

F 2876

Sascha Feistkorn, Norman Diersch

Kombination von zerstörungsfreien Prüfverfahren: Verbesserung der Einsetzbarkeit in der Baupraxis durch Charakterisierung und Fusion der Verfahren

> Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung im Bundesamt für Bauwesen und Raumofnung

Fraunhofer IRB Verlag

F 2876

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- 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 reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9193-5

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/bauforschung

Abschlussbericht vom 01.02.2012 bis 30.06.2013

des Forschungsvorhabens

"Kombination von zerstörungsfreien Prüfverfahren: Verbesserung der Einsetzbarkeit in der Baupraxis durch Charakterisierung und Fusion der Verfahren"

Aktenzeichen	SF-10.08.18.7-11.45 / II 3-F20-10-1-073
Ausfertigung	1 von 5
Auftraggeber	Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumordnung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung
Zuwendungs- bescheid	21.12.2011
Zeichen	SF-10.08.18.7-11.45
Prüfgegenstand	Erhöhung der Aussagekraft von Datensätzen der ZfPBau durch Datenfusion
Laufzeit	01.02.2012 - 30.06.2013
Beteiligte	Softwareentwicklung M.Sc. Sergey Pushkarev
	Koordination Prof. DrIng. C. Boller
	Projektbearbeitung und Berichterstattung DrIng. Sascha Feistkorn DiplIng. Norman Diersch
Koordination	Universität des Saarlandes DiplIng. Norman Diersch
	Institut für Zerstörungsfreie Prüfverfahren Campus, Geb. E3.1 66123 Saarbrücken
	e-Mail: norman.diersch@bam.de

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative *"Zukunft Bau"* des Bundesinstitutes für Bau-, Stadt- und Raumforschung gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt beim Autor.

Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht vom 01.02.2012 bis 30.06.2013			1
1	Ein	nführung	5
	1.1	Allgemeines	5
	1.2	Ziele des Forschungsvorhabens	6
	1.3	Vorgehensweise	6
2	Fes	stlegung der Prüfaufgabe	7
	2.1	Allgemeines	7
	2.2	Prinzip der Elementwand und in der Praxis auftretende Mängel	7
	2.3	Beispiel einer Elementwanduntersuchung mit Radar und Ultraschall	8
	2.4	Ergebnisse der Radaruntersuchungen	9
	2.5	Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen	11
	2.6	Grafische Überlagerung der Ergebnisse	12
3	En	twicklung von Testkörpern	14
	3.1	Allgemeines	14
	3.2	Referenzkörper aus Polyamid	14
	3.3	Elementwandkonstruktionen mit definierten Fehlstellen	15
4	На	ırdware	17
	4.1	Allgemeines	17
	4.2	Radar - Mala Pro Ex	17
	4.3	Ultraschall - Acsys A1220	18
	4.4	Wirbelstrom - Proceq Profoscope	19
	4.5	Automatisierte Messungen - OSSCAR Scanner	20
5	Ein	ngesetzte Software und Algorithmenentwicklung	21
	5.1	Allgemeines	21
	5.2 5.2 5.2	MATLAB Routinen zur Vorbereitung der Datensätze2.1Normierung der Datensätze2.2Erste Ableitung der Signalamplituden	21 21 22
	5.3 5.3 5.3 5.3	 MATLAB Routinen für die Datenfusion Gewichtung und Addition der Signalamplituden Gewichtung und Subtraktion der Signalamplituden Gewichtung und Multiplikation der Signalamplituden 	23 23 23 24
	5.4	Rekonstruktion von Radardaten mit ReflexW	25
	5.5	Rekonstruktion von Ultraschalldaten	26
	5.6	ZIBAmira Routinen für die Datenfusion	27
6	Un	tersuchungen der Testkörper	29
	6.1	Allgemeines	29

	6.2	Untersuchungen am Polyamidblock		
	6.2.	.1 Erläuterungen zu den Radaruntersuchungen	30	
	6.2.	.2 Erläuterung zu den Ultraschalluntersuchungen	31	
	6.2.	.3 Datenfusion der beschriebenen Messreihen	33	
	6.2.	.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Polyamiduntersuchungen	40	
	6.3	Untersuchungen an den Elementwänden	40	
	6.3.	.1 Erläuterungen zu den Untersuchungen	43	
	6.3.	.2 Ergebnisse der Datenfusion von 2D-Datensätzen an den Elementwänden	43	
	6.3.	.3 Ergebnisse der Datenfusion von 3D-Datensätzen an den Elementwänden	58	
	6.4	Untersuchungen an einer Betonplatte	62	
7	Zus	sammenfassung	64	
	7.1	Ergebnisse aus dem Bereich Hardware	64	
	7.2	Ergebnisse aus dem Bereich Software	64	
	7.3	Ergebnisse der Untersuchungen	65	
	7.4	Ausblick	66	
8	An	Anhang		
	8.1	Katalog der Aufbereitungsschritte von der Datenaufnahme zur Datenfusion	67	
9	Lite	eraturverzeichnis	70	

1 Einführung

1.1 Allgemeines

Die Anwendung der ZfPBau Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom für die Zustandsanalyse bzw. Schadenserfassung hat in letzter Zeit zunehmende praktische Bedeutung erlangt. In Abhängigkeit der vorhandenen Randbedingungen wird hierbei das ZfPBau Verfahren ausgewählt, mit dem die gestellte Prüfaufgabe bestmöglich gelöst werden kann. Von Vorteil sind hierbei die unterschiedlichen Eigenschaften der drei Verfahren.

So findet bei dem elektromagnetischen Verfahren eine Totalreflexion an metallischen Einbauteilen wie Hüllrohren oder oberflächennaher Bewehrung etc. statt, so dass sich das Radarverfahren neben der deutlich schnelleren Messdatenaufnahme sehr gut für die Strukturanalyse von Betonbauteilen eignet, wenn der Abstand zwischen den metallischen Einbauteilen nicht zu gering ist. Eine Dickenbestimmung von Betonbauteilen ist aufgrund des hohen Energieverlusts an eingelegter Bewehrung sowie der dämpfenden Eigenschaften des Betons nur bis ca. 30 cm möglich.

Das Ultraschallechoverfahren, mit dem elastische Wellen im Betonbauteil mit Punktkontaktprüfköpfen (Transversalwellen) angeregt werden, eignet sich u.a. für die Ermittlung größerer Dicken. Aufgrund der Eigenschaften der elastischen Wellen werden an metallischen Bauteilen nur ca. 50% der eingebrachten mechanischen Energie reflektiert, so dass das Ultraschallechoverfahren auch hinter dicht verlegter Bewehrung noch Strukturen wie die Lage von Hüllrohren auflösen sowie Bauteildicken bestimmen kann. Weiterhin findet eine Totalreflexion der Transversalwellen an Grenzflächen zu schubspannungsfreien Medien statt, so dass beispielsweise Schichtgrenzen Bauteil/Luft dazu führen, dass Dicken bis ca. 1,0 m gut bestimmt werden können. Auch die Ortung von Auffälligkeiten wie Kiesnestern oder Delaminationen ist mit dem Ultraschallechoverfahren zuverlässig möglich.

Das Wirbelstromverfahren eignet sich aufgrund seines physikalischen Prinzips dazu, präzise die Betondeckung der ersten Bewehrungslage bei bekanntem Durchmesser zu bestimmen. Bei bekannter Betondeckung kann weiterhin unter Beachtung verschiedener Randbedingungen der Stabdurchmesser ermittelt werden. Begrenzt ist das Wirbelstromverfahren jedoch in seiner Eindringtiefe von ca. 15 cm.

Radar	Ultraschall	Wirbelstrom	Radar	Ultraschall	Wirbelstrom
Sehr scharfe Darstellung einzelner Stabe Sicht auch hinter Luftschicht Unempfindlich bei Beschichtung	Große Eindringtiefe auch in dicht bewehrten Bereichen Sicht auch hinter Stahlplatte	Bestimmung des Stabdurchmessers Betondeckung sehr präzise	Keine Sicht hinter dichte Bewehrung oder Stahlplatte Begrenzte Eindringtiefe (junger Beton)	Keine Sicht hinter Luftschicht im µm- Bereich (I), z.B. Abdichtung, Dämmung Empfindlich gegen Beschichtung oder h raue Oberfläche	Aussagen nur über oberste Bewehrungslage
(a)			(b)		

Abb 1 aus [1] fasst die Vor- und Nachteile der drei Verfahren zusammen.



Schon die Auflistung dieser wenigen, jedoch signifikanten Eigenschaften der drei Verfahren zeigt deutlich, dass die Kombination von Verfahren zur optimalen Lösung einer Prüfaufgabe sinnvoll ist, um die Schwächen eines Verfahrens durch die Stärken eines Anderen zu kompensieren. Neben der Kombination von Verfahren mit einer getrennten Auswertung der Ergebnisse

ist die Fusion der aufbereiteten Messergebnisse dieser drei Verfahren eine Möglichkeit, den Wert der Prüfaussage zu erhöhen sowie die Aussagesicherheit zu verbessern.

1.2 Ziele des Forschungsvorhabens

Das übergeordnete Ziel des Forschungsvorhabens F20-10-1-073 besteht darin, eine Methodik zu entwickeln, mit der Radar-, Ultraschall- und Wirbelstromdaten aufbereitet, fusioniert und anschließend in einem Bild dargestellt werden können, um die Aussagekraft der Datensätze zu erhöhen.

Dazu ist es neben der Weiterentwicklung und dem Anpassen von Algorithmen für die Datenaufbereitung notwendig, einen vorhandenen Scanner so weiterzuentwickeln, dass neben der erforderlichen Aufnahmegenauigkeit schon bei der Datenaufnahme die Deckungsgleichheit von Messfeldern, die mit den drei unterschiedlichen Verfahren aufgenommen wurden, gegeben ist. Ein entsprechender Scanner wurde im Verbundforschungsvorhaben "Brückenscanner – Automatisierte zerstörungsfreie in-situ-Untersuchungen von Brücken (OSSCAR – OnSite SCAnneR)" entwickelt, so dass im Rahmen des aktuellen Forschungsvorhabens auf diesen Scanner zurückgegriffen wurde.

Durch die Untersuchung eines Referenztestkörpers werden die optimalen Datenaufbereitungsalgorithmen ermittelt sowie eine Formulierung von Mess- und Auswertestrategien für die Datenfusion angestrebt, um einen Leitfaden für baupraktische Fragestellungen zur Verfügung zu stellen. Diese Algorithmen und Auswertestrategien werden anschließend an praxisrelevanten Testkörpern optimiert.

1.3 Vorgehensweise

Um die Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom hinsichtlich ihrer Möglichkeiten und Grenzen objektiv bewerten zu können, wurden nach der Festlegung der verwendeten Prüfgeräte Messreihen an einer Referenz aus Polyamid mit unterschiedlichen Reflektoren durchgeführt. Mit diesen an einem homogenen Testkörper aufgezeichneten Daten werden mit zuvor entwickelten Auswertealgorithmen unterschiedliche Datenfusionen durchgeführt, um optimale Parameter für die Datenfusion festzulegen. Diese werden dann auf eine vorher festgelegte Prüfaufgabe - Detektion von Schädigungen an Elementwandkonstruktionen - angewendet, da die Fusion von Daten bei dieser Fragestellung einen Informationsgewinn liefert.

Mithilfe der Untersuchung dieser baupraktischen Fragestellung werden die Fusionsalgorithmen und Aufnahmeparameter optimiert. Dazu werden im ersten Schritt Elementwände mit bekannten Fehlstellen untersucht, anschließend erfolgt die Prüfung von unbekannten Elementwänden.

Nachdem nun umfangreiche Erfahrungswerte durch die Untersuchung von Referenzen und bekannten sowie unbekannten Elementwandkonstruktionen vorliegen, wird im letzten Schritt ein Katalog entwickelt, in dem die Aufbereitungsschritte so dokumentiert werden, dass sie in der Baupraxis für die Qualitätssicherung und Zustandsanalyse dieser Konstruktionsart angewendet werden können.

2 Festlegung der Prüfaufgabe

2.1 Allgemeines

Ein wichtiger Ansatz des Forschungsvorhabens im Rahmen von Zukunft Bau ist es, einen Nutzen für die Baupraxis zu generieren und eine Anwendung für praktische Fragestellungen zu ermöglichen. Darum wurde auf dem 1. AG Treffen am 28.06.2012 beschlossen, die Datenfusion für eine spezielle Prüfaufgabe zu entwickeln, um das Prinzip der Datenfusion in der täglichen Anwendung zu etablieren.

Eine häufige Fragestellung in der Baupraxis stellt hierbei die Detektion von Schäden, Mängeln bzw. Auffälligkeiten in Elementwandkonstruktionen dar. Die durch die schnelle Fertigung und das Anpassen an beliebige Grundrisse viel genutzte Bauweise macht es jedoch erforderlich, eine Methodik zu entwickeln, um die Qualität in der Ausführung zu sichern und die Ursachen von auftretenden Mängeln zu finden.

2.2 Prinzip der Elementwand und in der Praxis auftretende Mängel

Generell besteht eine Elementwand aus zwei bewehrten Betonschalen mit einer Dicke von ca. 6 cm, die am Aufstellungsort mit Beton verfüllt werden (s. Abb 2). Anwendung findet diese Bauweise bei Industriebauten wie Lagerhallen, Silobauten oder bei der Ausbildung von Kellergeschossen.



Abb 2 schematischer Aufbau einer Elementwand

Bei der Aufstellung der Elemente kann es jedoch zu unterschiedlichen Schadensfällen kommen. So können neben horizontalen Fugenblechen auch Übergangskonstruktionen wie Fugenbänder und Schwindrohre beschädigt oder unsachgemäß eingebaut worden sein.

Zudem kann es aufgrund von unterschiedlicher Rauheit der inneren Oberflächen und dem damit verbundenen mangelhaften Haftverbund des Kernbetons mit den Betonschalen zu Delaminationen kommen. Diese Delaminationen können hierbei unter Umständen die Standsicherheit gefährden, da der statisch angesetzte Lastabtrag durch den vollen Elementwandquerschnitt nicht mehr gegeben ist.

Auch grobe Mängel wie die Ausbildung von Kiesnestern durch mangelhafte Verdichtung, das Entmischen des Ortbetons bei der Betonage aus zu großen Fallhöhen oder gar das Vergessen des Ortbetons sind in der Baupraxis keine Seltenheit. Beispiele für Schädigungen sind in Abb 3 dargestellt, wobei die Schädigungen in Abb 3a und Abb 3b auch visuell detektiert werden können.





Beispiele für Schäden an Elementwänden (Quelle: Bam 8.2); Abb 3

a) Schädigung der Betonschale und feuchter Kernbeton; b) unsachgemäße Fugenausbildung;

c) Querschnitt der Wand mit sichtbaren Betonierfugen und unterschiedlichen Betongualitäten

Im Gegensatz zu den in Abb 3a und Abb 3b aufgezeigten Mängeln ist die in Abb 3c dargestellte Entmischung von außen nicht zu erkennen. Für die Detektion dieser "inneren" Auffälligkeiten kommen zerstörungsfreie Prüfverfahren zum Einsatz. Hierzu eignen sich das Radar- sowie das Ultraschallechoverfahren.

Hierbei können mit dem Ultraschallechoverfahren Kiesnestern und Entmischungen in Abhängigkeit des Messrasters ab einer bestimmten Größenordnung zuverlässig geortet werden. Jedoch gelangt dieses Verfahren an seine Grenze, wenn sich der Kernbeton von der zugänglichen Betonschale abgelöst hat und kein akustischer Verbund mehr gegeben ist. In diesem Fall findet eine Totalreflexion der elastischen Wellen an dieser Grenzfläche statt, so dass keine Aussage über Bereiche hinter der Delamination getroffen werden kann.

Bei einseitiger Zugänglichkeit der Elementwand stellt dies ein großes Problem dar, da ein fehlender akustischer Verbund, der im Submillimeterbereich liegen kann, keine Aussage über den hinter der Delamination liegenden Kernbeton erlaubt.

In diesem Fall hat das Radarverfahren den Vorteil, dass eine Delamination keine Totalreflexion der elektromagnetischen Energie zur Folge hat, so dass mit dem Radarverfahren der Zustand des Kernbetons auch bei einseitigem Zugang untersucht werden kann.

2.3 Beispiel einer Elementwanduntersuchung mit Radar und Ultraschall

Um die Möglichkeiten einer Datenfusion zu unterstreichen, wird in diesem Abschnitt an einem Beispiel erläutert, wie die Datenfusion die Aussagekraft bei einer Prüfaufgabe erhöhen kann. Zu Vergleichszwecken im Rahmen eines Wettbewerbs wurde eine Elementwand mit einer Länge von 6,00 m, einer Höhe von 2,36 m und einer Dicke von 0,30 m (Dicke der Betonschalen jeweils 0,06 m) errichtet, die in Lage und Größe bekannte Fehlstellen enthielt. Sowohl die Lage als auch die Art, Anzahl und Größe der Fehlstellen war den teilnehmenden Messteams im Vorfeld der Untersuchungen unbekannt. Ziel war es nun, möglichst viele dieser Auffälligkeiten zu detektieren, wobei die Wahl des Prüfverfahrens dem Prüfer überlassen wurde.

Aus diesem Grund wurden von Seiten der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung sowohl das Radar- als auch das Ultraschallechoverfahren angewendet, um die Grenzen, die jedes Verfahren aufweist, mit dem anderen Stärken des anderen Verfahrens zu kompensieren. Die zu untersuchende Elementwand ist in **Abb 4** dargestellt.



Abb 4 untersuchte Elementwand mit bekannten Fehlstellen

Die Radaruntersuchung wurde mit einer 2,0 GHz Antenne und dem Radarprüfsystem GSSI SIR 20 durchgeführt (s. Abb 5a), das Messraster betrug 10 cm x 10 cm. Weiterhin wurde eine tieffrequente Antenne mit einer Mittenfrequenz von 900 MHz in einem Messraster von 20 cm x 20 cm verwendet.

Die Ultraschalluntersuchungen erfolgten aufgrund der Größe der Fläche und dem Ziel der Optimierung der Aufnahmezeit mit dem Acsys Mira Lineararray (s. Abb 5b), wobei die Messdaten in einem Messraster von 20 cm x 20 cm und mit einer Frequenz von 75 kHz aufgezeichnet wurden.



a) Abb 5 verwendete Prüfgeräte für die Untersuchung der Elementwand; a) GSSI SIR 20 und 2,0 GHz Palm Antenne (Quelle: BAM 8.2) b) ACSYS Mira A1040 (Quelle: Acsys)

2.4 Ergebnisse der Radaruntersuchungen

Die Ergebnisse der Radaruntersuchungen sind zusammen mit den rot markierten Auffälligkeiten in ausgewählten Tiefenschnitten in Abb 6 dargestellt.



a) GSSI SIR 20 mit 2,0 GHz Antenne - Tiefenschnitt zwischen 0 - 10 cm



b) GSSI SIR 20 mit 2,0 GHz Antenne - Tiefenschnitt zwischen 12 - 30 cm



c) GSSI SIR 20 mit 900 MHz Antenne - Tiefenschnitt bei 28,5 cm



d) GSSI SIR 20 mit 900 MHz Antenne - Tiefenschnitt zwischen 20 - 30 cm

Abb 6 Ergebnisse der Radaruntersuchungen in ausgewählten Tiefenschnitten

An den Ergebnissen in Abb 6 können die Vorzüge des Radarverfahrens deutlich dargestellt werden.

So wird in Abb 6a die oberflächennahe Bewehrung der vorderen Betonschale sehr deutlich sichtbar gemacht. Dies liegt zum Einem in den physikalischen Eigenschaften des Verfahrens begründet, welche eine Totalreflexion der elektromagnetischen Wellen an metallischen Einbauteilen zur Folge haben. Zum Anderen ist die Wahl der hochfrequenten Antenne dafür verantwortlich, dass die Bewehrung sehr fein und präzise aufgelöst werden kann. Weiterhin sind die beiden Anschlussfugen der drei Teilstücke der Elementwände sehr gut im Tiefenschnitt in Abb 6a ersichtlich (rot gestrichelt markiert). Im Tiefenschnitt der Abb 6b sind drei Auffälligkeiten im Kernbeton der Elementwand zu erkennen. Jedoch wirkt sich bei dieser hochfrequenten Antenne die begrenzte Eindringtiefe in den Beton aus. So können keine Aussagen über den kompletten Dickenbereich des Kernbetons getroffen werden. Aus diesem Grund kam im zweiten Schritt der Radaruntersuchungen eine tieffrequente Antenne zum Einsatz, um die Auffälligkeiten im gesamten Dickenbereich der Elementwand erfassen zu können. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in den Abb 6d dargestellt.

Es zeigt sich in beiden Tiefenschnitten, dass sich im linken Bereich der Elementwand eine Auffälligkeit über die gesamte Höhe des Bauteils erstreckt. Weiterhin sind im mittleren Bereich kleiner örtlich begrenzte Verdachtsstellen zu erkennen, die aufgrund ihrer Größe auf mögliche Kiesnester hinweisen können. Im rechten Bereich des Untersuchungsobjekts zeichnet sich in allen drei Tiefenschnitten scharf die Fensteröffnung ab (Vgl. mit Abb 4). Im Umkreis dieser Öffnung sind zusätzlich weitere Verdachtsstellen im unteren Bereich zu vermuten.

Zusammengefasst liefert das Radarverfahren mit einer hochfrequenten Antenne somit eine präzise Darstellung der oberflächennahen Bewehrung. Verdachtsstellen über die gesamte Dicke des Kernbetons sind hingegen mit einer tieffrequenten Antenne besser zu detektieren.

2.5 Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen

Die Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen sind in Abb 7 zusammengefasst. Grün markierte Bereiche deuten hierbei auf Auffälligkeiten hin.



b) Acsys MIRA A1040 mit 75 kHz - Tiefenschnitt bei 30 cm

Abb 7 Ergebnisse der Ultraschalluntersuchungen in ausgewählten Tiefenschnitten

Ein Vergleich der Ergebnisse der Abb 7 mit den Radarergebnissen kommt zu dem Ergebnis, das mit dem Ultraschallechoverfahren deutlich mehr Verdachtsstellen detektiert werden können. Im Tiefenschnitt von 24 cm in Abb 7a werden sowohl die Auffälligkeiten geortet, die auch mit dem Radarverfahren sichtbar gemacht werden konnten. Zusätzlich werden jedoch weitere Fehlstellen detektiert. Der Tiefenschnitt in 30 cm in Abb 7b entspricht der Rückwand der Elementwand, wo die hintere Betonschale auf die Grenzfläche zu Luft trifft. An dieser Grenzfläche zu Luft findet aufgrund der physikalischen Eigenschaften der elastischen (Transversal-)Wellen eine Totalreflexion statt. Ist diese Rückwand über die gesamte Fläche des Messobjekts deutlich erkennbar (in diesem Fall bedeutet dies eine rote Färbung), so ist dies ein Indiz dafür, dass die Tiefenbereiche vor der Rückwand ungestört sind und keine Auffälligkeiten vorliegen. Umgekehrt deuten abgeschattete Rückwandbereiche darauf hin. dass die elastischen Wellen schon im Bauteil eine Totalreflexion hin zur Oberfläche erfahren haben, was auf Fehlstellen im Objekt hindeutet. Wird Abb 7b auf diese Weise interpretiert, können alle blauen Bereiche als Hinweise aufgefasst werden, dass an diesen geometrischen Orten ein Verdacht auf eine Fehlstelle geäußert werden kann, wobei über die Tiefenlage der Fehlstelle keine Aussage möglich ist. Diese Verdachtsstellen infolge einer abgeschatteten Rückwand sind in Abb 7b grün markiert.

Nachteilig wirkt sich beim Ultraschallechoverfahren aus, dass die oberflächennahe Bewehrung nicht darstellbar ist, da diese sich im Nahfeld der Prüfköpfe befindet und deshalb nicht aufgelöst werden kann.

Somit liefert das Ultraschallechoverfahren zusammengefasst deutlich mehr Hinweise auf Verdachtsstellen unsachgemäßer Ausführung als das Radarverfahren. Jedoch kann die oberflächennahe Bewehrung nicht scharf dargestellt werden.

2.6 Grafische Überlagerung der Ergebnisse

Wie in Kapitel 2.4 und Kapitel 2.5 gezeigt werden konnte, hat jedes der zwei angewendeten ZfPBau Verfahren seine Vor- und Nachteile bei der Untersuchung einer Elementwandkonstruktion. Dies legt den Schluss nahe, die Ergebnisse beider Untersuchungen zu überlagern, um die bestmöglichen Informationen über das Bauteil zu erhalten. In Abb 8 wird diese Überlagerung, die als eine Art "grafische Datenfusion" betrachtet werden kann, dargestellt.



a) GSSI SIR 20 mit 2,0 GHz Antenne - Tiefenschnitt zwischen 0 - 10 cm



b) Acsys MIRA A1040 mit 75 kHz - Tiefenschnitt bei 30 cm

Abb 8 grafische Überlagerungen der Verdachtsstellen (rot - detektierte Auffälligkeiten mit Radar; grün - detektierte Auffälligkeiten mit Ultraschall) a) Darstellung der Verdachtsstellen in einem Radartiefenschnitt b) Darstellung der Verd

Die grafische Datenfusion in Abb 8 lässt folgende Schlüsse zu:

- Die oberflächennahe Bewehrung wird mit dem Radarverfahren und der Anwendung einer hochfrequenten Antenne präzise dargestellt.
- Die Anschlussfugen der einzelnen Elementwandabschnitte sind mit dem Radarverfahren anhand der unterbrochenen Bewehrungsführung (rot gestrichelt) nachweisbar.
- Das Radarverfahren mit einer tieffrequenten Antenne liefert Hinweise auf Verdachtsstellen, jedoch sind diese im Vergleich mit dem Ultraschallechoverfahren unvollständig.
- Das Ultraschallechoverfahren liefert deutlich mehr Verdachtsstellen als das Radarverfahren. Hilfreich erweist sich hierbei das Kriterium der abgeschatteten Rückwand.
- Jedoch werden auch die Anschlussfugen mit dem Ultraschallechoverfahren als Fehlstellen interpretiert.
- Mit dem Radarverfahren wird diese Fehlinterpretation, die bei alleiniger Anwendung des Ultraschallechoverfahrens auftreten kann, entkräftet.
- Zusammengefasst bedeutet dies, dass die grafische Datenfusion bei der geschilderten Pr
 üfaufgabe von Radar und Ultraschall dabei hilft, eine gr
 ößere Anzahl von Verdachtsstellen zu detektieren. Weiterhin k
 önnen "fehlerhafte" Verdachtsstellen entkr
 äftet werden. Zus
 ätzlich beinhaltet die Fusion Informationen
 über den Aufbau des Bauteils, beispielsweise
 über die oberfl
 ächennahe Bewehrung.

Abschließend soll erwähnt werden, dass die Auswertung der Elementwanduntersuchungen mit dem Hersteller der Fehlstellen ergab, dass mit der Kombination der beiden Verfahren alle eingebauten Fehlstellen detektiert werden konnten.

Weiterhin konnte an diesem Beispiel nachgewiesen werden, dass die Fusion von Daten für diese Prüfaufgabe einen Informationsgewinn liefert, so dass die Wahl dieser Prüfaufgabe die Forderung des Forschungsvorhabens nach einem baupraktischen Nutzen erfüllt.

3 Entwicklung von Testkörpern

3.1 Allgemeines

Einen Hauptbestandteil der ZfPBau macht die Untersuchung des heterogenen Werkstoffs Beton aus. Jedoch ist es durch die zufällige Anordnung der Gesteinskörnung bei der Herstellung nicht möglich, einen allgemeingültigen Referenzkörper aus Beton zu erstellen. Vielmehr kann nur angestrebt werden, sich anhand der meistverbauten Materialien eine Referenz für eine bestimmte Prüfaufgabe zu konstruieren [2]. Zusätzlich zur nicht umsetzbaren Reproduzierbarkeit ergibt sich bei der Datenfusion das Problem, dass die aufbereiteten Messdaten, die an einem Bauteil aus Beton aufgezeichnet wurden, Artefakte (z. B. Reflexionshyperbeln durch Überlagerungseffekte, obwohl kein Reflektor vorhanden ist) beinhalten können. Negativ wirkt sich ebenfalls aus, dass die Gesteinskörnung in der gleichen Größenordnung wie die zu detektierenden Einbauteile wie beispielsweise die Bewehrung liegt.

Um die Problemstellung der Datenfusion im ersten Schritt zu vereinfachen, ist ein homogener und isotroper Referenzkörper ausgewählt worden. Damit konnte die Datenfusion an einem genau bekannten Objekt durchgeführt und optimiert werden.

3.2 Referenzkörper aus Polyamid

Wie in Kapitel 3.1 erläutert, ist eine homogene und isotrope Referenz erforderlich, um die Datenfusion im ersten Schritt an einem genau definierten Testkörper durchführen zu können. Hierzu bot sich ein Block aus Polyamid an, da dieser eine homogene Struktur aufweist und leicht zu bearbeiten ist. Weiterhin bietet die glatte Oberfläche kontinuierliche Ankopplungsbedingungen für die Untersuchung mit dem Ultraschallechoverfahren. Der ausgewählte Testkörper hat eine Länge von x = 1,00 m, eine Breite von y = 0,60 m und eine Höhe von h = 0,30 m (s. Abb 9).



Abb 9 Darstellung des Referenzkörpers aus Polyamid

Nachdem die Referenzmessung am ungestörten Polyamidblock durchgeführt wurde, werden genau definierte Bohrungen (s. Abb 10) in asymmetrischer Lage eingebracht, um einen Reflektor zu simulieren. Zusätzlich können verschiedene Bauteile in die Bohrung eingesteckt werden, um die Änderung der Materialeigenschaften des Reflektors in den Messdaten zu erfassen.



Abb 10 Darstellung der eingebrachten Bohrung im Referenzkörper

Durch die Untersuchungen des bekannten Polyamidblocks mit den ZfPBau Verfahren liegen nun Messdaten eines Objekts als Referenz vor, welches als genau definiert betrachtet werden kann.

3.3 Elementwandkonstruktionen mit definierten Fehlstellen

Nachdem die Möglichkeiten der Datenfusion im ersten Schritt an einem homogenen isotropen Testkörper aus Polyamid bestimmt wurden, erfolgt anschließend die Untersuchung von realen Bauteilen, die jedoch definiert hergestellt werden, so dass deren Aufbau genau bekannt ist. Da die Datenfusion auf die Untersuchung von Elementwänden angepasst werden soll, werden in diesem Kapitel die konzipierten Elementwände mit den eingebauten Fehlstellen vorgestellt. Einen Überblick über den Aufbau der ersten Elementwand gibt Abb 11.



Abb 11 schematischer Aufbau der zu untersuchenden ersten Elementwand; entnommen aus [4]

Einige praxisrelevante Schädigungen sind in diesem Testkörper eingebaut worden.

Neben der Ausbildung eines Schüttkegels, der aus einem Monokorngemisch besteht, wurden zusätzlich zwei verschiedene Betonrezepturen mit unterschiedlichem Größtkorn als Kernbeton verwendet.

Des weiteren wurden künstlich Delaminationen mit einer Größe von 2,5 cm bis 25 cm erzeugt, indem dünne Folien auf der Innenseite einer Betonschale (s. Abb 12b) aufgebracht wurden.



a) b) Abb 12 Aufnahmen der Elementwand; a) Ansicht der Elementwand; b) Beispiel von eingebauten Delaminationen

Weiterhin wurde an der BAM eine zweite Elementwand konstruiert, die neben metallischen Reflektoren auch Fehlstellen in Form von Kiesnestern beinhaltet. Der Aufbau dieser Elementwand ist in Abb 13 dargestellt.



Abb 13 schematischer Aufbau der zu untersuchenden zweiten Elementwand; entnommen aus [4]



Abb 14 Aufnahmen der zweiten Elementwand; Quelle: BAM 8.2 a) eingebaute Auffälligkeiten; b) Beispiel von eingebauten Kiesnestern

An diesen konzipierten Testkörpern, in denen die Lage der Fehlstellen genau bekannt ist, wird der zweite Teil der zerstörungsfreien Voruntersuchungen durchgeführt, die die Grundlage der Datenfusion für die gewählte Prüfaufgabe an realen Bauteilen bilden.

4 Hardware

4.1 Allgemeines

Für die zerstörungsfreie Ortung und Lagebestimmung von Bewehrungsstäben, Spanngliedern und Auffälligkeiten können die zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom eingesetzt werden. Ziel dieses Vorhabens ist es, die drei Verfahren prüfaufgabenorientiert miteinander zu fusionieren.

In den folgenden Kapiteln werden die verwendeten Prüfgeräte vorgestellt. Ausgewählt wurden diese Prüfgeräte aufgrund ihrer Einsetzbarkeit bei baupraktischen Anwendungen als auch aufgrund ihrer Steuerungsmöglichkeit durch ein scannendes Messsystem.

4.2 Radar - Mala Pro Ex

Das Mala Pro Ex System ist ein Radarprüfsystem, welches im Rahmen des Forschungsvorhabens mit drei unterschiedlichen Antennen bestückt wird. Abb 15 zeigt dieses System beispielhaft mit einer Antenne der Mittenfrequenz von 2,3 GHz.



Abb 15 Mala Pro Ex Radarprüfsystem mit einer Antenne der Mittenfrequenz 2,3 GHz; Quelle: BAM

Dieses angewendete Radarprüfsystem basiert auf der Aussendung kurzzeitiger elektromagnetischer Impulse. Die Control Unit dient hierbei zur Steuerung, Erzeugung und Aufzeichnung der Sende- bzw. Empfangssignale. Das dabei aufgezeichnete Signalbild wird auf einem externen Monitor visualisiert. Aufgrund der hohen Pulsfolge der Sendesignale ist es nun möglich, quasikontinuierliche Messungen mit bewegten Antennen durchzuführen, so dass in kurzer Zeit im Gegensatz zum Ultraschallechoverfahren eine große Anzahl von Messwerten vorliegt.

Aufgezeichnet wird der zeitliche Verlauf der Signalamplitude der Empfangsantenne, der dann grauwertskaliert auf einem externen Monitor dargestellt wird (s.Abb 15). Unterschiedliche Grauwerte entstehen hierbei genau dann, wenn sich die dielektrischen Eigenschaften des untersuchten Mediums ändern. Um eine spätere Zuordnung zu einem geometrischen Ort möglich zu machen, erfolgt eine weggesteuerte Messdatenaufnahme [2], [5].

Eine ausführliche Beschreibung der Anwendung von Impulsradar an Beton ist im entsprechenden Merkblatt B10 der DGZfP (Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung) [6] zu finden.

4.3 Ultraschall - Acsys A1220

Das Ultraschallecho-Verfahren wird im Merkblatt B4 der DGZfP [7] beschrieben. Grundlagen werden u.a. in [8] erläutert. Die nachfolgende kursiv gekennzeichnete Beschreibung wurde in [9] veröffentlicht.

Im Bauwesen wird Ultraschallecho u.a. für folgende Prüfaufgaben eingesetzt:

a) Messung von Bauteildicken

b) Ortung von Bewehrung (Sonderfälle), Spanngliedern und Verdichtungsmängeln

Baupraktisch wird meist die Ultraschallecho-Anordnung verwendet, bei der sich Sender und Empfänger auf der gleichen Seite des Bauteils befinden, und somit nur eine einseitige Zugänglichkeit erforderlich ist. Die Funktionsweise beruht auf der gerichteten Einkopplung von Ultraschallimpulsen einer bestimmten Wellenart in das Material über einen Sendekopf. Die Schallwellen werden bei der Änderung der akustischen Impedanz (abhängig von der Schallausbreitungsgeschwindigkeit und der Rohdichte des Mediums) im untersuchten Bauteil reflektiert, wobei an Außenflächen, Hohlräumen und Rissen, d.h. an Übergängen bzw. Grenzflächen zur Luft, nahezu eine Totalreflexion erfolgt. Das reflektierte Signal wird über der Zeit aufgetragen (Abb 16 oben). Die Messung erfolgt im hier verwendeten Niederfrequenzbereich üblicherweise mit getrennten Sende- und Empfangsköpfen (bi-statische Anordnung).



Abb 16 Signalamplitude über der Zeit aufgetragen (A-Bild, oben); Schnitte zur Darstellung von Messergebnissen

Die Ankopplung ebener Prüfköpfe erfolgt mit einem Koppelmittel. Anwenderfreundlicher sind deshalb koppelmittelfrei arbeitende Prüfköpfe, wie sie auch im Rahmen dieses Forschungsvorhabens eingesetzt werden. Sie haben über eine Spitze einen Punktkontakt mit dem Bauteil und werden zur Messung, wie in Abb 17, dargestellt, einfach an das Bauteil gepresst.



Ultraschallecho-Messung mit dem A1220 (koppelmittelfrei arbeitende Prüfköpfe)

Abb 17 Bei einer Dickenmessung (Fall a) reicht unter günstigen Randbedingungen eine punktuelle Messung aus. Bei dem Anwendungsfall b ist die Messung auf einem Bereich der Oberfläche erforderlich, z. B. entlang einer Linie oder auf einer Fläche. Je nach Geräteausstattung ist die Darstellung der Reflexionen im Bauteil als B- oder C-Bild möglich (Abb 16 unten).

Aufgrund der deutlich geringeren Geschwindigkeit der Messdatenaufnahme im Vergleich mit dem Radarverfahren wird der Messpunktabstand beim Ultraschallechoverfahren im Rahmen des Forschungsvorhabens größer gewählt, um den zeitlichen Aufwand zu optimieren.

4.4 Wirbelstrom - Proceq Profoscope

Das Profoscope, welches in Abb 18 dargestellt ist, beruht auf dem Wirbelstromprinzip, mit dem in einer Messung jeweils eine der folgenden Prüfaufgaben gelöst werden kann:

- Ortung von Bewehrung
- Ortung des Mittelpunkts zwischen Bewehrungsstäben zum schadfreien Bohren
- Bestimmung der Betondeckung
- Abschätzung des Reflektordurchmessers



Abb 18 Profoscope; Quelle: BAM 8.2

Dazu wird in eine im Gerät befindliche Spule ein Gleichstrom induziert und somit ein Magnetfeld in Tiefenrichtung erzeugt. Durch das ständige An- und Abschalten des Stroms im Profoscope bricht das primäre Magnetfeld zusammen und erzeugt dabei im metallischen Objekt einen Wirbelstrom, dessen Stärke von der Tiefenlage des metallischen Reflektors im Bauteil und dessen Geometrie abhängig ist. Zusätzlich erzeugt dieser induzierte Wirbelstrom ein sekundäres Magnetfeld, welches auch auf die Spule wirkt, die nun in einen "Empfangsmodus" umgeschaltet wird. Aufgrund der induzierten Spannung kann nun entweder auf die Tiefenlage oder auf den Durchmesser des metallischen Reflektors geschlossen werden.

Zusammengefasst dient die Wirbelstromprüfung somit dazu, Informationen über die oberflächennahe Bewehrung zu gewinnen. Aussagen über tiefer liegende Bereiche sind nur in Ausnahmefällen möglich.

4.5 Automatisierte Messungen - OSSCAR Scanner

Eine Grundvoraussetzung für die Durchführung von Fusionen verschiedener Messdaten ist es, deckungsgleiche Messfelder unterschiedlicher Verfahren zu erzeugen.

Dies ist mit dem OSSCAR-Scanner (On-Site SCAnneR), der in Abb 19 dargestellt ist, möglich [15].



Abb 19 (a) OSSCAR Scannersystem bestehend aus Rahmen und Steuerungseinheit mit den verwendeten Messgeräten für (b) Radar (Mala ProEx), (c) Ultraschallecho (ACSYS A1220) und (d) Wirbelstrom (Proceq Profoscope); entnommen aus [10]

Der OSSCAR-Scanner ist hierbei dazu geeignet, eine kombinierte Untersuchung mit den Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom durchzuführen und die Ergebnisse vor Ort bildgebend darzustellen. Hierbei besteht das System aus einem Rahmen und einer Steuerungseinheit (s. Abb 19). Um nun eine Vergleichbarkeit der verschiedenen Verfahren zu ermöglichen, müssen die Daten in einem einheitlichen Koordinatensystem aufgezeichnet werden [10].

Dazu werden die Prüfköpfe bzw. Antennen wie in Abb 19b) - d) am Rahmen befestigt und die entsprechenden Messgeräte mit der Steuerungseinheit verbunden [10].

Zusammengefasst werden die Messungen also mit dem OSSCAR Scanner aufgezeichnet, um zum Einen Messdaten zu erhalten, die präzise einem geometrischen Ort zugeordnet werden können. Zum anderen ist mit dieser Art der Datenaufnahme sichergestellt, dass die Messfelder deckungsgleich sind.

5 Eingesetzte Software und Algorithmenentwicklung

5.1 Allgemeines

Umfangreiche Voruntersuchungen für die Fusion von Datensätzen zerstörungsfreier Prüfverfahren wurden in [12] und [13] dokumentiert. Ein wichtiges Ergebnis der Untersuchungen war die Erkenntnis, die Datenfusion von Rohdaten durchzuführen, um Artefakte zu unterdrücken. Weiterhin wurde in diesen Forschungsarbeiten nachgewiesen, dass das Messraster unterschiedlicher Prüfverfahren nicht gleich sein muss. Auf dieser Grundlage ist es möglich, Messzeit gerade bei den Ultraschalluntersuchungen einzusparen.

In den folgenden Kapiteln werden unterschiedliche Algorithmen vorgestellt, die für eine Datenfusion im Rahmen des Forschungsvorhabens entwickelt wurden. Die sollen mit dem Ziel variiert werden, einen Arbeitsablauf mit einem bestmöglichen Ergebnis für die festgelegte Prüfaufgabe zu entwickeln.

5.2 MATLAB Routinen zur Vorbereitung der Datensätze

Am Beispiel eines Rohdatensatzes, der in Abb 20 dargestellt ist, werden die unterschiedlichen MATLAB Algorithmen vorgestellt. Bevor diese Algorithmen jedoch angewendet werden können, ist es erforderlich, die aufgezeichneten Messdaten zu normieren. Dies bedeutet, dass Bauteildicken wie die in Abb 20 eingezeichnete Rückwand als Referenz dienen und in gleicher Tiefe im entsprechenden B-Bild erscheinen müssen.



Abb 20 Rohdaten; a) B-Bild aufgezeichnet mit Radar; b) B-Bild aufgezeichnet mit Ultraschall

5.2.1 Normierung der Datensätze

Wie in Abb 21 ersichtlich, wurden im ersten Schritt die B-Bilder unterschiedlicher ZfPBau Verfahren interpoliert und normalisiert. Dies ist erforderlich, um Unterschiede im Messraster und der Tiefenachse (siehe Tiefe der Rückwand in beiden B-Bildern in Abb 20) auszugleichen.



Abb 21 interpolierte und normalisierte Rohdaten; a) B-Bild aufgezeichnet mit Radar; b) B-Bild aufgezeichnet mit Ultraschall

5.2.2 Erste Ableitung der Signalamplituden

Wird die erste Ableitung der Signalamplituden gebildet, wird, wie im B-Bild in Abb 22 beispielhaft gezeigt, die Änderung der Signalamplituden dargestellt. Dies bedeutet, dass hohe Kontraste genau dann entstehen, wenn sich die Signalamplituden zweier benachbarter Punkte stark ändern.



Abb 22 erste Ableitung der Signalamplituden a) B-Bild aufgezeichnet mit Radar; b) B-Bild aufgezeichnet mit Ultraschall

Dieser Auswertungsschritt wurde ebenfalls als Vorbereitung notwendig, um die Möglichkeit zu eröffnen, eine Datenfusion mit unterschiedlichen Datengrundlagen durchführen zu können.

5.3 MATLAB Routinen für die Datenfusion

5.3.1 Gewichtung und Addition der Signalamplituden

Eine Möglichkeit, einen Mehrwert aus der Datenfusion zu erzielen, ist es, die Datensätze unterschiedlich zu gewichten und anschließend zu addieren. Beinhaltet beispielweise der Radardatensatz eine wichtige Information, die für die Lösung der Prüfaufgabe unerlässlich ist, wird die Ableitung der Signalamplituden der Radardaten entsprechend gewichtet. So ist im Beispieldatensatz die Information über die oberflächennahe Bewehrung ausschließlich im Radardatensatz enthalten, wohingegen die Information der Rückwand sowohl im Radar- als auch im Ultraschalldatensatz ausgelesen werden kann. Dementsprechend bringt eine stärkere Gewichtung des Radardatensatzes in diesem Fall einen Vorteil bei der Detektion der oberflächennahen Bewehrung.

In Abb 23 sind verschiedene Gewichtungsfaktoren mit anschließender Addition dargestellt, um ihren Einfluss auf das Ergebnis zu verdeutlichen.



Abb 23 Addition - Einfluss unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren auf die Datenfusion a) gleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall; b) ungleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall; c) ungleiche Gewichtung der Beträge von Radar und Ultraschall; b) ungleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall; c) ungleiche Gewichtung der Beträge von Radar und Ultraschall

Werden wie in Abb 23a die Radar- und Ultraschalldaten gleich gewichtet, ist die Information der Rückwand in den fusionierten Daten vorhanden. Verloren geht allerdings die Information über die oberflächennahe Bewehrung, die einem Radargramm wie in Abb 20a anhand der Reflexionshyperbeln eindeutig entnommen werden kann. Demzufolge ist die gleiche Gewichtung in diesem Fall aufgrund eines signifikanten Informationsverlusts nicht zielführend. Wird der Radardatensatz wie in Abb 23b oder Abb 23c entsprechend stärker gewichtet, kann dem B-Bild der fusionierten Daten die Information über die oberflächennahe Bewehrung eben-

falls entnommen werden.

5.3.2 Gewichtung und Subtraktion der Signalamplituden

Die Auswirkung der Subtraktion von B-Bildern unterschiedlicher Verfahren im Rahmen einer Datenfusion ist in Abb 24 dargestellt.



Abb 24 Subtraktion - Einfluss unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren auf die Datenfusion a) gleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall; b) ungleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall; c) ungleiche Gewichtung der Beträge von Radar und Ultraschall

In dieser Abbildung wird der Einfluss der Betragsbildung auf die Datenfusion erkennbar. So ist die Rückwand in Abb 24c deutlich stärker als in Abb 24a und Abb 24b erkenntlich. Ursache dafür ist die unterschiedliche Betragsbildung, da die Gewichtungsfaktoren konstant gehalten wurden.

Demzufolge sollte für eine optimale Datenfusion neben der Gewichtung auch die Betragsbildung als ein Parameter angesehen werden, um die Ergebnisse der Datenfusion zu optimieren.

5.3.3 Gewichtung und Multiplikation der Signalamplituden

Der Einfluss der Betragsfunktion in Kombination mit der Multiplikation der Datensätze wird in Abb 25 herausgestellt. Es zeigte sich, dass auch hier die Betragsfunktion dazu geeignet ist, das fusionierte Bild weiter zu optimieren. Im Gegensatz zur Subtraktion in Abb 24 ist das Produkt aus einem Radar- und einem Ultraschalldatensatz aussagekräftiger, wenn Abb 24 mit Abb 25 verglichen wird.







c) |GPR| * |US|

Abb 25 Multiplikation - Einfluss unterschiedlicher Beträge auf die Datenfusion a) ohne Betragsfunktion; b) Betragsfunktion bei Ultraschall; c) Betragsfunktion bei Radar und Ultraschall

Zusammengefasst wird deutlich, dass die Fusion von Datensätzen mit einer entsprechenden Gewichtung sowie einer optimierten Datenzusammenfügung (Multiplikation; Summation; Betragsfunktion etc.) deutlich an Aussagekraft gewinnt.

Um dies zu untermauern, werden in den folgenden Kapiteln die Fusionen aufgezeichneter Daten mit unterschiedlichen Algorithmen beschrieben, um die baupraktisch optimale Vorgehensweise im Rahmen des Forschungsvorhabens in die Praxis zu übertragen.

5.4 Rekonstruktion von Radardaten mit ReflexW

Messlinien, welche mit dem Radarsystem aufgenommen wurden, werden in das Programm ReflexW importiert, so dass sie dort als Rohdaten vorliegen (s. Abb 26). Diese werden durch mehrere Bearbeitungsschritte bearbeitet, so dass am Ende ein migrierter Datensatz für die Fusion zur Verfügung steht.

Im ersten Schritt wird die Vorlaufzeit, die das Signal von der Antenne bis zur Bauteiloberfläche benötigt, entfernt. Dabei wird die direkte Welle zwischen der Sende- und Empfangsantenne als die Nullzeit für die Angabe der Bauteiloberfläche festgelegt.



Abb 26 links - B-Bild der Rohdaten mit Vorlaufzeit; rechts - B-Bild ohne Vorlaufzeit

Der Versatz des Signales bezüglich der Nullachse ist im A-Bild in Abb 26 zu erkennen. Bevor die Daten weiter bearbeitet werden können, wird dieser Versatz entfernt, eine sogenannte Offset Korrektur durchgeführt. Desweiteren wird darauf folgend ein vorhandenes Signalrauschen reduziert, indem Frequenzen des Breitbandes ober- und unterhalb eines Nutzbereiches gedämpft werden (Abb 27).



Abb 27 A-Bild vor (links) und nach (rechts) der Offset-Korrektur und der Dämpfung der Frequenzen außerhalb des Nutzbereiches

Im weiteren Verlauf der Bearbeitung der Messdaten wurde die Zeitachse der Signale verkürzt Dabei ist darauf zu achten, dass eine mögliche Rückwandreflexionen nicht mit entfernt werden. Beim Durchlaufen der elektromagnetischen Wellen des Radarsignales durch das Bauteil verlieren diese einen Großteil ihrer Energie durch verschiedene Faktoren. Um diese Verluste zum Teil zu kompensieren, werden in einem weiteren Schritt die Amplituden der Signale verstärkt. Da die Dämpfung der Signale tiefenabhängig ist, muss die Verstärkung mit der Zeit variiert werden. Dies wurde in diesem Vorhaben mit Hilfe eines sogenannten "manual gain" durchgeführt und das Ergebnis ist in Abb 28 zu sehen.



Reflexionen der Bewehrung

Rückwandreflexion

Abb 28 B-Bild nach der Verkürzung der Zeitachse (links) und nachdem tiefenabhängig die Amplituden der Signale verstärkt wurden (rechts). Es resultiert eine bessere Sichtbarkeit von Punktreflektoren sowie flächigen Reflektoren wie der Rückwand

In einem letzten Schritt werden die so bearbeiteten Daten einer Migration unterzogen um ein sinnvolles Abbild des Aufbaues des Bauteiles zu erhalten. Zusätzlich wird die Einhüllende (envelope) gebildet.

5.5 Rekonstruktion von Ultraschalldaten

Die Messlinien, welche mit dem Ultraschallgerät A1220 aufgenommen wurden, werden zuerst mit einem Bandpassfilter bearbeitet, damit ein vorhandenes Signalrauschen entfernt wird wie in Abb 29 zu sehen ist. Danach wird ein spezielles Abbildungsverfahren, die SAFT-Rekonstruktion (*Synthetic Aperture Focusing Technique*) [11][14], angewendet. Die Empfangssignale werden dabei ähnlich der Tomographie vor ihrer Darstellung durch eine kohärente Überlagerungsrechnung verarbeitet. Als Resultat erhält man Datensätze, bei deren Darstellung innere Objekte ortsrichtig dargestellt werden und eine Verbesserung der Abbildung bei scannenden Verfahren.



Abb 29 Bandpassfilter der Ultraschallsignale

5.6 ZIBAmira Routinen für die Datenfusion

Aus den Erfahrungen der Datenfusion mit Hilfe von MATLAB Routinen wurden die Messdaten der Radar- und Ultraschallmessungen auch mit dem Programm ZIBAmira des Zuse Institut Berlin (ZIB) miteinander fusioniert. Das Programm wurde gewählt, da es vor allem im Bereich der 3D-Darstellung von Objekten viele Möglichkeiten der Bearbeitung der Messdaten ermöglicht und in einigen Anwendungsbereichen erfolgreich eingesetzt wird. Dafür wurde das Programm um weitere Einlesemodule für, in der ZfP-Praxis verwendete, Datenformate erweitert. Diese Daten können anschließend kombiniert (gleichzeitige Darstellung) und fusioniert (gewichtete Verrechnung zu einem neuen Datensatz) in ZIBAmira visualisiert werden. Dabei wurden die Radardaten stärker gewichtet, um keinen Informationsverlust über die oberflächennahe Bewehrung zu erhalten, wie dies im Kap. 5.3.1 festgestellt wurde. Bevor die Datensätze miteinander fusioniert werden konnten, sind die in den vorhergehenden Kapiteln 5.4 und 5.5 beschriebenen Schritte der Datenaufbereitung durchgeführt worden. Über programminterne Einstellmöglichkeiten können Einstellungen an den jeweiligen Koordinatenachsen der einzelnen Datensätze getroffen werden, so dass zum Beispiel die Rückwandreflexion als ortsgenauer Referenzpunkt bei den B-Bildern der Radar- und Ultraschaldaten in derselben Tiefenlage liegt.

<u>Daten</u>

Die einzulesenden Datensätze stammen aus kommerziellen ZfP-Messsystemen denen verschiedene Bild gebenden Verfahren zugrunde liegen: Radar und Ultraschall. Diese Daten liegen in proprietären Formaten vor.

Auswertung und Arbeitsablauf

Bei der Auswertung der Daten mit ZIBAmira wurde folgender Arbeitsablauf durchgeführt:

- 1. Einlesen der Datensätze unterschiedlicher Modalitäten
- 2. Visualisierung der einzelnen Datensätze

- 3. Optionale Registrierung der Daten mit Hilfe von starren Transformationen
- 4. Gewichtete Fusionierung der Daten in Abhängigkeit verfahrenstypischer Eigenschaften mit dem Arithmetik-Modul von ZIBAmira
- 5. Visualisierung der fusionierten Daten mit folgenden Methoden:
 - a. 2D-Schnitte (Orthoslice)
 - b. 3D-Isoflächen (Isosurface)
 - c. 3D-Volumenrendering (Volumen-Rendering)
 - d. Projektion maximaler Intensität auf die Seitenflächen (Maximum-Intensity-Projection)
- 6. Vermessung auf den visualisierten Daten



Abb 30 Addition und ungleiche Gewichtung von Radar und Ultraschall (1,5*Radar + Ultraschall)

Wie in Abb 30 beispielhaft zu sehen ist, sind Informationen nach der Fusion der Datensätze über die oberflächennahe Bewehrung (grüne Pfeile) genauso vorhanden wie auch die der Rückwand (rote Pfeile) und dem Vorhandensein eines Kiesnestes auf der rechten Seite des B-Bildes.

Ein weiterer Vorteil des Programmes ist die Möglichkeit der Fusion von 3D-Datensätzen von Radar- und Ultraschallmessungen.

6 Untersuchungen der Testkörper

6.1 Allgemeines

Ein Ziel des Forschungsvorhabens ist es, die Datenfusion für die zerstörungsfreie Untersuchung von Elementwänden baupraktisch anwendbar zu gestalten.

Deshalb wird neben der Entwicklung von Algorithmen ein dreistufiger Versuchsplan aufgestellt. Im ersten Schritt werden Referenzuntersuchungen an einem Polyamidblock durchgeführt. Diese haben zum Ziel, die Algorithmen für die Datenfusion festzulegen und die Wahl der Prüfgeräteeinstellungen zu erleichtern. Von Vorteil ist hierbei die Homogenität des Testobjekts, da das Gefügerauschen somit als gleichmäßig betrachtet werden kann und Artefakte so gut wie ausgeschlossen werden können.

Im zweiten Schritt werden Elementwände untersucht, deren Aufbau genau bekannt ist. An diesen Elementwänden werden die festgelegten Algorithmen mit den entsprechenden Geräteeinstellungen angewendet, überprüft und optimiert.

Im dritten Schritt erfolgt die Anwendung in der Praxis. Hierbei werden Elementwandkonstruktionen untersucht, deren innere Konstruktion bezüglich möglicher Auffälligkeiten nicht bekannt ist.

6.2 Untersuchungen am Polyamidblock

Die Untersuchungen am Polyamidblock dienen dazu, die verwendeten Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an einem homogenen Testkörper zu charakterisieren. Aus diesem Grund wurden Voruntersuchungen mit unterschiedlichen Parametereinstellungen durchgeführt. Variiert wurde hierbei unter anderem die Frequenz, sowohl bei den Radar- als auch bei den Ultraschalluntersuchungen. Dies hat den Hintergrund, dass eine höhere Frequenz dazu führt, dass die innere Struktur des Polyamidblocks feiner aufgelöst wird. Nachteilig wirkt sich jedoch die reduzierte Eindringtiefe aus. Des weiteren wurde die Polarisation der Prüfköpfe bzw. Antennen variiert, um die Auswirkung der Randeffekte auf das Ergebnisbild zu minimieren. Zusätzlich wurden die Ultraschalluntersuchungen mit Transversal- und Longitudinalwellenprüfköpfen durchgeführt. Ein Beispiel der Untersuchung des Polyamidblocks mit dem Radarverfahren ist in Abb 31 dargestellt.



a)

Beispiel einer Untersuchung des Polyamidblocks - Radarverfahren Abb 31 a) ausgerichteter OSSCAR Scanner mit Radarantenne; b) Nahaufnahme der Radarantenne

Die Untersuchungen wurden in folgendem Messraster durchgeführt:

- 2 mm Abstand zwischen den einzelnen A-Bildern (Messpunktabstand) Radar: 2 mm Abstand zwischen benachbarten Messlinien (Spurabstand)
- Ultraschall: 10 mm Abstand zwischen den einzelnen A-Bildern (Messpunktabstand) 10 mm Abstand zwischen benachbarten Messlinien (Spurabstand)

Da die Messdatenaufnahme beim Ultraschallechoverfahren deutlich mehr Zeit benötigt, wurde das Messraster auf 10 mm vergrößert. Ob diese Vorgehensweise praktikabel ist, soll ebenfalls am Referenzblock nachgewiesen werden.

Die durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 1 in einer Übersicht zusammengefasst.

Radar	Ultraschall
1,2 GHz horizontal/vertikal	100 kHz Longitudinal horizontal/vertikal
1,6 GHz horizontal/vertikal	50 kHz Transversal horizontal/vertikal
2,3 GHz horizontal/vertikal	

Tabelle 1: durchgeführte Versuchsreihen am Polyamidblock

6.2.1 Erläuterungen zu den Radaruntersuchungen

Um die getroffenen Schlussfolgerungen nachvollziehbar zu gestalten, sind in Abb 32 die signifikanten Reflexionen in einem Radargramm erläutert, welches am Polyamidblock mit einer 1,2-GHz Antenne und einer Polarisation parallel zur y-Achse aufgezeichnet wurde.



Abb 32 Darstellung der signifikanten Reflexionen in einem Radar B-Bild

Die direkte Welle, die sich mit nahezu Lichtgeschwindigkeit vom Sender zum Empfänger in Luft ausbreitet, ist in Abb 32 bei ca. 100 µs zu erkennen. Weiterhin zeichnet sich in einer Tiefe von ca. 320 µs die Rückwand des Polyamidblocks als durchgehende Reflexion ab. Die Reflexionen von den Seitenrändern des Polyamidblocks, die aufgrund der näherungsweise kugelförmigen Wellenausbreitung ebenfalls von der Empfangsantenne erfasst werden, bilden sich durch vom Rand hin schräg in die Tiefe laufende Reflexionen ab. Dies liegt darin begründet, dass mit zunehmender Entfernung der Antenne vom Rand die Reflexion von der Antenne nun erst nach einer längeren Laufzeit der Welle aufgrund des nun längeren Laufwegs zum Rand registriert wird. Es ist zu beachten, dass die Tiefenachse aufgrund der anschließenden Datenfusion nicht korrekt skaliert ist und somit die Laufzeiten nicht korrekt in Tiefen umgerechnet werden können.

In Abb 33 sind beispielhaft sechs Radargramme (Radar B-Bild) dargestellt, die den Einfluss unterschiedlicher Antennenmittenfrequenzen und Polarisationen verdeutlichen. Aus der Abb 33 können folgende Schlussfolgerungen gezogen werden:

- Mit zunehmender Antennenmittenfrequenz (in Abb 33 von links nach rechts) verbessert sich die Auflösung, die Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen nimmt jedoch ab. Dies ist an dem schwächer werdenden Rückwandsignal bei ca. 300 µs zu erkennen. Es ist zu beachten, dass die Skalierung der Zeitachse nicht korrekt ist, dies ist dem Umstand geschuldet, dass die B-Bilder für eine Datenfusion in der Tiefe gleich skaliert sein müssen.
- Bei einer Antennenpolarisation parallel zur y-Achse zeichnen sich die Effekte der Seitenränder deutlicher im Radargramm ab. So sind die Randeffekte in der unteren Zeile deutlich stärker als in der oberen Zeile der Abb 33.



Abb 33 Radar B-Bilder unterschiedlicher Antennenmittenfrequenz und Polarisation; aufgezeichnet am Polyamidblock

6.2.2 Erläuterung zu den Ultraschalluntersuchungen

Die signifikanten Reflexionen in einem Ultraschall B-Bild, aufgenommen mit einer Frequenz von 55 kHz und einer Polarisation (Transversal) parallel zur x-Achse sind in Abb 34 eingezeichnet. Das Sendesignal ist hierbei zwischen 100 und 200 µs deutlich zu erkennen. Weiterhin zeichnet sich in einer Tiefe von ca. 650 µs die Rückwand des Polyamidblocks genau wie beim Radarverfahren als durchgehende Reflexion ab. Die Reflexionen von den Seitenrändern des Polyamidblocks bilden sich ebenfalls durch vom Rand hin schräg in die Tiefe laufende Reflexionen ab.

In Abb 35 werden verschiedene B-Bilder des Ultraschallverfahrens einander gegenübergestellt.



Abb 34 Darstellung der signifikanten Reflexionen in einem Ultraschall B-Bild

Folgende Schlussfolgerungen können aus Abb 35 gezogen werden:

- Wird die linke Spalte (50 kHz Transversal) mit der rechten Spalte (100 kHz longitudinal) verglichen, ist ersichtlich, dass sich die Rückwand deutlicher abzeichnet, wenn mit einem Transversalwellenprüfkopf und einer Mittenfrequenz von 50 kHz aufgezeichnet wird.
- Wird nur die linke Spalte betrachtet, zeichnen sich die Randeffekte, die möglichst gering sein sollten, stärker im oberen B-Bild ab, was einer Polarisation parallel zur x-Achse entspricht.





c) 50 kHz Transversal Polarisation parallel x-Achse



a) 50 kHz Transversal Polarisation parallel y-Achse

aufgezeichnet am Polyamidblock

Abb 35

d) 100 kHz Longitudinal Polarisation parallel x-Achse



b) 100 kHz Longitudinal Polarisation parallel y-Achse Ultraschall B-Bilder unterschiedlicher Mittenfrequenz, Polarisation und Wellenart;

Um die bestmöglichen Eigenschaften beider Verfahren in der Datenfusion zu vereinen, werden auf Grundlage der Kapitel 6.2.1 und 6.2.2 folgende Festlegungen getroffen:

Radar:

- Die Messungen werden mit einer <u>hochfrequenten Antenne</u> (Mittenfrequenz 2,3 GHz) aufgezeichnet. Dies bietet den Vorteil einer hohen Auflösung. Zusätzlich wird die Polarisationsrichtung parallel zur x-Achse festgelegt, um den Einfluss der Randeffekte zu minimieren.
- Zusammengefasst bieten diese Parameter den Vorteil, detaillierte Informationen über den oberflächennahen Bereich zu generieren und den Einfluss von Artefakten dabei zu minimieren. Für die Datenaufzeichnung an realen Objekten ist es jedoch sinnvoll, die Polarisation an die Lage der Bewehrung anzupassen.
- Das <u>Messraster</u> der <u>Radaruntersuchung</u> sollte <u>feiner</u> als das Messraster der <u>Ultraschall-</u> <u>untersuchung</u> gewählt werden, um die Messzeit zu optimieren.

Ultraschall:

- Die Messungen werden mit einem <u>Transversalwellenprüfkopf</u> einer <u>Mittenfrequenz von</u> <u>50 kHz</u> durchgeführt. Vorteilhaft bei dieser Wahl ist, dass damit Informationen über tiefer liegende Bereiche gewonnen werden.
- Zusätzlich wird die Polarisation parallel zur y-Achse festgelegt, um den Einfluss der Randeffekte auf das Ergebnisbild zu minimieren.

Die Festlegungen werden in den folgenden Kapiteln untermauert, in dem parallel zwei Datenfusionen durchgeführt werden. Hierbei wird die Datenfusion mit den festgelegten Parametern mit einer Datenfusion verglichen, die den ermittelten Randbedingungen widerspricht.

6.2.3 Datenfusion der beschriebenen Messreihen

An zwei Beispielen werden die Ergebnisse der Referenzuntersuchungen erläutert und die getroffenen Festlegungen begründet. In Beispiel 2 werden die Messlinien mit optimalen Parametern fusioniert, Beispiel 1 beinhaltet eine ungünstige Wahl der Parameter. In Abb 36 sind sich die entsprechenden B-Bilder der beiden Beispiele gegenübergestellt.





100 kHz Longitudinal Polarisation parallel y-Achse

Beispiel 1 - ungünstige Wahl der Parameter für eine Datenfusion



Abb 36 Gegenüberstellung zweier Datensätze für die Datenfusion

Im Folgenden werden die in Kapitel 5.2 und 5.3 beschriebenen Schritte für die Aufbereitung der Daten und die anschließende Fusion durchgeführt und in entsprechenden Abbildungen gegenübergestellt. Weiterhin werden die Ultraschall B-Bilder ebenfalls grauwertskaliert dargestellt. Vorbereitung Schritt 1: Verkürzung und Korrektur der Zeitachse der B-Bilder:



Beispiel 1 (ungünstige Wahl) - Verkürzung/Korrektur der Zeitachse; links: Radar; rechts: Ultraschall



Beispiel 2 (optimale Wahl) - Verkürzung/Korrektur der Zeitachse; links: Radar; rechts: Ultraschall Abb 37 Vorbereitung der Datensätze; Schritt 1: Verkürzung und Korrektur der Zeitachse

Vorbereitung Schritt 2: Normierung und Verstärkungskorrektur der B-Bilder



Beispiel 1 (ungünstige Wahl) - Normierung/Verstärkungskorrektur; links: Radar; rechts: Ultraschall



Beispiel 2 (optimale Wahl) - Normierung/Verstärkungskorrektur; links: Radar; rechts: Ultraschall

Abb 38 Vorbereitung der Datensätze; Schritt 2: Normierung der Datensätze und Korrektur der Verstärkung

Schon nach diesen beiden Schritten der Datenvorbereitung wird erkennbar, dass die bearbeiteten Daten des Beispiels 2 besser für die Datenfusion geeignet sind. So ist die Auflösung des Radar B-Bildes aufgrund der höheren Antennenmittenfrequenz deutlich höher als die Auflösung des Radar B-Bildes im Beispiel 1. Zusätzlich zeichnet sich die Rückwand im Vergleich beider Ultraschalldatensätze im Beispiel 2 schärfer und deutlicher ab, was ebenfalls auf die gewählte Frequenz zurückzuführen ist.

Im Folgenden werden verschiedene Datenfusionen dargestellt, um sowohl den Einfluss der Parameter als auch den Einfluss der Art der Datenfusion zu verdeutlichen.



Datenfusion 1 - Addition der Datensätze:

a) 0,6*GPR + 1,0*US b) 0,6*|GPR| + 1,0*|US| c) 0,6*GPR + 1,0*|US| Beispiel 1 (ungünstige Wahl) - gewichtete Addition der Datensätze



a) 0,6*GPR + 1,0*US b) 0,6*|GPR| + 1,0*|US| c) 0,6*GPR + 1,0*|US| Beispiel 2 (optimale Wahl) - gewichtete Addition der Datensätze

Abb 39 Fusion der Datensätze durch eine gewichtete Addition

Datenfusion 2 - Subtraktion der Datensätze:



a) 0,6*GPR - 1,0*US b) 0,6*|GPR| - 1,0*|US| c) 0,6*GPR - 1,0*|US| Beispiel 2 (optimale Wahl) - gewichtete Subtraktion der Datensätze





Datenfusion 3 - Bildung des Durchschnitts, des Maximums und des Minimums







Abb 41 Fusion der Datensätze durch Bildung des Durchschnitts und der Extrema

Unabhängig von der Art der Datenfusion wird in den Abb 39 bis Abb 41 deutlich, dass die Datenfusion bei ungünstig gewählten Eingangsparametern wie Frequenz und Polarisation deutlich schlechtere Ergebnisse bei der Zusammenfügung der Informationen liefert. Dies bedeutet somit für die Messdatenaufnahme grundsätzlich, die Parameter optimal für die Prüfaufgabe anzupassen. Jedoch muss im Gegensatz zur Anwendung nur eines Verfahrens nun zwingend berücksichtigt werden, dass die Daten im Zuge der Auswertung einer Datenfusion unterzogen werden. In der Konsequenz bedeutet dies, dass die Einstellungen der Parameter bei Durchführung einer Datenfusion von den Einstellungen bei der Anwendung nur eines Verfahrens abweichen können.

6.2.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Polyamiduntersuchungen

Die vorangegangenen Kapitel haben gezeigt, dass sowohl die Wahl der Eingangsparameter als auch die Wahl des Fusionsalgorithmus einen entscheidenden Einfluss auf die Qualität der Datenfusion haben. Durch Versuche an einem Referenzblock aus Polyamid konnte nachgewiesen werden, welche Einstellungen gewählt werden sollten, um eine optimale Aussagekraft aus dem fusionierten Datensatz zu erhalten.

Diese Einstellungen sind in nachfolgender Tabelle 2 noch einmal zusammengefasst.

Tabelle 2: Zusammenfassung der gewählten Parameter

	Radar	Ultraschall
Frequenz	2,3 GHz - hochfrequent	50 kHz transversal (tieffrequent)
Polarisation	parallel zur x-Achse	parallel zur y-Achse
Messraster	feiner als Ultraschall	gröber als Radar

Die Festlegung dieser Parameter hat signifikante Auswirkungen auf das Ergebnis der Datenfusion. So ist es durch die Auswahl der Frequenzen möglich, die oberflächennahen Bereiche sehr deutlich mit dem Radarverfahren abzubilden. Informationen über tiefer liegende Bereiche werden mithilfe des Ultraschallechoverfahrens generiert, da eine tiefe Mittenfrequenz angewendet wird.

Durch die Wahl unterschiedlicher Polarisationen ist es möglich, die Messzeit zu optimieren. Durch unterschiedliche Polarisationsrichtungen wird die Orientierung der eingebauten Auffälligkeiten somit mindestens von einem Prüfkopf bestmöglich detektiert.

Da die Messdatenaufnahme des Radarverfahrens sehr schnell möglich ist, können die Radaruntersuchungen in einem dichten Messraster erfolgen. Dadurch liegt ein hoher Informationsgehalt vor. Zeitgleich ist es möglich, dass Messraster des Ultraschallechoverfahrens aufzuweiten, um so Messzeit zu sparen.

Demzufolge bringt eine Datenfusion dieser Art den Vorteil, dem Endnutzer nur ein Ergebnisbild als Gesamtüberblick zur Verfügung zu stellen und ihm so die Interpretation zu erleichtern. Zusätzlich kann durch eine geschickte Wahl des Messrasters und der Polarisation ein erheblicher Anteil der Messzeit eingespart werden, was zu mehr Akzeptanz der zerstörungsfreien Prüfverfahren in der Baupraxis führt. So ist es unter optimalen Randbedingungen möglich, dass die Messzeit für die Aufnahme von Radar- und Ultraschalldaten (unterschiedliche Polarisationen; unterschiedliches Messraster) nicht größer ist als die Messdatenaufnahme einer Radaruntersuchung in zwei Polarisationen.

6.3 Untersuchungen an den Elementwänden

Um im ersten Schritt Daten von realen Messobjekten für eine Fusion zu erhalten, wurden jeweils vier ausgewählte Messlinien auf den beiden Elementwänden, wie in Abb 42 und Abb 43 gekennzeichnet, aufgezeichnet. Die Randabstände der Messlinien betragen 15 cm, um die Auswirkung der Randeffekte zu reduzieren. Die Länge der jeweiligen Linien ergibt sich dadurch zu 220 cm.

An der ersten Elementwand wurden vier Messlinien aufgezeichnet (s. Abb 42). Die Messlinie 1 verläuft über vier Delaminationen von unterschiedlicher Größe während die Messlinie 2 in einem Bereich ohne Störungen aufgezeichnet wurde. Messlinie 3 wurde so gelegt, dass sie sich innerhalb des Schüttkegels befindet. Die Messlinie 4 verläuft über Bereiche mit unterschiedlichen Betonmischungen des eingebrachten Ortbetons.



Abb 42 aufgezeichnete Messlinien an der ersten zu untersuchenden Elementwand

An der zweiten Elementwand wurden ebenso vier Messlinien, welche folgend beschrieben werden, aufgezeichnet (s. Abb 43). Die Messlinie 1 verläuft über zwei Stahlkugeln und den Buchstaben B, welcher aus Aluminium besteht. Die Messlinie 2 befindet sich oberhalb von 2 Stahlkugeln und einem kleineren Kiesnest. Die Messlinie 3 verläuft über den Buchstaben A, welcher aus Kunststoff besteht. Die Messlinie 4 wurde im Bereich aufgezeichnet, der oberhalb zweier Stahlkugeln, einem größeren Kiesnest und dem Buchstaben M (Sperrholz) liegt.





Im weiteren Verlauf des Projektes wurden 3D-Messungen an den beiden Elementwänden mit dem Scannersystem OSSCAR durchgeführt. Insgesamt wurden dabei drei Messfelder aufgezeichnet. Ein 3D-Datensatz wurde an der ersten Elementwand aufgenommen. Dieses liegt im unteren linken Bereich und innerhalb diesem befinden sich Bereiche mit verschiedenen Betonmischungen (s. Abb 44).



Abb 44 aufgezeichnete Messfeld 1 an der ersten Elementwand

Zwei 3D-Datensätze sind von der zweiten Elementwand aufgezeichnet worden. Das erste Messfeld befindet sich im linken oberen Bereich. Innerhalb des Messfeldes liegen zwei Stahlkugeln, sowie zum Teil der Buchstabe B (Aluminium) und der Buchstabe A (Kunststoff). Das zweite Messfeld liegt im unteren rechten Bereich der Elementwand und innerhalb Diesem befindet sich das große Kiesnest (s. Abb 45).



Abb 45 aufgezeichnete Messfeld 1 und 2 an der zweiten Elementwand

6.3.1 Erläuterungen zu den Untersuchungen

Um die bestmöglichen Eigenschaften der beiden Verfahren Radar und Ultraschall in der Datenfusion zu vereinen, wurden auf Grundlage der durchgeführten Referenzuntersuchungen am Polyamidblock (Kap. 6.2) entsprechende Festlegungen bezüglich der Messdatenaufnahme an den Elementwänden in 2D und 3D getroffen.

Radaraufnahme

Die Aufzeichnung der Messlinien an den beiden Elementwänden wurde mit einer hochfrequenten Antenne (Mittenfrequenz 2,3 GHz) durchgeführt, um eine möglichst gute Auflösung zu erreichen. Dies wurde durch die Referenzuntersuchungen an dem Polyamidblock (Kap. 6.2.1) als vorteilhaft festgestellt. Es wurde dabei alle 2 mm ein Messpunkt (A-Bild) auf dieser Linie aufgenommen. Durch die Festlegung dieser beiden Parameter (Antennenfrequenz und Messpunktabstand) ist es möglich, detailliertere Informationen des oberflächennahen Bereichs zu erhalten. Die Polarisationsrichtung der Radarantenne ist so gewählt worden, dass die oberflächennahe Bewehrung, die senkrecht zur Messlinie und parallel zu Oberfläche verläuft, detektiert werden konnte.

Für die 3D-Visualisierung wurden maändrierende Messungen mit dem OSSCAR-System mit einer hochfrequenten Antenne (Mittenfrequenz 2,3 GHz) durchgeführt um ein 3D-Bild zu rekonstruieren. Im Gegensatz zu den Linienmessungen wurde der Messpunktabstand auf 4 mm erhöht, um die Messgeschwindigkeit mit dem OSSCAR-System nicht zu stark zu reduzieren. Es wurden außerdem nur Messlinien parallel zur X-Achse aufgezeichnet. Der Abstand der einzelnen Messlinien wurde auf 5 cm festgelegt, so dass sich für ein Messfeld von 100 cm in Richtung der X-Achse und 50 cm in Richtung der Y-Achse bei Messungen parallel zur Y-Achse 11 Messlinien ergeben. Die Zeitdauer der Durchführung der Messung für dieses Messfeld beträgt dabei etwa 10 Minuten.

Ultraschallaufnahme

Die Messungen wurden mit einem Transversalwellenprüfkopf mit einer Mittenfrequenz von 50 kHz durchgeführt. Damit konnten Informationen über tieferliegende Bereiche gewonnen werden. Der Abstand der aufgenommenen A-Bilder wurde auf 5 cm festgelegt.

Bei den 3D Messungen mit Ultraschall und dem OSSCAR-System sind die gleichen Einstellungen wie bei den Linienmessungen verwendet worden. Der Abstand der einzelnen Messlinien wurde auch wie bei den Radarmessungen auf 5 cm festgelegt, so dass sich auch hier 11 Messlinien ergaben. Durch die Wahl der Abstände der einzelnen A-Bilder und der Messlinien konnte der Zeitbedarf bei der Datenaufnahme gering gehalten werden und beträgt mit dem OSSCAR-System für Ultraschall in etwa 45 Minuten.

6.3.2 Ergebnisse der Datenfusion von 2D-Datensätzen an den Elementwänden

2D-Datenfusion an der ersten Elementwand

Wie in Abb 42 dargestellt, wurden vier Messlinien aufgezeichnet, um Daten eines realen Messobjektes für die Fusion zu erhalten. Die gewonnenen Daten der ersten Elementwand wurden wie im Kap. 5.2 und 5.3 beschrieben, aufbereitet und miteinander fusioniert. Der Vorgang der Datenfusion wurde bereits am Beispiel der Referenzmessung am Polyamidkörper im Kap. 6.2.3 genauer vorgestellt.

Im ersten Schritt der Bearbeitung wurden die Datensätze der Messlinien wie in Kap. 5.2 beschrieben, normiert und interpoliert und darauf folgend die erste Ableitung der Signalamplituden durchgeführt. Im nächsten Schritt sind die Datensätze gewichtet und miteinander addiert, subtrahiert oder multipliziert worden. Im Folgenden sind die Ergebnisse der Linienmessungen für Radar und Ultraschall dargestellt und den Messlinien auf der ersten Elementwand zugeordnet.

<u>Radar</u>



Abb 46 Rohdaten der Radarmessungen (2,3GHz-Antenne) für vier ausgewählte Messlinien an der ersten Elementwand

<u>Ultraschall</u>









Linie 2





Linie 3 0 50-100-100 150 200-150 250-س₃₀₀-200 Tiefe [-250 F 400-300 450 350 500 400 550-617-2 ^{"=457} 512 800 1000 1200 x-Position [mm] 1800 200 400 600 1400 1600 2000 2250 -512 -250 0 250 Amplitude



Linie 4

Abb 47 Rohdaten der Ultraschallmessungen (50kHz-Messkopf) für vier ausgewählte Messlinien an der ersten Elementwand



Abb 48 interpolierte aber noch nicht normierte Radar- (links) und Ultraschalldaten (rechts)

In Abb 48 sind die Ausgangsdatensätze der Radar- und Ultraschallmessungen dargestellt, welche im Folgenden mit verschiedenen Algorithmen fusioniert werden.

Für die Addition beider Datensätze werden diese unterschiedlich gewichtet, um keinen Informationsverlust bei der Fusionierung der oberflächennahen Bewehrung zu erhalten. Anhand der Referenzuntersuchungen an dem Polyamidblock sind die Radardaten stärker gewichtet worden (1,5fach) gegenüber den Ultraschalldaten. In Abb 49 sind die Ergebnisse der Addition dargestellt.



Abb 49 Addition der Messdaten für die Linie 1 der ersten Elementwand

Deutlich erkennbar sind in den addierten Datensätzen die Reflexionshyperbeln (rote Ellipse) der oberflächennahen Bewehrung der äußeren Betonschale der Elementwand, auf der die Messlinien aufgenommen worden sind. In ca. 80 mm Tiefe ist die Rückwand dieser Betonschale (grüne Ellipse) zu erkennen. Die Vorderseite der auf der Rückseite liegenden Betonschale ist bei etwa 220 mm Tiefe erkennbar und die Reflexion der Rückwand ist noch schwach bei 300 mm Tiefe dargestellt (grüne untere Ellipse). Die Reflexionen an den künstlich eingebachten Delaminationsstellen der Ultraschallmessungen, wie in Abb 48 noch zu sehen, sind in der Darstellung der fusionierten Daten nicht mehr auszumachen (s.Abb 49).

Für die Subtraktion beider Datensätze werden die Radardaten wie bei der Addition um das 1,5fache gegenüber den Ultraschalldaten gewichtet. Die Ergebnisse der Subtraktion sind in Abb 50 dargestellt.



Abb 50 Subtraktion der Messdaten für die Linie 1 der ersten Elementwand

Die Ergebnisse der Subtraktion sind denen der Addition (s. Abb 49) sehr ähnlich. Deutlich sind die oberflächennahe Bewehrung (rote Ellipse) und die Rückseite der Betonschale (grüne Ellipse) zu erkennen. Auch die Vorderseite der hinteren Betonschale ist in einer Tiefe von etwa 220 mm erkennbar (untere grüne Ellipse). Die Rückwand dieser ist bei der Subtraktion der Daten nicht mehr erkennbar. Genauso sind die Reflexionen an den Delaminationen der Ultraschallmessungen nach der Fusion nicht mehr auszumachen.

Bei der Multiplikation der beiden Datensätze sind die Radardaten gleich den Ultraschalldaten gewichtet. Die Ergebnisse der Multiplikation sind in Abb 51 dargestellt.

Die oberflächennahe Bewehrung (rote Ellipse) ist auch hier gut zu erkennen. Die Reflexionen der Rückseite der vorderen Betonschale (grüne Ellipse) genau wie auch die Vorderseite der hinteren Betonschale (grüne untere Ellipse) sind hier schlechter zu erkennen und die Rückwandreflexion der Elementwand ist nicht mehr erkennbar.



Abb 51 Multiplikation der Messdaten für die Linie 1 der ersten Elementwand

Deutlich zu erkennen ist, dass mit unterschiedlicher Gewichtung von Radar- und Ultraschalldaten und der Addition dieser beiden Datensätze mit dem bisherigen Stand der Untersuchungen die besten Ergebnisse erzielt werden. Die Ergebnisse der Fusion der weiteren Messlinien der ersten Elementwand werden deswegen im Folgenden für die Addition der beiden Datensätze dargestellt und beschrieben.

Fusionierte Daten der Linie 2



Abb 52 interpolierte und normierte Radar- (links) und Ultraschalldaten (rechts)

Die Messlinie 2 an der ersten Elementwand wurde in einem ungestörten Bereich (s. Abb 47) durchgeführt. In Abb 52 auf der linken Seite sind die Reflexionshyperbeln der oberflächennahen Bewehrung (rote Ellipse) für die Radarmessung gut zu erkennen. Im B-Bild der Ultraschallmessung ist in 80 mm Tiefe die Reflexion der Rückseite der vorderen Betonschale (grüne Ellipse) und in ca. 220 mm Tiefe eine starke Reflexion (grüne untere Ellipse) zu erkennen, welches durch die Vorderseite der hinteren Betonschale hervorgerufen sein könnte. Wenn zwischen dem nachträglich eingebrachten Ortbeton und den Betonschalen kein ausreichender akustischer

Verbund entstanden ist, würde dies die starke Reflexion der Vorderseite und die fehlende Reflexion der Rückseite der Elementwand erklären.



Abb 53 Addition der Messdaten für die Linie 2 der ersten Elementwand

Nach der Addition der Datensätze mit der vorher festgelegten Gewichtung sind die Reflexionshyperbeln der oberflächennahen Bewehrung der Radarmessung weiterhin deutlich zu erkennen (rote Ellipse). Desweiteren ist nun auch die Rückseite der vorderen Betonschale in einer Tiefe von etwa 80 mm erkennbar (grüne Ellipse), welche vorher in den einzelnen Datensätzen der Radar- und Ultraschallmessung nicht deutlich wurde. In einer Tiefe von 220 mm ist die starke Reflexion an der Vorderseite der hinteren Betonschale (grüne untere Ellipse) und in etwa 300 mm Tiefe die Rückwandreflexion (blaue Ellipse) erkennbar.

Fusionierte Daten der Linie 3

Die Messlinie 3 wurde im Bereich der Schüttkegel (s. Abb 46), die eine andere Betonmischung haben als der darüber liegende Ortbeton, aufgenommen. Im B-Bild der Radarmessung sind die Reflexionshyperbeln der oberflächennahen Bewehrung deutlich zu erkennen (rote Ellipse). In einer etwas größeren Tiefe sind weitere Reflexionen zu erkennen, welche durch die Schüttkegel hervorgerufen worden sein könnten (blaue Ellipse). Im B-Bild der Ultraschallmessung erkennt man gut die beiden Bereiche des Wechsels der Betonmischung durch die Schüttkegel (rote Ellipse). Durch eine andere Skalierung wird in der Abb 54 nicht die tatsächliche Tiefenlage dargestellt. Dies resultiert durch die Verwendung einer nicht auf das Bauteil kalibrierten Ausbreitungsgeschwindigkeit. Da aber eine korrekte Tiefenskalierung für die hier untersuchte Prüfaussage nicht zwingend erforderlich ist, wurde auf eine Korrektur verzichtet.



Abb 54 interpolierte und normierte Radar- (links) und Ultraschalldaten (rechts)



Abb 55 Addition der Messdaten für die Linie 3 der ersten Elementwand

Nachdem die beiden Datensätze miteinander addiert wurden, wobei die Radardaten eine 1,5fache Gewichtung erhalten haben, sind in den erhaltenen B-Bildern deutlich die Reflexionshyperbeln der Bewehrungsstäbe der Radarmessungen (rote Ellipse) erkennbar sowie die Bereiche mit einer anderen Betonmischung durch die Schüttkegel innerhalb des eingebrachten Ortbetons (grüne Ellipse). Auch ist die Rückwandreflexion in einer hier falsch skalierten Tiefenlage von etwa 220 mm erkennbar (blau). Diese wird aber nur in dem Bereich der Betonmischung 1 (s. Abb 11) sichtbar.

Fusionierte Daten der Linie 4

Die Messlinie 4 verläuft über einen Bereich zweier verschiedener Betonmischungen wie in Abb 42 zu sehen. In dem B-Bild der Radarmessung (linkes Bild) sind die oberflächennahen Bewehrungsstäbe als Reflexionshyperbeln abgebildet (rote Ellipse). In einer etwas größeren Tiefe sind Reflexionseffekte zu erkennen, die durch den Wechsel der Betonmischungen hervorgerufen werden (blaue Ellipse). Im B-Bild der Ultraschallmessung (rechtes Bild) ist eine Reflexion im Bereich der Rückseite der vorderen Betonschale erkennbar (grüne Ellipse). Diese erstreckt sich nicht über die gesamte Länge der Messlinie, sondern ist nur im Bereich der Betonmischung 3, dem Schüttkegel, vorhanden. Dies konnte aufgrund eines nicht vorhandenen akustischen Verbundes zwischen der vorderen Betonschale und dem eingebrachten Beton des Schüttkegels hervorgerufen worden sein. Am Anfang und am Ende der Messlinie ist die Rückwandreflexion in einer (keine korrekte Skalierung) Tiefe von ca. 210 mm zu erkennen.







Abb 57 Addition der Messdaten für die Linie 4 der ersten Elementwand

Nach der Fusion der beiden Datensätze mit unterschiedlicher Gewichtung sind die Reflexionsanteile der Radarmessung, also die Reflexionshyperbeln der Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen (rote Ellipse). Auch ist die Reflexion der Rückseite der vorderen Betonschale aus der Ultraschalmessung deutlich erkennbar (grüne Ellipse), wobei dies nur deutlich im Bereich der Betonmischung 3 des Schüttkegels wird.

Zusammenfassend wird deutlich, dass bei der Fusion der Datensätze mit einer entsprechenden Gewichtung ein Mehrwert in der Darstellung der B-Bilder erreicht wird. Zum Teil kann es aber zur Verschlechterung bis zum Verlust von Informationen kommen, wie es im Falle der Delaminationsstellen der Linie 1 erkennbar ist. Auch ist bei einem fehlenden akustischen Verbund zwischen dem eingebrachten Ortbeton und der Betonschale die Rückwand der Elementwand im dahinter liegenden Bereich nicht mehr erkennbar.

Den größten Informationsgehalt beinhalten dabei die B-Bilder der Addition der Datensätze, bei dem kein Betrag gebildet worden ist.

2D-Datenfusion an der zweiten Elementwand

Wie in Abb 43 dargestellt, wurden vier Messlinien an der zweiten Elementwand aufgezeichnet, um Daten eines weiteren realen Messobjektes für die Fusion zu erhalten. Die gewonnenen Daten wurden wie im Kap. 5.4 und 5.5 beschrieben, aufbereitet und wie in Kap. 5.6 nun mit dem Programm ZIBAmira fusioniert.

Bei der Fusion der Datensätze mit ZIBAmira werden diese miteinander addiert, wobei Radar eine 1,5fache Gewichtung gegenüber Ultraschall erhält (s. Abb 30).

Im Folgenden sind die Ergebnisse der Linienmessungen für Radar und Ultraschall dargestellt und den Messlinien auf der zweiten Elementwand zugeordnet.

<u>Radar</u>



Linie 4

Abb 58 Rohdaten der Radarmessungen (2,3GHz-Antenne) für vier ausgewählte Messlinien an der zweiten Elementwand

<u>Ultraschall</u>



Abb 59 Rohdaten der Ultraschallmessungen (50kHz-Messkopf) für vier ausgewählte Messlinien an der zweiten Elementwand

Fusionierte Daten der Linie 1



Abb 60 prozessierte (Kap. 5.4) a) Radar- und b) Ultraschalldaten der Messlinie 1

In dem B-Bild der Radarmessung (Abb 60a) sind die Reflexionen der oberflächennahen Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen. In dem B-Bild der Ultraschallmessung (Abb 60b) ist in einer Tiefe von etwa 150 mm und bei einer Lage von 500 bis 1000 mm eine flächige Reflexion zu erkennen die durch den eingebauten Buchstaben B (Aluminium) sowie der eingebauten Metallkugel aus Vollmaterial hervorgerufen wird (blaue Ellipse). Die in größerer Tiefe liegenden Effekte resultieren aus der Mehrfachreflexion der Ultraschallwellen. Desweiteren ist schwach in einer Tiefe von etwa 80 mm die Rückwandreflexion (grüne Ellipse) der vorderen Betonschale und in etwa 300 mm die Reflexion der hinteren Betonschale der Elementwand zu erkennen.

In dem Programm ZIBAmira wurden die Datensätze miteinander addiert, wobei die Radardaten dabei eine 1,5fache Gewichtung gegenüber den Ultraschalldaten erhielten.



Abb 61 Addition der Messdaten für die Linie 1 der zweiten Elementwand

Die oberflächennahe Bewehrung ist im B-Bild nach der Fusion (Abb 61) weiterhin deutlich zu erkennen. Im rechten Bereich bei etwa 300 mm Tiefe auftretende Reflexionen werden durch Ultraschall an der Rückwand der Elementwand hervorgerufen. Die Reflexion in etwa 150 mm Tiefe bei etwa 700 bis 900 mm auf der X-Achse wird durch den Buchstaben B (Aluminium) hervorgerufen.

Bei Analyse des B-Bildes nach der Fusion ist eine Zunahme der Aussagekraft zu erkennen, wie z.B. eine bessere Darstellung der Rückwandreflexion im rechten Bereich.

Fusionierte Daten der Linie 2



Abb 62 prozessierte (Kap. 5.4) a) Radar- und b) Ultraschalldaten der Messlinie 2

In dem B-Bild der Radarmessung (Abb 62a) sind die Reflexionen der oberflächennahen Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen. Dahinter in einer Tiefe von etwa 80 mm scheint eine flächige Reflexion vorhanden zu sein, welche durch die Rückwand der vorderen Betonschale hervorgerufen wird.

In dem B-Bild der Ultraschallmessung (Abb 62b) ist ein Verrauschen in zwei unterschiedlichen Tiefen (ca. 80 mm und 220 mm) erkennbar (grüne Ellipsen). Diese könnten durch einen fehlenden akustischen Verbund zwischen dem eingebrachten Ortbeton und der Betonschale der Elementwand hervorgerufen werden. Durch diesen Effekt wird eine mögliche Detektion des kleinen Kiesnestes (s. Abb 59) auf der rechten Seite durch die Totalreflexion der Ultraschalwellen überlagert und somit nicht mehr möglich.



Abb 63 Addition der Messdaten für die Linie 2 der zweiten Elementwand

Die oberflächennahe Bewehrung ist im B-Bild nach der Fusion (Abb 63) und die durchgehende Reflexion in einer Tiefe von 80 mm deutlich zu erkennen. In dem Bereich des fehlenden akustischen Verbundes ist dieses Signal deutlicher und besser zu erkennen.

Durch die Fusion der beiden Datensätze von Radar und Ultraschall ist auch für die Linie 2 der zweiten Elementwand eine Verbesserung der Aussagekraft zu erkennen.

Fusionierte Daten der Linie 3



Abb 64 prozessierte (Kap. 5.4) a) Radar- und b) Ultraschalldaten der Messlinie 3

In dem B-Bild der Radarmessung (Abb 64a) sind die Reflexionen der oberflächennahen Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen.

In dem B-Bild der Ultraschallmessung (Abb 64b) ist ein starkes Rauschen im Bereich von 0 bis 700 mm in einer Tiefe von etwa 80 mm erkennbar (grüne Ellipse). Dieses wird durch einen fehlenden akustischen Verbund zwischen der vorderen Betonschale und dem nachträglich eingebrachten Ortbeton hervorgerufen und führt zu einer Totalreflexion der Schallwellen. Damit ist der dahinter liegende Buchstabe A aus Kunststoff nicht mit Ultraschall detektierbar. Bei etwa einer Lage von 1600 bis 1800 mm ist eine etwas schwächere Reflexion in einer Tiefe von etwa 120 mm zu erkennen (rote Ellipse). Dies könnte das kleinere Kiesnest (s. Abb 59) sein.



Abb 65 Addition der Messdaten für die Linie 3 der zweiten Elementwand

Die oberflächennahe Bewehrung ist im B-Bild nach der Fusion (Abb 65) weiterhin deutlich erkennbar. Die Abbildung der Rückwand der vorderen Betonschale durch die Fusion der beiden Datensätze ist in dem B-Bild der Fusion offensichtlicher. Desweiteren wird in dem Bereich, wo das kleine Kiesnest vermutet wurde, eine deutlicheres Signal abgebildet. Im Bereich auf der linken Seite ist hingegen keine Verbesserung nach der Fusion erkennbar.

Bei der Fusion der beiden Datensätze ist für die Messlinie 3 der zweiten Elementwand eine Verbesserung der Aussagekraft zu beobachten. Einschränkend wirkt sich hier aber das starke Signal der Totalreflexion im Bereich des fehlenden akustischen Verbundes auf der Rückseite der vorderen Betonschale aus. Durch die daraus resultierenden Mehrfachreflexionen werden mögliche aber schwächere Signale aus der Radarmessung überlagert.

Fusionierte Daten der Linie 4



Abb 66 prozessierte (Kap. 5.4) a) Radar- und b) Ultraschalldaten der Messlinie 4

In dem B-Bild der Radarmessung (Abb 66a) sind die Reflexionen der oberflächennahen Bewehrungsstäbe deutlich zu erkennen.

In dem B-Bild der Ultraschallmessung (Abb 66b) ist eine starkes Rauschen im Bereich von 700 bis 1600 mm erkennbar (grüne Ellipse). Dieses wird durch einen fehlenden akustischen Verbund zwischen der vorderen Betonschale und dem nachträglich eingebrachten Ortbeton hervorgerufen und führt zu einer Totalreflexion der Schallwellen. In einer Tiefe von etwa 220 mm sind auf der rechten und linken Seite des B-Bildes Reflexionen erkennbar, die durch die hintere Betonschale der Elementwand hervorgerufen werden (rote Ellipsen). Der Verdacht, dass sich das größere Kiesnest während des Einbringens des Ortbetons zwischen den Betonschalen gelöst hat und sich nicht mehr an dem ursprünglichen Ort befindet, scheint sich zu bestätigen, da keine Signalerscheinungen, welche durch das Kiesnest hervorgerufen werden müssten, erkennbar sind.



Abb 67 Addition der Messdaten für die Linie 4 der zweiten Elementwand

Im fusionierten B-Bild der beiden Datensätze ist die oberflächennahe Bewehrung deutlich erkennbar. Desweiteren sind die Reflexionen der hinteren Betonschale in einer Tiefe von etwa 220 mm zu beobachten. Der Buchstabe M (Holz) ist auch in dem fusionierten Datensatz nicht detektierbar.

Auch hier ist für den Datensatz der Messlinie 4 der zweiten Elementwand eine Verbesserung der Aussagekraft erkennbar.

6.3.3 Ergebnisse der Datenfusion von 3D-Datensätzen an den Elementwänden

3D-Datenfusion an der ersten Elementwand des Messfeldes 1

Wie in Abb 44 dargestellt, ist ein Messfeld mit der Größe von 100 x 50 cm im Bereich dreier verschiedener Betonmischungen des Ortbetons aufgezeichnet worden um Daten eines realen Messobjektes für die dreidimensionale Fusion zu erhalten. Die gewonnenen Messdaten werden wie im Kap. 5.4 und 5.5 beschrieben, aufbereitet und wie in Kap. 5.6 mit dem Programm ZIBAmira fusioniert. Die Fusion von 3D-Datensätzen wurde ausschließlich mit prozessierten Daten durchgeführt, so dass durch die Reflexionshyperbeln an den Bewehrungsstäben keine Artefakte oder Falschdarstellungen in der 3D-Darstellung auftreten. Bei der Fusion der Datensätze mit ZIBAmira werden diese miteinander addiert, wobei Radar

eine 1,5fache Gewichtung gegenüber Ultraschall erhält.

Im Folgenden sind die Ergebnisse der 3D-Messung für Radar und Ultraschall als C-Bilder (s. Abb 16) für das Messfeld 1 der ersten Elementwand dargestellt.

3D-Datensatz Radar



Abb 68 a) C-Bild der oberflächennahen Bewehrung und b) Isoflächendarstellung der Bewehrung und einem B-Bild der ersten Elementwand im Messfeld 1, aufgenommen mit Radar (2,3GHz-Antenne) und einer Polarisationsrichtung

Wie aus Abb 68a zu ersehen ist, wird der Verlauf der oberflächennahen Bewehrung durch die Aufnahme eines 3D-Datensatzes deutlich dargestellt. In Abb 68b wurde eine Darstellung von Isoflächen gewählt um die Lage der Bewehrungsstäbe hervorzuheben. Dabei werden benachbarte Punkte einer bestimmten Größe (Amplitudenwert) miteinander verbunden. Durch die Verwendung einer hochfrequenten Radarantenne ist die Eindringtiefe relativ gering.

3D-Datensatz Ultraschall



Abb 69C-Bild der Ultraschallmessung (50kHz-Messkopf):a) in einer Tiefe von etwa 150 mm. Darstellung des Schüttkegels (s. Abb 44) im unteren Bereichder Betonmischung 3 und

b) in einer Tiefe von etwa 300 mm. Erkennbare Rückwandreflexion der Elementwand.

Es sind mit Ultraschall in verschiedenen Tiefen Reflexionen zu erkennen. So sind in Abb 69a in etwa 150 mm Tiefe Reflexionen im unteren rechten Bereich vorhanden, die auf die Änderung der Betonmischung des eingebrachten Ortbetons zurückzuführen sind. In diesem Bereich liegt der Schüttkegel mit der eingebrachten Betonmischung 3, wie dies aus der Abb 44 zu entnehmen ist. In einer Tiefe von etwa 300 mm sind in der Abb 69b die Rückwandreflexionen der Elementwand erkennbar.

Fusionierte Daten des Messfeldes 1 der ersten Elementwand

Nachdem die Daten der Radar- und Ultraschallmessung fusioniert worden sind, ist das Ergebnis als Isoflächendarstellung in der Abb 70 aufgezeigt. Deutlich erkennbar sind auch hier die Bewehrungsstäbe, welche oberflächennah liegen. Desweiteren ist auch der Schüttkegel sowie die Reflexion der Rückwand zu sehen. Insgesamt sind aber die Detektion und die Zuordnung von Bauteilobjekten im dreidimensionalen fusionierten Datenobjekt schwieriger als bei der 2D-Fusionierung.



Abb 70 3D-Darstellung der fusionierten Datensätze der Radar- und Ultraschallmessung des Messfeldes 1 an der ersten Elementwand

3D-Datenfusion an der zweiten Elementwand des Messfeldes 1

Wie in Abb 45 dargestellt, ist ein Messfeld mit der Größe von 100 x 50 cm im Bereich der beiden Buchstaben B (Aluminium) und A (Kunststoff) aufgezeichnet worden um Daten eines realen Messobjektes für die dreidimensionale Fusion zu erhalten. Die gewonnenen Messdaten werden wie im Kap. 5.4 und 5.5 beschrieben, aufbereitet und wie in Kap. 5.6 mit dem Programm ZIBAmira fusioniert. Die Fusion von 3D-Datensätzen wurde ausschließlich mit prozessierten Daten durchgeführt, so dass durch die Reflexionshyperbeln an den Bewehrungsstäben keine Artefakte oder Falschdarstellungen in der 3D-Darstellung auftreten.

Bei der Fusion der Datensätze mit ZIBAmira wurden diese miteinander addiert, wobei Radar eine 1,5fache Gewichtung gegenüber Ultraschall erhält.

3D-Datensatz Radar





a)

Abb 71a) C-Bild der oberflächennahe Bewehrung undb) Isoflächendarstellung der Bewehrung und einem B-Bild der zweiten Elementwand im Messfeld1, aufgenommen mit Radar (2,3GHz-Antenne) und einer Polarisationsrichtung

Wie aus Abb 71a zu ersehen ist, wird der Verlauf der oberflächennahen Bewehrung durch die Aufnahme eines 3D-Datensatzes deutlich dargestellt. In Abb 71b wurde eine Darstellung von Isoflächen gewählt, um die Lage der Bewehrungsstäbe hervorzuheben. Dabei werden benachbarte Punkte einer bestimmten Größe (Amplitudenwert) miteinander verbunden. Durch die Verwendung einer hochfrequenten Radarantenne ist die Eindringtiefe relativ gering.

3D-Datensatz Ultraschall



Abb 72C-Bild der Ultraschallmessung (50kHz-Messkopf):a) in einer Tiefe von etwa 120 mm ist eine großflächige Reflexion erkennbar undb) in einer Tiefe von etwa 300 mm keine deutlichen Signale einer möglichen Rückwandreflexionder Elementwand.

Es sind bei dem Messfeld 1 der zweiten Elementwand nur großflächige Reflexionen im Bereich des Überganges von der vorderen Betonschale zum eingebrachten Ortbeton in einer Tiefe von etwa 80 bis 100 mm erkennbar (s. Abb 72a). Dies deutet auf einen fehlenden akustischen Verbund zwischen diesen beiden Schichten hin. Damit sind auch in größeren Tiefen keine Signale auf Grund der Totalreflexion, welche aus dem fehlenden akustischen Verbund resultiert, zu erwarten und auch in der Abb 72b zu erkennen.

Fusionierte Daten des Messfeldes 1 der zweiten Elementwand

Die Ergebnisse der Datenfusion der Radar- und Ultraschallmessung sind in Abb. 73 aufgezeigt. Deutlich sind hier die oberflächennahen Bewehrungsstäbe aus der Radarmessung zu erkennen. Zur Verdeutlichung wurden diese blau hervorgehoben. In tieferen Bereichen sind keine weiteren Reflexionen zu erkennen. Dies resutliert aus der Delamination zwischen der vorderen Betonschale und dem eingebrachten Ortbeton, was zu einem fehlenden akustischen Verbund führt. Die daraus resultierende Totalrefelxion führt zu Mehrfachreflexionen, die ein starkes Rauschen im B-Bild und fusionierten 3D-Datensatz hervorruft.



Abb 73 3D-Darstellung der fusionierten Datensätze der Radar- und Ultraschallmessung des Messfeldes 1 an der zweiten Elementwand

Ein Vorteil des Programmes ZIBAmira ist, dass der fusionierte Datensatz auch in einzelnen B-Bildern darstellbar ist, so dass man ähnliche Ergebnisse der Fusion erhält, wie sie im Kap. 6.3.2 aufgezeigt wurden. In Abb. 74 sind zwei B-Bilder des Datensatzes des Messfeldes 1 der zweiten Elementwand, wie in Abb. 73, dargestellt. Die oberflächennahe Bewehrung ist auch hier deutlich zu sehen, doch ist ab einer Tiefe von ca. 80 bis 100 mm das Ergebnis von etwa 0 bis 600 mm auf der X-Achse durch die Totalreflexion der Ultraschallwellen nicht brauchbar. Von ca. 700 bis 1000 mm ist aber in den B-Bildern in einer Tiefe von etwa 300 mm die Rückwandreflexion zu erkennen.



Abb 74 B-Bilder der fusionierten Datensätze des Messfeldes 1 an der zweiten Elementwand

Hier wird an diesem Messfeld deutlich, dass im Falle komplexerer Betonbauteile wie einer Elementwand dreidimensionale Ergebnisdarstellungen problematisch sind. Die Fusion eines 3D-Datensatzes ist dabei gut möglich, doch ist die Darstellung einzelner B-Bilder für das Erkennen von Problembereichen oder auch der Bauteildicke sinnvoller.

6.4 Untersuchungen an einer Betonplatte

Um einen möglichen Anwendungsbereich der 3D-Darstellung eines fusionierten 3D-Datensatzes zu erkennen, wurden an einem Testkörper Messungen mit dem OSSCAR-System mit Radar und Ultraschall durchgeführt. Diese Datensätze wurden wie im Kap. 5.4 und 5.5 beschrieben, prozessiert und mit ZIBAmira (s. Kap. 5.6) fusionert.

In Abb 75 ist die innere Konstruktion des Testkörpers zu erkennen, bevor er betoniert wurde. Das Messfeld wurde so gewählt, das die oberflächennahe Bewehrungsmatte die Hälfte des Messfeldes abdeckt. Das Hüllrohr befindet sich komplett im Messbereich, wie auch die Bewehrungsmatte auf der Rückseite der Betonplatte. Damit befinden sich in der Betonplatte Konstruktionselemente, die bevorzugt im Brückenbau, wie auch bei vielen anderen Ingenieursbauwerken verwendet werden. Auf die gesamte Dicke der Platte ist desweiteren derselbe Beton verwendet worden, so dass es hier zu keinen Schichtgrenzen im Aufbau kommt.

Die Messungen mit Radar wurden bei diesem Bauteil in beide Polarisationsrichtungen durchgeführt, so dass die rechtwinklig zueinander liegenden Bewehrungsstäbe der Bewehrungsmatte detektiert werden konnten. Die Ultraschallmessungen hingegen wurden mit dem Transversalwellenmesskopf wie auch bei den anderen Messungen nur in eine Richtung durchgeführt. Ansonsten wurde die Aufnahme des 3D-Datensatzes wie in Kap. 6.3.1 erläutert, durchgeführt.



Abb 75 innere Konstruktion der untersuchten Betonplatte mit oberflächennaher Bewehrungsmatte auf beiden Seite des Testkörpers, einem Hüllrohr und einer eingelegten Fehlstelle (Styropor, in der Messung nicht mit aufgezeichnet)

In Abb 75 ist das Ergebnis der Fusion der 3 Datensätze als Isoflächendarstellung zu sehen. Deutlich ist die oberflächennahe Bewehrungsmatte zu erkennen, welche durch die Radarmessung detektiert wurde. In einer etwas größeren Tiefe ist das durchlaufende Hüllrohr zu erkennen und dies auch unterhalb der Bewehrungsmatte. In einer Tiefe von etwa 200 mm ist eine flächige Reflexion zu sehen, die durch die Rückwand hervorgerufen wird. Im Bereich der Tiefenlage des Hüllrohres sind die Signale von der Radarmessung schon stark abgeschwächt, so dass im B-Bild das Hüllrohr nur noch schwach zu erkennen ist. Auch ist das Reflexionssignal bei der Ultraschallmessung des Hüllrohres noch gering. Nach der Fusion der Datensätze werden diese schwachen Reflexionssignale deutlich stärker und damit die Lage des Hüllrohres besser detektierbar.



Abb 76 Isoflächendarstellung der fusionierten 3D-Datensätze der Radar- und Ultraschallmessungen an der Betonplatte

Es wird deutlich, dass bei einer anderen Konstrukionsweise des zu untersuchenden Betonbauteiles als der von Elementwänden eine 3D-Darstellung der fusionierten Datensätze einen Zugewinn an Informationen mit sich bringt. Hier kann deutlich die räumliche Lage der verschiedenen Konstruktionselemente festgestellt werden. Diese Zuordnung der Ortslagen der Konstruktionselemente wird durch die Verwendung eines Messsystemes wie dem OSSCAR-Rahmen ermöglicht. So können die einzelnen Messpunkte und –linien genauen Koordinaten zugeordnet werden und damit auch auf das untersuchte Objekt übertragen werden.

7 Zusammenfassung

7.1 Ergebnisse aus dem Bereich Hardware

Um bestmögliche Ergebnisse in diesem Forschungsvorhaben zu erzielen, ist eine Auswahl getroffen worden, welche Messgeräte im Rahmen der Fusion von Messdaten integriert werden sollen.

Die Auswahl eines Messgeräts wurde auf Grundlage folgender Kriterien getroffen:

- Anwendbarkeit des Messgeräts in der Praxis
- Kompatibilität mit dem OSSCAR-Scanner
- Lösbarkeit der Prüfaufgabe

Sowohl das Ultraschallgerät Acsys A1220, das Radargerät Mala Pro Ex als auch das Wirbelstromgerät Proceq Profoscope erfüllen die gestellten Anforderungen.

So werden alle drei Geräte in der Praxis angewendet. Das Acsys A1220 eignet sich hierbei unter anderem für die Detektion von Fehlstellen und die Ortung von tiefliegender Spannbewehrung. Das Radargerät Mala Pro Ex wird in der Praxis aufgrund der schnellen Messdatenaufnahme für die Strukturauflösung verwendet. Mit dem Proceq Profoscope wird im Zuge der Qualitätssicherung die Betonüberdeckung der obersten Bewehrungslage als auch der Reflektordurchmesser bestimmt. In diesem Projekt wurde ansonsten auf den Einsatz des Profoscopes weitesgehend verzichtet um eine Reduzierung der Messdauer zu erreichen. Durch die Nutzung einer hochfrequenten Radarantenne (2,3 GHz) ist die Detektion von oberflächennahen Bewehrungsstäben gewährleistet. Mit dem Profoscope wurde aber per Handmessung die Tiefenlage und mit dieser dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen bestimmt. Dies ermöglichte bei der Weiterbearbeitung der Messdaten und der Umrechnung der Zeitachse in eine Tiefenachse eine genauere Angabe der Betondeckung der Bewehrungsstäbe.

Ein großer Vorteil bei der Auswahl dieser Messgeräte, die meist als Einzelmessgeräte angewendet werden, ist die Kompatibilität mit dem OSSCAR-Scanner. So lassen sich alle drei Systeme mit dem OSSCAR-Scanner ansteuern. Dies ist ein wichtiges Kriterium für die Datenfusion, da mit dieser automatisierten Messdatenaufnahme die Deckungsgleichheit der Messfelder gegeben ist. Zusätzlich erfüllen die Scannermessungen die Anforderungen an die Genauigkeit.

Zu guter Letzt ist es mit der Kombination dieser Messgeräte auf Basis der Verfahrenskombination möglich, die gestellte Prüfaufgabe zu lösen.

7.2 Ergebnisse aus dem Bereich Software

Ein elementarer Punkt für das Forschungsvorhaben ist das Zusammenfügen der Informationen der verschiedenen Verfahren. Hierfür standen zu Beginn des Vorhabens keine geeigneten Softwaretools zur Verfügung.

Aus diesem Grund wurden in einem frühen Stadium des Vorhabens Algorithmen auf Basis der kommerziell erhältlichen Software MATLAB entwickelt, die eine Datenfusion mit unterschiedlichen Ansätzen ermöglichen.

Unabhängig von den eigentlichen Algorithmen sind hierbei immer folgende Schritte für die Datenfusion notwendig:

- Aufnahme der Messdaten in einen kompatiblen Raster
- Eliminieren systematischer Abweichungen (DC-Shift etc.)
- Verkürzung der Zeitachse
- Normierung und Interpolation der Messdaten
- Datenfusion mit unterschiedlichen Algorithmen

In einem späteren Stadium wurde desweiteren die kommerzielle Software ZIBAmira des Zuse Institut Berlin (ZIB) verwendet. Mit dieser war es desweiteren möglich auch 3D-Datensätze zu fusionieren. Um mit dieser Software sinnvolle Ergebnisse zu erhalten, wurden die Messdaten bevor sie fusioniert wurden, prozessiert. Da sich aus den Fusionen mit MATLAB die Addition der einzelnen Datensätze und eine stärkere Gewichtung der Radardaten herausstellte, wurden diese Einstellungen in ZIBAmira übernommen. Somit waren folgende Schritte für die Datenfusion nötig:

- Aufnahme der Messdaten in einem kompatiblen Raster
- Eliminieren systematischer Abweichungen (DC-Shift etc.)
- Verkürzung der Zeitachse
- Tiefenabhängige Verstärkung der Amplituden der Signale
- Entfernen von Antennenrauschen
- Migrieren der Messdaten
- Datenfusion mit dem Additions-Algorithmus

Zusammengefasst heißt das, dass die Fusion der Messdaten also nur durchgeführt werden kann, wenn die Messdatenaufnahme und die Vorbereitung der B-Bilder entsprechend durchgeführt wurde.

7.3 Ergebnisse der Untersuchungen

Um die Fragestellung des Forschungsvorhabens systematisch beantworten zu können, wurde das Versuchskonzept so aufgestellt, dass im ersten Schritt Messdaten ausgewertet werden, die an einem Referenztestkörper aufgezeichnet wurden. Als Referenz wurde hierbei ein Polyamidblock ausgewählt, der eine homogene und isotrope Gefügestruktur aufweist.

Es wurden systematische Untersuchungen an dem Polyamidblock durchgeführt, wobei die Parameter Polarisation, Frequenz und Messraster sowohl bei den Radar- als auch bei den Ultraschalluntersuchungen variiert wurden. Folgende Erkenntnisse konnten aus diesen Untersuchungen für die Lösung der gestellten Prüfaufgabe gewonnen werden:

- Die Radaruntersuchungen werden mit einer hochfrequenten Antenne in dichtem Messraster durchgeführt.
- Die Ultraschalluntersuchungen werden mit einem tieffrequentem Transversalwellenpr
 üfkopf in einem weiten Messraster durchgef
 ührt.
- Die Polarisation der beiden Verfahren ist gegensätzlich

Das Wirbelstromverfahren wurde im Verlauf dieses Projektes nicht mit in die Messungen integriert. Dies liegt darin begründet, dass durch die Wahl einer hochfrequenten Antenne der Radaruntersuchungen die oberflächennahen Bewehrungsstäbe schon detektiert werden konnten. So wurde das Wirbelstromverfahren alternativ dazu genutzt, um Aussagen zur Betonüberdeckung zu treffen. Damit konnte mit der Angabe über die Betondeckung die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen kalibriert werden. Dadurch konnte auf das Einbinden von Wirbelstrommessungen, und einer damit erhöhten Messzeit, verzichtet werden, da kein deutlicher Zuwachs an Informationen erreicht wird.

Durch die Anwendung der Ergebnisse aus der Referenzmessung an dem Polyamidblock an den Elementwänden mit bekannten Aufbau und Fehlstellen wurden folgende Erkenntnisse gewonnen:

- Als Fusionsalgorithmus werden mit der Addition und einer stärkeren Gewichtung der Radardaten die aussagekräftigsten Ergebnisse erreicht
- Bei der 2D-Fusion ist es gut möglich, auf die Migration der Datensätze zu verzichten, was die Genauigkeit der Tiefenlage von Reflektoren erhöht
- Durch den komplexen Konstruktionsaufbau der Elementwände ist es schwierig, Aufbaufehler und Konstruktionsgrenzen klar voneinander abzugrenzen
- Delaminationen des eingebrachten Kernbetons in die Betonschale führt zu Totalreflexionen der Ultraschallwellen und durch die Verwendung der hochfrequenten Radarantenne ist die Eindringtiefe zu gering, um nach der Fusion auch in größeren Tiefenlagen als der der Delamination Ergebnisse zu erhalten

- Bei der 3D-Fusion müssen die Datensätze prozessiert werden, damit keine Effekte wie Verrauschen entstehen
- Darstellung des fusionierten Datensatzes in 3D als Isoflächen ist durch die Konstruktion der Elementwände nicht gut geeignet. Delaminationen werden dabei als Isoflächen dargestellt und verdecken weitere mögliche Konstruktionselemente oder Fehlstellen innerhalb der Elementwand
- Durch die 3D-Fusion stehen mehrere hintereinanderliegende B-Bilder zur Verfügung, mit denen Delaminationen, Kiesnester und weitere Fehlstellen oder Konstruktionselemente feststellen lassen
- Anwendung der 3D-Fusion auf Betonelemente mit Bewehrungsstäben und Spanngliedern ist sehr gut geeignet, da diese durch eine Darstellung der Isoflächen klar hervorgehoben werden können

Als Ergebnis für das Forschungsvorhaben ist festzustellen, dass durch die Fusion von Datensätzen der Radar- und Ultraschallmessungen und der Nutzung des Wirbelstromverfahrens zur Bestimmung der Betondeckung ein deutlicher Zuwachs der Aussagekraft erreicht werden kann. Hierbei sind aber Unterschiede festzustellen. In Abhängigkeit der Fragestellung und der Betonbauteile kann dies stark schwanken. So ist die Fusion von Radar- und Ultraschalldaten an Elementwänden durch mögliche Delaminationen des eingebrachten Ortbetons in die Betonschale häufig nicht mit einem Zuwachs an Informationen verbunden. Wie in Kap. 6.3.2 festgestellt wurde, sind die Delaminationen auch schon in dem B-Bild der Ultraschallmessung deutlich zu erkennen. Durch die geringe Eindringtiefe der hochfrequenten Radarantenne werden kaum stärkere Signale aus einer größeren Tiefe erlangt. Wenn schwächere Signale der Radarmessung aus einer größeren Tiefe, wie z.B. in Abb 54, zu erkennen sind, werden diese durch die starken Signale der Totalreflexion der Ultraschallwellen nach der Fusion überdeckt.

Ist die Elementwand hingegen homogen und hat der eingebrachte Ortbeton in die Betonschale einen akustischen Verbund mit diesen, so sind mögliche Störungen wie Kiesnester nach der Fusion besser erkennbar.

Die Anwendung der Fusion auf andere Konstruktionsbauteile des Ingenieurbaus lässt, wie in Kap. 6.4 dargestellt, eine deutliche Verbesserung der Aussagekraft über den inneren Aufbau zu. Mit der Verwendung des Wirbelstromverfahrens kann hierbei die Betondeckung der oberflächennahen Bewehrung und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen bestimmt werden. Dadurch wird auch eine genauere Lagebestimmung von Konstruktionselementen in der Tiefe möglich.

7.4 Ausblick

Im Zeitraum des Forschungsvorhabens wurden Erkenntnisse gesammelt, die als Grundlage für die Anwendung der Fusion an realen Testkörpern dienen und in den vorangegangenen Kapiteln beschrieben wurden. So ist die Anwendung der Fusion an Elementwänden möglich und kann damit die Aussagekraft erhöhen. Doch kann es auch durch einen fehlenden akustischen Verbund dazu kommen, dass nach der Fusion Informationen überlagert werden. Hier wären weitere Untersuchungen nötig, wie z.B. die Fusion solcher Datensätze zusätzlich mit einem Datensatz einer Radarmessung, der mit einer niederfrequenteren Radarantenne aufgenommen wurde, durchzuführen. Dadurch erhält man einen weiteren Datensatz der Informationen auch in größeren Tiefen beinhaltet. Durch entsprechende Gewichtung der einzelnen Datensätze wäre es dann auch möglich, im fusionierten Datensatz auch hinter einer vorhandenen Delamination, Aussagen über die Konstruktion zu erhalten.

Desweiteren wären weitere Fusionsuntersuchungen von Datensätzen, welche an Ingenieursbauwerken (wie z.B. Brückenelementen oder Betonplatten mit Vorspannung) aufgenommen worden sind, von Interesse. Damit könnte die Fusion und damit die Erhöhung der Aussagekraft von zerstörungsfreien Untersuchungen auf ein breiteres Feld des Betonbaus ausgeweitet werden.

8 Anhang

8.1 Katalog der Aufbereitungsschritte von der Datenaufnahme zur Datenfusion

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte kurz erläutert und in tabellarischer Form aufgeführt. Dabei wird das Wesentliche erläutert, damit mit Hilfe dieser Erläuterungen zerstörungsfreie Messungen und die Fusion der aufgenommenen Daten durchgeführt werden können.

Planung und Durchführung der Messungen

Um deckungsgleiche Messfelder zu erhalten, welches die Grundvoraussetzung ist für die Datenfusion, wird ein Scannersystem (OSSCAR-Scanner) verwendet. Dieser muss dazu geeignet sein, die verschiedenen Messverfahren Radar und Ultraschall, als kombinierte Untersuchung durchzuführen (Kap.4.5).

Um den Zeitaufwand für die Messungen gering zu halten und trotzdem ausreichende Messdaten zu erhalten, werden für die beiden Verfahren Messraster festgelegt (Tabelle 3). Desweiteren werden für die Radarmessungen hochfrequente Antennen (z.B. 2,3 GHz) und für die Ultraschallmessungen niedrige Frequenzen (z.B. 50 KHz) für den Messkopf genutzt. Das Wirbelstromverfahren wird verwendet, um die Tiefenlagen der oberflächennahen Bewehrung zu bestimmen und mit dieser dann die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Radarwellen festzulegen.

rabono or Emotoriangon dor Fortamon rar moodangon mit dom o oo orat odamor			
Einstellungen	Ultraschall	Radar	
Frequenz	50 kHz Transversal	2,3 GHz	
Messpunktabstand	5 cm	2 mm	
Messlinienabstand	5 cm	5 cm	

Tabelle 3: Einstellungen der Verfahren für Messungen mit dem OSSCAR-Scanner

Aufbereitung der Messdaten für Radar und Ultraschall

Um die Daten sinnvoll zu kombinieren müssen diese im Vorfeld aufbereitet und prozessiert werden.

Radar:

Entfernen der Vorlaufzeit Durchführung eines DC-Shift zur Eliminierung systematischer Abweichungen Verkürzen der Zeitachse Tiefenabhängige Verstärkung der Signalamplituden Antennenrauschen reduzieren oder wenn möglich entfernen Falls nötig, durchführen der Migration der Messdaten

Ultraschall:

Entfernen des Signalrauschens Verkürzen der Zeitachse Durchführen der SAFT-Rekonstruktion

Datenfusion mit ZIBAmira

Wie in Kap. 5.6 aufgeführt, werden die prozessierten Messdaten wie folgt mit ZIBAmira kombiniert und fusioniert:

> Einlesen der Datensätze Visualisierung dieser Datensätze Eventuelle Durchführung starrer Transformationen der Daten Gewichtete Fusionierung der Daten Visualisierung der fusionierten Daten mit verschiedenen Methoden: Orthoslice Isosurface Volumen-Rendering Maximum-Intensity-Projection Innerliche Vermessung der visualisierten Daten möglich

Universität des Saarlandes Naturwissenschaftl.-techn. Fakultät III, Lehrstuhl für zerstörungsfreie Prüfverfahren und Qualitätssicherung Prof.Dr.-Ing. Christian Boller Campus, Geb. E3.1 66123 Saarbrücken

Im Auftrag

Prof. Dr.-Ing. C. Boller Projektleiter/Wissenschaftler Dipl.-Ing. Norman Diersch Wissenschaftler

9 Literaturverzeichnis

- [1] Taffe, A., Feistkorn, S. und N. Diersch: Erzielbare Detektionstiefen metallischer Reflektoren mit dem Impulsradarverfahren an Beton; In: Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 7, Ernst & Sohn
- [2] Feistkorn, S.: Gütebewertung qualitativer Prüfaufgaben in der zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen am Beispiel des Impulsradarverfahrens In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 603, Beuth Verlag Berlin (Dissertation TU-Berlin, 2011)
- [3] Taffe, A.: Zur Validierung quantitativer zerstörungsfreier Prüfverfahren im Stahlbetonbau am Beispiel der Laufzeitmessung In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 574, Beuth Verlag Berlin (Dissertation RWTH Aachen, 2008)
- [4] Maack, S.: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen, Dissertation; in Veröffentlichung
- [5] Taffe, A., Feistkorn, S. und N. Diersch: Erzielbare Detektionstiefen metallischer Reflektoren mit dem Impulsradarverfahren an Beton, Beton- und Stahlbetonbau 107 (2012) 7, Ernst & Sohn, S. 442-450
- [6] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen, DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (2008)
- [7] Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), Merkblatt für Ultraschallverfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile, Merkblatt B4 (1999), DGZfP
- [8] Krause, M.: Ultraschallechoverfahren an Betonbauteilen, in: Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.4, S. 341-352
- [9] Taffe, A. und H. Wiggenhauser, Zerstörungsfreie Zustandsermittlung und Qualitätssicherung in der Betoninstandsetzung, Beton- und Stahlbetonbau, Spezial `Erhaltung, Verstärkung, Instandsetzung` 7 (2005) S. 2-14
- [10] Taffe, A., Kind, T., Stoppel, M. und J. H. Kurz: Bauwerkscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen, Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011) 4, Ernst & Sohn, S. 267-276
- [11] Zimmer, A.: Abbildende zerstörungsfreie Prüfverfahren mit elastischen und elektromagnetischen Wellen. Kassel university press GmbH, Kassel, 2008
- [12] Streicher, D., Boller, C., und A. Taffe: Quantitative Ermittlung der Leistungsfähigkeit von Radar an Stahl- und Spannbetonbauteilen, In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2010, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2010, Mo.3.B.1. (DGZfP-Berichtsband 122-CD)
- [13] Streicher, D., Kurz, J. H. und C. Boller: Radar, Ultraschallecho und die Bestimmung der Betondeckung an Stahl- und Spannbetonbauteilen, In: Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V. (DGZfP): DGZfP-Jahrestagung 2011, ZfP in Forschung, Entwicklung und Anwendung, Zerstörungsfreie Materialprüfung, Berlin: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung (DGZfP), 2011, 9 Seiten, (DGZfP-Berichtsband 127-CD)
- [14] M.Schickert, M.Krause, W.Müller: Ultrasonic Imaging of Concrete Elements Using Reconstruction by Synthetic Aperture Focusing Technique". Journal of Materials in Civil Engineering 15 (2003) 235-246
- [15] Taffe, A., Kurz, J.H., Holst, R.: Brückenscanner Automatisierte zerstörungsfreie in-situ-Untersuchungen von Brücken (OSSCAR – OnSiteSCAnneR), Abschlussbericht, 1.1.2008 – 31.12.2010, Innonet Project