



Fraunhofer
IZFP



UNIVERSITÄT
DES
SAARLANDES

Bestimmung der Tiefe von vertikalen Rissen in stahlverstärktem Beton mithilfe von Ultraschall-Tomographiesystemen

Masterarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Master of Science

im Studiengang Materialwissenschaft und Werkstofftechnik

der Naturwissenschaftlich-Technischen Fakultät

- Chemie, Pharmazie, Bio- und Werkstoffwissenschaften -

der Universität des Saarlandes

vorgelegt von

Patrick Stiglmaier

Matrikelnummer 2557246

Saarbrücken

2022

Tag der Einreichung 02.12.2022

Gutachter: Prof. Dr. Ute Rabe
Prof. Dr. Christian Motz

Betreuung: Prof. Dr. Ute Rabe

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit
selbständig verfasst und keine anderen als die
angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Ort, Datum

Patrick Stiglmaier

Abstract

Diese Arbeit befasst sich mit der Tiefenbestimmung von Oberflächenrissen in Betonbauteilen mithilfe der Ultraschalltomographen „A1040 Mira“ und „A1040 Mira 3D Pro“ von Acoustic Control Systems (ACS). Es wurden an vorgefertigten Probekörpern mit eingebrachten Rissen/Nuten Ultraschallprüfungen vorgenommen. Die Messungen erfolgten durch in einer Matrix angeordnete Trockenkontaktprüfköpfe, die niederfrequente Scherwellen aussenden. Die aufgenommenen Daten wurden mithilfe von in Python programmierten Algorithmen verarbeitet und verschiedenen Prüfhypothesen unterworfen, die bei Überlegungen zur Aufgabe der Bestimmung der Risttiefe entstanden sind. Ziel der Arbeit war es, eine geeignete, reproduzierbare Methode zu entwickeln, mit deren Hilfe man die Tiefe von Oberflächenrissen in Beton zuverlässig bestimmen kann. Eine solche Methode würde eine Lebensdauerabschätzung, beispielsweise von sicherheitsrelevanten Strukturen aus Beton, ermöglichen.

Danksagung

Diese Masterarbeit entstand am Fraunhofer IZFP in Saarbrücken. Ich bedanke mich bei allen Mitarbeitern des Fraunhofer IZFP für die angenehme Zusammenarbeit und Arbeitsatmosphäre. Besonderer Dank gebührt dabei Prof. Dr. Ute Rabe und Dr. Sergey Pudovikov, die mich bei der Planung und Durchführung der Messungen und dem Anfertigen dieser Abschlussarbeit unterstützt haben. Bei fachlichen Fragen und auch bei persönlichen Belangen hatten sie immer ein offenes Ohr für mich und nahmen sich die Zeit, mir Dinge zu erklären und mit mir zu diskutieren. Darüber hinaus möchte ich mich bei Prof. Dr. Ute Rabe für die Erst- und bei Prof. Dr. Christian Motz für die Zweitkorrektur dieser Abschlussarbeit bedanken.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen	1
1.2	Ultraschallprüfung im Bauwesen	4
2	Theoretische Grundlagen	5
2.1	Physikalische Grundlagen	5
2.1.1	Ultraschall als elastische Welle	5
2.1.2	Elastizitätstheorie	6
2.1.3	Teilchenbewegung in einer elastischen Welle	9
2.1.4	Reflexion und Transmission	12
2.2	Trockenkontaktprüfköpfe (DPC)	17
2.3	Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)	19
3	Risstiefenbestimmung an Beton	21
3.1	Werkstoff Beton	21
3.2	Risstiefenbestimmung - Stand der Technik	24
4	Messgeräte	29
4.1	A1040 Mira	29
4.2	A1040 Mira 3D Pro	30
5	Umsetzung in Python	31

6	Probekörper	34
6.1	Probekörper der BAM mit kontrolliert erzeugten Rissen	34
6.2	Probekörper der HSKL mit kontrolliert erzeugten Rissen	36
7	Messergebnisse und Diskussion	39
7.1	Flächenscans	39
7.1.1	Klassische SAFT-Rekonstruktion	41
7.1.2	Cosinus-Filter	44
7.1.3	Auswertung des Rissspitzensignals	47
7.2	Messung entlang des Risses	59
7.2.1	Auswertung der Oberflächenwelle	60
7.2.2	Auswertung des Rissspitzensignals	62
7.2.3	Auswertung des Rissflankensignals	68
7.2.4	Verrechnung mit Referenzsignal	73
8	Zusammenfassung und Ausblick	75

Abbildungsverzeichnis

2.1	Federmodell zur Beschreibung eines elastischen Körpers [1]	5
2.2	Schematische Darstellung der Teilchenbewegung in einer Longitudinalwelle [1].	10
2.3	Schematische Darstellung der Teilchenbewegung in einer Transversalwelle [1].	11
2.4	Verhalten des Schalldrucks einer Ultraschallwelle am Übergang Stahl/Wasser (a) und Wasser/Stahl (b) [1].	13
2.5	Snelliussches Gesetz und Modenumwandlung.	14
2.6	Einkopplung der Ultraschallwelle unter verschiedenen Einfallswinkeln und damit verbundene Modenumwandlung.	15
2.7	Trockenpunktkontaktwandler: 1 - Keramikspitze, 2- Piezoelement, 3 - Dämpfungkörper, 4 - Abschirmung, 5 - Stromwandler, 6 - Anschluss, 7 - Verkleidung [2]	17
2.8	Gemessene Schallfelder der zwei Anregungsformen durch Trockenpunktkontaktwandler: (a) Schwingung in Normalenrichtung, (b) tangentielle Schwingung mit Schnitt entlang des Schwingungsvektors (SV-Ebene), (c) tangentielle Schwingung mit Schnitt senkrecht zum Schwingungsvektor (SH-Ebene). Die Longitudinalwelle ist hierbei blau, die Scherwelle rot dargestellt [3]	18
2.9	Schematische Darstellung der dem SAFT-Algorithmus zugrunde liegenden Variablen.	19
3.1	Das Betongefüge in Oberflächennähe [4].	22

3.2	Erscheinungsformen und Ursachen der auftretenden Rissarten in Beton [5]	23
3.3	Schematische Darstellung der Laufzeitverfahren nach Bungey (a) und BS 1881: Part 203 (b) [6]	26
4.1	Bedienoberfläche und Unterseite des Ultraschalltomographen A1040 Mira der ACS Group.	29
4.2	Ober- und Unterseite des Ultraschalltomographen A1040 Mira 3D Pro von ACS. Die Bedienoberfläche stellt das links zu sehende und drahtlos mit den Modulen verbundene Smartphone dar.	30
5.1	Einlesen der lbv-Datei einer Mira 3D Pro-Messung und Abspeichern in einer Matrix.	31
5.2	Verarbeitung der Daten: Überführen der Daten vom integer- in das float-Zahlenformat, Hilberttransformation und Aufteilung in Real- und Imaginärteil.	32
5.3	Umsetzung des SAFT-Algorithmus in Python.	33
5.4	Einlesen der Excel-Datei mit den aperturbezogenen Positionen der Einzelelemente des Messgeräts.	33
6.1	Bewehrungsplan der Betonprobekörper nach BAM-Standard.	34
6.2	Draufsicht auf die Risse bei den Probekörpern 359, 360, 361 und auf die Nut bei Probekörper 369. Die Fehler verlaufen entlang der y-Achse des auch bei der Auswertung beachteten Koordinatensystems.	35
6.3	Aufnahme der Probekörper HSKL PK 4-7 mit Seitenflächen.	38
7.1	Schematische Darstellung des Messrasters bei den durchgeführten Flächenscans. Die Positionierung des Messgeräts erfolgt in den Schnittpunkten des Rasters.	39
7.2	Nomenklatur zu den Darstellungsmöglichkeiten des Bauteilinneren bei einer Ultraschallprüfung.	40

7.3	SAFT-Rekonstruktionen (B-Bilder) der mit den Geräten A1040 Mira (oben) und A1040 Mira 3D Pro (unten) an PK 4 bei $y = 300$ mm ermittelten Ultraschalldaten.	41
7.4	SAFT-Rekonstruktionen (B-Bilder) der mit den Geräten A1040 Mira (oben) und A1040 Mira 3D Pro (unten) an PK 5 bei $y = 300$ mm ermittelten Ultraschalldaten.	42
7.5	Prinzip des Cosinus-Filters bei der SAFT-Rekonstruktion. Oberflächenanteile des Signals werden mit steigendem Winkel α und/oder β abgeschwächt.	44
7.6	SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 4 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.	45
7.7	SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 5 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.	45
7.8	SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 6 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.	46
7.9	Messprinzip zur Extraktion des Rissspitzensignals.	47
7.10	Rissspitzenauswertung nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus der Messspur $y = 300$ mm für BAM 359, BAM 360, BAM 361 und BAM 369.	48
7.11	Rissspitzenauswertung nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus der Messspur $y = 300$ mm für PK 4, PK 5, PK 6 und PK 7.	49
7.12	SAFT-B-Bild der Messspur $y = 300$ für PK 7 mit Cosinus-Filter; Normierung auf 60% der Maximalamplitude.	50
7.13	Tiefenprofile der Probekörper BAM 359, BAM 360 und BAM 361 an den jeweiligen Risspositionen. Die y -Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet.	51

- 7.14 Tiefenprofile der Probekörper BAM 369, PK 4 und PK 5 an den jeweiligen Risspositionen. Die y-Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet. 52
- 7.15 Tiefenprofile der Probekörper PK 6 und PK 7 an den jeweiligen Risspositionen. Die y-Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet. 53
- 7.16 Tiefe der als Rissspitzensignal identifizierten Amplituden für alle Messspuren der Probekörper BAM 359 und BAM 360. Blau: Maximum im Intervall $z = 50\text{-}200\text{ mm}$; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen. 56
- 7.17 Tiefe der als Rissspitzensignal identifizierten Amplituden für alle Messspuren der Probekörper BAM 361, BAM 369 und PK 4. Blau: Maximum im Intervall $z = 50\text{-}200\text{ mm}$; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen. 57
- 7.18 Tiefe der als Rissspitzensignal identifizierten Amplituden für alle Messspuren der Probekörper PK 5, PK 6 und PK 7. Blau: Maximum im Intervall $z = 50\text{-}200\text{ mm}$; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen. 58
- 7.19 Schematische Darstellung des Messvorgehens bei der Messung entlang des Risses. Die Positionierung des Messgeräts erfolgt in den Schnittpunkten des Rasters. Eine Messung besteht somit aus 41×2 Messpunkten. 59

7.20	Auswertung der Oberflächenwelle (C-Bild) mit dem SAFT-TOFD-Algorithmus für PK 4 (oben links), PK 5 (oben rechts), PK 6 (unten links) und PK 7 (unten rechts). Für jeden Probekörper wurde eine Messung in einem rissfreien (Darstellung jeweils links) und im rissbehafteten (Darstellung jeweils rechts) Bereich vorgenommen und ausgewertet.	60
7.21	D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschall- daten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).	62
7.22	D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschall- daten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).	64
7.23	D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschall- daten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten) unter Verwendung der Time-gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).	65
7.24	D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschall- daten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten) unter Verwendung der Time-Gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).	67
7.25	D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschall- daten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).	68

- 7.26 D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts). 70
- 7.27 D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten) unter Verwendung der Time-gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts). 71
- 7.28 D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten) unter Verwendung der Time-Gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts). 72
- 7.29 Differenz aus den rekonstruierten D-Bildern der Ultraschalldaten des Riss- und Referenzbereichs der TGC-Messung für PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Links: für die Auswertung der Rissspitze nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus; rechts: für die Auswertung des Rissflankensignals. 73
- 7.30 Differenz aus den D-Bildern der Ultraschalldaten des Riss- und Referenzbereichs der TGC-Messung für PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Links: für die Auswertung der Rissspitze nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus; rechts: für die Auswertung des Rissflankensignals. . . . 74

Tabellenverzeichnis

1.1	Verfahrensbeispiele zu zerstörungsfreien Prüfverfahren [7].	3
2.1	Berechnete Werte für die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren für diverse Grenzflächen von Beton zu in der Praxis relevanten Medien. .	14
6.1	Lokalisierung und visuell bestimmte Kennzahlen der Risse/Nuten für die Probekörper der BAM und der HSKL.	36
6.2	Übersicht über die betrachteten Probekörper mit Beschreibung des künstlichen Fehlers, der Maße und der Bewehrungslage.	37

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen

Beton ist ein vielfältiger Werkstoff, der aufgrund seiner geringen Kosten und hohen Tragfähigkeit breite Anwendung findet. Durch den charakteristischen Herstellungsprozess und der Möglichkeit, verstärkende Elemente wie z.B. Bewehrungsstäbe aus Stahl einzubringen, wird eine nahezu freie Formgebung bei gleichzeitig hervorragenden mechanischen Eigenschaften ermöglicht. Bei der Betonherstellung fallen im Rahmen der chemischen Reaktion, die zur Aushärtung des Zements führt, große Mengen an klimaschädlichem CO_2 an (6 % der weltweiten CO_2 -Emissionen) [8]. In Zeiten von Ressourcenknappheit und der hohen Umweltbelastung ist es unabdingbar, die Lebenszeit von Bauwerken durch dauerhafte oder zeitlich begrenzte Überwachung über die zuvor berechneten Nutzungsdauer zu verlängern.

Mit zerstörungsfreien Methoden ist es möglich, Schäden und Mängel festzustellen, sie zu lokalisieren und ihr Ausmaß zu erfassen. Mit den ermittelten Informationen lässt sich das veränderte Tragverhalten und die restliche Lebensdauer des Bauteils bewerten. Mängel können hierbei unzureichend verpresste Hüllrohre, Kiesnester, fehlende Bewehrung oder aber auch Rissbildung sein [9]. Auch Fragestellungen wie Lage der Spannglieder, Leitungen und der Bewehrung oder schlicht die Bauteilabmessungen können Ziele der Untersuchung sein [7].

Der Eingriff in die Bausubstanz fällt bei den zerstörungsfreien Prüfverfahren höchstens minimal aus und ist damit besonders für denkmalgeschützte Bauwerke oder sicherheitsrelevante Bauteile attraktiv. Vor allem bei Bauwerken aus den 70er oder 80er Jahren sind Schwachstellen, zu denen beispielsweise geringe Betondeckung und fehlende Abdichtungen gehören, weit verbreitet [10]. Diese Probleme sind nicht immer von außen erkennbar, weshalb eine Methode, die in das Bauteilvolumen „hineinsehen“ kann, eindeutige Vorteile mit sich bringt.

Durch die rasante Entwicklung im Bereich Sensorik, Informatik und Mikroelektronik findet auch eine Weiterentwicklung der Prüfverfahren und -auswertungsmöglichkeiten statt [11]. Es lassen sich größere Datenmengen immer schneller und preiswerter erfassen und auswerten. Es wurden bereits erste vielversprechende Anstrengungen zur automatisierten Vermessung von großflächigen Bauwerken, wie z.B. Parkhäusern [10] oder Brücken [12], unternommen, bei denen verschiedene zerstörungsfreie Methoden miteinander kombiniert wurden.

Schadensanalyse im Baubereich wird jedoch traditionsgemäß fast ausschließlich mittels Sichtprüfung oder der Entnahme von Bohrkernen durchgeführt [13]. Zerstörungsfreie Prüfverfahren sind in diversen Anwendungsbereichen wie beispielsweise der Medizintechnik oder der Werkstoffprüfung weit verbreitet aber konnten sich, bis auf Ausnahmen wie die bereits erwähnte Sichtprüfung oder das Verwenden eines Rückprallhammers [14], noch nicht in der Bauwerksdiagnose durchsetzen. In Deutschland wird der Zustand von Brücken und anderen Ingenieurbauwerken gemäß DIN 1076 erfasst. Ein Überblick zu dieser Norm gibt „Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten“ [15]. Ergänzend hierzu legt die RIERH-ING [16] Regeln zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung der Prüfergebnisse fest. Im Rahmen dieser Richtlinie wird die Zustandsüberwachung durch ein einheitliches IT-Programm, einheitliche Auswerteprozeduren (beispielsweise durch Vergabe von Zustandsnoten) und die Vorgabe von Schadensbeispielen zur Bewertung eines Schadensbildes erleichtert. Sie ist ebenfalls Grundlage für die objektbezogene Schadensanalyse (OSA) [17], die bei schwer zu beurteilenden und komplexen Schadensbildern zum Greifen kommt: Bei unzureichendem Informationsgehalt der Grunddaten muss hiernach eine zusätzliche Untersuchung

erfolgen. Bei der OSA sind, anders als bei der grundlegenden Untersuchung der Prüfbjekte, vor allem zerstörungsfreie und -arme Prüfmethode von Bedeutung. Zur Auswahl und Anwendung des geeigneten Verfahrens im Bauwesen wurde vom deutschen Beton- und Bautechnikverein e.V. ein Merkblatt erstellt [18]. Eine Auswahl von ZfP-Methoden sei in Tabelle 1.1 gegeben. Für einige dieser Methoden existieren seitens der DGZfP (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung) Merkblätter zur Unterstützung der praktischen Anwendung, jedoch existieren, bis auf bei der Dickenbestimmung von Tunnelinnenschalen mittels Ultraschall [11], noch keine festgelegten Normen für diese Art der Prüfung.

Elektromagnetische Verfahren	Akustische Verfahren	Sonstige Verfahren
Radar	Ultraschallecho	3D-Laser-Scan
Thermographie(aktiv/passiv)	Impact-Echo	LIBS
Röntgen		

Tabelle 1.1: Verfahrensbeispiele zu zerstörungsfreien Prüfverfahren [7].

1.2 Ultraschallprüfung im Bauwesen

Echoverfahren ermöglichen insbesondere die Abbildung und Lokalisierung von Fehlstellen und Konstruktionselementen im Bauteilinneren. Ihr großer Vorteil liegt darin, dass nur ein einseitiger Zugang zum Bauteil benötigt wird. Folglich eignen sich solche Verfahren für die Qualitätskontrolle, Fehlerdetektion und Zustandsanalyse [13]. Die Ultraschallverfahren sind vor allem in der Schweißnahtprüfung und im medizintechnischen Bereich bereits etabliert. Ein Grund für die vernachlässigbare Praxisanwendung im Bauwesen ist die Interpretation der Messergebnisse. Diese sind sehr stark vom Bauteil abhängig und oft mehrdeutig und fehlerbeladen. Ein tieferes Verständnis der Prüfsituation, des betrachteten Materials, der verwendeten Prüfgeräte und der Grundlagen zur Wellenausbreitung ist somit unerlässlich für eine erfolgreiche Prüfung [11].

Eine werkstoffgerechte Anpassung der bereits etablierten Prüfverfahren an die Betonprüfung ist notwendig, da sich die innere Struktur des Betons grundsätzlich von der der Metalle unterscheidet. Mit neuen Entwicklungen, wie die in Kapitel 3 beschriebenen Sensorarrays und Trockenkontaktprüfköpfe, lassen sich bereits größere Eindringtiefen und eine unkomplizierte Ankopplung an Beton realisieren. Durch die bereits erwähnten Fortschritte im Mikroelektronik-Bereich lassen sich die aufgenommenen Daten in kürzester Zeit visualisieren.

Kapitel 2

Theoretische Grundlagen

2.1 Physikalische Grundlagen

2.1.1 Ultraschall als elastische Welle

Die theoretische Grundlage der zerstörungsfreien Prüfung mit Ultraschallmethoden stellt die Wellenausbreitung dar. Als ausführliche Grundlagenliteratur sei hier auf „Ultrasonic Testing of Materials“ von Krautkrämer und Krautkrämer verwiesen, das selbst nach 30 Jahren noch als Nachschlagewerk für grundlegende und weiterführende Fragestellungen geeignet ist [1].

Ultraschall basiert auf mechanischen bzw. elastischen Wellen. Bei dieser Wellenart schwingen die Stoffteilchen um eine Ruhelage auf und ab. Anschaulich lässt sich das anhand der in Abb. 1 gezeigten Modelle erklären.

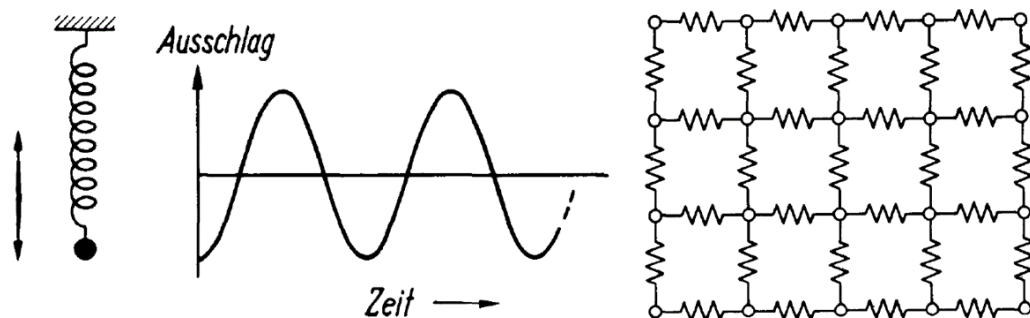


Abbildung 2.1: Federmodell zur Beschreibung eines elastischen Körpers [1]

Hierzu kann man sich, wie rechts in Abb.2.1 gezeigt, den Körper so vorstellen, dass er aus einzelnen Masseteilchen, die mit Federn miteinander verbunden sind, besteht. Solange die Rückstellkraft mit zunehmender Auslenkung steigt, ergibt sich ein sinusförmiger Kurve, wenn man den Ausschlag bzw. die Auslenkung über die Zeit aufträgt. Da die Teilchen jedoch nicht starr miteinander verbunden sind, überträgt sich eine solche Schwingung nicht instantan auf benachbarte Ebenen, sondern zeitverzögert. Die Folge ist das Entstehen einer mechanischen Welle [1].

2.1.2 Elastizitätstheorie

Der Körper erfährt beim Durchgang der Welle eine Deformation. Hierbei unterliegt ein Partikel einer Verschiebung u und er verändert seine Position, die durch die Ortskoordinaten x festgelegt ist. Der Verschiebungsgradient H ergibt sich bei technischen Anwendungen als Funktion der Raumkoordinaten:

$$H_{ij} = \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (2.1)$$

Dieser Gradient kann wiederum in einen Dehnungs- und einen Drehtensor unterteilt werden:

$$H_{ij} = u_{i,j} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) + \frac{1}{2} (u_{i,j} - u_{j,i}) = \varepsilon_{ij} + \omega_{ij} \quad (2.2)$$

Für die Betrachtung von elastischen Wellen ist vor allem der erste Term von Bedeutung, da die Drehkomponenten keine Verzerrungen und Spannungen hervorrufen und somit nicht im Elastizitätsgesetz auftauchen. Dieser Anteil ist symmetrisch und wird Verzerrungstensor genannt. Die Matrixschreibweise sieht wie folgt aus [19]:

$$\varepsilon = \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Dabei sind

$$\varepsilon_{11} = \frac{\partial u_1}{\partial x_1}, \quad \varepsilon_{22} = \frac{\partial u_2}{\partial x_2}, \quad \varepsilon_{33} = \frac{\partial u_3}{\partial x_3} \quad (2.4)$$

die Dehnungen und

$$2\varepsilon_{12} = \frac{\partial u_1}{\partial x_2} + \frac{\partial u_2}{\partial x_1}, \quad 2\varepsilon_{23} = \frac{\partial u_2}{\partial x_3} + \frac{\partial u_3}{\partial x_2}, \quad 2\varepsilon_{31} = \frac{\partial u_3}{\partial x_1} + \frac{\partial u_1}{\partial x_3} \quad (2.5)$$

die Winkeländerungen bzw. Gleitungen. Diese beiden Veränderungen nennt man Verzerrungen und sind durch das Elastizitätsgesetz über die Elastizitätskonstante E mit der wirkenden Spannung verbunden. Dieses Gesetz beschreibt das mechanische Verhalten des Materials. Der von uns betrachtete Werkstoff Beton ist zwar inhomogen aber seine Materialeigenschaften sind auf makroskopischer Ebene richtungsunabhängig und er wird folglich als isotrop bezeichnet. Im dreiachsigen Fall wird die lineare Beziehung zwischen Spannung und Dehnung als Verknüpfung zweier Tensoren 2. Stufe ausgedrückt:

$$\sigma_{ij} = E_{ijkl}\varepsilon_{kl} \quad (2.6)$$

Der Elastizitätstensor stellt einen Tensor 4. Stufe mit 81 Komponenten, den sogenannten Elastizitätskonstanten, dar. Die Symmetrie der Spannungs- und Dehnungstensoren setzt sich auch im Elastizitätstensor fort, weshalb die Indizes i, j vertauscht werden dürfen. Folglich besteht er nur aus 36 unabhängigen Komponenten. In Matrixschreibweise folgt [20]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \\ \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} C_{1111} & C_{1122} & C_{1133} & C_{1123} & C_{1131} & C_{1112} \\ C_{2211} & C_{2222} & C_{2233} & C_{2231} & C_{2212} & C_{2223} \\ C_{3311} & C_{3322} & C_{3333} & C_{3331} & C_{3312} & C_{3323} \\ C_{2311} & C_{2322} & C_{2333} & C_{2331} & C_{2312} & C_{2323} \\ C_{3111} & C_{3122} & C_{3133} & C_{3131} & C_{3112} & C_{3123} \\ C_{1211} & C_{1222} & C_{1233} & C_{1231} & C_{1212} & C_{1223} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{23} \\ 2\varepsilon_{31} \\ 2\varepsilon_{12} \end{pmatrix} \quad (2.7)$$

Wie oben bereits erwähnt ist in dieser Arbeit nur die Betrachtung des isotropen Falls notwendig. Die Elastizitätskomponenten E_{ijkl} ändern sich also bei Drehung des Koordinatensystems nicht. Der Tensor, der diese Bedingung erfüllt, hat die Form

$$E_{ijkl} = \lambda\delta_{ij}\delta_{kl} + \mu(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (2.8)$$

und wird bestimmt durch die beiden unabhängigen Laméschen Konstanten μ und λ sowie durch das Kroneckersymbol δ , das bei gleichwertigen Indizes den Wert 1 und ansonsten den Wert 0 besitzt. Einsetzen in 2.6 liefert das Elastizitätsgesetz bzw. das verallgemeinerte Hookesche Gesetz

$$\sigma_{ij} = \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} + 2\mu\varepsilon_{ij}. \quad (2.9)$$

Die zugehörige Matrixschreibweise ergibt sich somit zu [20]:

$$\begin{pmatrix} \sigma_1 = \sigma_{11} \\ \sigma_2 = \sigma_{22} \\ \sigma_3 = \sigma_{33} \\ \sigma_4 = \sigma_{23} \\ \sigma_5 = \sigma_{31} \\ \sigma_6 = \sigma_{12} \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ & & & \lambda + 2\mu & 0 & 0 \\ & \text{symm} & & & \mu & 0 \\ & & & & & \mu \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \varepsilon_1 = \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_2 = \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_3 = \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_1 = 2\varepsilon_{23} = \gamma_{23} \\ 2\varepsilon_1 = 2\varepsilon_{31} = \gamma_{31} \\ 2\varepsilon_1 = 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} \end{pmatrix} \quad (2.10)$$

Es existieren somit noch drei unabhängige Materialkonstanten. Zieht man die Parallele zum Elastizitätsgesetz für die Schubspannung wird klar, dass μ dem Schubmodul G gleichzusetzen ist. Durch Substitution der Achsenbezeichnungen durch x , y und z und von $\sigma_{11}, \sigma_{12}, \varepsilon_{11}, \varepsilon_{12}$ durch $\sigma_x, \tau_{xy}, \varepsilon_x, \frac{\gamma_{xy}}{2}$ usw. erhält man:

$$\begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)], & \gamma_{xy} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{xy} = \frac{1}{G} \tau_{xy} \\ \varepsilon_y &= \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)], & \gamma_{yz} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{yz} = \frac{1}{G} \tau_{yz} \\ \varepsilon_z &= \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)], & \gamma_{zx} &= \frac{2(1+\nu)}{E} \tau_{zx} = \frac{1}{G} \tau_{zx} \end{aligned} \quad (2.11)$$

Die Zusammenhänge zwischen den Laméschen Konstanten und Elastizitätsmodul E , Querkontraktionszahl ν , Schubmodul G und Kompressionsmodul K ergeben sich somit zu:

$$\begin{aligned} E &= \frac{\mu(3\lambda + 2\mu)}{\lambda + \mu}, & \nu &= \frac{\lambda}{2(\lambda + \mu)}, & G = \mu &= \frac{E}{2(1+\nu)} \\ K &= \lambda + \frac{2}{3}\mu = \frac{E}{3(1-2\nu)}, & \lambda &= \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \end{aligned} \quad (2.12)$$

2.1.3 Teilchenbewegung in einer elastischen Welle

Der Ort, an dem sich der Partikel befindet, und die zugehörige Verschiebung werden über die Vektoren $x = \{x_1, x_2, x_3\}$ und $u = \{u_1, u_2, u_3\}$ beschrieben.

Da es sich bei der elastischen Wellenbewegung um eine mechanische Auslenkung massebehafteter Partikel handelt, erfolgt die Beschreibung der Spannungen und Dehnungen analog zur Elastizitätstheorie. Die Bewegung eines Partikels in einem Körper kann folglich über die Bewegungsgleichung

$$\frac{\text{Kraft}}{\text{Volumen}} = \frac{\text{Masse}}{\text{Volumen}} \cdot \text{Beschleunigung} \quad (2.13)$$

$$\frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} = \rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}$$

Einsetzen des Hooke'schen Gesetzes in die Bewegungsgleichung und die Annahme, dass der betrachtete Werkstoff homogen ist und somit die Dichte ρ ortsunabhängig ist, liefert die 3D-Wellengleichung:

$$\rho \cdot \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = E_{ijkl} \cdot \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_j \partial x_l} \quad (2.14)$$

Die Lösung dieser Gleichung hat für ebene Wellen die Form

$$\hat{u} = u_0 \cdot e^{i(\omega t - k_1 x_1 - k_2 x_2 - k_3 x_3)} \quad (2.15)$$

wobei $u_0 = \{u_{01}, u_{02}, u_{03}\}$ für den Verschiebungs-/Amplitudenvektor steht. $\omega = 2\pi f$ ist die Kreisfrequenz und f die Frequenz der Welle. Die Ausbreitungsrichtung der Welle wird über das Vorzeichen festgelegt. Der Wellenzahlvektor $\vec{k} = \{k_1, k_2, k_3\}$ steht senkrecht auf der Wellenfront der Welle und beschreibt ihre Ausbreitungsrichtung.

Setzt man die i-te Verschiebungskomponente von Gl. 2.15 in Gl. 2.14 ein, erhält man:

$$-\rho \omega^2 u_{0i} = -E_{ijkl} k_j k_l u_{0k} \quad (2.16)$$

Mit der Definition des Kronecker-Symbols ($\delta_{ik} = 0$ wenn $k \neq i$; $u_{0i} = \delta_{ik} \cdot u_{0k}$) folgt die Christoffel-Gleichung:

$$(E_{ijkl} k_j k_l - \delta_{ik} \omega^2 \rho) \cdot u_{0k} = 0 \quad (2.17)$$

Es handelt sich um ein homogenes Gleichungssystem. Der Term in Klammern wird Christoffel-Matrix genannt. Die Lösung erhält man unter Einbeziehung der Matrixschreibweise des isotropen Elastizitätstensors aus Gl. 2.10 durch gleich Null setzen

der Determinanten dieser Matrix:

$$\begin{vmatrix} (\lambda + 2\mu) \cdot k^2 - \omega^2 \cdot \rho & 0 & 0 \\ 0 & \mu \cdot k^2 - \omega^2 \cdot \rho & 0 \\ 0 & 0 & \mu \cdot k^2 - \omega^2 \cdot \rho \end{vmatrix} = 0 \quad (2.18)$$

Für isotrope Materialien ergeben sich drei Lösungen. Eine Lösung für die in Ausbreitungsrichtung polarisierte Longitudinalwelle mit der Phasengeschwindigkeit

$$c_L = \frac{\omega}{k_L} = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}} \quad (2.19)$$

und zwei Lösungen für die zwei senkrecht zueinander und senkrecht zur Ausbreitungsrichtung polarisierten Transversalwellen (shear horizontal bzw. SH- und shear vertical bzw. SV-Welle) mit der Phasengeschwindigkeit

$$c_T = \frac{\omega}{k_T} = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}} \quad (2.20)$$

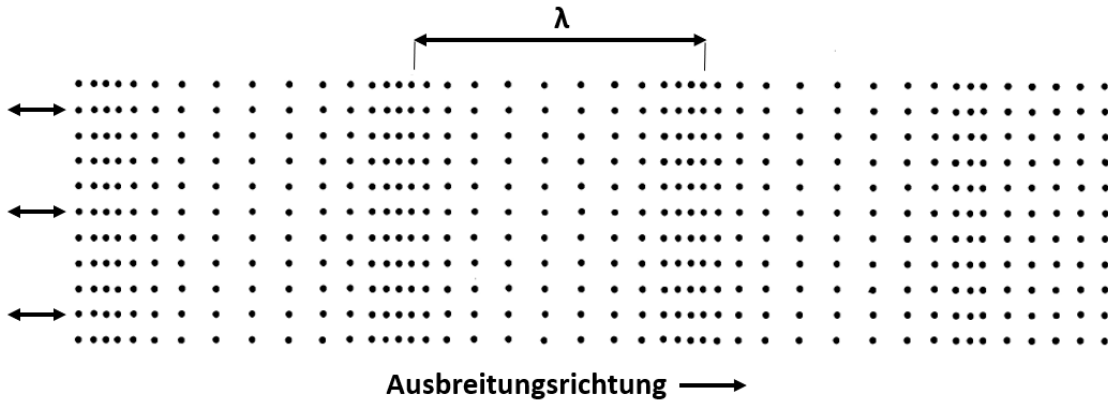


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Teilchenbewegung in einer Longitudinalwelle [1].

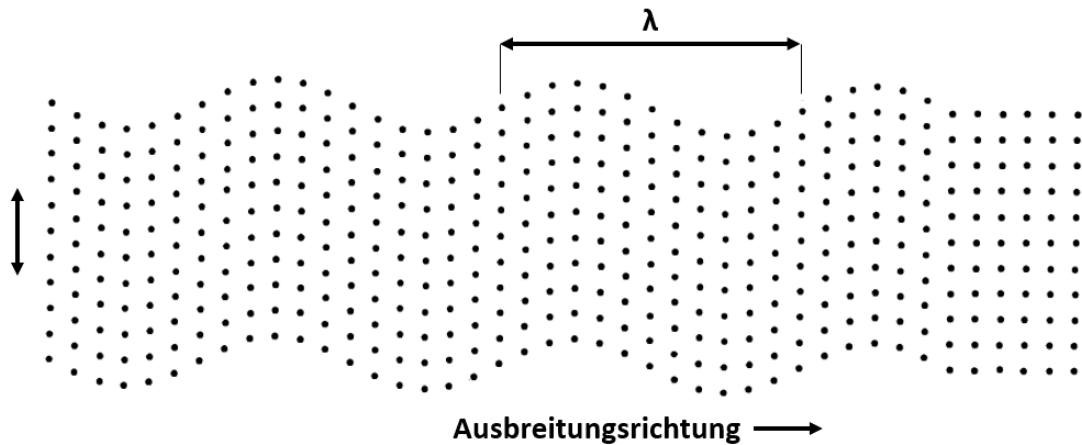


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung der Teilchenbewegung in einer Transversalwelle [1].

Die Orientierung der Auslenkungsrichtung im Verhältnis zur Ausbreitungsrichtung der Welle lässt demnach die Definition zweier grundlegender Wellenarten zu: Longitudinalwellen (s. Abb. 2.2), bei denen die Auslenkung parallel zur Ausbreitungsrichtung, und Transversalwellen (s. Abb. 2.3), bei denen die Auslenkung senkrecht zur Ausbreitungsrichtung erfolgt. In der Longitudinalwelle wechseln sich Bereiche, die unter Druckbeanspruchung (Teilchen kommen sich nahe) und Bereiche, die unter Zugbeanspruchung (Teilchen sind weit voneinander entfernt) stehen, ab. Daher wird sie auch Druck- oder Kompressionswelle genannt. Ein wichtiger Parameter dieser Wellenart ist der Schalldruck p , der maßgeblich das Schallfeld einer solchen Welle bestimmt. Die Transversalwelle weist aufgrund der Schwingungsrichtung der Masseilchen Bereiche höherer und niedriger Schubkräfte auf. Man nennt sie auch Scher- oder Schubwelle. Da der Unterschied zwischen den Beanspruchungen der Transversalwelle nur in der Richtung der Kraft liegt, wird im Allgemeinen das Schallfeld mit dem Schalldruck beschrieben, auch wenn strenggenommen keine Druckkräfte bei Transversalwellen auftreten.

2.1.4 Reflexion und Transmission

An einer Grenzfläche zwischen zwei Medien wird die elastische Welle in einen reflektierten und einen transmittierten Anteil aufgespalten. Die Betrachtung der Ausbreitung der Welle an Grenzflächen ist von vielerlei Bedeutung: sei es bei der Übertragung vom Erzeuger zum Prüfstück, an Fehlern im Inneren oder an weiteren Grenzflächen des Prüfstücks zu anderen Medien.

Im leeren Raum können sich Schallwellen nicht ausbreiten. Folglich werden die eintreffenden Wellenfronten an solch einer freien Grenzfläche reflektiert. Liegt jedoch statt luftleerem Raum ein weiterer Stoff vor, in dem sich die Schallwelle ausbreiten kann, werden Kräfte übertragen. Man betrachtet nun 3 Wellen: die einfallende, die reflektierte und die transmittierte Welle und die dazugehörigen Größen der Impedanz Z (bzw. Schalldruck p), der Dichte ρ und der Schallgeschwindigkeit c . Die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren an einer Grenzfläche lassen sich wie folgt berechnen [21]:

$$R = \frac{p_r}{p_e} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad D = \frac{p_d}{p_e} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (2.21)$$

Die akustische Impedanz ist ein reiner Materialparameter, da er über $Z = \rho \cdot c$ durch die Dichte des betrachteten Mediums definiert ist.

Diese Formeln sind die Grundlage für die Werkstoffprüfung mithilfe von Ultraschall, denn wenn eine Schallwelle, die ein Medium hoher Impedanz (bspw. Stahl) durchläuft, auf die Grenzfläche zu einem Medium niedriger Impedanz trifft, wird der Reflexionsfaktor groß und der Durchlässigkeitsfaktor klein. Somit fungieren Lufteinschlüsse oder ungefüllte Risse als Reflektoren und werden bei der Prüfung sichtbar. In der Ultraschalltechnik wird die Amplitude über das Dezibelmaß beschrieben [1]:

$$\text{Dezibelmaß} = 20 \lg \left| \frac{p_1}{p_2} \right| \text{dB} \quad (2.22)$$

Hierbei stehen p_1 und p_2 für die jeweiligen Schalldrücke. Der Quotient kann für den Fall der Reflexion durch den Reflexionsfaktor aus Gl. 2.21 ersetzt werden.

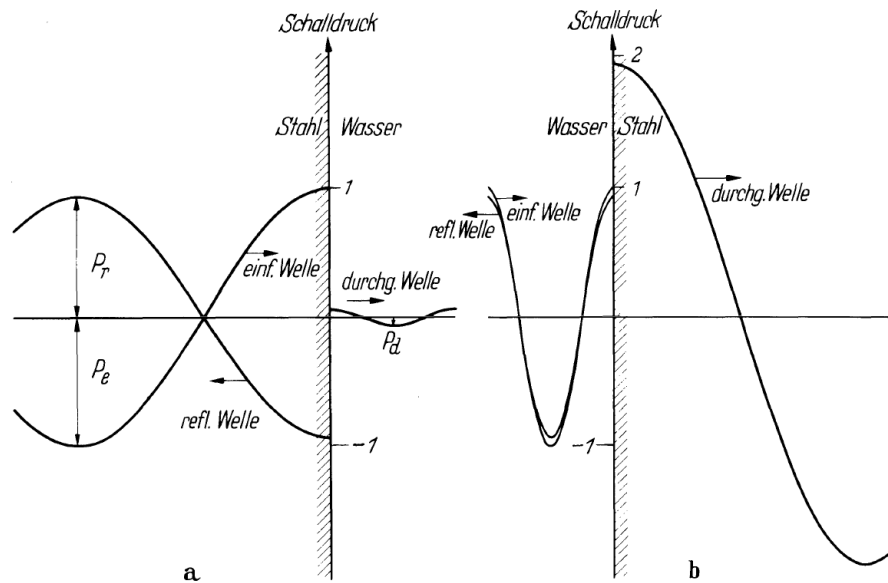


Abbildung 2.4: Verhalten des Schalldrucks einer Ultraschallwelle am Übergang Stahl/Wasser (a) und Wasser/Stahl (b) [1].

Ein grafisches Beispiel für diese Beobachtungen ist in Abb. 2.4 zu sehen: Fällt eine Wellenfront auf die Grenzfläche Stahl/Wasser (a), so wird der Großteil reflektiert und der Schalldruck der durchgehenden Welle fällt dementsprechend klein aus. Setzt man die entsprechenden Impedanzen für diese Grenzfläche in 2.21 erhält man $R = -0,935$ und $D = 0,065$. Anders ausgedrückt beträgt der Schalldruck der reflektierten Welle -93,5 % der einfallenden Welle und die transmittierte Welle 6,5 %. Darüber hinaus erfolgt bei der Reflexion eine Phasenverschiebung um 180° (R negativ). Im umgekehrten Fall (b) ist wiederum der Transmissionskoeffizient groß und der Schalldruck steigt hinter dem Übergang sprunghaft an ($D = 1,935$). R (0,935) hat ein positives Vorzeichen und die reflektierte Welle erfährt keine Phasenänderung. In dieser Arbeit sind jedoch nur Grenzflächen von Beton mit anderen Medien wie beispielsweise Wasser, Stahl, Luft und Epoxidharz von Interesse. Die für diese Fälle berechneten Werte für R und D sind in Tabelle 2.1 dargestellt.

Grenzfläche	Reflexionsfaktor R	Durchlässigkeitsfaktor D
Beton/Luft	-0,999	0,0001
Beton/Wasser	-0,693	0,307
Beton/Stahl	0,659	1,659
Beton/Epoxidharz	-0,448	0,552

Tabelle 2.1: Berechnete Werte für die Reflexions- und Durchlässigkeitsfaktoren für diverse Grenzflächen von Beton zu in der Praxis relevanten Medien.

Für die Prüfung von Ultraschall ist ausschlaggebend, dass an relevanten Grenzflächen ein detektierbarer Schalldruck reflektiert wird. Ungefüllte Risse reflektieren dabei stärker als mit Wasser gefüllte Risse. Der hier gezeigte Fall der Grenzfläche Beton/Epoxidharz ist für unseren Fall nicht relevant, da die von uns betrachteten Probekörper unbeschichtete Bewehrungsstäbe aufweisen. Bei Transversalwellen muss man beachten, dass sich diese nicht in Flüssigkeiten und Gasen ausbreiten können [22]. Die bisherigen Betrachtungen lassen sich somit bei dieser Wellenart nur für die Grenzfläche fest/fest anwenden.

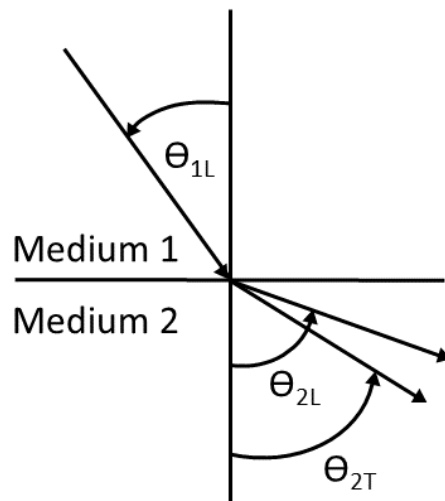


Abbildung 2.5: Snelliussches Gesetz und Modenumwandlung.

Bei einem vom Einfallswinkel 90° zur Grenzfläche abweichenden Winkel wird die Welle gebrochen. Die resultierenden Ausbreitungsrichtungen der reflektierten und transmittierten Welle sind abhängig vom Einfallswinkel und der Schallgeschwindig-

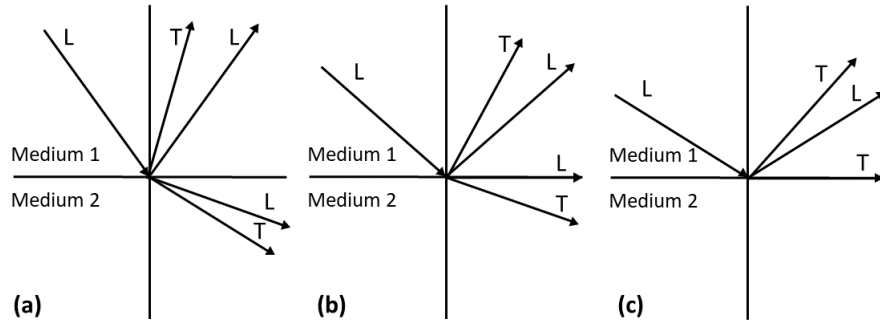


Abbildung 2.6: Einkopplung der Ultraschallwelle unter verschiedenen Einfallswinkeln und damit verbundene Modenumwandlung.

keit der beiden Medien und werden mit dem Snelliusschen Brechungsgesetz

$$\frac{\sin \theta_1}{\sin \theta_2} = \frac{c_1}{c_2} \quad (2.23)$$

berechnet. Da die Schallgeschwindigkeiten für Transversal- und Longitudinalwellen verschieden sind, breiten diese sich nach dem Brechungsvorgang nicht in derselben Richtung aus. Die langsamere Transversalwelle schließt mit dem Lot zur Oberfläche somit einen kleinen Winkel als die Longitudinalwelle ein. Wellen, die von einem Medium 1 niedrigerer Schallgeschwindigkeit kommen und in ein Medium 2 höherer Schallgeschwindigkeit gelangen, werden vom Lot weggebrochen.

Das zweite Phänomen, das neben der Brechung auftritt, ist die Modenumwandlung. Die Energie wird hierbei in Longitudinal- und Transversalwelle aufgeteilt. Ein gewisser Energieanteil wird ebenfalls reflektiert, wobei der Ausfallwinkel dem Einfallswinkel entspricht. Zur Veranschaulichung der Modenumwandlung kann man sich eine Kraft F vorstellen, die unter einem bestimmten Winkel auf eine Oberfläche wirkt und als Superposition einer Scher- und einer Normalkraft angesehen werden kann. Es existieren zwei kritische Winkel, bei denen jeweils eine der entstehenden Welle in einem Winkel $= 90^\circ$ zum Lot gebrochen wird und eine Kriechwelle abgibt. Dies ist in Abb. 2.6 schematisch dargestellt. In Fall (a) ist der Brechungswinkel sowohl für die Transversal- als auch für die Longitudinalwelle kleiner dem kritischen Winkel. Sie breiten sich somit in Medium 2 aus. Fall (b) zeigt eine Schallwelle, bei der der größere Einfallswinkel dazu führt, dass die Longitudinalwelle in einem Winkel von 90° zum Lot gebrochen wird. Den dazugehörigen Einfallswinkel nennt man Grenzwinkel zur Totalreflexion der Longitudinalwelle oder auch 1. Kritischer Winkel [23]. Fall (c) zeigt den Fall, bei dem $\theta_{T2} = 90^\circ$ und somit der 2. kritische Winkel/ Winkel zur

Totalreflexion der Transversalwelle erreicht wurde. Da die Longitudinalwelle laut Gl. 2.23 in einem Winkel $> 90^\circ$ gebrochen werden müsste, kann sie sich auch nicht als Kriechwelle ausbreiten.

Jeder Prüfkopf einen Divergenzwinkel auf, der ein Maß für die Schallbündelaufweitung darstellt. Dadurch können auch bei kleineren Winkeln Teile des Strahls den kritischen Winkel überschreiten, während andere Anteile in das Material eingekoppelt werden. Diesen Effekt macht man sich bei der Verwendung von Vorlaufkeilen zu Nutze, um nur eine Wellenart in das Material einzukoppeln. Da die Longitudinalwelle eine höhere Schallgeschwindigkeit als die Transversalwelle aufweist, kann dies beispielsweise bei der Analyse reflektierter oder transmittierter Wellen zu Mehrfachindikationen führen, die wiederum die Interpretation der Messergebnisse erschweren. Darüber hinaus stellt bei der Verwendung von Transversalwellenprüfköpfen die Polarisierung der eingekoppelten Welle einen wichtigen Aspekt der Werkstoffprüfung dar. Die SH-Welle („shear horizontal wave“) schwingt rein horizontal und senkrecht zur Ausbreitungsebene. Die Schwingungen der SV-Welle („shear vertical wave“) hingegen liegen in der Ausbreitungsebene und senkrecht zum Strahl. Die Besonderheit an der SH-Welle ist, dass bei der Einkopplung als auch an inneren Grenzflächen keine weiteren Wellentypen abgespalten werden. Darin ist auch die Attraktivität von SH-Wellen-Prüfköpfen bei der Werkstoffprüfung begründet: In der SH-Ebene eines Wellenfeldes findet keine Modenumwandlung und somit auch kein Auftreten von Mehrfachindikationen statt.

2.2 Trockenkontaktprüfköpfe (DPC)

Beton ist ein heterogener Werkstoff. Aufgrund der Grobkörnigkeit des Gefüges muss man mit niedrigen Frequenzen bzw. großen Wellenlängen (20-100 mm) Messungen vornehmen, damit Reflexionen durch die Gefügebestandteile vermieden werden. Darüber hinaus weisen Körper aus Beton meist eine raue und poröse Oberfläche auf, weshalb die Ankopplung der Ultraschall-Transducer nicht ohne weiteres erfolgen kann. Für die Auswertung der Messdaten muss die Prüfkopfposition, und damit der Ausgangspunkt der eingeschallten Welle, genau feststellbar sein. Um dies zu gewährleisten, ist eine möglichst kleine Auslegung des Wandlers von Vorteil.

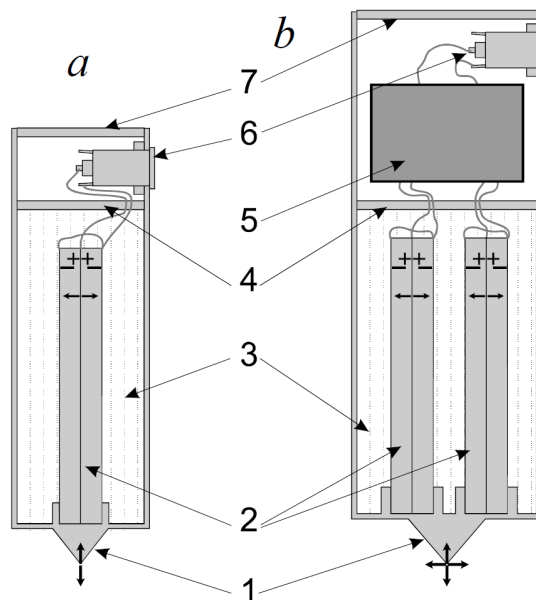


Abbildung 2.7: Trockenpunktkontaktwandler: 1 - Keramikspitze, 2 - Piezoelement, 3 - Dämpfungskörper, 4 - Abschirmung, 5 - Stromwandler, 6 - Anschluss, 7 - Verkleidung [2]

Mit sogenannten Trockenpunktkontakten lassen sich einige dieser Probleme umgehen. Die Kontaktfläche der Prüfköpfe ist mit 1-2 mm Durchmesser wesentlich kleiner als die bei der Betonprüfung verwendete Wellenlänge. Man kann ihn daher als Punktkontakt ansehen und präzise positionieren. Der Aufbau ist in Abb. 2.7 dargestellt. Der in der Abbildung zu sehende Wandler ist durch eine oben am Gehäuse montierte Feder gelagert. Durch diese Lagerung ist die Messung unempfindlich gegenüber Un-

ebenheiten der Messfläche und durch das verschleißresistente Spitzenmaterial sind auch raue Oberflächen weniger problematisch. Somit werden reproduzierbare Messungen ermöglicht. Das Koppelmittel kann durch diesen Aufbau weggelassen werden. Durch den den freien Raum vollständig einnehmenden Dämpfer können die Betriebsschwingungen und das Eigenrauschen minimiert werden. Durch das Verwenden zweier Piezoelemente und Variation der Polaritäten können entweder Scher- oder Longitudinalwellen angeregt werden (Abb. 2.7, Aufbau b). Bei gleichphasiger Anregung werden longitudinale Schwingungen, mit gegenphasiger Anregung transversale Schwingungen hervorgerufen.

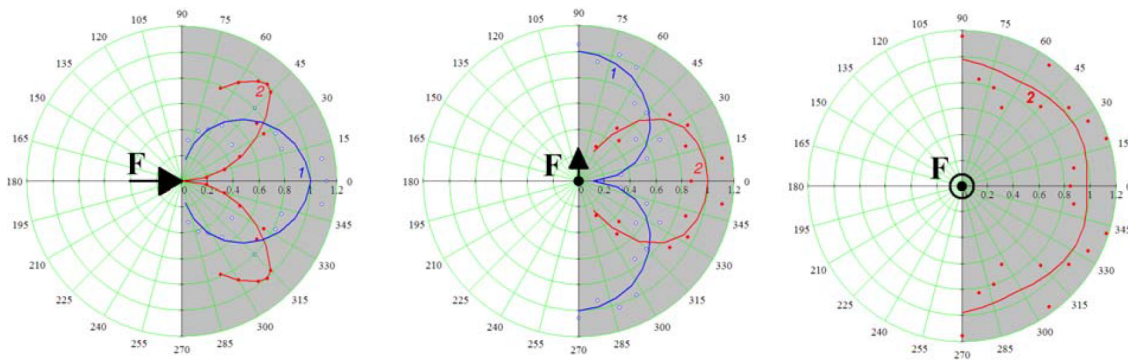


Abbildung 2.8: Gemessene Schallfelder der zwei Anregungsformen durch Trockenpunktkontaktwandler: (a) Schwingung in Normalenrichtung, (b) tangentiale Schwingung mit Schnitt entlang des Schwingungsvektors (SV-Ebene), (c) tangentiale Schwingung mit Schnitt senkrecht zum Schwingungsvektor (SH-Ebene). Die Longitudinalwelle ist hierbei blau, die Scherwelle rot dargestellt [3]

Ein weiterer Vorteil der Punktkontakte liegt im Aufbau des Wellenfeldes, gezeigt in Abb. 2.8. Wie schon in 2.1.4 erwähnt, erfolgen die Untersuchungen in dieser Arbeit mit SH-Wellen. Auffällig ist die bei der SH-Welle (Wellenfeld (c)) winkelnunabhängige Richtcharakteristik und das Fehlen der Longitudinalwelle in dieser akustischen Ebene. Um den, durch die kleine Schwingergröße bedingten, geringen Schalldruck auszugleichen und das Signal/Rausch-Verhältnis zu erhöhen, werden mehrere solcher Wandler in einer Matrixanordnung zusammengeschaltet. Die Einzelelemente werden zeitlich synchron angesteuert. Das Signal/Rausch-Verhältnis nimmt proportional

mit der Anzahl an Trockenpunktkontaktwandlern zu [24]. Die winkelunabhängige Richtcharakteristik ist für die in Kapitel näher beschriebenen Ultraschalltomographen und die damit durchgeführten Ultraschallmessungen von großer Bedeutung. Durch die Matrixanordnung, sprich durch die zweidimensionale Vergrößerung der Apertur, wird zudem eine gewisse Bündelung des Schallfelds erreicht, wodurch auch Einzelmessungen aussagekräftige Ergebnisse liefern [25]. Ein weiteres Vorgehen neben der Einzelmessung ist das systematische Abtasten der Oberfläche mit einer anschließenden SAFT-Rekonstruktion, die die Einzelergebnisse miteinander kombiniert. Der zugrunde liegende Algorithmus wird im Folgekapitel erläutert.

2.3 Synthetic Aperture Focusing Technique (SAFT)

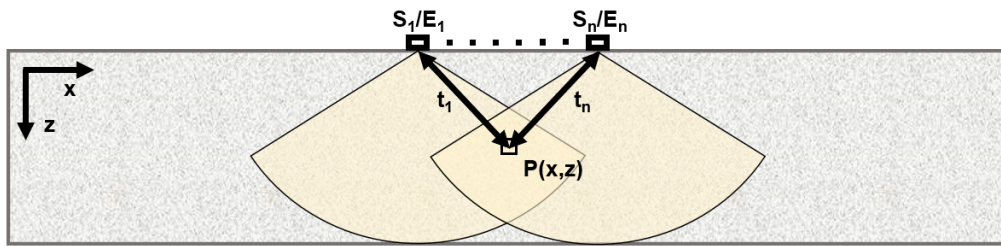


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der dem SAFT-Algorithmus zugrunde liegenden Variablen.

Beim SAFT-Algorithmus wird die Prüfoberfläche mit einem bestimmten Messpunktstand abgetastet. Das Prinzip sei in Abb. 5.3 schematisch dargestellt. Hierbei werden Prüfköpfe mit einem möglichst großen Öffnungswinkel verwendet. Somit wird an jeder Position ein großer Teil des Volumens durchschallt. Nach der Aufnahme der Messpunkte werden die Daten digital gespeichert. Jedem aufgenommenen Amplitudensignal wird eine Zeitinformation (Laufzeit, abhängig von der Schallgeschwindigkeit der verwendeten Wellenart im betrachteten Material) zugeordnet. Diese Ausgangsdaten stellen die Grundlage für die Rekonstruktion dar. Der SAFT-Algorithmus projiziert nun diese Amplituden in das Bauteilinnere zurück. Dazu wird der Probekörper in Pixel (2D-SAFT) unterteilt. Über die Positionen von Sender und Empfänger kann jedem Volumeninkrement abhängig von der Messposition eine feste Laufzeit t_i zugeordnet werden, die die Summe der Laufzeiten der Welle vom Sender

zum Pixel und vom Pixel zum Empfänger darstellt. Die mit ihr verbundenen Amplitudenwerte A der aufgenommenen Signale der betrachteten Sender-Empfänger-Positionierungen S_i und E_i werden im Rahmen des Algorithmus aufsummiert und ergeben so die dem Pixel zugeordnete Amplitude

$$A(P) = \sum_{i=1}^n A(S_i, E_i, t_i) \quad . \quad (2.24)$$

Das Wiederholen dieser Prozedur für jeden Pixel in der Rekonstruktionsebene liefert eine Datenmatrix aus überlagerten Amplituden. Die Oberflächen stark streuender Reflektoren (bspw. räumliche Begrenzungen, Fremdkörper und Einschlüsse) stellen dabei die größten Amplitudenwerte dar und heben sich vom Untergrund ab. Über eine farbkodierte Darstellung ergibt sich somit eine anschauliche 2D-Darstellung des Bauteilinneren, das sogenannte B-Bild. Das SAFT-Verfahren gehört zu den etablierten Standardverfahren in der Auswertung von Ultraschalldaten im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen. Zu diesem Thema veröffentlichte Forschungsarbeiten sind in Kapitel 3.2 erläutert.

Kapitel 3

Risstiefenbestimmung an Beton

3.1 Werkstoff Beton

Beton ist ein Baustoff, der als eine Dispersion aus Bindemittel und Zuschlagstoffen unter Zugabe einer Flüssigkeit hergestellt wird. Meistens wird als Bindemittel Zement und als Zuschlagstoff Gesteinskörnung verwendet. Die Sieblinie beschreibt die Menge und Größe der Körner der Zuschlagstoffe und definiert somit die Zusammensetzung des Korngemischs. Bei der Zugabe von Wasser erhärtet der nun vorliegende Zementleim durch Hydratation zu Zementstein. Die Gesteinskörnung dient als eine Art Gerüst des Werkstoffs, dessen Zwischenräume durch den Zementstein ausgefüllt werden.

Dennoch kann man die Zusammensetzung nicht pauschalisieren, da es eine Vielzahl von Zementarten gibt, die sich unter anderem in ihrer Hydratationswärme unterscheiden, und die Gesteinskörnung in ihren Ausmessungen, ihrem Gefüge und der Kernrohichte stark variieren kann. Diese Faktoren beeinflussen die grundlegenden Eigenschaften des Betons [26]. Darüber hinaus werden Betonzusatzmittel in geringen Mengen zugesetzt, um die Eigenschaften bspw. betreffend der Verarbeitbarkeit oder dem Ablauf des Erstarrungsprozesses zu ändern [27]. Es kann somit eine Bandbreite an Betonsorten über die Variation der Mischungsverhältnisse und der Bestandteile hergestellt werden. Eine schematische Zeichnung des sich nach der Aushärtung einstellenden Gefüges sei mit Abb. 3.1 gegeben.

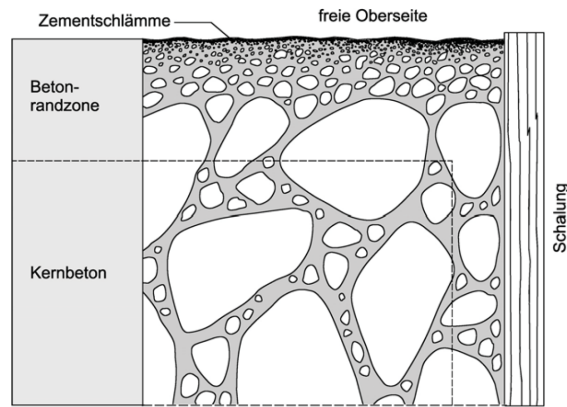


Abbildung 3.1: Das Betongefüge in Oberflächennähe [4].

Eine äußerst wichtige Eigenschaft des Betons ist die Druckfestigkeit. Jede Betonsorte wird daher einer Festigkeitsklasse nach DIN EN 1992-1-1 zugeordnet. Diese beziehen sich auf die charakteristische Mindestdruckfestigkeit, die anhand von Zylindern oder Würfeln definierter Ausmaße und festgelegtem Alter bestimmt wird [28]. Die Nomenklatur erfolgt so, dass sich die Klasse aus einem C für „concrete“ bzw. LC für „light concrete“, gefolgt von zwei durch einen Schrägstrich getrennte Zahlen, zusammensetzt. Die erste Zahl steht für die am Zylinder und die zweite Zahl entsprechend für die am Würfel gemessene Druckfestigkeit. Je nach geforderter Festigkeitsklasse ergeben sich auch entsprechende Anforderungen an die Zusammensetzung sowie an die Zementfestigkeit.

Da Beton von Natur aus keine großen Zugkräfte aufnehmen kann, kommt der in der Anwendung vorliegende Beton meist als Verbundwerkstoff vor. Es werden z.B. zugfeste Bewehrungen aus Betonstahl (Stahlbeton) oder Spannstahl (Spannbeton) eingesetzt. Die Bewehrungsstäbe müssen laut der alten DIN 1045 „...zum Schutz gegen Brandeinwirkung ausreichend dick und dicht mit Beton ummantelt sein“ [4]. Die Tragfähigkeit, selbst von ordnungsgemäß bewehrtem Beton hoher Festigkeitsklasse, kann durch Risse stark beeinträchtigt werden. Risse sind nicht grundsätzlich schädlich. Abhängig von den Standortbedingungen können sogar Rissbreiten von 0,1-0,4 mm als unbedenklich angesehen werden. Es ist für Bauwerke jedoch bedeutsam, ob es sich um Oberflächen- oder Trennrisse handelt. Oberflächennahe Risse können abhängig von ihrer Tiefe die darunterliegenden Bewehrungslagen durch das Eindringen von korrosiven Medien gefährden und das Erscheinungsbild negativ beeinflussen. Trennrisse gefährden jedoch, besonders bei Bauteilen mit Abdichtfunktio-

3. Risstiefenbestimmung an Beton

on, die Gebrauchstauglichkeit. Die Art, Entstehungsursache, die Risttiefe und -breite sind wichtige Instandsetzungskriterien [4].

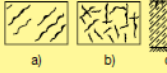
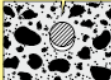
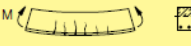
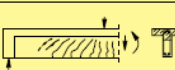
Zeile	Risse nach ihrer Ursache	Erscheinungsform	Beschreibung	Ursachen	Abhilfe
1	Risse infolge der Verarbeitung und der Eigenschaften des Betons	Oberflächige Netzerisse, Krakeleerisse 	Treten vor allem an der Oberfläche von flächigen Bauteilen auf. Sie können der Bewehrung folgen, aber auch „wild“ verlaufen. Die Risttiefe ist meist gering.	Unzureichende Nachbehandlung; gleiches Rissbild auch bei Alkali-Kieselsäure-Reaktion; Unterscheidung schwer möglich	Bessere Nachbehandlung; Überprüfung der Betonzusammensetzung
2		Schwindrisse 	Durch die Volumenverminderung infolge Schwindens treten diese Risse dort auf, wo die Verformungen behindert werden. Die Risse gehen in der Regel durch die ganze Bauteildicke und verlaufen gerichtet oder „ungeordnet“.	Unter anderem ungünstige Bauteilgeometrie wie L-förmig oder $L/B > 2$, bzw. ungünstige Betonrezeptur bzw. unzureichende Nachbehandlung	Kleinere/ günstigere Bauteilgeometrien und/oder schwindärmere Betonrezeptur und/oder bessere Nachbehandlung
3		Risse längs der Bewehrung 	Verlaufen häufig oberhalb von oberliegenden Bewehrungsstäben an nicht geschalteten Bauteilflächen. Je nach Ursache entstehen Fehlstellen unter der Bewehrung.	Leichtes Setzen des frischen Betons; tritt besonders an höheren Bauteilen und über dicken Bewehrungsstäben auf	Nachverdichten, solange der Beton noch plastisch (verformbar) ist
4	Risse infolge von äußeren Kräften bzw. Zwang	Biegerisse 	Verlaufen etwa senkrecht zur Biegezugbewehrung; beginnen am Zugrand und enden im Bereich der Nulllinie. Verlauf ist oft affin zum Biegemomentenverlauf.	Abtragung der Zugkräfte über die Bewehrung	Im Allgemeinen unvermeidbar, da die Bewehrung die Zugkräfte erst aufnimmt, wenn der Beton bereits gerissen ist; alternativ Spannbeton einsetzen
5		Schubrisse 	Bilden sich aus Biegerissen; verlaufen meist schräg zur Stabachse; treten im Bereich großer Querkkräfte auf.	Einleitung hoher Lasten auf kleinstem Raum	Bessere Lastverteilung
6		Trennrisse 	Verlaufen durch den gesamten Querschnitt; treten bei zentrischem Zug oder bei Zugbeanspruchung mit kleiner Ausmitte auf.	Lokale Überbeanspruchung	Zugbeanspruchung reduzieren bzw. Spannbeton einsetzen; Bewehrungsführung modifizieren
7		Spaltzugrisse 	Verlaufen parallel zu den Hauptdruckspannungen.	Überlastung	Bessere Lastverteilung

Abbildung 3.2: Erscheinungsformen und Ursachen der auftretenden Rissarten in Beton [5]

Risse können in den verschiedensten Stadien der Betonherstellung entstehen [5]:

- *Risse im Frischbeton* entstehen beim Austrocknen und damit einhergehender rascher Volumenminderung der oberflächennahen Betonschichten. Ihre Bildung wird vor allem durch ungünstige Wetterbedingungen begünstigt.
- *Risse im jungen und erhärteten Beton* werden durch Eigenspannungen und

äußere Belastungen hervorgerufen, die die momentane Zugfestigkeit des Betons überschreiten.

Je nach Rissursache liegen die, in der Praxis vor allem durch Schwinden und Abfließen der Hydratationswärme, entstehenden Risse in bestimmten Erscheinungsformen vor und können einzelnen Risskategorien zugeordnet werden. Eine Übersicht gängiger Rissformen mit den zugehörigen Ursachen, Erscheinungsformen und Abhilfemaßnahmen sei in Abb. 3.2 gezeigt. In dieser Arbeit werden vertikale, von der Oberfläche ausgehende Risse betrachtet. Hierzu gehören sowohl die ungerichteten oberflächennahen Risse, die meist durch große Feuchtigkeits- und Temperaturunterschiede zwischen Schale und Kern entstehen, und Trennrisse, die z.B. durch Betonieren auf ein bereits erhärtetes Fundament auftreten können [5].

3.2 Risstiefenbestimmung - Stand der Technik

Wie bereits erwähnt können Risse Steifigkeitsverluste und Korrosion der eingelegten Stahlbewehrung mit sich führen. Wenn der Riss so tief ist, dass die Schutzwirkung der Betonabdeckung nicht mehr gegeben ist, kann eine Reparatur bzw. ein Austausch des Bauteils nötig sein. Um die Lebensdauer solcher Strukturen zu verlängern, verlangt es nach zerstörungsfreien Methoden, um den Rissfortschritt konservativ abschätzen zu können. Beton ist ein heterogener, mehrphasiger und poröser Werkstoff, der aus Zuschlagstoffen, die in einer Matrix aus Zementstein eingebettet sind, besteht. Entscheidend für die Prüfbarkeit ist die Sieblinie und die Art der verwendeten Zuschlagstoffe, da diese maßgeblich an den Streuprozessen der Ultraschallwelle beteiligt sind. Hohe Frequenzbereiche, die bei der Ultraschallprüfung von Stählen zum Einsatz kommen, würden aufgrund der vielen Streuereignisse in Beton zu einem sehr niedrigen Signal/Rausch-Verhältnis führen. Demnach verlangt es nach neu entwickelten Prüfmethoden.

Bereits 1983 beschrieb Angel [29] die Reflexion, Transmission und Streuung von schräg auf einen Oberflächenriss einfallenden Oberflächenwellen. Auch Popovics nutzte 2000 [30] diesen Ansatz und untersuchte eine Reihe von Betonplatten mit

unterschiedlich tiefen Rissen und Nuten. Er wählte den, erstmals durch Achenbach [31] beschriebenen, Versuchsaufbau so, dass unbekannte Größen, verursacht z.B. durch den Sensortyp, durch die Ankoppelbedingungen oder durch die Schallgeschwindigkeit, aus der Formel zur Berechnung der Signalübertragung über den Riss ausgenommen wurden. Folglich ist sein selbstkompensierender Aufbau unabhängig von den dem Prüfer jeweils zur Verfügung stehenden Ultraschallwandlern. Es gelang ihm, reproduzierbare Transmissionswerte für Oberflächenwellen zu ermitteln. Die Messungen sind sehr empfindlich bei oberflächennahen Rissen, selbst wenn diese dicht geschlossen sind und die Rissspitze nicht klar definiert ist. Darüber hinaus lässt sich nicht nur eine Aussage über das Vorhandensein, sondern auch über die Tiefe des betrachteten Risses treffen. Song [32] zeigte jedoch auch die Grenzen der Technik auf: Ab einer bestimmten Tiefe sind die Ergebnisse der Technik zur Bestimmung der Risttiefe nicht mehr aussagekräftig. In griff den Ansatz 2015 [33] erneut unter Verwendung kontaktloser, luftgekoppelter Ultraschallwandler auf. Er umgeht damit das Problem, dass bei den vorhergegangenen Prüfaufbauten stets auch andere Wellenarten neben der gewollten Rayleigh-Welle angeregt werden. Darüber hinaus ist die Ankopplung an Beton meist problematisch. Ein Nachteil der Methode ist jedoch, dass die Einkopplung bei luftgekoppelten Ultraschallprüfmethoden im Vergleich eher ineffizient ist. Bei anderen, auf Kontakt basierenden, Verfahren werden höhere Amplituden bzw. Schalldrücke erzeugt.

Eine weitere Technik stammt von Ramamorthy [34]. Er positionierte Sender und Empfänger auf jeweils einer Seite des Risses und verwendete Impulse im Frequenzbereich von 400 - 600 kHz. Bei diesen Frequenzen wird der Ultraschall stark an Heterogenitäten gestreut. Bei ausreichend vielen Streuereignissen kann man den Vorgang als Diffusionsprozess modellieren. Durch den Riss wird das Eintreffen des Streusignals verzögert, was zur Bestimmung der Risttiefe dienen kann. Die experimentellen Ergebnisse für die Energiedichte und die Verzögerungszeiten werden mit FEM-Simulationen für verschiedene Risstiefen verglichen. Das am besten übereinstimmende Simulationsergebnis entspricht dann der realen Messung zu entnehmenden Risttiefe. Seher zeigte [35] in seiner, auf der Arbeit von Ramamorthy basieren-

den, Veröffentlichung jedoch auf, dass diese Methode bei realen Rissen versagt: bei Schallbrücken zwischen den Rissflanken diffundiert die gesamte Energie der Ultraschallwelle durch diese Verbindungsstelle. Dies führt zu einem in der Praxis problematischen Unterschätzen der Risstiefe.

Das in der Forschung am meisten verbreitete Themenfeld ist das der laufzeitbasierenden Verfahren. Die einfallende Welle wird oftmals durch einen mechanischen Schlag (Impact-Echo-Methode), beispielsweise durch einen Hammer oder einer Stahlkugel [36, 37, 38], aber auch durch Ultraschallprüfköpfe erzeugt. Bei der Messung werden Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten des Risses positioniert. Zwischen ihnen wird das Amplitudensignal für verschiedene Abstände zum Riss gemessen. Durch die Beugung an der Risspitze wird die Laufzeit, im Vergleich zu rissfreien Bereichen, verlängert.

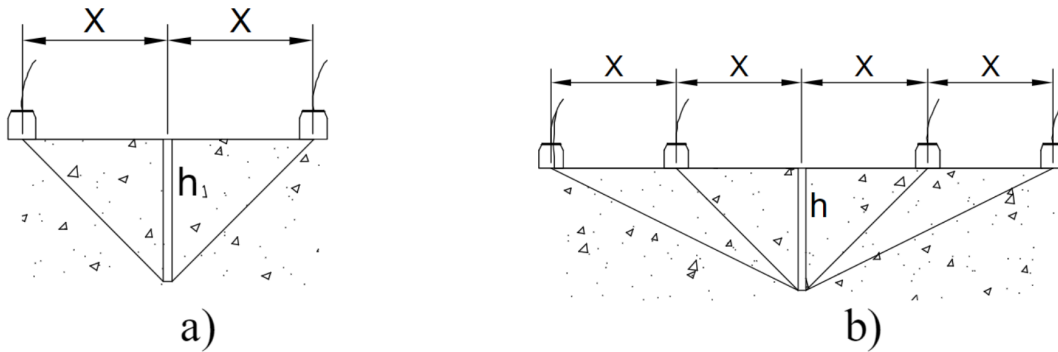


Abbildung 3.3: Schematische Darstellung der Laufzeitverfahren nach Bungey (a) und BS 1881: Part 203 (b) [6]

In dem in [6] beschriebenen Ansatz von Bungey (s. Abb. 3.3) wird die Laufzeit der Ultraschallwelle um den Riss mit der Laufzeit ohne Riss unter Annahme konstanter Schallgeschwindigkeit verglichen. Die mathematische Beschreibung der Risstiefe h hat die Form

$$h = \left(\frac{x}{t_s} \right) \sqrt{t_c^2 - t_s^2} \quad (3.1)$$

mit den Laufzeiten t_s für den rissfreien, t_c für den rissbehafteten Bereich und dem Abstand der Wandler zum Riss x . Die Wandler werden in einem Abstand $2x$ zuein-

ander platziert.

Eine weitere Prüftechnik ist in BS 1881: Part 203 [39] beschrieben. In dieser Methode werden zwei Messungen mit den Abständen x und $2x$ vom Riss vorgenommen. Die aus den kombinierten Messergebnissen zu entnehmenden Risstiefe wird über

$$h = x \sqrt{\frac{4t_1^2 - t_2^2}{t_2^2 - t_1^2}} \quad (3.2)$$

berechnet. Hierbei sind t_1 und t_2 die Laufzeiten für jeweils die Abstände x und $2x$ zum Riss. Der Vorteil dieser Methode ist, dass sie keine gesonderte Referenzmessung an rissfreien Bereichen erfordert und somit die Fehlerquelle, nämlich dass die Phasengeschwindigkeit als konstant angesehen wird, vermieden werden kann. Da hier jedoch nur zwei Messungen vorliegen, bei denen der genaue Laufweg der Welle nicht genau bestimmt werden kann, empfiehlt es sich nach [39] mehrere Messungen mit fester Senderposition vorzunehmen. Um eine bessere Statistik zu erreichen, kann man die Anzahl der Messungen noch weiter erhöhen [6]. Die Ultraschalllaufzeitkurven lassen sich zum Erhöhen der Genauigkeit überlagern. An der Rissspitze überlagern sich die Signale konstruktiv und die Streuwellenanteile löschen sich teilweise aus. Bei der Betrachtung von künstlichen Fehlern scheinen die laufzeitbasierten Verfahren zuverlässige Ergebnisse zu liefern. Popovics [40] stellte jedoch fest: „The time-of-flight method however is not effective when realistic concrete cracks are tested, that is when the crack tip is ill defined and the crack is tightly closed“. Für die Untersuchung an realen Rissen ist demnach eine Erprobung weiterer Techniken erforderlich.

Mielentz [41] nutzt die im vorherigen Kapitel erläuterte SAFT-Rekonstruktion. Er scannte die Oberfläche von zuvor mit künstlichen Fehlern wie Nuten, künstlich erzeugten Rissen und Styrodureinschlüssen versehenen Betonprobekörpern systematisch ab. Eine nachfolgende Rekonstruktionsrechnung mit 3D-SAFT erlaubt die Unterscheidung partieller Streuzentren und dem tatsächlichen Risstiefenverlauf bzw. der Einschlüsse. Die Ergebnisse lassen sich als zweidimensionale Schnitte darstellen, bei denen die unterschiedlichen Intensitätswerte anhand der Farbskala erkennbar sind. Der Messaufbau von Mielentz bestand aus Laservibrometer und Spiegelscanner als berührungslosen Ultraschallempfänger. Die rekonstruierten Ergebnisse konnten sowohl die Nutspitze als auch die Rückwand darstellen. Bei der Untersuchung eines

durch eine Biegemaschine erzeugten Trennrisses wurde der Nachweis durch das Fehlen des Rückwandechos erbracht.

Auch Krause [42] untersuchte Betonprobekörper mithilfe der Rekonstruktionsrechnung. Es wurden Probekörper mit Nuten und Schallbrücken in Form von Bewehrungsstäben als auch Probekörper mit realen Rissen betrachtet. Auf einer Seite des Risses wurde ein Breitbandprüfkopf platziert. Als Empfänger diente ein Laserinterferometer. Durch den großen Öffnungswinkel wird durch den Breitbandprüfkopf ein großes Volumen durchschallt. Nach jedem Ändern der Senderposition wurde die Oberfläche mithilfe des Interferometers abgescannt. Die aufgenommenen Daten wurden dann mithilfe des 3D-SAFT-Algorithmus rekonstruiert und der Bereich des Risses mit B-Scans senkrecht oder parallel zum Riss dargestellt. Bei der Messung der mit Nuten versehenen Probekörper konnten die Nutspitze und das Rückwandecho abgebildet werden. Auch Schallbrücken waren durch Indikationen erkennbar. Es konnten jedoch Mehrfachanzeigen in verschiedenen Tiefen, verursacht durch Modenkongression, festgestellt werden. Bei realen Rissen wurde der Riss als breite Region abgebildet. Durch ein nachfolgendes Öffnen des Probekörpers konnte eine korrekte Darstellung des Rissverlaufs nachgewiesen werden.

Friese [43] nutzte das kommerziell erhältliche Linienarray A 1040 MIRA. Es besteht aus bis zu 16 aneinander gereihten Prüfkopfmodulen mit jeweils 4 Trockenkontakten als Einzelelemente, die Transverallwellen einkoppeln. Die Messung erfolgt durch mehrfaches Ankoppeln senkrecht zum Riss und anschließender Rekonstruktion. Auch hier gelang eine korrekte Abbildung der Nuten, jedoch konnte keine zweifelsfreie Zuordnung der Reflexionen zur Risspitze vorgenommen werden. Helmerich [44] nennt einen der Gründe für das Problem der Risstiefenbestimmung an realen Rissen mittels lauffzeitbasierten Verfahren: Durch den stark heterogenen Aufbau des Werkstoffs sei eine präzise Ausbildung des Rissspitzensignals nicht möglich. Vielmehr sei die sich bildende Zone an Mikrorissen am Ende des Makrorisses ebenfalls an der Beugung der akustischen Welle beteiligt und erschwert die Auswertung. Darüber hinaus behindern Schallbrücken, verursacht durch Verunreinigungen, Gesteinskörnung oder Bewehrungsstäbe, eine eindeutige Identifikation des Rissspitzenechos.

Kapitel 4

Messgeräte

4.1 A1040 Mira

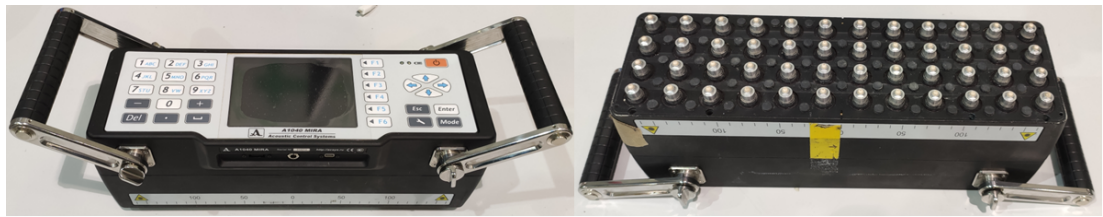


Abbildung 4.1: Bedienoberfläche und Unterseite des Ultraschalltomographen A1040 Mira der ACS Group.

Das A 1040 Mira ist ein für die bautechnische Anwendung konstruierter Tomograph, dessen Sensoren als Linienarray zusammengeschaltet werden. Die Apertur besteht aus einer Matrixanordnung von 12 x 4 Trockenpunktkontaktprüfköpfen. Der Abstand zwischen den Einzelementen beträgt 30 mm in der einen und 25 mm in der anderen Richtung. Damit ergibt sich eine Apertur von 330 mm x 75 mm. Der Tomograph arbeitet mit SH-Wellen. Die Positionierung des Gerätes erfolgt über Markierungslaser. Der Messpunkt wird dabei als Mittelpunkt der Apertur festgelegt. Die vier DPCs einer Spalte werden als Gruppe angesteuert. Die Ansteuerung durchläuft die Apertur nach folgendem Schema: Gruppe n sendet, Gruppen n+1 bis 12 empfangen. Folglich erhält man an jedem Messpunkt 66 A-Scans. Die Betriebsfrequenz liegt bei 50 kHz. Die geräteinterne SAFT-Auswertung wurde nur zum Nachweis ausreichender Ankopplung genutzt.

4.2 A1040 Mira 3D Pro



Abbildung 4.2: Ober- und Unterseite des Ultraschalltomographen A1040 Mira 3D Pro von ACS. Die Bedienoberfläche stellt das links zu sehende und drahtlos mit den Modulen verbundene Smartphone dar.

Das A1040 Mira 3D Pro ist der direkte Nachfolger des A1040 Mira. Die Apertur besteht aus 16 x 4 DPC-Prüfköpfen mit einem Abstand von 25 mm zueinander und hat somit die Abmessungen 375 mm x 100 mm. Im Gegensatz zum Vorgänger ist hier jeder DPC einzeln ansteuerbar. Das Gerät lässt sich sowohl im Linearmodus (siehe A1040 Mira) als auch im Matrix-Modus, bei dem jedes Element als einzelner Sender und Empfänger fungieren kann, betreiben. Eine weitere Besonderheit ist der modulare Aufbau: Das Gerät lässt sich in zwei Module mit je 8 x 4 Elementen zerlegen und mithilfe eines Kabels miteinander synchronisieren. Das als Steuergerät fungierende Smartphone ist nicht fest installiert, sondern wird mit Magneten an den Einheiten befestigt. Die Kommunikation mit den Modulen erfolgt drahtlos. Auch hier können die Messungen als 2D- oder 3D-Rekonstruktion dargestellt werden. Um die Funktionstüchtigkeit der Einzelwandler zu überprüfen, können bei beiden Geräten auch die einzelnen A-Scans angezeigt werden. Über die neu hinzugefügte TGC-Funktion („time gain compensation“) lässt sich die mit dem Laufweg der Welle zunehmende Schallschwächung durch eine zusätzlichen Verstärkung von $x \text{ dB}/\mu\text{s}$ kompensieren. Wie schon sein Vorgänger arbeitet das Mira 3D Pro mit SH-Wellen.

Kapitel 5

Umsetzung in Python

```
92     list_int = []
93     arrays = []
94     for scan_number in range(1, columns_scanned+1):
95         column = scan_number
96         scan_file = file_path + "\\\" + str(column) + \"_\" + str(row) + "\\\" + \"raw_data.bin\"
97         try:
98             with open(scan_file, \"rb\") as f:
99                 byte = f.read(2)
100                 list_int = []
101                 while byte:
102                     conv_byte = struct.unpack(\"<h\", byte)
103                     conv_byte_int = functools.reduce(lambda sub, ele: sub * 10 + ele, conv_byte)
104                     byte = f.read(2)
105                     list_int.append(conv_byte_int)
106             except IOError as e:
107                 print('Operation failed: %s' % e.strerror)
108             globals()[f'array{column}'] = np.reshape(np.asarray(list_int), (120, 4096))
109             arrays.append(globals()[f'array{column}'])
110
111     array_3D = np.zeros((columns_scanned, 4096, 120))
112     # array3D(scan_pos, data, a-scan)
113     for k in range(columns_scanned):
114         for i in range(4096):
115             for j in range(120):
116                 temp = arrays[k]
117                 array_3D[k, i, j] = temp[j, i]
```

Abbildung 5.1: Einlesen der lbv-Datei einer Mira 3D Pro-Messung und Abspeichern in einer Matrix.

Die programmiertechnische Umsetzung der Datenbearbeitung sei hier beispielhaft anhand des Mira 3D Pro-Pythonprogramms gezeigt. Im ersten Schritt werden die lbv-Daten der zu analysierenden Messung (Binärdateien) eingelesen (s. Abb. 5.1). Hierbei werden die einzelnen A-Scans der betrachteten Messspur für jeden Messpunkt als ganze Zahlen in eine Matrix der Größe n (Anzahl Messpunkte in der Messspur) $\times$ 4096 $\times$ 120 gelegt. Dabei stellt 4096 die Länge des A-Scans in Mikrosekunden und 120 die Anzahl an A-Scans pro Messpunkt dar. Draufhin werden

```
120     # float for B-Scan
121     array_3D = array_3D.astype(float)
122
123     # DC-Anteil rausfiltern
124     for k in range(columns_scanned):
125         for j in range(120):
126             array_3D[k, :, j] = array_3D[k, :, j] - statistics.mean(array_3D[k, :, j])
127
128     # hilbert
129     array_3D_imag = np.zeros((columns_scanned, 4096, 120))
130     array_3D_real = np.zeros((columns_scanned, 4096, 120))
131
132
133     for k in range(columns_scanned):
134         for h in range(120):
135             a = hilbert(array_3D[k, :, h])
136             for i in range(4096):
137                 array_3D_real[k, i, h] = a[i].real
138                 array_3D_imag[k, i, h] = a[i].imag
```

Abbildung 5.2: Verarbeitung der Daten: Überführen der Daten vom integer- in das float-Zahlenformat, Hilberttransformation und Aufteilung in Real- und Imaginärteil.

die Daten verarbeitet (s. Abb. 5.2): Zunächst werden die Daten vom integer- in das float-Zahlenformat überführt. Danach wird für jeden A-Scan der Gleichstromanteil der Messung herausgefiltert, indem der statistische Mittelwert von jedem Amplitudenwert subtrahiert wird. Dadurch verläuft die Schwingung der A-Scans um den Amplitudenwert 0. Die gefilterte Messung wird danach einer Hilbert-Transformation unterworfen, in Zuge derer die Amplituden- und Phaseninformationen extrahiert werden. Das transformierte Signal kann nun in Real- (Amplitudeninformation) und Imaginärteil (Phaseninformation) aufgeteilt werden. Beide Signalanteile werden unabhängig voneinander dem SAFT-Algorithmus überführt. Um Rechenzeit zu sparen wird die hierfür verwendete Funktion in den Zwischenspeicher („cache“) geladen und die zu den einzelnen Pixel zugehörigen Laufzeiten bereits vor der eigentlichen Rekonstruktion ermittelt. Hierzu werden die, mithilfe eines separaten Pythonprogramms (s. Abb. 5.4) aus einer Excel-Tabelle extrahierten und messpositionsbezogen berechneten, Positionsdaten der Transducer in das eigentliche Programm importiert. Die Rekonstruktion folgt dem in Kapitel 2.3 erläuterten Prinzip. Die Rekonstruktionsfläche wird nach der Berechnung als Datei abgespeichert und mit matplotlib farbkodiert dargestellt.

```

33  @njit(cache=True)
34  def SAFT(matrix, x_sta, x_ste, y_ste, res, cos, vel, columns):
35      reco = np.zeros((int(z / res), int(x / res)))
36      Hilfsvektor = np.array([0.0, 100.0])
37      if cos == 1:
38          for k in range(columns):
39              lookup = np.zeros((16, int(x/res), int(z/res)))
40              cosinus_array = np.zeros((16, int(x/res), int(z/res)))
41              pos_scan_x = x_sta + k * x_ste
42              for position in range(16):
43                  vector1 = np.array([pos_scan_x + positionen[position], 0])
44                  for x_vol in range(int(x / resolution)):
45                      for z_vol in range(int(z/resolution)):
46                          vector_vol = np.array([(x_vol - (extend/res)) * res, z_vol * res])
47                          distance = vector1 - vector_vol
48                          runtime = norm(distance)/vel
49                          dotProduct = np.dot(distance, Hilfsvektor)
50                          cosinus = dotProduct/(norm(distance)*norm(Hilfsvektor))
51                          lookup[position, x_vol, z_vol] = runtime
52                          cosinus_array[position, x_vol, z_vol] = cosinus
53              for scan in range(120):
54                  sender = int(pos_sender_numbers[scan]) - 1
55                  empfänger = int(pos_empf_numbers[scan]) - 1
56                  for x_vol in range(int(x / res)):
57                      for z_vol in range(int(z/res)):
58                          reco[z_vol, x_vol] += matrix[k, int(lookup[empfänger, x_vol, z_vol] +
59                                                                    lookup[sender, x_vol, z_vol])
60                                                                    + delay, scan] * cosinus_array[empfänger, x_vol, z_vol] \
61                                                                    * cosinus_array[sender, x_vol, z_vol]
62      return reco

```

Abbildung 5.3: Umsetzung des SAFT-Algorithmus in Python.

```

1  import csv
2  import numpy as np
3
4  with open("MIRA3DPro.txt") as csv_file:
5      csv_reader = csv.reader(csv_file, delimiter='t')
6      pos_sender = list()
7      pos_empf = list()
8      pos_sender_numbers = np.array([])
9      pos_empf_numbers = np.array([])
10     positionen = np.array([])
11     line_counter = 0
12     for line in csv_reader:
13         if line_counter >= 1:
14             pos_sender.append(float(line[3]))
15             pos_empf.append(float(line[4]))
16             if line_counter < 17:
17                 positionen = np.append(positionen, float(line[6]))
18             if line_counter < 122:
19                 pos_sender_numbers = np.append(pos_sender_numbers, float(line[1]))
20                 pos_empf_numbers = np.append(pos_empf_numbers, float(line[2]))
21         line_counter += 1

```

Abbildung 5.4: Einlesen der Excel-Datei mit den aperturbezogenen Positionen der Einzelelemente des Messgeräts.

Kapitel 6

Probekörper

6.1 Probekörper der BAM mit kontrolliert erzeugten Rissen

Im Vorfeld dieser Arbeit wurden bereits Probekörper in Zusammenarbeit mit dem Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM, Berlin) hergestellt und mit Ultraschall untersucht. Um die Statistik und die Aussagekräftigkeit der Messergebnisse zu verbessern, wurden einige dieser Messungen mit einbezogen und mit denselben Algorithmen ausgewertet wie die an den weiteren Probekörpern der Hoch-

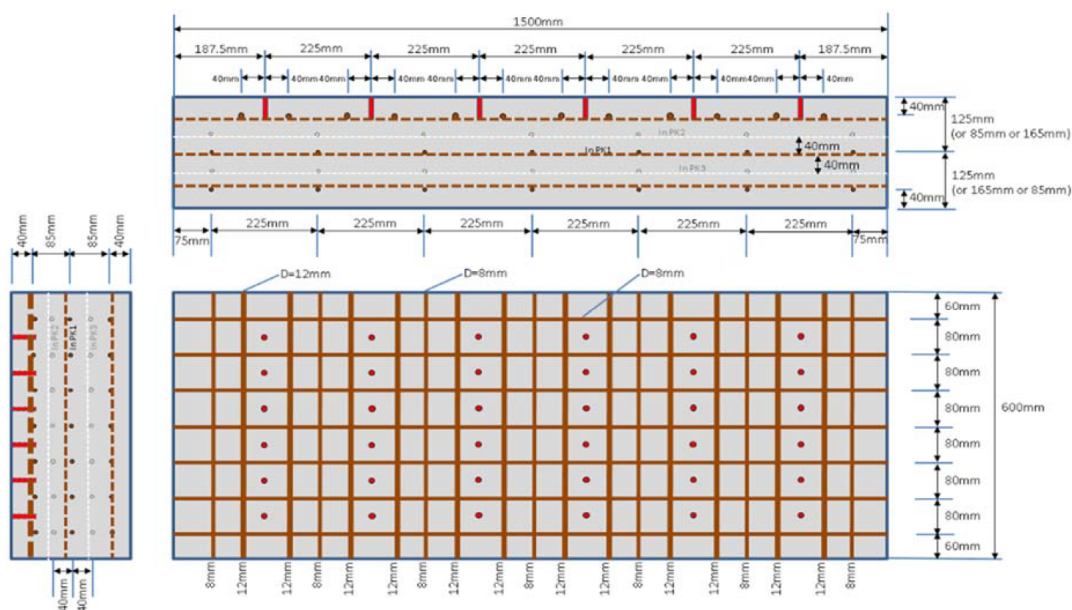


Abbildung 6.1: Bewehrungsplan der Betonprobekörper nach BAM-Standard.

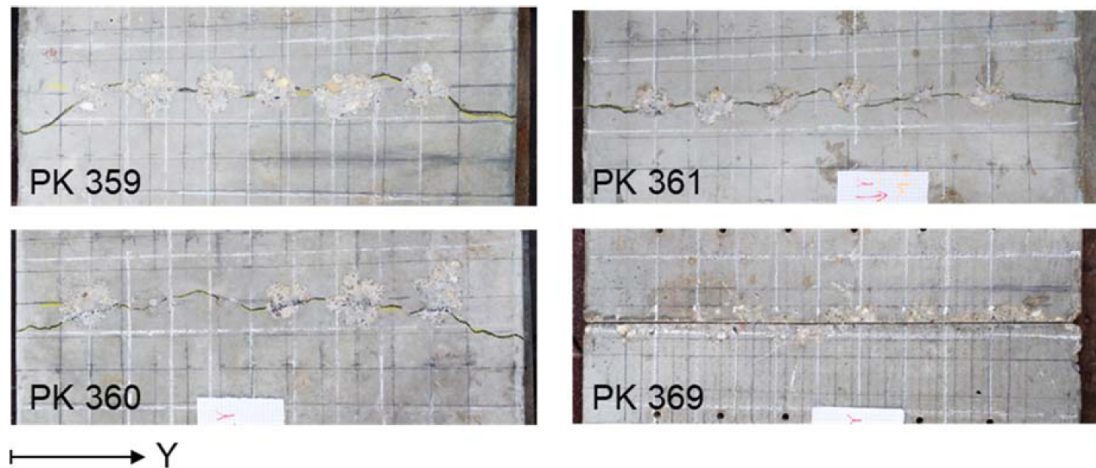


Abbildung 6.2: Draufsicht auf die Risse bei den Probekörpern 359, 360, 361 und auf die Nut bei Probekörper 369. Die Fehler verlaufen entlang der y-Achse des auch bei der Auswertung beachteten Koordinatensystems.

schule Kaiserslautern (s. Kapitel 6.2) aufgenommenen Ultraschalldaten. Das der kontrollierten Erzeugung von Rissen in Beton zugrunde liegende Verfahren wurde von der BAM entwickelt [45].

Der erste Satz an Probekörpern besteht aus vier Betonblöcken mit den Maßen 1500 mm x 600 mm x 250 mm. Der Beton zeichnet sich mit der, über Probewürfel ermittelten, Druckfestigkeitsklasse C30/37 und einem Größtkorn der Größe von 16 mm aus. Die beim Gießvorgang verwendete Schalung wurde im Vorfeld mit Bohrungen versehen um Bewehrungsstäbe einlegen zu können. Darüber hinaus wurden Sacklöcher an der Oberfläche eingelassen. In die Sacklöcher wurde nach dem Erhärten Sprengmörtel eingefüllt, um mithilfe seiner Ausdehnung kontrolliert Risse zu erzeugen. Die Variation der Probekörper liegt in den unterschiedlichen Bewehrungslagen (s. Tab. 6.2). Die mittlere Bewehrung fungiert als Stopperbewehrung und bremst durch die Aufnahme von Kräften den Rissfortschritt aus. Insgesamt wurden drei Bewehrungslagen mit Quer- und Längsbewehrung eingelegt (s. Abb. 6.1). Die Risse verlaufen in Dickenrichtung bzw., nach dem aufgebrachtem Koordinatensystem, in y-Richtung. Abplatzungen an der Oberfläche um die eingebrachten Risse erschweren zwar die akustische Ankopplung, stellen aber eine adäquate Simulation des realen Anwendungsfalles dar. Um den Effekt von Schallbrücken nachvollziehen zu können, wurde bei der Herstellung von BAM 369 zur Erzeugung der Nut ein Blech ohne die Bewehrungsstäbe zu durchtrennen eingeschoben (s. Abb. 6.1).

6.2 Probekörper der HSKL mit kontrolliert erzeugten Rissen

Um Messungen auch am IZFP in Saarbrücken vornehmen zu können, wurde nach dem Vorbild der BAM ein zweiter Satz Probekörper an der Hochschule Kaiserslautern hergestellt [46]. Es wurde darauf geachtet, dass der Herstellungsprozess identisch zum vorherigen Satz war, um die Vergleichbarkeit der Messungen zu gewährleisten. Im Vorfeld der Rissinjektion wurden die Probekörper mittels Ultraschall- und Georadarmessungen auf etwaige Fehler untersucht. Das Einbringen der Risse wurde als erfolgreich angesehen, wenn eine ausreichend große Rissöffnung messbar und der Riss an den Seitenflächen erkennbar war. Für den Sägeschnitt (HSKL PK 6) und PK 7 wurde eine Position weiter am Rand gewählt, um Zugang zu einer möglichst großen fehlerfreien Fläche zu haben. Darüber hinaus wurden allgemein die Positionen der erzeugten Risse so gewählt, dass unmittelbar unter den Rissen keine Stäbe der Längsbewehrung verlaufen (s. Tab. 6.1, 6.2 und Abb. 6.3).

Tabelle 6.1: Lokalisierung und visuell bestimmte Kennzahlen der Risse/Nuten für die Probekörper der BAM und der HSKL.

Probekörper	Riss- /Nutöffnung [mm]	Riss-/Nuttiefe Seitenfläche [mm]	Lage in Längs- richtung d. Riss/Nut [mm]
BAM 359	$0,025 \pm 0,025$	91 ± 45	$866,5 \pm 11,5$
BAM 360	$0,2 \pm 0,05$	98 ± 10	$860,5 \pm 9,5$
BAM 361	$0,125 \pm 0,025$	135 ± 11	$864,5 \pm 7,5$
BAM 369	$0,9 \pm 0,1$	$72,5 \pm 2,5$	$747,5 \pm 0,25$
HSKL PK 4	$0,3 \pm 0,2$	$98,5 \pm 26,5$	860 ± 10
HSKL PK 5	$0,225 \pm 0,125$	171 ± 8	860 ± 10
HSKL PK 6	$4,9 \pm 0,6$	72 ± 2	1085 ± 5
HSKL PK 7	$0,4 \pm 0,1$	185 ± 10	1085 ± 5

Tabelle 6.2: Übersicht über die betrachteten Probekörper mit Beschreibung des künstlichen Fehlers, der Maße und der Bewehrungslage.

Probekörper	Beschreibung	Geometrie Länge [mm] x Breite [mm] x Höhe [mm]	Bewehrung
BAM 359	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 85 mm Tiefe
BAM 360	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 125 mm Tiefe
BAM 361	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 165 mm Tiefe
BAM 369	Nut (75 mm)	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 125 mm Tiefe
HSKL PK 4	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 125 mm Tiefe
HSKL PK 5	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 165 mm Tiefe
HSKL PK 6	Sägeschnitt (72 mm)	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 85 mm Tiefe
HSKL PK 7	Riss mit Restwandstärke	150 x 60 x 25	3 Lagen, 2. Lage in 125 mm Tiefe

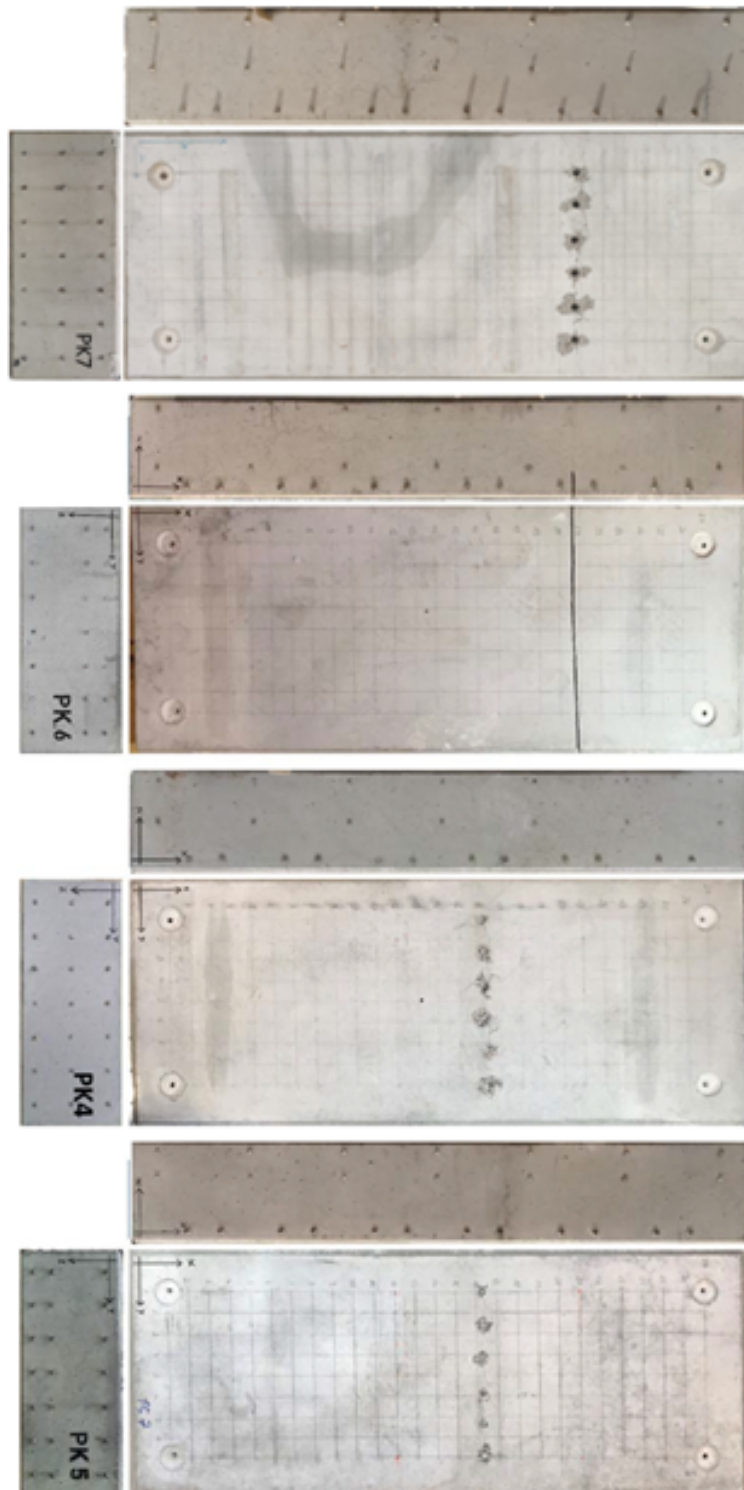


Abbildung 6.3: Aufnahme der Probekörper HSKL PK 4-7 mit Seitenflächen.

Kapitel 7

Messergebnisse und Diskussion

7.1 Flächenscans

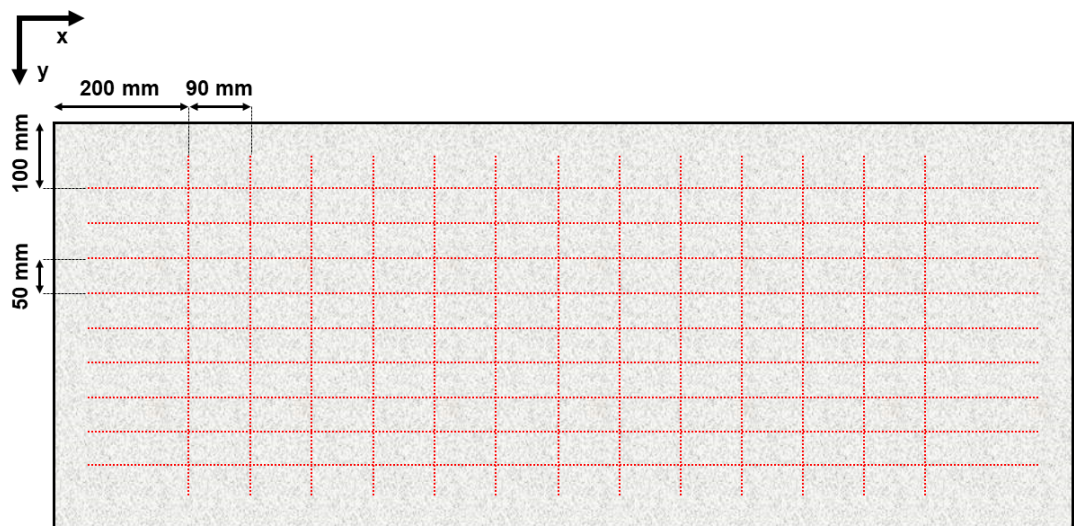


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Messrasters bei den durchgeführten Flächenscans. Die Positionierung des Messgeräts erfolgt in den Schnittpunkten des Rasters.

Zur allgemeinen Darstellung des Inneren der Probekörper wurden zunächst Flächenscans durchgeführt. Dazu wurde ein Messraster (s. Abb. 7.1) mit Abstand der Rasterlinien von 90 mm bzw. 50 mm in x- und 50 mm in y-Richtung aufgetragen. Die Positionierung des Messgeräts erfolgte mithilfe der integrierten Laser-Positionierhilfe an den Schnittstellen der Linien. Damit die Messapertur nicht über die Probenkanten

hinausragt, wurde der Startpunkt der Messungen bei $x = 200 \text{ mm}$ und $y = 100 \text{ mm}$ festgelegt. Dieser Messaufbau ergibt eine Datenmenge von 13×9 bzw. 22×9 Messpunkten. Es wurden sowohl die Probekörper 359, 360, 361, 369 der BAM, als auch die Probekörper 4, 5, 6 und 7 der HSKL nach diesem Prinzip untersucht.

Aus den aufgenommenen Daten können Darstellungen des Bauteilinneren rekonstruiert werden. Bei der Rekonstruktion wird jede der 9 Messspuren (Zeilen des Messrasters) einzeln betrachtet. Somit ergeben sich je Probekörper 9 Querschnitte in der x - z -Ebene. Die Übersicht über die Nomenklatur mittels Ultraschalldaten rekonstruierter Querschnitte und der eindimensionalen Darstellung der Amplitude über eine Raumrichtung (A-Scan) sei mit Abb. 7.2 gegeben. Ein C-Scan bzw. ein C-Bild stellt demnach eine Ebene parallel zur Oberfläche des Prüfobjekts, B- und C-Scan ein Querschnitt senkrecht dazu dar. Die Amplituden bzw. die verwendete Farbskala wurden, falls nicht anders angegeben, auf das maximale Amplitude des Rekonstruktionsbildes (entspricht demnach 100 %) normiert. Die geräteinterne Auswertung zeigte bei diesen Parametern ein stark ausgeprägtes, jedoch nicht übersteuertes Rückwandecho.

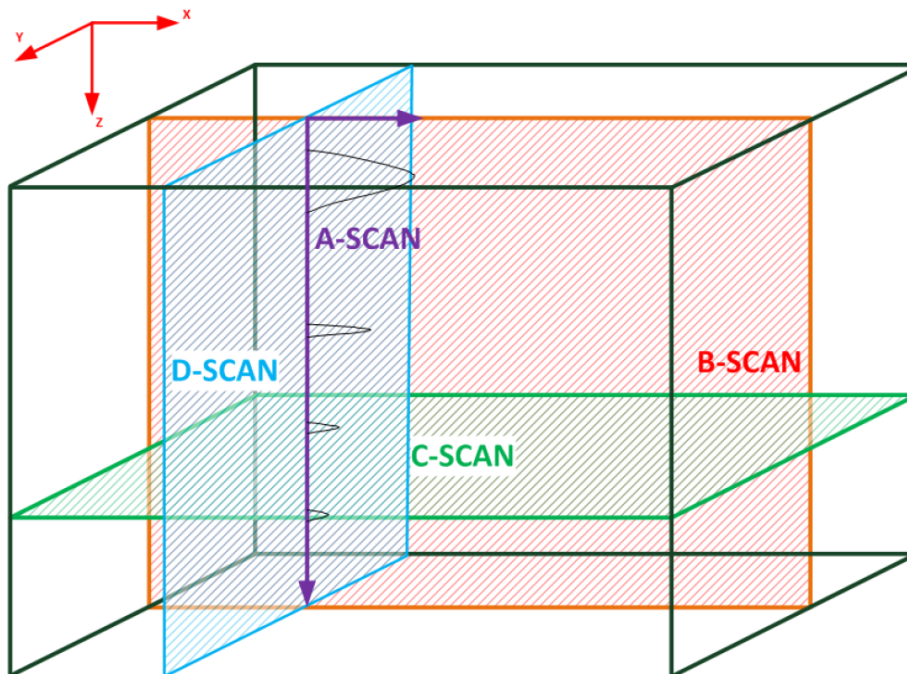


Abbildung 7.2: Nomenklatur zu den Darstellungsmöglichkeiten des Bauteilinneren bei einer Ultraschallprüfung.

7.1.1 Klassische SAFT-Rekonstruktion

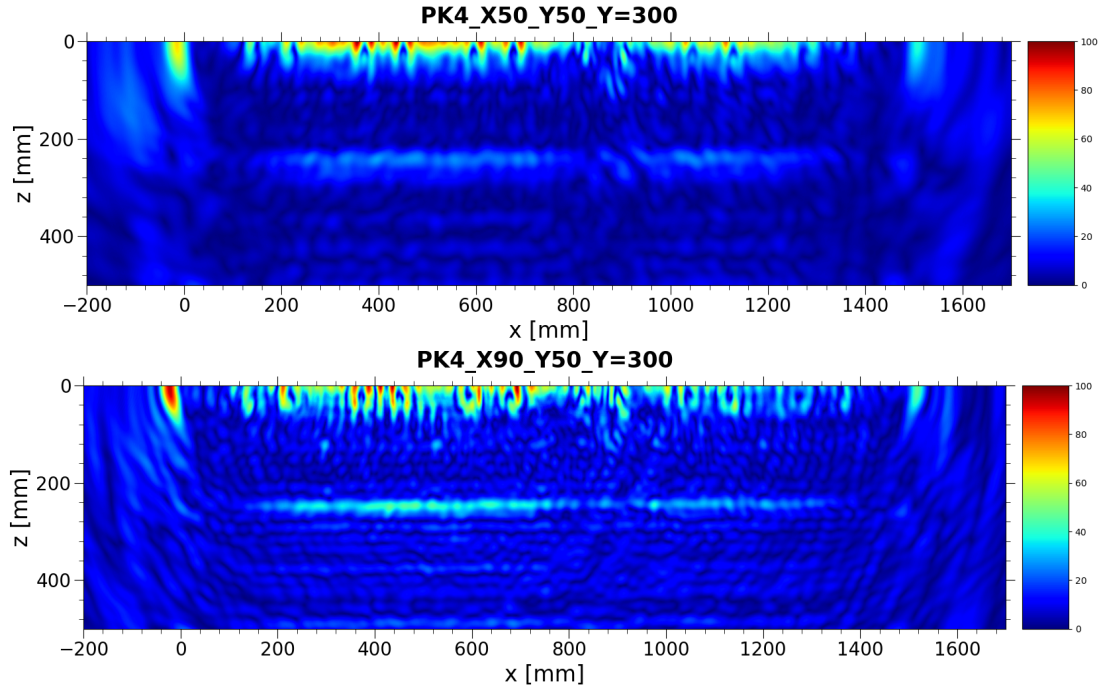


Abbildung 7.3: SAFT-Rekonstruktionen (B-Bilder) der mit den Geräten A1040 Mira (oben) und A1040 Mira 3D Pro (unten) an PK 4 bei $y = 300$ mm ermittelten Ultraschalldaten.

Die Probekörper der BAM wurden ausschließlich mit dem A1040 Mira untersucht. Um eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse der späteren Messergebnisse zu gewährleisten, wurden Vergleichsmessungen an den Probekörpern PK 4 und PK 5 mit dem A1040 Mira 3D Pro vorgenommen.

Um die geringere Anzahl an A-Scans pro Messpunkt beim A1040 Mira auszugleichen, wurde der Rasterabstand für diese Messungen auf 50 mm in x- und 50 mm in y-Richtung festgelegt. Folglich liegen bei dieser Messung 1518 A-Scans und bei den Messungen mit dem A1040 Mira 3D Pro 1560 A-Scans pro Messreihe vor.

Zur Rekonstruktion der Messergebnisse werden, wie in Kapitel 2.3 beschrieben, die einzelnen registrierten Amplitudenwerte entsprechend ihrer Laufzeit den Pixeln zugeordnet. Die für die Berechnung gewählte Pixelgröße beträgt 1 mm x 1 mm. Bei der Berechnung wurden die A-Scans einer Hilbert-Transformation unterworfen und die Gleichstromanteile der Signale subtrahiert.

Die Flächenscans wurden dazu verwendet, B-Bilder für jede Messzeile im Messraster über die komplette Probenlänge darzustellen. Durch Identifikation des Rückwandechos konnte die Schallgeschwindigkeit als 2740 m/s für die Probekörper der BAM und 2530 m/s für die Probekörper der HSKL bestimmt werden. Der Rekonstruktionsbereich der B-Scans wurde so gewählt, dass die Probenränder und etwaige Wiederholungsechos abgebildet werden können. Es wurde jeweils die Position $y = 300$ mm als repräsentative Spur ausgewählt.

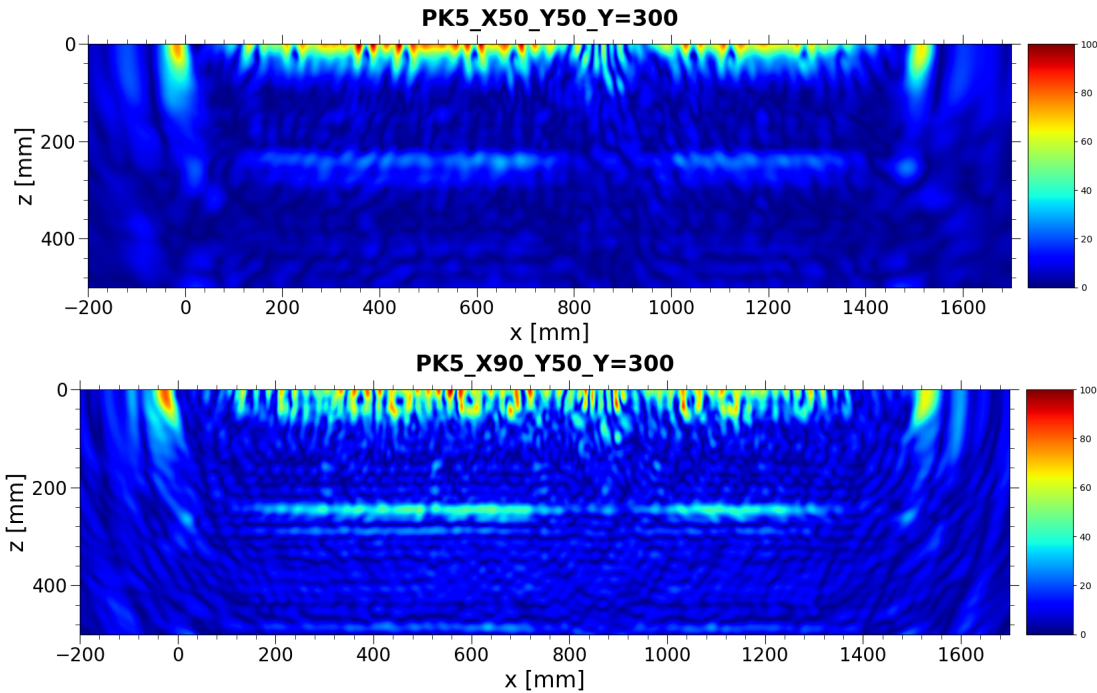


Abbildung 7.4: SAFT-Rekonstruktionen (B-Bilder) der mit den Geräten A1040 Mira (oben) und A1040 Mira 3D Pro (unten) an PK 5 bei $y = 300$ mm ermittelten Ultraschalldaten.

In beiden in den Abbildungen 7.3 und 7.4 gezeigten Fällen konnte sowohl mit dem A1040 Mira als auch mit dem A1040 Mira 3D Pro die Probengeometrie korrekt dargestellt werden. Das Rückwandecho wird in einer Tiefe von 250 mm als waagerechte Linie angezeigt. Die seitlichen Probenränder sind anhand der, an den Positionen $x/y = 0$ mm/250 mm bzw. $x/y = 1500$ mm/250 mm auftretenden, Winkelspiegelanzeigen zu erkennen. Dabei werden die Wellen, die in einem Winkel von 45 % auf die Seitenfläche (yz-Ebene) treffen, in dieselbe Richtung zurückreflektiert, aus der sie gekommen sind. Darüber hinaus lassen sich Störungen der Rückwandanzeige und Irregularitäten in der Oberflächenwelle an der Rissposition 860 ± 10 mm identi-

zieren. Die Irregularitäten resultieren daraus, dass die Schallübertragung von einer Rissflanke zur anderen im Bereich der Oberfläche durch den Luftspalt nicht möglich ist bzw. nur in stark abgeschwächter Form erfolgen kann. Durch die Unterbrechung des Schallwegs auch in größerer Tiefe durch die vertikale Ausdehnung des Risses werden Anteile der Rückwand nicht mehr mit der selben Amplitude dargestellt wie in rissfreien Probenbereichen.

Auffällig ist jedoch, dass die Darstellung der mit dem A1040 Mira aufgenommenen Daten nicht ganz so detailliert erscheint wie die der Daten des Nachfolgemodells. Die Bewehrungslage ist beispielsweise bei der Messung mit dem Mira 3D Pro an PK 4 (Abb. 7.3 (oben)) klar in einer Tiefe von etwa 125 mm zu erkennen, während diese in Abb. 7.3 nicht zu erkennen ist. Zudem ist das Rückwandecho stärker ausgeprägt. Ein möglicher Grund könnte das Vorhandensein einer, durch die unterschiedlichen Prüfkopfabstände begünstigte, stärkeren Oberflächenwelle sein, die durch die Normierung dominanter als die erwähnten Details dargestellt wird. Die Normierung erfolgt in der Regel so, dass der maximalen Amplitude des Bildes der Wert 100 % in der Farbskala zugeordnet wird. Die Einfärbung der Pixel erfolgt demnach im Verhältnis zu diesem Maximalwert. Durch eine andere Wahl des Normierungswertes kann man das B-Bild digital verstärken. Die Qualität der mit dem A1040 Mira aufgenommenen Daten ist dennoch akzeptabel und für die hier betrachteten Prüfungen geeignet.

7.1.2 Cosinus-Filter

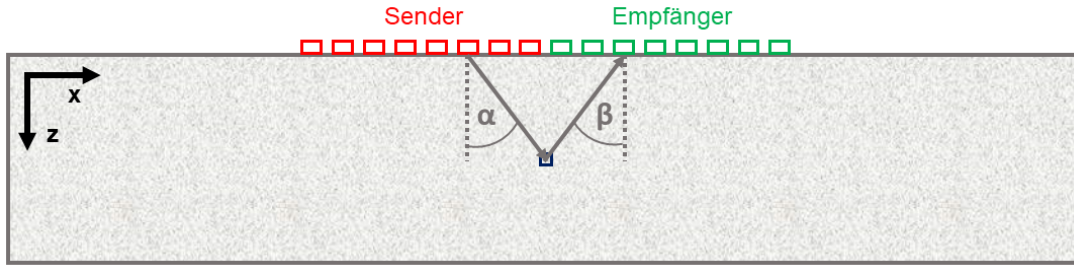


Abbildung 7.5: Prinzip des Cosinus-Filters bei der SAFT-Rekonstruktion. Oberflächennahe Anteile des Signals werden mit steigendem Winkel α und/oder β abgeschwächt.

Eine Möglichkeit zur Verbesserung der Anschaulichkeit der Abbildungen stellt die Abschwächung der Oberflächenwelle dar. Dies kann beispielsweise durch einen „Cosinus-Filter“ erreicht werden. In Anlehnung an Gleichung 2.24 und Abbildung 7.5 erfolgt die Filterung wie folgt:

$$I(\underline{R}_j) = \sum_{i=1}^n S(\underline{E}_i, \underline{R}_i, t_{ij}) \cdot \cos(\alpha) \cdot \cos(\beta). \quad (7.1)$$

Folglich werden Pixel in der Nähe der Oberfläche, das heißt jene, die einen großen Winkel mit Sender und/oder Empfänger einschließen, abgeschwächt dargestellt. Beispielsweise wurden B-Bilder der Spur $y = 300$ mm für PK 4, PK 5 und PK 6 unter Verwendung dieses Filters rekonstruiert (Abb. 7.6, 7.7 und 7.8). Im Vergleich zu den Abbildungen zuvor wurden die Einflüsse der Oberflächenwelle merklich reduziert bzw. entfernt. Die oberflächennahen Anzeigen der Probenkanten bei $x = 0$ mm und $y = 1500$ mm fehlen ebenfalls. Die Bewehrungsstäbe lassen sich unter Zuhilfenahme des Bewehrungsplans und dem Verwenden einer geeigneten digitalen Verstärkung zweifelsfrei identifizieren. Dies liegt vor allem daran, dass die sonst stark ausgeprägte Oberflächenwelle nicht mehr den für die Normierung verwendeten Maximalwert der Amplitude stellt, sondern das B-Bild nun auf die Rückwandanzeige normiert wird. Die Rissposition ist ebenfalls klarer bei $x = 860$ mm für PK 4 und PK 5 bzw. bei $x = 1085$ mm für PK 6 anhand von oberflächennahen Anzeigen zu erkennen. Die Darstellung der Rückwandanzeige ist aufgrund der Normierung detaillierter als im ungefilterten B-Bild.

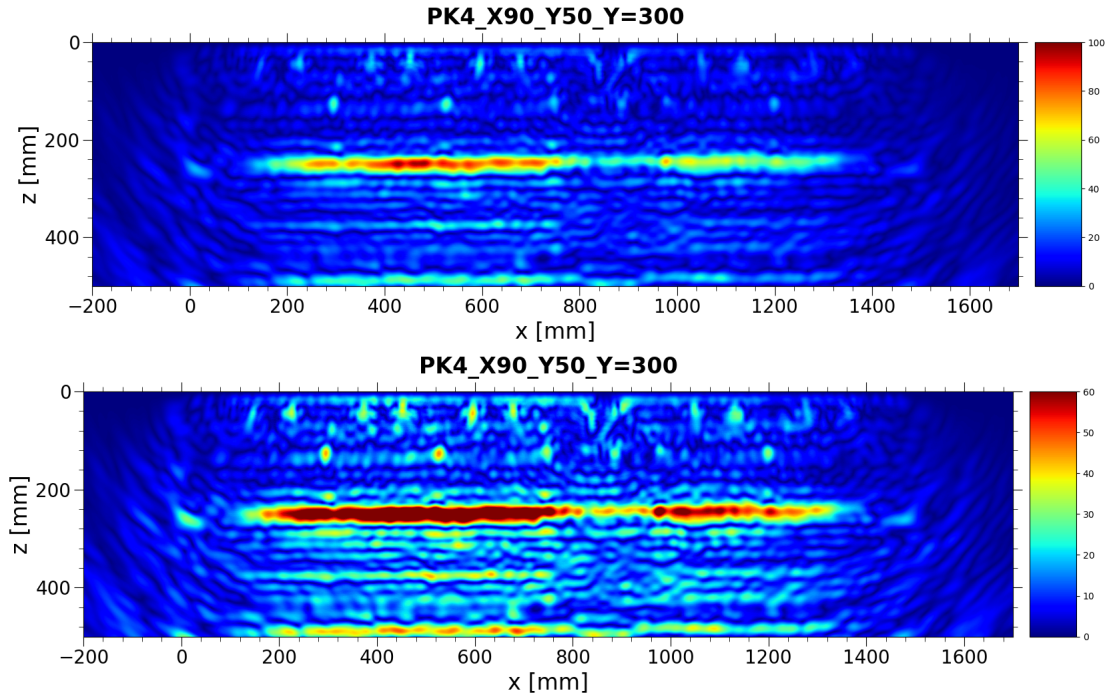


Abbildung 7.6: SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 4 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.

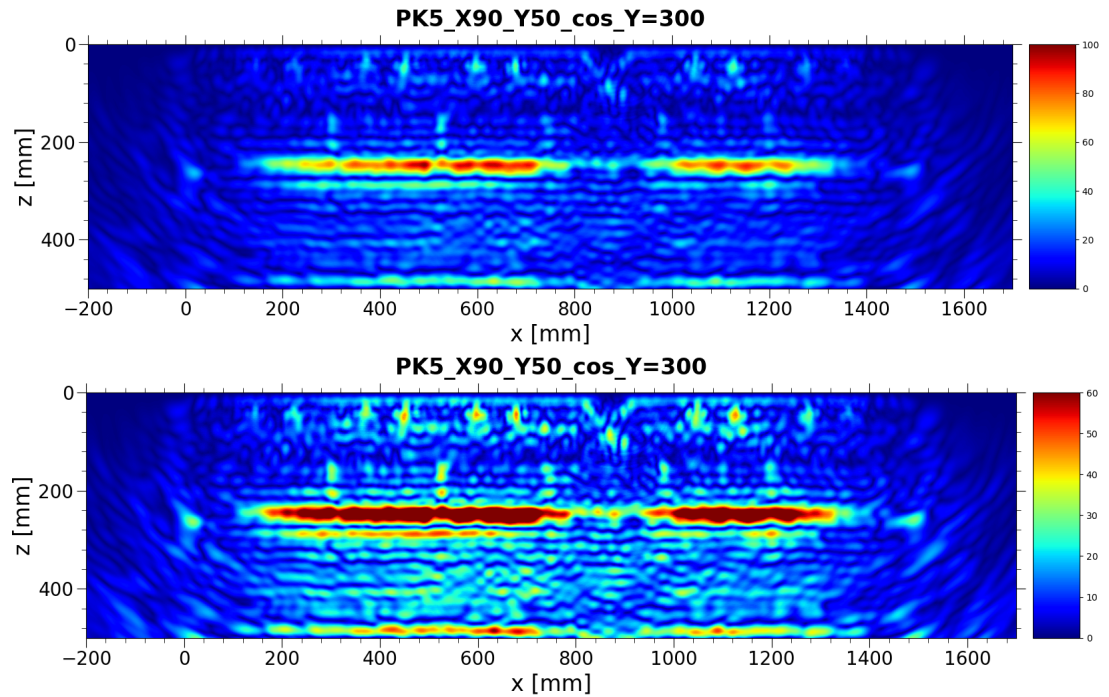


Abbildung 7.7: SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 5 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.

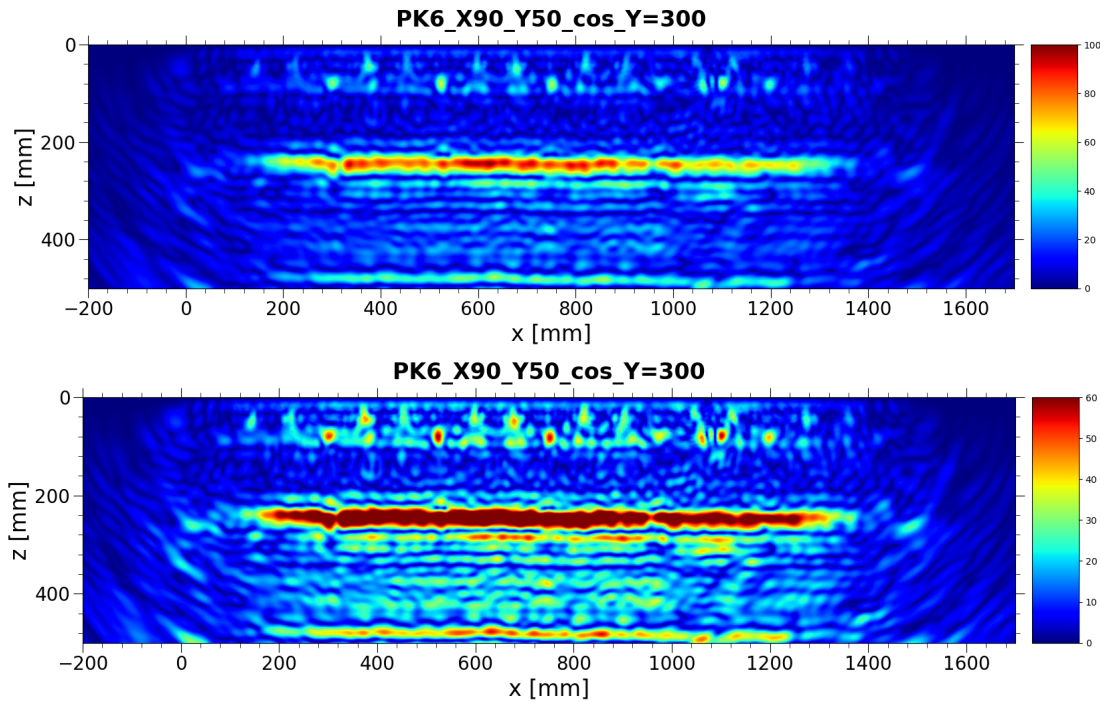


Abbildung 7.8: SAFT-B-Bilder der Messspur $y = 300$ mm für PK 6 mit Cosinus-Filter. Oben: Normierung auf die Maximalamplitude; unten: Normierung auf 60% der Maximalamplitude.

Es gilt also festzuhalten, dass die Identifikation eines Risses unter Verwendung von geeigneten Filtern zur Abschwächung der Oberflächenwelle und die Wahl einer geeigneten Verstärkung erleichtert werden kann. Der Verlust an Informationen im oberflächennahen Bereich ist jedoch bei der Bewertung der Messergebnisse zu beachten. Das dem Riss zugehörige Signal entstammt aus der Streuung der Welle an den Rissflanken als auch von der Streuung an der Risspitze. Es lässt sich festhalten, dass die verwendeten Geräte und die gewählten Parameter für die tomographische Untersuchung von Beton geeignet sind. Anhand dieser B-Scans ist jedoch keine genaue Bewertung der Risstiefe möglich. Es bedarf also weiterführenden Auswerteargorithmen und Prüfhypothesen.

7.1.3 Auswertung des Rissspitzensignals

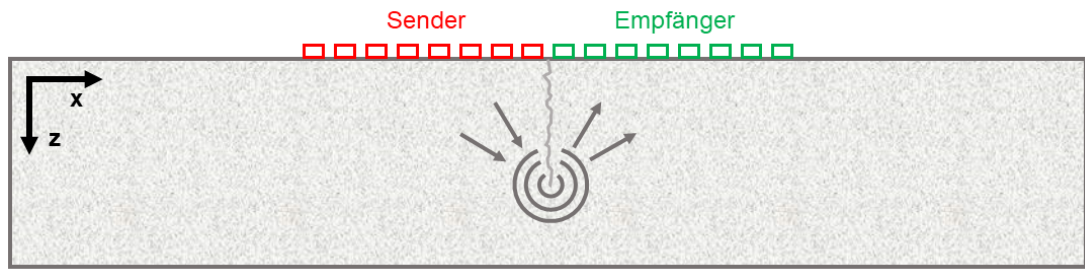


Abbildung 7.9: Messprinzip zur Extraktion des Rissspitzensignals.

Wie in Abb. 7.9 gezeigt, wird eine auf die Rissspitze treffende Welle gebeugt. Dieses Signal kann zur Bestimmung der Risstiefe genutzt werden. Das Rissspitzensignal wird jedoch von diversen anderen Signalen überlagert. Um es zu extrahieren, müssen die für die Rekonstruktion verwendeten Sender- und Empfängerpositionen so gewählt werden, dass der Riss zwischen ihnen liegt (Abb. 7.9). Dieses Messprinzip wird Time-of-flight diffraction genannt. Es wird in der Regel so angewandt, dass der Abstand Sender-Riss dem Abstand Riss-Empfänger entspricht und jeweils nur ein Element sendet und empfängt (siehe British Standard [39]). Darüber hinaus werden normalerweise lediglich A-Scans bzw. die Verschiebung der Laufzeit bei Änderung der Abstände und keine mit dem SAFT-Algorithmus rekonstruierten Bilder betrachtet. Der hier verwendete Ansatz kann somit als SAFT-TOFD bezeichnet werden.

Durch die Trennung der Transducer durch den Riss soll eine Einflussnahme der Oberflächenwelle auf die Messergebnisse verhindert werden. Um dies zu gewährleisten, wurde bei der Berechnung ein Intervall von einigen Millimetern um den Riss festgelegt, in denen sich keiner der an der Rekonstruktionsrechnung beteiligten Transducer befinden darf. Da der Riss nicht geradlinig verläuft, ist somit eine allgemeingültige Formulierung des Algorithmus für jede Messspur gegeben. Auch Ankopplungsfehler, bei denen ein DPC-Prüfkopf auf dem Riss aufsetzt, werden dadurch nicht in die Messung mit eingehen. Die Ergebnisse sind im Folgenden in Abbildung 7.10 und 7.11 dargestellt. Da nur der unmittelbare Bereich um den Riss von Interesse ist, wurde ein entsprechendes Abbildungsintervall festgelegt.

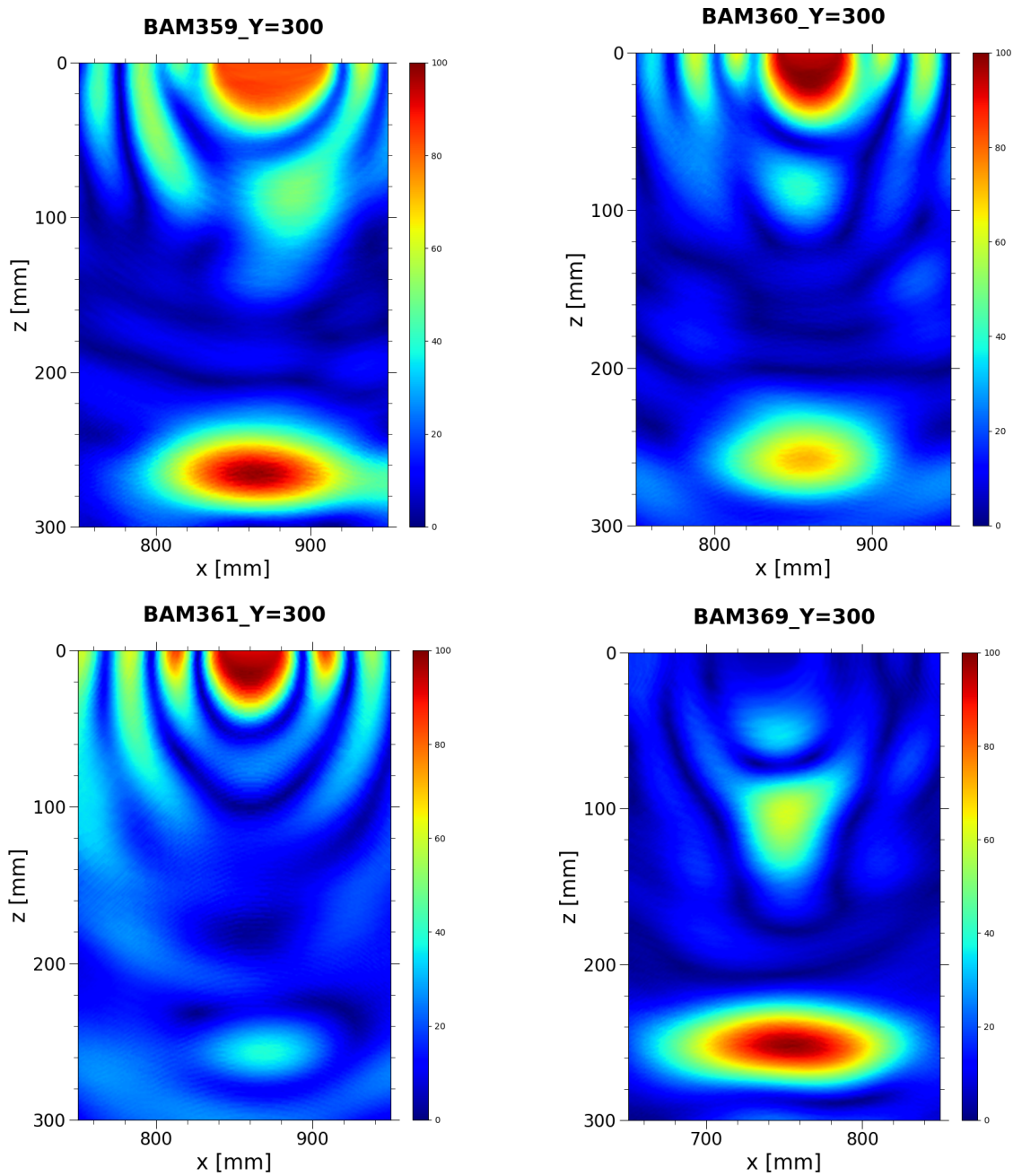


Abbildung 7.10: Risspitzenauswertung nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus der Messspur $y = 300$ mm für BAM 359, BAM 360, BAM 361 und BAM 369.

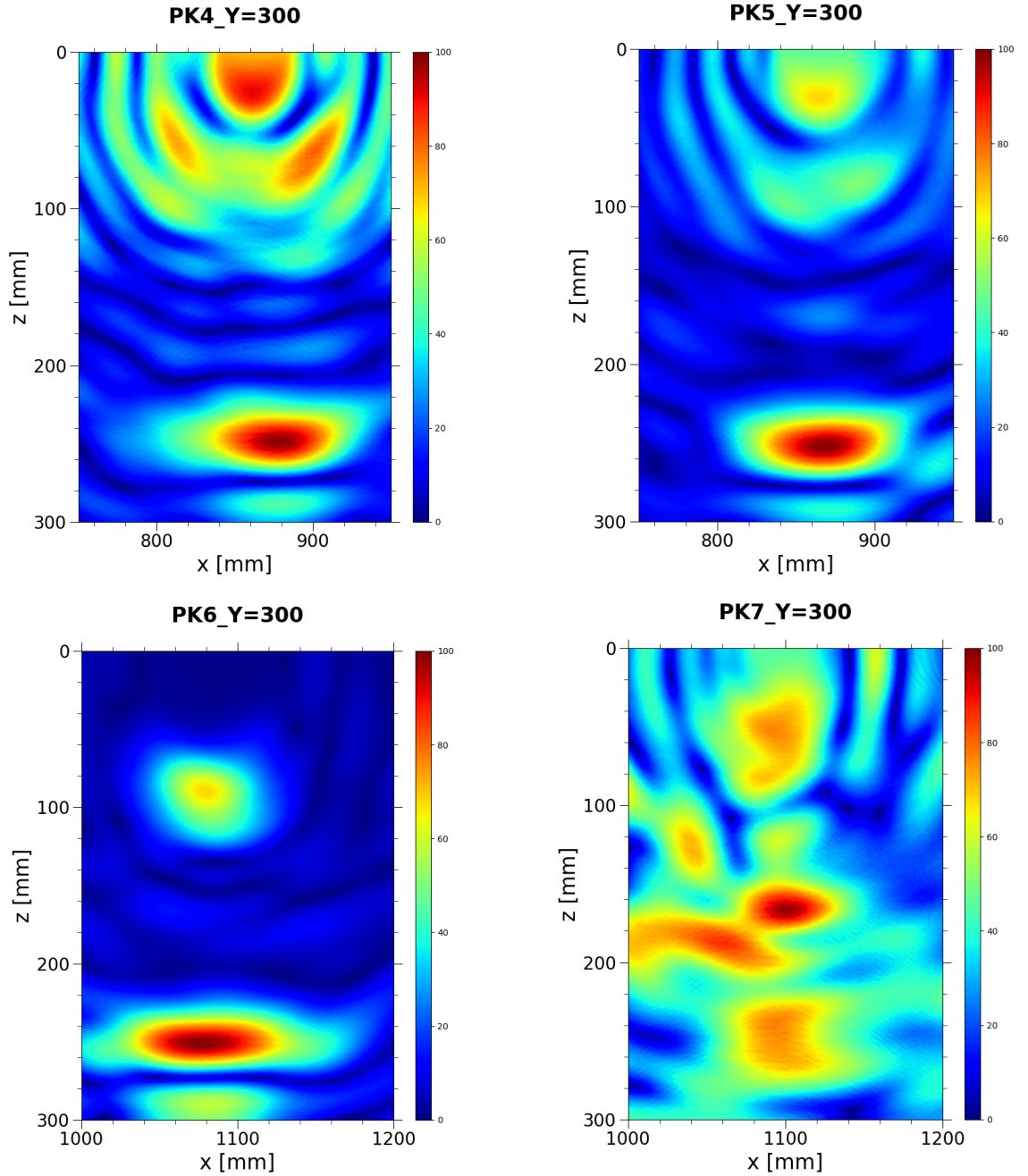


Abbildung 7.11: Risspitzenauswertung nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus der Messspur $y = 300$ mm für PK 4, PK 5, PK 6 und PK 7.

Dass der Algorithmus funktioniert, kann man anhand der Abbildung der Spitze des Sägeschnitts bei PK 6 erkennen. Es findet keine Schallübertragung entlang der Oberfläche statt, da beide Flanken ohne Berührungspunkte bis zur Spitze parallel zueinander verlaufen. Darüber hinaus wurden die Bewehrungsstäbe bei der Herstellung des künstlichen Fehlers ebenfalls durchtrennt und können somit nicht als

Schallbrücken fungieren. Das durch die Beugung der Ultraschallwelle an der Spitze des Schnittes entstehende Signal hebt sich klar vom Gefügerauschen ab und setzt bei der erwarteten Tiefe von etwa 70 mm an. Da somit neben der Rückwandanzeige keine weiteren distinkten Anzeigen zu erkennen sind, ist die Zuordnung des Spitzensignals in diesem Fall eindeutig.

Der nächste zu betrachtende Fall ist der des Probekörpers BAM 369. Dieser Probekörper wurde auch mit einer künstlichen Nut versehen, jedoch wurde die Längsbewehrung intakt gelassen. Daraus resultierend ist eine zweite Anzeige oberhalb der Nutspitze zu erkennen, die auf die als Schallbrücke fungierende Bewehrung zurückzuführen ist. Die Nut wird in der korrekten Tiefe von etwa 75 mm angezeigt.

Die Bewertung der Messergebnisse ist bei realen Rissen nicht so eindeutig. Beispielsweise kann bei der Messung von BAM 361 optisch kein Signal der Risspitze zugeordnet werden. Auch die Anzeigen bei BAM 359 (2. Bewehrungslage bei 85 mm) können auch auf die Bewehrung zurückzuführen sein. Besonders auffällig ist die Rekonstruktion bei PK 7: Es gibt eine Vielzahl an Anzeigen in Tiefen, bei denen nicht auf die Bewehrung als Ursache geschlossen werden kann. Es liegt die Vermutung nahe, dass der Riss sehr tief in den Probekörper hineinreicht und es darüber hinaus noch mehrere Schallbrücken gibt, die durch Berührungspunkte der Rissflanken hervorgerufen werden. Das Rückwandecho ist ebenfalls nicht so stark ausgeprägt wie bei den anderen Probekörpern. Abbildung 7.12 zeigt jedoch keine Winkelspiegelanzeigen auf, weshalb man nicht von einem Trennriss ausgehen kann.

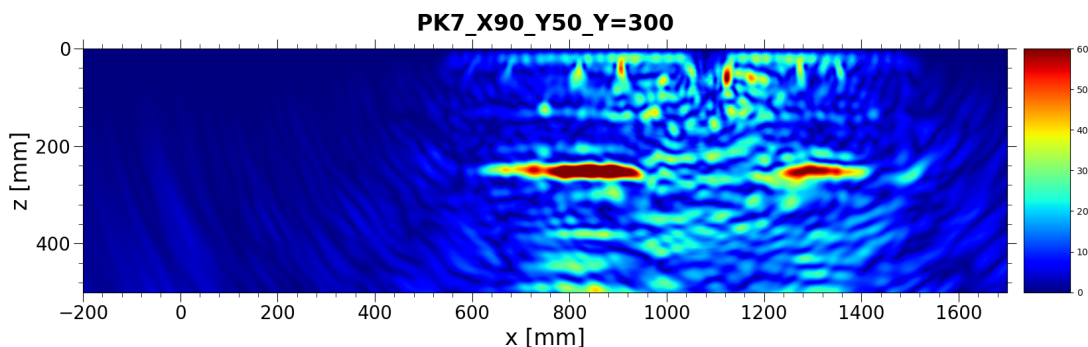


Abbildung 7.12: SAFT-B-Bild der Messspur $y = 300$ für PK 7 mit Cosinus-Filter; Normierung auf 60% der Maximalamplitude.

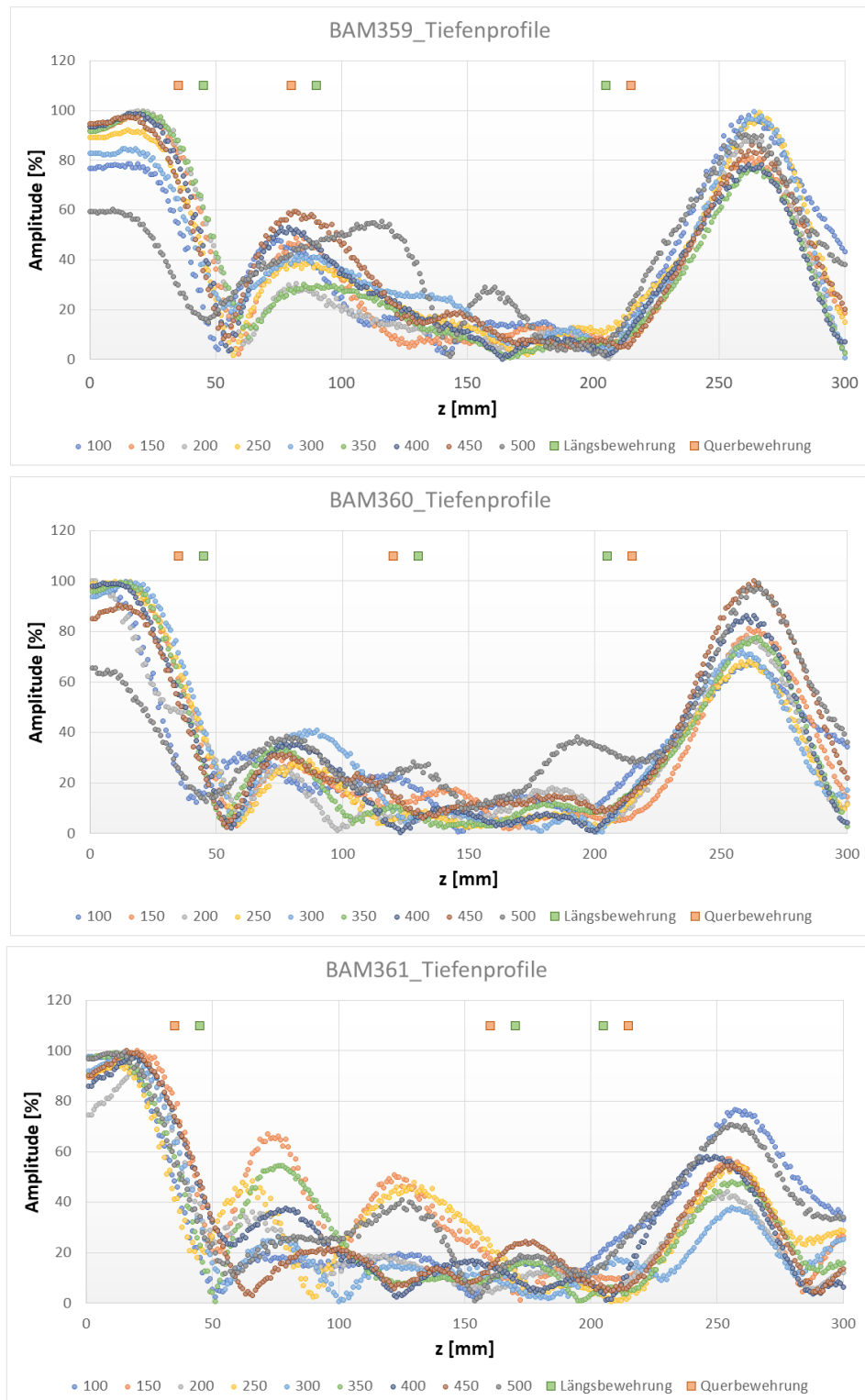


Abbildung 7.13: Tiefenprofile der Probekörper BAM 359, BAM 360 und BAM 361 an den jeweiligen Risspositionen. Die y-Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet.

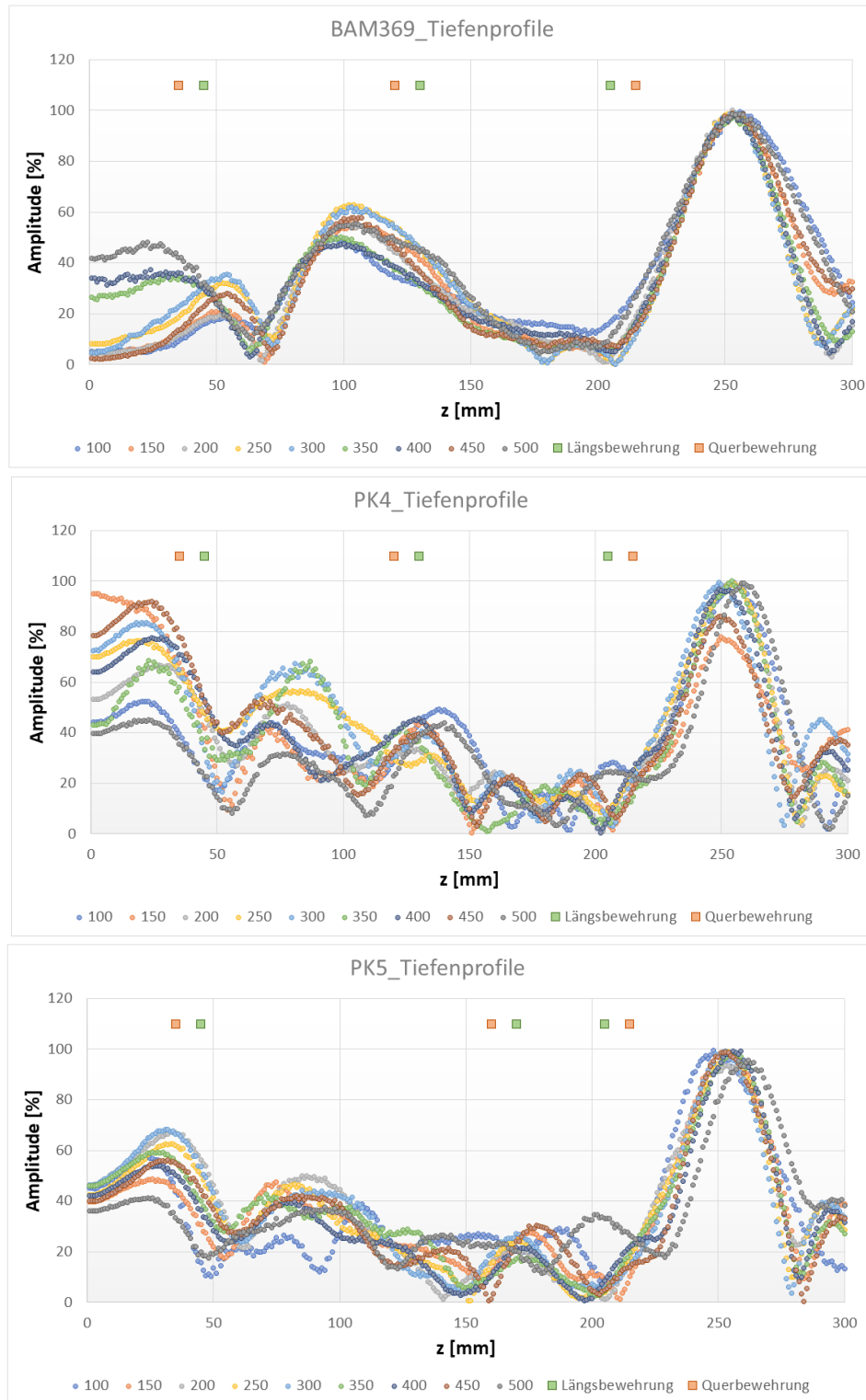


Abbildung 7.14: Tiefenprofile der Probekörper BAM 369, PK 4 und PK 5 an den jeweiligen Risspositionen. Die y-Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet.

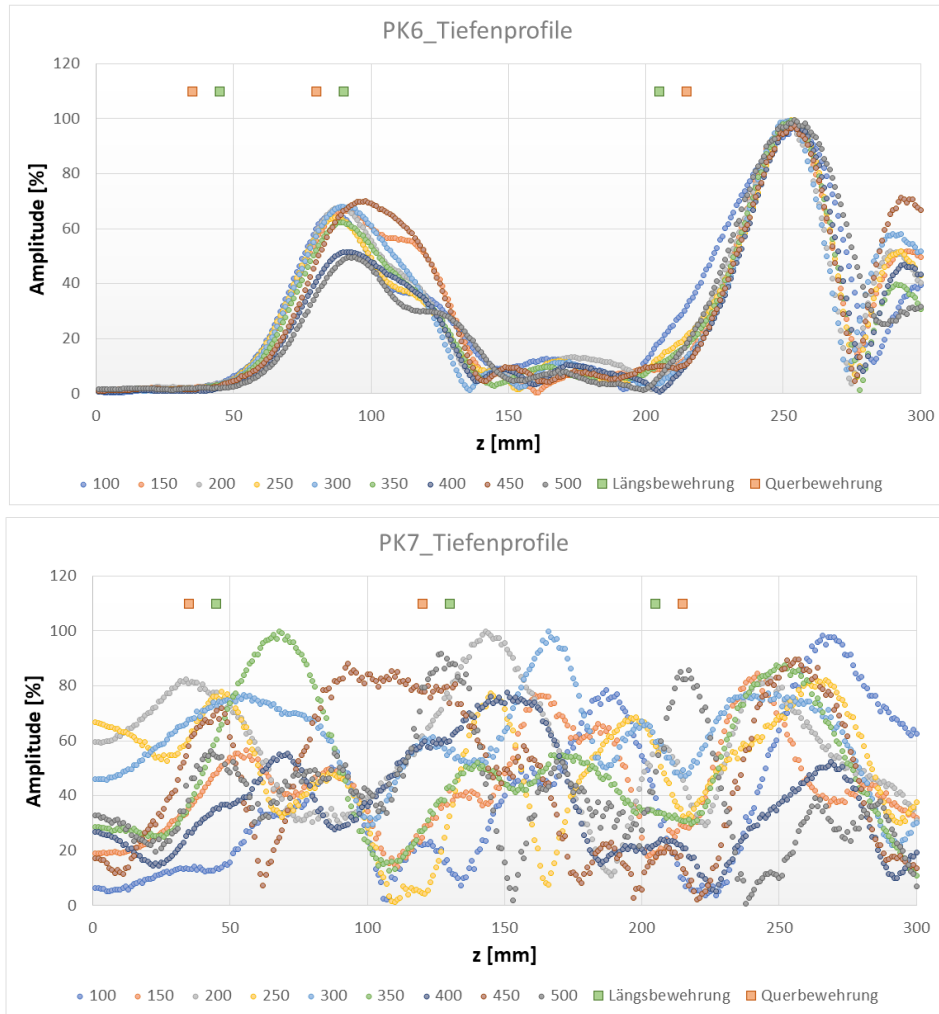


Abbildung 7.15: Tiefenprofile der Probekörper PK 6 und PK 7 an den jeweiligen Risspositionen. Die y-Positionen der den Tiefenprofilen zugehörigen Messspuren sind der Farbdarstellung und der Legende zu entnehmen. Die Bewehrungslagen sind durch orangene (Querbewehrung) und grüne (Längsbewehrung) Quadrate gekennzeichnet.

Eine Möglichkeit zur Ergänzung der aus den B-Bildern gewonnenen Informationen stellt das Extrahieren von Tiefenprofilen dar. Hierzu wurde die der Rissachse entsprechenden x-Position optisch aus den B-Bildern bestimmt und der Amplitudenverlauf in Tiefenrichtung aufgetragen. Die Verläufe sind in den Abbildungen 7.13-7.15 für alle Messspuren und sämtliche Probekörper aufgetragen. Die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse ist an der ähnlichen Ausprägung der Amplitudenverläufe der einzelnen Spuren zu erkennen. Ein ideales Rissspitzensignal ist stark ausgeprägt und geht mit dem Fehlen einer Oberflächenwelle einher. Paradebeispiele hierfür stellen

die Tiefenprofile von BAM 369 und PK 6 dar. Der einzige, sich nennenswert vom Gefügerauschen abhebende, Peak kann hierbei eindeutig der Nutspitze zugeordnet werden. Die bekannten Nuttiefen konnten nicht exakt anhand des dazugehörigen Maximums bestimmt werden. Die Tiefenlage scheint bei solchen künstlichen Fehlern durch die Breite der Peaks überschätzt zu werden. In diesen Fällen ist es also ratsam, die Nuttiefe anhand des Wendepunkts der linken Flanke zu bestimmen. Zusätzlich zum Nutspitzensignal sind bei BAM 369 Reflexionen an den Bewehrungsstäben in 40 mm Tiefe zu erkennen. Bei den durch Sprengmörtel erzeugten Rissen kommen zusätzlich noch Störeinflüsse durch das Vorhandensein von Schallbrücken durch sich berührende Rissflanken hinzu. Eine Aussage über die Risstiefe bzw. die zweifelsfreie Identifikation des Rissspitzensignals ist somit nicht ohne weitere Überlegungen möglich. Diese Problematik wird besonders am Beispiel von PK 7 deutlich. Die Amplitudenverläufe der einzelnen Messspuren unterscheiden sich in diesem Fall deutlich in der Form, Ausprägung und Position der Peaks.

Der nächste Schritt, die Bestimmung der Risstiefe anhand von Tiefenprofilen, ist in den Abbildungen 7.16-7.18 dargestellt. Für jede Spur wurde die Risstiefe einmal als Maximum der Amplitude im Intervall $z = 50-200$ mm (blaue Linie) und einmal manuell unter Berücksichtigung der Bewehrungslage (grüne Linie) bestimmt. Zusätzlich wurden die zuvor optisch an den Seitenflächen bestimmten Risstiefen als waagerechte Geraden aufgetragen. Auch hier fällt die Überschätzung der Nuttiefe von bis zu 30 mm an den künstlichen Fehlern auf. Da die Spitze der natürlichen Rissen räumlich nicht so weit ausgedehnt ist wie die der künstlichen Fehler, sind diese Peaks schmaler. Die Überschätzung der Risstiefe ist daher vermutlich nicht so stark ausgeprägt. Die Risstiefe an den Seitenflächen stellt eine gute Orientierungshilfe zur Bewertung der Messergebnisse dar. Grundsätzlich bewegen sich die akustisch bestimmten Risstiefen in ähnlichen Tiefenbereichen wie die optisch bestimmten. Eine Annäherung an den aufgespannten Tiefenbereich kann durch Miteinbeziehen der Bewehrungslage in die Bewertung der Tiefenprofile erreicht werden. In einigen Fällen kann das lokale Amplitudenmaximum nämlich nicht der Risspitze zugeordnet werden. Es existieren oftmals niederamplitudigere Reflexionen in Tiefenlagen, die nicht den Bewehrungsstäben zugeschrieben werden können. Es ist also möglich,

dass das lokale Maximum entweder einem Bewehrungsstab oder einer Schallbrücke durch sich berührende Rissflanken zugehörig ist. Mit diesem Vorgehen lassen sich folglich reproduzierbar plausible Risstiefen bestimmen (s. Abb. 7.16-7.18). Eine automatisierte Bestimmung ist jedoch aus den oben genannten Gründen nicht ratsam und führt in einigen Fällen zu anderen Messwerten. Eine aufmerksame Interpretation der Diagramme durch den Prüfer ist somit unerlässlich. Ob die hier bestimmten Risstiefen wirklich der Realität entsprechen, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht nachgeprüft. Eine finale Beurteilung des Verfahrens erfordert eine Öffnung der Risse mit vorhergegangener Farbinjektion. Ein direkter Zusammenhang zwischen der Rissöffnung an der Oberfläche (s. Tab. 6.1) und der bestimmten Risstiefe konnte nicht nachgewiesen werden.

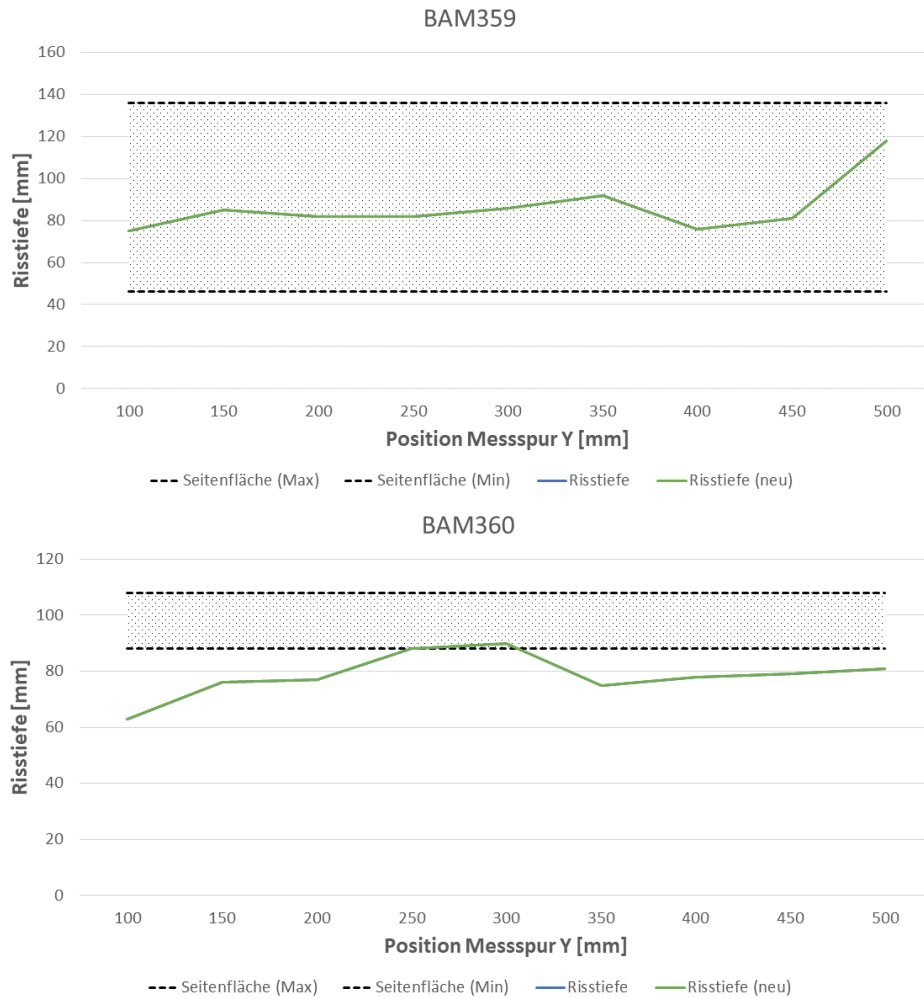


Abbildung 7.16: Tiefe der als Risspitzensignal identifizierten Amplituden für alle Messspuren der Probekörper BAM 359 und BAM 360. Blau: Maximum im Intervall $z = 50-200$ mm; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen.



Abbildung 7.17: Tiefe der als Rissspitzensignal identifizierten Amplituden für alle Messspuren der Probekörper BAM 361, BAM 369 und PK 4. Blau: Maximum im Intervall $z = 50\text{-}200\text{ mm}$; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen.

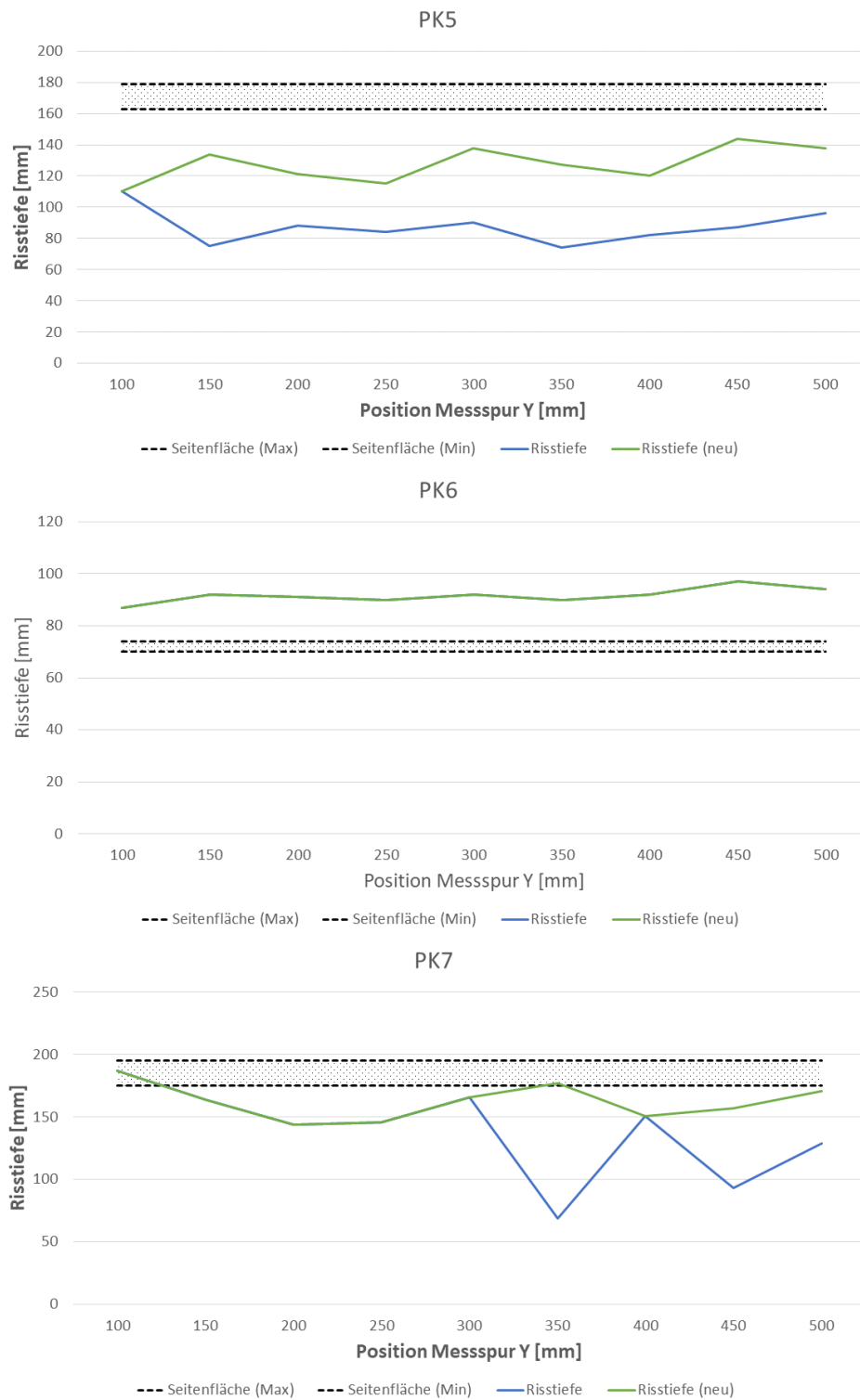


Abbildung 7.18: Tiefe der als Rissspitzensignal identifizierte Amplituden für alle Messspuren der Probekörper PK 5, PK 6 und PK 7. Blau: Maximum im Intervall $z = 50-200$ mm; Grün: Extraktion unter Einbeziehung von Bewehrungslage und Risstiefe an den Seitenflächen.

7.2 Messung entlang des Risses

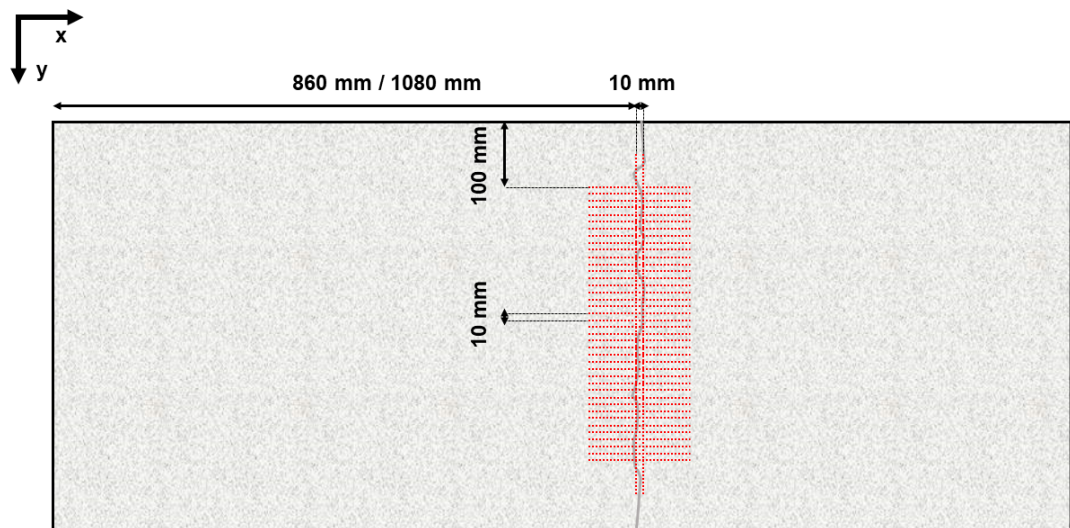


Abbildung 7.19: Schematische Darstellung des Messvorgehens bei der Messung entlang des Risses. Die Positionierung des Messgeräts erfolgt in den Schnittpunkten des Rasters. Eine Messung besteht somit aus 41×2 Messpunkten.

In den vorherigen Auswertungen wurden nur Messpositionen, bei denen die TOFD-Anordnung vorliegt, zur Rekonstruktion verwendet. Um die zur Verfügung stehende Datenmenge und damit die Qualität der Ergebnisse zu erhöhen, wurde gezielt der Bereich in direkter Umgebung des Risses verstärkt gescannt. Das Messprinzip ist in Abbildung 7.19 dargestellt. Es wurden zwei Messspuren mit je 41 Messpositionen untersucht. Der Abstand der Positionen zueinander betrug 10 mm in x- und y-Richtung. Das Rekonstruktionsvolumen befindet sich in einem Intervall der Breite 100 mm um die Rissposition. Es erstreckt sich von $y = 100\text{--}500$ mm und von $z = 0\text{--}300$ mm. Um die Aussagekräftigkeit der Messergebnisse zu erhöhen, wurden Referenzbereiche in rissfreien Bereichen mit äquivalenter Bewehrungslage gemessen. Bei der Rekonstruktion der C- und D-Bildern wurde die Pixelgröße 1 mm in x-, 10 mm in y- und 10 mm in z-Richtung gewählt. Die Normierung erfolgte für die rissbehafteten Bereiche auf die Maximalamplitude des jeweiligen Bildes. Für die zugehörige Referenzmessung wurde dieser Normierungswert übernommen.

7.2.1 Auswertung der Oberflächenwelle

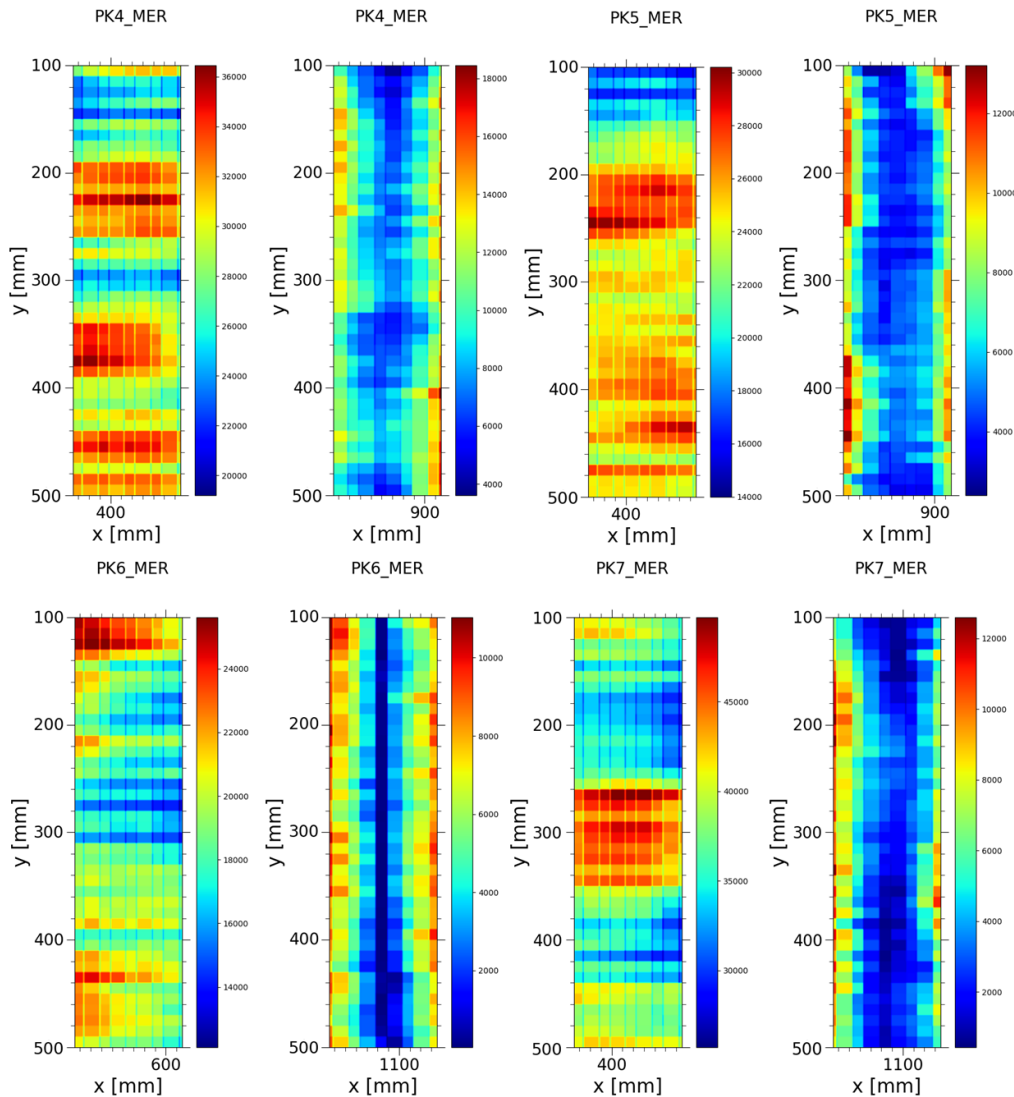


Abbildung 7.20: Auswertung der Oberflächenwelle (C-Bild) mit dem SAFT-TOFD-Algorithmus für PK 4 (oben links), PK 5 (oben rechts), PK 6 (unten links) und PK 7 (unten rechts). Für jeden Probekörper wurde eine Messung in einem rissfreien (Darstellung jeweils links) und im rissbehafteten (Darstellung jeweils rechts) Bereich vorgenommen und ausgewertet.

Zur Bestimmung der Rissposition in x-Richtung ist neben der Störung der Rückwandanzeige das Fehlen einer ausgeprägten Oberflächenwelle am besten geeignet. Hierzu wurde das Rekonstruktionsvolumen unter Verwendung des SAFT-TOFD-Algorithmus erstellt. Die für den Algorithmus verwendete hypothetische Rissposition wurde in dem Volumen vor jedem neuen Rechenvorgang in 1 mm-Schritten in

x-Richtung verschoben. Zum Betrachten der Oberflächenwelle wurde jeweils ein C-Bild in einer Tiefe von $z = 1$ mm extrahiert (s. Abb. 7.20).

Es ist klar zu erkennen, dass es in vertikaler Richtung in den Referenzbereichen keine Störungen in der Oberflächenwelle gibt. Wie erwartet, wird der künstliche Fehler bei PK 6 als klare vertikale Unterbrechung dargestellt. Es findet somit keine Schallübertragung statt, wenn sich Sender und Empfänger auf gegenüberliegenden Seiten dieser Position befinden. Doch auch die C-Bilder der natürlichen Risse lassen keinen Zweifel zu, dass ein Riss vorliegt. In allen Fällen ist ein stark ausgeprägtes Minimum in der Mitte des Intervalls, also an der zuvor optisch bestimmten Rissposition, zu erkennen. Die C-Bilder wurden nicht normiert und der Maximalwert als Maximum der Farbskala festgelegt. An den Referenzstellen sind die den jeweiligen Pixeln zugeordneten Amplitudenwerte mindestens doppelt so hoch wie die Amplitudenwerte in den rissbehafteten Bereichen. Es wird somit mehr Energie zwischen Sender und Empfänger übertragen. Generell könnte man mit dieser Methode auch unbekannte Risspositionen bestimmen, indem man den ganzen Probekörper nach diesem Prinzip abscannt und die Oberfläche als C-Bild darstellt.

Auch hier ist kein direkter Zusammenhang mit der Rissöffnung (s. Tab. 6.1) zu erkennen: Obwohl der Riss bei PK 4 an der Oberfläche weiter geöffnet ist als bei PK 5, ist das Signal bei PK 5 deutlicher ausgeprägt und das Minimum in x-Richtung breiter. Diese Beobachtung kann man auch anhand der Tiefenprofile in Abbildung 7.14 machen: Die Oberflächenwelle, also der erste Peak im Bereich $z = 0-50$ mm, zeichnet sich bei PK 4 mit einer im Durchschnitt höheren Amplitude als bei PK 5 aus.

7.2.2 Auswertung des Rissspitzensignals

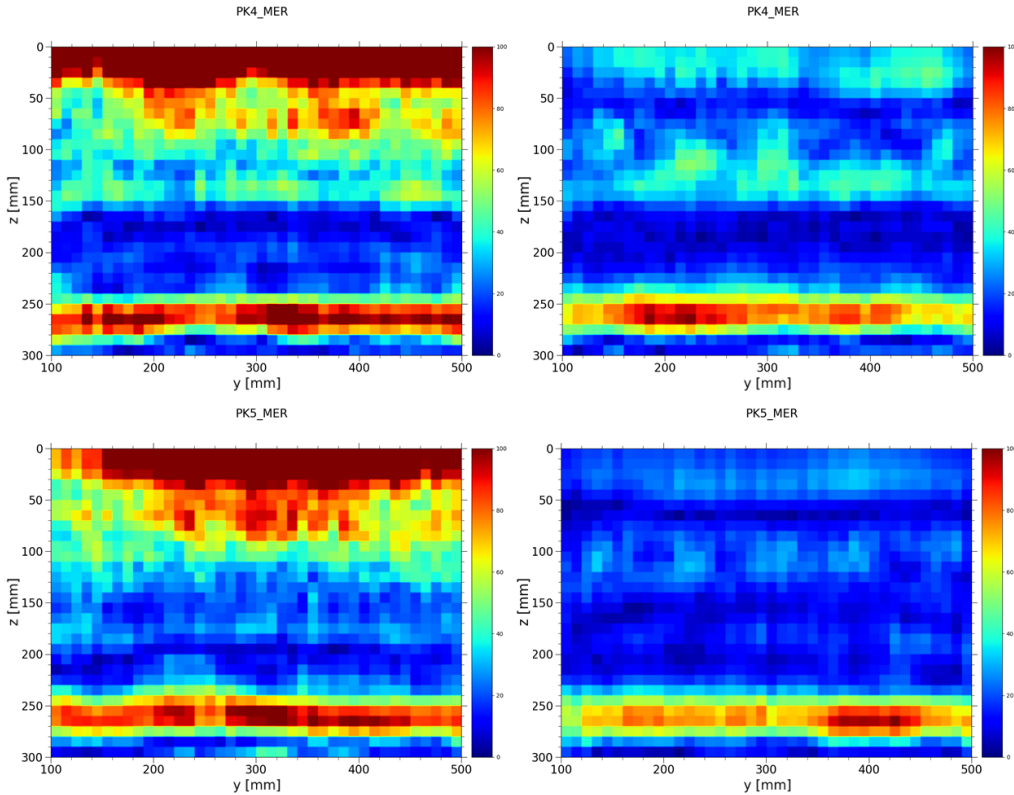


Abbildung 7.21: D-Bilder der per SAFT-TOFD-Alorithmus rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

Ermittelt man für jede Messspur die x -Position des Minimums der Oberflächenwelle, lässt sich ein D-Bild, das sich aus aneinandergereihten Tiefenprofilen zusammensetzt, darstellen. Das Ziel bei diesem Vorgehen ist es, die Rissposition für jede Messspur möglichst exakt zu bestimmen, um Störeinflüsse durch die Oberflächenwelle zu vermeiden und ein bestmögliches Signal der Rissspitze über die Breite des Probekörpers darzustellen. Anhand dieser D-Bilder lässt sich die Risstiefenentwicklung über den Querschnitt nachvollziehen. Die Ergebnisse für die einzelnen Probekörper sind in den Abbildungen 7.21 und 7.22 dargestellt. Da die Normierung für beide Probenbereiche auf die maximale Amplitude des rissbehafteten Bereichs erfolgt, sind die Signale der Oberflächenwelle und des Rückwandechos im rissfreien Bereich übersteuert. Damit vermeidet man jedoch, dass gemeinsame Anzeigen in den Riss-D-Bildern stärker und in den Referenz-D-Bildern schwächer dargestellt werden. Die Abbildungen sind

dadurch direkt miteinander vergleichbar. Generell gilt zu bemerken, dass die Rissposition bei der Fertigung der Probekörper stets so gewählt wurde, dass sich unterhalb des Risses keine Bewehrungslagen befinden. Bei einem klar ausgeprägten Minimum in der Oberflächenwelle und somit einer exakten Bestimmung der Rissposition durch den Algorithmus, werden die Einflüsse durch die Bewehrung minimiert.

Bei der Referenzmessung bei PK 4 sind Amplituden bis zu einer Tiefe von etwa 140 mm zu erkennen. Diese resultieren einerseits aus dem Energieübertrag direkt unter der Oberfläche, als auch von den Bewehrungslagen bei $z = 40$ mm und $z = 125$ mm. Der rissbehaftete Bereich weist diese Anzeigen, abgesehen von der Oberflächenwelle, ebenfalls auf. Ein distinktes Rissspitzensignal hebt sich jedoch nicht von diesen Signalen ab. Da sich die zuvor bestimmte Risstiefe in den Tiefenbereichen $z = 70$ mm - 140 mm bewegt, kann man hier davon ausgehen, dass der Riss die Stopperbewehrung, sprich die 2. Bewehrungslage in einer Tiefe von 125 mm, nicht überschreitet. Das Rissspitzensignal wird also in dieser Abbildungsform teilweise von den Reflexionen an den Bewehrungsstäben überlagert und kann nicht zweifelsfrei zugeordnet werden. Wie schon in Abbildung 7.14 zu sehen, sind die Amplituden bei PK 5 eher schwach ausgeprägt. Die ersten beiden Bewehrungslagen befinden sich bei $z = 40$ mm und $z = 165$ mm. In beiden D-Bildern sind an diesen Positionen Anzeigen zu erkennen. In einer Tiefe von etwa 80-140 mm sind im Bereich des Risses weitere Anzeigen erkennbar, die nicht der Bewehrung zuzuordnen sind. Es gilt zu vermuten, dass diese entweder durch Kontaktstellen der Rissflanken oder durch die Rissspitze selbst verursacht wurden.

Bei PK 6 (Abb. 7.22) fällt zunächst auf, dass das sonst gleichmäßig erscheinende Echo des Sägeschnitts und das Rückwandecho im Bereich $y = 100$ -270 mm schwächer ausgeprägt ist als im Rest des D-Bildes. Da dieser Effekt nicht durch die Tiefenprofile in Abbildung 7.15 bestätigt werden kann, ist er auf einen Messfehler zurückzuführen. Die Tiefenlage stimmt jedoch trotz der geringeren Intensität überein. Die Bewehrungslage bei $z = 40$ mm und $z = 85$ mm heben sich nicht vom Gefügerauschen und dem Spitzensignal ab. Zweitere ist jedoch im Referenzbild klar zu erkennen. Die Messergebnisse für PK 7 zeichnen ein Bild eines fast durchgehenden Risses. Die gemessene Risstiefe an den Seitenflächen (175 mm-195 mm) lässt diese Beobachtung

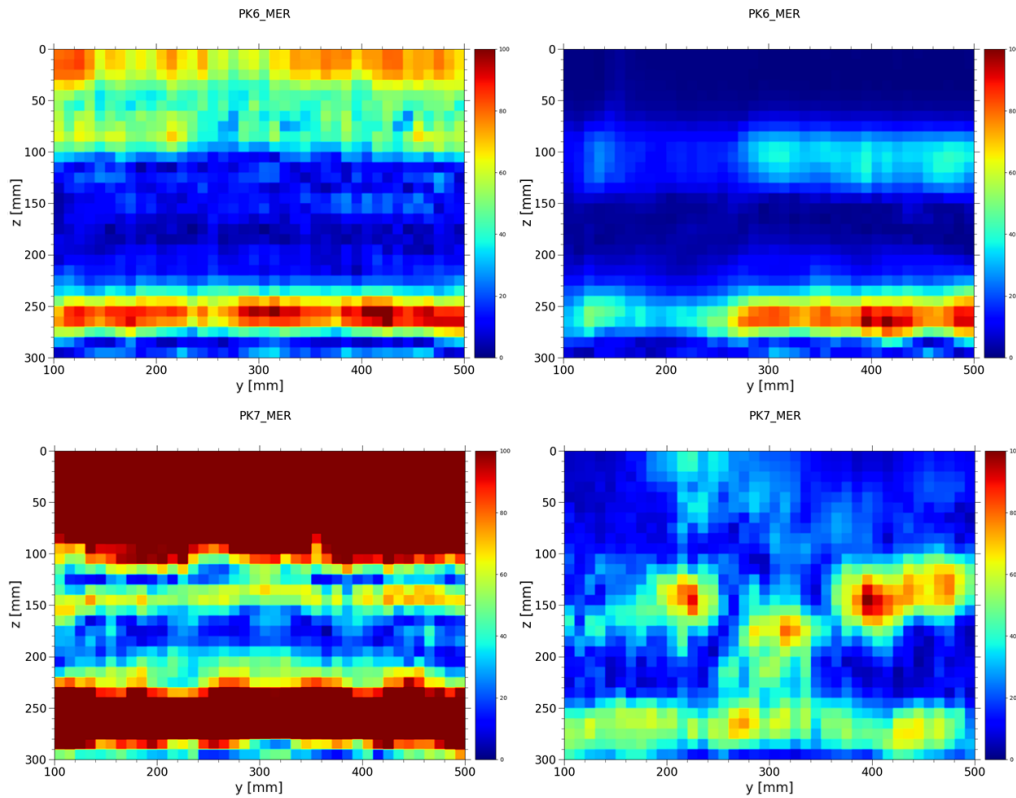


Abbildung 7.22: D-Bilder der per SAFT-TOFD-Alorithmus rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

realistisch erscheinen. Vor allem die tiefsten Anzeigen bei $y = 300$ mm lassen sich keiner Bewehrungslage (2. Bewehrungslage bei $z = 125$ mm) zuordnen. Das Rückwandecho ist bei diesem Probekörper ebenfalls stark abgeschwächt im Vergleich zu den anderen Messungen. Dies ist ebenfalls ein Anzeichen für eine stärkere Schädigung.

Aufgrund der bei allen Messungen schwach ausgeprägten bzw. fehlenden Oberflächenwelle lässt sich festhalten, dass die Rissposition hinreichend gut bestimmt wurde. Je stärker die Schädigung eines Probekörpers bzw. je größer die Risstiefe, desto stärker wird die Rückwandanzeige geschwächt. Folglich wird die registrierte Maximalamplitude niedriger und das D-Bild der Referenzmessung stärker übersteuert. Die nach diesem Verfahren bestimmten Risstiefen bestätigen die Ergebnisse in den Abbildungen 7.16-7.18.

Time-Gain-Compensation (TGC)

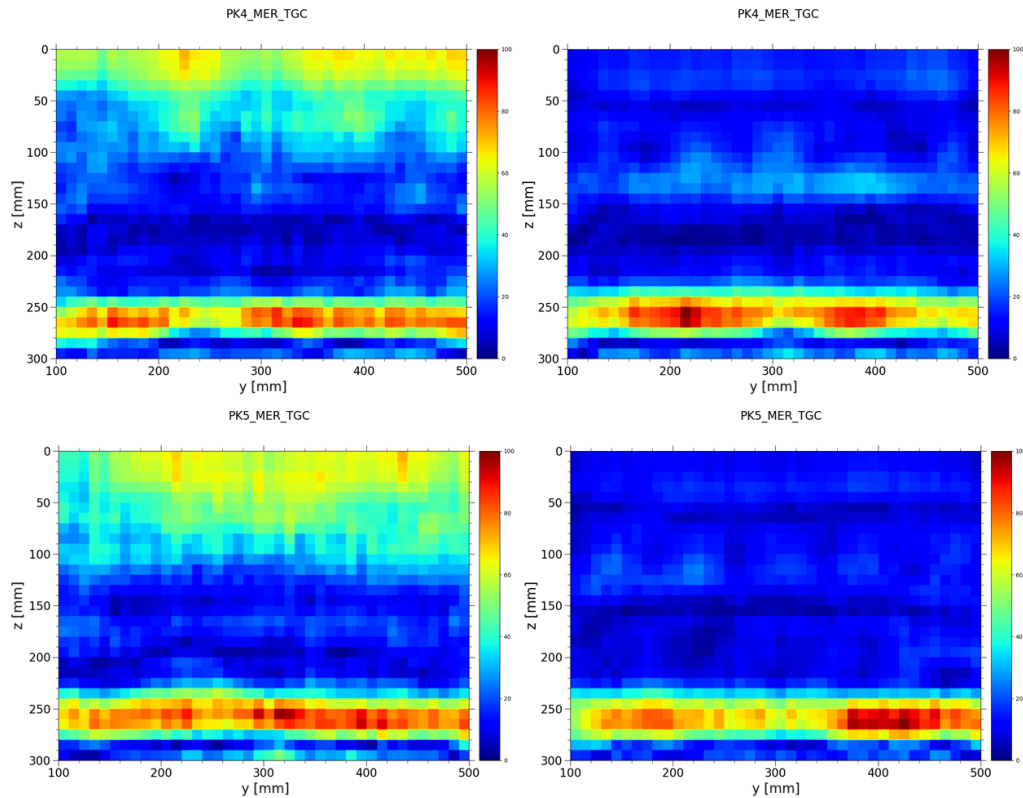


Abbildung 7.23: D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten) unter Verwendung der Time-gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

Mit zunehmender Eindringtiefe in das Prüfstück werden Schallwellen durch Streuerereignisse abgeschwächt. In den bisherigen Messergebnissen wurde dieser Effekt nicht berücksichtigt. Das A1040 Mira 3D besitzt eine Funktion, mit der man durch eine laufzeitabhängige Verstärkung die Amplituden tieferliegender Signale anheben kann. Die Funktion wird bei diesem Gerät Time-Gain-Compensation (TGC) genannt. Die Einstellung des TGC-Parameters erfolgte so, dass das Wiederholungsecho der Rückwandanzeige ($z = 500$ mm) in der geräteinternen Auswertung denselben Amplitudenwert aufweist, wie die Anzeige des Rückwandechos bei $z = 250$ mm. Dies ergab eine laufzeitabhängige Änderung der Verstärkung um $0,05$ dB/ μ s.

Unter Verwendung dieser Funktion wurden die Messungen entlang des Risses mit ansonsten identischen Parametern wie zuvor wiederholt. Die Ergebnisse für die Ober-

flächenwelle unterscheiden sich nicht von den Ergebnissen der TGC-freien Messung und werden hier nicht explizit gezeigt. Die D-Scans für die Auswertung des Riss-spitzensignals mit den Referenzmessungen sind in den Abbildungen 7.23 und 7.24 zu sehen. Generell lässt sich die Beobachtung machen, dass die Rückwandanzeige nun deutlich stärker dargestellt wird als zuvor und der Maximalwert der Farbskala bzw. der Amplitude auch in diesen Tiefenbereichen liegt und nicht mehr im Bereich der Oberflächenwelle. Die Reflexionen bei PK 4 und PK 5, die dem Riss oder oberflächennahen Bewehrungslagen zuzuschreiben sind, werden daher im farbkodierten Bild mit einer niedrigeren Amplitude als zuvor dargestellt. Das Signal ist zu schwach, um ohne zusätzliche digitale Verstärkung Aussagen treffen zu können. Das Signal für PK 6 zeigt diesmal keine einseitig ausgeprägte Amplitudenverteilung auf und entspricht der erwarteten Tiefe des Sägeschnitts von 72 mm. Da die Risstiefe bei PK 7 nahezu der Tiefenlage des Rückwandechos entspricht und die Normierung der Farbskala bereits bei der Messung ohne TGC auf das Rückwandecho erfolgte, hat die tiefenabhängige Verstärkung keinen großen Einfluss auf die Messergebnisse.

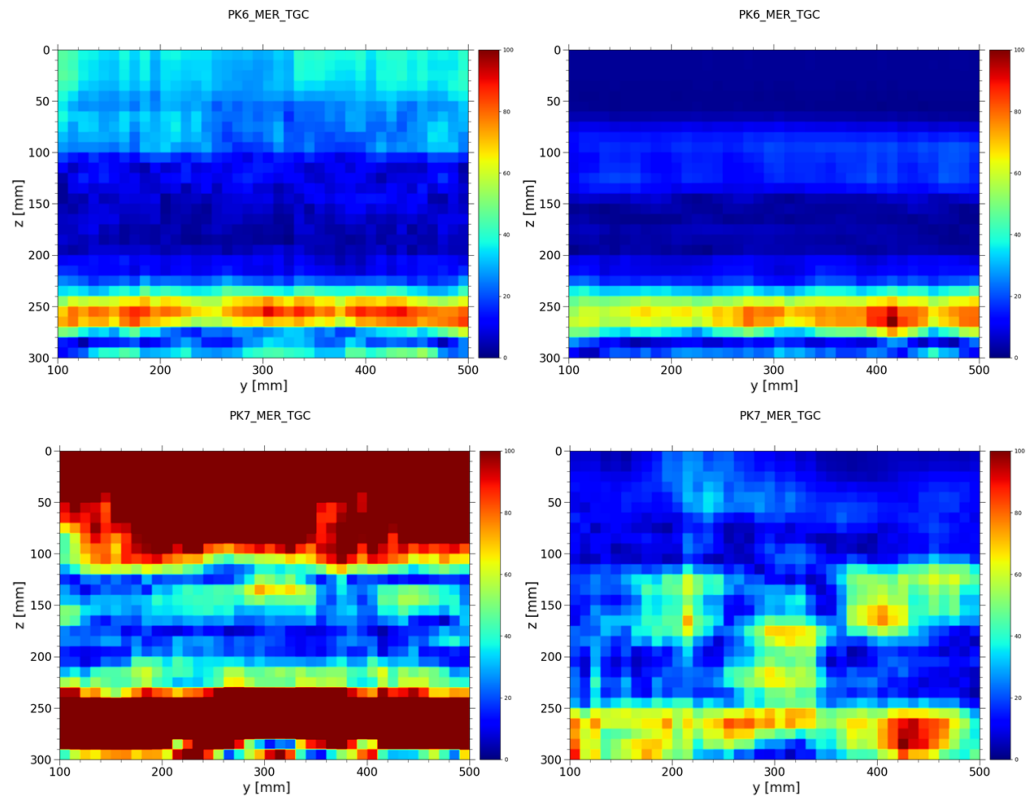


Abbildung 7.24: D-Bilder der per SAFT-TOFD-Algorithmus rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten) unter Verwendung der Time-Gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

7.2.3 Auswertung des Rissflankensignals

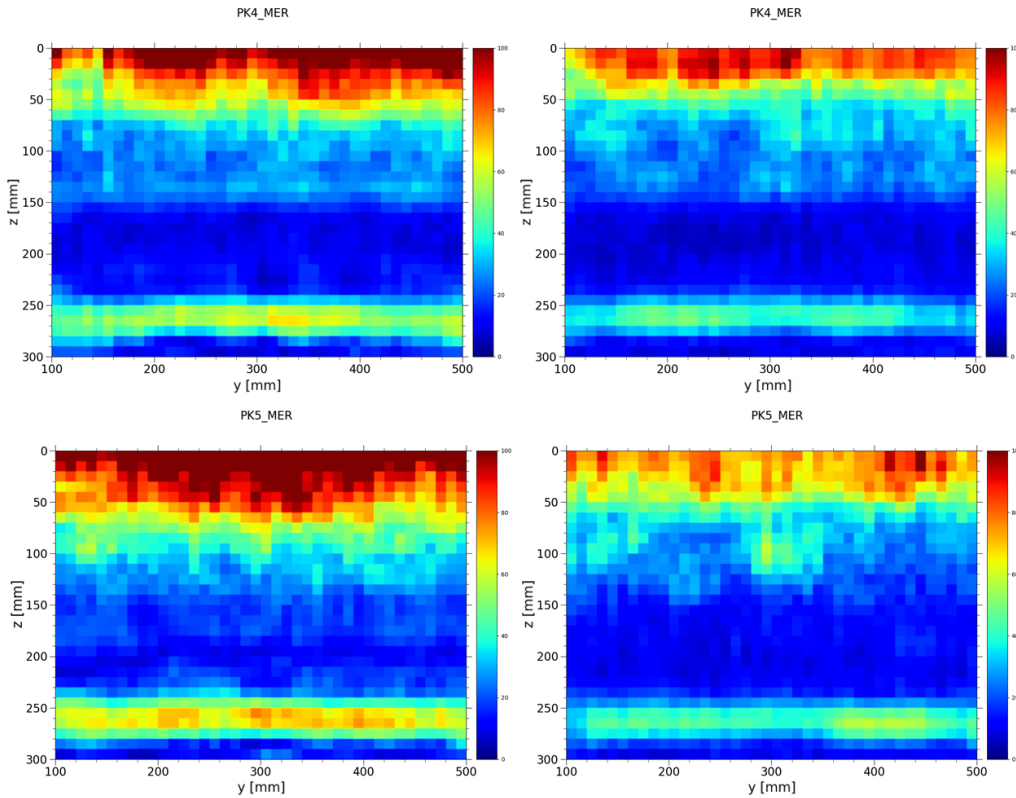


Abbildung 7.25: D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

Neben der Beugung der Ultraschallwelle an der Risspitze wird auch ein gewisser Anteil der eingekoppelten Energie an den Rissflanken gestreut. Ist dieser Betrag groß genug und über den gesamten Querschnitt vorhanden, sollte eine Abbildung der Rissflanke möglich sein. Zur Extraktion eben dieses Signals müsste man nur die beim SAFT-TOFD-Algorithmus ausgeschlossenen A-Scans zur Rekonstruktion benutzen. Da das Rissspitzensignal sich jedoch nur positiv auf das Messergebnis auswirken kann, werden auch die Messanordnungen, bei denen Sender und Empfänger durch den Riss getrennt sind, in die Auswertung miteinbezogen. Es wurde für jede Position y/z das Maximum des rekonstruierten Volumens bestimmt und als farbkodiertes D-Bild dargestellt. Auch hier wurde die Normierung auf den Maximalwert der Amplitude des rissbehafteten Bereichs festgelegt und für beide Prüfbereiche übernommen. Da die Detektion der Oberflächenwelle durch Verwenden der Mess-

positionen, die nicht dem SAFT-TOFD-Algorithmus entsprechen, nicht verhindert werden kann, ist das Referenzbild nicht so stark übersteuert wie bei der reinen Auswertung des Rissspitzensignals.

Generell lässt sich anhand der in den Abbildungen 7.25 und 7.26 dargestellten Ergebnisse festhalten, dass bei dieser Auswertung keine großen Unterschiede zwischen Riss- und Referenzbereich zu erkennen sind. Besonders bei PK 4 ist das einzige Unterscheidungsmerkmal die abgeschwächte Rückwandanzeige und die etwas weniger stark ausgeprägte Oberflächenwelle. Bei PK 5 ist die Oberflächenwelle im Rissbereich weniger dominant, weshalb man feinere Signaländerungen in einem Tiefenbereich bis etwa 140 mm erkennen kann. Wie in Abbildung 7.14 ersichtlich, ist die tiefer liegende Rissspitze im Vergleich zu den restlichen Amplituden nicht stark ausgeprägt, weshalb ein klar ausgeprägtes Rissspitzensignal nicht zu erkennen ist. Die Anzeigen, die man als Rissflanke interpretieren könnte, erstrecken sich jedoch bis zu einer, mit der ermittelten Risstiefe übereinstimmenden, Tiefenlage von $z = 120\text{-}140$ mm. Der Messfehler bei PK 6 ist auch bei diesem Auswerteverfahren zu erkennen. Die Spitze des Sägeschnitts hebt sich jedoch deutlich von der Oberflächenwelle ab. Bei PK 7 lässt sich, wie schon bei der Auswertung der Rissspitze, ein klares Rissflankensignal erkennen. Es gilt die Vermutung, dass diese Auswerteprozedur bei kleineren Risstiefen aufgrund von Überlagerungseffekten an seine Grenzen stößt. Bei größeren Risstiefen kann sie dabei helfen, die aus dem SAFT-TOFD-Algorithmus gewonnenen Informationen zu ergänzen und zu veranschaulichen.

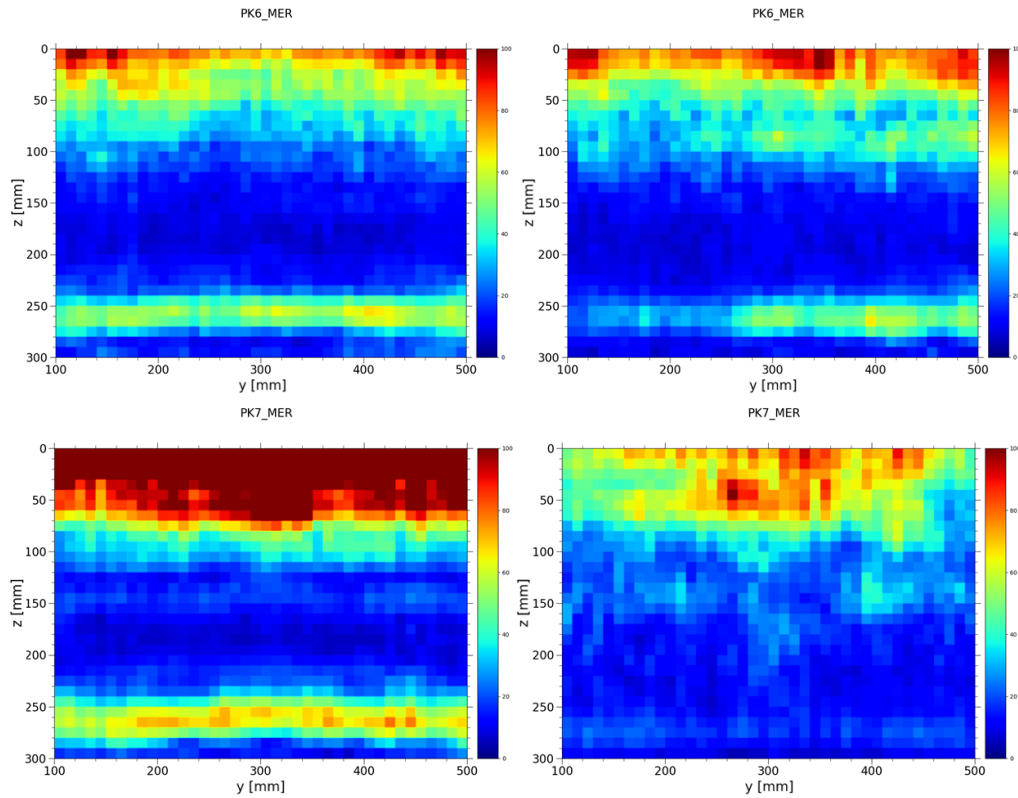


Abbildung 7.26: D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

Time-Gain-Compensation (TGC)

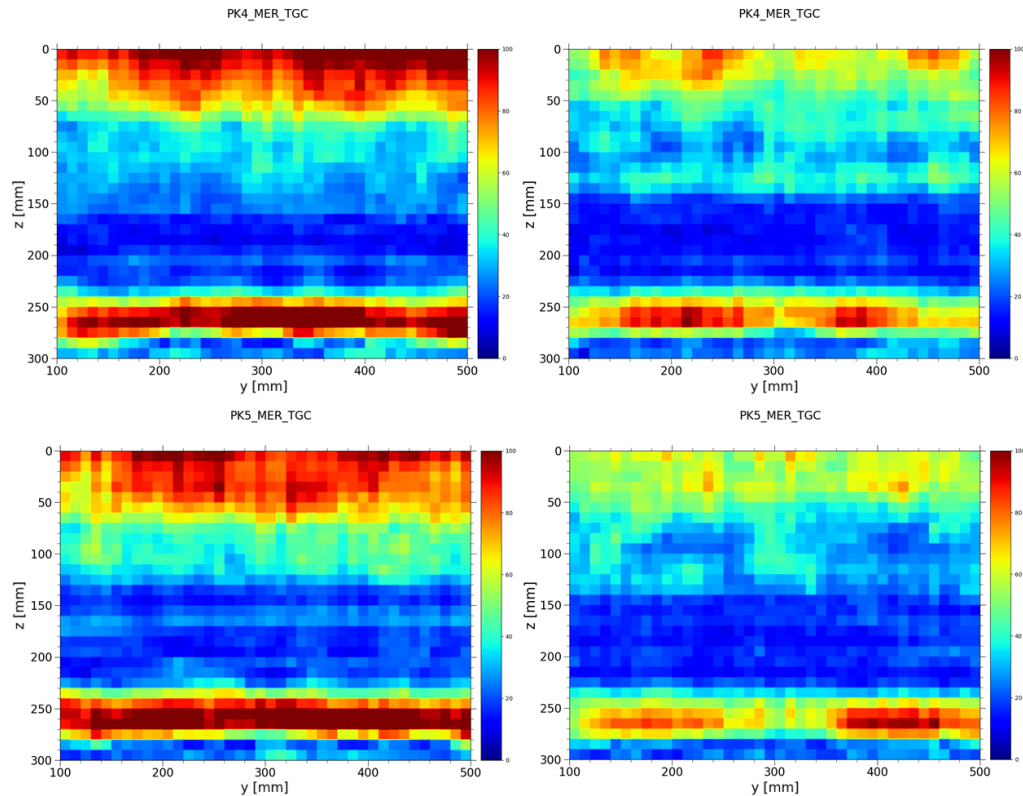


Abbildung 7.27: D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Ultraschalldaten der Probekörper PK 4 (oben) und PK 5 (unten) unter Verwendung der Time-gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

Die Qualität der Abbildung lässt sich mit der TGC-Funktion verbessern: Bei PK 4 ist die 2. Bewehrungslage ($z = 125$ mm) klar zu erkennen. In Bereichen näher an der Oberfläche lassen sich einzelne Reflexionen ausmachen, die zum Riss gehören. Bei PK 5 sind wieder einzelne Ausläufer des Fehlers bei $z = 100$ mm-150 mm zu erkennen. Im Vergleich zur Messung ohne TGC sind diese Ausläufer detaillierter und heben sich besser vom Gefügerauschen ab. Die Abbildungsqualität bei PK 6 wurde ebenfalls gesteigert. Der Sägeschnitt wird als Anzeige mit konstanter Amplitude über die Probenlänge dargestellt. Diese Verbesserung ist jedoch auf die neu durchgeführte Messung zurückzuführen. Die starke, bis in große Tiefen reichende, Schädigung bei PK 7 ist auch hier klar erkennbar. Durch die Verstärkung sind Reflexionen in tieferen Bereichen besser zu erkennen. Jedoch ist hier die Oberflächenwelle die normierende Anzeige, da die Amplitude der Rückwand sehr gering ausfällt. Die über fast das

gesamte D-Bild verteilten Anzeigen erwecken erneut den Anschein eines Trennrisses. Diese Vermutung wurde im Vorfeld bereits widerlegt.

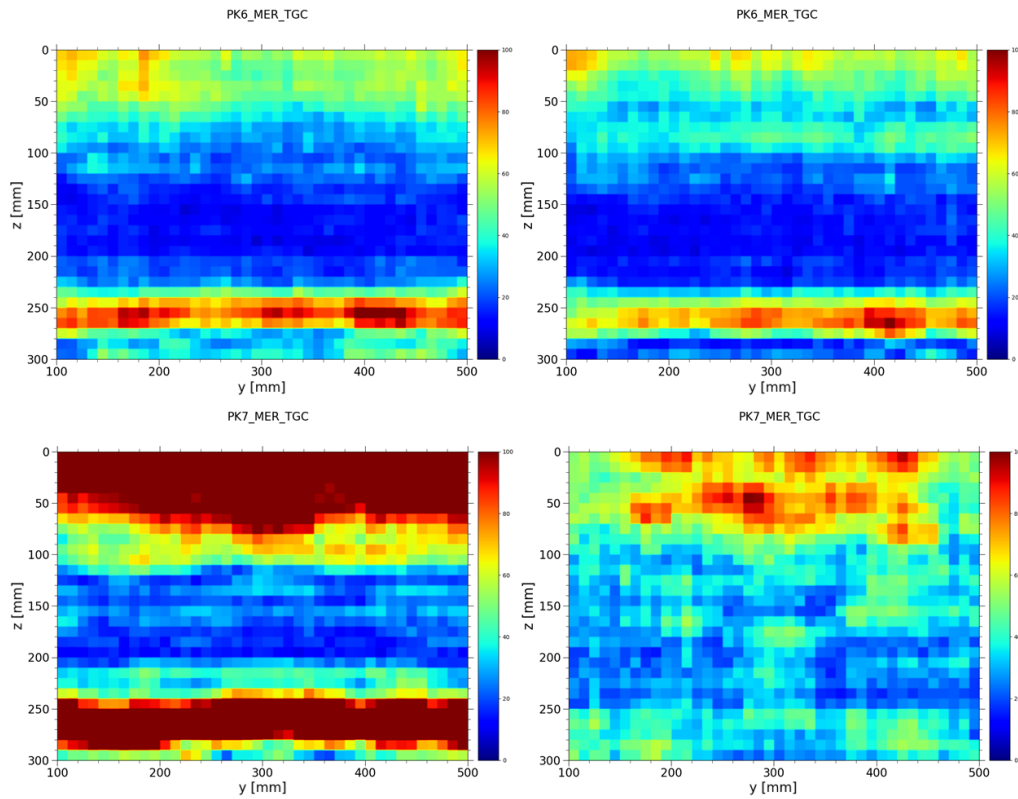


Abbildung 7.28: D-Bilder der mit allen aufgenommenen A-Scans rekonstruierten Probekörper PK 6 (oben) und PK 7 (unten) unter Verwendung der Time-Gain-Compensation. Der gemessene Referenzbereich (links) weist dieselbe Bewehrungslage auf wie der Bereich unmittelbar um den Riss (rechts).

7.2.4 Verrechnung mit Referenzsignal

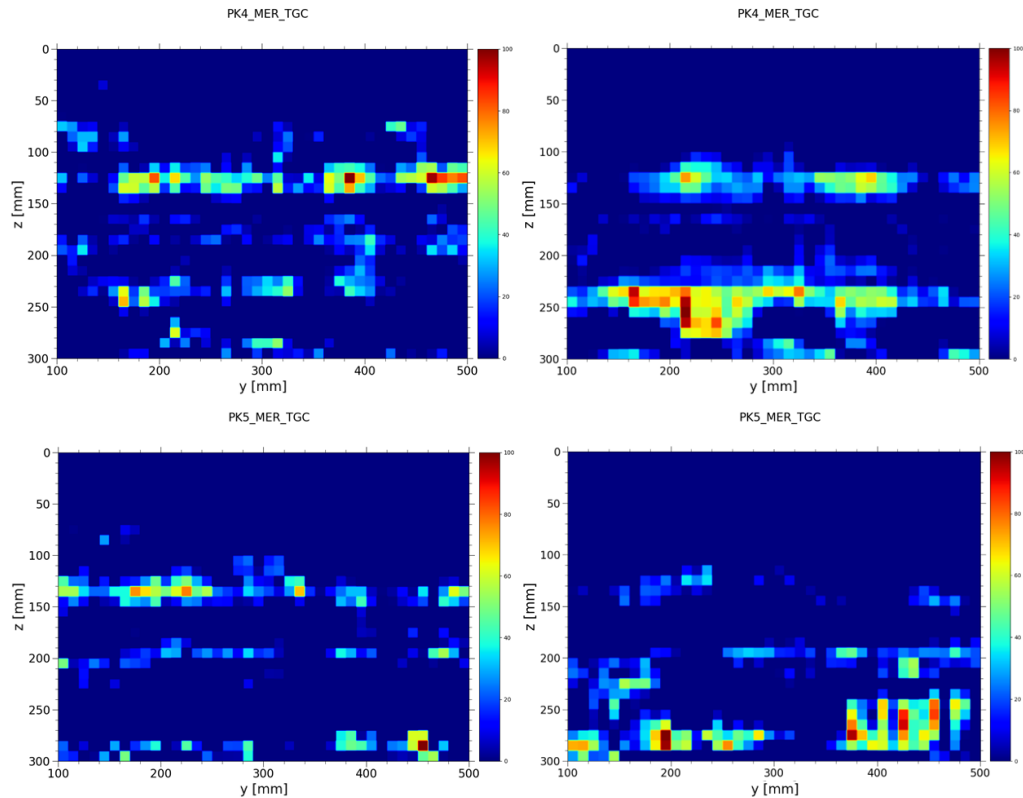


Abbildung 7.29: Differenz aus den rekonstruierten D-Bildern der Ultraschalldaten des Riss- und Referenzbereichs der TGC-Messung für PK 4 (oben) und PK 5 (unten). Links: für die Auswertung der Risspitze nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus; rechts: für die Auswertung des Rissflankensignals.

Ein rein optischer Vergleich mit einem Referenzbereich erfüllt nicht die Bedingung einer objektiven Auswertung der Messergebnisse. Bildet man die Differenz aus den D-Bildern des Rissbereichs und des Referenzbereichs, so sollten bei präziser Positionierung des Messgeräts nur die Amplituden übrig bleiben, die dem Riss zuzuordnen sind. Durch die stärker ausgeprägte Oberflächenwelle und Rückwandanzeige im rekonstruierten rissfreien Probenvolumen sollten diese Anzeigen ebenfalls nicht im Differenz-D-Bild auftauchen. Da die im Vorfeld betrachteten TGC-Messungen durchschnittlich bessere Messergebnisse liefern, wurden an ihnen dieser Auswertung vorgenommen. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 7.29 und 7.30 dargestellt. Auf der linken Seite ist jeweils die Differenz der Risspitzen- und rechts der Rissflankenbilder aufgetragen. Auch hier ist bei PK 4 kein klares Risspitzen oder -flankensignal zu erkennen. Einzig die Bewehrungslagen bei $z = 125$ mm und $z = 210$ mm hebt

sich deutlich ab. Teile der Rückwandanzeige werden noch dargestellt. Da die zweite Bewehrungslage bei PK 5 in einer Tiefe von 165 mm liegt, können die, vor allem bei der Rissspitzendifferenz, deutlichen Anzeigen bei $z = 140$ mm nur vom Riss stammen. Es lässt sich sagen, dass die Differenzbildung bei der Rissflankenauswertung keinerlei positiven Effekt auf die Darstellung des Rissverlaufs hat. Der Mehrwert dieses Auswertungsschrittes lässt sich jedoch anhand des Rissspitzenbildes ausmachen: Besonders bei PK 6 und PK 7 können ablenkende Anzeigen der Rückwand und der Oberfläche größtenteils entfernt werden. Die Ergebnisse können so auch von weniger erfahrenen Prüfern hinreichend gut beurteilt werden. Dass in einigen Fällen noch Reflexionen der Bewehrungsstäbe zu sehen sind, könnte an unzureichender Präzision bei der Durchführung der Messung liegen.

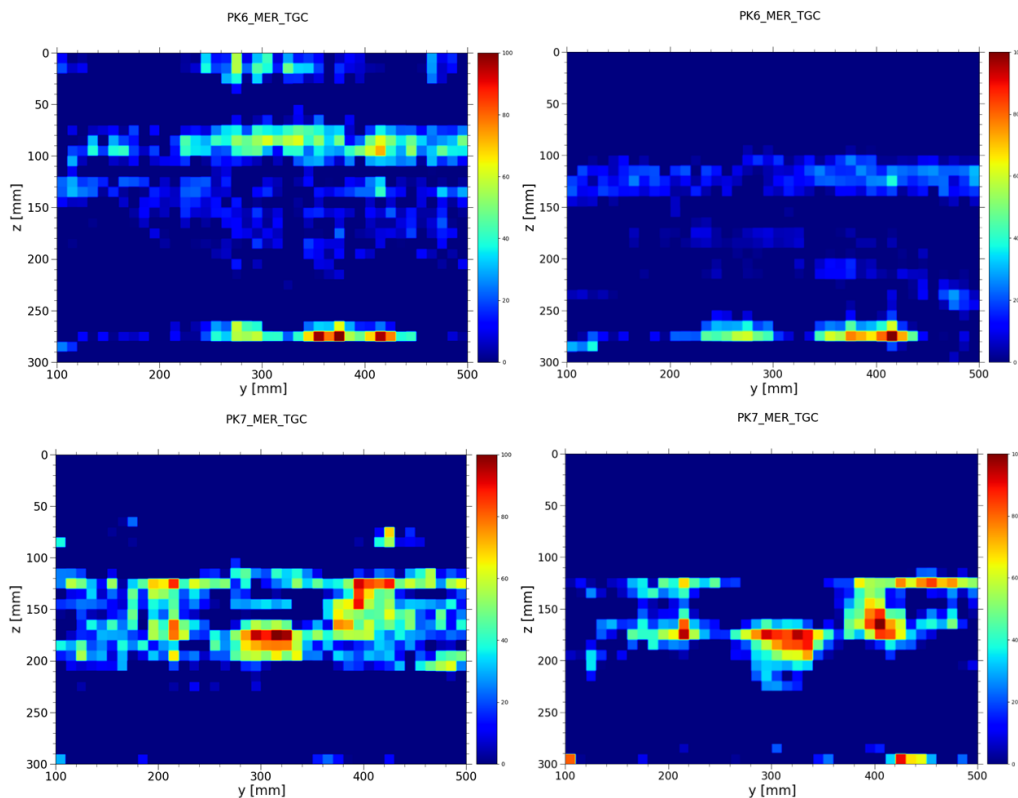


Abbildung 7.30: Differenz aus den D-Bildern der Ultraschalldaten des Riss- und Referenzbereichs der TGC-Messung für PK 6 (oben) und PK 7 (unten). Links: für die Auswertung der Rissspitze nach dem SAFT-TOFD-Algorithmus; rechts: für die Auswertung des Rissflankensignals.

Kapitel 8

Zusammenfassung und Ausblick

Bezüglich der Bestimmung der Tiefenausdehnung von vertikalen Rissen im Beton wurden folgende Prüfhypothesen untersucht:

1. Die Rissposition lässt sich anhand einer gestörten Oberflächenwelle und einem Einbruch im Rückwandsignal erkennen.
2. Durch eine Positionierung des Risses zwischen Sender und Empfänger erfolgt eine akustische Trennung (Ausblenden bzw. Abschwächen der Oberflächenwelle) und das Rissspitzensignal ist neben der Rückwandanzeige die einzige sich vom Untergrund abhebende Amplitude.
3. Durch ein Erhöhen der Anzahl an Messpositionen, die diese Bedingung erfüllen, lässt sich die Qualität der Abbildung so weit erhöhen, dass eine Auswertung am B-Bild aussagekräftig genug ist.
4. Die Auswertung der von der Rissflanke gestreuten Wellen liefert Zusatzinformationen zur Bewertung der Risstiefe.
5. Das Prüfen von Referenzbereichen mit gleichwertigen Bewehrungslagen erleichtert die Interpretation der Ergebnisse.
6. Eine tiefenabhängige Verstärkung trägt zu einer besseren Abbildungsqualität bei.

Die den Hypothesen zugrunde liegenden Algorithmen wurden bei Messungen an 8 Betonprobekörpern der Maße 1500 mm x 600 mm x 250 mm angewendet. 6 davon

wiesen natürliche, mittels Sprengmörtel eingebrachte, Risse auf. Ein Probekörper wies einen Sägeschnitt mit durchtrennten Bewehrungsstäben auf, wohingegen bei einem anderen beim Gießen ein Metallblech mit Aussparungen für die Bewehrungslagen eingelassen.

Zur Überprüfung der Hypothesen 1 und 2 wurden Flächenscans in einem Raster mit den Messpunktabständen 90 mm in x- und 50 mm in y-Richtung vorgenommen. Anhand der resultierenden Rekonstruktionsbilder konnte die Geometrie und die Bewehrungslage detailgenau abgebildet werden. Die zuvor optisch bestimmte Riss- bzw. Fehlerposition konnte anhand der Ultraschallmessung ebenfalls ermittelt werden. Die Oberflächenwelle war im Bereich des Risses gestört und wies ein Minimum in ihrer Amplitude auf. Auch die Rückwandanzeige zeigte Unterbrechungen in der sonst stabilen Ausprägung des Signals. Zur Untersuchung von Hypothese 2 wurden die aufgenommenen Daten dem SAFT-TOFD-Algorithmus zugeführt, in Rahmen dessen nur durch den Riss bzw. durch die Nut getrennte Sender- und Empfängerpositionen zur B-Bild-Berechnung verwendet wurden. Eine vollständige akustische Trennung zwischen Sender- und Empfänger konnte nur im Falle der Nuten nachgewiesen werden. Im Falle der realen Risse wurde bei jedem Probekörper eine gewisse Menge an Schall über Kontaktstellen oder Bewehrungsstäbe übertragen. Nicht in jedem Fall ließ sich ein distinktes Rissspitzensignal extrahieren, das ohne weitere Auswertung interpretierbar ist. Zur Veranschaulichung der Amplitudenpositionen wurden Tiefenprofilkurven entlang der Rissachse angefertigt. Die Nuttiefen konnten zwar nur in einer größeren Tiefe, aber als eine sich stark vom Untergrund abhebbende Amplitude dargestellt werden. Durch die Darstellung als Kurve wurde die Interpretation der Daten der realen Risse erleichtert. Unter Berücksichtigung der Bewehrungslage ließen sich auch hier plausible Risstiefen extrahieren. Ein Zusammenhang zwischen Rissöffnung und -tiefe konnte nicht festgestellt werden.

Die Erhöhung der SAFT-TOFD-Datenmenge (Hypothese 3) wurde durch ein Messraster direkt über dem geschädigten Bereich mit einem Abstand von 10 mm in x- und 10 mm in y-Richtung erreicht. Die für jede Messspur berechneten B-Bilder wurden mithilfe von Interpolation in ein Rekonstruktionsvolumen überführt. Die exakte Rissposition wurde anhand des C-Bildes direkt an der Oberfläche über Be-

stimmung des Minimums der Oberflächenwelle ermittelt. Das händische Festlegen der Rissposition basierend auf optischer Vermessung des Probekörpers ist somit vermieden worden. Die den Risspositionen zugehörigen Tiefenprofile wurden in einem den Rissverlauf repräsentierenden D-Bild dargestellt. Der Informationsgehalt hat sich im Vergleich zu den Daten aus dem Flächenscan nicht verbessert. Vor allem oberflächennahe Rissspitzensignale ließen sich nur schwer oder gar nicht anhand des D-Bildes identifizieren. Tiefergelegene Risse hingegen wurden anschaulich dargestellt.

Neben der SAFT-TOFD-Auswertung wurde ebenfalls die Streuung an der Rissflanke untersucht. Die daraus resultierenden D-Bilder stellten jedoch keinen Mehrwert dar. Der direkte Vergleich mit D-Bildern der Referenzbereiche als auch Differenzbildung scheint bei der Untersuchung der Risstiefe nicht zielführend zu sein. Auch eine tiefenabhängige Verstärkung hatte keinen positiven Einfluss auf die Messungen.

Generell lässt sich sagen, dass Ultraschalltomographen in Verbindung mit dem SAFT-Algorithmus dazu geeignet sind, das Bauteilvolumen detailgenau darzustellen. In Verbindung mit dem TOFD-Verfahren lassen sich plausible Rissspitzensignale extrahieren. Die Validierung dieser Ergebnisse, lässt sich jedoch nur durch Öffnen des Risses, also durch zerstörende Prüfung des Probekörpers, vornehmen. Folglich sollte sich ein Folgeprojekt mit der Validierung der hier ermittelten Kennwerte befassen. Auch der Matrixmodus des A1040 Mira 3D Pro könnte einen Vorteil bei der Risstiefenbestimmung mit Ultraschall liefern. Ließen sich die hier auf akustischem Weg gemachten Beobachtungen bestätigen, würde das ein vielversprechendes Feld für die Betonuntersuchung im Bauwesen eröffnen. Die schnelle und präzise Positionierung der Messgeräte in Verbindung mit den reproduzierbar anwendbaren Messprinzipen würde einen breiten Einsatz in der Praxis ermöglichen.

Literaturverzeichnis

- [1] Josef Krautkrämer und Herbert Krautkrämer. *Werkstoffprüfung mit Ultraschall*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg GmbH, 1986.
- [2] V. G. Shevaldykin et al. Ultrasonic low-frequency transducers with dry dot contact and their applications for evaluation of concrete structures. *Proceedings of the IEEE Ultrasonics Symposium*, 2002.
- [3] A. Samokrutov et al. Development of acoustic methods and production of modern digital devices and technologies for ultrasonic non-destructive testing. *ULTRAGARSAS Journal*, 2006.
- [4] Andreas W. Momber und Rolf-Rainer Schulz. *Handbuch der Oberflächenbearbeitung Beton: Bearbeitung - Eigenschaften - Prüfung*. Birkhäuser Verlag, 2006.
- [5] D. Bosold. *Zement-Merkblatt Betontechnik B 18: Risse in Beton*. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014.
- [6] Roberto C. A. Pinto et al. Use of ultrasound to estimate depth of surface opening cracks in concrete structures. *E-Journal of Nondestructive Testing and Ultrasonics*, 2010.
- [7] A. Hasenstab und G. Jost. Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen - angewandte Forschung und Praxis. *DACH-Jahrestagung*, 2008.
- [8] Roland Knauer: Warum Beton klimaschädlich ist. <https://www.spektrum.de/news/warum-beton-klimaschaedlich-ist/1760122>. (Aufgerufen: 10.07.2022).

- [9] Alexander Taffe und Herbert Wiggenhauser. Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung. *Beton- und Stahlbetonbau*, 2008.
- [10] Markus Stoppel et al. Zustandsermittlung und Schadensdiagnose für Parkhäuser mit automatisierten zerstörungsfreien Prüfverfahren. *ZfP-Zeitung 126*, Oktober 2011.
- [11] Christian U. Große. Bauwerksdiagnose mit zerstörungsfreien Prüfverfahren: Was wurde erreicht? - Woran fehlt es? *Fachtagung Bauwerksdiagnose - DGZfP*, 2014.
- [12] Robert Zobel et al. ND condition assessment of george washington memorial parkway/arlington memorial bridge. *Transportation Research Board (TRB) 93rd Annual Meeting*, 2014.
- [13] M. Schickert. Ultraschall-Abbildungsverfahren - Neue Entwicklungen beschleunigen den Einsatz. *Fachtagung Bauwerksdiagnose - DGZfP*, 2010.
- [14] J Kolek. Analysis of answers to rilem questionnaire on the schmidt rebound hammer. *Matériaux et Constructions*, 1969.
- [15] Bundesministerium für Verkehr Bau und Stadtentwicklung. Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten. *RI-ERH-ING - Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten*, 2013.
- [16] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. RI-EBW-PRÜF: Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN 1076. *RI-ERH-ING - Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten*, 2017.
- [17] Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. OSA - Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse. *RI-ERH-ING - Richtlinien für die Erhaltung von Ingenieurbauten*, 2017.
- [18] Heinrich Bastert. *DBV-Merkblatt „Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen“*. Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein e.V., 2014.

- [19] Gross et al. *Technische Mechanik 4*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2009.
- [20] Tribikram Kundu. *Mechanics of Elastic Waves and Ultrasonic Nondestructive Evaluation*. Taylor Francis Group, 2019.
- [21] Joseph L. Rose. *Ultrasonic Waves in Solid Media*. Cambridge University Press, 2008.
- [22] Gh. Reza Sinambari und Stefan Sentpali. *Ingenieurakustik*. Springer Vieweg, 2014.
- [23] Karlheinz Schiebold. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung - Ultraschallprüfung*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2015.
- [24] V. N. Kozlov et al. Thickness measurements and flaw detection in concrete using ultrasonic echo method. *Nondestructive Testing and Evaluation*, 1997.
- [25] Frank Mielentz et al. Optimierung von Ultraschall-Prüfkopf-Arrays für die zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen mithilfe von Modellierungen. *DGZfP-Jahrestagung*, 2009.
- [26] M. Biscopig. *Zement-Merkblatt Betontechnik B 20: Zusammensetzung von Normalbeton*. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2015.
- [27] R. Kampen. *Zement-Merkblatt Betontechnik B 3: Betonzusätze Zusatzmittel und Zusatzstoffe*. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014.
- [28] R. Oesterheld. *Zement-Merkblatt Betontechnik B9: Expositionsklassen für Betonbauteile im Geltungsbereich des EC2*. Verein Deutscher Zementwerke e.V., 2014.
- [29] C.A. Angel und J. D. Achenbach. Reflection and transmission of obliquely incident rayleigh waves by a surface-breaking crack. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1983.
- [30] John S. Popovics et al. Application of surface wave transmission measurements for crack depth determination in concrete. *ACI Materials Journal*, 2000.

- [31] J. D. Achenbach et al. Self-calibrating ultrasonic technique for crack depth measurement. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 1992.
- [32] Won-Joon Song et al. Measurement of surface wave transmission coefficient across surface-breaking cracks and notches in concrete. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2002.
- [33] Chi Won In et al. A fully non-contact, air-coupled ultrasonic measurement of surface breaking cracks in concrete. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2015.
- [34] S. K. Ramamoorthy et al. Ultrasound diffusion for crack depth determination in concrete. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2004.
- [35] Matthias Seher et al. Numerical and experimental study of crack depth measurement in concrete using diffuse ultrasound. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2012.
- [36] Yamin Sun et al. Depth estimation of surface-opening crack in concrete beams using impact-echo and non-contact video-based methods. *Eurasip Journal on Image and Video Processing*, 2018.
- [37] J.-S. Fang und P. L. Liu T. T. Wu. Detection of the depth of a surface-breaking crack using transient elastic waves. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 1993.
- [38] Tzonghow Liou und Wen-Hsiang Tsai Yiching Lin. Determining crack depth and measurement errors using time-of-flight diffracton techniques. *ACI Materials Journal*, 1999.
- [39] British Standards Institution. Testing concrete - Part 203: Recommendations for measurement of velocity of ultrasonic pulses in concrete. 1986.
- [40] J. S. Popovics und J. Zhu. Crack depth measurement in concrete using surface wave transmission. *Review of Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2003.
- [41] F. Mielentz und M. Krause. Zerstörungsfreie Risscharakterisierung in Betonbauteilen mit Ultraschall. *Fachtagung Bauwerksdiagnose - DGZfP*, 2001.

- [42] Martin Krause et al. Ultrasonic imaging of concrete elements: State of the art using 2D synthetic aperture. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering*, 2003.
- [43] Martin Friese et al. Erfolgskontrolle von Rissinjektionen durch Ultraschallmessungen. *Fachtagung Bauwerksdiagnose - DGZfP*, 2010.
- [44] Rosemarie Helmerich et al. Detection of cracks perpendicular to the surface using acoustic methods. *International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)*, 2015.
- [45] Herbert Wiggenhauser et al. Controlled creating of cracks in concrete for non-destructive testing. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2018.
- [46] Phillipp Jozef Michalski. Bachelorarbeit: Eignungsprüfung von Stahlbetonprobekörpern für die zerstörungsfreie Risstiefenbestimmung mittels Ultraschall, Hochschule Kaiserslautern 2021.