

Martin Krause, Marcus Schubert
Klaus Mayer, Mohamad Ibrahim

Sicherstellung der Ausführungsqualität an Neu- und Bestandsbauten aus Beton durch innovative zerstörungsfreie Prüfung

F 3057

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0101-9

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung



Bundesanstalt für
Materialforschung
und -prüfung

FORSCHUNGSINITIATIVE
ZukunftBAU

U N I K A S S E L
V E R S I T Ä T

ABSCHLUSSBERICHT

zum Forschungsvorhaben

„Sicherstellung der Ausführungsqualität an Neu- und Bestandsbauten aus Beton durch innovative zerstörungsfreie Prüfung“

Aktenzeichen	SWD-10.08.18.7.14.14 / F20-13-1-149 BAM Kennzeichen: Vh 8206
Ausfertigung	1 von 1
Auftraggeber	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung Forschungsinitiative „Zukunft Bau“, Referat II 3 Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn
Zuwendungsbescheid	05. September 2014
Zeichen	SWD-10.08.18.7.14.14
Berichtszeitraum	vom 01. Dez. 2015 bis 30.04.2017
Antragsteller	Arbeitsgemeinschaft aus BAM Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung Fachbereich 8.2 Unter den Eichen 87 12205 Berlin und Universität Kassel Fachgebiet CEP Wilhelmshöher Allee 71 34121 Kassel
Förderer	Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat, München Hupfer Ingenieure, Hamburg Neobotix GmbH, Heilbronn

Dieser Abschlussbericht besteht aus Seite 1 bis 110.



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	4
2	Ultraschallechoprfung von Betonbauteilen in Bestands- und Neubauten	6
3	Positionserfassungssystem	11
3.1	Anforderungsprofil für das Positionserfassungssystem	12
3.2	Seilzug mit Winkelencoder	13
3.2.1	Systemkonzept und -implementierung	15
3.2.2	Positionserfassungssoftware	20
3.2.3	Apparatur für Messungen in der Prüfhalle	23
3.2.4	Konzept und Bau einer baustellentauglichen Apparatur	25
3.3	Validierungsmessungen mit Scanner	26
4	Messergebnisdarstellung und Rekonstruktionsrechnung	30
4.1	Allgemeine Anforderungen	30
4.2	Eindimensionale Methoden der Signalanalyse	30
4.2.1	"Model-based Echo Decomposition"-Methode	31
4.3	2D- und 3D-Bildgebungsverfahren für nicht-äquidistante Messraster	34
4.4	Implementierung des SAFT Algorithmus	35
4.4.1	Rekonstruktionsprogramm „SAFT-Analysis“	36
4.4.2	Software-Modul „extract_from_ghk“ zur Entwicklung von Messstrategien	38
4.5	Identifizierung von flächigen Reflektoren und Punktstreuern	39
5	Erläuterung der Arbeitsweise des Mess- und Auswertesystems am Beispiel eines Probekörpers	45
6	Ergebnisse an einem Probekörper mit bekanntem Aufbau	48
6.1	Äquidistante, automatisierte Messung und 3D-Rekonstruktion	50
6.2	Ultraschall-Messungen mit automatischer Positionserfassung (USP) und online Rekonstruktion	54
6.2.1	Vorgehensweisen bei der Messung, Messstrategie	54
6.2.2	Beispiele für USP und online-Rekonstruktion	59
6.3	Virtuelle Messung mit hinterlegten Daten	69
7	Ergebnisse an realen Bauteilen	76
7.1	Kontrolle und Planung von Verstärkungsmaßnahmen an Brücken	76
7.2	Ergebnisse mit Daten	82
8	Zusammenfassung und Ausblick	85
9	Danksagung	90
10	Literatur	90



11 Anhang	93
11.1 Ergebnisse FBS1 im Maßstab 1:10	93
11.2 Positionserfassungssysteme	94
11.3 Industrial Design	98
11.3.1 Zusammenfassung	98
11.3.2 Skizzen und Entwürfe	99
11.3.3 Modellbau	100
11.4 Anwendungstests und Validierungsmessungen an Probekörpern	100
11.5 Anleitung zur Inbetriebnahme des USP-Systems mit online-Rekonstruktion	104
11.5.1 Systemkomponenten	103
11.5.2 Inbetriebnahme der Hardware	105
11.5.3 Inbetriebnahme der Software	108



1 Einleitung

Allgemein gesagt ist die Aufgabe der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen die Feststellung des aktuellen (inneren) Zustands von Bauteilen und der Abgleich mit dem Sollzustand, wie er sich aus dem Bauplan und den aktuellen statischen Anforderungen an das Bauteil / Bauwerk ergibt. Nicht selten sind die Planunterlagen ungenau, unvollständig oder gar nicht verfügbar, so dass eine Überprüfung der relevanten Anforderungen an die Abmaße von Betonbauteilen (Dicke, Form, Bewehrungsausführung) notwendig wird. Bei Neu- und Umbauten können zerstörungsfreie Prüfverfahren dazu eingesetzt werden, die planungsgemäße Ausführung zu validieren (Qualitätssicherung).

Ultraschallechoverfahren für Betonbauteile werden in den letzten zehn Jahren zunehmend im Bauwesen eingesetzt. Im Antrag für das Vorhaben sind einige typische Fragestellungen aufgelistet. Für alle diese Aufgaben gibt es bereits erfolgversprechende Anwendungen in der Praxis, insbesondere von Ingenieurbüros, die über die entsprechende Technik verfügen.

In vielen Fällen ist eine bildgebende Darstellung der Ergebnisse mithilfe der Rekonstruktionsrechnung sinnvoll. Dabei wird, teilweise in Zusammenarbeit mit der BAM oder anderen Forschungs- und Prüfanstalten die **Synthetische Apertur Fokussierungstechnik (SAFT)** eingesetzt. Üblicherweise wird dabei in drei Schritten vorgegangen:

- Testmessung am Objekt und Entscheidung, ob eine flächige Datenaufnahme zielführend ist
- Durchführung der flächigen Messung (mit Baustellenscannern, mit äquidistanten Handmessungen oder durch Einsatz eines Linearen Ultraschall-Arrays)
- Rekonstruktionsrechnung und bildgebende Auswertung einschließlich Bewertung (üblicherweise im Büro oder Labor)

In manchen Fällen sind dann noch in einem zweiten Einsatz ergänzende Daten aufzunehmen, um die ermittelten Aussagen zu validieren oder zu verbessern.

Das Forschungsvorhaben gliedert sich in zwei Teile:

1. Weiterentwicklung eines Ultraschallmesssystems zur sofortigen, interaktiven Messung und Rekonstruktionsrechnung direkt am Objekt
2. Testanwendung dieses Systems an Bauteilen und Bauwerken und daraus resultierende Verbesserung in Richtung Praxistauglichkeit.

Das Forschungsvorhaben wurde arbeitsteilig von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Fachbereich 8.2) und der Universität Kassel (Fachbereich CEP) bearbeitet. Die beteiligten Ingenieurbüros und Geräteentwickler lieferten im Zuge des Vorhabens wichtige Praxisexperten und beteiligten sich an der Verfahrensentwicklung.



Ablauf

Für den ersten Teil des Forschungsvorhabens wird das Ultraschallecho-Verfahren auf Basis der existierenden Ultraschallprüfköpfe mit Punktkontakt-Ankopplung für die manuelle Datenaufnahme an Betonbauteilen in Bestands- und Neubauten baupraktisch erweitert, so dass eine direkte Aufnahme der Positionsdaten erfolgt und die Messergebnisse unmittelbar vor Ort bildgebend dargestellt werden.

Dafür wird die Rekonstruktionsrechnung dahingehend erweitert, dass die Messdatenaufnahme nicht an eine Vorgabe eines äquidistanten Messrasters gebunden ist, sondern die Echodaten von beliebig gewählten Messpunkten rekonstruiert werden können.

Die bildgebende sowie interaktive Darstellung inklusive Rekonstruktion liefert dann dem Anwender direkt vor Ort fundierte Aussagen über das zu untersuchende Messobjekt. Durch Verdichten der Messpunkte verbunden mit einer kumulativen Erweiterung der Messung und Auswertung in interessanten Bereichen sollen die Prüfaussagen zur Qualitätssicherung der Bauausführung jederzeit verbessert werden können.

Durch Untersuchungen an Betonprobekörpern in der Entwicklungsphase werden der jeweiligen Stand der Hard- und Software und deren Zusammenspiel getestet und Optimierungspotentiale ermittelt. Da der innere Aufbau der Referenzprobekörper bekannt ist, kann die unmittelbare, bildgebende Messergebnisdarstellung hinsichtlich der erreichten Aussagekraft eingeschätzt und qualitativ validiert werden.

Im zweiten Teil des Vorhabens wird das neue System an bereits existierenden Probekörpern getestet und optimiert. So früh wie möglich sollte das neue Mess- und Auswertesystem an geeigneten Bauwerken in Zusammenarbeit mit den beteiligten Ingenieurbüros angewendet werden. Daraus werden wichtige Rückschlüsse für die Optimierung des Systems erwartet.

Zur strukturierten Umsetzung des Vorhabens sind im Antrag fünf Arbeitspakete definiert worden:

- O** Literatur und Marktrecherche zur Positionserfassung
- A** Positionserfassung und Datenübergabe an die Auswertesoftware
- B** Unmittelbare Messergebnisdarstellung und Rekonstruktionsrechnung
- C** Anwendungstests an Probekörpern
- D** Messungen und Auswertung in der Praxis

Die Arbeiten erfolgen weitgehend wie im Antrag vorgesehen. Die Universität Kassel hat mit Einstellung des entsprechenden Wissenschaftlichen Mitarbeiters die Arbeiten im Arbeitspaket *B Messergebnisdarstellung und Rekonstruktionsrechnung* im November 2014 begonnen. Aus verschiedenen Gründen konnte die Stelle des Wissenschaftlichen Mitarbeiters der BAM erst zum Mai 2015 erfolgen, woraus eine kostenneutrale Laufzeitverlängerung bis April 2017 beantragt und genehmigt wurde. Nach dem ersten Treffen der begleitenden Arbeitsgruppe wurde der Zeitplan geringfügig modifiziert.



Die Entwicklung der **Ultraschall**-Messapparatur mit automatischer **Positionserfassung** (nachfolgend auch abgekürzt **USP**) war insgesamt etwas aufwendiger als geplant. Auch waren für den Schritt von der Laborapparatur (bestehend aus mehreren Komponenten) zu einem handlichen zweiteiligen baupraktischen Gerät in spritzwassergeschützten Gehäuse mehr Zeit erforderlich als geplant.

Als zusätzliches Modul für das Auswerteprogramm wurde die Möglichkeit implementiert, virtuelle (künstliche) Messungen zu simulieren. Dabei wird aus einem vorhandenen, in äquidistantem Raster (z.B. mit einem Baustellenscanner) aufgenommenen Messdatenfeld im Auswerteprogramm mit dem Cursor an vom Operateur gewählten Punkten Messdaten „gepickt“ und mit dem Rekonstruktionsprogramm in SAFT-Analysis ausgewertet. Auf diese Weise können bereits existierende, äquidistant (z.B. mit Bauwerksscannern) aufgenommene Datensätze in die Anwendungstests des neuen Messsystems einbezogen werden.

In der Schlussphase des Projektes wurde eine Studentin im Fach Bauingenieurwesen der HTW eingebunden, die die Anwendungstests des neu entwickelten Verfahrens an Probekörpern und realen Bauteilen im Rahmen einer Bachelorarbeit weiterführen wird. Ergänzend zum Vorhaben wurde zudem eine Bachelorarbeit im Fach Industriedesign zur durchgeführt, um Wege zur Verbesserung der Funktionalität und Nutzerfreundlichkeit eines möglichen innovativen Gerätes zu verbessern. Einige Details sind im Anhang aufgeführt.

Im Laufe des Vorhabens fanden zwei Sitzungen der beratenden Arbeitsgruppe der Forscher, den beteiligten Ingenieurbüros, zwei externen Experten und teilweise den Fachbetreuern des BBRS statt. Die Protokolle der Besprechungen sind im Anhang aufgeführt. Außerdem beteiligten sich die BAM und die U Kassel mit einem Beitrag an den Projekttagen im Juni 2016.

2 **Ultraschallechoprüfung von Betonbauteilen in Bestands- und Neubauten**

Übersicht

Das Ultraschallechoverfahren, mit dem elastische Wellen in Betonbauteilen angeregt werden, eignet sich für verschiedene Fragestellungen im Bereich:

- Qualitätssicherung der Bauausführung,
- Umnutzung von Betonbauwerken,
- Lage- und Zustandsbewertung von Einbauteilen oder
- Bauteildickenbestimmung.

Aufgrund der Eigenschaften der elastischen Wellen werden an metallischen Bauteilen nur ca. 50% der eingebrachten Energie reflektiert, so dass für das Ultraschallechoverfahren auch hinter dicht verlegter Bewehrung noch Strukturen erkennbar sind. Bei der Verwendung von Transversalwellen treten an Bauteil-Luft-Schichtgrenzen Totalreflexionen auf. Dies ermöglicht die zuverlässige Bauteildickenmessung bis ca. 1 m sowie die Ortung von Auffälligkeiten wie

Kiesnester oder Delaminationen [1]. In Abbildung 1 sind für die Bewertung der Ausführungsqualität relevante Defektarten mit den dazugehörigen Ultraschallecho-Effekten schematisch dargestellt.

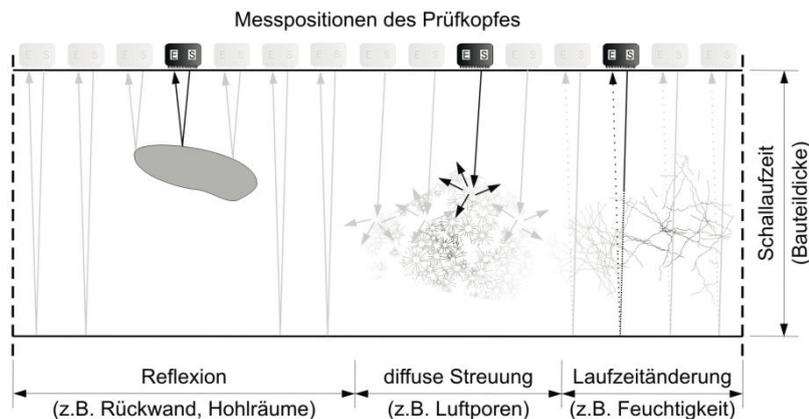


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Ultraschallechoprüfung für verschiedene Defektarten (Quelle: BAM)

Für den Handbetrieb existieren bereits sehr leistungsfähige Geräte. In den meisten Fällen erfolgt hier aber keine Abbildung des Inneren der Bauteile über Rekonstruktionsrechnungen. Entsprechende Ultraschall-Systeme erfordern sehr hohe Investitionskosten und werden noch überwiegend von Forschungsinstituten angewendet. Auch sind Vorbereitungs-, Einsatz- und Auswertzeit noch zu umfangreich, um eine echte Akzeptanz und Wirtschaftlichkeit der eingesetzten Technik zu ermöglichen. Das Forschungsvorhaben hat zum Ziel das Ultraschall-Verfahren soweit zu ertüchtigen, dass eine einfach auszuführende, handbetriebene Datenaufnahme mit schneller 3D-Bildgebung vor Ort erreicht wird.

Verwendete Geräte

Für die Messungen werden im Rahmen dieses Vorhabens die nachfolgend aufgeführten Ultraschallgeräte verwendet:

- a) Ultraschallechogerät mit einem kombinierten Sende-/Empfangskopf (S/E) bestehend aus jeweils 12 trocken ankoppelnden Einzelprüfköpfen [19] (Abbildung 2). Für spezielle Fragen werden auch andere Prüfköpfe, wie einzeln ankoppelnde Punktkontaktprüfköpfe und flächig ankoppelnder Prüfköpfe verwendet. Prinzipiell hat der Experimentator die Wahl, Prüfköpfe einzusetzen, die bevorzugt Longitudinalwellenpulse (Druckwellen) oder Transversalwellenpulse (Scherwellen / S-Wellen) aussenden.
- b) Ein multistatisch arbeitendes Ultraschall-Array, bestehend aus 12 Prüfkopfreiheiten, bei dem nacheinander jede Reihe sendet und alle anderen empfangen. Damit wird der Bereich unter dem Gerät „ausgeleuchtet“ und die im Gerät implementierte Rekonstruktionssoftware erstellt einen Ultraschall-Längsschnitt, der auf dem Gerät angezeigt und ausgegeben werden kann [18] (Abbildung 2).

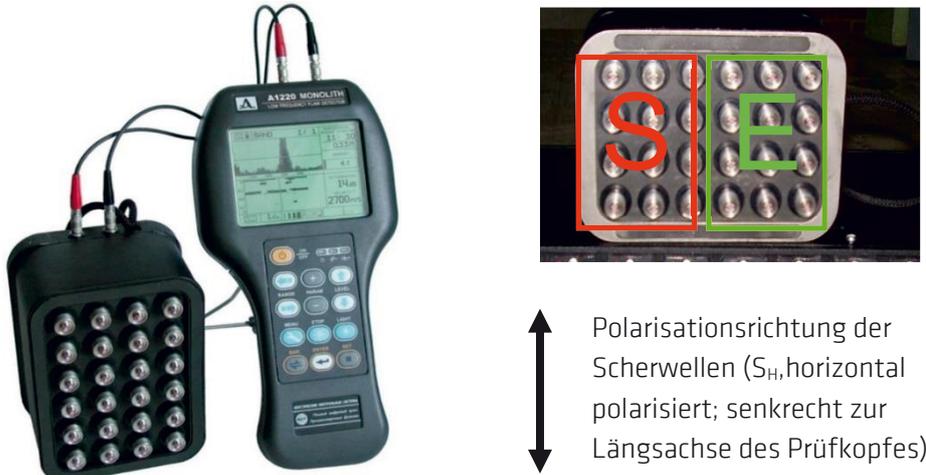


Abbildung 2: Ultraschallecho Gerät: Sende/Empfangskopf (S/E) bestehend aus je 12 parallel geschalteten Punktkontaktprüfköpfen (Scherwellenprüfköpfe, Mittenfrequenz 50 kHz, Hersteller: ACSYS [18])

Links: Steuergerät mit Prüfkopf

Rechts: Aufteilung des Prüfkopfes in Sende- und Empfangsteil (S/E-Prüfkopf). Polarisationsrichtung der horizontal polarisierten Scherwellen (SH) senkrecht zur Prüfkopflängsachse

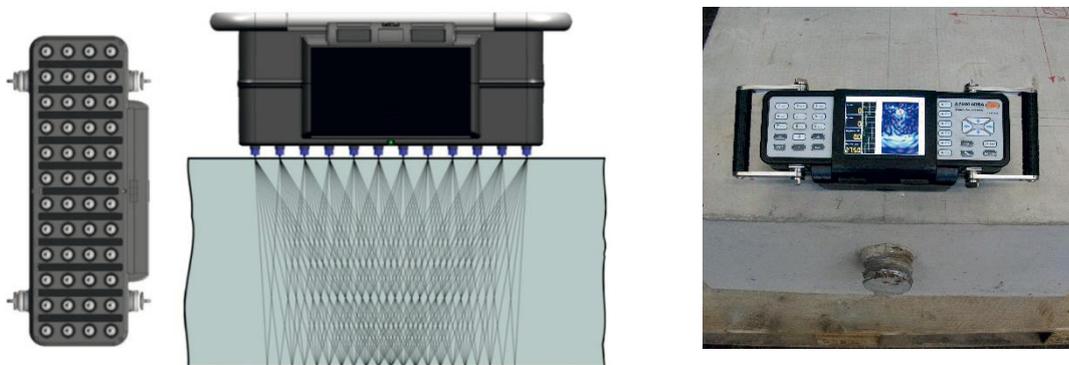


Abbildung 3: Ultraschallmesssystem *Lineares Array*

Links: Untersicht auf ein Linear Array mit zwölf Prüfkopfbänken und Schallwegen bei der multistatischen Messung (vereinfachte Darstellung des Messprinzips (Bild rechts: ACS Ltd., Moskau) aus). Polarisation der Scherwellen (S_H) senkrecht zur Array-Längsachse

Rechts: Linear Array: Ergebnis der Sofort-Rekonstruktion eines Spannkannals in einem Betonprobekörper (Foto: BAM)

Auswertung, Bilddarstellung

Für die Auswertung der Messdaten und die Darstellung der Ergebnisse werden je nach Anforderung fünf Möglichkeiten angewendet [9], [10] (siehe dazu Abbildung 4):

- Darstellung einer Punktmessung als Zeitsignal der Ultraschallecho-Pulse, in der Fachsprache A-Bild genannt
- Zusammensetzung mehrerer Punktmessungen zu Linienscans bzw. Längsschnitten, in der Fachsprache ist dafür die Bezeichnung B-Bild üblich (Abbildung 4)
- Flächenhafte Darstellung eines Schnittes parallel zur Messfläche (Tiefenschnitt, Zeitscheibe), in der Fachsprache C-Bild genannt (Abbildung 4)
- Rekonstruktionsrechnung nach dem Prinzip der Synthetischen Apertur Fokussierungstechnik (SAFT) [7]
- Rekonstruktion mit Inter-SAFT (interaktive Version einer SAFT-Rekonstruktion)[20])

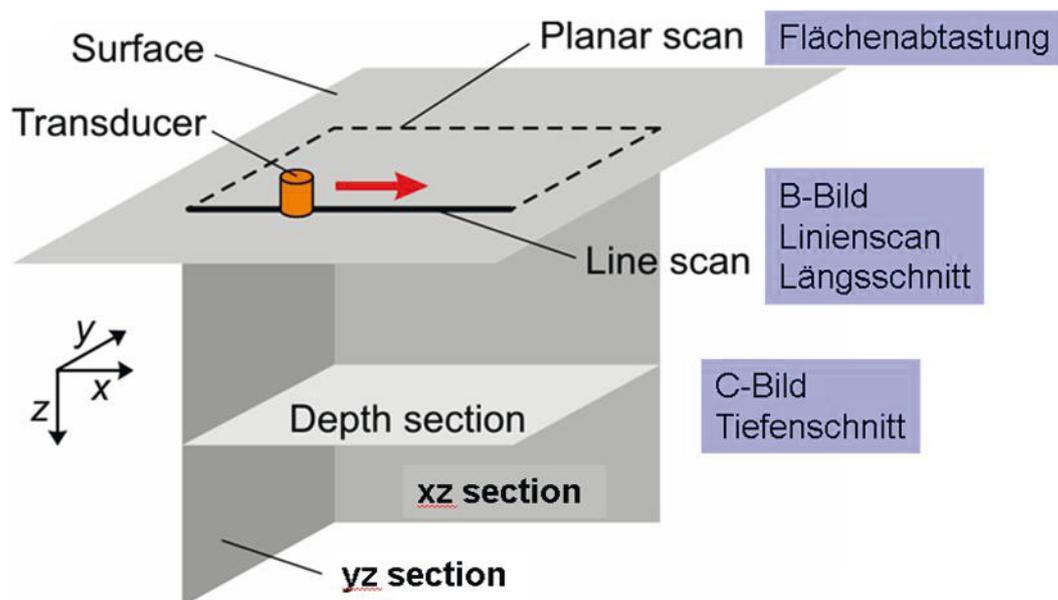


Abbildung 4: Prinzip der Darstellung von Ultraschallecho-Ergebnissen als Schnitte in einem 3D-Datensatz und typische Bezeichnungen (nach [7])

Während mit dem Linear Array die Bildgebung also für jede aktuelle Position mithilfe einer Rekonstruktionsrechnung dargestellt und gespeichert werden kann, wird mit dem S/E Kopf lediglich die aktuelle Zeitkurve (A-Bild) dargestellt und gespeichert. Äquidistante Messlinien werden zu Linienscans (B-Bildern) zusammengesetzt.



Großflächige Untersuchungen für Forschung und Anwendung werden häufig mit sogenannten Bauwerksscannern durchgeführt. Dabei wird ein Ultraschall-Prüfkopf mit einer Schrittmotorsteuerung über die Oberfläche des zu untersuchenden Volumens geführt und in einem vorgegebenen Raster (meistens 20 mm x 20 mm) pneumatisch angedrückt (Abbildung 36) und die Ultraschallkurve (A-Bild) aufgezeichnet. Diese Datensätze dienen dann zur Ergebnisdarstellung einschließlich einer 3D-Rekonstruktionsrechnung.

Polarisationsrichtung der Schwerwellen

Zum Verständnis der in diesem Forschungsvorhaben angewendeten und weiterentwickelten Ultraschall-Abbildungsverfahren mit Punktkontaktprüfköpfen ist es erforderlich, das Schallfeld der Prüfköpfe in Abhängigkeit von der Polarisationsrichtung zu kennen. In Abbildung 5 sind die drei prinzipiellen Möglichkeiten gezeigt:

Links: Anregung einer Druckwelle (in diesem Vorhaben nicht angewendet). Neben der Druckwelle (p) entstehen zwei seitlich verlaufende Scherwellenpulse (s) und eine Rayleighwelle an der Oberfläche.

Mitte: Anregung einer Scherwelle bei Orientierung der Polarisation in der Papierebene: Eine vertikal polarisierte Scherwelle (S_v) verläuft mit der Hauptrichtung nach unten (Öffnungswinkel ca. 30°). Nach links und rechts entsteht ein p -Wellenpuls, sowie eine Rayleighwelle an der Oberfläche).

Unten: Anregung einer Scherwelle bei Orientierung der Polarisation senkrecht zur Papierebene: Eine horizontal polarisierte Scherwelle (S_H) verläuft mit gleicher Amplitude in alle Richtungen einschließlich auf der Oberfläche (Öffnungswinkel 180°). Es entstehen keine weiteren Wellenmoden, außerdem treten in der S_H -Ebene keine Modenumwandlungen auf (siehe z.B. Krautkrämer).

Diese Besonderheit der S_H -Wellenpulse ist einer der Hintergründe für die Anordnung der Prüfköpfe für den 12+12-Punktkontaktprüfkopf (Abbildung 1):

Die Polarisation der Einzelprüfköpfe ist senkrecht zur Verbindungsachse von Sender und Empfänger eingestellt. Auf diese Weise hat das Schallfeld für Messlinien in S_H -Richtung einen großen Öffnungswinkel und erfasst Reflektoren rechts und links. Diese können bei mehreren Linien nebeneinander mit der Rekonstruktionsrechnung gut fokussiert werden. Außerdem entsteht an der Gesteinskörnung im Beton in S_H -Anordnung weniger Modenumwandlung, die Schallschwächung ist also geringer im Vergleich zur S_v -Anordnung.

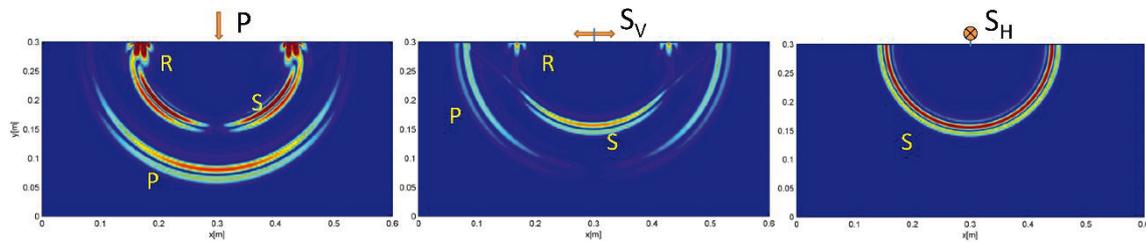


Abbildung 5: Schallfeld von Punktkontaktprüfköpfen

Links: Druckwellenanregung, Polarisationsrichtung nach unten (hier nicht verwendet)

Mitte: Schwerwellenanregung in der Papierebene (S_V-Anregung)

Rechts: Schwerwellenanregung senkrecht zur Papierebene (S_H-Anregung)

3 Positionserfassungssystem

Für die Rekonstruktion der Ultraschalldaten zur räumlichen Darstellung der inneren Strukturen sind die jeweiligen Prüfkopfpositionen notwendig. Eine zu Beginn des Forschungsprojekts durchgeführte Markt- und Literaturrecherche zu bekannten Positionsbestimmungsmethoden ergab, dass sich folgende Systeme / Verfahren eignen:

- Seilzug mit Winkelencoder
- Laserdistanzmesser
- Tachymeter
- Fotogrammetrie

Das jeweilige Messprinzip ist hierbei sehr unterschiedlich.

Bei der Realisierung mit Seilzug und Winkelencoder wird ein Polarkoordinatensystem konstruiert. Hierbei ist eine permanente Verbindung zwischen fest installiertem Positionserfassungssystem (= Bezugspunkt des Koordinatensystems) und dem Prüfkopf notwendig. Jede Positionsänderung führt zu einer Winkel- und/oder Längenänderung und kann in kartesische Koordinaten transformiert werden.

Die Positionsbestimmung mit Laserdistanzmesser und Tachymeter zählt zu den optischen Verfahren. Die Entfernung zum Erfassungssystem wird über eine Impulslaufzeitmessung ermittelt. Der im Vorhaben untersuchte und getestete 2D-Laserdistanzmesser realisiert im Gegensatz zum Tachymeter nicht nur eine Einzelentfernungsmessung, sondern ermittelt im Winkelbereich von 270° in einer Schrittweite von bis zu 0,25° mehrere Entfernungswerte (vgl. Abbildung 75 und Abbildung 76 sowie Tabelle 3 im Anhang). Die Intensitätswerte des Empfangssignals stehen ebenfalls zur Auswertung zur Verfügung. Das Tachymeter als hochgenaues Vermessungssystem wird in vielen Anwendungen wie Straßenvermessung und Konturbestimmung von Objekt genutzt [6]. Einige Tachymeter-Varianten besitzen die Möglichkeit, Reflektoren / Prismen eigenständig zu finden und deren Position automatisch zu verfolgen (vgl. Abbildung 74 im Anhang). Diese Funktionalität ist für die Positionserfassung des Prüfkopfs sehr gut geeignet.

Die Verwendung eines Bilderfassungssystems, bestehend aus hochauflösender Kamera und

Referenzmarken auf dem Prüfkopf, zur Positionsbestimmung per Fotogrammetrie ist ebenfalls eine in Frage kommende Entwicklungsoption.

3.1 Anforderungsprofil für das Positionserfassungssystem

Um die ausgewählten Verfahren / Systeme untereinander vergleichen und bewerten zu können, werden folgende Systemanforderungen bzw. -eigenschaften für das Erfassungssystem spezifiziert:

- a. Messfeldgröße: $>1 \text{ m}^2$
- b. Positionsgenauigkeit: 5-10mm
- c. Echtzeitfähigkeit / hohe Messwiederholrate
- d. einfache und schnelle Installation (kompakte Bauform)
- e. komfortable Benutzersteuerung / Systemhandhabung
- f. Baustellentauglichkeit (Staub und Feuchtigkeit)
- g. Polarisationsbestimmung des Sensors (optional)
- h. geringe Material- / Anschaffungskosten
- i. Implementierungsaufwand.

Die Eigenschaften der verschiedenen Systeme sind in Tabelle 1 einander gegenübergestellt. Ausschlaggebend für die Wahl des Positionsbestimmungsverfahrens sind neben den baupraktischen Eigenschaften, wie z.B. kompakte Bauform, und den funktionellen Anforderungen, wie Positionsgenauigkeit, vor allem die Abschätzung zum Implementierungsaufwand und die Anschaffungskosten. Die Umsetzung mit Seilzug und Winkelencoder erscheint als geeignetste Wahl zur Realisierung des Positionserfassungssystems. Die Lagebestimmung mit Laserdistanzmesser sowie Tachymeter sind darüber hinaus erprobt worden (siehe Abschnitt 11.2 im Anhang).

Tabelle 1: Eigenschaften der Positioniersysteme

Systemanforderung	Seilzug mit Winkelencoder	Laserdistanzmesser	Tachymeter	Fotogrammetrie
Messfeldgröße	$>1 \text{ m}^2$	$>5 \text{ m}^2$	$>>1 \text{ m}^2$	$>>1 \text{ m}^2$
Positionsgenauigkeit	5-20mm	$>30\text{mm}$	1mm	? ¹
Messwiederholrate	$<1\text{s}$	$<<1\text{s}$	$>2\text{s}$? ¹
kompakte Bauform	möglich	ja	nein	möglich
Systemhandhabung	einfach	einfach	umfangreich	einfach
Baustellentauglichkeit	möglich	ja	ja	möglich
Polarisationsbestimmung	möglich	schwierig	nein	möglich
Anschaffungskosten	gering	mittel-hoch	sehr hoch	mittel-hoch ¹
Implementierungsaufwand	mittel	mittel	gering	hoch

¹ abhängig von der Kameraauflösung und den Bildverarbeitungsrouitinen



3.2 Seilzug mit Winkelencoder

Mit Hilfe des Seilzugs wird der Abstand zwischen dem Ultraschallprüfkopf und dem fest installierten Positionserfassungssystem (im Folgenden auch als Basisstation bezeichnet) bestimmt. Der Seilzug ist drehbar auf einem hochauflösenden Winkelencoder montiert. Die Basisstation mit Seilzug und Winkelencoder dient somit als Ursprung eines aufgespannten Polarkoordinatensystems. Da in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen meist ebene Prüfobjekte untersucht werden, ist die realisierte zweidimensionale Positionsbestimmung über Länge und Winkel hinreichend. Die Darstellung der Prüfkopfpositionen in polarer Form ist eher unüblich, so dass die ermittelte Länge und der dazugehörige Winkel permanent mittels Koordinatentransformation in die kartesische Form umgewandelt werden.

Die Basisstation bildet den Ursprung des Positionserfassungssystems. Das realisierte Koordinatensystem ist somit rein lokal definiert und abhängig von der Positionierung der Station. Eine Anpassung an das globale Koordinatensystem des Messobjekts ist zwangsläufig, um die gemessenen Punkte eindeutig lokalisieren und ggfs. in vorhandene Planungsunterlagen übertragen zu können.

Für die Transformation des Koordinatensystems sind zwei markante (z.B. Ixel) bzw. zwei global eingemessene Positionen notwendig. Der erste Messpunkt dient hierbei der Verschiebung des Ursprungs. Alle bereits gemessenen Punkte und die Nachfolgenden werden entsprechend angepasst. Die Ausrichtung des neuen Koordinatensystems bleibt aber zunächst unverändert. Durch den zweiten Transformationspunkt wird eine Rotation des Systems ermöglicht. Der im ersten Schritt gewählte Ursprung bildet zusammen mit dem zweiten Messpunkt die neue X-Achse. In Abbildung 6 ist die Anpassung des Koordinatensystems in zwei Schritten beispielhaft dargestellt.

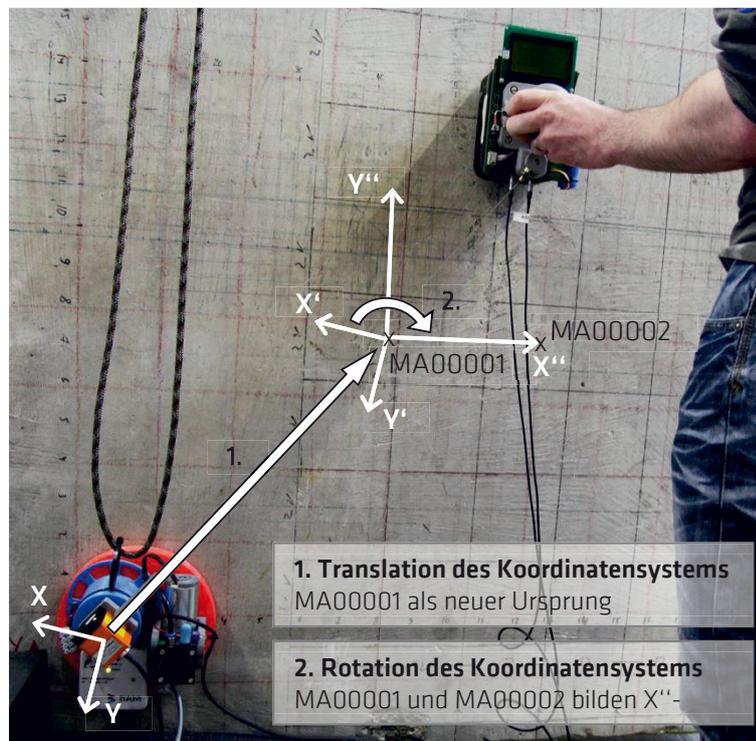


Abbildung 6: Transformation des Koordinatensystems zur Messfeldanpassung

Da der Seilzug drehbar gelagert ist und der Prüfkopf möglichst beliebig positioniert werden kann bzw. ausgerichtet sein soll, ist für die permanente Anbindung des Messeils am Prüfkopf eine entsprechend drehbare Seilaufnahme notwendig. Mit Hilfe eines zweiten Winkelencoders am Prüfkopf, der die Ausrichtung der Seilaufnahme auswertbar macht, kann die Polarisation des Prüfkopfs bestimmt werden. Ist, wie beim im Projekt entwickelten Prüfkopfaufsatz, die Aufnahme exzentrisch vom Prüfkopfmittelpunkt positioniert, ist diese Winkelinformation sogar zwangsläufig notwendig um die Sende- und Empfangsposition zu bestimmen.

Die zwei zentralen Komponenten des entwickelten Positionserfassungssystems sind:

- die **Basisstation** mit Seilzug und hochauflösendem Winkelencoder und
- der **Prüfkopfaufsatz** mit drehbarer Seilaufnahme inklusive Winkelencoder.

Im Nachfolgenden werden auf Basis der funktionellen Anforderungen die notwendigen technischen Eigenschaften der Hauptkomponenten des Systems ermittelt. Hierbei fließen die umfangreichen Erfahrungen mit händischen Messungen ein, um Aspekte wie Benutzerfreundlichkeit und Systemhandhabung bereits konzeptionell zu berücksichtigen. Die baupraktischen Eigenschaften des Positionserfassungssystems, wie z.B. kompakte Bauform, Schutzklasse oder Ergonomie, sind im Projekt durch den Projektpartner Neobotix untersucht worden. Die erlangten Erkenntnisse fließen in die Konstruktion und den Bau eines baustellentauglichen Prüfkopfaufsatzes ein. Um den Weg aufzuzeigen, wie der gesamte Aufbau und im Besonderen der Prüfkopfaufsatz für umfangreiche Handmessungen mit



Positionserfassung unter ergonomischen Gesichtspunkten konzipiert werden kann, hat Herr Lotz, Student des Studiengangs Industriedesign an der Hochschule für Technik und Wirtschaft Berlin (HTW), ein integriertes Design für die Prüfkopfelektronik sowie für die Basisstation im Rahmen einer Bachelorarbeit konzipiert.

Die jeweiligen Entwicklungsstände wurden im Laufe des Projekts mehrfach getestet (vgl. Tabelle 4 im Anhang). Dies führte zu sukzessiven Verbesserungen des Systems. Neben Änderungen im Bereich Elektronik sind dabei auch konstruktive und ergonomische Anpassung vorgenommen worden (vgl. Abbildung 81 im Anhang). Baustelleneinsätze sind aktuell ohne weiteres möglich.

Im nachfolgenden wird das entwickelte System auch „Ultraschallapparatur mit automatischer Positionserfassung“(USP) genannt.

3.2.1 Systemkonzept und -implementierung

Die Entwicklung eines Systemkonzepts, inklusive der Spezifikation der benötigten Hardware- und Software-Bestandteile, fußt auf einer abwägenden Betrachtung der verschiedenen Systemanforderungen (vgl. Abschnitt 0). Maßgebend für den Systementwurf und dessen Umsetzung sind hierbei die technischen Systemanforderungen (siehe Tabelle 2).

Tabelle 2: Technische Systemanforderungen für Seilzug mit Winkelencoder (vgl. Abschnitt 0)

Eigenschaft	Anforderung
Messfeldgröße	>1 m ²
Positionsgenauigkeit	5-10mm
Messwiederholrate	<1s
Polarisationsbestimmung	optional

Hardware

Im Fokus soll zunächst die Basisstation stehen. Die zentralen Systemkomponenten sind der Seilzug zur Entfernungsbestimmung und der hochauflösende Winkelencoder, der die Winkelauslenkung des drehbar gelagerten Seilzugs bestimmt. Die Seilzuglänge und die realisierbare Abstandsauflösung für den Seilzug sowie die Winkelgenauigkeit für den Winkelencoder beschreiben die maßgebenden Parameter zur Auswahl geeigneter Bauelemente. In theoretischen Betrachtungen wurden zunächst das Lage-Abstand-Verhältnis zwischen Messfeldgröße und Basisstationsposition untersucht sowie die Abhängigkeiten zwischen Seilzuglänge, auflösbaren Punktabstand und notwendiger Winkelauflösung analysiert.

Da die Ultraschallprüfung am Bauwerk zeitintensiv ist, werden meist nur kurze Messlinien oder kleinformatig Messfelder in Verdachtsbereichen untersucht. Als Zielgröße ergibt sich daraus, dass ein Messfeld von 1m² durch das Positionserfassungssystem abgedeckt werden muss. Eine Seilzuglänge von 2m erfüllt diese Anforderung (siehe Abbildung 7(a)). Eine Abstandsauflösung des Seilzugs kleiner als 1mm ist unter Berücksichtigung einer angestrebten

Positionsgenauigkeit von 5-10mm mehr als hinreichend. Die Betrachtungen zur benötigten Winkelauflösung sind unter Berücksichtigung des auflösbaren Punktabstands und der maximalen Seilzuglänge durchzuführen. Abbildung 7(b) zeigt verschiedene Punktabstand-Längen-Kombinationen, wobei die Zielgröße für die notwendige Winkelauflösung bei 12556 Ticks je Umdrehung liegt ($d=1\text{mm}$ und $s=2\text{m}$). Dies entspricht einer Gradauflösung von unter $0,0287^\circ$.

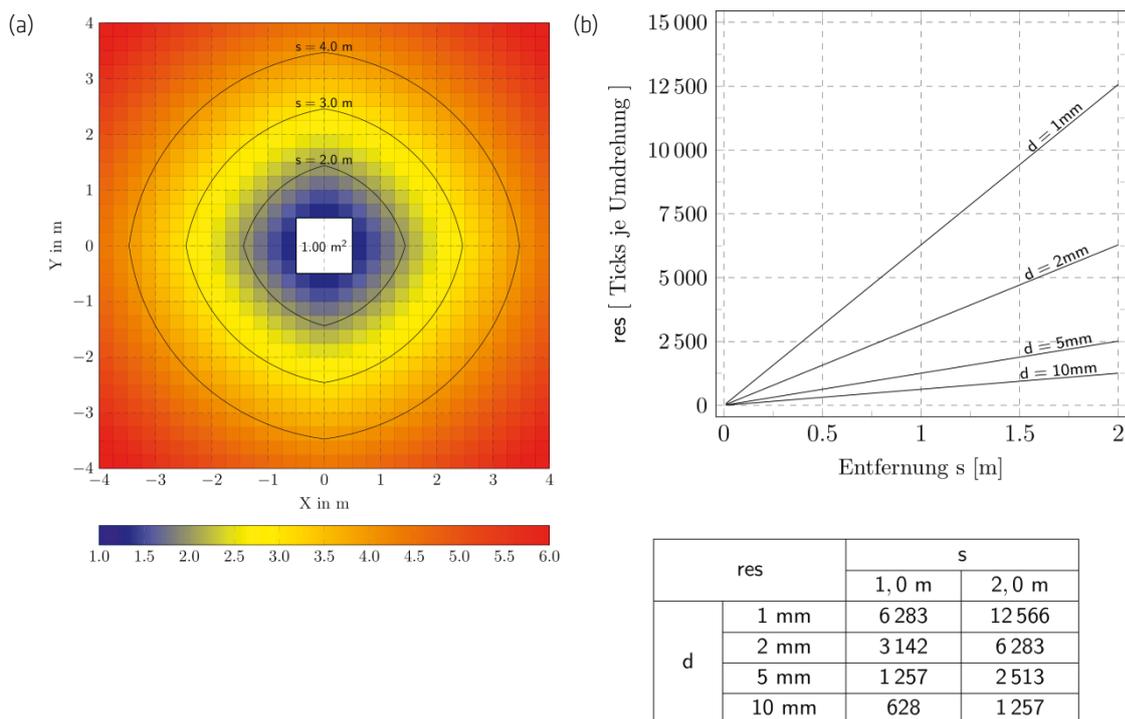


Abbildung 7: Konzeption der Seilzug- und Winkelencoder-Eigenschaften (Basisstation). (a) Lage-Abstand-Verhältnis zur Ermittlung von gangbaren Seilzuglängen, (b) notwendige Winkelauflösung res unter Berücksichtigung des auflösbaren Punktabstands d .

Zur Beschaltung des Seilzugs und des Winkelencoders, zur Kommunikation zwischen den Komponenten sowie zur Auswertung der Positionsinformationen ist entsprechende Hardware notwendig. Die Elektronik, bestehend aus einem Mikroprozessor, mehreren Pegelwandlern, verschiedenen Spannungsversorgungen und einigen weiteren Bauelementen, sollte kompakt auf einer kleinformatischen Platine (z.B. 70mm x 70mm) integrierbar sein, so dass diese problemlos in der unmittelbaren Nähe zum Seilzug und Winkelencoder montiert werden kann. Die Übertragung der Koordinatendaten auf den Messrechner wird drahtlos per WLAN realisiert. Dies verbessert die Handhabung zwischen den frei positionierbaren Komponenten im Vergleich zu einer kabelgebundenen Realisierung.

Angefragte Prüfaufgaben sowie die Erfahrungen der Ingenieurbüros zeigen, dass vor allem vertikale - oder Über-Kopf-Messung von baupraktischer Relevanz sind. Darüber hinaus dient die Basisstation als Bezugspunkt des Koordinatensystems. Schlussfolgernd ergibt sich, dass die



Basisstation stets fest und unverrückbar am Prüfobjekt installiert werden muss. Dies führt dazu, dass das Erfassungssystem auf einem Saugfuß mit Vakuumpumpe montiert wurde.

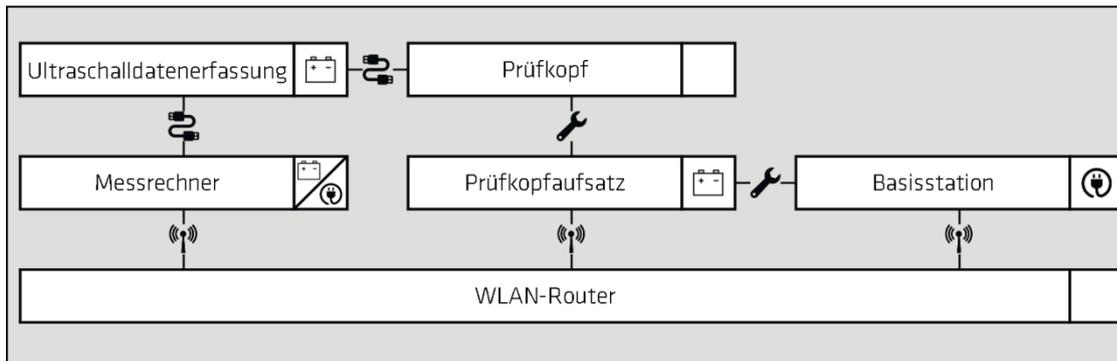
Im Zuge des Forschungsvorhabens entstanden mehrere Prüfkopfaufsätze (vgl. Abbildung 81 im Anhang). Im Zentrum der Entwicklungen standen folgende Anforderungen:

- die online-Darstellung der aktuellen Polarisations- und Positionsinformationen
- die Realisierung eines benutzerfreundlichen Auslösemechanismus mit visuellem / akustischem Feedback
- die rudimentäre Ergebnisdarstellung der Ultraschalldaten zur Schnellbewertung
- die drahtlose Kommunikation zwischen Aufsatz und Messrechner
- die Realisierung eines Eingabemechanismus zur Verwaltung von Systemparametern
- die Bereitstellung einer autarken Energieversorgung
- das Vorhandensein einer Griffmöglichkeit

Wie bereits in der Konzeptbeschreibung unter Abschnitt 3.2 erläutert, ist eine drehbare Seilaufnahme am Prüfkopfaufsatz notwendig. Die Ausrichtung der Aufnahme wird durch einen Winkelencoder permanent ausgewertet und ermöglicht somit im Zusammenspiel mit den Winkelinformationen der Basisstation eine Lage- / Polarisationsbestimmung des Prüfkopfs in Bezug auf das Messfeld.

Die ergonomischen und baupraktischen Eigenschaften des Prüfkopfaufsatzes sind bei den verschiedenen Entwicklungsstufen im Vergleich zu den funktionell / technischen Anforderungen meist nur nachrangig bzw. kaum berücksichtigt worden. Durch die Initiative des Industriepartners Neobotix konnte gegen Projektende ein baustellentauglicher Prüfkopfaufsatz erfolgreich in Betrieb genommen und getestet werden. Darüber hinaus ist ein gesamtheitlicher Designentwurf zum Positionserfassungssystem unter Aspekten wie Ergonomie, Benutzerfreundlichkeit, Baustellentauglichkeit in Form einer Bachelorarbeit erstellt worden. Im Abschnitt 3.2.4, Abbildung 16 sind die Entwicklungsergebnisse von Neobotix und das Industrial Design beschrieben und näher erläutert.

In Abbildung 8 sind die Systemkomponenten, die zugrundeliegende Verbindungsstruktur und die Spannungsquellen der jeweiligen Hardwareteile visualisiert.



- Legende:**
- mechanische Verbindung (Verschraubungen, Verbindungseil)
 - kabelgebunden Verbindung (USB-Kabel, Koaxialkabel)
 - drahtlose Verbindung (WLAN)
 - Spannungsversorgung durch Batterie
 - Spannungsversorgung durch Netzteil

Abbildung 8: Systemkomponenten (Hardware). Im Zuge des Forschungsvorhabens sind verschiedene Versionen der Basisstation und des Prüfkopfaufsatzes konzipiert, konstruiert und getestet worden (vgl. Abbildung 81 im Anhang). Die dargestellte Verbindungsstruktur liegt aber allen Varianten zugrunde. Bei den restlichen Systemkomponenten handelt es sich um kommerzielle Produkte, die entsprechend konfiguriert wurden. Zu jeder Systemkomponente ist die dazugehörige Spannungsquelle angegeben. Der Prüfkopf als passives Element benötigt keine Versorgung.

Software

Auf dem zentralen Messrechner befinden sich die Softwareentwicklungen zur:

- a. Aufnahme und Verarbeitung der Positionsinformationen
- b. 2D-Darstellung der Positionen inklusive Transformation in kartesische Koordinaten
- c. Messfeldanpassung durch Translation und Rotation des Ursprungskoordinatensystems
- d. Konfiguration des kommerziellen Ultraschallgeräts und Ultraschalldatenaufnahme
- e. Rekonstruktionsrechnung mit Bildgebung
- f. 1D-Signalanalyse.

Die Aufnahme-Funktionalitäten (a.-d.) sind in einem Programm zusammengefasst. Im nachfolgenden Abschnitt wird die Positionserfassungssoftware näher erläutert. Die umfangreichen Berechnungen zur Rekonstruktion und Ergebnisdarstellung (e.-f.) sind in eine performantere Software-Umgebung ausgelagert und als separates Programm ausführbar. Die Details zur Umsetzung der Rekonstruktion, zur Bildgebung und zur 1D-Signalanalyse werden im Kapitel 4 ausführlich dargestellt.

Im Prinzip ist es möglich die beiden Programme auf verschiedenen Computern auszuführen. Dies würde eine permanente Netzwerkverbindung notwendig machen, um den Datenaustausch zu ermöglichen, und auch einen höheren Geräte- und Handhabungsaufwand bedeuten. Das Messszenario mit zwei Messrechnern bietet unter Einsatz zweier Prüffingenieure den großen Vorteil, dass parallel Messungen ausführbar wären und zeitgleich die Rekonstruktions-



ergebnisse analysiert und bewertet werden könnten. Durch die Koordination zwischen Mess- und Auswertingenieur würde die gezielte, kumulative Erweiterung der Messdaten effizient genutzt werden.

Der Datenaustausch zwischen Positionserfassungssoftware und online-Rekonstruktionsprogramm geschieht über eine gemeinsame Datei. Sobald eine Messung durch den Anwender ausgelöst/getriggert wird, bestimmt das Positionserfassungsprogramm die aktuelle Position und initiiert eine Ultraschallmessung. Die Ultraschalldatenerfassung liefert anschließend die Amplitudenwerte an die Positionserfassungssoftware zurück. Die zur Aufnahme gehörenden Einstellungs- und Koordinateninformationen werden den Ultraschalldaten vorangestellt und gebündelt am Dateiende angefügt. Die so entstehende A-Scan-Sammeldatei wird kontinuierlich von der Rekonstruktionssoftware überprüft. Sowohl das Hinzufügen von Daten als auch das Ändern der Positionswerte infolge einer Messfeldanpassung führen hierbei zu einer Neuberechnung. Darüber hinaus kann der Anwender jederzeit die Rekonstruktionsparameter anpassen, so dass eine Aktualisierung der Rekonstruktion notwendig wird. Jedes Programm verwaltet darüber hinaus noch lokale Konfigurations- und Datendateien.

Die realisierte Kommunikation über eine gemeinsame Datei ermöglicht den beiden Programmen in ihrem jeweiligen Verarbeitungstempo voranzuschreiten, so dass keine Wartesituation z.B. in Folge umfangreicher Rekonstruktionsberechnungen entsteht. Neben diesem asynchronen Datenaustausch ist eine Kommunikation basierend auf User Data Protocol- Nachrichten (UDP-Nachrichten) implementiert worden. Da es sich hierbei um einen verbindungslosen Datenaustausch handelt, der gegebenenfalls verlustbehaftet sein kann, werden nur unkritische Informationen über diesen Kanal versandt. Für die Visualisierung der aktuellen Prüfkopfposition im Rekonstruktionsprogramm ist ein entsprechendes UDP-Nachrichtenformat spezifiziert und implementiert worden.

Abbildung 9 visualisiert das Systemkonzept der Software.

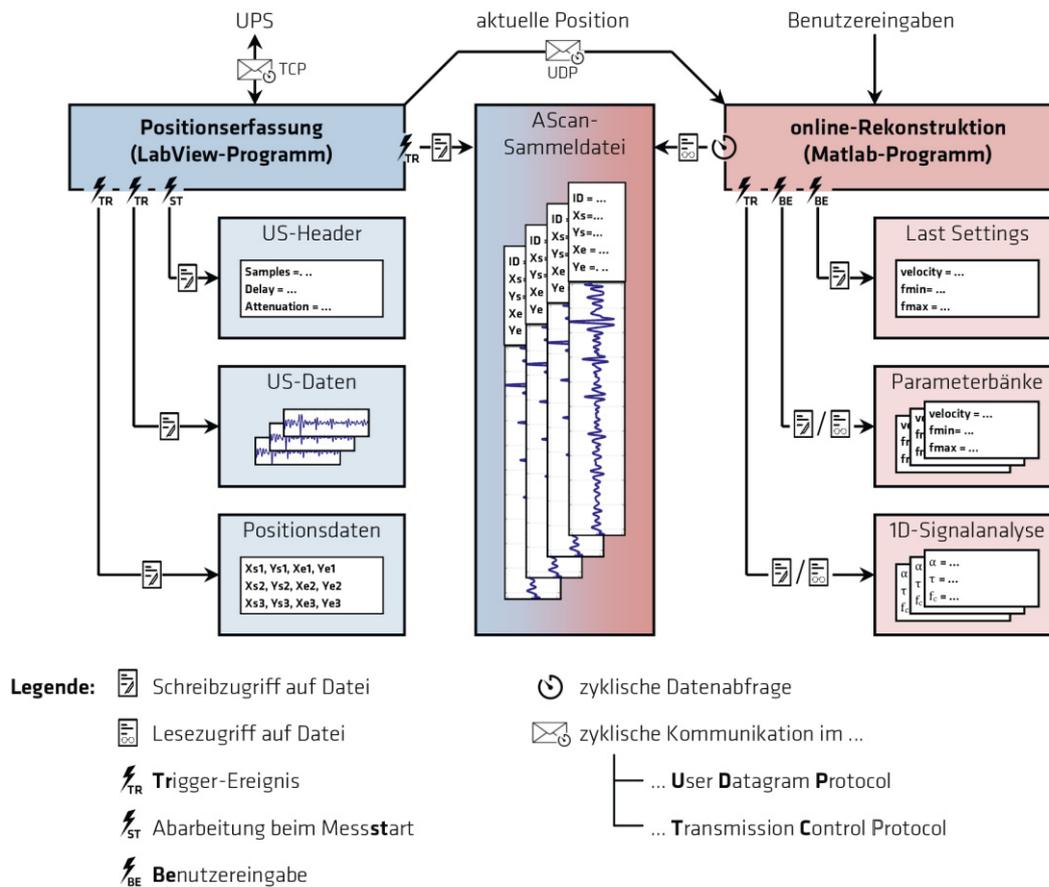
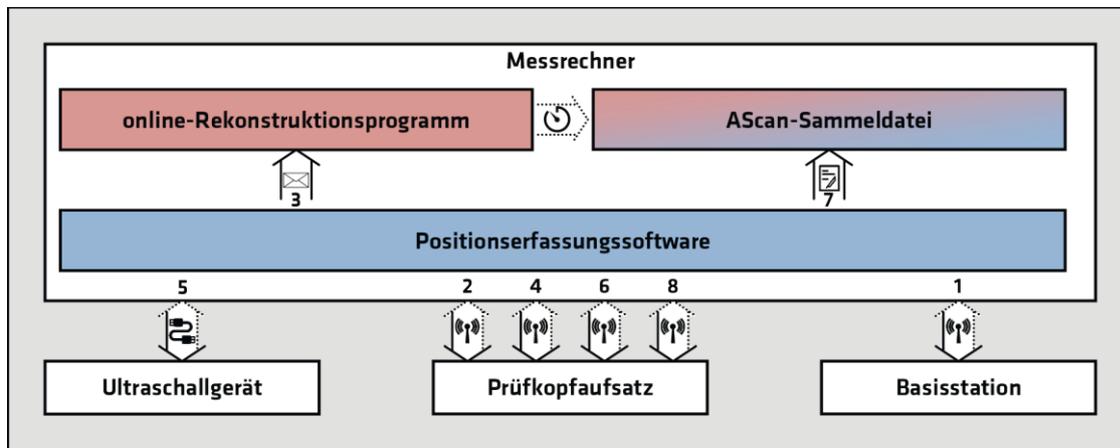


Abbildung 9: Systemkonzept (Software). Die beiden im Forschungsvorhaben entwickelten Programme zur Positionserfassung und online-Rekonstruktion tauschen die Einstellungs-, Positions- sowie Ultraschalldaten asynchron über eine A-Scan-Sammeldatei aus. Das USP-System signalisiert dem Positionserfassungsprogramm ein Auslöseereignis in dessen Folge die Positions- und Datenerfassungsprozesse gestartet und die Sammeldatei aktualisiert wird. Sowohl Benutzereingaben als auch Dateiänderung führen zu einer Aktualisierung der Rekonstruktionsergebnisse. Ein separater Kommunikationskanal auf Basis von UDP-Nachrichten ist ergänzend dazu implementiert worden, um dem Rekonstruktionsprogramm die aktuelle Prüfposition zugänglich zu machen. Jedes Programm verwaltet darüber hinaus noch lokale Konfigurations- und Datendateien.

3.2.2 Positionserfassungssoftware

Wie bereits beschrieben ist das Positionserfassungsprogramm für die Aufnahme und Verarbeitung der Positionsinformationen, für die 2D-Darstellung der Positionen inklusive Transformation in kartesische Koordinaten, für die Messfeldanpassung durch Translation und Rotation des Ursprungskoordinatensystems sowie für die Konfiguration des kommerziellen Ultraschallgeräts und für die Ultraschalldatenaufnahme zuständig. Die Software bündelt und koordiniert somit eine Vielzahl von Kommunikationsschnittstellen und Verarbeitungsabläufe. Die Verbindungsstruktur sowie der Kommunikationsablauf sind nach dem Master-Slave-Prinzip organisiert. Die zentrale Einheit - der Master - initiiert jedwede Kommunikation innerhalb des Gesamtsystems und die peripheren Elemente - die Slaves - agieren rein passiv und reagieren nur bei direkter Anfrage durch den Master. In Abbildung 10/Abbildung 7 ist der Kommunikations- und Verarbeitungsablauf der Positionserfassungssoftware dargestellt.



Kommunikationsablauf / Verarbeitungsschritte:

- 1 Anfrage zu aktuellen Polarkoordinaten
- 2 Anfrage zur Ausrichtung der Seilaufnahme
- 3 Übermittlung der aktuellen Position für Cursorsdarstellung
- 4 Übermittlung der aktuellen Position und Polarisierung zur Ausgabe auf Prüfkopfdisplay
+ Abfrage von Trigger-Ereignissen
- 5 Initiierung einer Ultraschallmessung
- 6 Übermittlung der auf die Displayauflösung skalierten AScan-Daten zur Ausgabe am Prüfkopf
- 7 Aktualisierung der Sammeldatei
- 8 Ausgabe eines akustischen Signals

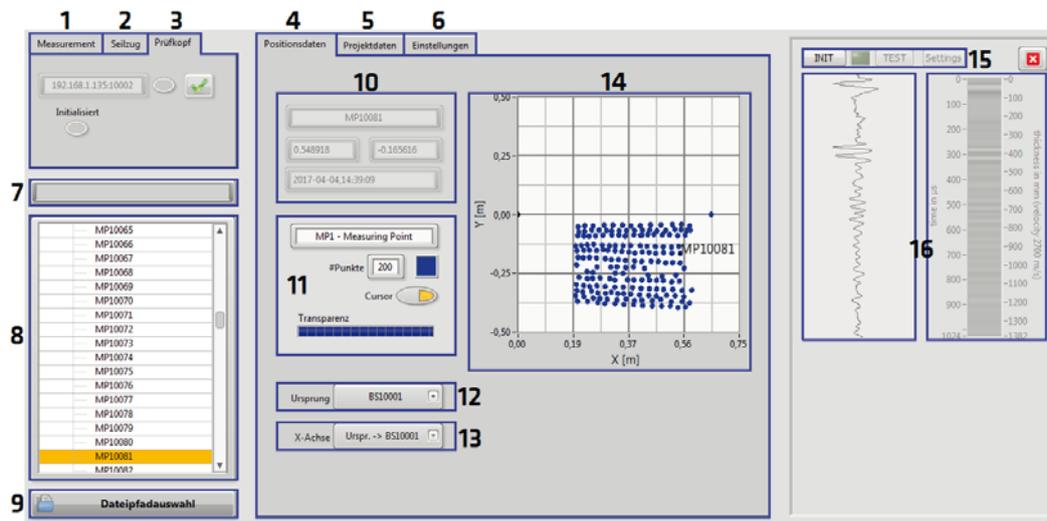
Legende:

- drahtlose Verbindung
- kabelgebunden Verbindung
- Dateizugriff
- UDP-Nachricht
- bidirektionale Kommunikation (Master-Slave-Prinzip)
- unidirektionale Kommunikation
- zyklisches Überprüfen

Abbildung 10: Kommunikations- und Verarbeitungsablauf zwischen Positionserfassungssoftware und restlichen Systemkomponenten.

Aus der Abbildung 10 ist erkenntlich, dass die zentralisierte Realisierung mit der Positionserfassungssoftware als Master einen hohen Kommunikationsaufwand zwischen Messrechner und Prüfkopfaufsatz aufweist. Ein denkbare, dezentrales Kommunikationskonzept, in dem z.B. der Prüfkopf direkt die Positionsinformation von der Basisstation abfragt, würde den Kommunikationsaufwand reduzieren und folglich den Kommunikationsprozess ganzheitlich beschleunigen. Nachteilig ist, dass dabei parallele Kommunikationsstrukturen entstehen würden, die dann zu Synchronisationsproblemen bei den Verarbeitungsabläufen führen können.

Abbildung 11 zeigt die Benutzeroberfläche der Positionserfassungssoftware. Die verschiedenen Bestandteile sind zum Verständnis entsprechend kommentiert.



Nr	Beschreibung
1	Reiter auf dem das Tracking ¹ aktiviert / deaktiviert werden kann.
2	Reiter auf dem ein Kommunikationscheck mit der Basisstation durchgeführt werden kann.
3	Reiter auf dem ein Kommunikationscheck mit dem Prüfkopfaufsatz durchgeführt werden kann.
4	Übersicht zu den allen Positionsdaten
5	Übersicht zu den Projektpfaden und -dateien
6	weitere Einstellungsmöglichkeiten zur Anpassung von Apparaturparametern
7	Antwort der Systemkomponenten auf Kommunikationsanfragen bzw. Ausgabe von Fehlerinformationen
8	Übersicht zu aufgenommen Messpunkten, Auswahl (orange) aktualisiert den Positionsinformationbereich (10) sowie die A-Scan-Darstellung (16) und markiert durch einen Cursor die Position (14)
9	Dateiauswahl-Option um abgeschlossene Messfelder einzuladen
10	Positionsinformation bestehend aus Punktname, Koordinaten ² und Aufnahmezeitpunkt
11	Informationen zur Messpunktgruppe ³ / Einstellung von Visualisierungsoptionen
12	Translationspunkt zur Messfeldanpassung (Spezifikation des Koordinatenursprung)
13	Rotationspunkt zur Messfeldanpassung (Ausrichtung der X-Achse)
14	2D-Positionsdarstellung, bei aktivem Tracking wird die aktuelle Position durch ein Cursor visualisiert
15	Kommunikationstest und Einstellungsbereich für Ultraschalldatenaufnahmesystem A1220
16	A-Scan-Darstellung als Zeitkurve und Intensitätsbild

¹ zyklische Positionsbestimmung und Ausgabe der aktuellen Position auf dem Prüfkopfdisplay

² Positionen unter Berücksichtigung der Messfeldanpassung mittels Translation (12) und Rotation (13)

³ vorgesehen für eine Mehrfeldmessung (noch nicht realisiert). Es handelt sich um eine Kombination mehrerer Messfelder. Die Basisstation soll hierbei jeweils neu positioniert werden. Zwei Überschneidungspunkte zwischen neuem Messfeld und aktuellem Mehrfeld ergeben die notwendigen Informationen zur Integration der neuen Messpunkte.

Abbildung 11 : Benutzeroberfläche der Positionserfassungssoftware

3.2.3 Apparatur für Messungen in der Prüfhalle

Dieser Abschnitt beschreibt kurz die für Messungen in der Prüfhalle hauptsächlich verwendete Apparatur. Die Komponenten des USP-Systems sind in Abbildung 12 dargestellt.



- 1 Kabeltrommel
- 2 Messrechner (Laptop)
- 3 Maus
- 4 Netzteil für Messrechner
- 5 A1220-Datenaufnahme
- 6 USB-Kabel
- 7 Datenverbindungskabel (A1220 <-> Prüfkopf)
- 8 Prüfkopf
- 9 Prüfkopfelektronik mit Anzeige und Griff
- 10 WLAN-Router
- 11 Netzteil für WLAN-Router
- 12 Basisstation
- 13 Netzteil für Basisstation

Abbildung 12: Komponenten des Positionserfassungssystems (UPS-Version 2.3)

Komponentenbeschreibung für die Basisstation:

„Unterhalb der orangenen Trägerplatte befindet sich in einer kreisförmigen Nut eine 10 mm breite Schaumgummidichtung, welche das Ansaugen der Basisstation gewährleistet. Das Vakuum wird mittels einer 24V Pumpe der Marke Thomas (2) erzeugt, die auf der Oberseite der Platte sitzt. Auf der Trägerplatte befindet sich neben der Pumpe noch eine graue Feuchtraumdose (3) mit Elektronikbauteilen und ein blauer Zylinder (4), der den Winkelencoder beinhaltet. Auf dem blauen 3D-Druck-Zylinder sitzt die Seilzugmechanik (5), gelagert auf der Achse des Winkelencoders. An dem orange schwarzen Seilauszug befindet sich ein graues 3D-Druckteil (6). Dieses dient als Führungsarm für den dünnen, kunststoffummantelten Draht. Der aktuelle Aufbau der Basisstation kommt auf ein Gesamtgewicht von 1,85 kg (aus [10], S.16).



- 1 Saugfuß
- 2 Vakuumpumpe mit separatem Ein-Aus-Schalter
- 3 Gehäuse für Elektronik
- 4 Winkelencoder umschlossen von Zylindergehäuse
- 5 Seilzug
- 6 Führungsarm
- 7 Stecker für Stromnetzteil

Abbildung 13: Komponenten der Basisstation (USP-Version: 2.3)

Komponentenbeschreibung für den Prüfkopfaufsatz (hier auch als Handscanner bezeichnet):

„Oberhalb des Prüfkopfes befindet sich eine Platine mit Elektronikbauteilen. Mittig sitzt ein grauer 3D-gedruckter Handknauf, der mit vier Schrauben an den vorgesehenen Schnittstellen am Prüfkopf verschraubt ist. Oberhalb des Knaufes befindet sich ein monochromatisches Zeilendisplay für die Positions- und Neigungsanzeige sowie des Akku-Ladezustands. Seitlich fest verbaut befindet sich aktuell der 3,7 V Lithium-Ionen Akkumulator, der die benötigte Energie für den Betrieb des Handscanners bereitstellt. Geladen wird der Akku kabelgebunden über einen Mini-USB Anschluss an der Seite des Geräts. Gegenüberliegend zum Display, auf der anderen Seite des Handknaufs, befindet sich die Seilzugaufnahme, gelagert auf der Achse des zweiten Winkelencoders. Das Seil hält über eine Messing Gewindeaufnahme in einem 3D-Druck Ring aus Kunststoff. Das Gesamtgewicht des Handscanners einschließlich des Prüfkopfes beträgt 1,43 kg.“ (aus [10], S.17)



- 1 Prüfkopf
- 2 Platine mit Elektronikkomponenten
- 3 Seilzugaufnahme
- 4 Lithium-Ionen-Akkumulator
- 5 Handknauf
- 6 Joystick zur Menüsteuerung
- 7 Display

Abbildung 14: Komponenten des Prüfkopfaufsatzes (USP-Version: 2.3)

Abbildung 15 zeigt einen Anwendungstest in der BAM-Prüfhalle.

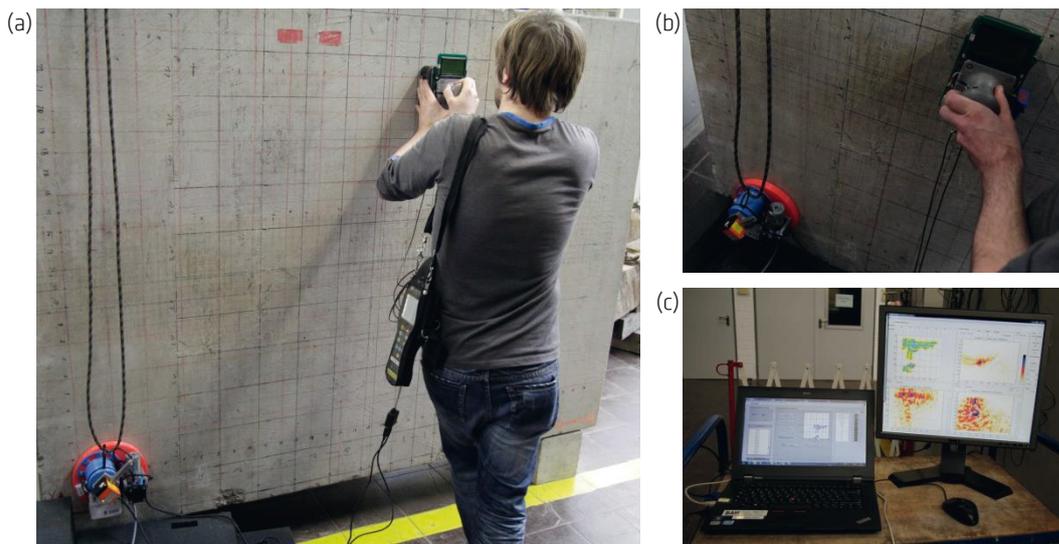


Abbildung 15: Anwendungstest an vertikaler Wand (USP-Version: 2.3). (a) Messsituation am Prüfbjekt, (b) Nahansicht zu den Hauptkomponenten des USP-Systems (Basisstation und Prüfkopfaufsatz), (c) Messrechner mit Positionserfassungs-Software (linker Bildschirm) und online-Rekonstruktionsprogramm (rechter Bildschirm)

3.2.4 Konzept und Bau einer baustellentauglichen Apparatur

Da die Basisstation kaum benutzerrelevante Eingabemöglichkeiten benötigt und die vorliegende Gehäusekonstruktion als eingeschränkt baustellene geeignet eingeschätzt werden kann, lag der Schwerpunkt für das Konzept und den Bau einer baustellentauglichen Apparatur auf dem Prüfkopfaufsatz. Die Konstruktion des zu bauenden Handteils mit Griff, Auslöser, Winkelencoder, Koordinatenanzeige und Kontrollelementen ist durch den Partner Neobotix realisiert worden. Die entwickelte Prüfkopfelektronik sollte bei der angestrebten Konstruktion möglichst unverändert integrierbar sein. Eine Neuentwicklung der Elektronik wäre im Rahmen des Projekts nicht mehr möglich gewesen. Aus den Erfahrungen der verschiedenen Anwendungstests hat sich vor allem die Seilzugaufnahme, welche durch Verschraubung hergestellt wird, als benutzerunfreundlich herausgestellt. Neobotix hat zur Lösung des Problems einen magnetischen Schnellverschluss entwickelt. Konstruktionsansichten und Bilder vom erfolgreichen Anwendungstest sind in Abbildung 16 dargestellt.



Abbildung 16: Baustellentauglicher Prüfkopfaufsatz (Neobotix). (a) Konstruktionsansichten, (b) Anwendungstest (UPS-Version 3.3), (c) Detailaufnahme zu Seilaufnahme / -verschluss und Auslösemechanismus

Die elektrischen Bauelemente sind in einem spritzwassergeschützten Gehäuse untergebracht, das gleichzeitig als Halterung für den Ultraschallprüfkopf dient. Der Prüfkopfaufsatz ist für eine zweihändige Nutzung konzipiert. Die Gehäuseränder dienen hierbei als Griff. Die Auslöseknöpfe sind in Daumenreichweite zu den Rändern positioniert.

Im Vergleich zu den Messungen mit der Prüfhallen-Apparatur kann festgehalten werden, dass der Andruck weniger kraftraubend und das Auslösen einer Messung benutzerfreundlicher sind. Auch der Schnellverschluss vereinfacht die Handhabung signifikant.

Im Zuge der Diskussionen zu möglichen Weiterentwicklungspotentialen während des ersten Arbeitstreffens im März 2016, regte Prof. Taffe (Fachgutachter des Projekts) an, in das Gesamtkonzept das Fachgebiet Industriedesign der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) einzubeziehen. Ziel sei es hierbei Impulse für die Funktionalität und Ergonomie des Systems zu erhalten und den Weg zur baupraktischen Weiterentwicklung aufzuzeigen.

Im Zuge einer Bachelorarbeit zur gestalterischen Weiterentwicklung des Systems sind die verschiedenen technischen, ergonomischen und konstruktiven Facetten umfangreich analysiert worden. Auf der Grundlage dieser Ergebnisse sind ein gesamtheitlicher Entwurf bis hin zu einem ergonomischen Modell (siehe Abbildung 17) entstanden. Eine Zusammenfassung der Arbeit, ein Auszug zu den entstanden Skizzen und Entwürfen sowie weitere Modellansichten sind im Abschnitt 11.3 im Anhang zu finden.



Abbildung 17: Industrial Design (aus [10], S. 83)

3.3 Validierungsmessungen mit Scanner

Nach den ersten prinzipiellen Anwendungstests ist es erforderlich, die Genauigkeit der Positionserfassung und das Zusammenspiel zwischen den verschiedenen Messsystemkomponenten und der Software zu untersuchen. Durch systematische Messungen mit einem modifizierten BAM-Baustellenscanner sind automatische Messungen mit hoher Positionierungspräzision möglich. Manuelle Testmessungen auf einem Messraster bieten bei weitem nicht die Genauigkeit, die benötigt wird, um auch Positionierungsfehler im Bereich von ≤ 5 mm sicher validieren zu können.

Für die USP-Versionen 0.0 und 0.1 sind keine Validierungsmessungen durchgeführt worden, da die Positions- und Datenübergabe zwischen Positionserfassungssoftware und online-Rekonstruktionsprogramm damals noch nicht realisiert waren.

Die erste Validierungsmessung mit Scanner ist im März 2016 an einem Referenzprobekörper mit oberflächennaher Bewehrung und variierender Bauteildicke durchgeführt worden.

Abbildung 18 zeigt den damaligen Messaufbau (USP-Version: 1.2).

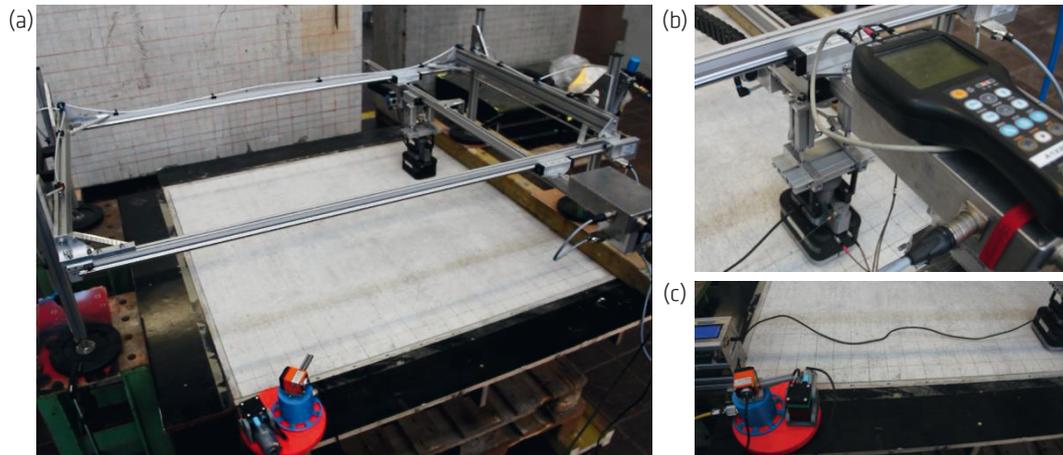


Abbildung 18: Validierungsmessung mit Baustellenscanner. (a) Scanner mit USP (Version 1.2), (b) am Scanner verbautes Ultraschallmessgerät, (c) Verbindung zwischen Basisstation und Prüfkopfaufsatz

Durch ein mäanderartiges Verfahren von fünf Messlinien konnten die Ein- und Auszieheigenschaften des Seilzugs beobachtet und das Winkelencoder-Verhalten analysiert werden. Es hat sich während der Validierungsmessung gezeigt, dass rücklaufende Messlinien (also Linien, bei denen der Seilzug das Mess-Seil einziehen muss) fehlerbehaftet sind. Hierbei ist ersichtlich geworden, dass die Winkeländerungen des Messseils trotz Seilführung nicht einwandfrei auf den Winkelencoder übertragen wurden. Diese Winkelfehler resultieren dann folglich in fehlerhaften Koordinaten. In Abbildung 82 im Anhang sind der Probekörperaufbau und die entsprechenden Positions- und Rekonstruktionsergebnisse ergänzend dargestellt.

Eine zweite Validierungsmessung ist im Juli 2016 mit der USP-Version 2.2 durchgeführt worden. Da an dieser Stelle nur auf die Positionsdaten eingegangen wird, verzichten wir auf die Vorstellung des verwendeten Probekörpers. Im Gegensatz zur Messung im März ist ein wesentlich größeres Messfeld angelegt und vermessen worden (24 Messlinien in einem Abstand von 50mm mit jeweils 61 Messpunkten im Raster von 20mm). Die Messlinien sind kammartig verfahren worden, um den bereits erkannten Fehler bei rücklaufenden Messlinien zu unterdrücken. Die händischen Messungen mit der USP-Version 2.2 im Vorfeld der Validierungsmessung zeigten, dass das System eine teils sehr hohe Latenz von bis zu zehn Sekunden aufwies. Der Scanner ist darauf angepasst worden und realisierte ca. alle sieben Sekunden einen Messpunkt. Abbildung 19 visualisiert den Vergleich zwischen den Soll-Positionen, die durch das Scanraster vorgegeben sind, und den durch das USP-System ermittelten Ist-Koordinaten. Folgende Auffälligkeiten / Fehler sind erkennbar:

- a. Innerhalb mehrerer Messlinien fehlen sporadisch Messpunkte.
- b. Die Positionen im Nahfeld der Basisstation (=Ursprung) weisen starke Abweichungen zwischen Soll und Ist auf.

- c. Die Ist-Werte der Y-Koordinate nehmen keine positiven Werte an.
- d. Fünf Messpunkte weisen mit „Not-A-Number“-Werten für X bzw. Y völlig fehlerhafte Koordinaten auf (hier nicht dargestellt).

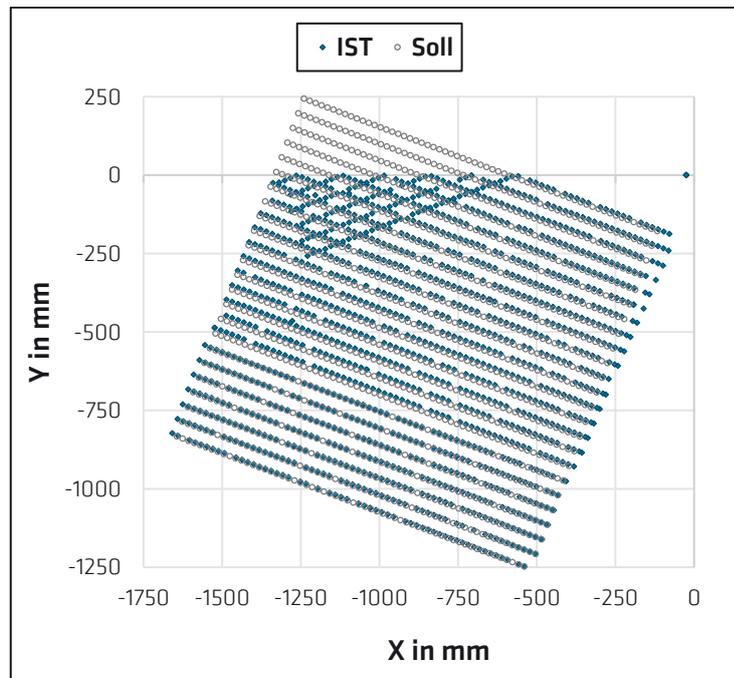


Abbildung 19: Validierungsmessung zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit (USP-Version: 2.2, Juli 2016). Dargestellt sind die Soll-Position, die durch den Scanner vorgegeben ist, und die durch das USP-System ermittelte Koordinate als IST-Wert. Das Messfeld ist unangepasst dargestellt (=keine Koordinatensystemtransformation).

Der Punkt a. zusammen mit der langsamen Messgeschwindigkeit begründete die Notwendigkeit für die Überarbeitung der Basisstationselektronik. Die Positionsabweichungen im Nahfeld (Punkt b.) deuten auf Probleme bei der Winkelbestimmung hin, da sich in dem Bereich vor allem diese Polarkoordinatenkomponente ändert. Der Y-Koordinatenfehler (c.) stellte sich als ein Implementierungsfehler in der Positionserfassungssoftware heraus und ist behoben worden. Die beschriebene Auffälligkeit in d. ist als ein kombiniertes Problem aus dem umfangreichen Kommunikationsablauf (vgl. Abbildung 10) und der zyklischen Bestimmung der aktuellen Position identifiziert worden. Softwareseitig sind Mechanismen umgesetzt worden, die die Datenaufnahme in solchen Fällen verhindert und diese bis zu den nächsten validen Positionswerten aufschiebt. Die gewonnenen Erkenntnisse sind in die Konzipierung, Implementierung und Konstruktion der USP-Version 2.3 eingeflossen.

In einer dritten Validierungsmessung im November 2016 stand die Version 2.3 dann auf dem Prüfstand. Eine Kammmessung bestehend aus 24 Messlinien mit jeweils 27 Messpunkten (Raster: 50 x 50mm) sollte Aufschlüsse über die erzielbare Messgeschwindigkeit sowie dem Winkelverhalten geben. Auf die Vorstellung des verwendeten Probekörpers wird wieder verzichtet. Die Ergebnisse zur Positioniergenauigkeit sind als Soll-Ist-Wert-Vergleich in Abbildung 20 visualisiert. Zwei Auffälligkeiten sind aus der Darstellung erkennbar. Zum einen

fehlen an mehreren Stellen einzelne oder kurz aufeinanderfolgende Messpunkte. Zum anderen weisen die Soll- und Ist-Positionen mit steigender Entfernung zur Basisstation Abweichungen auf.

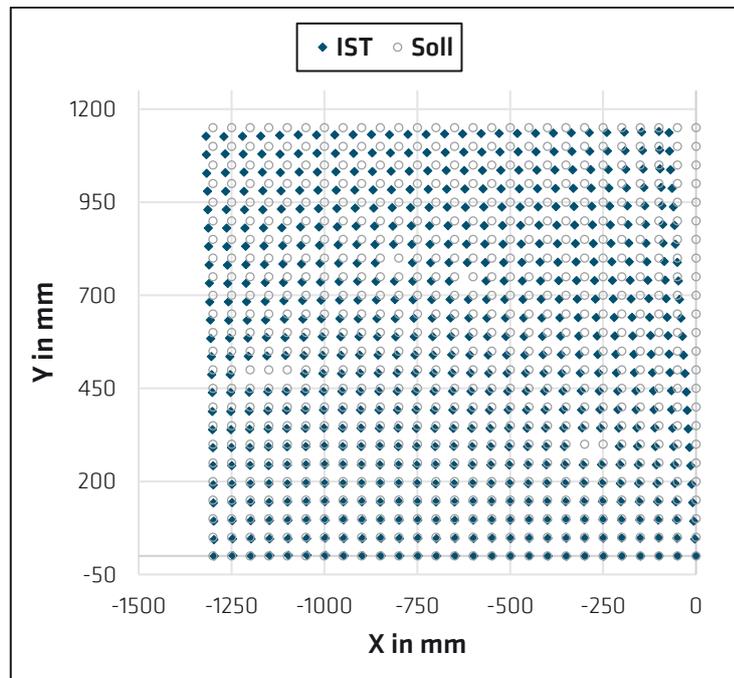


Abbildung 20: Validierungsmessung zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit (USP-Version: 2.3, November 2016). Dargestellt sind die Soll-Position, die durch den Scanner vorgegeben ist, und die durch das USP-System ermittelte Koordinate als IST-Wert. Das Koordinatensystem ist zum ersten Messpunkt hin verschoben und auf die erste Messlinie ausgerichtet worden. Die Position der Basisstation ist nicht dargestellt.

Die Messgeschwindigkeit betrug ca. eine Sekunde und liegt damit im Bereich der geforderten Systemanforderung (vgl. Tabelle 2).

Während der Scannermessung kam es immer wieder zu Kommunikationsabbrüchen durch Zeitüberschreitung. In solchen Fällen fuhr der Scanner zunächst unverändert sein Messraster ab bis er schließlich angehalten worden ist. Dies erklärt die fehlenden Positionswerte in den Messlinien. Ursächlich für den Kommunikationsfehler war hierbei stets die Elektronik des Prüfkopfaufsatzes, die dann nur durch einen Reset wieder funktionstüchtig gemacht werden konnte. In der hardwarenahen Programmierung des verwendeten Mikrocontrollers sind nun Fehlerbehandlungsmechanismen für solche Situationen implementiert.

Die Abweichungen zwischen den Soll- und Ist-Werten beruhen auf einem mechanischen Problem mit der Kabelanbindung zwischen dem drehbar gelagerten Seilzug und der auf dem Saugfuß fest installierten Elektronik. Das Kabel wirkt als Hebelarm und hindert mitunter die freie und ungehemmte Drehung des Seilzugs. Eine gezielte Kabelführung mit Zugentlastung konnte das Problem auch in nachfolgenden Messungen nicht beheben. Die Verwendung von Schleifkontakten könnte die Anbindung zwischen den Komponenten verbessern. Dieser Ansatz konnte aus Zeitgründen leider nicht mehr verfolgt werden.



4 Messergebnisdarstellung und Rekonstruktionsrechnung

4.1 Allgemeine Anforderungen

Das Ziel der Hard- und Softwareentwicklung ist es, die Ergebnisse von Ultraschallmessungen interaktiv auszuwerten, zu verfeinern und zu klassifizieren.

Dies kann nur erreicht werden, wenn die gemessenen Signale (A-Bilder) durch eindimensionale Signalanalysemethoden analysiert werden, da die Daten für mehrdimensionale Analyse noch nicht verfügbar sind. Das Ziel der 1D-Signalanalyse kann es sein, Reflexionen von bekannten oder unbekanntem Objekten oder typischen Mehrfachreflexionen von Objekten zu unterscheiden. Die verfügbare Information ist in zwei Klassen unterteilt:

- a. Signale, die erwartet werden und untersucht werden müssen. Dies sind z.B. Reflexionen von Rückwandsignalen oder Vielfache davon und Reflexionen der Oberflächenwellen an den Begrenzungen des Objekts welches untersucht wird. Mithilfe dieser Signale können auch Geschwindigkeitsschätzungen durchgeführt werden. Es ist jedoch schwierig, verschiedene Arten von Reflexion in eindimensionalen Signalen (A-Scans) zu unterscheiden.
- b. Die zweite Kategorie (Klasse b) sind die Signale von Fehlstellen oder Reflektoren, die zu untersuchen sind, wie z.B. Spannkane, Ablösungen, Kiesnester oder Material-Entmischungen.

Kriterien müssen entwickelt werden, um diese Fälle zu unterscheiden, so dass eine Trennung von gemischten Signalen erreicht werden kann. Um die Zuverlässigkeit eines Ergebnisses abzuschätzen, ist es erforderlich die Position eines Reflektors zu ermitteln. Dies kann nur durch eine Art Triangulation erreicht werden. In unserem Fall wird eine Variante der Synthetic Aperture Focusing Technique (Synthetische Apertur Fokussierungs-Technik, SAFT) eingesetzt, eine Methode der zerstörungsfreien Werkstoffprüfung, die von der Idee der Rückausbreitung des gemessenen Wellenfeldes abgeleitet ist. Die konventionelle SAFT Methode wird bei äquidistantem Messraster und häufig bei ebenen Flächen angewendet. Dies ist im allgemeine aber nicht notwendig.

4.2 Eindimensionale Methoden der Signalanalyse

Die Möglichkeiten und die in der Literatur beschriebenen Methoden, um eindimensionale Signale zu bearbeiten, sind vielfältig, da viele Anwendungen der akustischen, elastischen und elektromagnetischen Wellenausbreitung ähnlich gelagerte Probleme aufweisen [9]. Für unseren Zweck haben wir uns auf bekannte Verfahren konzentriert, die auch auf einem kleinen und flexiblen Messgerät verwendet werden können. Die nach mehreren vergleichenden Untersuchungen hier hauptsächlich gewählte Methode wird als „Model-based Echo Decomposition“ bezeichnet.



4.2.1 "Model-based Echo Decomposition"-Methode

Die Methode wird verwendet, um Echoimpulse im Ultraschallsignal nacheinander zu identifizieren und zu extrahieren. Jedes Echo kann durch ein mathematisches Modell mit Hilfe einer Gaußfunktion $s(t)$ beschrieben werden, das durch fünf Parameter $[\alpha, \tau, f_c, \varphi, \beta]$ bestimmt wird. Das Modell und die Beschreibung einzelner Parameter lauten:

$$s(t) = \beta \cdot e^{-\alpha \cdot (t-\tau)^2} \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f_c \cdot (t - \tau) + \varphi)$$

- α : Alpha beschreibt den Bandbreitenfaktor und damit die Echodauer an.
- τ : Tau ist die Ankunftszeit oder die Zeit, bei der der Maximalwert der Hüllkurve eines Echos liegt. Für ein symmetrisches Echo liegt die Ankunftszeit in der Echomitte.
- f_c : Bedeutet die Mittenfrequenz. Das Ultraschallecho ist eine Synthese von sinusförmigen Wellen mit unterschiedlichen Frequenzen unterschiedlicher Amplitude. Die Mittenfrequenz ist die Frequenz, bei der die maximale Energie des Echos im Spektralbereich auftritt.
- φ : Die Phase beschreibt eine Formveränderung. Der Phasenwert beinhaltet Informationen der reflektierenden Objekte, wie z.B. Materialeigenschaften. Er ist von Bedeutung bei der Klassifizierung von Objekten, aber bei der 1D-Signalanalyse reicht er nicht aus um den Streuvorgang vollständig zu beschreiben.
- β : Die Amplitude stellt die Höhe der Signalauslenkung im Zeitbereich dar. Beim normalisierten Signal wird dieser Parameter als Amplitudenkoeffizient bezeichnet.

Aufgrund der mathematischen Darstellung der Gaußfunktion wird für die Parameterschätzung die „Maximum-Likelihood“-Methode verwendet. Diese Methode schätzt die Modellparameter durch Maximierung der Wahrscheinlichkeit der Ähnlichkeit der Gaußfunktion mit dem Messsignal. Es wird der Unterschied zwischen der Gaußfunktion und dem realen Echo im Messsignal minimiert, daher kann das Problem auch als ein Minimierungsproblem betrachtet werden. Eine bekannte Methode zur Lösung von Problemen dieser Art ist das „Gauß-Newton-Verfahren“ (GN-Verfahren).

Beim GN-Verfahren wird versucht, das Minimum einer nichtlinearen Zielfunktion bei jedem Iterationsschritt zu finden. Die Zielfunktion lässt sich aus der numerischen Differenz zwischen dem Referenzsignal, oder in diesem Fall, dem realen Echo im Messsignal und der Gaußfunktion erstellen. Bei der Beschreibung des GN-Verfahrens ist die Berechnung der Jakobi-Matrix J des mathematischen Echomodells und auch die Matrizeninversion $(J^T J)^{-1}$ erforderlich, wobei J^T die transponierte Jakobi-Matrix bedeutet. Wird die Matrix $J^T J$ singulär, ist eine Iteration nicht möglich, bzw. wird fehlschlagen. Das Gleiche passiert auch bei einer schlecht konditionierten Matrix $J^T J$. Aufgrund numerischer Werte in der Matrix kann dieses Singularitätsproblem auftreten, deshalb wird die Matrixinversion $(J^T J)^{-1}$ durch eine analytische Berechnung bestimmt.



Um bei großer numerischer Differenz die Fehleranfälligkeit der Iterationsschritte zu reduzieren, wird ein lokales quadratisches Modell der Zielfunktion zur Regularisierung der Parameter bei jedem Iterationsschritt verwendet. Die Annahme ist, dass es eine Region um die aktuelle Iteration gibt, in der ein solches lokales Modell hinreichend genau ist, um eine nützliche Verbesserung der Parameter zu erzeugen. Diese Region wird allgemein als „Trust-Region“ bezeichnet. Es wird daher nicht ein reines GN-Verfahren, sondern eine modifizierte (regularisierte) Version des GN-Verfahrens mit dem Ansatz der Trust-Region verwendet. Der Ansatz des lokalen quadratischen Modells vermeidet die Änderungen der Minimierungsrichtung in die falsche Richtung und garantiert dabei auch die Konvergenz. Im Falle eines Versagens der Iteration oder bei Konvergenzproblemen können die möglichen Ursachen auf zwei Fälle zurückgeführt werden: Erstens: Die Empfindlichkeit des GN-Verfahrens bezüglich der Anfangswerte, z.B. wenn die Anfangswerte schlecht gewählt sind oder weit entfernt von dem Minimum liegen. Zweitens: Bei einem schlecht schätzbaren Referenzsignal, d.h. dass das parametrische Modell nicht an das Referenzsignal angepasst werden kann. In diesen Fällen dürfte die Berechnung scheitern.

Alternativ steht das sogenannte „Nelder-Mead-Verfahren“ (NM-Verfahren) als Optimierungsmethode zur Verfügung. Bei dieser Methode wird ohne notwendige Ableitungen der mathematischen Funktion versucht, das globale Minimum der Zielfunktion zu finden. Das Hauptkonzept ist die Verwendung eines speziellen Polytopes von $n+1$ Eckpunkte in n Dimensionen, wobei n die Anzahl der zu schätzenden Parameter bedeutet. Vor Beginn werden n Parametersätze erstellt, die sich jeweils durch eine Abweichung an einer Stelle von dem Parametersatz des Referenzmodells unterscheiden. Bei jedem Iterationsschritt wird die Zielfunktion für den aktuellen Parametersatz ausgewertet und nach dem Vergleich mit dem besten und schlechtesten Satz wird einer von vier Berechnungsschritten ausgewählt. Diese Berechnungsschritte werden durch die jeweilige Reflexions-, Expansions-, Kontraktions- und Komprimierungskoeffizienten gesteuert, die als Geschwindigkeit der Schritte definiert werden können.

Die Koeffizienten gewichten zwischen der Dauer und der Genauigkeit. Die größeren Werte können zu einer schnelleren Konvergenz aber zu ungenauen Abschätzungen führen und umgekehrt. Nach dem ausgewählten Berechnungsschritt wird der schlechteste Parametersatz durch einen neuen Satz ersetzt. Die Iteration wird beim Erreichen der Toleranzgrenze für den Unterschied zwischen dem Besten und dem Schlechtesten beendet. Diese Methode erreicht für die Abschätzung der parametrischen Gaußfunktion immer das globale Minimum und scheint unempfindlich gegenüber den Anfangswerten. Da das NM-Verfahren mehr Iterationsschritte als das GN-Verfahren benötigt, ist seine Rechenzeit deutlich länger. Daher wird das NM-Verfahren nur dann verwendet, wenn das GN-Verfahren aufgrund der beiden möglichen genannten Gründe ausfällt.

Die Identifizierung und Extraktion der Ultraschallechos aus dem Messsignal erfolgt sukzessiv, bis die Energie des Signals eine bestimmte Untergrenze erreicht. Damit soll sichergestellt werden, dass die Anzahl der zu extrahierenden Echos endlich bleibt.

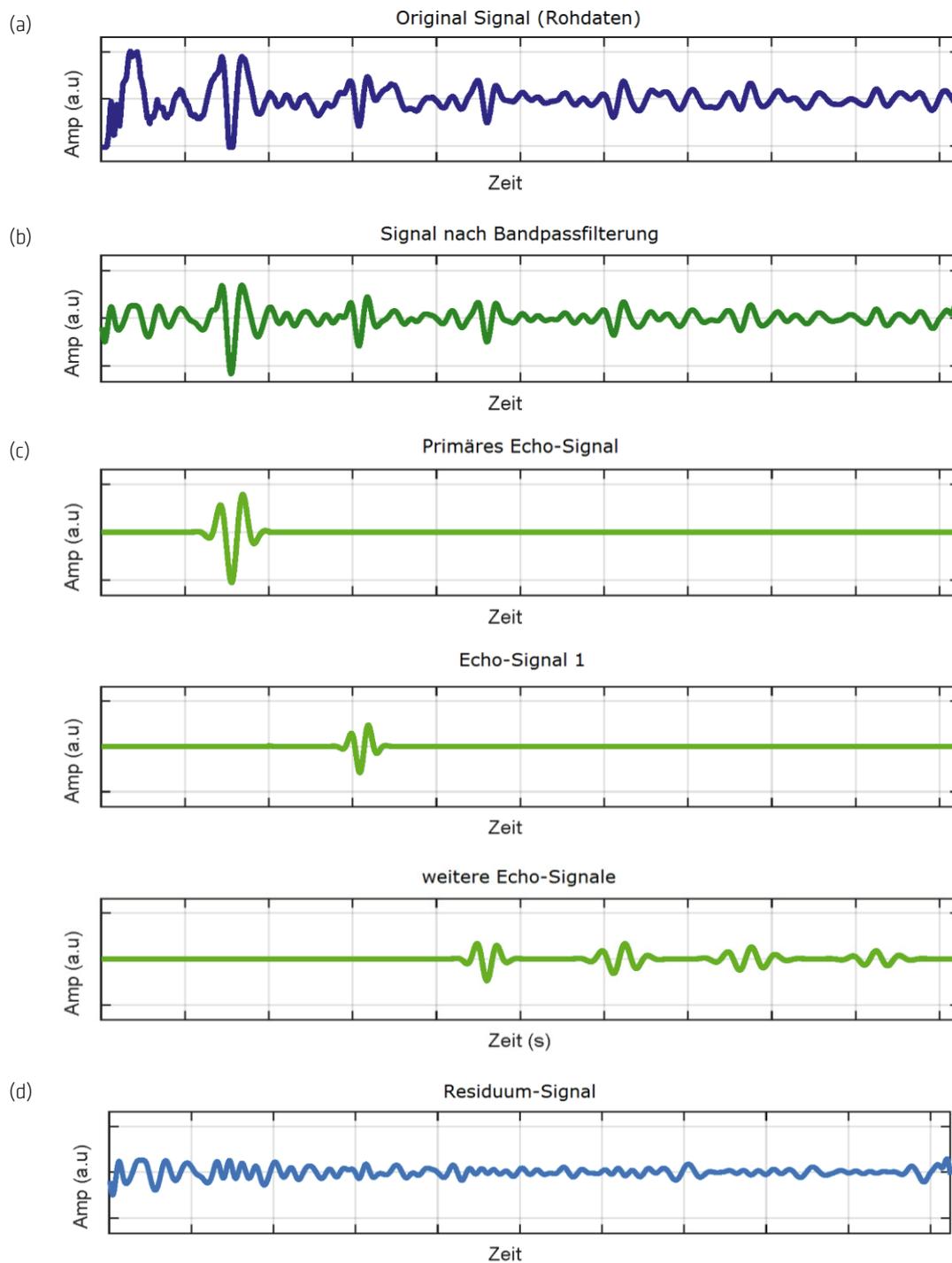


Abbildung 21: Die "Model-based Echo Decomposition"-Methode. (a) Original-A-Scan (entnommen aus einer Messung an dem BAM-Referenzprobekörper „Stufenplatte“). (b) Bandpass-gefilterter A-Scan. (c) extrahierte Echos. (d) verbleibendes Signal nach Abzug der Echos.

Mit fünf Parametern ist die Hüllkurvenfunktion des synthetischen Echos symmetrisch. Zur Beschreibung eines unsymmetrischen Echos kann ein weiterer Parameter hinzugefügt werden: die Chirp-Rate. Dieser Parameter charakterisiert die Dispersion innerhalb eines einzelnen Echos. Für solche Echoformen ergeben sich unterschiedlichen Anstiegs- und Abfallzeiten im Signal. Zum Anschauung ist hier ein Signal im Zeit-Frequenz-Bereich dargestellt. Man erkennt, dass die Energie der Mittenfrequenz in der Richtung höherer Frequenz verteilt ist. Für die 1D-Signalanalyse wird im vorliegenden Fall dieser Parameter aus dem mathematischen Modell weggelassen, da die Dispersion sehr klein und vernachlässigbar ist.

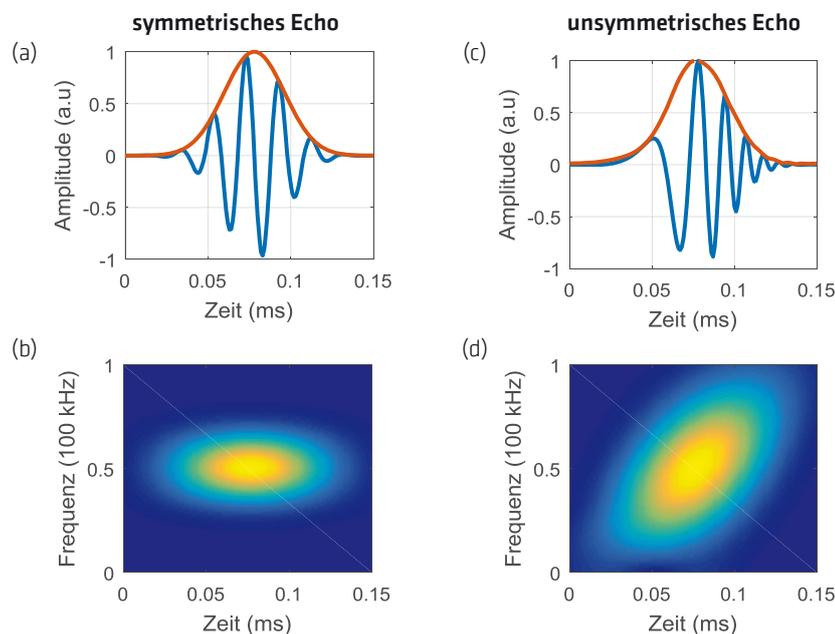


Abbildung 22: Symmetrische und unsymmetrische Echos. (a) Zeitsignal und Hüllkurve eines symmetrischen Echos. (b) Zeit-Frequenz-Bereich eines symmetrischen Echos. (c) Zeitsignal und Hüllkurve eines unsymmetrischen Echos. (d) Zeit-Frequenz-Bereich eines unsymmetrischen Echos

4.3 2D- und 3D-Bildgebungsverfahren für nicht-äquidistante Messraster

Algorithmen der synthetischen Apertur mit einer geringen Anzahl von Messpunkten zu verwenden ist normalerweise keine gute Idee. Unter den gegebenen Umständen kann es aber sein, dass die SAFT Auswertung dem Nutzer wichtige Hinweise über Position und Eigenschaften von Reflektoren liefert, die er verwenden kann um die Auswertung und das weitere Vorgehen besser zu verstehen. Die eingesetzten Ultraschallwandler (Punktkontakt-Prüfköpfe) besitzen eine geringe Auflagefläche und erzeugen damit einen entsprechend breit geöffneten Ultraschallstrahl sowohl beim Senden als auch beim Empfang. Die Zusammenschaltung der Einzelköpfe zu einem Prüfkopfarray erzeugt zwar wieder ein gebündeltes Schallfeld, der Öffnungswinkel reicht aber immer noch sehr gut für eine SAFT Auswertung aus.

Dieser Vorteil für die SAFT-Verarbeitung ist ein Nachteil für eine reine 1D-Signalanalyse, daher ist es sinnvoll beide Techniken für unsere Aufgabe zu kombinieren. Um dies zu erreichen, wurde



eine interaktive Imaging-Software entwickelt, die es dem Benutzer ermöglichen soll, Streuer zu positionieren und zu klassifizieren und das Ergebnis zu verbessern, indem er nacheinander die Anzahl der Messpunkte erhöht [8]. Die Operation wird in Teilaufgaben unterteilt:

- Aufnahme der nächsten Messdaten von der Messeinrichtung (ein oder mehrere A-Scan(s))
- Durchführung einiger Vorverarbeitungsschritte (Filterung, DC-Extraktion) auf den A-Scans
- grafische Anzeige der neuen und alten Messpositionen
- Auswertung der bisherigen Messung, um die erforderliche Dichte und neue Messpositionen zu bestimmen
- Verarbeiten der verfügbaren Daten zu B- und C-Bildern als 3D-SAFT Ergebnis

4.4 Implementierung des SAFT Algorithmus

Abbildungsverfahren wie SAFT basieren auf mathematischen Annahmen, die zu einer geschlossenen Lösung des Inversionsproblems führen. Die Lösung führt auf eine Gleichung, die im Wesentlichen eine Integration des gestreuten Wellenfeldes in der Messfläche vorsieht. Zur praktischen Auswertung muss diese Integration in eine zweidimensionale Summation überführt werden, wobei die infinitesimalen Flächenelemente in diskrete Flächenelemente überführt werden müssen. Da es sich bei der Wellenausbreitung um ein 4D Problem (Raum + Zeit) handelt, müssen zusätzlich auch noch Abtasttheoreme eingehalten werden. Da diese Randbedingungen bei der vorliegenden Messanordnung nur schwer zu erfüllen sind, ist mit starken Effekten zu rechnen, die das Ergebnis möglicherweise völlig unbrauchbar machen. Es gibt mehrere Ansätze das Problem der Unterabtastung und des irregulären Messrasters zu behandeln, diese Methoden sind jedoch numerisch sehr aufwendig und für den praktischen Messeinsatz wenig geeignet. Es wurde daher eine eigene Methode entwickelt, die im Rahmen der Erwartungen robust und intuitiv ist, sodass der Nutzer an jeder Stelle der Messung die bis dahin verfügbaren Ergebnisse verstehen und beurteilen kann.

Anstelle der starren Gewichtung durch Flächenelemente wird eine adaptive Amplitudengewichtung vorgenommen, um den unterschiedlichen räumlichen Entfernungen von Messpunkten zueinander Rechnung zu tragen. Dazu wird ein synthetischer Datensatz für eine Testgeometrie berechnet, die einige Punkt-Streuer enthält, die dem Benutzer die Möglichkeit gibt, die Auflösungsfähigkeiten der Daten, die er bereits manuell erfasst hat, zu überprüfen.

Dieser synthetische Datensatz kann so eingestellt werden, dass er den gleichen Frequenzbereich und ein ähnliches Ausbreitungsverhalten wie das vom realen Ultraschallgerät erzeugte Wellenfeld besitzt. Die Gewichtung der A-Scans wird durch Überlagerung entfernungsabhängiger Gauß-Funktionen für alle erfassten Positionen bestimmt, mit der heuristischen Idee, dass eng beieinanderliegende Messpositionen mehr Energie in ein Raumgebiet hineinbringen und damit normalerweise zu höheren Amplituden führen, als Raumgebiete, die von weniger Messpositionen abgedeckt sind.

Der Vorteil dieses Ansatzes ist es, dass eine größere lokale Dichte von Messungen nicht nur die Genauigkeit durch eine bessere Abtaststrategie erhöht, sondern auch Signalanteile durch bei Beton übliches Strukturrauschen reduziert. Die Dichte der Messung hat jedoch nur geringen Einfluss auf die Amplitude der Rekonstruktion selbst, da die Gewichtung die Multiplikation des diskreten Flächenelements in der Summationsformel von SAFT ersetzt.

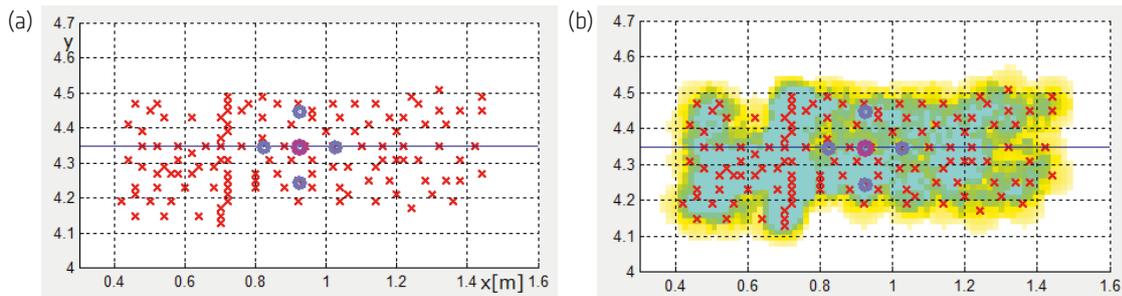


Abbildung 23: Messpunktdarstellung. (a) Markierung der aufgezeichneten Messpunkte und Lage des Testmusters. (Anwendungsbeispiel: Hüllrohr in 10,5 cm Tiefe). (b) Auswertung der Messpunktdichte mit Vorschlag für weitere Messpunkte (gelber und weißer Bereich)

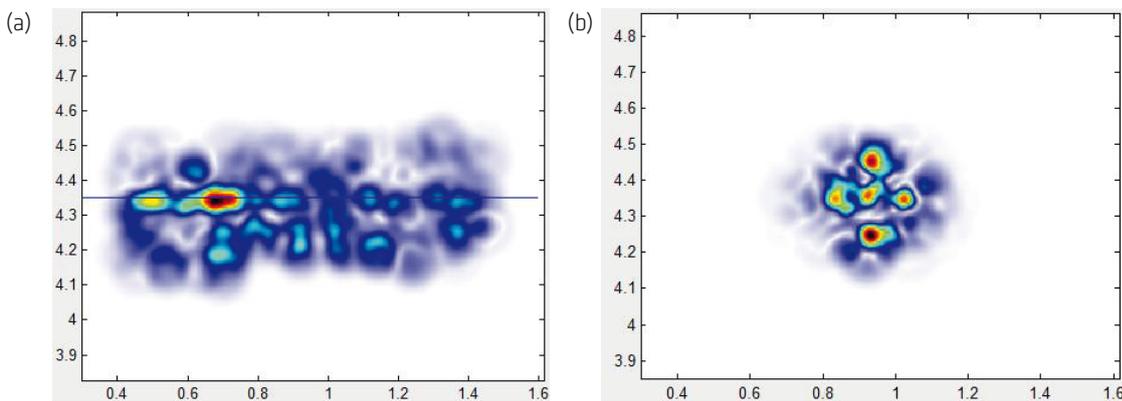


Abbildung 24: SAFT Rekonstruktion (a) C-Bild in 10,5 cm Tiefe mit den gegebenen Messdaten. (b) Test-Muster in der gleichen Tiefe mit der gleichen Messpunktanordnung wie Abbildung 23(a)

4.4.1 Rekonstruktionsprogramm „SAFT-Analysis“

Die Software zur Auswertung der Messdaten wird parallel zum Mess- und Steuerprogramm auf dem gleichen Rechner oder auf einem Rechner mit Zugriff auf das gleiche Dateisystem gestartet. Der Austausch der Daten erfolgt durch eine Datei, die vom Datenaufnahme-Programm generiert und durch andauernde Messungen erweitert wird. Das Auswerteprogramm schaut auf Änderungen in der Datendatei und führt eine Aktualisierung der Rekonstruktion und der Messdatenanzeige durch. Zu keinem Zeitpunkt versucht das Auswerteprogramm die Datendatei selbst zu verändern, um eine Manipulation der Rohdaten auszuschließen. Analyseinformationen und die Abschaltung einzelner als ungültig erkannter Messwerte, erfolgt durch weitere Steuerdateien, die auf der eindeutigen Kennung jedes einzelnen Scans aufbauen. Die Kennung wird bereits bei der Generierung der A-Scans festgelegt. Eine Checksumme über

jeden A-Scan ist vorgesehen und könnte bei Bedarf zu einem späteren Zeitpunkt zu Dokumentationszwecken eingeführt werden. Die Software ist so gestaltet, dass alle wichtigen Informationen in einem Fenster dargestellt werden können. Zur detaillierteren Auswertung können einzelne Bildausschnitte in externen Bildern, vom Hauptfenster separiert, dargestellt werden. Zusätzlich gibt es ein Fenster zur Einstellung von weniger häufig benutzten Optionen. Die benutzten Einstellungen können in Parameter-Bänken zwischengelagert und in einer Projektdatei abgespeichert werden. Beim Starten des Programms werden die Parameter der letzten Sitzung wieder geladen, sodass ein zügiges Fortsetzen der Arbeiten möglich ist.

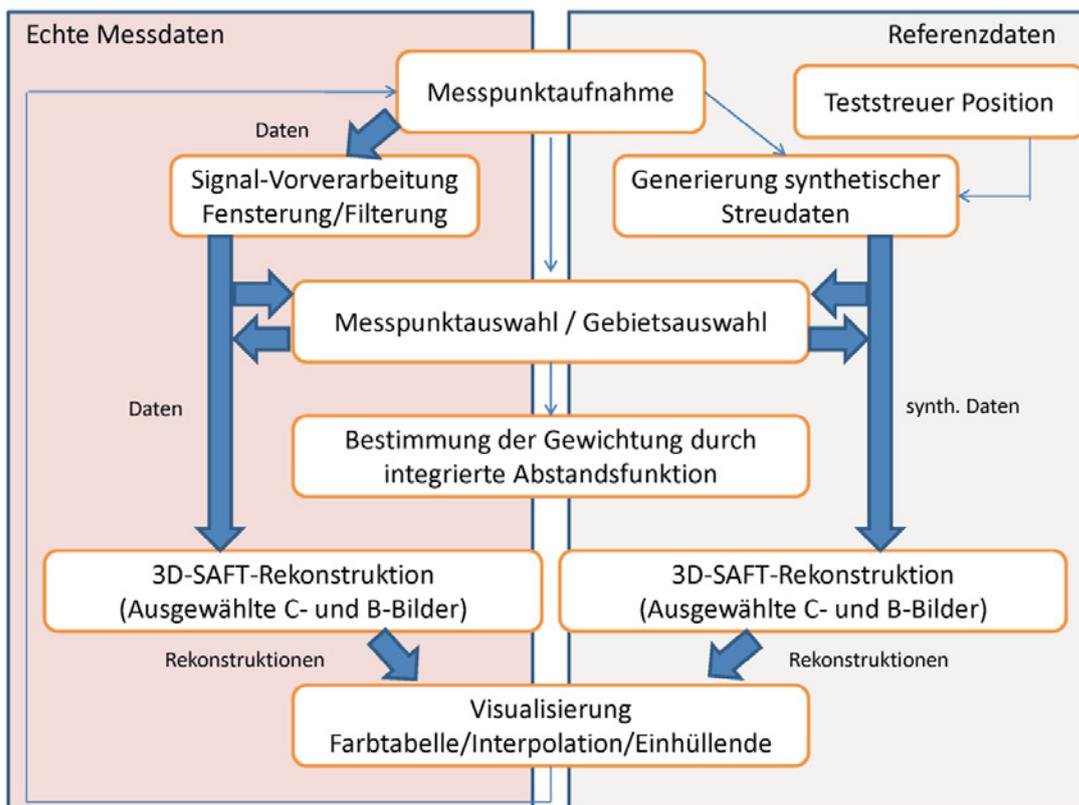


Abbildung 25: Flussdiagramm der Rekonstruktionstechnik mit Referenzdaten

Da es sich um eine interaktive Programmgestaltung handeln soll, werden die Messdaten nach dem Empfang direkt ausgewertet. Bekanntermaßen ist der dreidimensionale SAFT-Algorithmus zeitaufwendig, zumal verschiedene Maßnahmen zur Geschwindigkeitsreduzierung hier nicht angewendet werden können. Bei der derzeitigen Implementierung wird die Datenvorverarbeitung kumulativ durchgeführt, das heißt, jeder neue Datensatz wird ausgewertet und intern verarbeitet gespeichert. Auch die aktuelle Gewichtungsfunktion kann durch Hinzufügung einzelner Messpunkte aus der bestehenden Gewichtungsfunktion berechnet werden. Die Rekonstruktion selber wird jedoch für alle Datensätze gemeinsam durchgeführt, aber immer nur für das C- oder B-Bild das gerade zur Anzeige kommt. Dieser Rechenaufwand ist bei der bisher aufgetretenen Datenmenge gut vertretbar, da das Ergebnis in weniger als einer Sekunde angezeigt wird. Dieses Vorgehen hat den Vorteil, dass Parameter-Änderungen, die die

Rekonstruktion betreffen, ebenfalls interaktiv durchgeführt und deren Effekt beobachtet werden kann. Für diese Fälle ist eine komplette Neurekonstruktion für alle A-Scans erforderlich, was für den 3D-Fall zu aufwendig wäre. Da der SAFT-Algorithmus bezüglich der Datenauswertung ein linearer Algorithmus ist, das heißt, die gesamte Rekonstruktion ist die Summe der Rekonstruktionen aller Einzelmessungen, wäre eine kumulative Rekonstruktion möglich, wurde aber aus den genannten Gründen nicht implementiert.

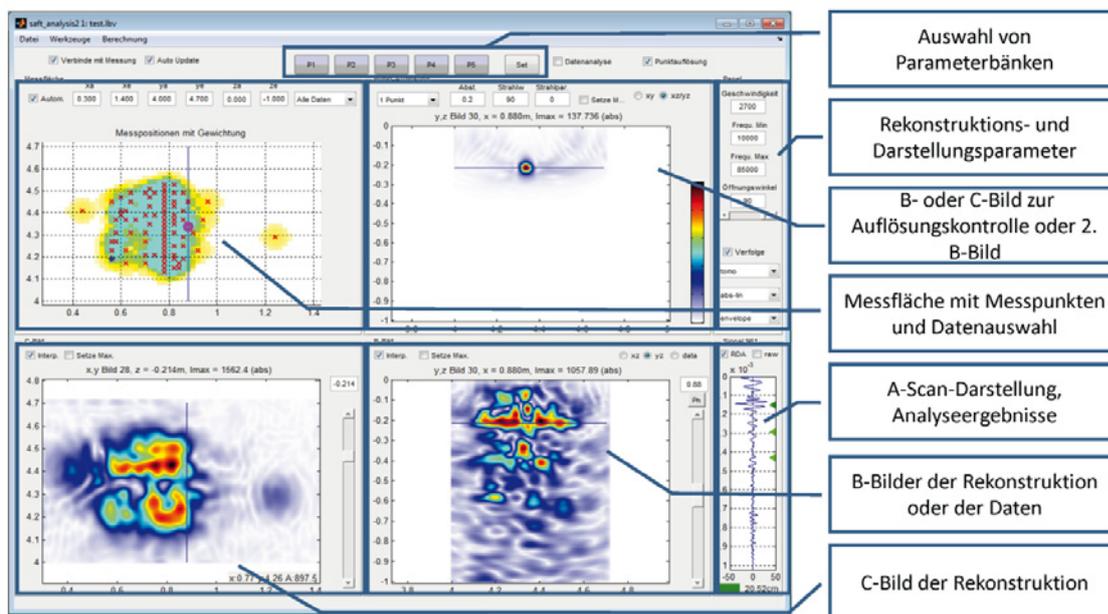


Abbildung 26: Hauptmenü des Programms „SAFT-Analyse“

Wenn alle Messdaten vorliegen und die Rekonstruktionsparameter ausgewählt sind, kann man eine 3D-Rekonstruktion des vollen Untersuchungsraums durchführen und die Ergebnisse durch eine 3D-Visualisierung (Browser) interaktiv durchforsten. Zu diesem Zweck wurde ein Visualisierungs-Modul aus dem Softwarepaket „InterSAFT“ in abgespeckter Form dem Projekt hinzugefügt.

4.4.2 Software-Modul „extract_from_ghk“ zur Entwicklung von Messstrategien

Im Rahmen der Softwareentwicklung war es erforderlich, Testdatensätze zu generieren. Nur an Daten mit genau bekannter Anordnung kann man die Software testen und Features ausprobieren. Im Fachgebiet CEP stehen ausgereifte numerische Methoden zur Verfügung, um komplexe zweidimensionale und dreidimensionale elastische Wellenausbreitungsphänomene zu berechnen. Eine einfache Methode zum Testen von SAFT mit synthetischen Daten ist die Punktquellen-Synthese, die im Auswerteprogramm in Form der Referenzstreuer-Analyse bereits implementiert ist. Mit Hilfe des Moduls „extract_from_ghk“ ist die Verwendung von extern simulierten Daten möglich. Außerdem ist es möglich, aus bestehenden Messdaten, die mit einem A1220 oder einem anderen Impuls-Echo-Prüfkopf in einem äquidistanten, kartesischen Raster, die z.B. mit einem Scanner aufgenommen wurden, einzelne Messpunkte

oder Bereiche zu selektieren und deren Messsignale über den gleichen Transportweg wie eine tatsächliche Messung an das Auswerteprogramm zu übergeben. Dieses Programm ist ebenfalls mit einer interaktiven Benutzeroberfläche versehen, sodass man mit der Maus oder auch manuell, die Auswahl der Messpunkte treffen kann. Aus einer kleinen Datenbank können Eigenschaften des Messgeräts wie Sende/Empfangs-Prüfkopfabstand, Ausrichtung des Prüfkopfes, Polarisation und Wellenart den Daten zur Übermittlung an das Auswerteprogramm beigefügt werden.

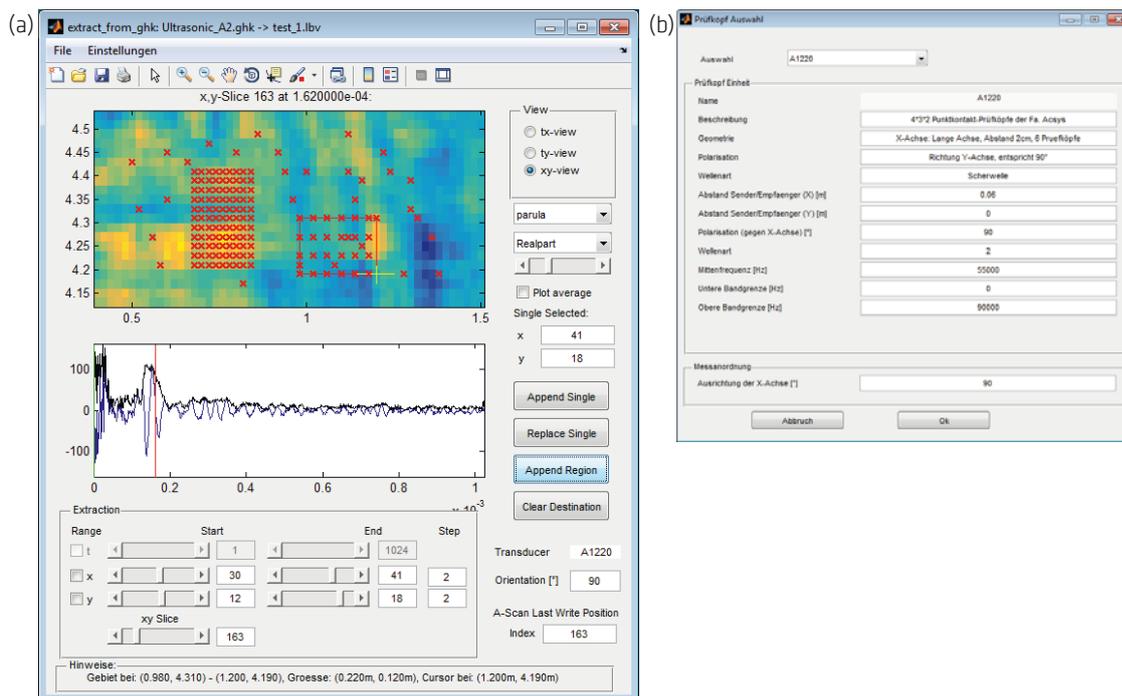


Abbildung 27: Software-Modul "extract_from_ghk" zur Entwicklung von Messstrategien. (a) Benutzeroberfläche (b) Prüfkopfeinstellungen (Parameterauswahl)

4.5 Identifizierung von flächigen Reflektoren und Punktstreuern

In der Ultraschallprüfung ist die Information über Form, Größe und Orientierung der Reflektoren in dem gemessenen Signal (A-Scan) enthalten. Jedoch ist es schwierig nur aus der eindimensionalen Signalanalyse zu einer eindeutigen Lösung des Identifizierungsproblems zu kommen. Die hier eingesetzte SAFT-Verarbeitung liefert genauere Informationen bezüglich der Position und Orientierung von Reflektoren da das Ergebnis in Form von Bildern mit Koordinatenangaben angezeigt wird. Trotzdem wird hier zunächst versucht, die Reflektoren allgemein in zwei Klassen - punktförmige und flächige Reflektoren - einzuteilen. In der eindimensionalen Signalanalyse werden die Echos aus einem A-Scan identifiziert und herausgenommen, wobei einer der charakterisierten Parameter die erste Ankunftszeit des Echos ist. Bei einem flächigen Reflektor könnte man im A-Scans erkennen, dass mehrere Echos mit konstanter Zeitdifferenz zwischen den jeweiligen Ankunftszeiten, also einer Art



Wiederholrate, auftreten. Diese Echos werden im A-Scan nach einer konstanten Wiederholrate und erwartungsgemäß mit kleiner werdender Amplitude erscheinen. Dieses Ereignis wird als „Vielfachreflexion“ bzw. „Vielfache“ bezeichnet.

Grundsätzlich wird das Vielfache auftreten, wenn die reflektierte Welle zwischen der Messfläche und einem flächigen Reflektor hin und her reflektiert wird und der A-Scan lange genug aufgezeichnet wird, um die sich wiederholenden Echos aufzunehmen. Die Wiederholrate bestimmt durch Verwendung einer einfachen Formel den Abstand zwischen der Messfläche und dem Reflektor bzw. die Tiefenposition des flächigen Reflektors, weil die Ausbreitungsgeschwindigkeit in dem Medium, hier in Betonbauteilen, als konstant betrachtet werden kann. Bei punktförmigen Reflektoren werden Vielfache im A-Scan nicht oder nur stark gedämpft auftreten, da das reflektierte Wellenfeld solcher Streuer diffus, d.h. ungerichtet ist. Die genaue Position eines punktförmigen Reflektors kann optimal durch die Anwendung der SAFT-Rekonstruktion bestimmt werden. In der SAFT-Verarbeitung werden A-Scans mit einem großen Öffnungswinkel in das Bild hinein gerechnet. Der reale Öffnungswinkel des Ultraschallwandlers sollte für eine gute Abbildung entsprechend groß sein. Mit einem A-Scan, der nur ein einzelnes Echo enthält, wird die SAFT-Verarbeitung aufgrund dieses Öffnungswinkels einen Halbkreis generieren und bei mehreren wird das rekonstruierte Bild durch den Effekt der konstruktiven und destruktiven Interferenz verbessert und die Lage des punktförmigen Reflektors bildet sich immer deutlicher ab. Andererseits wird bei der Unterdrückung der Vielfachreflexionen nur das erste Echo, oder das Primärecho, beibehalten und es besteht keine Notwendigkeit, einen breiten Öffnungswinkel bei der SAFT-Rekonstruktion zu verwenden, weil der flächige Reflektor direkt unterhalb und parallel zu der Messfläche liegen wird, d.h. der Ort der Reflexion ist schon bekannt.

In der seismischen Datenverarbeitung wird das Vielfache aus dem Signal unter Verwendung einer Methode, die als „Predictive Deconvolution“ [21], [22] bezeichnet wird, entfernt. Im Allgemeinen kann das seismische Signal als Faltung eines Quellwavelets mit der Reflektivitätsfunktion der Erdschichten betrachtet werden. So ist die Deconvolution (Entfaltung) ein Filterverfahren, bei dem diese Faltung umgekehrt wird. Bei der Predictive Deconvolution ergibt sich die Unterdrückung aus einem Parameter: der Zeitspanne zwischen der ersten Reflexion und den wiederholten Reflexionen (der Wiederholrate). Für die Abschätzung von Wiederholraten ist die Autokorrelationsfunktion entscheidend, daher wird sie auch als minimale Autokorrelationsverzögerung bezeichnet. Bei der Predictive Deconvolution werden als Vorkennnis das Quellwavelet und die Wiederholrate verwendet, um ein Wiener Filter in einem kleinsten quadratischen Ansatz zu entwerfen, was dann zu einem inversen Filter führt. Durch die Faltung des inversen Filters mit dem seismischen Signal wird das Vielfache eliminiert. Allerdings müssen einige Annahmen berücksichtigt werden: a) Das Quellwavelet ist vom Typ "minimale Phase" und darf sich während der Ausbreitung nicht verändern; b) Das Signal muss stationär sein, und c) Das Rauschen muss minimal und vernachlässigbar sein. Ein hoher Rauschpegel in den Daten kann die Entfaltungsergebnisse erheblich beeinträchtigen, da dieses Verfahren ein datengetriebenes Verfahren ist, d.h. die Referenz aus den Daten selber



ableitet. Vergleicht man zwischen Signalen seismischer Anwendungen und Signalen der Ultraschallprüfung, so findet man einen wesentlich höheren Frequenzbereich und die Tiefe des Eindringbereichs ist deutlich kürzer. Außerdem ist das Ultraschallsignal nichtstationär. Diese Annahmen beschränken deshalb die Verwendbarkeit für die Unterdrückung von Vielfachen in Ultraschallsignalen.

Bisher erfolgt die Erkennung des Vielfachen im Messsignal durch die menschliche Entscheidung nach der Auswertung der Daten. Um eine automatisierte Auswertung zu erhalten, d.h. um das Vielfache zu erkennen und daraufhin automatisch zu unterdrücken wird der folgende Ansatz vorgeschlagen. Zuerst werden die Echos aus dem A-Scan bestimmt und unter Verwendung einer parametrischen Gaußfunktion charakterisiert. Danach wird ein Vielfachmodell mit den charakterisierten Informationen - den Ankunftszeiten und den Amplitudenkoeffizienten - erstellt. Das Vielfachmodell wird später mit dem A-Scan verglichen, um einen Aussage über die Art und Form des Vielfachen zu erhalten. In dem letzten Schritt wird nach erfolgreicher Erkennung das sich wiederholende Echo mit Ausnahme des Primärechos beseitigt.

Mit Hilfe der „Model-based Echo Decomposition“-Methode [9], [23] sind - wie beschrieben - die Ankunftszeit und die Amplitude jedes Echos bestimmt. Daher kann eine synthetische Reflektivitätsfunktion mit Hilfe der beiden Parameter aufgebaut werden. Durch die Faltung dieser Reflektivitätsfunktion mit einem bekannten Wavelet, beispielsweise einem Sinus- oder einem Ricker-Wavelet, ergibt sich eine Wavelet-Normalisierte (WN) Version des A-Scans, wobei die Ankunftszeiten und die Amplituden die Gleichen wie in dem ursprünglichen Signal sind.

Der dritte Schritt besteht darin, ein Vielfachmodell analytisch zu erzeugen. Die Ankunftszeiten jedes Echos, die zu einem Vielfachen gehören, können in einer linearen Kombination zusammengefasst werden, wobei das Vielfachmodell durch die drei Parameter, Korrekturzeit, Wiederholrate und Dämpfungskoeffizient bestimmt wird. Mit diesen Parametern wird eine Reflektivitätsfunktion des Vielfachmodells erzeugt und nach der Faltung mit dem gleichen Wavelet, wie in dem vorherigen Schritt, ergibt sich dann eine WN-Version des Vielfachmodells.

Der nächste Schritt ist nun der Vergleich zwischen Vielfachmodell und A-Scan.

Dies ist nur dadurch möglich, dass sowohl der A-Scan, als auch das Vielfachmodell in einer WN-Version vorliegen. Weil der ursprüngliche A-Scan nicht stationär ist, ist es erforderlich die Signalform zu normalisieren, ohne die wichtigen Informationen des Vielfachen, die Ankunftszeiten und die Amplituden, zu verlieren. Weiterhin ist es schwierig, ein Vielfachmodell zu erzeugen, das nicht stationär ist, weil die Phasenwerte der wiederholten Echos nicht in einem linearen Zusammenhang erfasst werden können.

Weil das Vielfache nur im Zeitbereich betrachtet werden kann, wird das Ähnlichkeitsmaß zwischen diesen beiden Signalen, dem WN-A-Scans und dem WN-Vielfachmodell, durch der Pearson-Korrelationskoeffizient ρ quantifiziert, wobei ρ ein beliebiger Wert zwischen Null und Eins sein kann. Dieses Prinzip wird aus dem Konzept der Matched-Filterung entnommen. Bei

der Matched-Filterung (signalangepasste Filterung) wird die Korrelation zwischen einem bekannten Muster mit einem gemessenen Signal ausgenutzt, um das Vorhandensein des Musters in dem Signal zu detektieren. Somit kann der Korrelationskoeffizient zwischen WN-A-Scan und WN-Vielfachmodell als Maß für die Existenz eines Vielfachmodells verwendet werden. Übersteigt der ρ -Wert eine bestimmte Schwelle, wird das Muster als Erkennung des Vielfachen interpretiert.

Nach der Erkennung des Vielfachen werden die zugehörigen Echos von dem ursprünglichen A-Scan mit Ausnahme des Primärechos subtrahiert. Beziehungsweise, da die Echos bereits in den ersten beiden Schritten charakterisiert sind, genügt es, die Echos einfach in dem A-Scan auszuschalten. Das Primärecho ist in diesem Fall das reflektierte Echo von einem flächigen Reflektor. Wird in einem A-Scan kein Vielfaches erkannt, werden alle Echos als von punktförmigen Reflektoren erzeugt betrachtet.

Das Vielfachmodell wird mit der gleichen Abtastrate und Länge wie der ursprüngliche A-Scan erstellt. Vergleichbar mit dem Minimierungsproblem des Hausdorff-Abstands in der Bildverarbeitungstechnik kann zum Zweck der Vielfacherkennung ein Suchverfahren definiert werden, in dem das durch den ρ -Wert quantifizierte Ähnlichkeitsmaß zwischen dem WN-Vielfachmodell und WN-A-Scans maximiert wird. Dieses Problem kann mit dem bereits vorgestellten „Nelder-Mead“-Optimierungsverfahren (NM-Verfahren) implementiert werden. Da dieses Verfahren immer das globale Minimum erreicht, kann das maximale Ähnlichkeitsmaß zwischen den beiden WN-Signalen gefunden werden. Das WN-Vielfachmodell wird zu dem WN-A-Scan im NM-Verfahren gefittet und letztendlich werden die Wiederholrate und der entsprechende ρ -Wert ausgegeben.

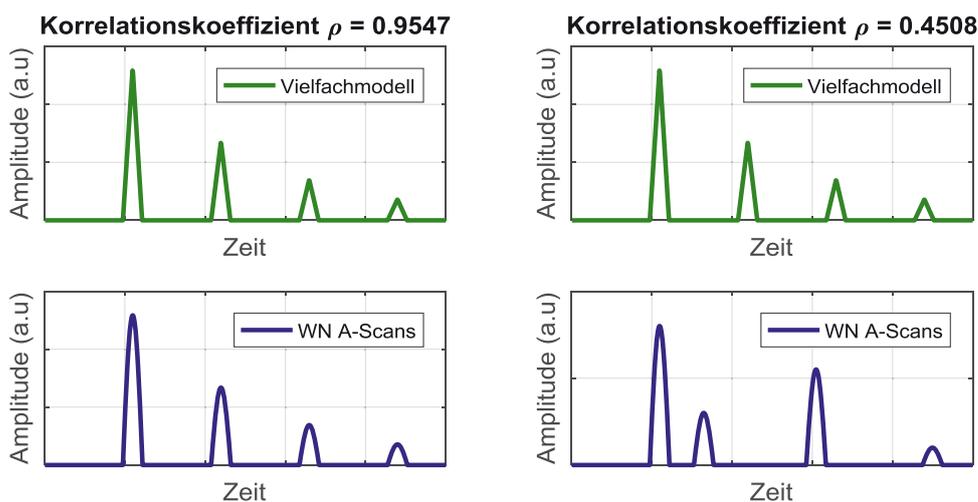


Abbildung 28: Korrelationskoeffizient ρ für zwei unterschiedliche Fälle (Erkennung und Nicht-Erkennung)

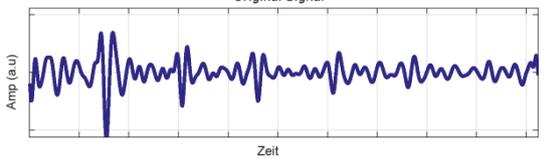
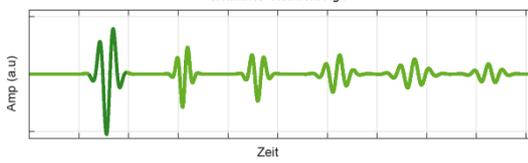
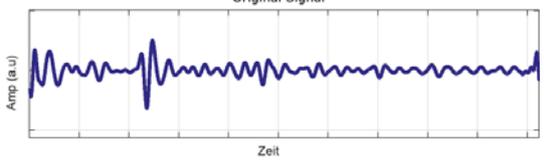
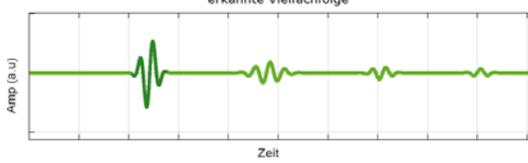
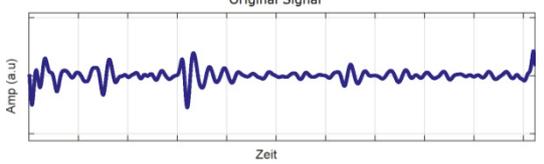
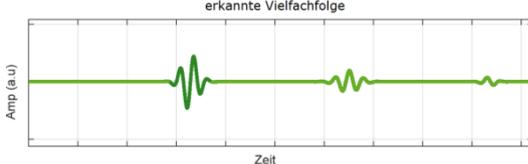
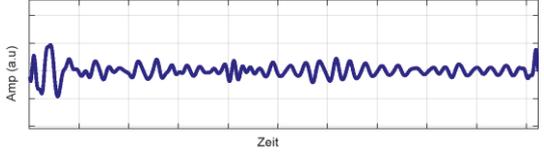
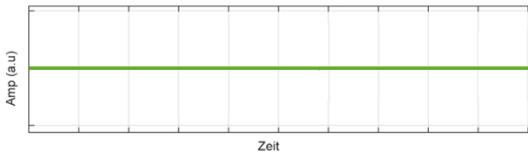
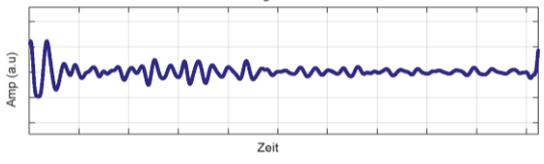
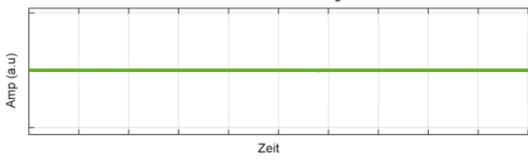
<p align="center">Beispiel 1:</p>	<p>Anzahl wiederholter Echos: 5 ρ-Wert: 0.8601 Status: erkannt</p>
<p align="center">Original Signal</p> 	<p align="center">erkannte Vielfachfolge</p> 
<p align="center">Beispiel 2:</p>	<p>Anzahl wiederholte Echos: 4 ρ-Wert: 0.8220 Status: erkannt</p>
<p align="center">Original Signal</p> 	<p align="center">erkannte Vielfachfolge</p> 
<p align="center">Beispiel 3:</p>	<p>Anzahl wiederholter Echos: 3 ρ-Wert: 0.7274 Status: erkannt</p>
<p align="center">Original Signal</p> 	<p align="center">erkannte Vielfachfolge</p> 
<p align="center">Beispiel 4:</p>	<p>Anzahl wiederholter Echos: 0 ρ-Wert: 0.2834 Status: nicht erkannt</p>
<p align="center">Signal A</p> 	<p align="center">erkannte Vielfachfolge</p> 
<p align="center">Beispiel 5:</p>	<p>Anzahl wiederholter Echos: 0 ρ-Wert: 0.3503 Status: nicht erkannt</p>
<p align="center">Signal B</p> 	<p align="center">erkannte Vielfachfolge</p> 

Abbildung 29: Ergebnisse des Analyse-Programms mit verschiedenen A-Scans

In dem beschriebenen Ansatz wird also jeder A-Scan in zwei unterschiedliche Signalarten unterteilt. Dabei werden die Signalarten durch unterschiedliche Öffnungswinkel bei der SAFT-Rekonstruktion verarbeitet. Die Echos von flächigen Reflektoren sollten eigentlich gar nicht über SAFT weiterverarbeitet werden. Um sie jedoch in das bestehende Bild zu integrieren wird die Öffnung in der SAFT-Rekonstruktion wie ein Streifen in der 2D-Darstellung und eine Säule in einer 3D-Darstellung in der Tiefenrichtung verwendet. Im Gegensatz dazu ist der Öffnungswinkel für die SAFT-Rekonstruktion mit Echos von punktförmigen Reflektoren variabel bis zu ± 90 Grad einstellbar. Schließlich werden die beiden Rekonstruktionen zusammen in einem Bild dargestellt. Im Auswerteprogramm kann man zwischen verschiedenen Varianten der Darstellung wählen.

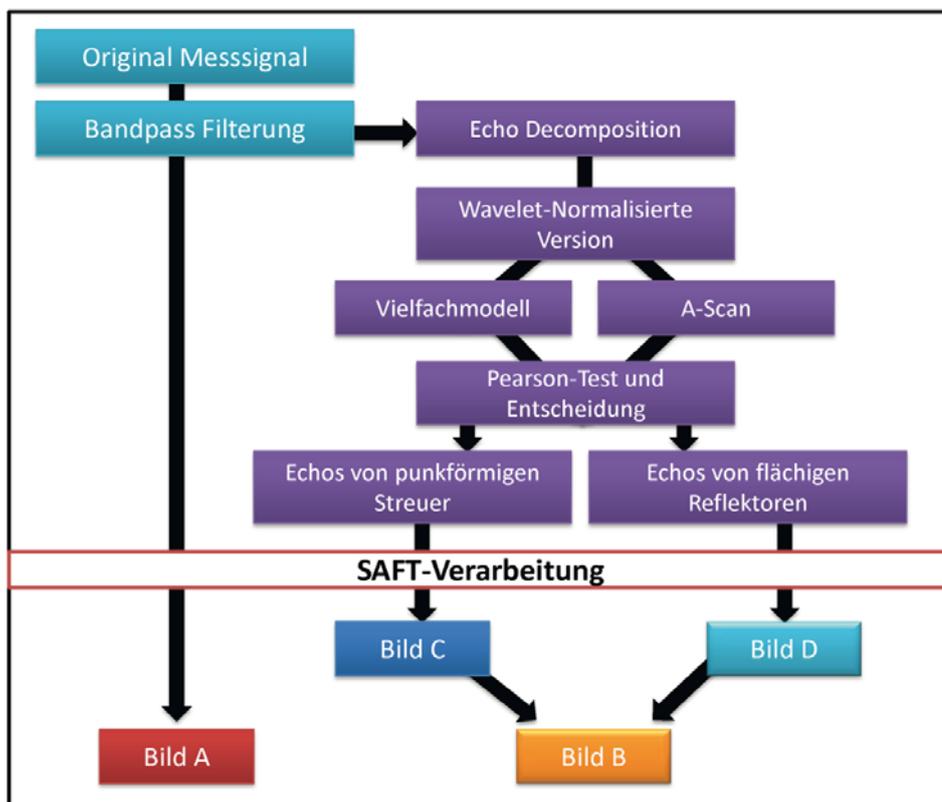


Abbildung 30: Vorgehensweise der 1D-Signalanalyse bis zu der SAFT-Rekonstruktion

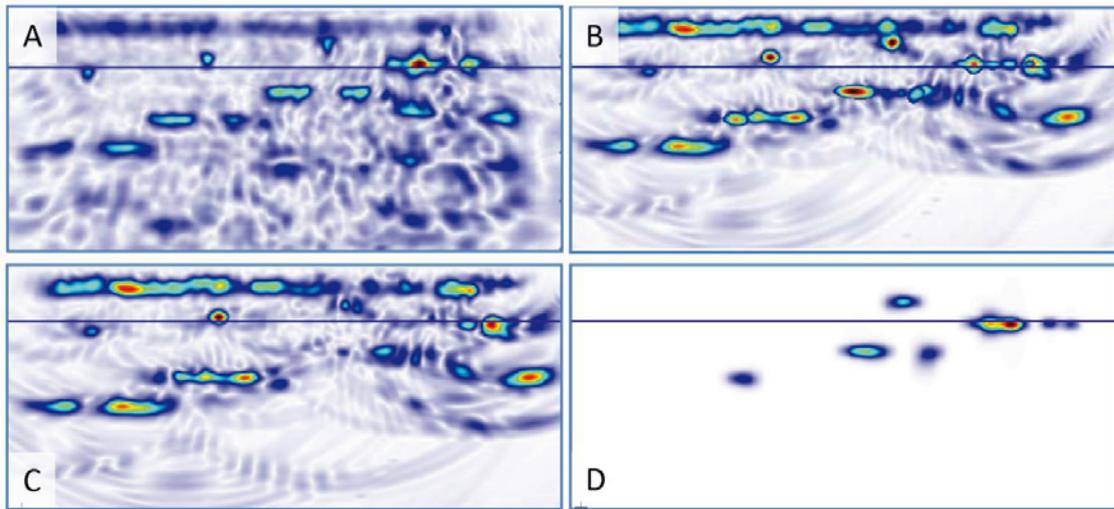


Abbildung 31: Darstellung der Detektionsergebnisse nach der SAFT-Verarbeitung laut Abbildung 30

5 Erläuterung der Arbeitsweise des Mess- und Auswertesystems am Beispiel eines Probekörpers

Dieses Kapitel beschreibt die Arbeitsweise der in diesem Vorhaben entwickelten Messmethode im Zusammenhang mit der online-Darstellung der Messergebnisse und der Rekonstruktionsrechnung anhand eines einfachen Anwendungsbeispiels. Als Probekörper dient eine im Fachbereich 8.2 der BAM häufig als Referenzobjekt verwendete Stufenplatte; der Messbereich beschränkt sich hier auf eine Messlinie senkrecht zu den im Probekörper eingebrachten leeren Hüllrohren (Abbildung 32).

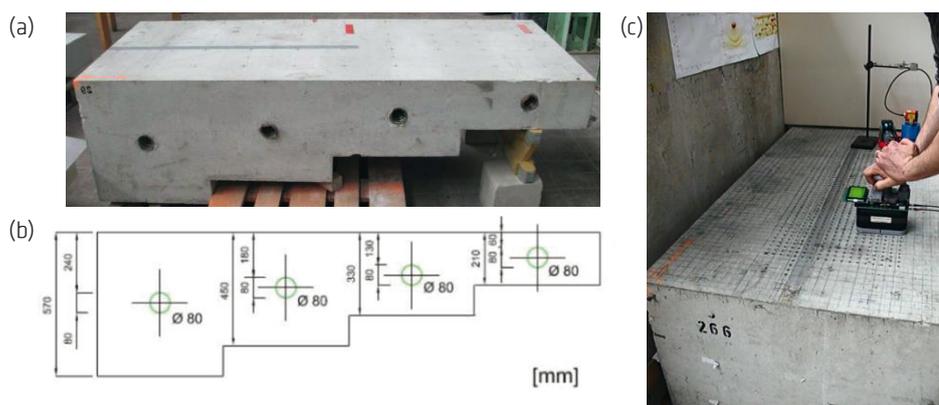


Abbildung 32: Probekörper der BAM zur Entwicklung und Demonstration von zerstörungsfreien Prüfverfahren (Beispiel). (a) Probekörperansicht und (b) Konstruktionsplan einer Stufenplatte aus Beton mit leeren Hüllrohren, (c) Messausführung.

Um die Messung sinnvoll durchzuführen, sind zunächst die für die Positionserfassung und drahtlose Weitergabe notwendigen Komponenten betriebsbereit aufzubauen. Diese sind -wie in Kapitel 3 beschrieben - der WLAN-Router für die Datenübertragung, die Basisstation, das



A1220-Datenaufnahmegesetz und der mit dem Prüfkopfaufsatz erweiterte Ultraschallsensor sowie der Messrechner mit integriertem WLAN-Modul. Bei der Anordnung der Geräte ist auf eine günstige Position in Bezug auf den geplanten Messabschnitt und zueinander zu achten. Wegen der im Abschnitt 3.3 beschriebenen Imperfektion des USP-Systems empfiehlt es sich, den Seilzug überwiegend auf Zug zu betreiben.

Nach der Inbetriebnahme der Hardwarekomponenten sind die beiden Programme aufnahme- und verarbeitungsbereit zu machen. Dem Start der Positionserfassungssoftware sowie des online-Rekonstruktionsprogramms folgt die Spezifikation der gemeinsamen A-Scan-Sammeldatei. Im Anschluss wird durch entsprechende Kommunikationstests mit den WLAN-Systemkomponenten sowie mit der Ultraschalldatenaufnahme die Betriebsbereitschaft des USP-Systems hergestellt. In zwei Programmfenstern werden in der Folge die gewählten Messpunkte graphisch und die sich sukzessive aufbauende Auswertung dargestellt. Um die Ergebnisse später einem Ort auf der Messfläche zuordnen zu können, wird eine von zwei gespeicherten Messpunkten begrenzte Linie erzeugt (x-Achse), sowie einer davon als Koordinatenursprung definiert. Eine umfangreichere Beschreibung des vorgestellten Ablaufs ist im Anhang (Abschnitt 11.5) zu finden.

Bei dem in Abbildung 33 erläuterten Messbeispiel der Stufenplatte liegt die x-Achse sinnvollerweise in Längsrichtung. Dem Rekonstruktionsergebnis ist der Konstruktionsplan grafisch überlagert, so dass der sukzessive Fortschritt bei der Abbildung der inneren Struktur besser veranschaulicht wird.

In Teilbild (a) sind die beiden Verankerungspunkte für die Koordinatensystemtransformation zu erkennen. Es handelt sich um das SAFT-B-Bild der nach der Rekonstruktion dieser Daten entsprechend der in Abschnitt 4.4.1, Abbildung 26 erläuterten Programmoberfläche von „SAFT-Analysis“ (unten rechts). Mit einem A-Scan, der nur ein einzelnes Echo enthält, wird die SAFT-Verarbeitung auf Basis des eingestellten Öffnungswinkels einen Halbkreis generieren und bei mehreren wird das rekonstruierte Bild durch den Effekt der konstruktiven und destruktiven Interferenz verbessert und die Lage eines punktförmigen Reflektors bildet sich immer deutlicher ab.

In den Teilbildern (d) bis (e) von Abbildung 33 kann man nun verfolgen, wie sich der komplette Längsschnitt (das SAFT-B-Bild) entsprechend des Messfortschrittes sukzessive aufbaut. Die Punktfolge bei der Messung ist dabei beliebig, im konkreten Fall in einem Abstand von 20 bis 30 mm. Der Zeitvorteil bei dieser Art von Messung besteht darin, dass man zwar einigermaßen gleichmäßige Messpunktabstände realisiert, diese aber nicht vorher anzeichnen bzw. streng einhalten muss. Außerdem, und das ist der entscheidende Vorteil, lässt sich das Messraster nach einer solchen ersten Testlinie je nach Fragestellung beliebig verdichten oder flächig erweitern.

Abbildung 33 (f) schließlich zeigt das aus den gemessenen Zeitkurven zusammengesetzte B-Bild. Die deutlichen Streuhyperlbeln der Hüllrohre, die Reflexe der Rückwände (einschließlich

Mehrfachechos), die Kantenechos und ähnliche Effekte entsprechen vollständig denen einer regelmäßigen Linienmessung.

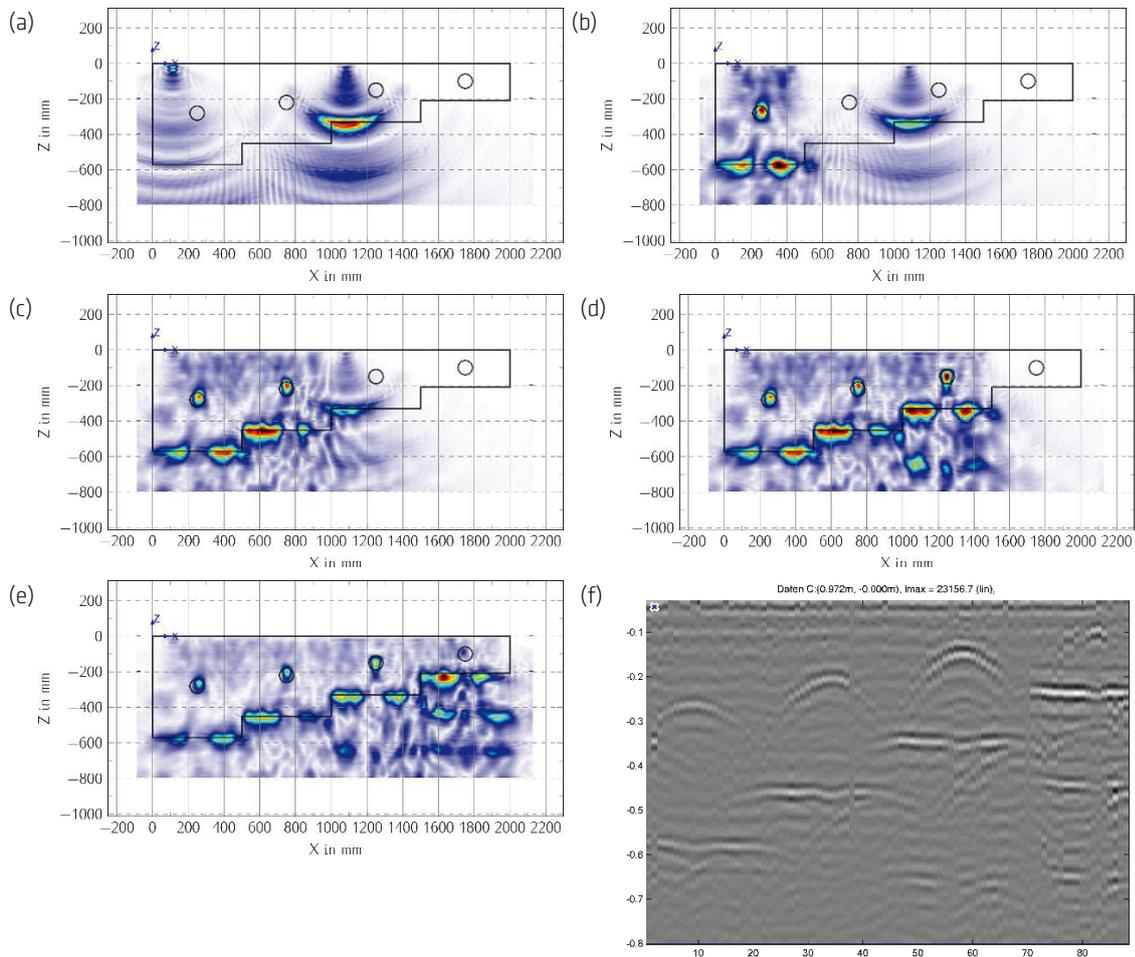


Abbildung 33: Rekonstruktionsergebnis an Stufenplatte nach (a) zwei, (b) 20, (c) 42, (d) 71 sowie (e) 90 Messpunkten. In (f) sind alle A-Scans als Intensitätsbild aneinandergereiht (bandpassgefilterte Daten).



6 Ergebnisse an einem Probekörper mit bekanntem Aufbau

In diesem Kapitel werden die Messtechnik und Auswertung mit dem entwickelten Ultraschallgerät mit automatischer Positionserfassung (USP) an einem Beispiel ausführlich erläutert. Als Objekt wird dazu ein Probekörper gewählt, dessen Aufbau sehr genau bekannt ist und an dem bereits zahlreiche Messungen und Auswertungen mit anderen Ultraschall-Techniken vorgenommen wurden (Probekörper BAM.NB.FBS.1, erstellt im Rahmen der Forschergruppe FOR 384, 2004,[2] hier kurz FBS1 genannt). Aus dem Vergleich mit bereits vorliegenden Auswertungen kann so am besten herausgefunden werden, inwieweit die neuen Techniken nahtlos an die bereits vorhandenen Methoden anknüpfen.

Der Referenzprobekörper FBS1 besitzt einen zweigeteilten Aufbau. Eine Hälfte des Probekörpers ist unbewehrt und beinhaltet sechs Fehlstellen (Styrodurkugeln mit einem Durchmesser von 120, 80 und 50 mm). Der andere Probekörperteil besitzt eine vorder- und rückseitige Maschenbewehrung (Maschenweite: 15 cm, Bewehrungsdurchmesser: 12 mm). Wie im unbewehrten Bereich sind drei verschieden große Styrodurkugeln integriert. Mittig und quer durch beide Probekörperhälften verläuft ein Spannkanal mit gezielt veränderten Verpresszuständen (schraffierter Bereich: Hohlstelle). Der FBS1 bemisst sich auf 2000 x 1500 x 500 mm (Breite x Höhe x Tiefe). Abbildung 34 zeigt den strukturelle Aufbau des Referenzprobekörpers und das mit einem automatisierten Ultraschallscanner äquidistant aufgenommene Messfeld.

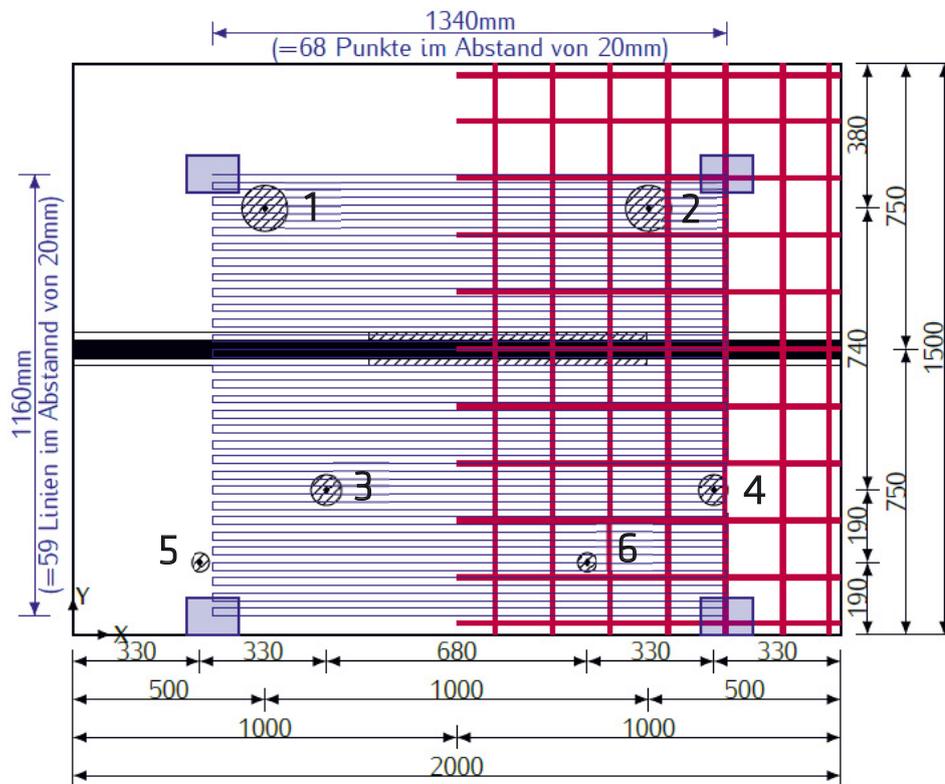


Abbildung 34: Konstruktionsplan des Probekörpers FB51 (Ansicht von der Schalungsseite). Hüllrohr mit geplanter Hohlstelle (schraffiert) und Verpressfehler auf der Betonierseite (hier: Rückseite). Styrodurkugeln (120/ 80/ 50 mm), Prüfkopfpositionen für die Referenzmessung mit dem Baustellenscanner sind blau hervorgehoben (mäanderförmiges Scannermessfeld von der Schalungsseite) (2016)



Abbildung 35: Referenzprobekörpers FB51. (a) vor der Betonage (Betonierseite) (b) Seitenansicht des verpressten Hüllrohres mit Verpressfehlern unten (Ansicht wie bei aktueller Messung von der Schalungsseite) [3]

In der Fotografie des Probekörpers vor dem Betonieren sind neben dem Hüllrohr die Styrodurkugeln verschiedenen Durchmessers zu erkennen, die als Testreflektoren für die Abbildungsverfahren dienen (Abbildung 35). Sie sind an relativ dünnen Drähten befestigt, so dass damit zu rechnen war, dass sich ihre Position während und nach der Betonage verändert und somit vom Konstruktionsplan abweichen könnte (z.B. durch Aufschwimmen). Die in diesem Abschnitt diskutierten Messergebnisse beziehen sich ausschließlich auf die Messungen



von der Schalungsseite aus. Damit befindet sich eine bereits bekannte unbeabsichtigte Luftlinse im Hüllrohr an der Unterseite (bezogen auf die aktuelle Messfläche in Abbildung 34)

Das aktuelle Kapitel enthält beispielhaft die Ergebnisse der Anwendung aller in diesem Forschungsvorhaben angewendeten Mess- und Auswertemethoden für den Probekörper FBS1. Dies umfasst:

1. Automatisierte, großflächige Messung mit dem S/E Prüfkopf A1220 (12+12 Einzelköpfe) unter Verwendung eines Baustellenscanners und anschließender 3D-Auswertung mit Rekonstruktionsrechnung (InterSAFT)
2. Simulierte Messung mit SAFT-Analysis2 auf Basis von hinterlegten Messdaten und Vergleich mit den Auswertungen mit InterSAFT
3. Anwendung der entwickelten **U**ltraschall-Apparatur mit automatischer **P**ositionserfassung (USP) bei verschiedenen Messpunktanordnungen
4. Vergleich von USP- mit simulierten Messungen unter Verwendung hinterlegter Daten (Beispiele)

6.1 Äquidistante, automatisierte Messung und 3D-Rekonstruktion

In Ergänzung zu früheren Messungen am Probekörper FBS1 ([3], [4], [5]) ist im Zuge des aktuellen Forschungsvorhabens ein Scanner mit erweiterter Messelektronik eingesetzt worden. Im Vergleich zum Ultraschallgerät A1220 weist das verwendete Datenaufnahmesystem eine größere Messdynamik (Amplituden-Auflösung: 16 Bit statt 10 Bit) sowie einer längere Aufzeichnungszeit der Ultraschalldaten (bis zu 50 μ s statt 2 μ s) auf. Die Polarisation der SH-Scherwellen ist für diese Messung senkrecht zur Hüllrohr-Längsachse polarisiert.

Dies ist erforderlich, um

- a) Übersteuerungen bei starken Reflektoren mit gleichzeitig großer Empfindlichkeit für schwache Reflektoren zu erreichen, sowie
- b) ausreichend viele Mehrfachreflexionen für die Auswertung aufzuzeichnen.



Abbildung 36: Messung mit Baustellenscanner und erweiterter Messelektronik am FBS 1

Aus dem mit äquidistant gemessenem Datensatz wird in bewährter Weise mit dem SAFT-Verfahren die Position der Reflektoren und Streuer dreidimensional rekonstruiert (vergl. als Beispiel Abbildung 37). Diese lassen sich dann in geeigneten Schnitten und Projektionen analysieren.

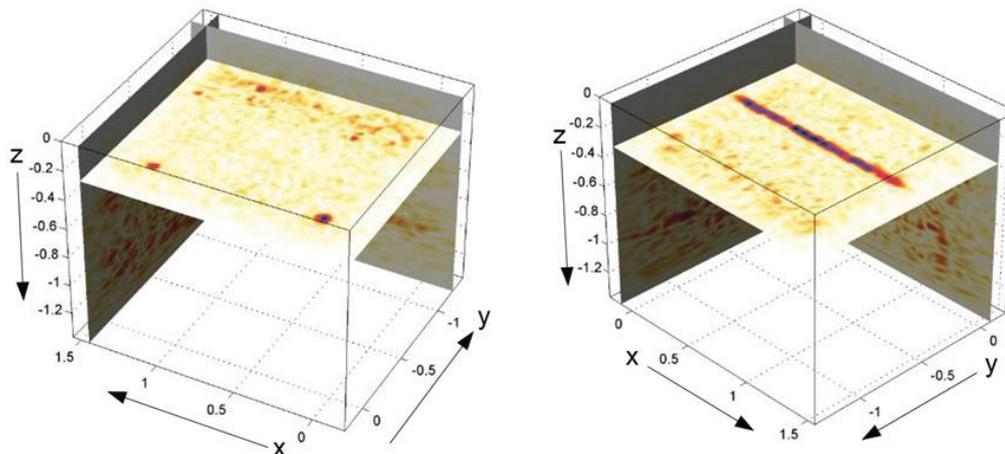


Abbildung 37: Ergebnis einer 3D-SAFT Rekonstruktion der Ultraschallechomessung am Probekörper FBS1: 3D-Ergebnisfile mit Tiefenschnitten bei links: $z = 213$ mm (Styrodurkugeln) und rechts: $z = 285$ mm (Hüllrohr)

In Abbildung 38 ist ein Längsschnitt der Rekonstruktion entlang der x-Achse dargestellt (SAFT-B-Bild), und zwar in der Amplituden- und Phasendarstellung.

Die beiden wesentlichen Reflexionslinien, nämlich die Oberseite des Hüllrohres bei $z = 280$ mm und das Rückwandecho bei 500 mm sind deutlich zu erkennen. Im Amplitudenbild weist die Oberseite des Hüllrohres keine sehr deutlichen Unterschiede auf, während im Phasenbild der Wert bei $x = 400$ mm deutlich von ca. 135° (schallhart) auf Werte um 45° (schallweich) springt. Dies zeigt deutlich den Übergang der Reflexion an den Stahllitzen zum eingebrachten

luftgefüllten Hüllrohrabschnitt. Zusätzlich ist ein geringer Unterschied in der Tiefe der Reflexion zu erkennen (der luftgefüllte Bereich liegt etwas dichter an der Messfläche als die Oberseite des Litzenbündels).

Der Phasenwert des Rückwandechos unterhalb des Hüllrohres ist uneinheitlich und entspricht nicht der eigentlichen Erwartung eines schallweichen Reflektors. Hinter einem Hüllrohr ist mit einer deutlichen Schattenbildung und entsprechender Phasenverschiebung der Ultraschallpulse zu rechnen. Die Kalibrierung einer schallweichen Reflexion an der Rückwand muss an einer Stelle ungestörter Rückwandreflexion erfolgen (hier nicht abgebildet).

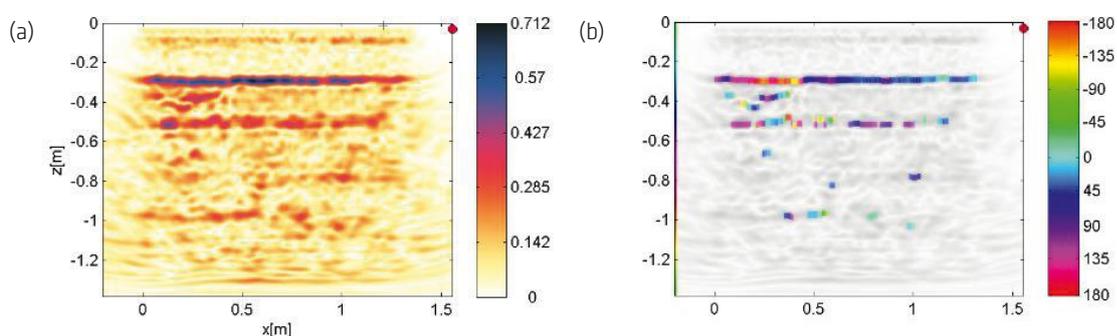


Abbildung 38: Typischer Längsschnitt (SAFT-B-Bild) als Ergebnis der Scannermessung am Probekörper FBS1. (a) Amplitudendarstellung, (b) farbcodierte Phasenwerte. Der Phasenwert 0 ist auf die schallweiche Reflexion an der Rückseite des Probekörpers kalibriert (hier nicht sichtbar). Die schallharte Anzeige für $x \leq 0,45\text{m}$ entspricht der Reflexion an den Litzen (gute Verpressung). Der Phasenwert 45° im Bereich $x \geq 0,45\text{m}$ deutet auf einen schallweichen Reflektor hin und kennzeichnet den identifizierten Verpressfehler¹ (vergl. Bauplan in Abbildung 34).

Abbildung 39 zeigt den Tiefenschnitt (SAFT-C-Bild) in der Ebene der Styrodurkugeln (Tiefe hier $z = 228\text{ mm}$). Von diesen schwachen Reflektoren sind die Durchmesser 120 mm und 80 mm deutlich dargestellt (die linke untere Styrodurkugel mit dem Durchmesser 50 mm befindet sich nicht mehr im Messfeld). Gemäß Konstruktionsplan wäre der Abstand des Zentrums der Kugeln bei $z = 200\text{ mm}$ von der Schalungsseite aus zu erwarten. Wegen des Auftriebes im Füllbeton und den Toleranzen der Befestigung in der Schalungsform ist jedoch eine gleichmäßige Tiefe der Kugeln nicht realisiert.

Der Sinn der Phasendarstellung wird im Vergleich mit dem Amplitudenbild in Abbildung 39 deutlich: Die Reflektoranzeige bei $x=1\text{m}/y=-1,10\text{m}$ wird im Phasenbild als schallweicher Reflektor bestätigt, während die Anzeigen bei $x = -0,7\text{ m}/y = -1,10\text{ m}$ und $x = 1\text{m}/y = -0,9\text{ m}$ nicht als solche erkennbar sind.

¹ Die für diese Messung gewählte Polarisationsrichtung der SH-Scherwellen senkrecht zum Hüllrohr ist für die Erkennung nicht optimal.

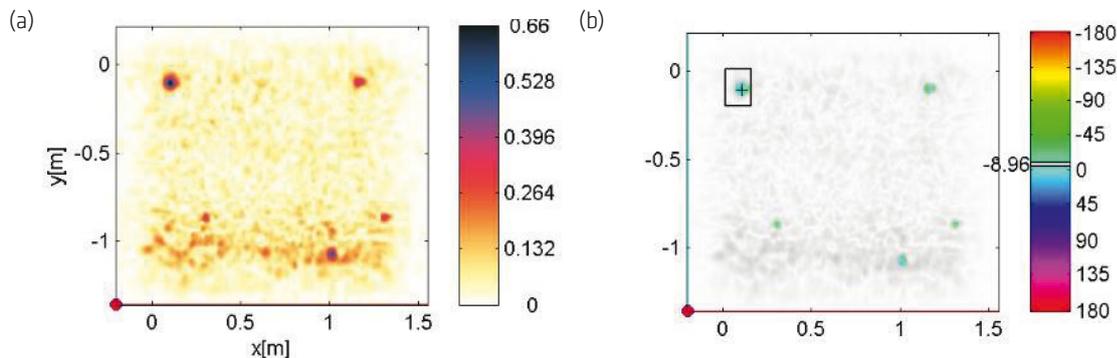


Abbildung 39: SAFT-C-Bild in der Tiefe von 228 mm mit Abbildung der Styrodurkugeln (Ansicht von der Schalungsseite). (a) Amplitudendarstellung, (b) Phasendarstellung

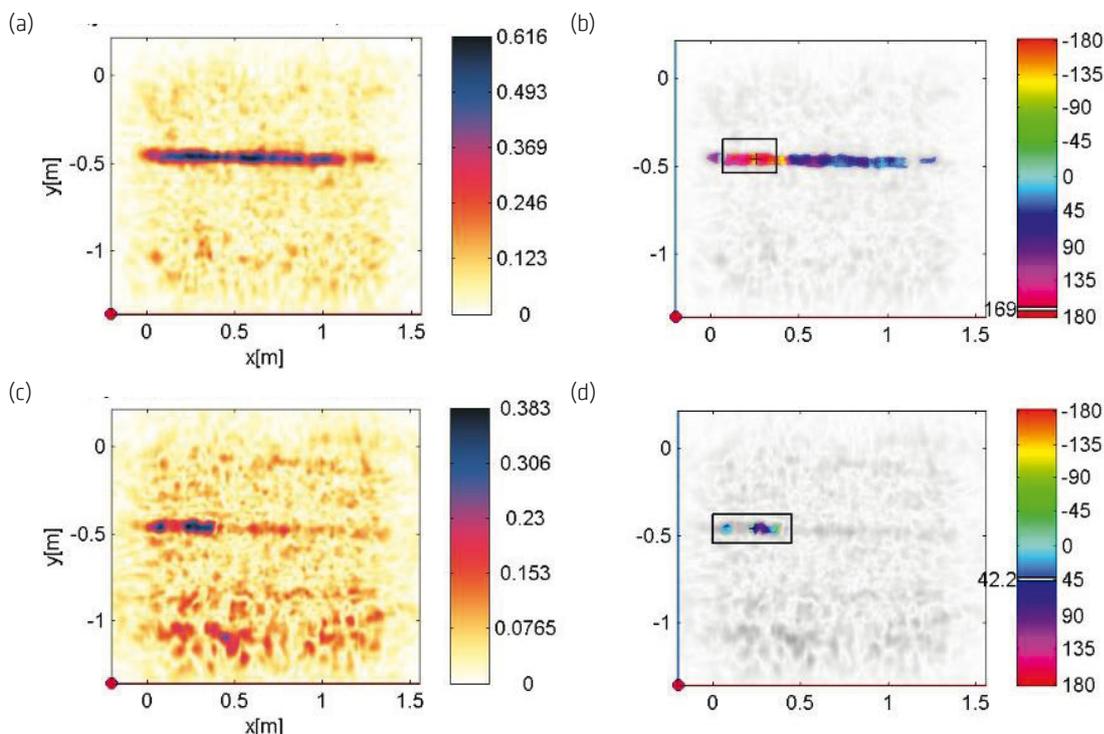


Abbildung 40: Bildgebung des Spannkannels in zwei Tiefen. (a) Amplitudendarstellungen für $z = 302$ mm, (b) Phasendarstellung für $z = 302$ mm, (c) Amplitudendarstellungen für $z = 370$ mm, (d) Phasendarstellung für $z = 370$ mm. Der Phasenwert 0° ist auf die schallweiche Reflexion (Luft) an der Rückseite des Probekörpers eingestellt. Die Ergebnisse (a) und (b) entsprechen der Oberseite des Spannkannels mit Reflexion an den Spanndrähten. Der Phasenwert 169° , nahe 180° zeigt einen schallharten Reflektor (Metall) an. Die Ergebnisse (c) und (d) bilden den unteren Bereich des Hüllrohres in der Tiefe z von ca. 380 mm ab. Der mittlere Phasenwert 42° entspricht einer schallweichen Reflexion und deutet auf eine Luftlinse an der Unterseite des Hüllrohres (siehe Text).

An den Tiefenschnitten des Hüllrohres kann ein interessanter Aspekt erkannt werden: Abbildung 40 (a) und (b) bestätigen, wie zu erwarten, die Amplitude und Phase der Hüllrohroberseite in der Tiefe von $z = 302$ mm (schallhart/Litzen links und schallweich/Luft rechts). Abbildung 40 (c) und (d) zeigen die Ausdehnung der Luftlinse unterhalb des Litzenbündels bis etwa $x = 0,4$ m in der Tiefe von $z = 370$ mm, was durch mechanische Prüfung von der Seite bestätigt wird. Der



Schallweg durch oder um das Litzenbündel ist allerdings bisher nicht vollständig verstanden, so dass die Phasenanzeige (Abbildung 40 (d)) nicht belastbar ist [5]. Es ist auch hinzuzufügen, dass Reflexionsanzeigen unterhalb von Litzenbündeln bisher nur selten beobachtet wurden. Dennoch ist dies eine Auffälligkeit, für die es durchaus Sinn macht herauszufinden, ob sie mit dem neu entwickelten Verfahren mit automatischer Positionserfassung ebenfalls detektiert werden kann.

6.2 Ultraschall-Messungen mit automatischer Positionserfassung (USP) und online Rekonstruktion

In diesem Kapitel werden Beispiele von realen Messungen am Probekörper FBS1 demonstriert und diskutiert. Dabei wird zunächst auf die unterschiedlichen Möglichkeiten einer Messstrategie eingegangen, also ob die Messung z.B. längs von Messlinien oder mit Punktwolken erfolgt und was dabei zu beachten ist.

Im zweiten Teil werden Ergebnisbeispiele gezeigt.

6.2.1 Vorgehensweisen bei der Messung, Messstrategie

Aufgrund des sehr eigenen Verhaltens des SAFT-Abbildungsalgorithmus ist es sinnvoll und notwendig eine Messung sorgfältig zu planen. Nachdem der generelle Messaufbau an einem Objekt durchgeführt wurde, kann es zur Aufnahme von Daten kommen. Hierzu sollte man sich eine Strategie überlegen, die davon abhängt welche Art von Objekten mit welcher Zielsetzung man untersuchen möchte. Da der SAFT-Algorithmus ein Abbildungsverfahren ist, ist es wenig hilfreich an einzelne Messpositionen verstreut auf dem Objekt Daten aufzunehmen, da diese nicht zu einem Bild zusammengefasst werden können. Dennoch kann es möglich sein auf einzelne Messpunkte zurückgreifen zu wollen.

Die Arbeiten mit dem System haben gezeigt, dass es generell fünf verschiedene Messmöglichkeiten gibt, die ihre grundlegende Bedeutung haben:

1. Aufnahme einzelner Punkte
2. Aufnahme von Punktwolken
3. Aufnahme von Linien
4. Aufnahme von Gebiete, jedoch mit einem weiten Raster
5. Aufnahme von Gebieten mit einem engen Messraster.

Der Aufwand ist dabei sehr unterschiedlich, daher wird die Problematik der einzelnen Verfahren hier dargelegt. Die Beschreibung geht davon aus, dass die Messfläche auf einem Objekt liegt und der Untersuchungsraum unterhalb der Messfläche. Zur Erläuterung der Methoden dienen USP-Messungen am Probekörper FBS1.

Natürlich ist es möglich, die Messmethoden gemäß der Prüfaufgabe zu kombinieren. Ob sich alle Daten jedoch in einer Rekonstruktion sinnvoll zusammenführen lassen, ist von Fall zu Fall



zu entscheiden, da die Anforderungen der Bildgebung, insbesondere unter Beachtung des Abtasttheorems, sehr hoch sind.

1. Aufnahme an einzelnen Messpunkten auf dem Objekt

Die Messaufnahme an einzelnen Punkten kann sinnvoll sein, um die Signalgüte zu testen, die Oberflächenbeschaffenheit zu bewerten, die Qualität der Ankopplung zu testen oder einzelne Orientierungspunkte am Objekt zu überprüfen. Möglicherweise müssen Parameter des Messsystems an die Oberflächengegebenheiten, bzw. an die Materialparameter angepasst werden.

2. Aufnahme von Punktwolken

Die Aufnahme von Punktwolken ist dann sinnvoll, wenn lokale Fragestellungen vorliegen. Es wird dabei mehr Energie in ein Raumgebiet eingestrahlt und die räumliche Mittelung, z.B. zur Verbesserung bei Ankopplungsproblemen oder zur Unterdrückung von Gefügerauschen, wird durch den SAFT Algorithmus dann in einem engen Winkelbereich realisiert. Die Reflexionseigenschaften können dadurch besser herausgearbeitet und auch eine Phasenanalyse kann durchgeführt werden. Nicht sinnvoll ist diese Methode, wenn es das Ziel ist, Objekte räumlich abzubilden, da es keine eindeutige räumliche Zuordnung von Anzeigen gibt, wenn die Ausdehnung des Messgebiets zu klein ist.

Abbildung 41 zeigt als Beispiel die Aufnahme einer Punktwolke über der Styrodurkugel K1 (Durchmesser 120 mm). Mit dem relativ kleinen Messgebiet von ca. 10 x 10 cm gelingt eine signifikante Abbildung.

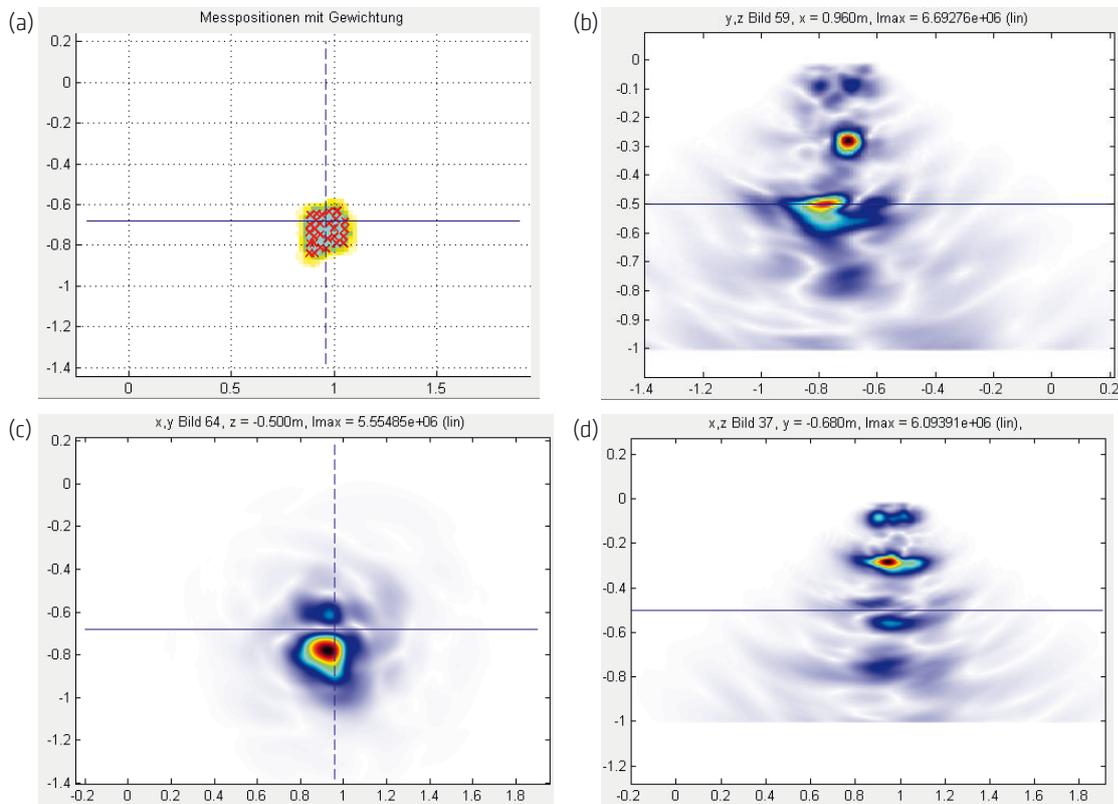


Abbildung 41: Aufnahme einer Punktwolke über einem Hüllrohr (Probekörper FBS1). (a) Messfläche mit Messpunktverteilung, (b) yz-Bild, (c) xy-C-Bild in Tiefe der Rückwand ($z=-50\text{cm}$), (d) xz-Bild. Die längliche Struktur des Hüllrohrs ist in (d) bereits ausgeprägt. Im C-Bild erkennt man die Schattenbildung des Hüllrohrs in der Rückwand.

3. Aufnahme von Messpunkten entlang einer Linie

Die Aufnahme von Linienmessungen ist dann sinnvoll, wenn es das Ziel ist, den Untergrund durch eine zweidimensionale Rekonstruktion abzubilden. Das Ergebnis sind dann B-Bilder des Bereichs unterhalb der Messlinie. Geeignet ist die Methode zur Detektion und Charakterisierung von 2D-Objekten z.B. Hüllrohre, Bewehrungseisen, Rückwände und Abschattungen bei Rückwänden, die z.B. durch Kiesnester entstanden sind. Die Verwendung des Punktkontaktmessgeräts A1220 bewirkt eine Richtcharakteristik der Einzelaufnahme, die durch die Überlagerung von vielen (12) Send- und Empfangsprüfköpfen gegeben ist, die eine ausgeprägte Begrenzung des Öffnungswinkels in SV-Anregungsrichtung zeigen. Bei optimaler Ausrichtung (Teilchenauslenkung senkrecht zur Messlinie, d.h. horizontal polarisiert im Bezug zur Rekonstruktions-Ebene (SH)) ist die 2D-Fokussierungswirkung unterhalb der Messlinie sehr gut und der Einfluss von Streuobjekten außerhalb des rekonstruierten B-Bildes ist geschwächt.

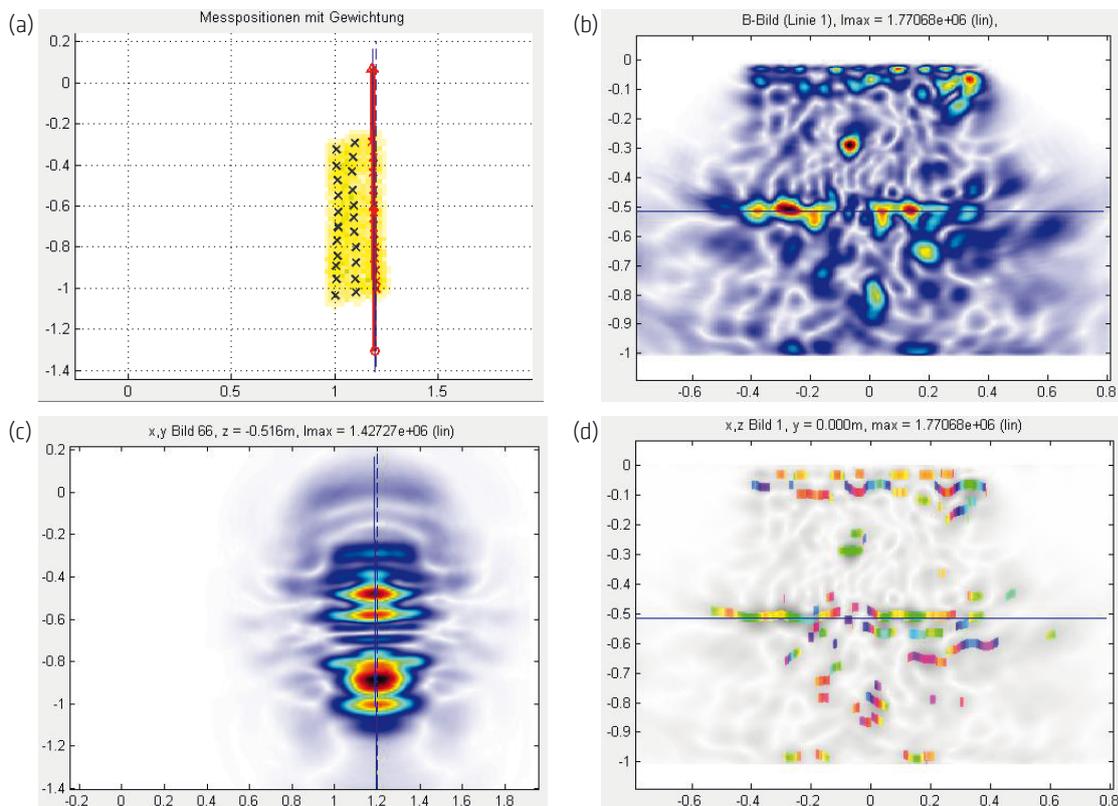


Abbildung 42: Aufnahme von Messlinien quer zu einem Hüllrohr. (a) Messfläche mit drei parallel verlaufenden Messlinien, (b) yz-B-Bild, (c) xy-C-Bild im Tiefenbereich der Rückwand, (d) Phasenanzeige
Die Rekonstruktion erfolgt hier nur über die rechte Messlinie. Das C-Bild (c) der Rückwand ist daher symmetrisch und enthält wegen der Zweidimensionalität nicht mehr Information als das B-Bild (b). Die Phasenanzeige (d) ist auswertbar und signalisiert ein nichtverpresstes Hüllrohr.

4. Aufnahme von Gebieten mit weitem Messraster

Unter gewissen Voraussetzungen und Zielsetzungen ist es möglich und ausreichend in einem weiten Raster (z.B. 10 cm Abstand) flächig abzutasten. Eine Abbildung des Volumens unterhalb des Gebietes ist mit Einschränkungen möglich. Die Methode ist ausreichend zum Auffinden und Lokalisieren von Objekten, zur eindimensionalen Signalanalyse oder zur C-Bilddarstellung verschiedener Tiefen. In diesem Fall müssen jedoch die Parameter der SAFT-Rekonstruktion sehr sorgfältig gewählt werden, da die destruktive Interferenz bei Abständen größer der halben Wellenlänge nicht funktioniert. Das heißt, man muss den Öffnungswinkel des "Rekonstruktionsstrahls" klein machen (halber Öffnungswinkel < 20 Grad) zumal bei Winkeln kleiner 10 Grad der Algorithmus automatisch auf einer Strahldarstellung umschaltet, d.h. es werden keine Beugungseffekte berücksichtigt bzw. kompensiert.

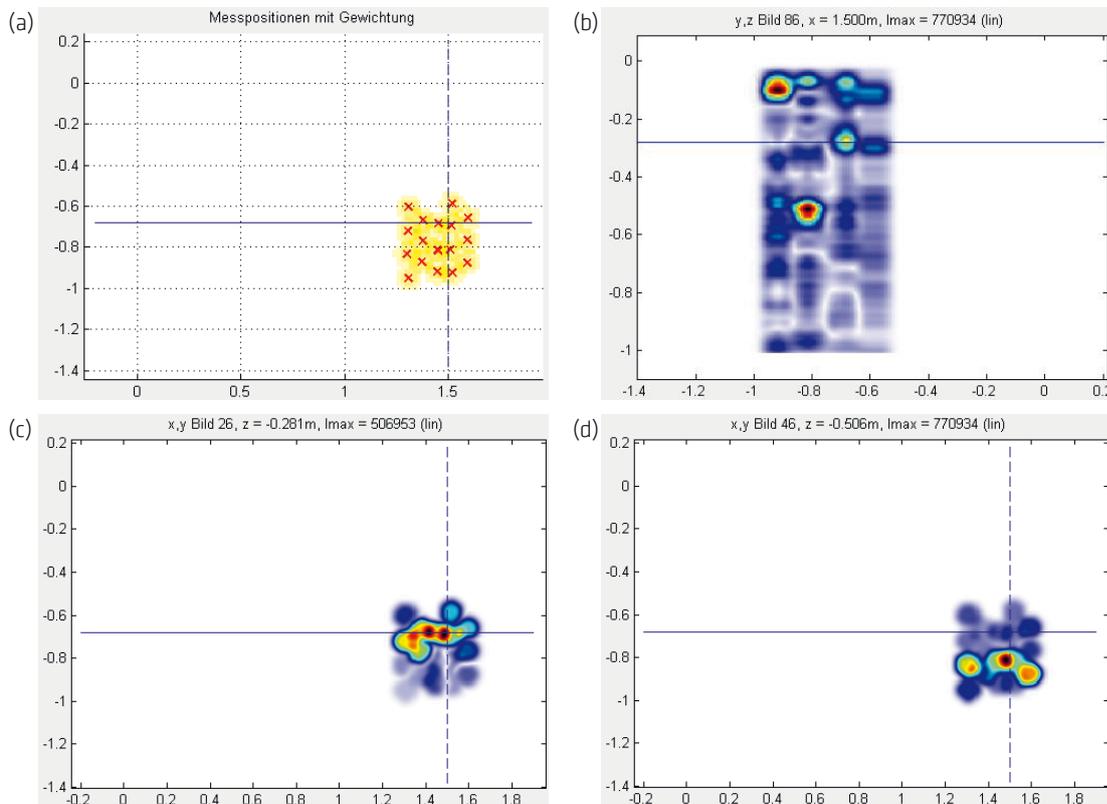


Abbildung 43: Aufnahme einer grob gerasterten Messfläche. (a) Messfläche, (b) yz-Bild, (c) xy-C-Bild in der Tiefe des Hüllrohrs, (d) xy-C-Bild im Tiefenbereich der Rückwand. Die Rekonstruktion erfolgt mit kleinem Öffnungswinkel, sodass A-Scans als Säulen in den Raum gerechnet werden. Die Lage des Hüllrohrs im C-Bild in 28cm Tiefe (c) und die Lage der Rückwand im C-Bild in 50cm Tiefe (d) ist deutlich voneinander unterscheidbar. Durch diese Anordnung tragen nur einzelne A-Scans zu dem jeweiligen Bildbereich bei, daher ist die Anzeige sehr störempfindlich.

5. Aufnahme von Gebieten abgetastet in engem Raster

Höchste Anforderungen an den Messaufwand sind gegeben, wenn man eine dreidimensionale Rekonstruktion des Gebiets unterhalb der Messfläche durchführen möchte. In diesem Fall sind Abtastregeln einzuhalten, die gewährleisten, dass sich durch konstruktive und destruktive Interferenz die Empfangssignale aus verschiedenen Richtungen zu einem Voxel eines 3D-Bildes überlagern. Die Vorstellung, man könnte in diesem Fall eine exakte dreidimensionale Rekonstruktion der Reflektivität erreichen, ist jedoch durch die Einschränkungen des SAFT-Algorithmus nicht erfüllbar. Nach wie vor muss berücksichtigt werden, dass der SAFT-Algorithmus gewissen Näherungen unterliegt, die dieses Ziel verhindern. Außerdem ist die Bandbreite des Systems durch das Ultraschallsignal begrenzt, wodurch sich automatisch eine entsprechende Punkt-Auflösung im Raum ergibt. Ergebnisse dieser Messmethode sind im Bericht an verschiedenen Beispielen vorhanden. Daher wird an dieser Stelle auf das Beispiel verzichtet.



6.2.2 Beispiele für USP und online-Rekonstruktion

Dieses Kapitel demonstriert die Anwendung des Messsystems mit automatischer Positionserfassung (USP) und online Rekonstruktion an einfachen Messbeispielen. Die Reihenfolge der Messbeispiele orientiert sich am vorangegangenen Abschnitt zur Messstrategie (6.2.1). Wesentliches Ziel dieses Abschnittes ist es, die Ortungsgenauigkeit und die Abbildungseigenschaften des Systems in Abhängigkeit von den Messparametern zu vergleichen, insbesondere im Hinblick auf die Orientierung der Scherwellen.

Für die Messung mit dem Positionserfassungssystem werden zunächst die Koordinaten der beiden notwendigen Kalibrierpunkte auf dem Probekörper FBS1 festgelegt. Die Messbeispiele konzentrieren sich auf die Styrodurkugel 1 und Umgebung sowie auf die linke Hälfte des Hüllrohres. Als Position für die Basisstation mit dem Seilzug wird der untere Rand gewählt. Damit der Seilzug überwiegend auf Zug arbeitet, zeigt die x-Achse des Messkoordinatensystems (x_m) dann in Richtung der Y-Achse des Probekörpers. Dieses Messkoordinatensystem ist in Abbildung 44 eingezeichnet.

Alle in diesem Kapitel abgebildeten Ergebnisse beziehen sich auf den Kalibrierpunkt KP_1 . Der zweite Kalibrierpunkt liegt bei $x_m = 300$ mm und bestimmt damit die Messachse x_m parallel zur Y-Achse des Probekörpers (y_{PK}). Alle in diesem Kapitel gezeigten Ergebnisse beziehen sich auf das Messkoordinatensystem x_m/y_m .

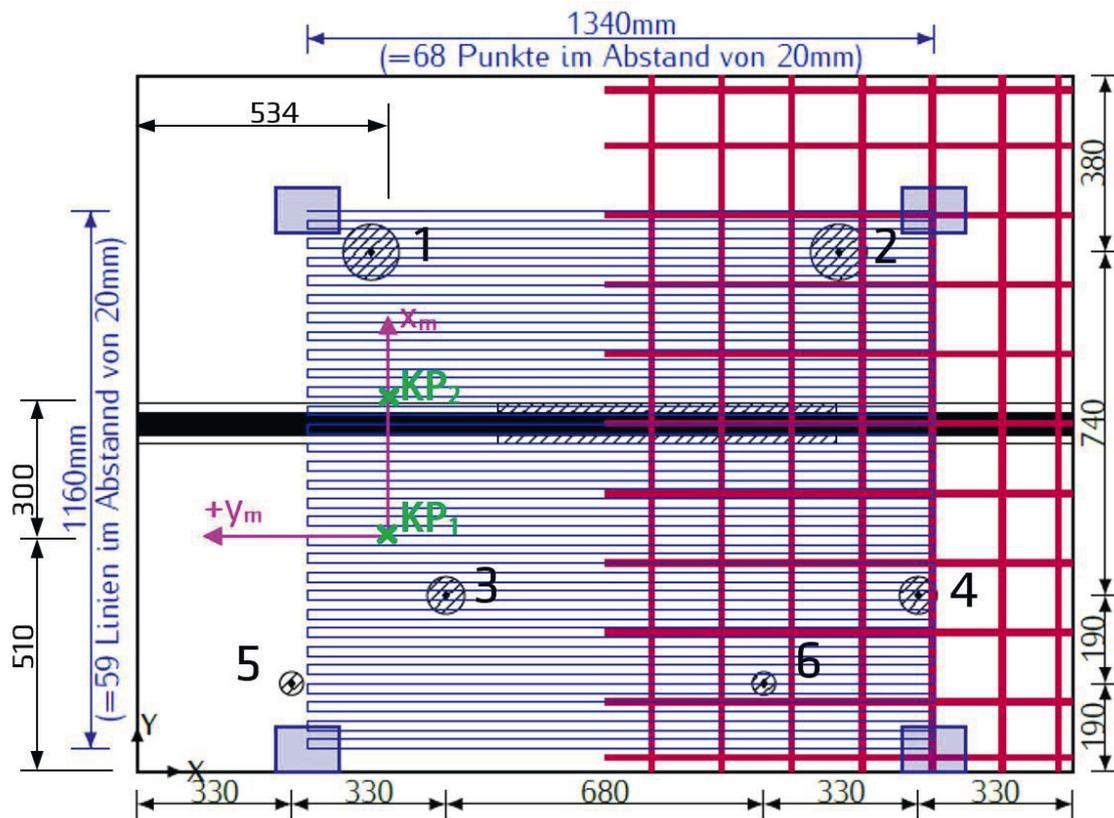


Abbildung 44: Verortung des Messfeldes auf dem FBS1 mit Position der Kalibrierpunkte KP1, KP2 und den Messachsen X_m , Y_m

Zum besseren Verständnis der in diesem Abschnitt geschilderten Ergebnisse sind in Abbildung 45 die Ortung der Styrodurkugel und des Hüllrohrs mit dem Bauplan überlagert dargestellt, so wie sie sich aus den in Abschnitt 6.1 beschriebenen Scannermessungen ergeben (SAFT-C-Bild aus Abbildung 39, links.) Diese Abbildung Plan befindet sich zusätzlich im Anhang 11.1 im Maßstab 1:10. Es ist zu erkennen, dass die Mittelpunkte der Styrodurkugeln 1 bis 4 mit einer Abweichung von 30 mm bis 50 mm gegenüber dem Bauplan abgebildet sind. Bei dieser Abweichung handelt es sich mit hoher Wahrscheinlichkeit nicht um eine Messungenauigkeit als Folge der Abtastung oder der Rekonstruktionsrechnung, sondern um eine Positionsverschiebung der Styrodurkugeln während des Betonierens und Verdichten des Ortbetons.

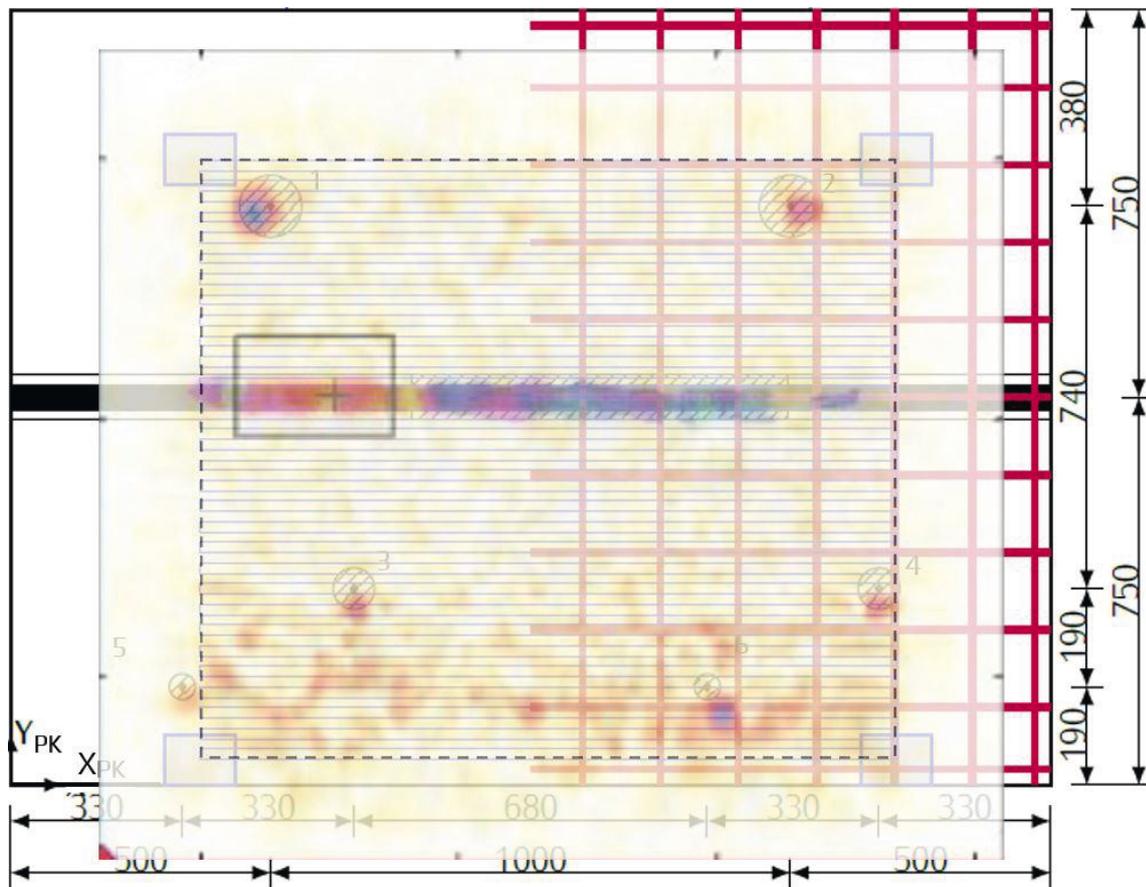


Abbildung 45: Vergleich der Ergebnisse der mit dem Scanner aufgenommenen und rekonstruierten Ergebnisse mit dem Bauplan des Probekörpers FBS1. Dargestellt sind die Ergebnisse wie im SAFT-C-Bild (Maßstabgerechte Version dieser Abbildung im Anhang 11.1 (M 1:10))

Abbildung der Styrodurkugel 1 mithilfe der Aufnahme einer Punktwolke

Nachfolgend wird die Anwendung des Ultraschall-Messsystems mit automatischer Positionserfassung (USP) und online Rekonstruktion an einfachen Messbeispielen demonstriert. Es handelt sich um die Abbildung der Styrodurkugel 1 im Probekörper FBS1 mithilfe einer Punktwolkenmessung. Die Position dieser Styrodurkugel und der anderen im Probekörper FBS1 eingebauten Reflektoren sowie der Bezugskordinaten sind Abbildung 44 zu entnehmen.

Vor dem Start der Messung werden die Geräteeinstellungen, insbesondere die Messempfindlichkeit anhand bekannter Reflektoren im Messobjekt optimiert, z.B. in einem nicht abgeschatteten Bereich der Rückwand oder an einem anderen bekannten Reflektor. Abbildung 46 zeigt die Anordnung der Apparatur zwischen der Aufnahme von zwei Messpunkten.



Abbildung 46: Anordnung der USP Apparatur zur Ortung der Styrodurkugel am FBS1.
links: Anordnung der Apparatur mit Prüfkopf zwischen zwei Punktmessungen und Zwischenergebnis der Rekonstruktion auf dem Messrechner. Im Hintergrund: Messstation mit Seilzug

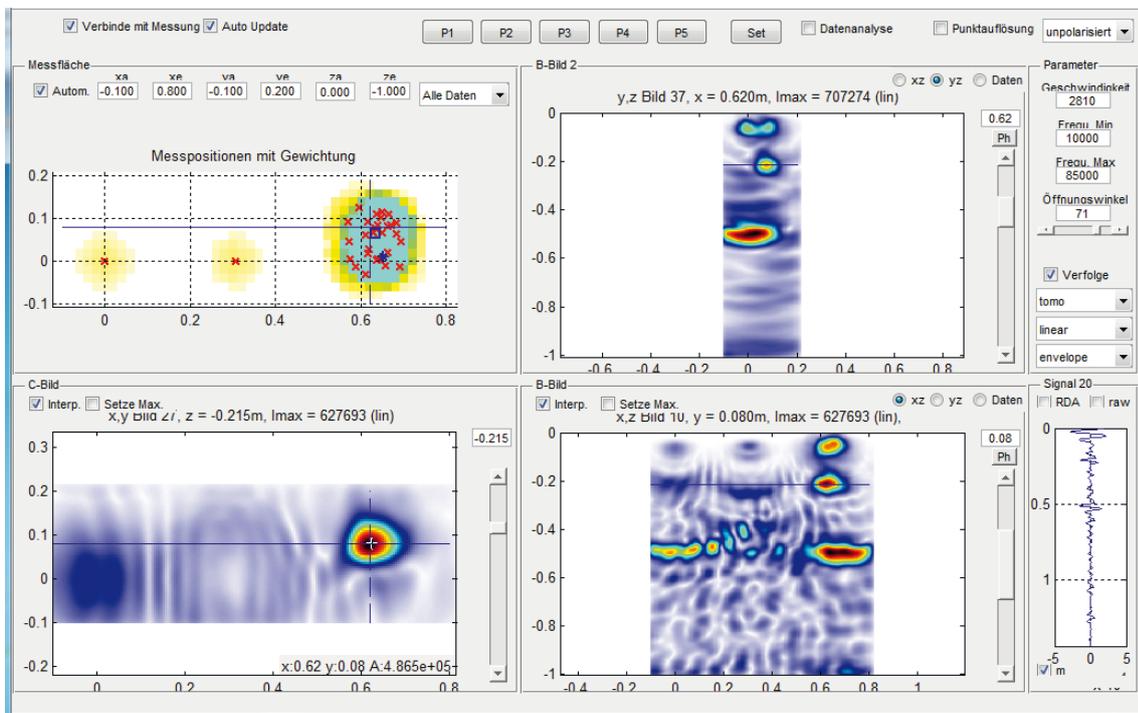


Abbildung 47: Ausschnitt von Abbildung 34: Lage der Kalibrierpunkte und der Messfeldkoordinaten für die in diesem Kapitel beschriebenen Messungen mit der automatischen Positionserfassung
links: Position der Messpunkte in Messfeldkoordinaten und SAFT-x,y-C-Bild in der Tiefe von $z = -215$ mm
rechts: SAFT y,z und x,z-Bilder entlang der links im C-Bild dargestellten Messfeldachsen x_m und y_m

Abbildung 47 zeigt das Ergebnis der Punktwolkenmessung als Screenshot von SAFT-Analyse nach Abschluss der Messwertaufnahme. Links oben sind die bis zum Zeitpunkt der Speicherung aufgenommenen ca. 26 Messpositionen über der Styrodurkugel 1 sowie die beiden Kalibrierpunkte KP_1 und KP_2 in den Messfeldkoordinaten x_m/y_m dargestellt (wobei die Ergebnisdarstellung an diesen Punkten abstellbar ist). Die Ausbreitungsgeschwindigkeit ist auf die bekannte Probekörperdicke von 500 mm, also $c = 2810$ m/s kalibriert.



Darunter ist der Reflex der Styrodurkugel im rekonstruierten x_m, y_m -Bild deutlich zu erkennen. Der Cursor zeigt die Position $x = 620 / y = 80$ mm. Das stimmt sehr gut mit der Scannermessung überein. Ein Vergleich mit der in Probekörperkoordinaten abgelesenen Reflexes von K1 von $x_m = 610$ mm / $y_m = 80$ mm aus den Scannermessungen zeigt lediglich eine Abweichung von 10 mm für den x_m -Wert.

Die beiden B-Bilder (oben rechts in der y_m, z_m - und unten rechts in der x_m, z_m - Darstellung) zeigen die deutliche Anzeige des Reflexes in 200 mm Tiefe und einen kleinen Teil des Rückwandeckes in 500 mm Tiefe.

Im linken Teil des x_m, z_m -B-Bildes ist ein kleiner Abschnitt des Rückwandeckes zu erkennen, der aus der Kalibrierposition KP_1 stammt. Am Kalibrierpunkt KP_2 erscheint dieses Echo nicht, da sich darüber das Hüllrohr befindet und die Rückwand abschattet.

Aufnahmen von Messpunkten entlang von Linien: Styrodurkugeln K1 und Hüllrohr

Am Beispiel von Messungen an der Styrodurkugel K1 soll nun die Leistungsfähigkeit von linienförmigen Messpunktaufnahmen demonstriert werden. Dabei wird auch auf den im Abschnitt 3 zur Messstrategie erwähnten Einfluss der Polarisationsrichtung der Scherwellen relativ zur Messachse eingegangen.

Als Beispiel zeigen wir hier die Ergebnisse von zwei senkrecht zueinander liegenden Messlinien über der Styrodurkugel K1 (Durchmesser 120 mm). Dabei werden für jede Linie beide Polarisationsrichtungen aufgenommen und verglichen. Dabei geht es um den Vergleich der Ortung und der Form (also z.B. die Abbildung der Krümmung einer Kugeloberfläche) eines bereits bekannten Reflektors mithilfe von Linienmessungen.

Zur Übersicht zeigt Abbildung 48 den ungefähren Verlauf der Messlinien im linken Abschnitt des Probekörpers FBS1. Dazu ist die Darstellung gegenüber Abbildung 45 gedreht, sodass die Messkoordinatenachse x_m waagrecht verläuft, analog zur x -Achse der Ergebnisdarstellung von SAFT-Analysis. Es wurden jeweils drei möglichst deckungsgleiche Messlinien in den beiden Polarisationsrichtungen aufgenommen (Abbildung 49): Links mit der Polarisationsrichtung parallel der Messkoordinatenachse x_m und rechts senkrecht zu dieser Achse.

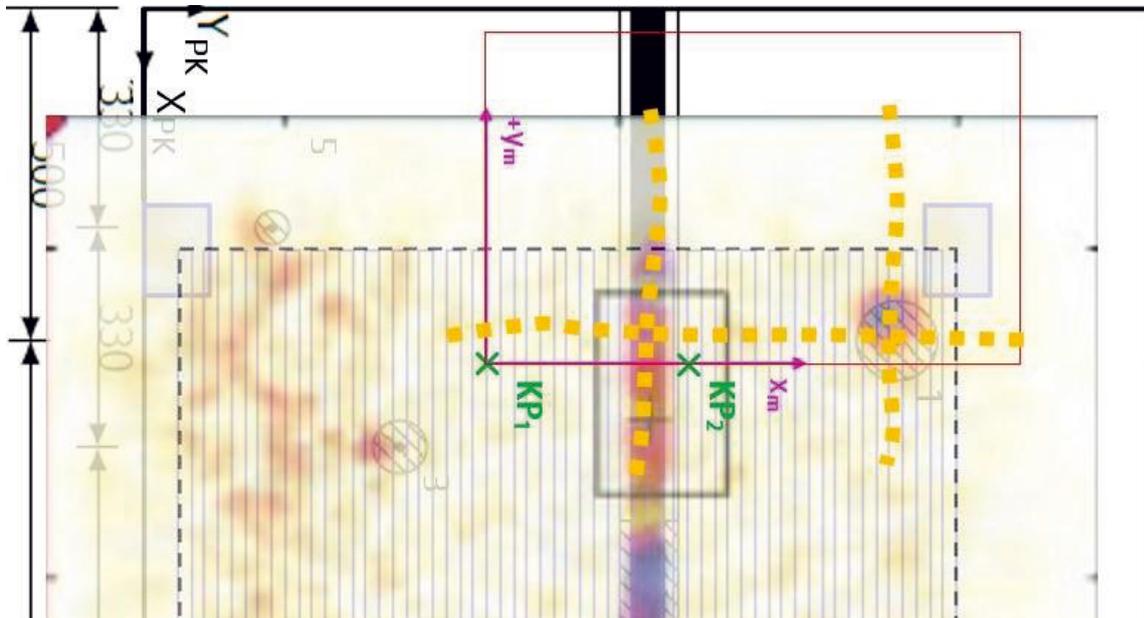


Abbildung 48: Überlagerung von Bauplan, Messlinien in Kapitel 6.2.2 und Ergebnis der Scannermessung aus Kapitel 6.1

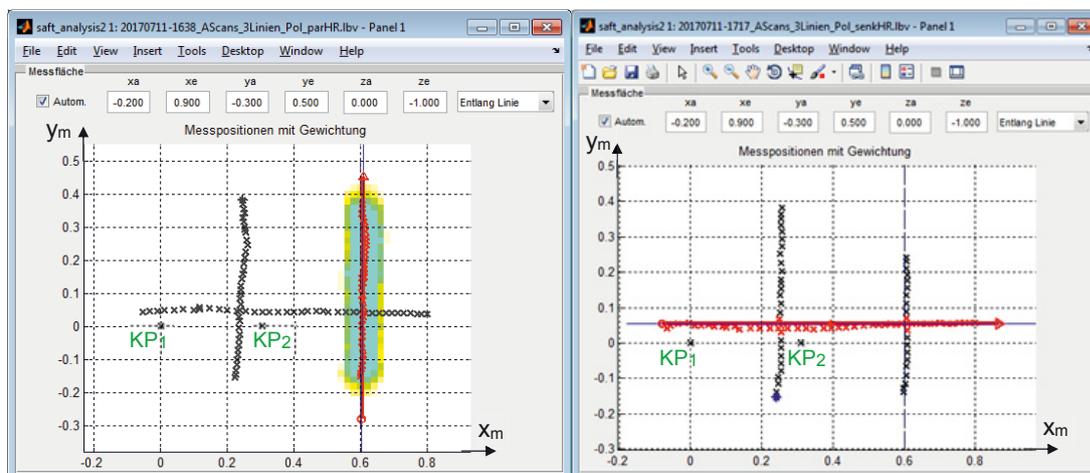


Abbildung 49: Lage der Messpunkte in Messkoordinaten für die Messung mit der Polarisationsrichtung in x_m -Richtung (links) und der Polarisation in y_m -Richtung (rechts). Unterhalb der (waagerechten) x_m -Achse befinden sich die beiden Kalibrierpunkte KP_1 und KP_2

Beispiel 1: Die erste Linienmessung beginnt am Kalibrierpunkt KP_1 und mit einer geschätzten Schrittweite von 20 mm in Richtung der x-Messachse entsprechend den Messpunkten aus Abbildung 49 links. Die Polarisation der Scherwellen ist senkrecht zur Messachse orientiert (Richtung y_m), um die optimale Beschallung in Richtung der Messlinie zu erhalten. Das B-Bild der Einhüllenden (Abbildung 50 links) zeigt bei $x_m = 230$ mm die Oberseite des Hüllrohrs und bei $x_m = 650$ mm die Oberseite der Styrodurkugel, jeweils sehr gut fokussiert.

In der entsprechenden Abbildung des Realteils der Rekonstruktion (Abbildung 50, rechts) ist besonders bei der Styrodurkugel die Krümmung der Oberfläche formgetreu abgebildet. Dies wird durch den großen Öffnungswinkel der quer zur Messlinie polarisierten horizontal polarisierten Scherwelle (S_H) erreicht.

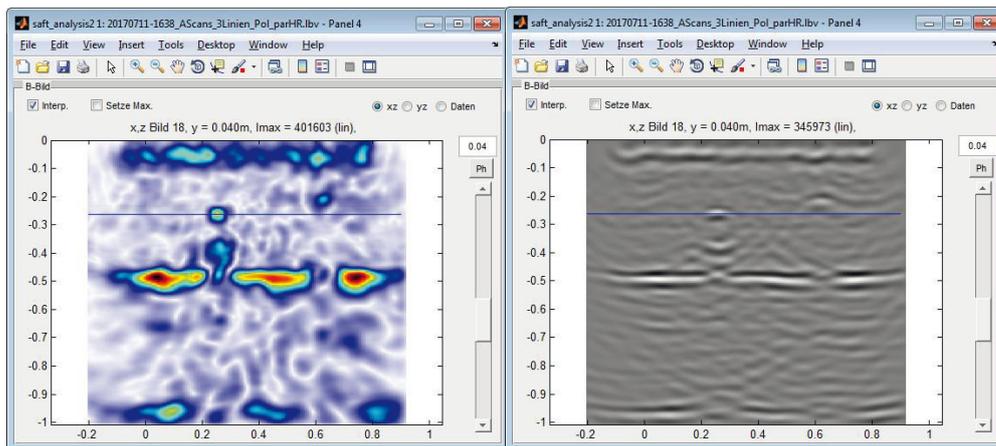


Abbildung 50: Rekonstruktion der Messlinie parallel x_m über das Hüllrohr und die Styrodurkugel K1
Polarisation parallel y_m , also senkrecht zur Messlinie: S_H -Anregung
links: xz-B-Bild mit Darstellung Einhüllenden; rechts: xz-B-Bild mit Darstellung des Realteils

Das nächste Bild (Abbildung 51) zeigt die entsprechende Messlinie, die parallel zur Y-Achse über die Styrodurkugel führt. Sie hat die gleiche Prüfkopforientierung, das heißt aber in diesem Fall, dass die Polarisation der Scherwellen in Richtung der Messlinie orientiert ist, also die vertikal polarisierte Scherwelle anregt. Dies entspricht der S_V -Symmetrie in Abbildung 5. Wie in Abbildung 51 zu erkennen, ist hier die Krümmung der Kugel kaum ausgeprägt. Der Grund dafür liegt in dem Öffnungswinkel des Schallfeldes in Abtastrichtung, die Styrodurkugel ist weniger gut ausgeleuchtet bei der Polarisation denkrecht zur Einfallsebene (S_H -Symmetrie)

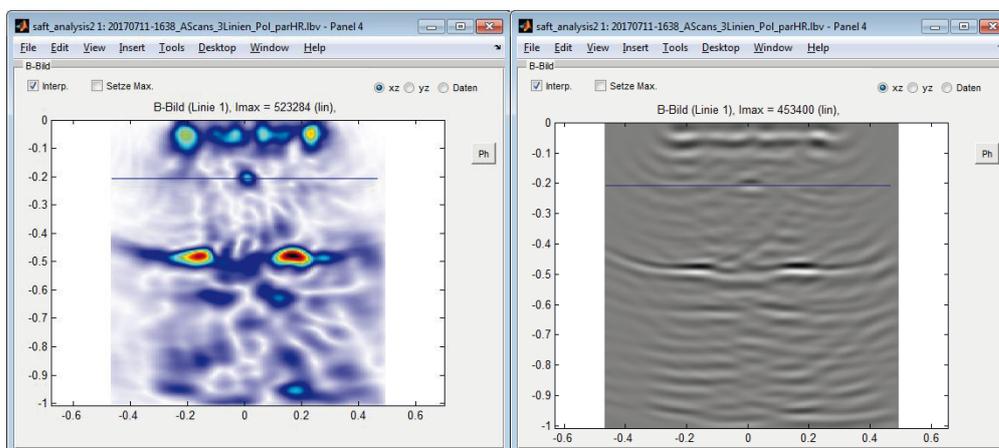


Abbildung 51: Rekonstruktion der Messlinie in Richtung y_m (parallel zum Hüllrohr) über die Kugel K1
Polarisation parallel y_m , also in Richtung der Messlinie
Links: xz-B-Bild mit Darstellung Einhüllenden; rechts: xz-B-Bild mit Darstellung des Realteils

Der Vollständigkeit halber wird die Abbildung der Styrodurkugel K1 nun noch in beiden Messrichtungen für die jeweils umgekehrte Polarisationsrichtung verglichen. Dazu betrachten wir in Abbildung 52 das Ergebnis der entsprechenden in Abbildung 49 (rechts) gezeigten Messlinien.

Bei der Linienführung in Richtung der y_m -Achse der Messfeldkoordinaten und Polarisationsrichtung in Richtung x_m ist dann die SH Welle angeregt (Polarisation senkrecht zur Messlinie, siehe Abbildung 52 links). Der Krümmungsansatz der Styrodurkugel ist zu erkennen. Im rechten Bildteil führt die Messlinie in x_m -Richtung sowohl über das Hüllrohr als auch die Kugel, wobei die Polarisation ebenfalls in diese Richtung orientiert ist. Die Oberkante der Kugel ist deutlich abgebildet, wobei die Wölbung der Kugel etwas weniger sichtbar ist. Der Unterschied ist allerdings geringer als für das davor in Abbildung 50 und Abbildung 51 diskutierte Beispiel.

Die in diesem Abschnitt diskutierten Ergebnisse zeigen, dass sowohl das Hüllrohr als auch die Styrodurkugel 1 über Linienmessungen mit USP und online-Rekonstruktion ortsgenau und präzise abgebildet werden können. Die Abbildungen entsprechen denen mit den Scannermessungen erhaltenen Ergebnisse (Kapitel 6.1). Wie in Abschnitt 6.2.1 bereits erwähnt, ist es bei ei Linienmessungen sinnvoll, die Polarisationsrichtung des Prüfkopfes senkrecht zur Linienführung (SH-Anregung) auszurichten, damit der Reflektor optimal abgebildet wird. Allerdings ist der Unterschied der beiden Polarisationsrichtungen in der Praxis weniger wichtig, als in Abbildung 5 dargestellt. Bei den Gruppenstrahlern (Sende und Empfangskopf bestehen aus je 12 Punktkontaktprüfköpfen) ist der Unterschied der Abstrahlcharakteristik zwischen den beiden Polarisationsrichtungen wesentlich geringer ausgeprägt, als für einzelne Punktkontaktprüfköpfe [16].

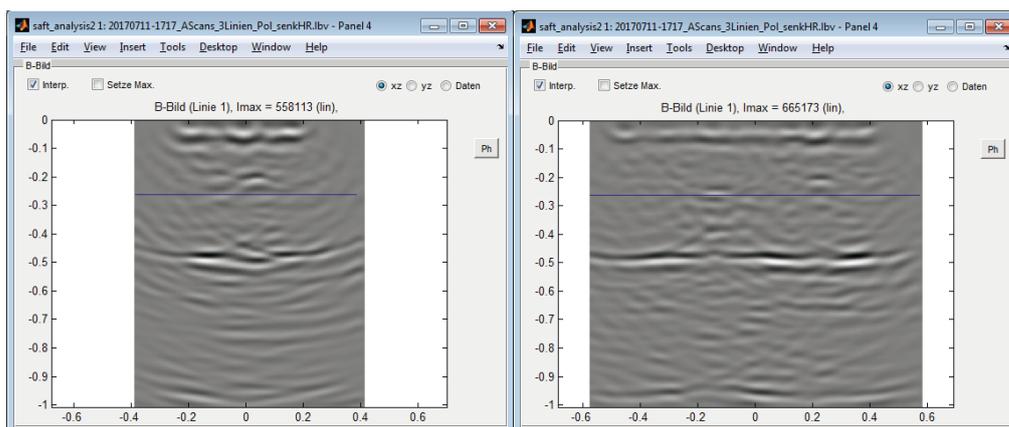


Abbildung 52 Vergleich der Rekonstruktion der Messlinien über die Styrodurkugel K1 bei der Polarisation parallel x_m (Darstellung der einhüllenden)

links: Messlinie parallel y_m , also Polarisation senkrecht zur Messlinie: SH-Anregung

rechts: Messlinie parallel x_m , also Polarisation in Richtung zur Messlinie: SV-Anregung

Aufnahme eines Gebietes über dem Hüllrohr mit engem Messraster

Mit der nachfolgend dargestellten Punktmessung mit engem Messraster soll die bereits im Abschnitt 3 mithilfe einer Linienmessung beschriebene Fehlstelle an der Unterseite des Hüllrohres genauer abgebildet werden.

Ein relativ großes Gebiet einer Länge von 500 mm in einer Breite, die das Hüllrohr auf jeden Fall abdeckt, soll in demselben Bereich zeigen, ob dieses Ergebnis auch mit der automatischen Positionserfassung und online Rekonstruktion erhalten werden kann. Das Ergebnis der entsprechenden Messung zeigt Abbildung 53 (screenshot von SAFT_Analysis2).

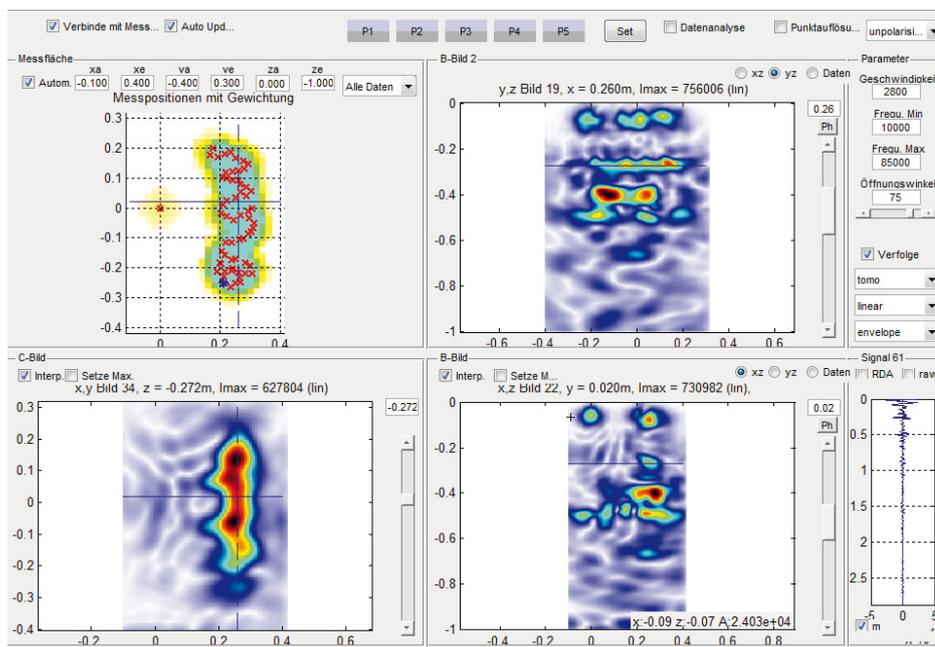


Abbildung 53: Messung eines 50 cm langen Hüllrohrabschnittes mithilfe eines willkürlichen Messrasters

Die Messpunkte im Bereich von x_m 180 mm bis 350 mm decken die Breite des Hüllrohres voll ab. Entlang des Hüllrohres reicht der Messbereich von y_m 200 mm bis -300 mm (entsprechend den Probekörperkoordinaten (x_{PK} von 400 mm bis 900 mm)). Im SAFT-x,y-C-Bild (unten links) kennzeichnet die große Reflexionsintensität der Hüllrohroberseite den Übergang von Beton zur Reflexion am Stahl des Litzenbündels. Im y_m -z-Bild (oben rechts) ist unterhalb davon ($y_m = 0,2$ m bis $-0,2$ m) die Luftlinse deutlich abgebildet.

Die so mit SAFT-Analysis rekonstruierten Ergebnisse lassen sich mit dem entsprechenden Browser zur Darstellung der 3D-Rekonstruktionsrechnung analysieren. Trotz des relativ kleinen mit der Punktwolke aufgenommenen Bereiches sind die wesentlichen Aspekte des Hüllrohres mit untenliegender Hohlstelle deutlich zu erkennen.

Großflächige Messung über Hüllrohr und Rückwand mit und ohne Bewehrung

In diesem Abschnitt präsentieren wir das Beispiel einer großflächigen Messung mit automatischer Positionserfassung, wie sie z.B. zur Orientierung durchgeführt wird, wenn nur ungefähre Information über die im Probekörper enthaltenen Objekte oder den Aufbau vorliegen. Mit solchen Versuchen kann herausgefunden werden, wie man sich mit der online-Rekonstruktion von SAFT-Analyse am besten einen Überblick über vorhandene Reflektoren verschaffen kann.

Abbildung 54 zeigt die gewählten Messpunkte und die Koordinaten der Einbauteile (a: bezogen auf den Koordinatenursprung unten links und (b) umgerechnet auf den vom Experimentator gewählten Ursprung oben links. Abbildung 55 zeigt die resultierende Messpunktverteilung und -dichte gemäß der Farbkodierung in SAFT-Analyse.

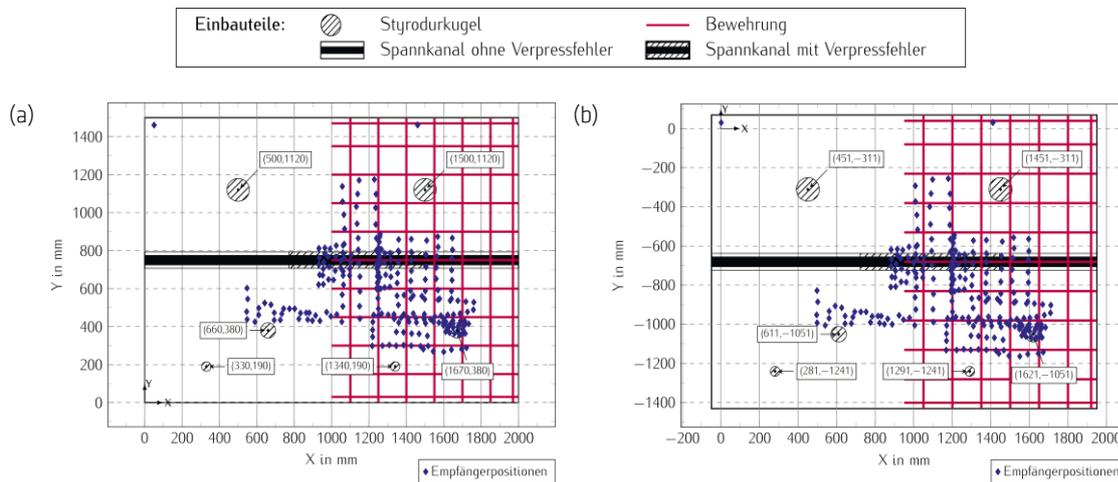


Abbildung 54: Empfängerpositionen: (a) Koordinatenursprung = Ursprung des Referenzprobekörpers, (b) Koordinatensystem nach Messfeldanpassung (Translation zur 1. Messposition und X-Achsen-Rotation zur 2. Messposition).

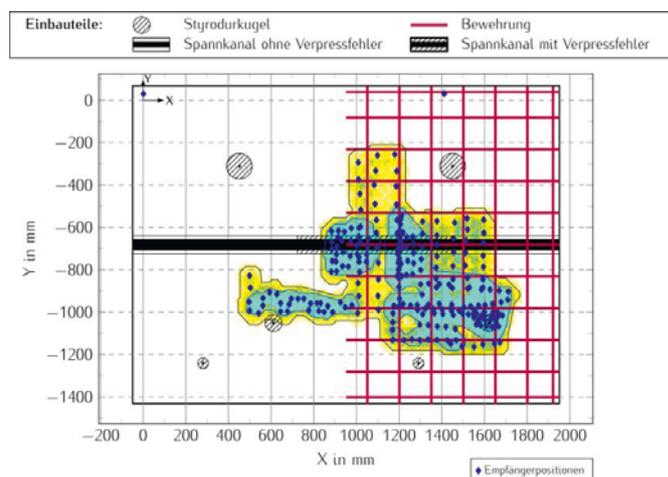


Abbildung 55: Messpunktverteilung und -dichte

Wie den Tiefenschnitten in Abbildung 56 zu entnehmen ist, stimmen der angezeigte Ort und die Tiefe des Hüllrohrs und der Rückwand mit dem Ergebnis der Scannermessung gut überein. Das Hüllrohr ist sehr deutlich mit hoher Amplitude abgebildet (Abbildung 56 (a)). Die Amplitude erklärt sich aus der Tatsache, dass die Messpunkte über dem in das Hüllrohr eingebrachten Verpressfehler verlaufen.

Die Rückwand des Probekörpers ist in Abbildung 56 b) in der Tiefe abgebildet, die sich z. B. im SAFT-B-Bild Abbildung 50 ergibt. Die Anzeige ist deutlich, aber ungleichmäßig in der Amplitude. Das liegt an den schon erwähnten Interferenzen für die Abbildung von ebenen Reflektoren bei Einstellung eines großen Öffnungswinkels für die Rekonstruktion (hier 70°). Diese kann man vermeiden, indem man einen kleinen Öffnungswinkel wählt. (s.a. Kapitel 6.2.1).

Im Bereich der mit Messpunkten abgedeckten Fläche befindet sich auch die rechte untere Styrodurkugel (Durchmesser 80 mm, Nr. 4 in Abbildung 44). Diese führt im Tiefenschnitt der Rückwand nicht zu signifikanten Abschattungen, die eine Ortung erlauben würden.

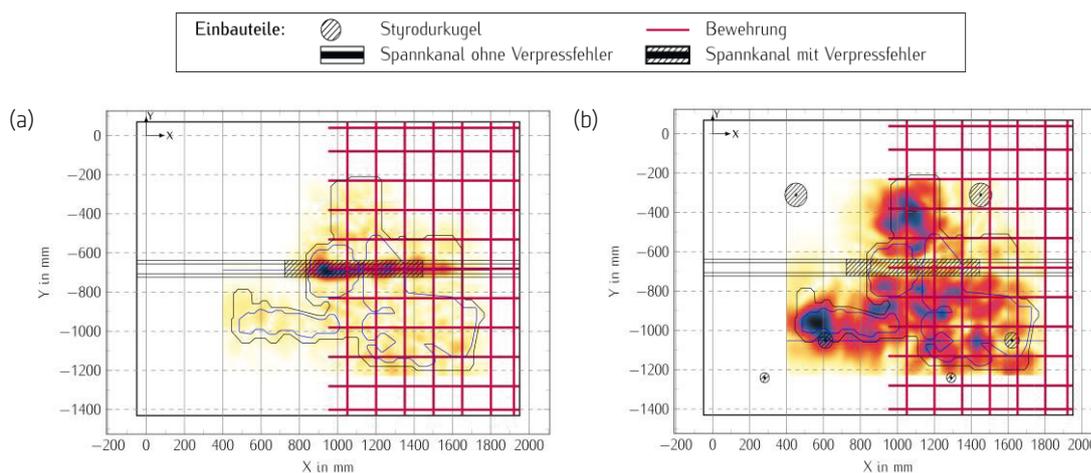


Abbildung 56: Rekonstruktionsergebnis zur Lage des Hüllrohrs. (a) C-Bild in einer Tiefe von $z=27,6\text{cm}$ (direkte Hüllrohrreflexion), (b) C-Bild in einer Tiefe von $z = 50,1\text{cm}$ (indirekte Hüllrohrdetektion über Abschattung, fehlendes Rückwandecho)

6.3 Virtuelle Messung mit hinterlegten Daten

Beispiel 1 Hüllrohr im FBS 1

Um die Methode der Automatischen Positionserfassung und unmittelbar folgender (online-) Rekonstruktion optimieren zu können, müssen verschiedene Messstrategien ausprobiert und bewertet werden. Dafür finden sich Beispiele in Kapitel 6.2.2.

Um das Ergebnis für verschiedene Messansätze schnell vergleichen zu können, wird im Programmpaket SAFT-Analysis die Methode der Virtuellen Messung mit hinterlegten Daten - kurz: *Virtualisierte Messung* - zur Verfügung gestellt. Damit können für Bauteilabschnitte, für die eine äquidistant (sinnvollerweise im Raster 20 mm) aufgenommene Scanner-Messung

vorliegt, nachträglich mit der Software SAFT-Analysis per Mausklick Messpunkte ausgewählt werden, die als eigenständiger Datensatz rekonstruiert werden.

So, wie man am Bauwerk mit dem Positionserfassungssystem intuitiv verschiedene Messpunkte auswählt, tut man das hier per Mausklick und kann die online-Rekonstruktion bis zu einem beurteilungsfähigen Ergebnis fortführen und verschiedene Ansätze schnell durchtesten. Der einzige Unterschied zu einer „echten“ Messung ist, dass nur Messpunkte im aufgenommenen Raster existieren und keine Zwischenpunkte.

Nachfolgend ist die Linienmessung über das Hüllrohr im Probekörper FBS1 (gezeigt in Abbildung 44 im vorigen Abschnitt 6.2.2) als virtualisierte Messung nachgestellt. Die im Programm hinterlegten Messdaten stammen aus der Scannermessung (diskutiert in Kapitel 6.1.1, z.B. Abbildung 40). Virtualisiert wird die Messung quer zum Hüllrohr analog einer Messung mit der USP-Apparatur (Abbildung 42 b, SAFT-B-Bild).

Abbildung 57 zeigt das Ergebnis: links: Messpunkte, hier äquidistant 2 cm und rechts: SAFT-B-Bild aus der Online Rekonstruktion. Die wesentlichen Ergebnisse aus realer Messung und virtualisierter Messung entsprechen sich: Das Rückwandecho bei $z = 0,5$ mm und die Hüllrohroberseite (1) bei $z = 300$ mm. Die schwächeren Reflektoren sind nicht vollständig identisch, insbesondere die Reflexion aus dem Inneren des Hüllrohres (5), die nur andeutungsweise zu erkennen ist.

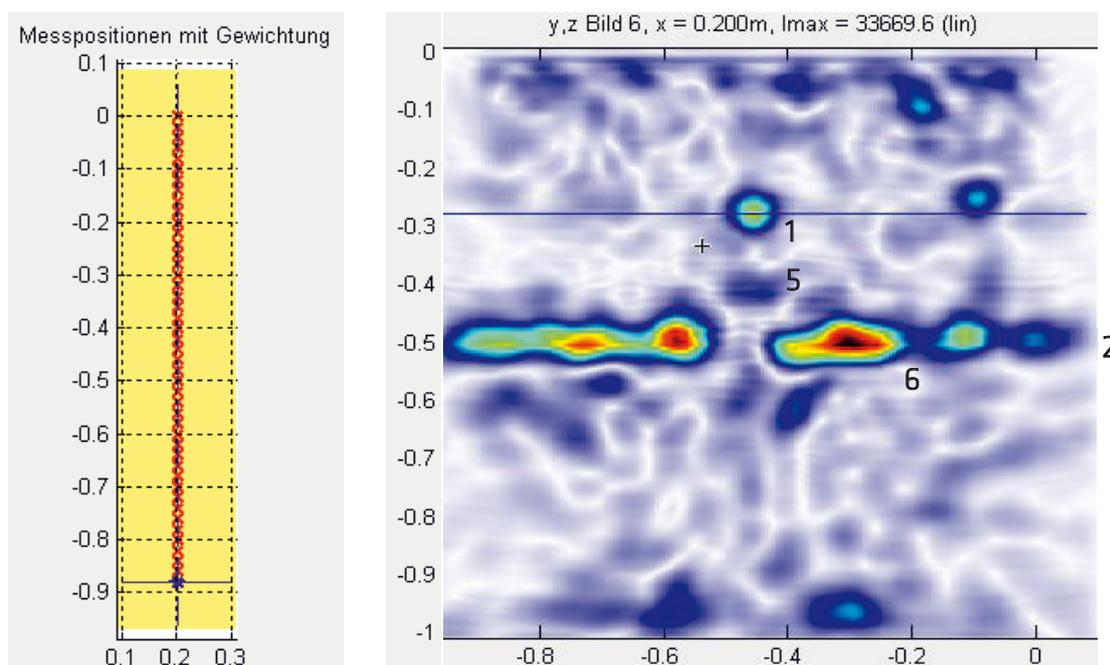


Abbildung 57: Links: Messpunkte der Linienmessung. Rechts: Rekonstruiertes B-Bild aus der virtuellen Messung mit hinterlegten Daten.

Beispiel 2: Ortung von Styrodurkugeln mit Punktwolken

Nachfolgend zeigen wir noch die virtuelle Messung von zwei Styrodurkugeln im Probekörper FBS1, wie sie sich aus den hinterlegten Scannermessungen aus Kapitel 6. 1 ergeben:

Abbildung 58 zeigt die virtuellen Messungen der Styrodurkugeln 1 (Durchmesser 120 mm) und 4 (Durchmesser 80 mm), eingezeichnet in den Konstruktionsplan Abbildung 34. Die Messpunkte wurden für beide Ortungen als Punktwolke gewählt, wie in Abbildung 59 (rechts) abgebildet.

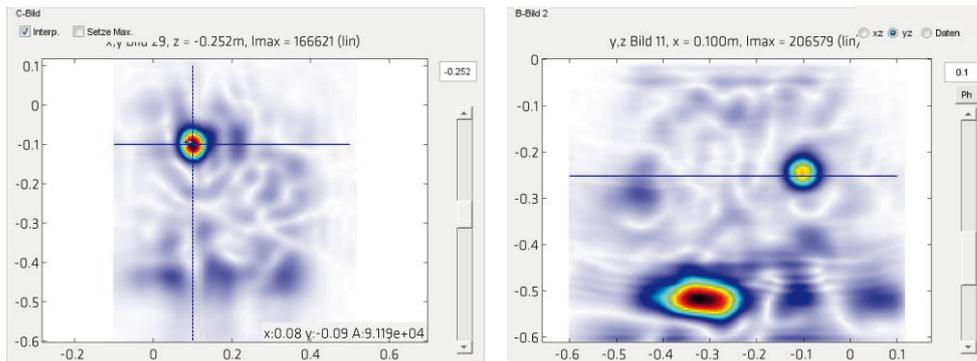


Abbildung 58: Virtualisierte Messung der Styrodurkugel 1
links: SAFT C-Bild (x,y) rechts SAFT-B-Bild (y,z)

Die Styrodurkugel 1 (Durchmesser 120 mm, im bewehrungsfreien Abschnitt von FBS1, siehe Abbildung 58) ist mit einem sehr guten S/R-Verhältnis abgebildet. Die Styrodurkugel 4 (Durchmesser 80 mm) ist ebenfalls eindeutig mit gutem S/R-Verhältnis zu erkennen, allerdings ist etwas oberhalb (Abbildung 59) ebenfalls ein etwas schwächerer Reflektor abgebildet, der keinem planmäßigen oder bekannten Reflektor im Bauplan entspricht.

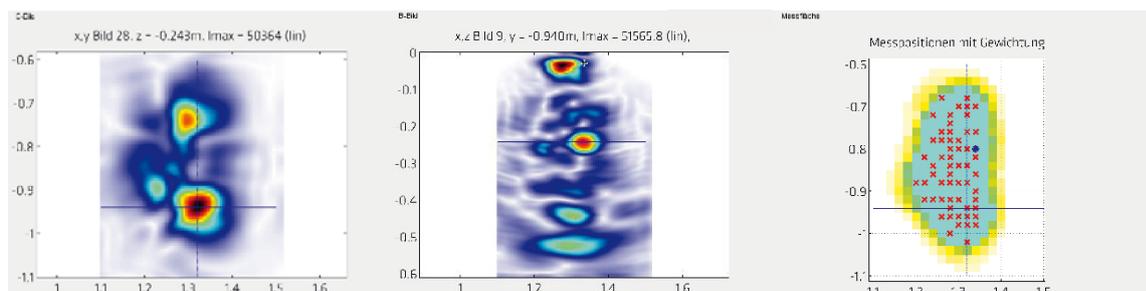


Abbildung 59: Virtualisierte Messung der Styrodurkugel 4
links: SAFT C-Bild (x,y) Mitte: SAFT-B-Bild (y,z) rechts: Messpositionen

Ortung der Auffälligkeit im Hüllrohr

Um die Abbildung des Hüllrohrs im FBS 1, gemessen mit dem USP und der online-Rekonstruktion mit dem Ergebnis der Scannermessung (Kapitel 6.1) zu vergleichen, erfolgt zunächst der Vergleich der Ergebnisse mit äquidistantem Messraster. Dazu wird mit Ultraschall-Analyse eine quasi-äquidistante Messung am Hüllrohr im FBS1 bezogen auf das Hüllrohr ausgewertet (Abbildung 60). Man erkennt oben links das gewählte virtuelle Messraster (hier, regelmäßig, 20 mm Rasterweite, entsprechend der Scannermessung). Die

Hüllrohroberseite ist in der Tiefe von $z = 315$ mm darstellt (unten links: Tiefenschnitt (SAFT-C-Bild), unten rechts SAFT-B-Bild). Die Hüllrohroberseite ist ab der x-Koordinate 0,2 m mit hoher Intensität dargestellt, was in etwa mit dem Beginn der im Plan (Abbildung 34) eingezeichneten Hohlstelle übereinstimmt.

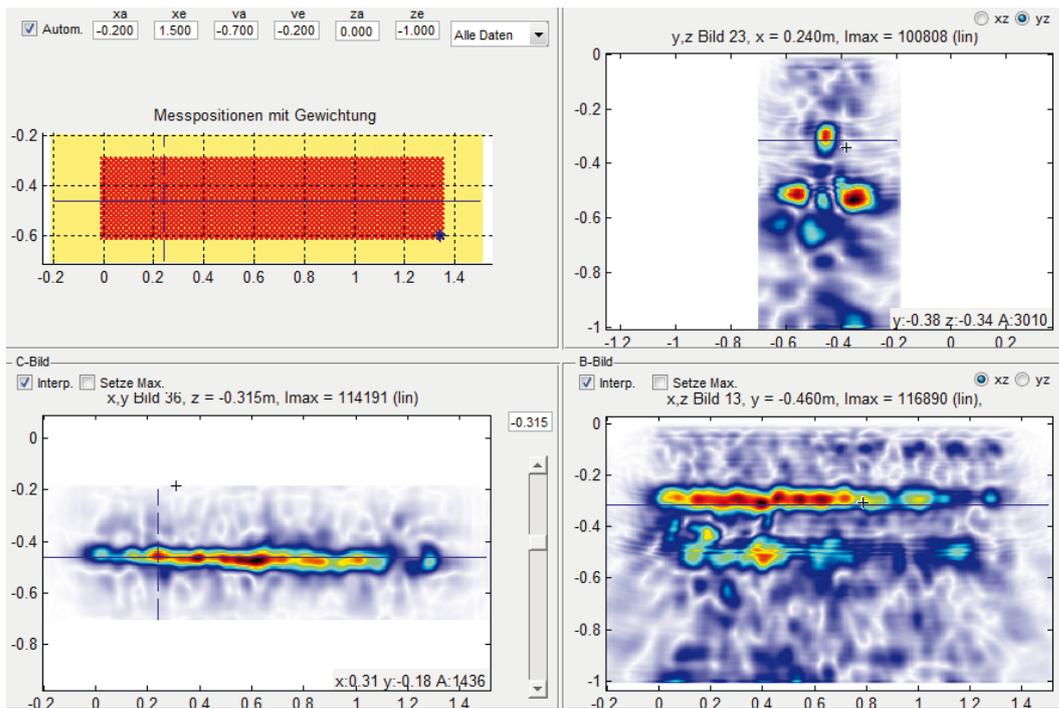


Abbildung 60: Hüllrohr Oberseite: Virtualisierte Messung mit Wahl eines äquidistanten Messrasters (20x20 mm)

Wählt man dagegen für den Tiefenschnitt die an der Unterseite des Hüllrohrs gemessenen Auffälligkeiten (um $z = 400$ mm), so erhält man die in Abbildung 61 dargestellte Situation. In den Längsschnitten wird die Auffälligkeit angezeigt (Abbildung 61: SAFT-B-Bilder, y,z-Bild und x,z-Bild rechts). Sie reicht von $x = 0$ bis etwa 200 mm.

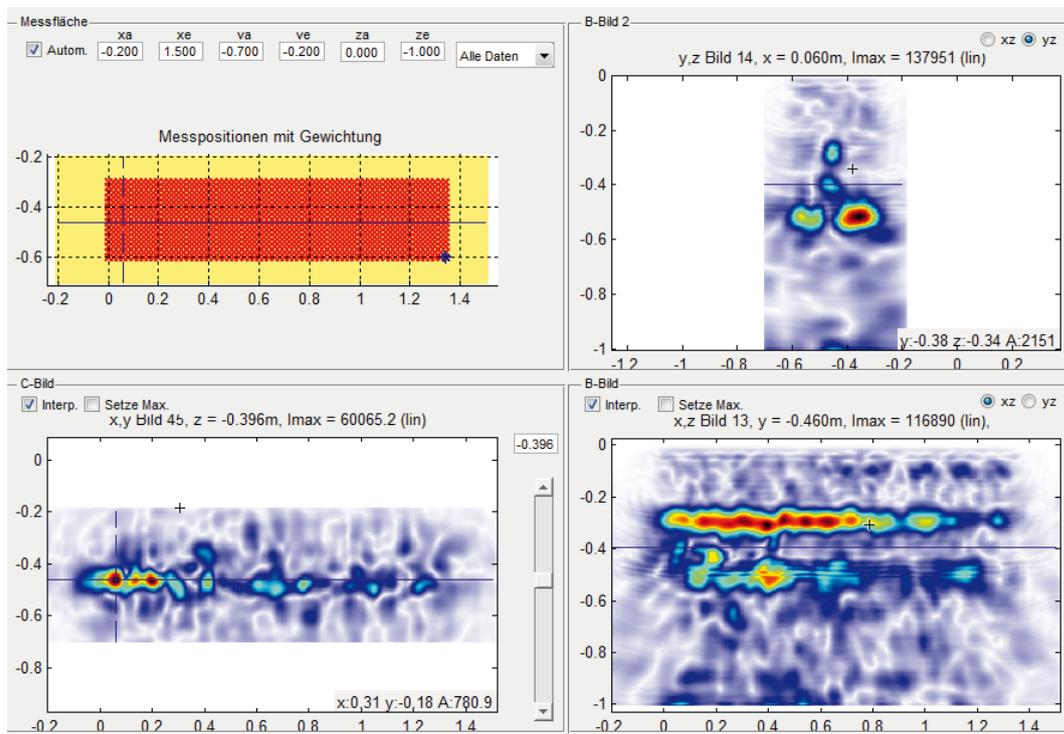


Abbildung 61: Virtualisierte Messung mit Wahl eines äquidistanten Messrasters (20x20 mm) mit Anzeige einer Auffälligkeit an der unteren Seite des Hüllrohres

Versucht man nun, denselben Hüllrohrbereich per virtualisierter Messung mit einer Punktwolke zu erfassen, erhält man die in Abbildung 62 und Abbildung 54 gezeigten Ergebnisse. Die Hüllrohroberseite (Abbildung 62) ist deutlich in den Längsschnitten (rechts) und im Tiefenschnitt unten links zu erkennen.

Die Auffälligkeit an der Unterseite des Hüllrohres wird mit dieser virtualisierten Messung ebenfalls angezeigt (Abbildung 63, Längsschnitte im y,z- und y,z- Bild sowie der Tiefenschnitt im x,y -Bild). Die Ausdehnung und Deutlichkeit erreicht jedoch nicht die Aussagekraft der Inter-SAFT Auswertung, wie sie in Kapitel 6.1 beschrieben ist (siehe z.B. Abbildungen 38 und 39).

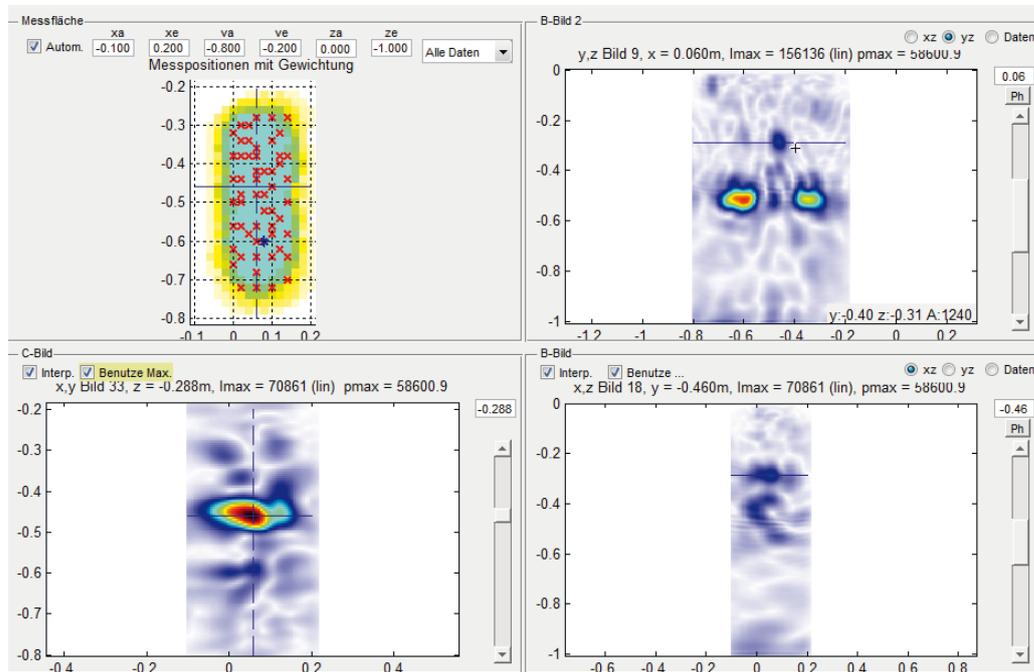


Abbildung 62: Virtualisierte Messung des Hüllrohres: Echoanzeige der Oberseite des Hüllrohres bei Anordnung der Messung als Punktwolke

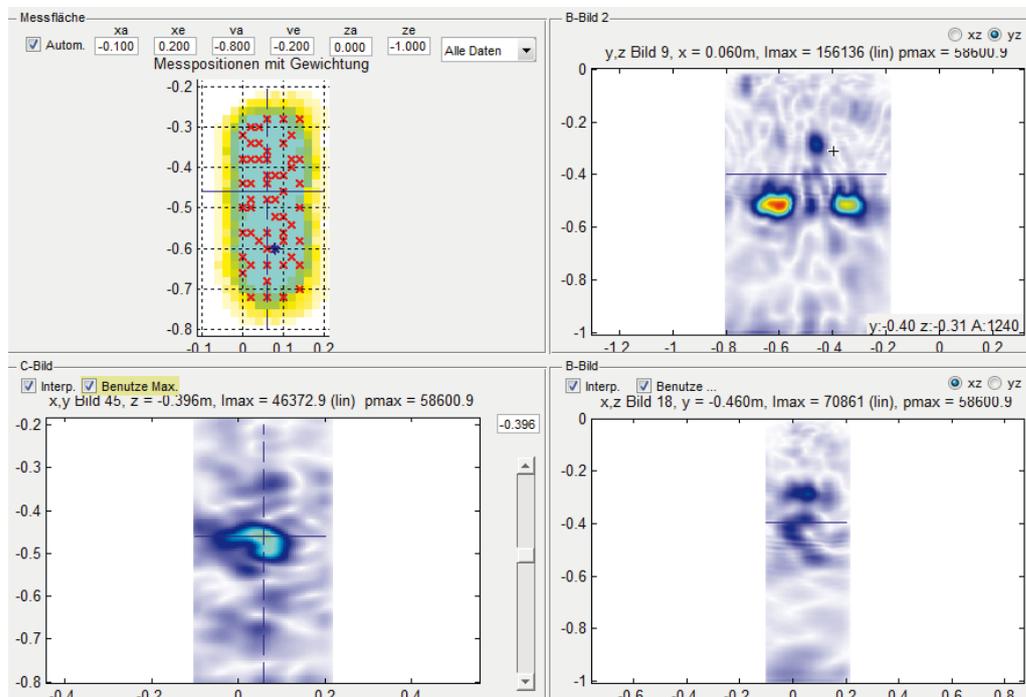


Abbildung 63: Virtualisierte Messung des Hüllrohres: Echoanzeige der Auffälligkeit an der Rückseite des Hüllrohres bei Anordnung der Messung als Punktwolke



Zusammenfassend kann man also sagen, dass die Methode der Abbildung mit automatischer Positionserfassung und online-Rekonstruktion bei direkt beschallten Reflektoren Ergebnisse liefern kann, die denen einer Scannermessung gleichwertig sind. Bei komplexen Reflektoren oder in mehrschichtigen Strukturen können zumindest Hinweise auf Auffälligkeiten gegeben werden, die dann mit anderen Verfahren weiter untersucht werden können.

7 Ergebnisse an realen Bauteilen

Um die Verwendbarkeit der Anlage für reale Prüfaufgaben zu untersuchen, wurden zwei Prüfaufgaben der Fa. Hupfer Ingenieure nachausgewertet und mit den Originalauswertungen verglichen.

7.1 Kontrolle und Planung von Verstärkungsmaßnahmen an Brücken

Aufgabenstellung 1

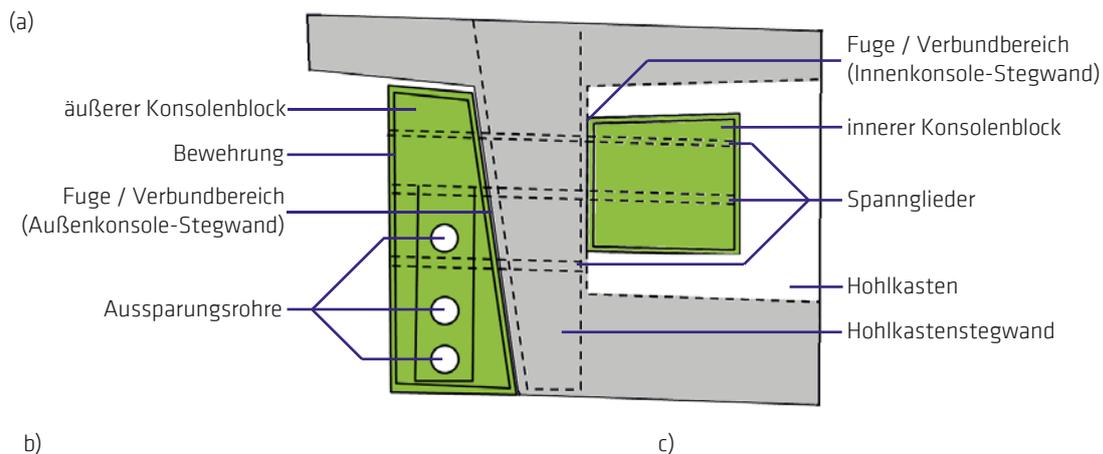


Abbildung 64: Verstärkungsmaßnahmen an einer Hochstraße. (a) schematischer Aufbau, (b) Konsolblock an einer Stegaußenwand der Brücke inklusive Messspurmarkierung (Achse 9-3 Nord), (c) Übergangsbereich zwischen Konsole und Hohlkastenwand (Quelle: Fa. Hupfer Ingenieure)

An der Verstärkungsmaßnahme einer Hochstraße in Hannover wurden an mehreren Konsolblöcken für die Umlenkung externer Spannglieder nach dem Ausschalen augenscheinliche Auffälligkeiten an der Betonoberfläche festgestellt (Entmischungen, Kiesnester, Lunker, u. ä.). Die Integrität im Innern der Blöcke und nach Möglichkeit an der Fuge zwischen Rückseite Block und Oberfläche Hohlkastenstegwand (Bestand) war stichprobenartig

an vier Umlenkconsolen zu untersuchen. Insbesondere der kraftschlüssige Verbund an der Fuge ist unabdingbar für die Übertragung der extern aufgebrachtten Spannkkräfte in die Bestandskonstruktion.

Durchführung der Untersuchungen

Es wurden mehrere Konsolblöcke untersucht, hier werden exemplarisch die Auswertungen an Achse 9-3 zusammengefasst. Messungen an anderen Umlenkblöcken zeigten keine Auffälligkeiten bei der Beurteilung. Aufgenommen wurden jeweils mehrere horizontale und vertikale Messspuren in äquidistantem Messraster (Abbildung 65 (b)). Die Daten wurden mit einem ACSYS A1040 (Mira) Linear Array aufgenommen. Dabei wurde jeweils manuell ein Linien-Scan durch paralleles Führen des Geräts im Abstand von 5cm aufgezeichnet und mit der InterSAFT Software der Universität Kassel ausgewertet.

Untersuchungsergebnisse

Relevant für die Beurteilung insbesondere der Fuge zwischen Rückseite Block und Oberfläche Hohlkastenstegwand sind die an der Stirnseite der Blöcke aufgenommenen vertikalen Messspuren. Durch die grafische Überlagerung der rekonstruierten Ultraschall-B-Bilder mit dem planungsgemäßen Schnitt durch einen Konsolblock können Auffälligkeiten und Abweichungen ermittelt und beurteilt werden (siehe Abbildung 65).

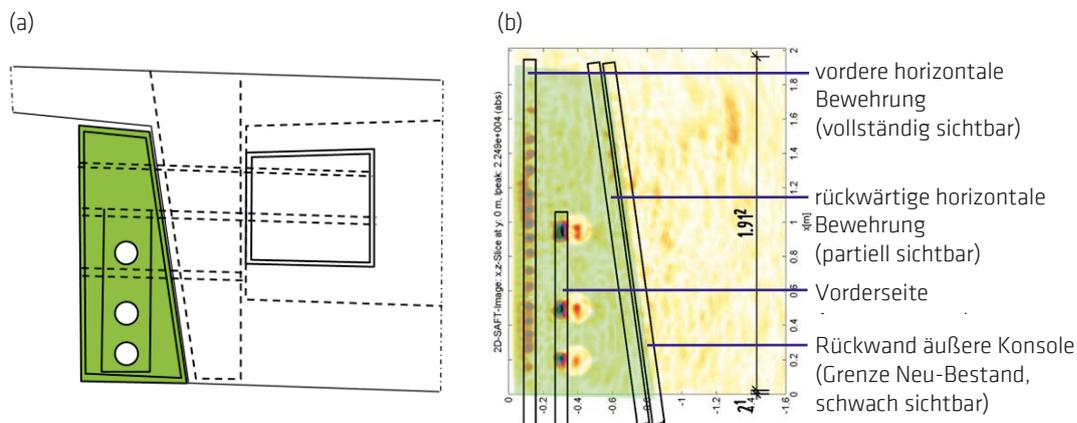


Abbildung 65: Messergebnisse zu einem äußeren Konsolblock (a) schematische Ansicht (b), grafische Überlagerung eines Ultraschall-B-Bildes mit dem Schnitt durch einen Konsolblock. Ergebnisse zeigen keine Auffälligkeiten bei der Beurteilung der inneren Integrität sowie bei der Bewertung des Verbunds an der Fuge. (Quelle: Fa. Hupfer Ingenieure)

Der äußere Block auf der Südseite in Achse 9-3 zeigt eine Auffälligkeit in der Verbundzone zwischen Konsolblock und Stegaußenwand auf einer Länge von ca. 20 cm (markiert in Abbildung 58 (a)). Die starke Reflexionsanzeige lässt auf Reflexion an Luft und damit auf fehlenden Verbund in diesem Bereich schließen. Der auffällige Bereich liegt zwischen zwei Ankerköpfen, eine horizontale Messung konnte hier nicht durchgeführt werden. Weitere Auffälligkeiten sind nicht vorhanden.

Anmerkung:

Aufgrund der Platzverhältnisse (Ankerköpfe) konnten keine flächigen Messungen durchgeführt werden. Die dargestellten Ultraschallbilder liefern daher lokal begrenzte Aussagen.

Nachauswertung und Ergebnisvergleich

Zur Nachauswertung der Daten mit dem BBSR-System wurden die Originalmessdaten in das Format für die SAFT-Analyse konvertiert. Da es sich bei dem verwendeten Messsystem um ein Linear-Array handelt, d.h. die Messdaten bestehen aus A-Scans einer linearen Anordnung von Sende- und Empfangsprüfköpfen, wobei jeweils ein Transducer (= vier Einzelprüfköpfe) in der Reihe sendet und die übrigen empfangen. Bei zwölf Transducern ergeben sich, durch das Durchschalten von allen Transducern als Sender und von allen restlichen als Empfängern an einer Messposition 66 A-Scans.

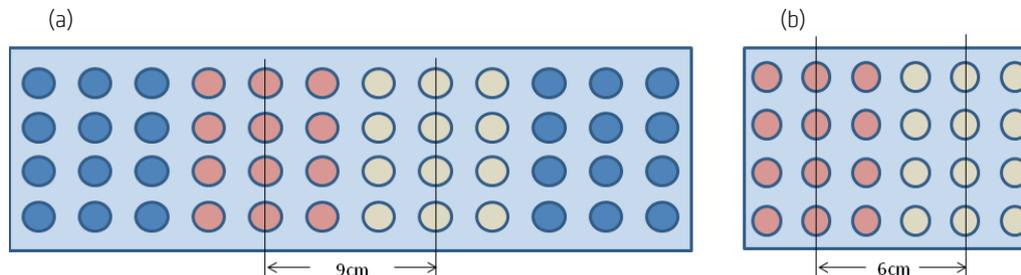


Abbildung 66: Schema der Umwandlung der Mira-Messung (A1040) zur "virtuellen" A1220-Messung (Rot: Sender, Gelb: Empfänger). (a) Bereich der Transducer im Linear Array (Mira), die rechnerisch zu einem A-Scan zusammengeführt werden, (b) Anordnung im A1220, die elektrisch zu einem A-Scan zusammen geschaltet sind.

Für die Nachauswertung wurden jeweils neun entsprechend ausgewählte Messsignale zu einem A-Scan zusammengeschaltet, sodass sich die Anordnung eines A1220 ergibt (siehe Abbildung 57). Die Unterschiede der Abstände der Prüfköpfe im Lineararray (3 cm) und im A1220 (2 cm) müssen hingenommen werden. Eine weitere Reduktion der Anzahl der verwendeten Transducer im A1040 würde zu einem zu geringen Signal-Rauschverhältnis führen. Der Vergleich der Rekonstruktion mit Originaldaten und der auf das BBSR-System reduzierten Daten zeigt, dass die B-Bilder prinzipiell die gleichen Anzeigen ergeben, wobei der oberflächennahe Bereich durch die große Integrationsfläche des A1220 nicht die Detailauflösung des Linear Arrays liefert (siehe Abbildung 66). Auch ist das Signal-Rauschverhältnis wegen der geringeren Anzahl von Messsignalen (Verhältnis 9/66) deutlich schlechter. Durch ein engeres Messraster der manuellen Messung mit dem USP-System könnte man dieses Problem aber leicht auffangen.

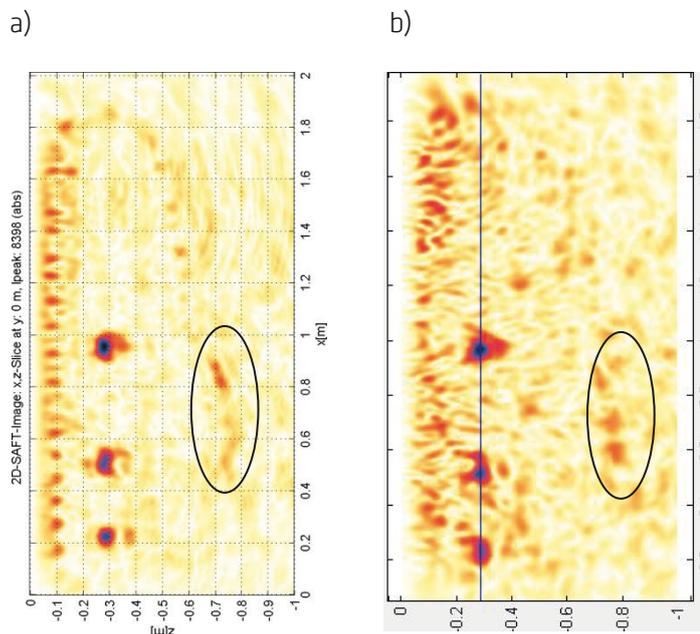


Abbildung 67: Vergleich der Rekonstruktionsergebnisse. (a) Rekonstruktion der original Linear-Array Daten mit InterSAFT (Übergangzone markiert) (Quelle: Fa. Hupfer Ingenieure), (b) Rekonstruktion der auf A1220 reduzierten Linear-Array Daten mit der SAFT-Analysis Software (Übergangzone markiert).

Aufgabenstellung 2

Bei der nachträglichen Verstärkung vorgespannter Brücken mit externen Spanngliedern ist die schadensfreie Montage der Umlenk- und Verankerungsstellen eine besondere Herausforderung. Abhängig von dem Ausnutzungsgrad der Konstruktion ist bei der Montage unter Umständen selbst die Durchtrennung von schlaffer Bewehrung zu vermeiden; in jedem Fall aber dürfen interne Spannglieder nicht beschädigt werden. Die sichere Feststellung der Lage letzterer kann beispielweise bei der Durchbohrung breiter Plattenbalken für die Quervorspannung lasteinleitender Ankerblöcke problematisch werden. Eine zuverlässige zerstörungsfreie Lageortung interner Spannglieder - z.B. mit Radar - ist nicht immer möglich, besonders, wenn diese sehr tief liegen oder durch engmaschige schlaffe Bewehrung verdeckt sind. In diesen Fällen werden üblicherweise Erkundungsbohrungen oder ähnliche Methoden angewendet, um Bewehrungstreffer zu vermeiden.

Die in einem Beitrag von S. Schulze (Fa. Hupfer Ingenieure) [11] beschriebene Lösungsvariante für derartige Fälle, die auf dem Einsatz zerstörungsfreier Ultraschallecho-Verfahren beruht wurde mit dem BBSR-Auswerteverfahren nachausgewertet und mit den dort publizierten Ergebnissen verglichen. Bei dem dargestellten Messauftrag handelte es sich um Untersuchungen an der im Jahre 2014 als erste in der Stadt Hamburg per externer Vorspannung verstärkten Brücke der A7 über die B73 in HH-Harburg. Es wurden umfangreiche Spanngliedortungen durchgeführt, welche insbesondere im Bereich der Endverankerung über den aktuellen Stand der Technik weit hinausgingen und das Potential von Ultraschallmethoden zur zerstörungsfreien Untersuchung von Bauwerken belegen.

In den der Sanierung vorangegangenen Jahren wurden Risse an den Koppelfugen festgestellt. Die daraufhin durchgeführte dreistufige Untersuchung ergab, dass die Dauerfestigkeit der Brücke nicht mehr gegeben ist und die Koppelfugen bis spätestens 2014 durch den Einbau von externen Spanngliedern zu verstärken sind.

Untersuchungsergebnisse

Auf die Details der Auswertung kann hier nicht eingegangen werden. Exemplarisch: Bei einem rechteckigen Balkenquerschnitt mit lotrecht orientierten Seitenflächen ist bei horizontal verlaufenden Spannstäben die laterale Lage der Spannglieder von Bedeutung. Die Tiefenlage dient lediglich der Identifikation der Spannglieder. Im hier vorliegenden Fall mit trapezförmigem Querschnitt und einer gegenüber der Lotrechten gekippten Messfläche kann aufgrund der horizontal, folglich nicht senkrecht auf die Bauteiloberfläche orientierten Bohrung die Tiefenlage nicht mehr vernachlässigt werden. Dies gilt insbesondere für mittig liegende Spannglieder. Die eleganteste und mutmaßlich sicherste Methode für die Überprüfung - und gegebenenfalls Korrektur - der Soll-Lage der Bohrungen, insbesondere bei Verwendbarkeit bestehender Planunterlagen, ist dann die maßstäbliche und lagetreue grafische Darstellung des bildgebenden Resultats im Plan (Abbildung 68).

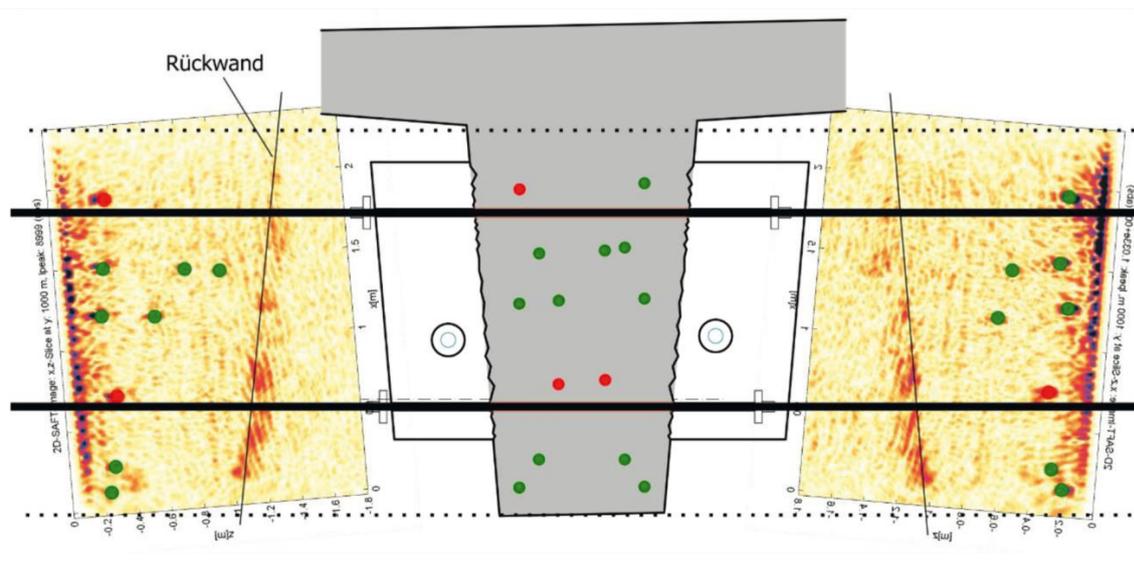


Abbildung 68: Kombination von Planunterlagen und SAFT-rekonstruierte Messdaten. Auswertung mit Bewertung der Spanngliedlagen an einem Endverankerungsbereich [11]

Die rekonstruierten Schnitte wurden in den Messbereich eingepasst und entsprechend geneigt, so dass die Lage der detektierten Spannglieder mit den Soll-Lagen gemäß Bestandsplänen abgeglichen werden konnte und die ortsgenaue Projektion der Soll-Bohrachse auf der Rekonstruktion möglich wurde.

Nachauswertung und Ergebnisvergleich

Verglichen wurde der Datensatz NWW2ELT A, der als Mira Linear-Array-Scan mit einer Schrittweite von 2 cm vorlag (Abbildung 69). Die Daten wurden nach dem bereits oben beschriebenen Verfahren zu Quasi-A1220 Daten konvertiert und mit SAFT-Analysis2 rekonstruiert. Wie auch bei den vorherigen Daten schon erkennbar, sind die Daten des vollen Linear-Arrays deutlich rauschärmer als die extrahierten Daten im Quasi-A1220 Format (nur 9 von 66 A-Scans pro Position) und die Auflösung im Nahbereich geht verloren. Die äußeren Hüllrohre sind vergleichsweise gut zu erkennen, wohingegen die weiter im Innern liegenden Hüllrohre nur noch schwer vom Rauschen zu trennen sind. Das Auflösungsvermögen bleibt aber aufgrund des recht dichten Messrasters erhalten. Durch eine zweite und dritte Messlinie in der Nachbarschaft könnte durch die einfache Handhabung des manuellen Systems das Signal-Rausch-Verhältnis sicher verbessert werden, da der SAFT Algorithmus eine ortsgenaue Mittelung aller vorliegenden Messdaten -auch von parallelen Spuren - durchführt.

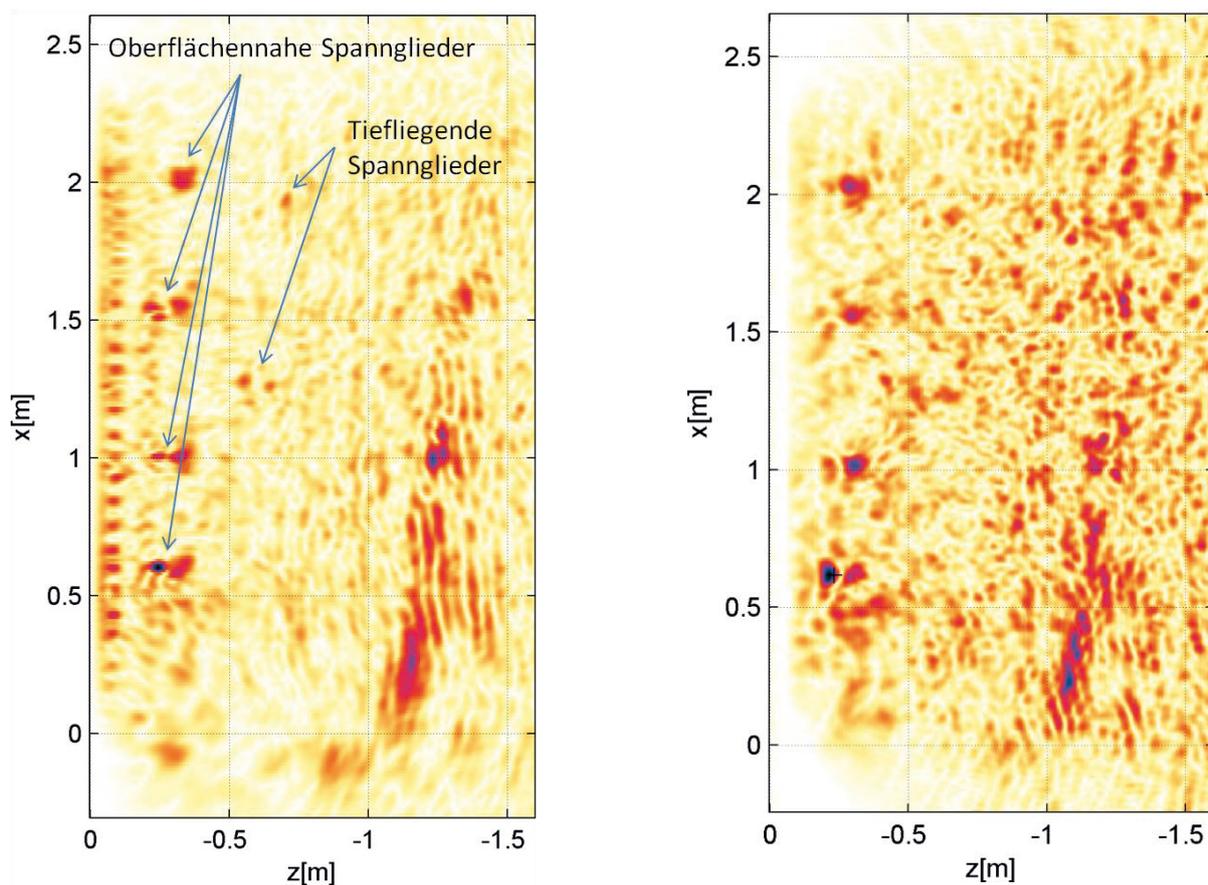


Abbildung 69: Vergleich der InterSAFT-Rekonstruktion von Linear-Array-Messungen (links) mit der Quasi-A1220-Messung und der BBSR-SAFT-Analysis2 Software (rechts).

7.2 Ergebnisse mit Daten

Von der Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH wurden im Rahmen des Projektes Messungen an verschiedenen Objekten durchgeführt und mit der im Rahmen des Vorhabens entwickelten Software ausgewertet.

Objekt	Messaufgabe
Spannbetonbrücke	Dicht bewehrte Brücke mit Verdacht auf Verpressfehler
Tunnel	Stark bewehrt, 3 Spannglieder mit Verdacht auf Verpressfehler
Windkraftanlage	Zustand Spannglieder, stark bewehrt

Exemplarisch wird hier die Auswertung an Testaufbauten zur Spanngliederproblematik an Windkraftanlagen mit Beton vorgestellt. Messungen wurden von der Fa. Schiessl mit einem A1220 Punktkontaktprüfkopf als Linienmessungen an drei verschiedenen Hüllrohrszenarien durchgeführt. An den gleichen Prüfkörpern wurden von der BAM Linear-Array Messungen mit dem Linearen Array Mira A1040 aufgenommen, sodass ein direkter Vergleich möglich sein könnte.

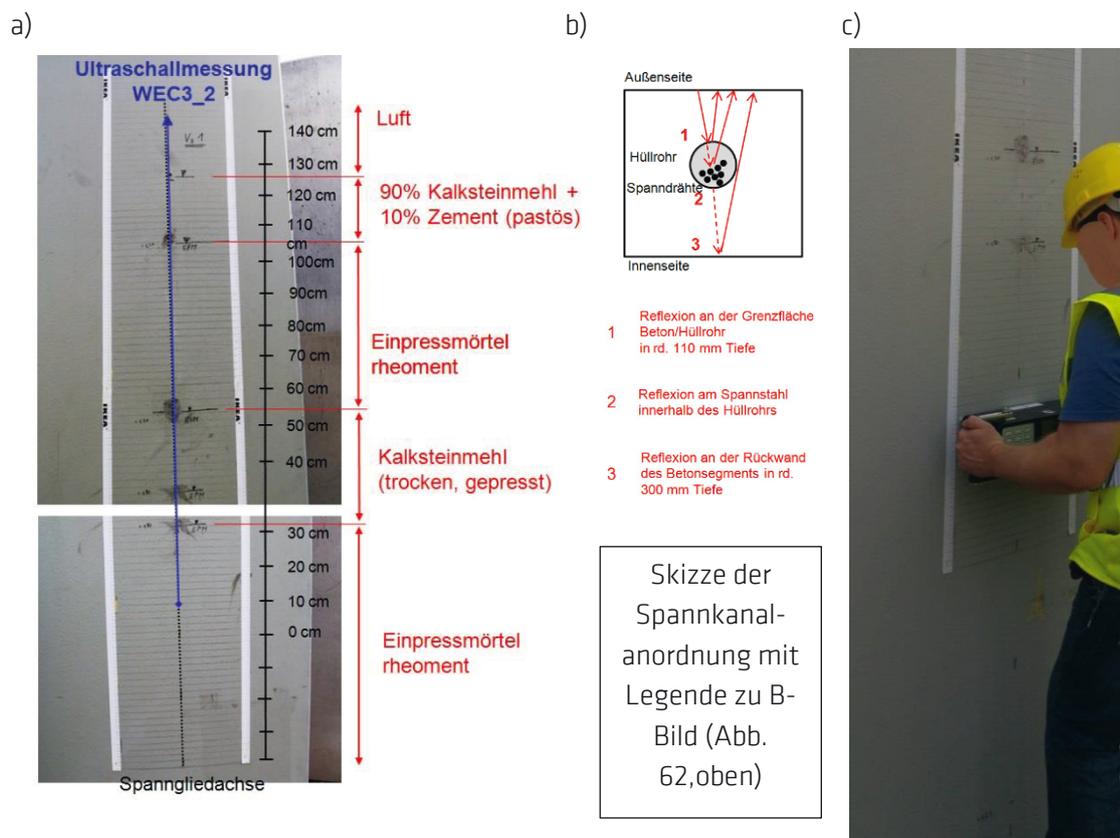


Abbildung 70: Links Fotomontage der Messfläche über Spannkanaal mit verschiedenen Füllungen. Die Höhenangaben im Bild beziehen sich auf die Schiessl Messungen. Rechts: Messung mit Linear-Array (Mira) an Segmentwand

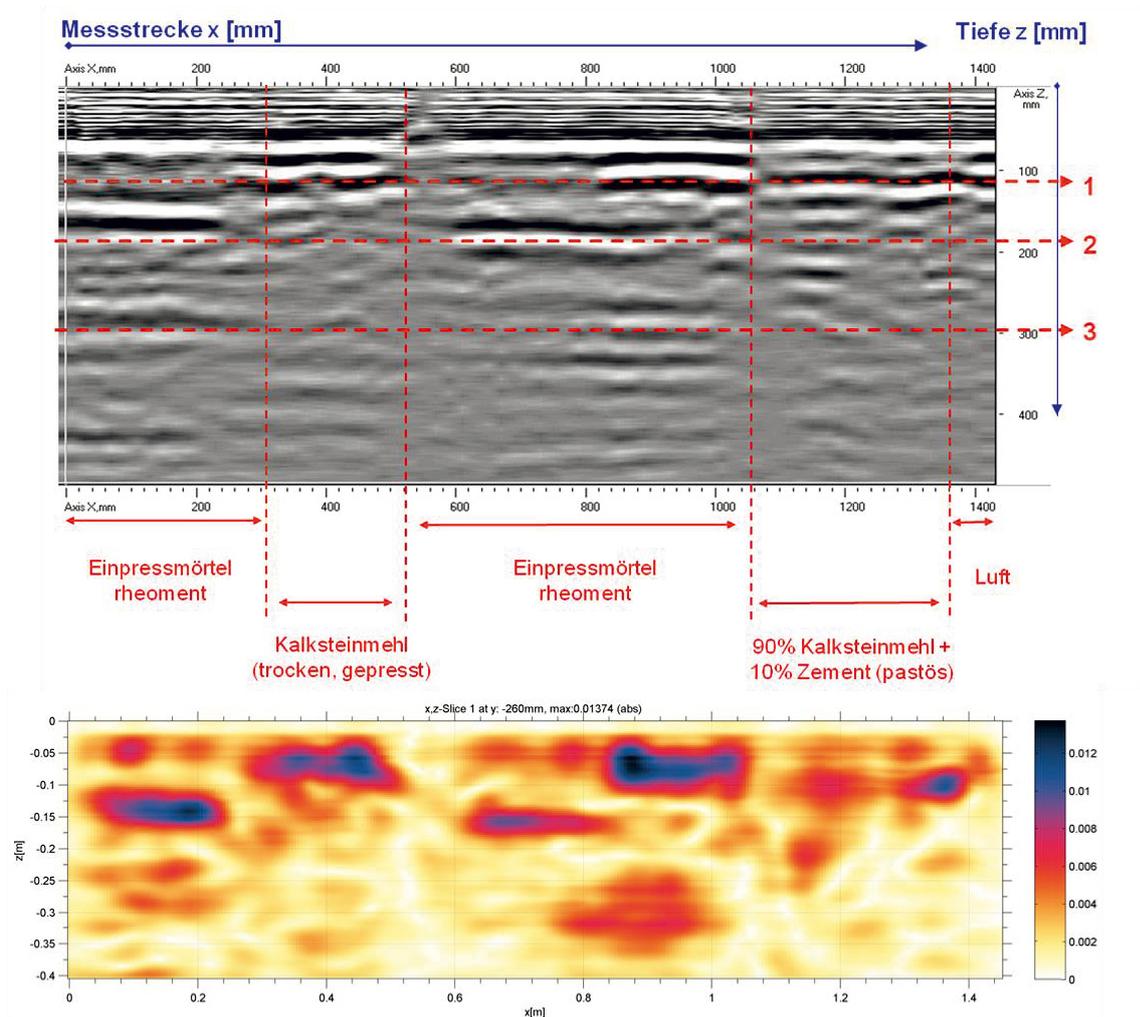


Abbildung 71: Oben: Messdaten einer Handmessung der Fa. Schiessl als interpoliertes B-Bild mit Tiefenangaben der Streuanzeigen. Unten: Rekonstruktion der Schiessl-Messdaten mit BBSR-SAFT-Analysis2 Software mit Bildung der Einhüllenden.

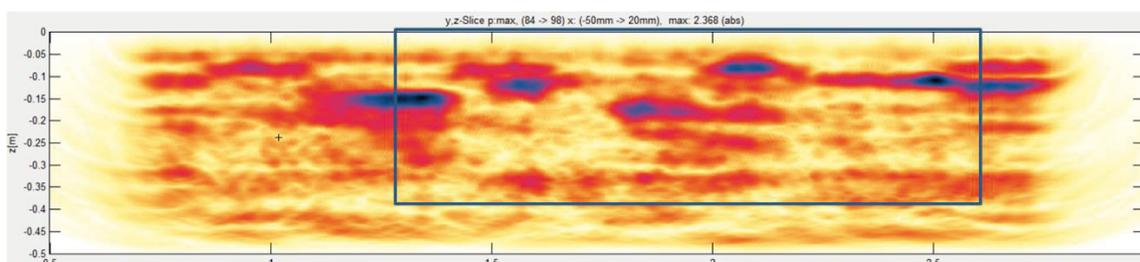


Abbildung 72: B-Bild einer 3D Rekonstruktion mit InterSAFT von Mira Linear-Array Daten der BAM am gleichen Testobjekt. Größerer Messbereich als die Schiessl-Messung, der Ausschnitt ist markiert. (Die Koordinatengabe bezieht sich auf die Höhenangabe vom Boden aus.)

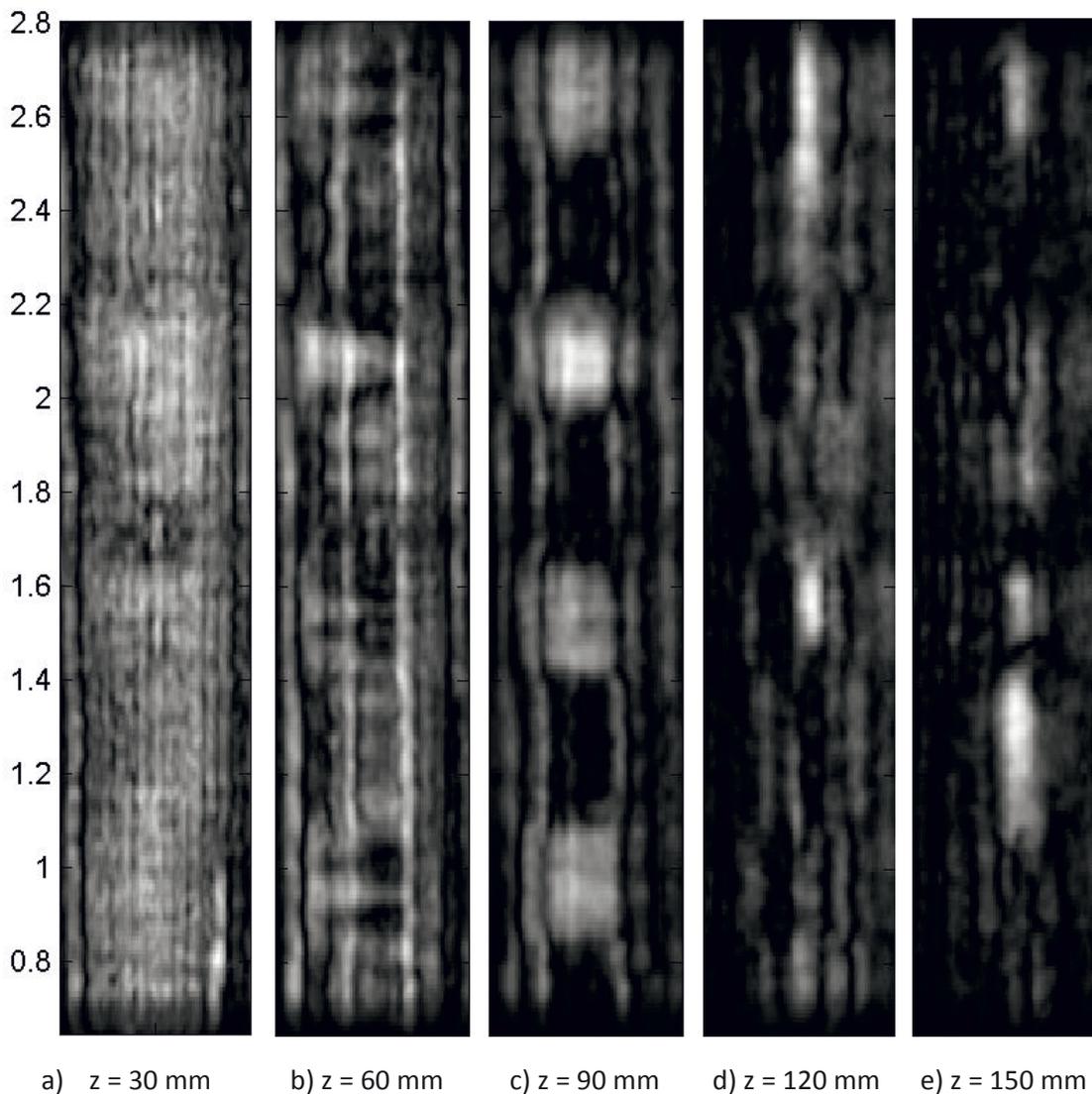


Abbildung 73: Tiefenschnitte (C-Bilder) der 3D Rekonstruktion mit Mira-Messdaten der BAM

Abbildung 70 links zeigt ein Foto des Testobjekts. Eine Teilfläche der Säule (Turm) eines Windrads, die aus mehreren Teilflächen zu einem konischen Zylinder zusammengebaut wird. Der Turm ist durch ein enges Raster von Spanngliedern vorgespannt, deren Integrität durch eine zerstörungsfreie Ultraschallprüfung festgestellt werden soll. Das Testobjekt wurde hergestellt, um verschiedene Szenarien zu realisieren und beinhaltet Spannkanäle mit unterschiedlicher Verfüllung (siehe Abbildung 70 links).

Abbildung 73 zeigt, dass die Messung nur entlang einer Linie über dem Hüllrohr problematisch ist. Die Tiefenstruktur des Objekts ist sehr komplex, es gibt wiederverfüllte Bohrungen (Abbildung 73 a) $z = 30 \text{ mm}$ bei $y = 1,7 \text{ m}$), es gibt Bewehrungsseisen (Abbildung 73 b) $z = 60 \text{ mm}$), es gibt flächige Reflektoren, deren Transparenz für Ultraschall noch nicht bekannt ist (Abbildung 73 c), $z = 90 \text{ mm}$) und es gibt den Spannkanal (Abbildung 73 d), $z = 120 \text{ mm}$ und e) $z = 150 \text{ mm}$)



= 150 mm), der durch die unterschiedliche Füllung in unterschiedlicher Tiefe reflektiert. Der unverfüllte Bereich reflektiert an der dem Schallfeld zugewandten Seite (Abbildung 73 d) bei 1,6 m und 2,6 m) wohingegen der verfüllte Bereich den Schall eindringen lässt und unscharf im Innern des Spannkanales bis hin zur Rückseite des Spannkanales reflektiert (Abbildung 73 e) bei 1,2 m. Durch die große Ausdehnung des A1220 Prüfkopfes ist bereits ein stark integrierendes Verhalten vorhanden, wodurch es zu einer Strahlfokussierung und einer flächigen Mittelung des Nahbereichs kommt. Daher ist ein Vergleich der Ergebnisse (Abbildung 72) der beiden Messarten möglich. Es sei noch darauf hingewiesen, dass die Verfüllzustände der Bereich $e < 30$ cm und 55-105 cm (Skala laut Schiessl Messung) zwar beide mit Einpressmörtel angegeben sind, der 2. Bereich jedoch etwas tiefer angezeigt wird und auch die Analyse der Phasenlage im Maximum ist deutlich unterschiedlich (im B-Bild Abbildung 72 oben erkennbar), sodass auf eine unterschiedliche innere Struktur geschlossen werden muss.

8 Zusammenfassung und Ausblick

Die Arbeiten und Ergebnisse im vom BBSR geförderten Projekt „Sicherstellung der Ausführungsqualität an Neu- und Bestandsbauten aus Beton durch innovative zerstörungsfreie Prüfung“ konzentrieren sich auf die Weiterentwicklung der bildgebenden Ultraschallprüfung. Die Ergebnisse lassen sich in drei Abschnitte gliedern und zusammenfassen.

1 Ultraschallecho mit automatischer Positionserfassung und Bildgebung (Basissystem)

- Entwicklung und Bau eines Positionserfassungssystems für händische Ultraschallecho-Messungen mit Rekonstruktionsrechnung, bei der die jeweils aktuelle Position des Prüfkopfes erfasst und zusammen mit der dazugehörigen Ultraschallzeitkurve (A-Bild) dem Auswertesystem zur Verfügung gestellt wird (für Experimente in der Prüfhalle)

Als Positionserfassungssystem dient ein Seilzug mit zwei Winkelencodern. Aus diesen Elementen entsteht ein Messsystem, das bis zu einem Abstand von ca. 2 Metern von einer Basisstation die jeweils aktuelle Position relativ zu einem eingemessenen Bezugspunkt in Polarkoordinaten ermittelt und dem Auswertesystem in kartesischen Koordinaten zur Verfügung stellt. Dabei wird sowohl der Ort des Prüfkopfes als auch die Orientierung (Winkelausrichtung) des Prüfkopfes erfasst. Dies ist wichtig für die Kontrolle der Polarisierung von Scherwellen-Prüfköpfen.

In der ersten Arbeitsgruppensitzung wird dieses System zur weiteren Anwendung im Rahmen des Vorhabens empfohlen, auch wenn erwartungsgemäß ein Seilzugsystem noch nicht das Optimum darstellt. Im Vordergrund steht die Entwicklung und Optimierung des Gesamtsystems und nicht die Suche nach der besten Positionserfassung. Es stellte sich außerdem im Laufe der Entwicklung heraus, dass die Winkeltreue des Positionserfassungssystems nicht für alle Winkel und Entfernungen zuverlässig funktioniert. Mit Berücksichtigung dieser Tatsache stellt das aber bei Beachtung der Randbedingungen für die Labormessungen keine Einschränkung dar.



Für eine Ultraschallanalyse wird das System händisch über die Betonoberfläche eines interessierenden Bauteilabschnittes geführt und punktweise eine Messung ausgelöst. Das Auswertesystem ermittelt mit einer Rekonstruktionsrechnung die im Volumen enthaltenen Reflektoren und stellt die Ergebnisse in geeigneten Schnitten am Auswerterechner unmittelbar dar. Für diese Berechnung wurde das Prinzip der SAFT-Rekonstruktion im Rahmen der Forschungsarbeiten für die Verarbeitung von beliebig verteilten Messpunkten ertüchtigt (ein äquidistantes Raster ist nicht erforderlich). Außerdem wird optional eine 1D Signalanalyse der Einzelmessung durchgeführt, mit dem Ziel flächige Streuer von punktförmigen oder regional begrenzten Streuvorgängen zu trennen, da diese Information wichtige Parameter für die nachfolgende SAFT-Rekonstruktion liefert. Das Ergebnis eines jeden Messpunktes wird nach und nach dem Ergebnis der bereits vorhandenen Messpunkte hinzugefügt und kann online auf einem Monitor verfolgt werden. Durch sukzessive Messungen kann die Messung gezielt so lange verbessert werden, bis ein Aussage-Optimum erreicht ist. Um die Aussagefähigkeit der bereits gemessenen Daten zu charakterisieren wird parallel zur Rekonstruktion der Messdaten ein synthetischer Datensatz (Referenzdaten) generiert, der Signale von fiktiven Streuobjekten in dem zu untersuchenden Messgebiet an den durch die Messung vorgegebenen Positionen simuliert. Die Rekonstruktion dieser Daten wird mit den gleichen Rekonstruktions- und Darstellungsparametern optional angezeigt, sodass der Operateur ein Maß für die geometrischen Artefakte bekommen kann, die durch ein zu weites oder nicht optimales Messraster zwangsläufig entstehen müssen.

Die prinzipielle Funktionsweise wird an Probekörpern mit bekanntem Aufbau in der Versuchshalle optimiert und erfolgreich demonstriert. Die Komponenten funktionieren im Zusammenspiel und die Online-Auswertung wird parallel zu den Messungen angezeigt.

Ein wichtiger Aspekt für die Leistungsfähigkeit des entwickelten Messsystems ist es, eine Messstrategie für verschiedene Fragestellungen und Prüfaufgaben zu entwickeln. Um verschiedene Messansätze (Messlinien, Punktwolken, verschiedenen Messpunktdichten) schnell vergleichen zu können, wird die Methode der virtuellen Messung mit hinterlegten Daten zur Verfügung gestellt. Dabei können mit der bildgebenden Auswertung (SAFT-Analysis) am Bildschirm beliebige Messpunkte von mit einem Baustellenscanner aufgenommenen Datensätzen „gepickt“ und damit verschiedene Messungen „simuliert“ werden (abgekürzt auch *virtualisierte Messung* genannt). Wenn also von einem zu untersuchenden Probekörper oder Bauteil die äquidistant aufgenommenen Echodaten vorliegen, können so verschiedene Messstrategien wesentlich effektiver durchgespielt und verglichen werden, als mit direkten Messungen am Bauteil.

Zudem eröffnet dies die Möglichkeit, das neue Messsystem für reale baupraktischen Fragestellungen zu testen, die bereits zu einem früheren Zeitpunkt vor Entwicklung der automatischen Positionserfassung aufgenommen worden waren.



2 Baustellentaugliches Messsystem

- Entwicklung und Bau einer baustellentauglichen Apparatur zur Weiterentwicklung und für Anwendungstests
- Technisches Design für einen ergonomischen Handscanner (Entwurf)

Um die Messungen zu beschleunigen und das System praxistauglicher zu gestalten, wurde in Zusammenarbeit mit einem Projektpartner ein robustes, spritzwassergeschütztes Gehäuse entwickelt, das zudem deutlich schneller betriebsbereit aufgebaut werden kann als die Laborapparatur. Damit wurden die wesentlichen Messungen an praxisrelevanten Probekörpern und Bauteilen erfolgreich durchgeführt.

Auf Initiative eines Experten der begleitenden Arbeitsgruppe wurden im Fachgebiet Industriedesign der Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) im Rahmen einer Bachelorarbeit der Handscanner und die Basisstation unter technischen, ergonomischen und konstruktiven Aspekten analysiert und designt. Dies eröffnet ein Weiterentwicklungspotenzial für zukünftige Anwendungen des Systems.

3 Messungen an praxisrelevanten Bauteilen und Bauwerken

- Anwendung an ingenieurtypischen Fragestellungen zur Ortung und dem Zustand von Bewehrung, Spanngliedern und Ermittlung der Bauteilgeometrie
- Bewertung der Ergebnisse

Die von den beteiligten Ingenieurbüros eingebrachten Fragestellungen beziehen sich auf die Ortung und den Zustand von Bewehrung, Spanngliedern und die Bauteilgeometrie.

Mit der Methode der virtualisierten Messung auf der Basis hinterlegter äquidistant gemessener Datensätze lässt sich das neu entwickelte Mess- und Auswertesystem auch ohne direkte Messung am Bauwerk bewerten, wenn eine Messung mit gleichmäßigem Raster vorliegt. Die Daten müssen dafür nicht zwangsläufig von einer Scannermessung stammen, sondern können auch mit sorgfältig durchgeführten Handmessungen (A1220-Püfkopf oder Linear Array (kommerziell verfügbares Gerät *Mira*)) gewonnen werden. Die grundsätzliche Eignung dieser Vorgehensweise wird durch die Forschungsarbeiten bestätigt.

Mit dem neu entwickelten Mess- und Auswertesystem werden die deutlichsten Ergebnisse für die Ortung von Hüllrohren erzielt. Dies gelingt für Bewehrungsraster bis 15 cm eindeutig. Für Bewehrungsraster um 12 cm und weniger lassen sich aus den bisher vorliegenden Ergebnissen noch keine quantifizierbaren Ergebnisse ableiten.

Die verifizierte Ortung von Auffälligkeiten in Hüllrohren wurde bisher an Probekörpern untersucht. Verpressfehler (Lufteinschlüsse in Richtung der Messfläche) lassen sich am Intensitätsunterschied der Reflexion feststellen. Die Phasenauswertung ist in dem



Auswerteprogramm implementiert und wurde für einige Beispiele angewendet, war aber nicht vorwiegendes Ziel in diesem Vorhaben.

Zur Untersuchung der Detektion und Ortungsgenauigkeit von kleineren Test-Reflektoren liegen systematische Messungen an entsprechenden Probekörpern vor. Kugeln im Durchmesser von 120 mm lassen sich bis bei einem Bewehrungsraster von 150 mm präzise lokalisieren. Mit Linienmessungen lässt sich die Krümmung der Oberfläche abbilden. Für den Durchmesser von 80 mm gelingt mithilfe der Aufnahme von Punktwolken ebenfalls eine genaue Ortung.

Für die komplexe Fragestellung von Auffälligkeiten an der Rückseite von verpressten Hüllrohren in Probekörpern wurden teilweise eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Wie gut sich solche Ergebnisse an unbekanntem Objekten reproduzieren lassen, bleibt zukünftigen Studien überlassen.

Für die Ortung von bekannten Fehlstellen, z. B. an der Rückseite von verpressten Hüllrohren, wurden teilweise eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Inwieweit diese Resultate zu verallgemeinern sind, werden zukünftige Ergebnisse zeigen.

Aus der praktischen Arbeit der beteiligten Ingenieurbüros wurden Fragestellungen wie die Kontrolle und Planungen von Verstärkungsmaßnahmen an Spannbetonbrücken sowie Zustandsuntersuchungen an Spanngliedern z.B. an Spannbetonbrücken, Windkraftanlagen eingebracht und erfolgreich bearbeitet.

4 Fazit

Mit der Automatischen Positionserfassung und Online Rekonstruktion steht nun ein System zur Verfügung, das für Flächenbereiche in der Größenordnung von einem Quadratmeter zuverlässige Ergebnisse vor Ort liefert und für einen großen Teil der baupraktischen Fragen geeignet ist. Da es sich um eine Entwicklungsarbeit mit ersten Anwendungen handelte, können konkrete Angaben zum Verhältnis von Nutzen zu Aufwand erst in nachfolgenden Studien ermittelt werden.

Für die komplexe Fragestellung von Auffälligkeiten an der Rückseite von verpressten Hüllrohren in Probekörpern wurden teilweise eindrucksvolle Ergebnisse erzielt. Für die Ortung von bekannten Fehlstellen, z. B. auch an der Rückseite von verpressten Hüllrohren, wurden ebenfalls wegweisende Ergebnisse erzielt. Wie gut sich solche Ergebnisse an unbekanntem Objekten reproduzieren lassen, bleibt zukünftigen Studien überlassen.

Eine häufige Fragestellung in der Baupraxis ist die Ermittlung der genauen Position von Spanngliedern. Hier ist der Aufwand der bildgebenden Rekonstruktionsrechnung gemäß Aussage der Projektpartner in den meisten Fällen nicht erforderlich, da die Linienführung der Spannglieder in einer Konstruktion durch Bauexperten auch ohne exakte Pläne angegeben werden kann. In der Regel ist zu erwarten, dass es dann ausreicht, mit den einfachen Handgeräten mit wenigen Linienmessung (B-Bildanzeige am Display) die genaue Position zu ermitteln.



Bei sehr dichter Bewehrung (Raster kleiner als 100 mm, Bewehrungsdurchmesser größer 25 mm und/oder zusätzlicher Bügelbewehrung sollte diese Aussage mit entsprechende Studien noch überprüft werden. Außerdem könnte das neue System eventuell sinnvoll für die Protokollierung eingesetzt werden.

Nutzung des Systems für Potenzielle Anwender

Die Software SAFT-Analysis wird über einen Link auf den Web-Seiten des Fachgebiets Computational Electronics and Photonics (CEP) an der Universität Kassel zur Verfügung gestellt (<http://www.uni-kassel.de/eecs/fachgebiete/cep/research/projects.html>). Aus patentrechtlichen Gründen ist in dieser Version die Phasenanalyse nicht enthalten. Um Rückmeldungen und Feed-back wird gebeten.

Ausblick

Wie beschrieben, hatten die Forschungsarbeiten nicht zu Aufgabe, ein optimales Positioniersystem zu finden, sondern die Idee der online-Bildauswertung mit einem handgeführten Ultraschallgerät in einer baustellentauglichen Version zu realisieren und an Probekörpern und in der Praxis anzuwenden und zu bewerten.

Die Erfahrungen zeigen, dass das Seilzugsystem in der realisierten Art noch nicht optimal ist. Es ist zu erwarten, dass das System bei einem Aufbau mit zwei Seilzügen und entsprechender Koordinatenermittlung insgesamt genauer arbeiten würde.

Für eine praxisgerechte Weiterentwicklung sollten aber auch andere Positioniermöglichkeiten in Betracht gezogen werden wie z.B. Laser-Distanzmessung, digitale Bilderfassung oder Sensor-tracking.

Das entwickelte Rekonstruktionsprogramm SAFT-Analysis bietet die Option, einer Phasenanalyse zur Unterscheidung von schallharten und schallweichen Reflektoren, ebenso wie das Programmpaket InterSAFT. Diese Möglichkeit konnte im vorliegenden Projekt erst ansatzweise getestet werden. Eine fundierte Fortführung dieser sicherheitsrelevanten Fragestellung an Spannbetonkonstruktionen ist ein wichtiger Aspekt für die Fortführung der im vorliegenden Projekt begonnenen Ansätze.

Die Beachtung ergonomischer Kriterien, wie sie in dem im Rahmen des Vorhabens realisierten Modells aufgezeigt wurden, weist den Weg für eine wirklich praxistaugliche Apparatur. Es ist zu wünschen, dass die Ergebnisse der vorliegenden Forschungsarbeit eine Anregung dazu geben. Über die Offenlegung der Software und die existierenden Kontaktadressen ist die Grundlage dafür gelegt.



9 Danksagung

Die Autoren danken allen an diesem Vorhaben beteiligten Personen für ihre engagierte Mitarbeit.

Die offenen Diskussionen und Anregungen in der begleitenden Arbeitsgruppe mit den Förderern, den Experten Prof. Dr. A. Taffe und Dr. J. Kurz und dem Fachbetreuer M.S. F. Brodbeck haben entscheidend dazu beigetragen, die Entwicklungs- und Messaufgaben auf einen realistischen Weg zu führen.

Prof. Dr. Chr. Sodeikat (Ingenieurbüro Schießl, Gehlen, Sodeikat) und Dr. S. Schulze (Hupfer Ingenieure) haben zur zielgerechten Planung der Entwicklungs- und Messaufgaben wesentlich beigetragen und den jeweiligen Entwicklungsstand kritisch begleitet und praxisorientiert eingesetzt.

J. Vohr (Neobotix) hat die baustellentaugliche Version der Apparatur entworfen.

In der BAM haben J. Thierling als Studentische Hilfskraft, B. Milmann, J. Wöstmann, Dr. U. Effner und K. Borchardt und an den vielfältigen Experimenten, Auswertungen und der Berichtslegung mitgewirkt. M. Behrens hat maßgeblich an den verschiedenen Versionen der neu zu entwickelnden Messstation und der Prüfkopfhalterung gearbeitet. In Anschluss an das Forschungsvorhaben hat J. Thierling zu dem an der HTW eine Bachelorarbeit begonnen.

In einer begleitenden Masterarbeit im Fach Industriedesign von C. Lotz an der HTW im Fachgebiet Industrial Design (Leitung Prof. J. Vietze), mitbetreut von Dr. St. Maack (BAM 8.2), wurde die Vision eines baustellengeeigneten Messgerätes unter ergonomischen Aspekten quasi greifbar.

Die experimentellen Arbeiten an Probekörpern erfolgten im Fachbereich 8.2 der BAM. Allen beteiligten hier nicht namentlich genannten Mitarbeitern sei für die Unterstützung gedankt.

Nicht zuletzt danken wir dem BBSR für die Förderung des Vorhabens und die engagierte kooperative Fachbetreuung von M. S. F. Brodbeck (IRB).

10 Literatur

- [1] Krause, M., Borchardt, K., Lange, M., Behrens, M., Maack, S., Mielentz, F., Milmann, B., Schaurich, D., Wöstmann, J., Hintzpeter, F., Sodeikat, Ch.: Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand. Bauforschung für die Praxis, Band 101, Stuttgart: Fraunhofer IRB Verlag (2011), 95 Seiten.
- [2] Reinhardt, H.-W. et al: Echo-Verfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Bergmeister, K. und J.-D. Wörner (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten - Flächentragwerke, Berlin: Ernst & Sohn, 96 (2007) Kapitel V, Bd. 1, S. 479-595.



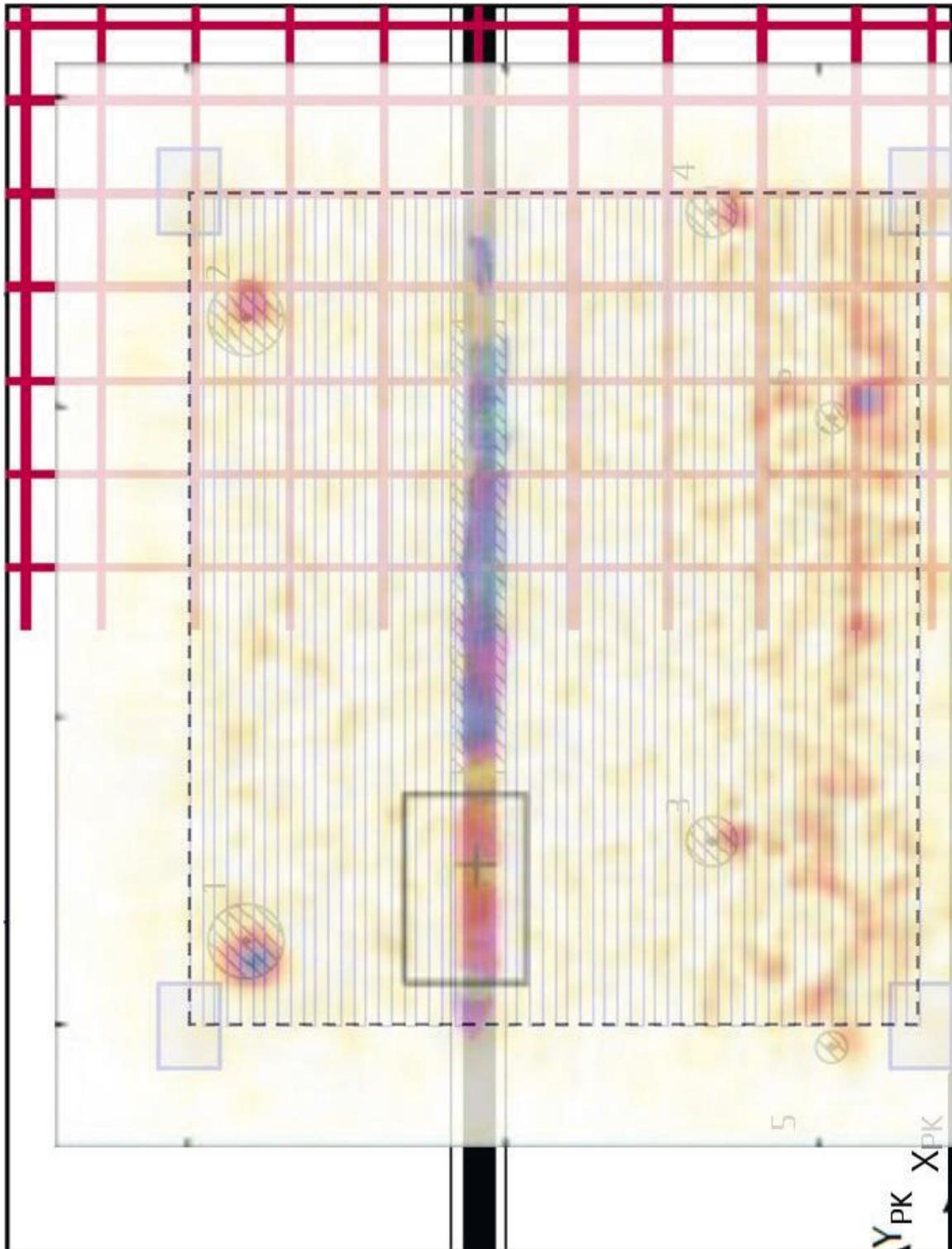
- [3] Krause, M., Milmann, B., Schickert, M. and K. Mayer: Investigation of Tendon Ducts by Means of Ultrasonic Echo Methods: A Comparative Study. In: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, Tu.3.2.1.
- [4] Krause, M.: Localization of grouting faults in post tensioned concrete structures. In: Breyse, D. (ed.); Non-Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Limits of Single and Combined Techniques. State-of-the-Art Report of the RILEM Technical Committee 207-INR, Springer (2012) Chap. 6, pp. 263-304.
- [5] Krause, M., Mayer, K., Friese, M., Milmann, B., Mielentz, F. and G. Ballier: Progress in ultrasonic tendon duct imaging. European Journal of Environmental and Civil Engineering, Vol. 15 (2011) 4, p. 461-485.
- [6] http://www.leica-geosystems.de/de/Totalstationen-TPS_4207.htm
- [7] Schickert, M., Krause, M., Müller, W.: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique. Journal of Materials in Civil Engineering (JMCE), vol. 15 no. 3, 2003, p. 235-246.
- [8] Mayer, K., Ibrahim, M., Krause, M. and M. Schubert: Requirements for a Small Size Ultrasonic Imaging System for Inspection of Concrete Elements. In: Proceedings of the 19th WCNDT 2016, 13.-17.06.2016, München, Germany.
- [9] Demirli, R., Saniie, J.: Model-based estimation of ultrasonic echoes. Part I: Analysis and algorithms. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 48 (2001) 3, pp. 787-802. doi:10.1109/58.920713.
- [10] Lotz, C.: Design eines Handscangerätes im zerstörungsfreien Prüfverfahren, Bachelorarbeit in Kooperation zwischen Hochschule für Technik und Wirtschaft (Berlin) und Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (Berlin), März 2017
- [11] Schulze, S.: Einsatz von Ultraschallecho zur Spanngliedortung bei der Verstärkung von Brückenbauwerken. Beton- und Stahlbau 110 (2015), H. 8, S. 521 ff.
- [12] Krause, M., Behrens, M., Lange, M., Maack, S., Milmann, B., Wöstmann, J. und F. Hintzpeter: Bildgebende Ortung von Ablösungen in mehrschichtigen Betonbauteilen mit dem Ultraschallecho-Verfahren. In: DGZfP (Hrsg.); Tagungsband zur Fachtagung Bauwerksdiagnose, 18.-19. Februar 2010, Berlin, BB 121-CD, Poster 10.
- [13] Krause, M., Mayer, K., Ballier, G., Friese, M., Mielentz, F. und B. Milmann: Darstellung des Verpresszustandes von Spannkälen mit 3D-Ultraschallechoverfahren: Modellierung und Experiment. In: Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2010, Erfurt, 10.-12. Mai 2010, BB 122-CD, Vortrag Mi.3.B.1, 12 Seiten.
- [14] Krautkrämer, J. und H. Krautkrämer: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Seite 33f, 1986.
- [15] Langenberg, K.-J., Marklein, R. und K. Mayer: Theoretische Grundlagen der zerstörungsfreien Materialprüfung mit Ultraschall. DGZfP (Hrsg.), Oldenburg, 2009.
- [16] Maack, St.: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen. BAM-Dissertationsreihe, Band 95, Berlin 2012.



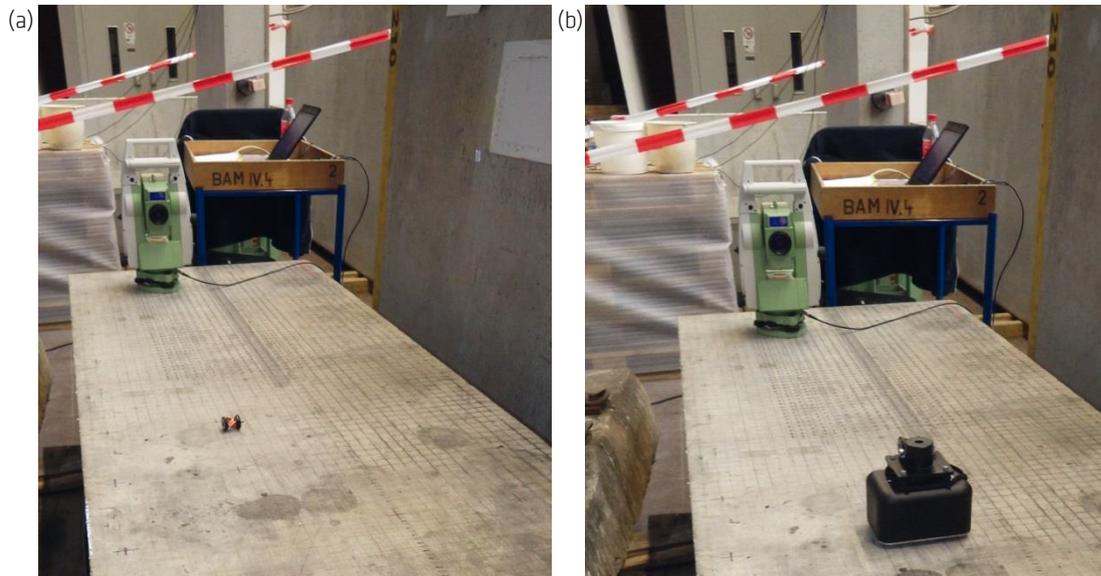
- [17] Krause, M., Borchardt, K., Lange, M., Behrens, M., Maack, St., Mielentz, F., Milmann, B., Schaurich, D., Wöstmann, J., Hintzpeter, F. und C. Sodeikat: Kosteneinsparung durch Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbauteile beim Bauen im Bestand. Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, F 2561 Bau- und Wohnforschung, (2010).
- [18] ACSYS Acoustic Control Systems Ltd., <http://www.acsys.ru>.
- [19] Kozlov, V.N., Samokrutov, A.A. and V.G. Shevaldykin (2006): Ultrasonic Equipment for Evaluation of Concrete Structures Based on Transducers with Dry Point Contact. In: Al-Quadi, I. and G. Washer (eds.); Proceedings of the NDE Conference on Civil Engineering, St. Louis, USA, 2006.
- [20] Mayer, K.: Programmentwicklung InterSAFT im Auftrag der BAM, seit 2008.
- [21] Peacock, K. L. and S. Treitel: Predictive deconvolution: Theory and Practice. Geophysics 34 (1969) 2, pp. 155-169. doi:10.1190/1.1440003.
- [22] Wang, R. J.: Adaptive predictive deconvolution of seismic data. Geophysical Prospecting 25 (1977) 2, pp. 342-381. doi: 10.1111/j.1365-2478.1977.tb01174.x.
- [23] Demirli, R., Saniie, J.: Model-based estimation of ultrasonic echoes. Part II: Nondestructive Evaluation applications. IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control, 48 (2001) 3, pp. 803-811. doi:10.1109/58.920714.

11 Anhang

11.1 Ergebnisse FBS1 im Maßstab 1:10

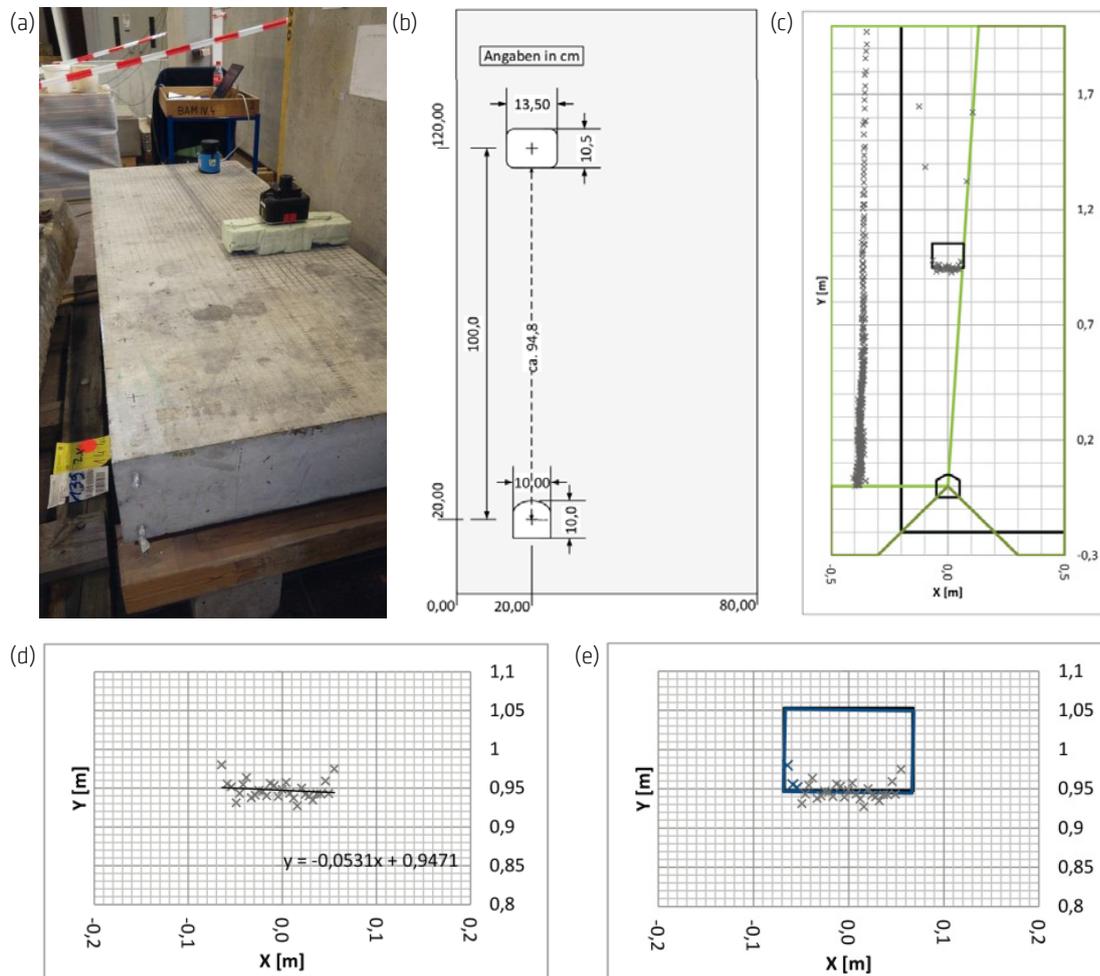


11.2 Positionserfassungssysteme



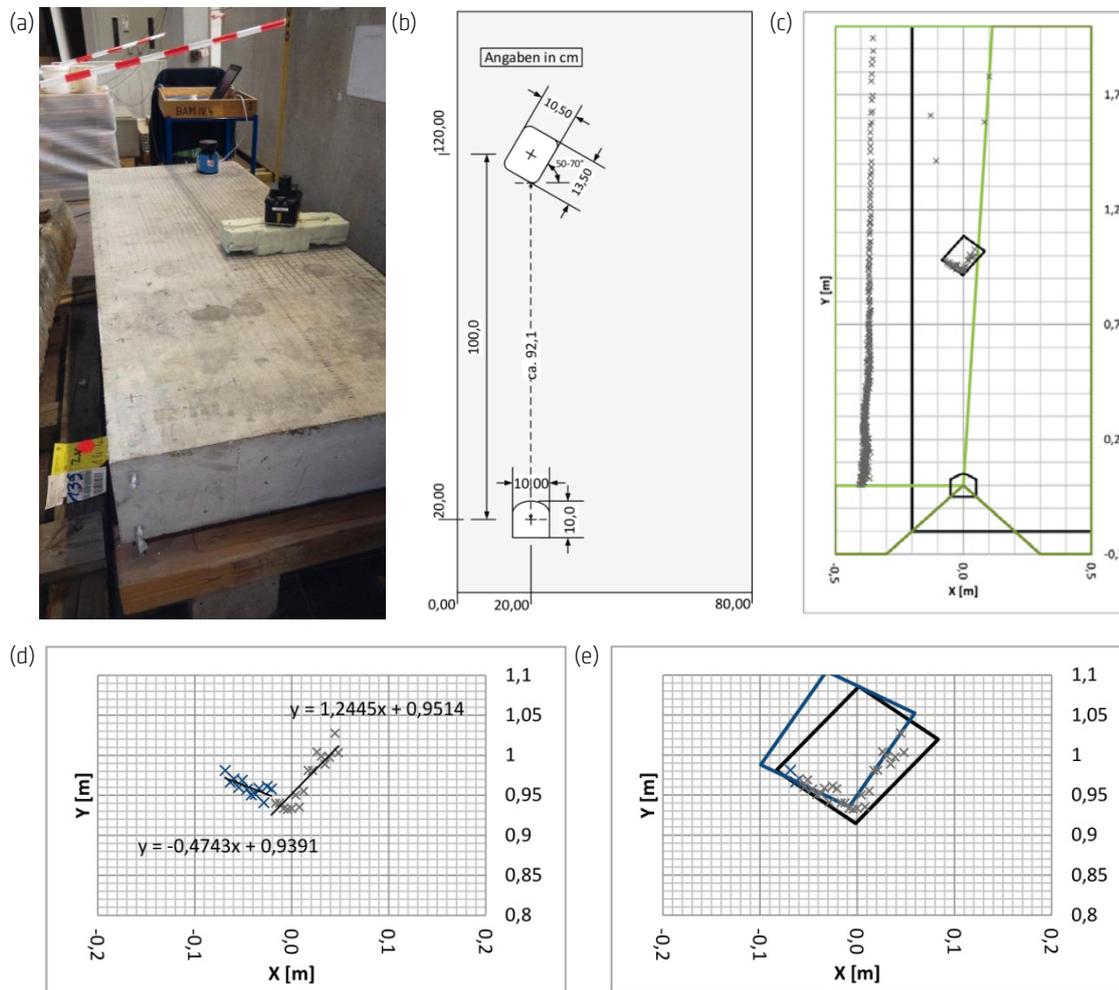
- (c) – laserbasierte Abstandsmessung
– reflektorlos oder Prisma
– automatische Prismensuche und -verfolgung
– hohe Reichweite: >100m
– Mindestabstand: 1,5 - 5m
– Messzeit: 3 -4s
– 3D-Positionsdaten
– sehr teuer

Abbildung 74: Testmessung zur Erprobung eines Tachymeters zur Positionserfassung. Tachymeter TPS 1203+ mit Fokussierung auf (a) Miniprisma, (b) Prüfkopf mit Miniprisma. (c) Zusammenfassung zur Positionsbestimmung mittels Tachymeter



- (f) – laserbasierte Abstandsmessung (Pulslaufzeitmessung)
 – Winkelauflösung: 0,25 - 0,50°
 – Abstrahlwinkel: -45 - 225° (insgesamt 270°)
 – Wiederholrate: 25 - 50 Hz
 – Reichweite: 0 - 50m
 – Remission des Zielobjekts beeinflusst Reichweite
 – Aufweitung des Laserstrahls problematisch
 – Ausrichtungsbestimmung bei gegenüberliegender Positionierung ist möglich.

Abbildung 75: Testmessung zur Erprobung eines Laserdistanzmesssystems zur Positionserfassung. Laserdistanzmesser LMS100 bei gegenüberliegender Prüfkopfpositionierung. (a) Messaufbau, (b) Positionierung und Ausrichtung, (c) Entfernungswerte (schwarz=Prüfobjekttrand, dunkelgrün=270°-Winkelbereich, hellgrün=Winkelbereich mit gültigen Entfernungswerten), (d) gezoomter Prüfkopf-Bereich mit Approximation zur Ausrichtung (lineare Regression), (e) Überlagerung der approximierten Ausrichtung (blau) mit der vorliegenden Prüfkopflage (schwarz), (f) Zusammenfassung zur Positionsbestimmung mittels Laserdistanzmesser



- (f) – laserbasierte Abstandsmessung (Pulslaufzeitmessung)
- Winkelauflösung: 0,25 - 0,50°
 - Abstrahlwinkel: -45 - 225° (insgesamt 270°)
 - Wiederholrate: 25 - 50 Hz
 - Reichweite: 0 - 50m
 - Remission des Zielobjekts beeinflusst Reichweite
 - Aufweitung des Laserstrahls problematisch
 - Ausrichtungsbestimmung bei gedrehter Positionierung ist schwierig.

Abbildung 76: Testmessung zur Erprobung eines Laserdistanzmesssystems zur Positionserfassung. Laserdistanzmesser LMS100 bei gedrehter Prüfkopflage. (a) Messaufbau, (b) Positionierung und Ausrichtung, (c) Entfernungswerte (schwarz=Prüfobjektrand, dunkelgrün=270°-Winkelbereich, hellgrün=Winkelbereich mit gültigen Entfernungswerten), (d) gezoomter Prüfkopf-Bereich mit Approximation zur Ausrichtung (lineare Regression), (e) Überlagerung der approximierten Ausrichtung (blau) mit der vorliegenden Prüfkopflage (schwarz), (f) Zusammenfassung zur Positionsbestimmung mittels Laserdistanzmesser



Tabelle 3: Produktanalyse zu Lasermesssysteme (Fa. SICK). Blau hervorgehoben ist das durch eine Testmessung erprobte System (siehe Abbildung 75 und Abbildung 76)

Gerät	Funktionen	Arbeitsbereich	Öffnungswinkel	Indoor / Outdoor	Gewicht	Schnittstelle	Winkelauflösung	Ansprechzeit	system. Fehler	stat. Fehler	Fazit
TIM3xx	Detection	0,05 ... 4m	270°	Indoor	0,15 kg	USB	-	134 ms	± 40 mm	± 30 mm	entfällt
S100	Detection	0 ... 10m	270°	Indoor	1,2 kg	Seriell, USB	0,5°	?	?	?	entfällt
LMS1xx	Detection, Ranging	0,5 ... 50m	270°	Indoor / Outdoor	1,1 kg	Seriell, Ethernet, CAN	0,25°, 0,5°	≥ 20ms	± 30 mm	± 12 mm	Fehler erscheint außerhalb des tolerierbaren Bereichs
LMS5xx	Detection, Ranging	0 ... 80m	190°	Indoor / Outdoor	3,7 kg	Seriell, Ethernet, USB, CAN	0,167°, 0,25°, 0,5°, ...	≥ 10ms	≥ ± 25 mm	± 7 mm	Gewicht zu hoch
LD-OEM	Detection, Ranging	0,5 ... 250m	360°	Indoor	2,4 kg	Seriell, Ethernet, CAN	0,125°, 0,25°, 0,5°, ...	≥ 100ms	± 38 mm	± 25 mm	Fehler erscheint außerhalb des tolerierbaren Bereiches
LD-LRS	Detection, Ranging	0,5 ... 250m	360°	Indoor / Outdoor	4,1 kg / 9,1 kg	Seriell, Ethernet, CAN	0,0625°, 0,125°, ...	≥ 100ms	± 38 mm	± 30 mm	Gewicht zu hoch
LD-MRS	Detection, Ranging	0,5 ... 250m	85°	Outdoor	1,0 kg	Seriell, Ethernet, CAN	0,125°, 0,25°, 0,5°	?	?	?	Öffnungswinkel kritisch, Fehlerdaten suchen
LMC1xx	Detection	0,5 ... 20m	270°	Indoor / Outdoor	1,1 kg	Seriell, Ethernet, CAN	0,25°, 0,5°	20ms	± 30 mm	± 12 mm	entfällt
LMP	Detection	0 ... 250m	180 ... 360°	Outdoor	?	?	?	?	?	?	entfällt
LMS4xx	Detection, Ranging	0,7 ... 3m	70°	Indoor	2,4 kg	Seriell, Ethernet	0,1 ... 1,0°	≥ 2ms	± 4 mm	± 3 mm	Indoor + Öffnungswinkel kritisch
NAV	Ranging	0,5 ... 250m	360°	Indoor	2,4 kg / 3,3 kg	Seriell, Ethernet, USB, CAN	0,1°	?	± 10 mm	± 10 mm	entfällt
Zieleigenschaften	winkelaufgelöste Distanzmessung	0,2 ... ≥ 2m	≥ 70°	robust Indoor oder Outdoor	≤ 2,0 kg	Seriell oder Ethernet	≤ 0,1°	≤ 100ms	± 5 mm	± 5 mm	

Legende:

- Anforderungen erfüllt
- kritischer Wert, aber unter Umständen hinreichend
- unzureichend



11.3 Industrial Design

11.3.1 Zusammenfassung

„Der Fachbereich 8.2 der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) hat eine innovative Methode zur zerstörungsfreien Ultraschallprüfung erarbeitet und den technischen Aufbau in Form eines neuen Gerätes entwickelt. Mit Hilfe des Produktdesigns soll die Etablierung auf dem Markt sichergestellt werden.

Die nachfolgende Arbeit erläutert detailliert die Bereiche, die für die Gestaltung des Handscangerätes von Bedeutung sind. Sie befasst sich mit der Installation und Handhabung des Systems am Einsatzort, und beleuchtet wichtige technische Details. Der nicht verkleidete technische Aufbau der zwei neu entwickelten Geräte dient als Grundlage für die Erarbeitung eines Gehäusekonzepts. Neben dem Gehäusedesign wird eine Überarbeitung des gesamten Aufbaus durchgeführt, um die Benutzerfreundlichkeit in verschiedenen Punkten zu verbessern.

Zukünftige Designentscheidungen werden auf Grundlage von praxisnahen Beobachtungen und der notwendigen Anordnung der technischen Komponenten getroffen. Ziel der Auseinandersetzung ist es, ein funktionelles und ästhetisch ansprechendes Design zu entwickeln. Am Ende sollen unter Beachtung aller Vorgaben die Ergebnisse dieser Arbeit zu einem ergonomischen Gerät führen. [...]

Die Problemstellung besteht daraus, den komplexen technischen Vorgaben und Ansprüchen des Projektpartners und Innovationsgebers¹ gerecht zu werden und gleichzeitig ein gutes Designziel zu erreichen. Das Design soll die Funktionalität und Handhabung des Gerätes verbessern und dient als Hilfsmittel, um den komplexen Aufbau zu vereinfachen. Die Benutzerfreundlichkeit soll an allen nötigen Stellen verbessert werden und ein ästhetisch zusammenstehender Gesamteindruck soll entstehen, ohne die Funktionalität negativ zu beeinflussen. [...]

(aus [10], S.9)

11.3.2 Skizzen und Entwürfe

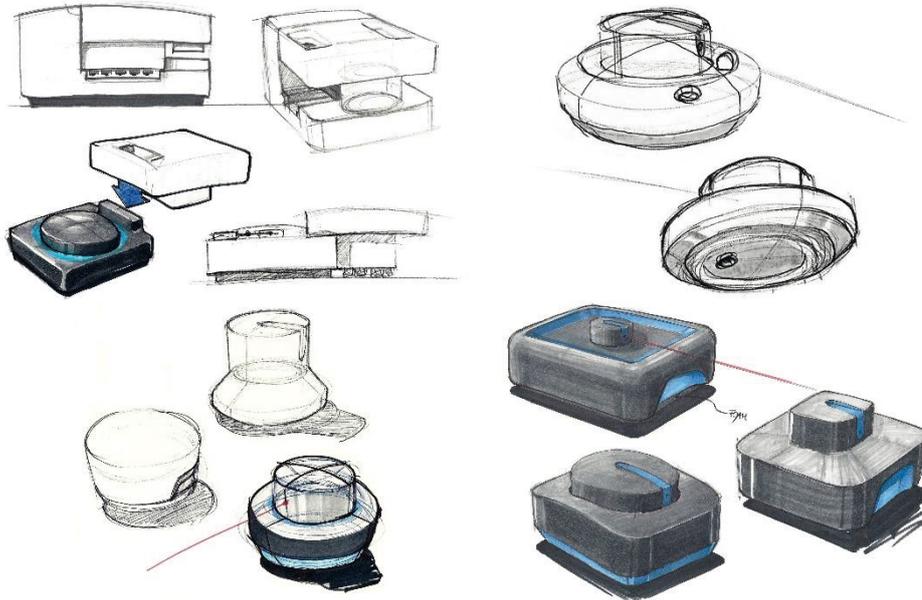


Abbildung 77: Skizzen und Entwürfe zu Basisstation (Auswahl), (aus [10], S. 66f.)



Abbildung 78: Skizzen und Entwürfe zu Handscanner (Auswahl), (aus [10], S. 64f.)

11.3.3 Modellbau



Abbildung 79: Modellbau zu Basisstation (aus [10], S. 80)



Abbildung 80: Modellbau zu Handscanner (aus [10], S. 81)

11.4 Anwendungstests und Validierungsmessungen an Probekörpern

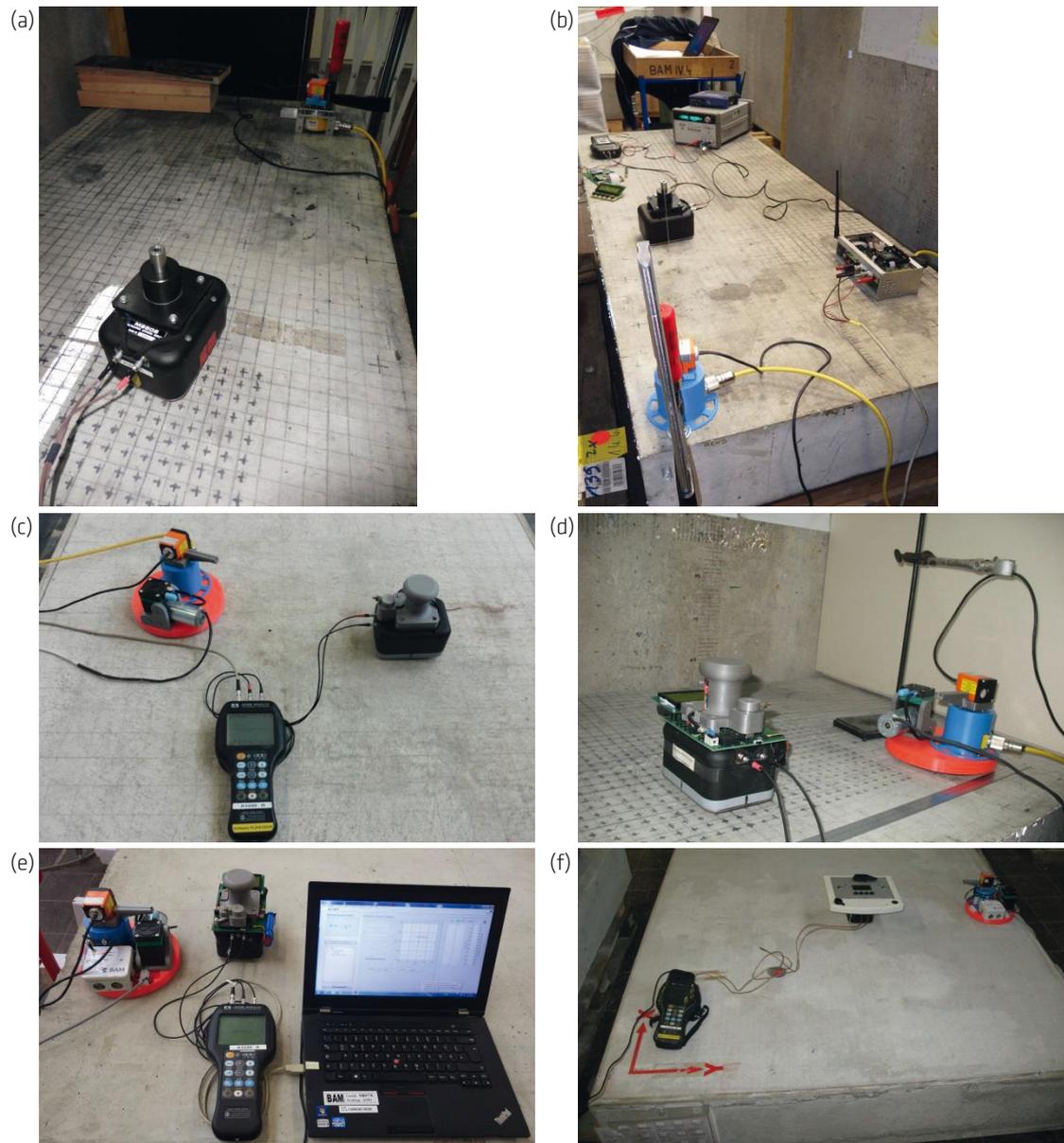


Abbildung 81: Entwicklungsübersicht zum USP-System. (a) Version 0.0 (Juli 2015), (b) Version 0.1 (November 2015), (c) Version 1.2 (Februar 2016), (d) Version 2.2 (Juni 2016), (e) Version 2.3 (Oktober 2016), (f) Version 3.3 (März 2017). In den Versionsnummern gibt die erste Ziffer die Entwicklungsstufe bzgl. des Prüfkopfaufsatzes an. Die zweite Ziffer codiert die Basisstationsversion.

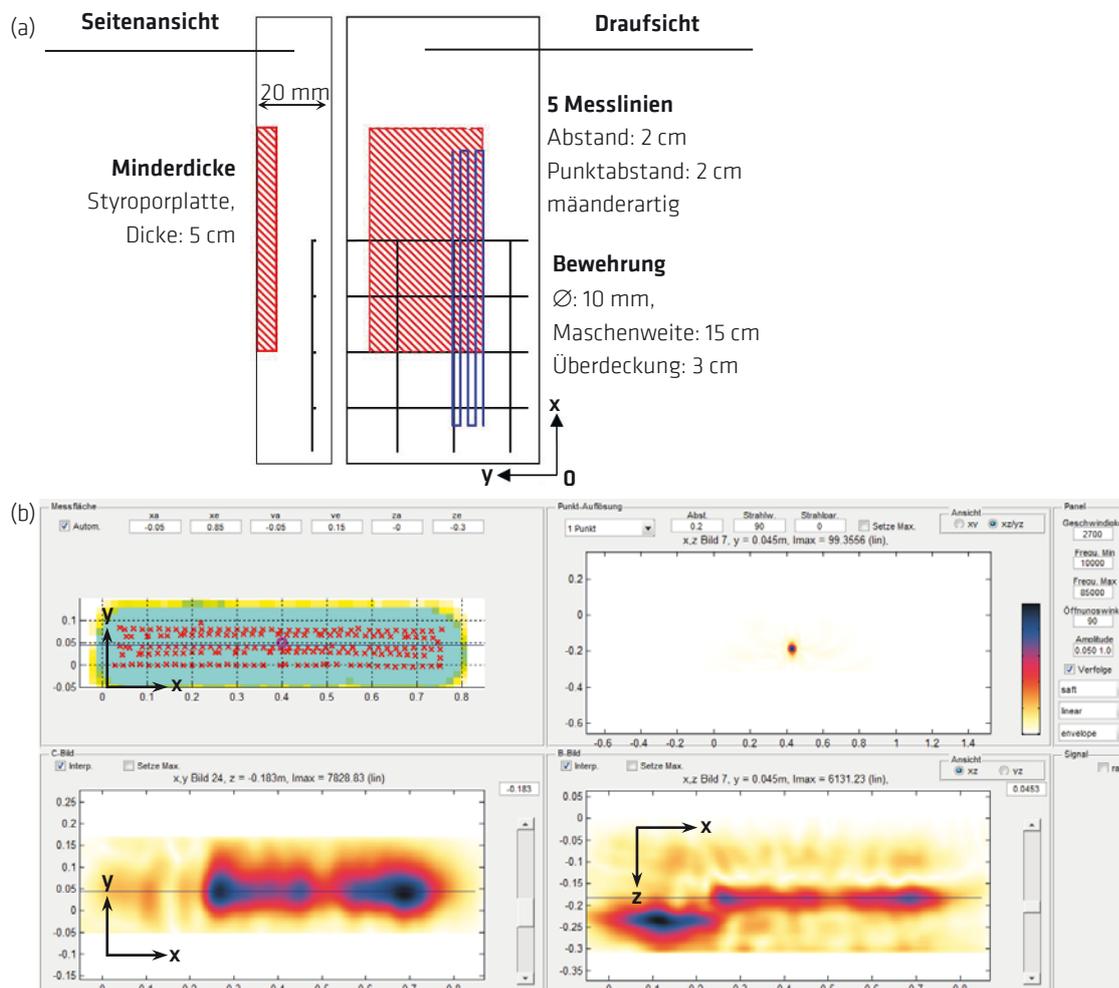


Abbildung 82: Validierungsmessung mit BAM-Baustellenscanner und USP (März 2016). (a) Schematische Darstellung des Untersuchungsbereichs. Die Messfeldlinien sind blau hervorgehoben. (b) Ergebnisdarstellung des Rekonstruktionsprogramms „SAFT-Analysis 2“. (oben links) Positionsdarstellung. (unten links) rekonstruiertes C-Bild in der Tiefe $z = 18,3$ cm. (oben rechts) synthetische Auflösungsanalyse auf Grundlage der vorliegenden Messpunktdichte. (unten rechts) rekonstruiertes B-Bild in der xz -Ebene bei $y = 4,5$ cm.



Tabelle 4: Übersicht zu durchgeführten Anwendungstest / Scannermessungen

Datum	Messobjekt	System	Anmerkung
08.07.2015	Stufenplatte	USP (Version 0.0)	Anwendungstest des Positionserfassungssystems, keine Datenaufnahme oder Rekonstruktion, Positionsauswertung
17.11.2015	Stufenplatte	Tachymeter	Testmessung zur Erprobung eines Tachymeters zur Positionsbestimmung
17.11.2015	Stufenplatte	Laserdistanzmesser	Testmessung zur Erprobung eines Laserdistanzmessers zur Positionsbestimmung
18.11.2015	Stufenplatte	USP (Version 0.1)	Anwendungstest zur Erprobung der Kommunikations- und Softwareabläufe
11.02.2016	Stufenplatte	USP (Version 1.2)	Anwendungstest zur Erprobung der gedruckten Halterungen (Basisstation mit Saugfuß und Vakuumpumpe, Prüfkopfaufsatz mit Seilzugaufnahme und Knauf)
24.03.2016	Radarplatte	Scanner und USP (Version 1.2)	Validierungsmessung mit Scanner zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit, Ermittlung der maximalen Messgeschwindigkeit, Test der Schnittstelle zwischen Positionserfassungssoftware (BAM) und online-Rekonstruktionsprogramm (U Kassel)
02.06.2016	Stufenplatte	USP (Version 2.2)	Anwendungstest der neuen Prüfkopfelektronik, Videoaufnahmen zur Anschauung der Arbeitsweise der Hard- und Software (Linienmessung und kumulative Erweiterung)
19.07.2016	FBS1	Scanner	Scannermessung mit NI-Ultraschalldaten-aufnahme, Referenzdaten für U Kassel mit langer Aufnahmezeit (A-Scan-Länge: 5ms)
29.07.2016	FBS1	USP (Version 2.2)	Anwendungstest
12.10.2016	NutPK	USP (Version 2.3)	Untersuchung zum Auflösungsvermögen
20.10.2016	FBS1	USP (Version 2.3)	Anwendungstest zur Erprobung des Messansatzes „Aufnahme von Gebieten mit weitem Messraster“, „Aufnahme von Messpunkten entlang einer Linie“ sowie „Aufnahme von Punktwolken“
01.11.2016	FBS1	Scanner und USP (Version 2.3)	Validierungsmessung mit Scanner zur Bestimmung der Positioniergenauigkeit
09.11.2016	FBS1	Scanner	Scannermessung mit NI-Ultraschallaufnahme, Abtastrate 2MHz, A-Scanlänge: 1024µs
17.11.2016	FBS2	USP (Version 2.3)	Anwendungstest an vertikaler Wand und Schulung in der Handhabung des USP-Systems (Herr Lotz – Student des Studiengangs Industrial Design)
22.11.2016	Stufenplatte	USP (Version 2.3)	Anwendungstest zur Erprobung des Messansatzes „Aufnahme von Messpunkten entlang einer Linie“ mit anschließender B-Bild-Analyse und -Bewertung
19.01.2017	EMW02	USP (Version 2.3)	Anwendungstest an Elementwand mit flächiger, oberflächennaher Fehlstelle / Ablösung (Vielfachechos)

Tabelle 4 (Fortsetzung):Übersicht zu durchgeführten Anwendungstest / Scannermessungen

Datum	Messobjekt	System	Anmerkung
26.01.2017	EMW02	Scanner	Scannermessung mit NI-Ultraschalldaten- aufnahme, Abtastrate: 1MHz, A-Scanlänge: 10 ms
01.02.2017	TOM01	USP (Version 2.3)	Anwendungstest
09.02.2017	TOM02	USP (Version 2.3)	Anwendungstest an vertikaler Wand, Messansatz „Aufnahme von Gebieten mit weitem Messraster“ (Raster: 50mm x 50mm) und kumulativer Erweiterung mit „Aufnahme von Punktwolken“
29.03.2017	EMW02	USP (Version 3.3)	Anwendungstest des neuen Prüfkopfaufsatzes (Neobotix)
30.03.2017	MPKs	USP (Version 3.3)	Anwendungstest an Probekörpern mit – leerem Hüllrohr – verpresstem Hüllrohr mit Litzen in mittiger Lage – verpresstem Hüllrohr mit Litzen an Hüllrohroberseite
03.04.2017	MPKs	USP (Version 3.3)	Fortsetzung der Messung vom 30.03.2017
06.04.2017	FBS1	USP (Version 3.3)	Anwendungstest

11.5 Anleitung zur Inbetriebnahme des USP-Systems mit online-Rekonstruktion

11.5.1 Systemkomponenten



Nummer	Komponente	Nummer	Komponente
1	Kabeltrommel	8	US-Prüfkopf
2	Messrechner (Laptop)	9	Prüfkopfaufsatz
3	Maus	10	WLAN-Router
4	Netzteil für Messrechner	11	Netzteil für WLAN-Router
5	A1220-Datenaufnahme	12	Basisstation inkl. Elektronik
6	USB-Datenkabel	13	Netzteil für Elektronik
7	US-Kabel (Lemo)		



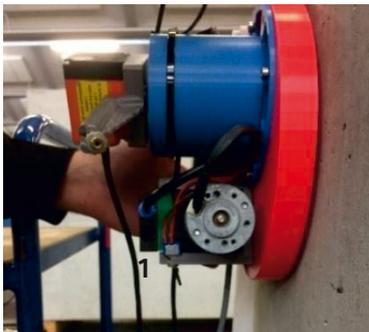
11.5.2 Inbetriebnahme der Hardware

Schritt 1	Stromversorgung
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Entrollen Sie die Kabeltrommel (1), so dass Sie diese in der Nähe der Messelektronik (2, 10, 12) positionieren können.- Verbinden Sie die Kabeltrommel mit dem Stromnetz.
Info	Der Großteil der Systemkomponenten wird mit 230V-Netzteilen betrieben und benötigt daher eine permanente Stromversorgung.
Schritt 2	WLAN-Router
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Verbinden Sie das Netzteil (11) mit dem WLAN-Router (10).- Stecken Sie das Netzteil (11) in einen freien Kabeltrommel-Steckplatz (1) ein.- Achten Sie darauf, dass der Netzstecker die anderen Steckplätze der Trommel nicht behindert und dass er fest eingesteckt ist.- Überprüfen Sie die Statusleuchten auf der Vorderseite des Routers (Power + WLAN).
Info	Die Kommunikation zwischen den verschiedenen Systemkomponenten wird per WLAN realisiert. Der WLAN-Router dient als „Datenverteilstation“ und etabliert / verwaltet das „Seilzug“-Netzwerk.
Schritt 3	Basisstation
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Verbinden Sie das Netzteil (13) mit der Basisstation (12).- Stecken Sie das Netzteil (13) in einen freien Kabeltrommel-Steckplatz (1) ein.- Die Elektronik besitzt zwei Ein-Aus-Schalter. Zum einen kann die verbaute Vakuumpumpe zu- bzw. abgeschaltet werden. Zum anderen ist die Basisstation separat ein- und ausschaltbar.- Es sollte zu Beginn ein langer Signalton zu hören sein.- Die Basisstation ist vor einem Absturz zu sichern (Sicherung falls die Vakuumpumpe ausfällt).
Info	Die Basisstation besteht aus einem Saugfuß auf dem eine Vakuumpumpe und ein Gehäuse für den Winkelencoder und Seilzug montiert sind. Der Seilzug ist drehbar auf dem Winkelencoder verbaut. Die Elektronik zur Ansteuerung des Positionserfassungssystems befindet sich ebenfalls auf dem Saugfuß. Sobald die Elektronik eingeschaltet wurde, verbindet sich die Basisstation mit dem WLAN-Netzwerk „Seilzug“.
Schritt 4	Prüfkopfaufsatz
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Entnehmen Sie den Prüfkopf (8) aus dem A1220-Messkoffer und demontieren Sie die Standardhalterung falls nötig.- Positionieren Sie die Platine passend auf den Prüfkopf, so dass die vier Fixierungsgewinde des Prüfkopfs erkennbar sind.

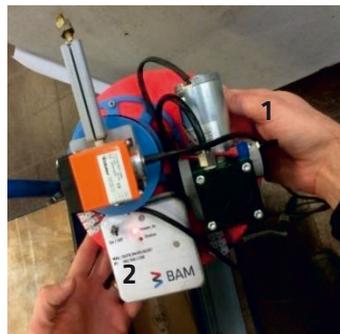
- Setzen Sie den Griff auf die Elektronikplatine auf und verschrauben Sie den Griff mit dem Prüfkopf.
- Stellen Sie die Verbindung zwischen Elektronik und Batterie her und schalten Sie das System ein.
- Es sollte nun ein Pieps zu hören sein.
- Auf dem Display sind darauffolgend Informationen zum Status der WLAN-Verbindung zu sehen, da automatisch eine Verbindung zum Netzwerk „Seilzug“ etabliert wird (auto login).
- Die Elektronik sieht bei einem erfolglosen Verbindungsaufbau, eine Wartezeit von 30 Sekunden vor bevor ein erneuter Loginversuch durchgeführt wird (insgesamt fünf Versuche).
- Am Ende der Inbetriebnahme ist auf dem Display die Menüstruktur dargestellt.

Info

Zur Visualisierung der Positionsdaten für den Anwender ist eine separate Elektronik entwickelt worden, die direkt auf dem Prüfkopf montierbar ist. Neben der Darstellung der aktuellen Positionen sowie der Prüfkopfausrichtung, kann per Elektronik eine Messung ausgelöst werden. Der aufgenommen A-Scan wird als Zeitkurve im Anschluss kurz dargestellt.



angesaugte Basisstation



Basisstation in Draufsicht

Schalter für ...

- 1 ... Vakuumpumpe
- 2 ... Elektronik



angedrückter Prüfkopf (Seitenansicht)



angedrückter Prüfkopf (Frontansicht)

Schritt 5	Messrechner (Laptop)
Ablauf	<ul style="list-style-type: none"> - Verbinden Sie das Netzteil (4) mit dem Messrechner (2). - Stecken Sie das Netzteil (4) in einen freien Kabeltrommel-Steckplatz (1) ein. - Die genannten Schritte entfallen bei Akkubetrieb. - Starten Sie den Messrechner und melden Sie sich falls nötig mit Ihrem Account an.
Info	Der Messrechner ist zentraler Steuerungspunkt für die Positions- und Datenerfassung. Das System muss hierbei über mindestens einen USB-Port verfügen und ein WLAN-Modul integrieren. Als Softwarevoraussetzungen ist eine LabView-Runtime 2013 sowie eine entsprechende Matlab-Laufzeitumgebung erforderlich. Weitere Details zur Inbetriebnahme der Software sind im nachfolgenden Abschnitt nachzulesen.
Schritt 6	Ultraschallsystem (A1220-Datenaufnahme)
Ablauf	<ul style="list-style-type: none"> - Verbinden Sie das Ultraschallsystem (5) mit dem Prüfkopf (8) in dem Sie das Verbindungskabel (7) beidseitig einstecken. - Überprüfen Sie Ihre Datenaufnahmeparameter durch punktuelle Tests am Prüfobjekt. Die Einstellungen können auch zu einem späteren Zeitpunkt softwareseitig angepasst werden. - Verbinden Sie das A1220 mit dem Messrechner. Nutzen Sie hierfür das USB-Datenkabel (6). Auf dem A1220 ist die Mittelung „USB-Link“ zu lesen. - Überprüfen Sie den Akkuzustand im Vorfeld der Messung oder betreiben Sie das System im Netzbetrieb.
Info	Die Ultraschalldatenaufnahme wird mittels des kommerziellen Systems A1220 der Firma Acsys vorgenommen. Das vorliegende System kann per USB-Schnittstelle konfiguriert und Messdaten entgegennehmen. Neue A1220-Geräte besitzen diese Möglichkeit nicht mehr. Alternativsysteme müssen ermittelt, erprobt und für automatische Messungen ertüchtigt werden



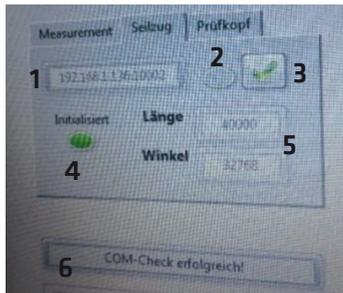
Ultraschallsystem (A1220)

11.5.3 Inbetriebnahme der Software

Schritt 7 Messprogramme starten	
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Klicken Sie doppelt auf die Script-Datei bzw. -Verknüpfung „Start“, welche standardmäßig auf Ihrem Desktop zu finden sein sollte.- Es öffnet sich zunächst ein schwarzes Eingabefenster (Fenstertitel: „Start“).- Befolgen Sie die Anweisungen, welche in den Fenstern angezeigt werden.
Info	Um den Softwarestart zu vereinfachen, ist eine Skript-Datei erstellt worden, die die Netzwerkkonnektivität überprüft, die Auswerteprogramme startet sowie abschließend die WLAN-Verbindung zum UPS-Netzwerk „Seilzug“ herstellt. Nach erfolgreichem Start sind die Programme zur Positionserfassung und online-Rekonstruktion betriebsbereit.

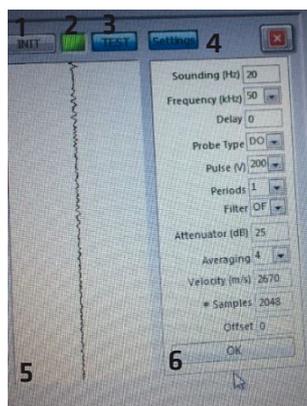
Schritt 8 Konfiguration des Positionserfassungsprogramms	
Ablauf	<ul style="list-style-type: none">- Zu Ausführungsbeginn blendet sich automatisch ein Dateiauswahlfenster ein. Legen Sie dort den Dateipfad sowie den Dateinamen für die A-Scan-Sammeldatei fest.- Initialisieren / Testen Sie die Kommunikation mit der Basisstation in dem Sie im Reiter „Seilzug“ (oben links) den Button mit grünem Haken betätigen. Im Antwortfeld wird entweder ein Fehlercode bei gescheitertem Verbindungsversuch angegeben oder der erfolgreiche Abschluss des Kommunikationschecks signalisiert. Der Status der Initialisierung kann anhand einer LED-Anzeige visuell nachvollzogen werden (grün= erfolgreich, grau = nicht initialisiert).- Initialisieren / Testen Sie die Kommunikation mit der Prüfkopfaufsatz in dem Sie im Reiter „Prüfkopf“ (oben links) den Button mit grünem Haken betätigen. Das Ergebnis des Verbindungsversuchs erscheint im Antwortfeld. Der Verbindungsstatus ist wieder durch eine LED-Anzeige sofort ablesbar.- Initialisieren Sie die Verbindung mit dem A1220 durch Betätigung von „Init“. Dieser Punkt entfällt falls zu Ausführungsbeginn der automatische Initialisierungsversuch erfolgreich war. Der Statusanzeige leuchtet in diesem Fall bereits.- Überprüfen Sie die Datenaufnahmeparameter des A1220 über „Settings“ und passen Sie diese ggfs. An.- Über den Butten „Track“ im Reiter „Measurement“ aktivieren Sie nun die zyklische Positionsabfrage und -visualisierung auf dem Prüfkopfdisplay. Das USP ist nun aufnahmebereit.- Messen Sie zunächst zwei Punkte mit dem Prüfkopf ein, von denen Sie die Position kennen (z.B. Eckbereiche des Testkörpers), um eine Transformation des Koordinatensystems durchzuführen.- Definieren Sie im Programm die beiden Messpunkte als „Ursprung“ und als „X-Achse“.
Info	Das USP übermittelt über WLAN die Messdaten an das Positionserfassungsprogramm auf dem Messrechner. Dort können die Positionen der einzelnen Messungen am Testkörper nachvollzogen werden. Eine Messung wird am Prüfkopf

ausgelöst und führt abschließend zur Aktualisierung der A-Scan-Sammeldatei. Die Messpunkte beziehen sich auf das kartesische Koordinatensystem, welches durch die Parameter „Ursprung“, „X-Achse“ festgelegt ist. Die Umwandlung von polaren Koordinaten (Winkel; Entfernung) zu kartesischen Koordinaten (x;y) wird automatisch vom Programm vorgenommen.



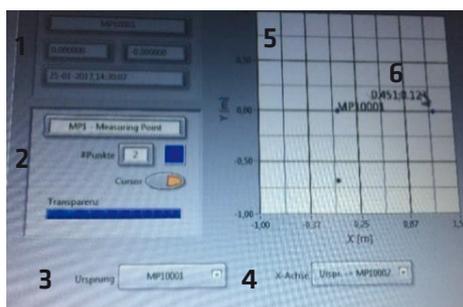
Kommunikationscheck (Basisstation)

- 1 IP-Adresse der Basisstation
- 2 Status einer Kommunikation (grau=keine, grün=in Ausführung)
- 3 Start-Button
- 4 Initialisierungsstatus (grün=erfolgreich, grau=uninitialisiert)
- 5 Skalierungsparameter für Seilzug und Winkelencoder
- 6 Antwortfeld



Datenaufnahmeparameter A1220

- 1 Button für Initialisierung
- 2 Status der Initialisierung (dunkel=uninitialisiert, grün=initialisiert)
- 3 Zyklische Abfrage von Ultraschalldaten ohne Abspeicherung (zum Test der Parameter)
- 4 Ein-/Ausblenden der Aufnahmeparameter (6)
- 5 A-Scan-Visualisierung als Zeitkurve
- 6 Übersichts- und Konfigurationsbereich für Aufnahmeparameter (wenn ausgeblendet, dann ist an dieser Stelle eine A-Scan-Visualisierung als Intensitätsbild zu finden)



Positionsdatenbereich

- 1 **Positionsinformation bestehend aus Punktname, Koordinaten und Aufnahmezeitpunkt**
- 2 **Informationen zur Messpunktgruppe / Einstellung von Visualisierungsoptionen**
- 3 **Translationspunkt zur Messfeldanpassung (Spezifikation des Koordinatenursprungs)**
- 4 **Rotationspunkt zur Messfeldanpassung (Ausrichtung der X-Achse)**
- 5 **2D-Positionsdarstellung,**
- 6 **bei aktivem Tracking wird die aktuelle Position durch einen Cursor visualisiert**

Schritt 9	Start der online-Rekonstruktion
Ablauf	- Wechseln Sie von der Positionserfassungssoftware zum online-Rekonstruktionsprogramm. Die Programme sind autark und zwischen ihnen kann beliebig gewechselt werden.



- Setzen Sie einen Haken vor „Verbinde mit Messung“ und wählen Sie die aktuell durchgeführte Messung an ihrem Speicherort aus.
- Die A-Scan-Daten werden im Anschluss eingeladen und entsprechend der vorliegenden Parameter rekonstruiert.
- Weitere Information zu den Software-Features entnehmen Sie bitte der Softwaredokumentation der Universität Kassel.

Info

Durch das Programm „saft_analysis2“ ist es möglich die Ultraschallmessungen direkt vor Ort nachzuvollziehen und auszuwerten.