

Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 121

bast

Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

von

Norman Diersch
Alexander Taffe
Jens Wöstmann

Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung Berlin

Jochen H. Kurz
Ralf M. Moryson

Fraunhofer IZFP Saarbrücken

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 121

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M - Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt bei der Carl Schünemann Verlag GmbH, Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen, Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in der Regel in Kurzform im Informationsdienst **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos angeboten; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Ab dem Jahrgang 2003 stehen die **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST)** zum Teil als kostenfreier Download im elektronischen BAST-Archiv ELBA zur Verfügung.
<http://bast.opus.hbz-nrw.de>

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.0429/2006/DRB:
Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

Fachbetreuung
Ralph Holst

Herausgeber
Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion
Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag
Fachverlag NW in der
Carl Schünemann Verlag GmbH
Zweite Schlachtpforte 7, D-28195 Bremen
Telefon: (04 21) 3 69 03 - 53
Telefax: (04 21) 3 69 03 - 48
www.schuenemann-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-95606-216-2

Bergisch Gladbach, November 2015

Kurzfassung – Abstract

Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

Verkehrsbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen werden gemäß Stand der Technik nach DIN 1076 untersucht. Sofern bei der handnahen Prüfung Schäden festgestellt werden, deren Ursache und Umfang unklar sind, erfolgt die Durchführung einer objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) nach dem Leitfaden der BAST. Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau-Verfahren) werden bislang nur in geringem Umfang eingesetzt. Detaillierte Untersuchungen mit Bauwerkscannern werden im Rahmen der OSA bislang gar nicht eingesetzt.

Die Aufgabenstellung dieses Forschungsvorhabens ist die Integration von ZfPBau-Verfahren in Form von Handmessungen und automatisierter Datenaufnahme mit Baustellenscannern in den Untersuchungsprozess nach DIN 1076 bzw. der nachfolgenden OSA.

Das Gesamtziel bestand darin, die Leistungsfähigkeit von Bauwerkscannern für Prüfaufgaben im Rahmen der OSA zu verbessern und ihre Einsetzbarkeit praxisorientiert zu gestalten. Dies wurde an geeigneten Fragestellungen und Bauwerken gezeigt.

Die Vorgehensweise, um den bestmöglichen Nutzen aus dem Einsatz des OSSCAR-Scanners zu erreichen, konzentriert sich auf die automatisierte Datenaufnahme und kombinierte Datenauswertung durch Vergleich von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom.

Um die automatisierte Datenaufnahme zu verbessern, wurden Geräteparameter wie Messpunktabstand, Messzeit an einem Punkt und Verfahrensgeschwindigkeit der Achsen den Bauteilbedingungen bestmöglich angepasst. Darüber hinaus wurde eine Strategie erarbeitet, die es erlaubt, Rüstzeit und Messzeit des Scanners zu verkürzen.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom, die auf der Basis von kongruenten Messflächen gewonnen wurden, ist der Mehrwert an Information hinsichtlich der inneren Konstruktion festgestellt worden.

Detailed non-destructive studies of prestressed bridgedecks under traffic conditions in the object-related damage analysis

Traffic structures in connection with federal highways are examined according to state of the art to DIN 1076. If in hand close examination damage is found and their cause and extent are unclear, an object-related damage analysis (OSA) according to the Guideline of the Federal Highway Research Institute is conducted. Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE methods) have so far been used only to a limited extent. Detailed studies with on-site scanners are not yet used in the scope of OSA.

The task of this research project was the integration of NDT-CE methods in the form of manual measurements and automated data acquisition with on-site scanners in the investigation process according to DIN 1076 or the following OSA.

The general aim was to improve the performance of on-site scanners for testing tasks in the context of OSA and to make their applicability.

The procedure to achieve the maximum benefit from the use of the on-site scanner OSSCAR, focuses on the automated data acquisition and combined data analysis for comparing radar, ultrasonic and eddy current methods.

To improve the automated data acquisition, measurement parameter like measurement points distance, measurement time at one location and velocity of the scanner axis, were optimally adapted to the component conditions. In addition, a strategy has been developed, which allows to reduce set-up time and measurement time of the scanner.

By combining the results of the methods radar, ultrasonic and eddy current, that have been obtained on the basis of congruent measuring surfaces, the added value of information regarding the internal structure has been achieved.

Inhalt

1	Aufgabenstellung, Ziel und Vorgehensweise	7	4	Datenaufnahme und Ergebnisdarstellung im Rahmen einer OSA	17
2	Bearbeitung des Vorhabens	8	4.1	Anforderungen einer OSA	17
2.1	Gliederung in Arbeitspakete (AP)	8	4.2	Großflächige Datenaufnahme von Hand	18
2.2	Anpassung des Bauwerkscanners an das Anforderungsprofil einer OSA (AP1)	8	4.3	Automatisierte und kombinierte Datenaufnahme mit Bauwerkscannern	18
2.3	Festlegung eines geeigneten Bauwerks (AP2)	8	4.3.1	Stand der Technik	18
2.4	Bauwerksuntersuchungen zur Verbesserung der Datenaufnahme (AP3)	9	4.3.2	OSSCAR-Bauwerkscanner	19
2.5	Modifikation des Bauwerkscanners (AP4)	9	4.3.3	Weiterentwicklung der Steuerungssoftware des OSSCAR-Scanners	21
2.6	Bauwerksuntersuchungen zur verbesserten bildgebenden Darstellung der Ergebnisse (AP5)	11	4.3.4	Entwicklung des Funktionscontainers und des 3D-Browsers	21
2.7	Kombinierte Datenauswertung und bildgebende Darstellung (AP6)	12	5	Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen	26
2.8	Dokumentation und Verfahrensanweisung (AP7)	12	5.1	Scannermessungen von unten an der Grumbachtalbrücke	26
3	Beschreibung der großflächig angewandten ZfPBau-Verfahren	12	5.2	Handmessungen von oben an der Grumbachtalbrücke	32
3.1	Allgemeines	12	5.3	Scannermessungen an dem IZFP-Brückenplattenelement	34
3.2	Ultraschallecho	13	5.4	Kombinierte Untersuchungen mit Radar und US an hergestellten Betonbauteilen	38
3.3	Radar	14	6	Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen	41
3.4	Wirbelstromprüfung	15	7	Verfahrensanweisung	43
3.4.1	Das Messprinzip	15	8	Literatur	69
3.4.2	Die Anwendung	16			
3.5	Verfahrenskombination	17			

1 Aufgabenstellung, Ziel und Vorgehensweise

Verkehrsbauwerke im Zuge von Bundesfernstraßen werden gemäß Stand der Technik nach DIN 1076 untersucht [1]. Sofern bei der handnahen Prüfung Schäden festgestellt werden, deren Ursache und Umfang unklar sind, erfolgt die Durchführung einer objektbezogenen Schadensanalyse (OSA) nach dem Leitfaden der BASt [2]. Die Rolle der OSA als Teil des Bauwerksmanagementsystems (BMS) ist in [3] beschrieben. Für etliche Fragestellungen, die im Rahmen der OSA aufgetreten sind, hat sich der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren (ZfPBau-Verfahren) bewährt. Zur Darstellung der Leistungsfähigkeit der zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar, Ultraschall und Impakt-Echo existieren von der BASt in verschiedenen Forschungsberichten dokumentierte Brückenuntersuchungen [3] bis [7] sowie Veröffentlichungen der BAM ([8] bis [12]). Schwerpunkte dieser Arbeiten sind die bildgebende Darstellung der inneren Konstruktion (Lage der schlaffen Bewehrung und der Spannglieder) und der Ortung von Verpressfehlern. Zur bildgebenden Darstellung existieren leistungsfähige Rekonstruktionsalgorithmen und Möglichkeiten der Datenfusion ([14, 15]). Dazu ist allerdings die Datenaufnahme mit mehreren Verfahren, i. d. R. Ultraschallecho, Radar und Impact-Echo in einem engen Messraster von 2 bis 5 cm erforderlich. Die Datenaufnahme erfolgt automatisiert mit Bauwerksscannern, die von der BAM in Zusammenarbeit mit dem IZFP Saarbrücken entwickelt und seit 2004 [13] angewandt werden. Verschiedene Bauwerksscanner sind in [9] bis [16] beschrieben.

Neuere Entwicklungen von Baustellenscannern, wie z. B. der im Verbundforschungsvorhaben entwickelte OSSCAR (www.osscar.eu On-Site SCAN neR), erlauben die kombinierte Untersuchung eines Bauteils mittels Ultraschall, Radar und Wirbelstrom [17]. Dieses Messsystem von BAM und IZFP steht im Rahmen dieses Vorhabens zur Verfügung. Damit ist es z. B. möglich, den tatsächlichen Verlauf von Spanngliedern genau zu ermitteln und beispielsweise vorhandene Bestandspläne zu verifizieren.

Die Aufgabenstellung dieses Forschungsvorhabens ist die Integration von ZfPBau-Verfahren in Form von Handmessungen und automatisierter Datenaufnahme mit Baustellenscannern in den

Untersuchungsprozess nach DIN 1076 bzw. der nachfolgenden OSA.

Das Gesamtziel besteht darin, die Leistungsfähigkeit des OSSCAR als Bauwerksscanner für Prüfaufgaben im Rahmen der OSA zu verbessern und seine Einsetzbarkeit praxisorientiert zu gestalten. Dies wird an geeigneten Fragestellungen und Bauwerken gezeigt. Aus den Untersuchungen erfolgt eine Strategie, an welchen Stellen Scanner bestmöglich eingesetzt werden können und wie die Rüstzeit hierzu (Befestigungspunkte des Scanners lokalisieren, Anbringen und Versetzen des Scanners) verkürzt werden kann. Des Weiteren sollen die Parameter der Datenaufnahme (Messpunkt-Abstand, Geräteparameter) im Hinblick auf eine bestmögliche bildgebende Darstellung der Ergebnisse optimiert werden. Dieses Ziel soll auch durch den Einsatz geeigneter Auswertungsalgorithmen (z. B. SAFT- und Migrationsalgorithmen) und Techniken zur Datenfusion erreicht werden.

Die Vorgehensweise, um den bestmöglichen Nutzen aus dem Einsatz des OSSCAR-Scanners zu erreichen, konzentriert sich auf folgende Schwerpunkte:

- automatisierte Datenaufnahme,
- kombinierte Datenauswertung durch Vergleich von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom.

Um die automatisierte Datenaufnahme zu verbessern, sollen Geräteparameter wie Messpunkt-Abstand, Messzeit an einem Punkt und Verfahrensgeschwindigkeit der Achsen den Bauteilbedingungen bestmöglich angepasst werden. Darüber hinaus soll eine Strategie erarbeitet werden, die es erlaubt, Rüstzeit und Messzeit des Scanners zu verkürzen. Dazu sollen Modifikationen am Scanner vorgenommen werden, die das Setzen der Befestigungspunkte erleichtern (z. B. Einsatz von Schablonen) und die den Anbau sowie das Versetzen des Scanners vereinfachen.

Durch den Vergleich der Ergebnisse der Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom, die auf der Basis von kongruenten Messflächen gewonnen wurden, soll der Mehrwert an Information hinsichtlich der inneren Konstruktion festgestellt werden.

2 Bearbeitung des Vorhabens

2.1 Gliederung in Arbeitspakete (AP)

Die Laufzeit des Vorhabens ist vom 15.04.2012 bis 15.10.2013. Die Arbeiten wurden in sieben Arbeitspakete (AP) gegliedert, die in Bild 1 im zeitlichen Ablauf dargestellt sind:

- AP1: Anpassung des Bauwerkscanners an das Anforderungsprofil einer OSA,
- AP2: Festlegung eines geeigneten Bauwerks,
- AP3: Bauwerksuntersuchungen zur Verbesserung der Datenaufnahme,
- AP4: Modifikation der Bauwerkscanners,
- AP5: Bauwerksuntersuchungen zur verbesserten bildgebenden Darstellung der Ergebnisse,
- AP6: Kombinierte Datenauswertung und bildgebende Darstellung,
- AP7: Dokumentation und Verfahrensweisung.

2.2 Anpassung des Bauwerkscanners an das Anforderungsprofil einer OSA (AP1)

Der Einsatz eines Bauwerkscanners zur Untersuchung von Brückenplatten im Rahmen einer OSA erfordert vorzugsweise Messungen von der Unterseite einer Brückenplatte. Des Weiteren muss der Scanner für den Einsatz von der Arbeitsbühne eines Brückenuntersichtgeräts (Unterflurfahrzeug) tauglich sein.

Scannermessungen von der Oberseite der Brückenplatte werden nur in Ausnahmefällen sinnvoll sein, da Ultraschall- und Wirbelstrommessungen durch den Asphalt und die Abdichtung i. d. R. zu keinen verwertbaren Ergebnissen führen. Daher wurde in diesen Fällen auf großflächige Radarmessungen von Hand Augenmerk gelegt.

Mit Beginn des Vorhabens wurde der OSSCAR-Bauwerkscanner (Kapitel 4.3.2) den Anforderungen zur Datenaufnahme an Brückenplatten angepasst. Bis dahin wurde der Scanner vorwiegend an vertikalen Bauteilen eingesetzt. Bei der Untersuchung von Brückenplatten sind die zu untersuchenden

	Monate																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
AP1	■	■	■															
AP2			■	■	■													
AP3					■	■												
AP4							■	■	■	■	■	■	■					
AP5							■								■			
AP6							■	■	■					■	■	■	■	
AP7								■							■	■	■	■

Bild 1: Vorgesehener Arbeitsplan nach Arbeitspaketen (AP) gegliedert

Flächen horizontal. Daher musste der Scanner den Anforderungen von Messungen an horizontalen Flächen über Kopf wie bei der Untersuchung der Unterseite von Brückenplatten angepasst werden. Dazu wurden umfangreiche Testmessungen über Kopf durchgeführt, um den Anpressdruck des Ultraschallprüfkopfs zu optimieren. Auch wurden einfache Vorrichtungen vorgesehen, um den Luftspalt zwischen Radarantenne und Bauteiloberfläche zu minimieren.

Es erfolgten umfangreiche Tests zunächst an Deckenflächen der Versuchshalle, um die Toleranz gegen Unebenheiten festzustellen. Am Scanner wurden die bestmöglichen Einstellpositionen der Saugfüße in Bezug zur Höheneinstellung der Prüfkopfhalterung bestimmt. Darüber hinaus mussten Kabelführungen so angepasst werden, dass ein Abfahren der Bauteiloberfläche störungsfrei möglich ist. Es wurde ein Konzept erarbeitet, wie der Scanner sicher und mit möglichst geringem Aufwand aus der Arbeitsbühne versetzt werden kann.

Diese Vorarbeiten in den ersten beiden Monaten des Vorhabens waren Voraussetzung für einen ersten erfolgreichen Messeinsatz im Juli 2012 an der Grumbachtalbrücke (Autobahn A 6, Saarland) zur Untersuchung der Unterseiten der Brückenplatte.

2.3 Festlegung eines geeigneten Bauwerks (AP2)

Im Frühjahr 2012 ergab die Anfrage des Landesbetriebs für Straßenbau des Saarlandes beim Projektpartner IZFP die Möglichkeit einer Messung an der Grumbachtalbrücke im Zuge der Autobahn A 6 zwischen St. Ingbert und Saarbrücken. Bereits im dritten Monat des Vorhabens konnte die Brückenplatte von der Unterseite eines Brückenuntersichtgeräts

mit dem Bauwerkscanner untersucht werden. Neben dem Test zur Einsetzbarkeit des Scanners bei Über-Kopf-Messungen von der Arbeitsbühne des Unterflurfahrzeuges wurden detaillierte Erkenntnisse über Geometrie und innere Konstruktion der Brückenplatte gewonnen.

Für das Frühjahr 2013 waren Messungen an dem IZFP-Brückenplattenelement geplant, das in Saarbrücken auf dem Gelände des Fraunhofer IZFP gelagert ist. Durch Messungen von Ober- und Unterseite des Plattenelementes mit dem Scanner konnten weitere Erkenntnisse bezüglich Machbarkeit und Grenzen des Verfahrens gewonnen werden.

Die Abstimmung, an welchem Objekt Untersuchungen durchgeführt wurden, erfolgte in Absprache mit der BAST.

2.4 Bauwerksuntersuchungen zur Verbesserung der Datenaufnahme (AP3)

Entgegen dem in Kapitel 2.1 dargestellten Arbeitsplan, wo nur im 6. und 7. Monat Bauwerksuntersuchungen vorgesehen waren, wurden weitere Untersuchungen im Frühjahr 2013 an einem Brückenelement, wie in Kapitel 2.3 erläutert, durchgeführt.

Im dritten Monat des Vorhabens erfolgten wie bereits oben ausgeführt Messungen an der Unterseite der Brückenplatte an der Grumbachtalbrücke im Zuge der A 6. Hier wurden insbesondere mit Ultraschall vor dem Einsatz des Scanners Handmessungen mit dem Ultraschallgerät A1220 an der Unterseite der Brücke vorgenommen, um die richtige Verstärkung und die bestmöglichen Geräteeinstellungen vorzunehmen. Insbesondere konnten die Erfahrungen aus den umfangreichen Tests in AP1 zur Optimierung des Anpressdrucks des Ultraschallprüfkopfs und zur Minimierung des Luftspalts zwischen Radarantenne und Bauteiloberfläche bei der Durchführung der Messungen mit dem Scanner umgesetzt werden.

Zusätzlich wurde das Zeitfenster des Absetzvorgangs des Ultraschallprüfkopfs bei unveränderter Datenqualität so weit verkürzt, sodass die Messung der gesamten Fläche (0,5 x 1,0 m²) bei einem Messraster von 2,5 cm statt 60 Minuten nur noch knapp 40 Minuten benötigt. Ebenso wurde die Verfahrensgeschwindigkeit der Radarantenne so optimiert, dass ohne Verlust einzelner Messungen die

schnellstmögliche Datenaufnahme erreicht wurde. Für eine Messung der gesamten Fläche (0,5 x 1,0 m²) wird eine Messzeit mit dem Radarverfahren von etwa 10 Minuten für eine Polarisationsrichtung benötigt.

Für das Umsetzen des Scanners wurden samt Verfahren des Brückenuntersichtgeräts etwa 10 Minuten benötigt. Der Wechsel des Prüfkopfs bzw. der Radarantenne von Ultraschall auf Radar und umgekehrt dauerte etwas weniger als 10 Minuten. Insgesamt kann bei störungsfreiem Ablauf eine Messfläche von 0,5 x 1,0 m² bei einem Messraster bei Ultraschall von 2,5 cm und bei Radar mit 5 cm Spurbstand in zwei Polarisationsrichtungen in ca. 1 ¼ Stunden erfasst werden.

2.5 Modifikation des Bauwerkscanners (AP4)

Dieses Arbeitspaket umfasst gerätetechnische und softwarespezifische Modifikationen. Die Erfordernisse zum gerätetechnischen Umbau ergaben sich aus dem Messeinsatz an der Grumbachtalbrücke. Neben Umbauten an den Endschaltern mussten Modifikationen zur Reduzierung der Anfälligkeit gegen Verdrillung der Scannerachsen vorgenommen werden. Diese Umbauarbeiten wurden im 4. bis 7. Monat im Anschluss an den Messeinsatz an der Grumbachtalbrücke vorgenommen.

Darüber hinaus sind Modifikationen an der Scannersoftware vorgesehen wie in Kapitel 4.3.3 beschrieben. Das vorhandene Softwarepaket des OSSCAR-Scanners wurde auf dem Stand des abgeschlossenen Forschungsvorhabens OSSCAR übernommen. Dabei wurden die Komponenten zur Scannersteuerung nur in einem geringen Maß angepasst. Die Hauptarbeit liegt in der Integration möglichst vieler Auswertungsalgorithmen in den Funktionscontainer und der Weiterentwicklung des 3D-Browsers.

Der Funktionscontainer ist ein softwaretechnischer Rumpf für die Integration verschiedener Algorithmen in eine bestehende Software. Der Begriff des Funktionscontainers ist eine Abstraktionsebene, um applikationsabhängige Algorithmen zu implementieren. Wie in Kapitel 4.3.4 beschrieben wurden zwei Softwarewerkzeuge zur Analyse der mit dem OSSCAR aufgezeichneten Messdaten in die enge Wahl gezogen. Die Softwaresysteme arbeiten auf unterschiedlichen Softwareframeworks. Das

Werkzeug HWDB basiert auf einer nativen C/C++ Schnittstelle basierend auf den Softwarebibliotheken der Microsoft Foundation Classes (MFC) in der Version 4.2. Der I-DEAL-Viewer basiert auf dem .NET Framework in der Version 3.5. Alle Auswertelgorithmen wurden mit MATLAB, Version 2010b und in der Folge mit der Version 2012a, implementiert und als C++ Bibliotheken (*.dll) distribuiert.

Um überhaupt die Algorithmen an die unterschiedlichen Softwareplattformen adaptieren zu können, mussten zwei unterschiedliche Wege implementiert werden.

Der Funktionscontainer für das Softwaresystem HWDB besteht aus einer C-Bibliothek, in Form einer DLL, die von der Applikation über eine Funktion des Windows Application Programming Interface (Windows-API) explizit zur Laufzeit geladen werden muss. Damit diese DLL geladen werden kann, müssen alle ihre Funktionen bestimmten Regeln genügen. Eine dieser Regeln beschreibt das Interface einer Funktion:

- `int Function(void* pParam)`

Der Funktionsrumpf ist gemäß der C-Notation streng untypisiert, was es einem Programmierer ermöglicht, jeden Speicherblock aus dem Anwenderprogramm in die Bibliothek zu transportieren. Nachteil dieser Technik ist genau diese untypisierte Schnittstelle. Beide Programmteile müssen intern nach gemeinsamen Regeln auf diesen Speicherbereich zugreifen und diesen kooperativ verwenden. Wird dies nicht beachtet, so ist das gesamte Softwaresystem instabil. Automatische Schutzmechanismen des Betriebssystems oder des Softwareframeworks greifen in diesem Fall nicht.

Das Anwenderprogramm HWDB stellte über diese Schnittstelle der Schnittstellen-DLL einen Datentyp auf die geladenen Rohdaten zur Verfügung. Diese konnten dann in der Folge bearbeitet werden (s. Bild 2).

Ein Nachteil der Verwendung des HWDB war, dass es keine Möglichkeit gab, die Algorithmenbibliothek direkt an das Anwenderprogramm HWDB zu binden. Grund hierfür war die Art der Ausführung des Programms. Es wurde noch mit der Softwareentwicklungsumgebung Visual Studio 6.0 auf Basis von C++ und der MFC-Bibliothek 4.2 entwickelt. Die verwendeten MATLAB-Skripte für die Algorithmen einbindung bauen allerdings bereits auf den MFC-Bibliotheken 9.0 auf, was zu Inkompatibilitäten

führt. Umgangen werden konnte das Problem, indem die neueren Module in eine zusätzliche Softwarestruktur eingebettet wurden. Dies verhinderte, dass die Algorithmenbibliothek unmittelbar im Prozessraum des Anwendungsprogrammes laufen konnte. Hierzu wurde ein COM-Server (OutProc-Server) implementiert, der im Grunde eine eigenständige Applikation darstellt und seine Funktionalität jedem Anwenderprogramm zur Verfügung stellen kann. Die Implementierung verlief so weit erfolgreich und die modernen Algorithmen konnten mit den alten Bibliotheksstrukturen verbunden werden.

Die Tatsache, dass die prozessierten Daten in allen Dimensionen in der gleichen Größe wie die Rohdaten bei der Anwendung der Algorithmen vorliegen mussten, damit das HWDB-Anwenderprogramm nutzbar war, führte dazu, dass die Weiterentwicklung mit diesem Werkzeug eingestellt wurde.

Als Alternative wurde das Softwaresystem der Firma I-DEAL eingesetzt. In Zusammenarbeit mit dem Hersteller wurde ein Interface-Konzept entwickelt, das den Bedürfnissen der verschiedenen Algorithmen gerecht wurde. Der I-DEAL-Viewer (Bild 3) ist ein modernes Werkzeug, das auf dem .NET Framework 3.5 und höher basiert. Beim An-

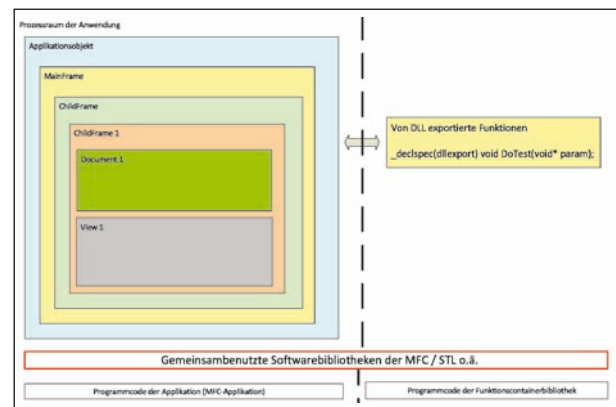


Bild 2: Code-Segmente Bibliothek und HWDB, Funktionsaufruf

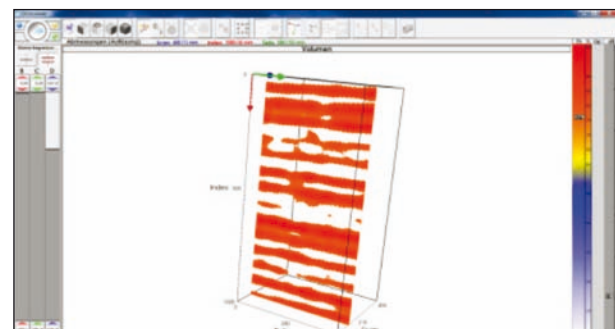


Bild 3: Code-Segmente Bibliothek und I-DEAL-Viewer, Funktionsaufruf

binden der Algorithmen-Bibliotheken entfiel dadurch eine separate Softwareebene. Hier konnte man eine Einbindung direkt auf Basis des .Net Frameworks durchführen, in dem man die C-Bibliotheken aus MATLAB mittels einer dünnen Prozessschicht aus Managed-C-Code integrieren konnte.

Einzig die Fehlersuche bei beiden Werkzeugen war bedingt durch die Verwendung der beiden Softwaretechnologien hinderlich.

Im Laufe der Tests stellte sich ein Nachteil des I-DEAL-Viewers heraus. In der 32-Bit-Variante fehlt dem Tool der notwendige Speicherplatz, um eine größere Datenmenge verarbeiten zu können. Daher wurde eine Portierung nach 64 Bit ins Auge gefasst.

Der aktuelle Funktionscontainer ist eine einfache Softwareschnittstelle, die in C implementiert wurde. Sie besteht aus einem einfach gehaltenen Interface wie im Folgenden zu sehen ist. Dieses muss zur Realisierung der Integration einfach implementiert werden, d. h., die Bibliothek zur algorithmischen Verarbeitung muss die Implementierung des Interfaces dem Anwenderprogramm zur Verfügung stellen.

```
namespace PluginInterface
{
    public interface IPluginProcessing
    {
        //void Initialize();
        //void Dispose();

        bool DatasetProcessing(ushort[] dataset);
    }

    public interface IPluginLoader
    {
        bool DatasetLoading(ISynchronizeInvoke UllInvoker,
            out ILoaderData loaderData);
    }

    public class Parameter3D<T>
    {
        public T Scan;
        public T Index;
        public T Depth;
    }

    public enum XYZ2BCDenum
    {
        DCB,
        BCD
    }

    public enum XYZ2SIDenum
    {
        SDI,
        IDS
    }

    public enum OriginPositionEnum
    {
        LowerLeft,
        UpperLeft,
        LowerRight,
        UpperRight
    }
}
```

```
}
public interface ILoaderData
{
    string FileTitel { get; }

    ushort[] Data { get; }

    Parameter3D<double> Origin { get; }
    Parameter3D<double> Size { get; }
    Parameter3D<int> Dimension { get; }

    XYZ2BCDenum XYZ2BCDmapping { get; }
    XYZ2SIDenum XYZ2SIDmapping { get; }

    OriginPositionEnum OriginPosition { get; }

    bool ToCompress { get; }
}
}
```

Im Gegensatz zur HWDB-Anwendung lädt der I-DEAL-Viewer nicht die Rohdaten. Das Anwenderprogramm empfängt nur diese Daten und stellt diese dar. Des Weiteren stellt es weitere Softwarefunktionen zur Darstellung, wie Zoom, Farbtabelle, 3D- und 2D-Datendarstellung, zur Verfügung. Aus diesem Grund können auch die Datenvolumina einzelner Auswertungen unterschiedlich groß sein, da alleine der Funktionscontainer die Größe der Dimensionen bestimmt.

Ein Nachteil ist, dass jede Algorithmenimplementierung für die Parametrierung der Auswertung zuständig ist und dementsprechend eine Bedienoberfläche hierfür zur Verfügung gestellt werden muss (Kapitel 4.3.4).

Für den I-DEAL-Viewer wurden im Rahmen des Vorhabens zwei Plugins implementiert. Beim ersten handelt es sich um Matlab-Algorithmen zum Processing von Radardaten [16]. Diese erlauben ein Processing der Daten ohne Migration. Für die Bearbeitung der Ultraschalldaten wurde ein 3D-SAFT-Algorithmus (Synthetic Aperture Focussing Technique) integriert. Screenshots der Plugin-Implementierungen und der erforderlichen Parameter sind in Kapitel 4.3.4 dargestellt.

2.6 Bauwerksuntersuchungen zur verbesserten bildgebenden Darstellung der Ergebnisse (AP5)

Es liegen Ergebnisse mit den Untersuchungen an der Grumbachtalbrücke (Kapitel 5.1) und der IZFP-Platte (Kapitel 5.3) vor und diese wurden systematisch hinsichtlich einer verbesserten bildgebenden Darstellung bearbeitet.

Folgende Ansätze wurden dabei verfolgt:

- Einsatz oberflächennaher Filter zur Verbesserung der Sichtbarkeit oberflächennaher Reflektoren bei den Radardaten.
- Durch systematische Anpassung der Auswertelgorithmen konnte eine deutliche Verbesserung der Darstellung der Ergebnisse erreicht werden. Hierbei wurden zwei Wege gegangen. Alle Daten sind mit Standardauswerteprogrammen bearbeitet worden, um die Möglichkeit der ZfPBau in der OSA aufzuzeigen. Gleichzeitig wurden vom IZfP der Funktionscontainer und der 3D-Browser weiter den Anforderungen der OSA angepasst, um eine möglichst kompakte Datenaufnahme und Auswertung ohne die Nutzung von Drittprogrammen zu erreichen (auch AP6). Hier wurden schon sehr gute Ergebnisse erreicht und Standardauswertelgorithmen konnten erfolgreich in den OSSCAR implementiert werden. Auch die 3D-Darstellung ist umgesetzt worden, doch sind hier Anpassungen der Hardware nötig, da der Ressourcenverbrauch mit dem derzeitigen benutzten Computersystem nicht gedeckt werden kann.

2.7 Kombinierte Datenauswertung und bildgebende Darstellung (AP6)

Durch die kombinierte Datenauswertung ist es möglich, die innere Struktur von Brückenplatten oberflächennah und in größerer Tiefe darzustellen. Dies ist vor allem durch die Verwendung der beiden Verfahren Ultraschall und Radar möglich, die ein unterschiedliches Eindring- und Auflösungsvermögen haben (Kapitel 3). In diesem Forschungsvorhaben sind die Stärken der beiden Verfahren herausgearbeitet worden und konnten sehr gut an der Grumbachtalbrücke und dem IZfP-Plattenelement dargestellt werden (Kapitel 5.1 und Kapitel 5.3).

Ein weiterer Mehrertrag durch die Fusion der Datensätze, die auf einer kongruenten Messfläche gewonnen wurden, ist machbar und konnte in Kapitel 5.4 am Beispiel eines bekannten Bauteiles aufgezeigt werden. Die daraus resultierenden Erfahrungen wurden dann auf ein Messfeld der Messungen an der Grumbachtalbrücke übertragen. Deutlich sind hier die Lagen der oberflächennahen Bewehrung, der Querspannglieder und der Bauteiloberflächen zu erkennen und können für die Analyse des Objektes herangezogen werden.

2.8 Dokumentation und Verfahrensanweisung (AP7)

Im Kapitel 7 sind die Erfahrungen, die mit dem OSSCAR-Scannersystem bei den Messeinsätzen gemacht wurden, dokumentiert und dargestellt. So ist der zeitliche Aufwand, der je Messfeld benötigt wird, im Laufe des Forschungsvorhabens reduziert worden.

Die Beschreibung für den Aufbau und die Installation des OSSCAR-Systems für Über-Kopf-Messungen wurde so aufgebaut, dass dies für Prüfer vor Ort gut und schnell umgesetzt werden kann und mit wenigen Einsätzen die Messzeiten erreichbar sind.

Des Weiteren sind die Auswerteschritte für die Messdaten der Ultraschall- und Radarverfahren ausführlich dokumentiert und bebildert worden.

3 Beschreibung der großflächig angewandten ZfPBau-Verfahren

3.1 Allgemeines

Für die Analyse des Zustands des Inneren der Konstruktion werden in diesem Forschungsvorhaben folgende zerstörungsfreie Prüfverfahren angewendet:

- Ultraschallecho,
- Radar,
- Wirbelstromverfahren.

Bei allen Verfahren handelt es sich um Echo-Verfahren, d. h., der Energieeintrag und die Erfassung der vom Bauteil reflektierten Energie erfolgen von derselben Seite. Für die zerstörungsfreien Untersuchungen ist somit eine einseitige Zugänglichkeit der Bauteile ausreichend.

Radar ist ein elektromagnetisches Verfahren, mit dem schnell und zuverlässig Bauteildicken bestimmt und schlaffe Bewehrung, Spannkäme und größere Hohlstellen geortet werden können. Die Wirbelstromprüfung dient ergänzend zu der Betondeckungsmessung der oberflächennahen Bewehrung.

Ultraschallecho wird ebenfalls zur Dickenbestimmung und zur Ortung von Spanngliedern angewendet.

det. Darüber hinaus sollen mit den Verfahren die Bauteile auf eventuelle Verdichtungsmängel im Betongefüge und vor allem auf gegebenenfalls vorhandene Verpressfehler in den Hüllrohren untersucht werden.

Durch Automatisierung der Messverfahren können im Vergleich zur Handmessung detaillierte Kenntnisse der inneren Konstruktion gewonnen werden.

Im Folgenden werden die angewendeten ZfPBau-Verfahren beschrieben.

3.2 Ultraschallecho

Das Ultraschallecho-Verfahren wurde bis vor einigen Jahren vorzugsweise zur Messung von Bauteildicken eingesetzt, wie im zugehörigen DGZfP-Merkblatt beschrieben [18]. Grundlagen des Ultraschalls sind in [19] beschrieben, wobei in [20] auf die Aspekte der Untersuchung an Beton eingegangen wird. Enge Messraster in Kombination mit entsprechender Datenauswertung erlauben mittlerweile, wie nachfolgend beschrieben, auch die bildgebende Darstellung der inneren Konstruktion von Bauteilen, wobei die Anzahl, Lage und Tiefe von Spanngliedern und schlaffer Bewehrung dargestellt werden können ([20, 21]). Zur schnellen automatisierten Messung werden sogenannte Punkt-Kontakt-Prüfköpfe verwendet, die ohne Koppelmittel einfach nur auf der Bauteiloberfläche angedrückt werden [22]. Für Messungen mit dem Ultraschallecho-Verfahren werden auf der Bauteiloberfläche durch eine elektrische Pulsanregung punktuell akustische Schallimpulse im Frequenzbereich von 20 bis 200 kHz erzeugt. Die Impulse breiten sich im Bauteil aus und werden an innen liegenden Grenzschichten (Lufteinschlüsse, Bewehrungsstahl, Hüllrohre) bzw. an der Bauteilrückseite gestreut, reflektiert und gebeugt. Für die Wellenausbreitung ist die akustische Impedanz der unterschiedlichen Materialien maßgebend. Die Reflexion der Schallwellen ist beim Übergang zu Luft am größten. Als Messergebnis werden die Intensitäten der zur Bauteiloberfläche zurück reflektierenden Schwingungsimpulse über die Zeit erfasst. Stellt man für eine Punktmessung diese Intensität über der Zeit dar, spricht man von einem Zeitsignal bzw. A-Bild (Bild 4).

Werden mehrere Ultraschallmessungen entlang einer Linie durchgeführt und stellt man die Amplituden der dabei erhaltenen A-Bilder entlang einer Messstrecke farbcodiert dar, so entsteht ein soge-

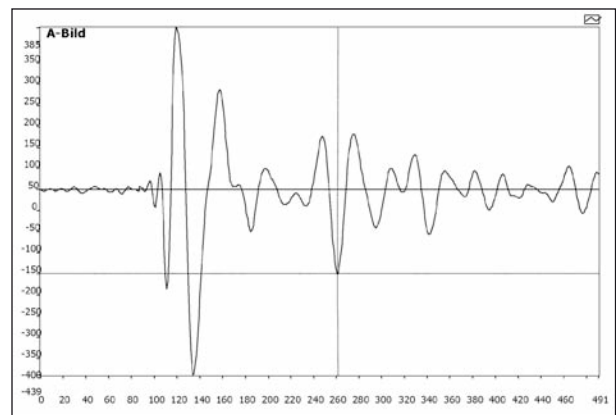


Bild 4: Ultraschall-A-Bild

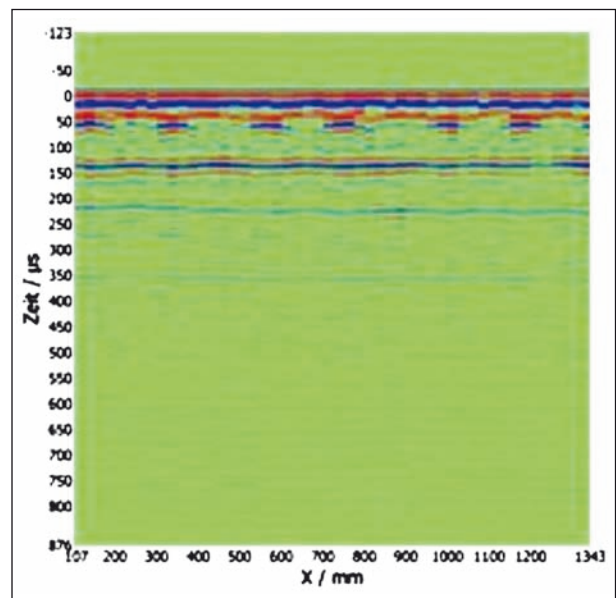


Bild 5: Ultraschall-B-Bild aus einer Fahrbahnplatte. Die Quer-spannglieder sind als Hyperbeln sichtbar

nanntes B-Bild. Da Ultraschall-Prüfköpfe für die Anwendung im Beton typischerweise keinen fokussierten Schallstrahl, sondern ein geöffnetes Schallbündel ausstrahlen, werden auch Objekte, die sich seitlich der aktuellen Messposition befinden, erfasst und erscheinen im B-Bild als Hyperbeln (Bild 5).

Unter Berücksichtigung der im Bauteil vorherrschenden Schallgeschwindigkeit können aus den gemessenen Laufzeiten die Messtiefen reflektierender Objekte bestimmt werden. Bei der flächigen Anwendung der Verfahren erfolgen zahlreiche Punktmessungen in einem vorher gewählten Raster.

Zur Verbesserung des Signal-/Rauschverhältnisses werden die Daten mit 3D-SAFT-Programmen rekonstruiert. Die Rekonstruktion der Daten wurde an der BAM sowie der Universität Kassel durchgeführt.

An der BAM kamen hierbei Programme zum Einsatz, die am Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfung IZFP für mit Scannern aufgenommene Messdaten entwickelt wurden. Aus den in einem zweidimensionalen Raster an der Oberfläche aufgenommenen Ultraschallechosignalen erfolgt unter Berücksichtigung der Schallgeschwindigkeit die Rückrechnung auf die dreidimensionale Reflektorverteilung im Prüfobjekt. Bei der Rekonstruktionsberechnung dieses Laufzeit-SAFT-Algorithmus [23] werden die Ultraschallsender und -empfänger getrennt voneinander berücksichtigt. Die Interpretation der SAFT-Ergebnisse erfolgt anhand von SAFT-B/C-Bildern bzw. Projektionen.

Das Ultraschallecho-Verfahren eignet sich wegen der zugrunde liegenden Wellencharakteristik zur Bestimmung von Bauteildicken, zur Ortung von Spanngliedern sowie zur Ortung von Verpressfehlern in Spanngliedern und von ausreichend großen Kiesnestern im Konstruktionsbeton [20].

Für die Erkennung von Verpressfehlern wurden bisher zwei Kriterien angewandt. Zum einen ist die Amplitude des reflektierten Signals in unverpressten Bereichen höher, zum anderen kommt es an Lufteinschlüssen zu Abschattungseffekten, sodass dort neben dem Eintrittsecho des Ultraschallsignals in das Hüllrohr keine Signale aus dem Tiefenbereich der Hüllrohrrückseite zu beobachten sind. Beide Kriterien konnten sowohl in Laborversuchen an Probekörpern als auch in Praxisanwendungen beobachtet und verifiziert werden, allerdings zeigte sich, dass die Deutlichkeit der zugrunde liegenden Effekte von vielfältigen Randbedingungen abhängt.

Große Aussagesicherheit lässt sich durch ein neues Kriterium erreichen, das auf der Beobachtung der Phasenlage des reflektierten Signals beruht [24]. Diese Methode nutzt den Effekt, dass sich die Reflexion von Ultraschallwellen beim Übergang zu einem akustisch dichteren Medium (z. B. von Beton zu Stahl) anders darstellt als beim Übergang

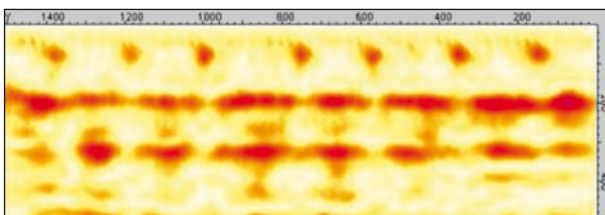


Bild 6: SAFT-B-Bild einer Fahrbahnplatte. Deutlich erkennbar sind die Querspannglieder und die Rückwand

zu einem akustisch dünneren Medium (z. B. von Beton zu Luft). Zwischen beiden besteht unter idealen Bedingungen ein Phasenunterschied von 180° .

3.3 Radar

Radar wird im Bauwesen in verschiedenen Bereichen eingesetzt. In der Richtlinie B10 der DGZfP werden Anwendungsbeispiele zur „Objektortung und Feuchteverteilung in Mauerwerk, Spannglied und Bewehrungsortung, Ortung von Ankern in Betonfahrbahnen, Belagschichtdickenmessung an Brücken sowie Baugrunderkundung“ beschrieben [25]. Dort werden ausführlich die Grundlagen aufgezeigt, die auf der Aussendung elektromagnetischer Wellen und der Einleitung in das zu untersuchende Bauteil beruhen. Weiteren Aufschluss gibt der Beitrag in [26]. In der Baupraxis werden zur Untersuchung von Betonbauteilen Antennen mit Mittenfrequenzen im Bereich von 500 MHz bis 2,6 GHz verwendet. Die Wellenausbreitung im Bauteil hängt von der Verteilung der dielektrischen Eigenschaften ab. Auf ihrem Weg wird die Welle an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften gestreut und reflektiert, wie in Bild 7 dargestellt.

An der Grenzfläche Luft/Beton (Bauteilrückwand, Fehlstelle) entstehen Reflexionen. An der Grenzfläche Beton/Metall (schlaife Bewehrung, Hüllrohr) treten Totalreflexionen auf. Die mit der Empfangsantenne aufgenommenen Reflexionen und Streuungen werden als Funktion der Laufzeit t digital aufgezeichnet (A-Bild). Sind die Permittivität des untersuchten Baustoffs und damit die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellen bekannt, lässt sich aus der Laufzeit der Reflexionen die Tiefe der Reflektoren (Rückwand, Bewehrung, Grenzfläche/Fehlstelle) ermitteln. Stellt man die Amplituden

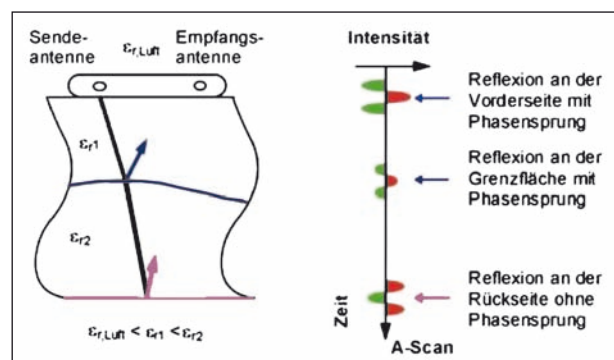


Bild 7: Prinzip des Impulsradars: Ausbreitung und Reflexion einer Impulsantenne [26]

mehrerer A-Bilder entlang einer Messstrecke farb-codiert dar, so entsteht ein Radargramm (B-Bild). Die Reflexionen der Bewehrungsstäbe sind im B-Bild an den typischen Reflexionshyperbeln zu erkennen.

Die entlang einer Linie aufgenommenen Radardaten werden während der Messungen auf dem Display des Radargerätes angezeigt. In der als Radargramm bezeichneten Darstellung sind die Amplituden und Phasen der empfangenen elektromagnetischen Impulse über die Zeit in Form von Grauwerten abgebildet. Aufgrund des Abstrahlwinkels der Radar-Antenne erscheinen die Reflexionen an metallischen Einbauteilen im Radargramm als Diffraktionshyperbeln. Ihre Entstehung ist in Bild 8 schematisch aufgezeigt.

Die tatsächliche laterale Position der Reflektoren liegt im Scheitelpunkt der Hyperbeln und kann aufgrund des unmittelbaren Bezugs zu den Koordinaten der Messfläche unmittelbar angegeben werden. Der Abstand der Reflektoren von der Messoberfläche kann erst bestimmt werden, wenn die Laufzeitachse der Radargramme unter Berücksichtigung der Permittivität (früher: Dielektrizitätskonstante) ϵ_r in eine Tiefenachse umgerechnet wurde. Zur Tiefenkalibrierung ist die im untersuchten Bauteil vorherrschende Dielektrizitätskonstante ϵ_r bzw. die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit anhand von Reflektoren mit bekannter Betondeckung oder aus den Öffnungswinkeln der Diffraktionshyperbeln zu bestimmen.

Die Überlagerung verschiedener Diffraktionshyperbeln kann zu Fehlinterpretationen führen. Untersuchungen an anderen Ingenieurbauwerken haben gezeigt, dass die Lesbarkeit der Ergebnisdarstellung, die Aussagezuverlässigkeit und die Informationsdichte bei Radaruntersuchungen durch 3D-

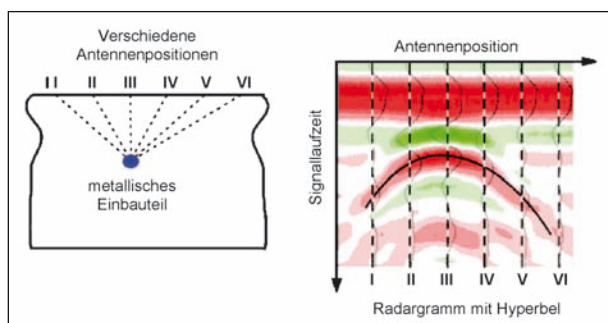


Bild 8: Typisches Reflexionssignal eines metallischen Einbauteiles im Radargramm (Diffraktionshyperbel) [26]

Rekonstruktionsberechnungen und Datenfusion deutlich gesteigert werden können.

Für die 3D-Rekonstruktionsberechnungen werden die in parallel geführten Messspuren aufgenommenen Daten in einen Datensatz zusammengefügt und anschließend die Messdaten auf die Reflektorverteilung im Prüfobjekt zurückgerechnet. An der BAM wird für die 3D-Rekonstruktionsberechnungen bei Radar ein 3D-FT-SAFT-Programm der Universität Kassel genutzt. Die Daten werden für die Berechnung mithilfe der Fourier Transformation (FT) in den Frequenzbereich überführt. Im Ergebnis werden die in den Radargrammen abgebildeten Diffraktionshyperbeln unter Annahme einer konstanten Signalausbreitungsgeschwindigkeit und unter Berücksichtigung des Öffnungswinkels der Radarantenne (i. d. R. 45°) in ihrem Scheitelpunkt fokussiert. Die Fokussierung erfolgt auch für Hyperbeln, die durch Abschattung nur unvollständig im Radargramm angezeigt werden.

3.4 Wirbelstromprüfung

3.4.1 Das Messprinzip

Bewehrungssucher oder Betondeckungsmessgeräte sind magnetisch induktiv arbeitende Instrumente, mit denen die Lage von Bewehrungsstäben in Beton bestimmt werden kann. Sie arbeiten meist nach dem Wirbelstromprinzip und ähnlichen Verfahren, die in [27] beschrieben sind.

Direkt nutzt das Verfahren die Eigenschaft des Stahls, durch die er sich von den meisten anderen Baustoffen unterscheidet, seinen Ferromagnetismus und die damit verbundene hohe relative magnetische Permeabilität μ_r .

Die gebräuchlichsten Verfahren nutzen die Induktivitätsänderung einer Spule, wenn sich die relative magnetische Permeabilität in ihrer Umgebung än-

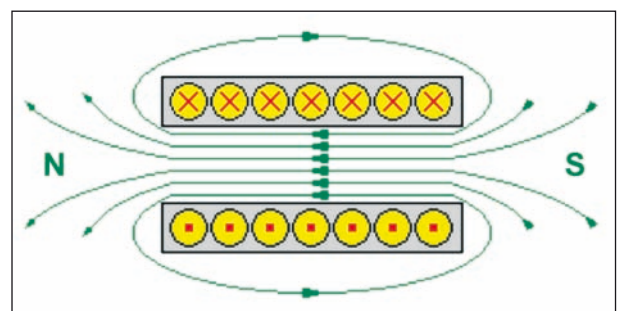


Bild 9: Magnetische Feldlinien einer Zylinderspule

dert. Eine stromdurchflossene Spule erzeugt ein magnetisches Feld (Bild 9), es entsteht ein magnetischer Fluss Φ durch die Spule

$$\phi = L \cdot I$$

der proportional zum Spulenstrom I ist. Der Proportionalitätsfaktor L ist die Induktivität der Spule. Die Induktivität einer Spule hängt in komplizierter Weise von der Lage und der Masse der Stahlteile in ihrer Umgebung ab.

$$L = L(\mu_r, c, d)$$

μ_r rel. mag. Permeabilität

c Betondeckung

d Durchmesser des Bewehrungsstabs

Man macht sich zunutze, dass die Induktivität L einer Spule deren Wechselstromwiderstand Z_{Sp} bestimmt:

$$Z_{Sp} = \sqrt{R_{Sp}^2 + (\omega L)^2}$$

R_{Sp} ohmscher Widerstand der Spule

ω Kreisfrequenz der angelegten Wechselspannung

Die prinzipielle Schaltung eines Betondeckungsmessers, der die Induktivitätsänderung einer Spule nutzt, ist in Bild 10 dargestellt. In der Regel wird eine Wechselspannung mit Frequenzen $\nu = \omega/2\pi$ zwischen 1 kHz und 2 kHz benutzt.

Durch den Vergleich der Spannung U_{Sp} , die über der Spule abfällt, mit der Spannung U_R , die über dem ohmschen Widerstand abfällt, lassen sich Induktivitätsänderungen der Spule aufgrund eines

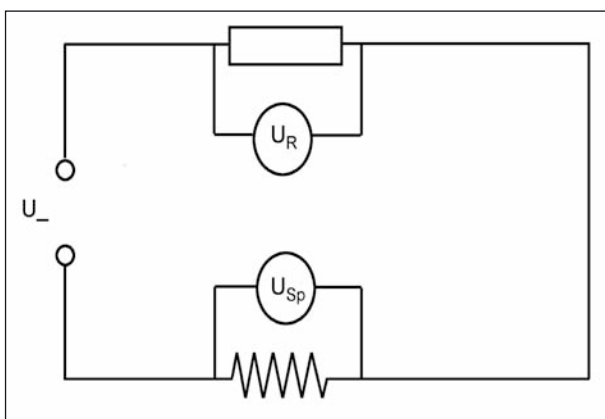


Bild 10: Prinzipielle Schaltung eines induktiv arbeitenden Bewehrungssuchers

Bewehrungsstabs (hohes μ_r) im Beton messen, denn es gilt:

$$\frac{U_{Sp}}{U_{\Omega}} = \frac{Z_{Sp}}{R_{\Omega}} \quad \frac{U_{Sp}}{U_{\Omega}} = \frac{Z_{Sp}}{R_{\Omega}}$$

Der Quotient der beiden Spannungen ist also letztendlich eine Funktion der Betondeckung c und des Durchmessers d des Bewehrungsstabs (der lokal hohen magnetischen Permeabilität μ_r):

$$\frac{U_{Sp}}{U_{\mu}} = \frac{U_{Sp}}{U_{\mu}} (Z_{Sp}) = \frac{U_{Sp}}{U_{\mu}} (Z_{Sp}(L)) = \frac{U_{Sp}}{U_{\mu}} (Z_{Sp}(L(\mu, c, d))) \Rightarrow \frac{U_{Sp}}{U_{\mu}} = \frac{U_{Sp}}{U_{\mu}}(\mu, c, d)$$

Da die Änderung der Spulenspannung ΔU_{Sp} aus der Induktivitätsänderung ΔL aufgrund eines Stoffs mit hoher Permeabilität im Spulen resultiert und diese mathematisch nur mit sehr hohem Aufwand beschrieben werden kann, erreicht man die Zuordnung der Betondeckung und des Stabdurchmessers zur Spulenspannung durch Kalibration. Kommerzielle Geräte sind kalibriert. Der Anwender liest nur noch die Betondeckung ab, wenn der Stabdurchmesser vorgegeben ist, bzw. den Stabdurchmesser, wenn die Betondeckung vorgegeben wurde. Beide Größen, Betondeckung und Stabdurchmesser, gleichzeitig mit einer Messung zu bestimmen ist derzeit noch nicht möglich.

3.4.2 Die Anwendung

Die messbare maximale Betondeckung liegt bei 9 cm bis 12 cm. Die Signale zweier nebeneinander liegender Bewehrungsstäbe sind dann klar unterscheidbar, wenn ihr Abstand größer als die Betondeckung ist (Bild 11). Wie eine Betondeckungsmessung an einem Bauteil durchgeführt wird,

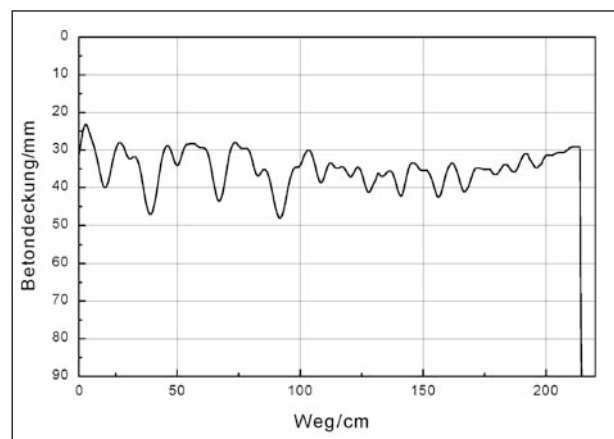


Bild 11: Die Messkurve eines Betondeckungsmessgeräts zeigt die Lage der Bügelbewehrung einer Stütze. Die jeweilige Betondeckung ist an den Maxima der Kurve abzulesen

soll am Beispiel einer Stütze erläutert werden. Die Messsignale können als wegabhängige Messkurve auf einem Laptop dargestellt werden.

Auf diese Weise erzeugte Daten werden von dem Scanner aufgenommen und weiterverarbeitet.

3.5 Verfahrenskombination

Ziel der Kombination verschiedener zerstörungsfreier Prüfverfahren ist es, die Interpretation der Messergebnisse zu vereinfachen und die Aussagezuverlässigkeit zu erhöhen.

Mithilfe verschiedener Operationen werden die einzelnen Ergebnisse von gleichen oder aber auch von unterschiedlichen Messverfahren überlagert. Abhängig von der Wahl der Operationsalgorithmen werden die für den Bearbeiter wesentlichen Informationen in einem Datensatz komprimiert.

Sowohl Rohdaten als auch bearbeitete, wie z. B. SAFT-rekonstruierte Datensätze können fusioniert werden. Die Datensätze müssen zuvor in ein definiertes Referenzsystem überführt werden. Das Referenzsystem legt die Auflösung, die Größe und das Koordinatensystem des Fusionsdatensatzes fest. Alle zu fusionierenden Datensätze müssen in ihren geometrischen Eigenschaften diesem Referenzsystem angepasst werden.

Unmittelbar vor der Fusion der Datensätze ist es möglich, die Signale je nach Bedarf mit dem Fusionsprogramm zu bearbeiten. Z. B. kann jeder Datensatz mit einer linearen oder nicht linearen Funktion tiefenabhängig gewichtet werden, um den unterschiedlichen Eigenschaften der Verfahren bezüglich der maximalen Eindringtiefe bedingt durch Absorption, Reflexion und Streuung Rechnung zu tragen. Stark verrauschte Datensätze können sowohl im Zeitbereich als auch räumlich mit unterschiedlichen Filtern geglättet werden. Außerdem ist es möglich, nur die Änderungen der Amplituden in z-Richtung bei der Fusion zu berücksichtigen.

Die eigentliche Fusion basiert auf der Überlagerung der verschiedenen Datensätze mittels einfacher mathematischer Operationen. Neben Addition, Subtraktion, Division und Durchschnitt können auch ausschließlich die maximalen Werte aller Datensätze im Fusionsdatensatz berücksichtigt werden. Des Weiteren existiert die Möglichkeit, zwei Datensätze mit einem vorher definierten richtungsorientierten Fokus zu kombinieren. Mit dieser Ope-

ration ist es möglich, vorwiegend in eine Richtung ausgedehnte Strukturen wie Bewehrungsstähle oder auch Spannkanäle richtungsabhängig herauszufiltern. Nicht zuletzt können natürlich alle erwähnten Operationen beliebig miteinander kombiniert werden [14]. Die Datenfusion wird im vorliegenden Fall auf die Verfahren Ultraschallecho und Radar angewendet.

4 Datenaufnahme und Ergebnisdarstellung im Rahmen einer OSA

4.1 Anforderungen einer OSA

Gemäß Leitfaden der BAST ist eine OSA (Objektbezogene Schadensanalyse) definitionsgemäß ein „Verfahren zur Erfassung, Auswertung und Bewertung von Schäden, die zusätzliche Untersuchungen erfordern, sowie Empfehlungen von Maßnahmen einschließlich Kostenschätzungen“ [2]. Dementsprechend wird eine OSA i. d. R. im Anschluss an eine einfache Prüfung oder Hauptprüfung nach DIN 1076 als gesonderte Prüfung durchgeführt, wenn Umfang und Ursache von Schäden nicht ausreichend genau bestimmt werden können. Dabei soll der Bauwerksprüfer Empfehlungen zu „Zielgrößen“ hinsichtlich einzusetzender zerstörungsfreier/zerstörender Baustellen/Laborverfahren geben. Diese Vorgabe ist sehr allgemein gefasst und oftmals besteht eine Lücke zwischen dem Erfordernis, ein „Verfahren zu benennen“ und „ein Verfahren zu kennen“.

Dem Prüfer stehen mit dem ZfPBau-Kompendium [28] und dem RI-EBW-PRÜF-kompatiblen Verfahrenskatalog, der konkret für die Schäden der RI-EBW-PRÜF [29] auf die Verfahren des ZfPBau-Kompendiums hinweist, entsprechende Hilfsmittel zur Verfügung. Der RI-EBW-PRÜF-kompatible Verfahrenskatalog steht derzeit auf der CD-ROM des SIB-Bauwerkeprogramms zur Verfügung. Damit wird der Prüfer in die Lage versetzt, konkrete Vorschläge zu möglichen Untersuchungsverfahren zu machen.

Beim Einsatz einer OSA werden i. d. R. tiefer gehende Untersuchungen erforderlich werden, die einen direkten Zugang zum Bauwerk und zur Bauteiloberfläche erfordern. Daher wird dies als Ziel zum Einsatz von Bauwerkscannern aufgestellt, um diese von einer Arbeitsbühne eines Brückenunter-

sichtgeräts zu betreiben. Alternativ sollte der Betrieb auch aus einem Steigerfahrzeug möglich sein, wobei dessen Kapazität mindestens drei Personen (zwei Personen Bedienpersonal zum Umsetzen des Scanners zuzüglich Scanner und Kiste der Steuerungseinheit) betragen muss.

4.2 Großflächige Datenaufnahme von Hand

Das Radarverfahren eignet sich aufgrund seiner schnellen mit einem Laufrad ausgelösten Datenaufnahme als Verfahren, um große Flächen an Brücken in zwei Polarisationsrichtungen aufzunehmen. Für die erzielbare Flächenleistung sind die Zugänglichkeit der Flächen und der gewählte Spurabstand maßgeblich. Einrüstungen ergeben Flächenleistungen von mehreren Hundert m² pro Tag, während bei Einsätzen aus dem Steigerfahrzeug 100 m² oder etwas darüber erreicht werden können (Spurabstand 10 cm). Besonders wirkungsvoll und schnell in der Datenaufnahme sind Einzelspuren auf Brückenplatten über die gesamte Brückenlänge. In wenigen Minuten aufgenommen erlauben sie auch eine gute Sicht in den Konstruktionsbeton unter dem Asphalt. Daher hat die großflächige Datenaufnahme mit Radar besondere Bedeutung beim Einsatz zur Untersuchung von Brückenplatten von der Oberseite.

Aus diesem Grund wurden beim Messeinsatz Grumbachtalbrücke im Auftrag des LfS im Hinblick auf die geplante Sanierungsmaßnahme auch großflächige Radaruntersuchungen durchgeführt und die Ergebnisse hier herangezogen, um die Leistungsfähigkeit im Vergleich zu Detailuntersuchungen mit Scannern zu zeigen. Dabei wurden bereits bekannte Effekte zum gezielten Einsatz von Antennenpolarisationen eingesetzt, um die Unterscheidbarkeit von oberflächennaher Bewehrung und dicht darunter befindlicher Querspannglieder zu verbessern. Ergebnisse sind in Kapitel 5.1 dokumentiert.

4.3 Automatisierte und kombinierte Datenaufnahme mit Bauwerksscannern

4.3.1 Stand der Technik

In [30] findet sich eine kurze Übersicht zum Stand der Technik von Bauwerksscannern, die nachfolgend wiedergegeben ist. Weitere Informationen sind [10] enthalten.

Bei ZfPBau-Verfahren wird i. d. R. ein Parameter gemessen und von diesem auf eine Kenngröße oder den Bauwerkszustand geschlossen. Oft bieten die Messergebnisse nur einen Hinweis auf mögliche Ursachen. Um einen vorliegenden Verdacht zu erhärten oder entkräften, bedient man sich häufig eines anderen, physikalisch unabhängigen Verfahrens. Solche Verfahrenskombinationen geben, wenn sie gezielt eingesetzt werden, verbesserten Aufschluss zur Lösung einer Prüfaufgabe. Das Potenzial der Kombination von Ultraschallecho, Impakt-Echo und Radar wurde bereits Mitte der 90er Jahre für den Massivbrückenbau erkannt [31].

1998 [4] und 2002 [5] folgten, initiiert durch die BAST, umfangreiche Berichte über zwei Brückenbauwerke, die vor und nach dem Abbruch mit Radar, Impakt-Echo und Ultraschallecho untersucht wurden und deren Ergebnisse nach dem Abbruch verifiziert werden konnten. Es wird über das erfolgreiche Lokalisieren von Verpressfehlern mit Ultraschallecho und Impakt-Echo berichtet. Die Messflächen mussten am Bauwerk z. T. im 1-cm-Raster abgetastet werden, was sehr zeitaufwendig war. Deshalb wurde bei der Untersuchung der Talbrücke Haiger [5] erstmals ein automatisches Impakt-Echo-Datenaufnahmesystem von der BAM eingesetzt. Die Entwicklung solcher automatisierten Messwerterfassungssysteme, später als Baustellenscanner bezeichnet [13], wurde in den Folgejahren fortgesetzt, da die bildgebende Darstellung der Messergebnisse eine Vielzahl von Einzelmessungen erfordert.

Die entwickelten Systeme erlauben eine hohe Positioniergenauigkeit und stellen gleichzeitig ein geometrisches Referenzsystem zur Verfügung. Darüber hinaus wird der Zeit- und Personalaufwand für die Prüfungen reduziert. Die Scannersysteme sind als zweiachsige Schienensysteme konzipiert und ermöglichen das zweidimensionale Verfahren der Prüfsensoren über der Messfläche. In [13] wird über ein Scannersystem berichtet, das zur Zeiterparnis mit einer Prüfkopfhalterung zur gleichzeitigen Messung von Ultraschall- und Impact-Echo ausgestattet ist. Die Weiterentwicklung wird in [9] detailliert beschrieben: Systeme zur Messung an vertikalen Flächen im beengten Raum unter Brückenkappen oder in Hohlkästen. So können Gesamtflächen von bis zu 40 m² untersucht werden, wobei das Ziel nicht die vollflächige Untersuchung ganzer Brücken ist, sondern nur gezielt vom Bauwerksprüfer ausgewählte Bereiche untersucht werden sollen.

Um eine Befestigung des Scanners in Bereichen zu ermöglichen, in denen nicht gebohrt werden darf, wurden Scanner mit Saugfüßen (Vakuumschanner) entwickelt, die die Apparatur senkrecht oder über Kopf am Bauwerk festhalten.

Die besten Resultate bei Verfahrenskombinationen werden erzielt, wenn die Messergebnisse zusammen bewertet werden. Dies kann durch Vergleich von Einzelergebnissen miteinander durch den Bauwerksprüfer geschehen, wie dies bei der klassischen Bauwerksuntersuchung (Chloridgehalte in Bezug zur Betondeckung und Karbonatisierungstiefe) erfolgreich praktiziert wird. Dies ist jedoch bei der Vielzahl von Einzelmessungen bei der flächigen Untersuchung von Bauteilen nicht mehr praktikabel. Aus diesem Grund wird zur verbesserten Datenauswertung die Datenfusion verwendet, deren Grundlagen in [14] beschrieben sind. Die Datenfusion basiert auf der Superposition verschiedener Datensätze durch mathematische Operationen und deren Speicherung in einem Datensatz. Neben Addition, Subtraktion, Division und Durchschnitt können z. B. auch ausschließlich die maximalen Werte aller Datensätze im Fusionsdatensatz berücksichtigt werden. Die Daten können sowohl aus Messungen eines Bereichs mit verschiedenen Verfahren stammen als auch aus Messungen mit einem Verfahren und verschiedenen Messkonfigurationen (z. B. Radar mit verschiedenen Antennenpolarisationen).

Im Kapitel 4.3.2 wird mit dem OSSCAR-Scanner eine Weiterentwicklung von BAM und Fraunhofer IZFP beschrieben, die auf den Erfahrungen der zuvor beschriebenen Bauwerksscanner aufbaut.

4.3.2 OSSCAR-Bauwerksscanner

Der im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens entwickelte Bauwerksscanner OSSCAR (www.osscar.eu **On-Site SCAnneR**) erlaubt die kombinierte Untersuchung eines Bauteils mittels Ultraschall, Radar und Wirbelstrom. Der Scanner besteht aus einem Rahmen, der aus drei Achsen zusammengesetzt wird, sodass auch ein Transport durch schmale Durchgänge möglich ist. Der Scanner wird mit Saugfüßen zerstörungsfrei am Bauteil befestigt (Bild 12). Bislang wurde der Scanner vorwiegend an vertikalen Bauteilen eingesetzt. In diesem Vorhaben wird der Scanner besonders für Messungen über Kopf zur Untersuchung von Brückenplatten von der Unterseite ertüchtigt.



Bild 12: OSSCAR-Scannersystem bestehend aus Rahmen und Steuerungseinheit für Radar, Ultraschallecho und Wirbelstrom. Der Scanner wird mit Saugfüßen am Bauwerk befestigt [17]

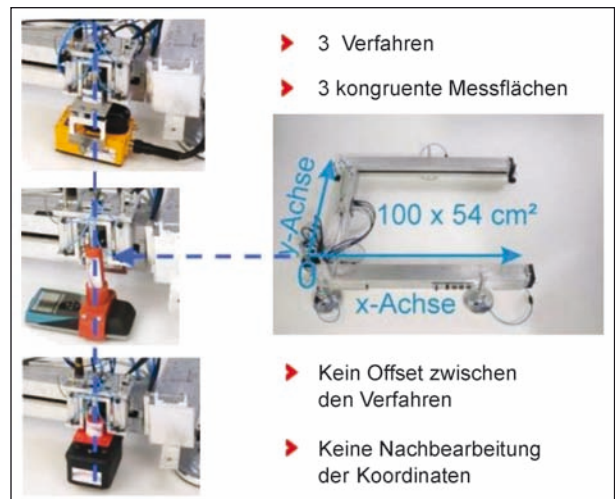


Bild 13: Am Scanner verwendete Messgeräte für Radar (Mala ProEx), Ultraschallecho (ACSYS A1220) und Wirbelstrom (Proceq Profoscope) [17]

Zur Untersuchung werden die in Bild 13 dargestellten Prüfköpfe bzw. Geräte mit dem Scanner verbunden, sodass Radar-, Ultraschall- und Wirbelstromuntersuchungen möglich sind. An den handelsüblichen Geräten müssen keine Modifikationen vorgenommen werden.

Der OSSCAR-Bauwerksscanner erfüllt durch seine Bauart bereits Voraussetzungen, die für eine

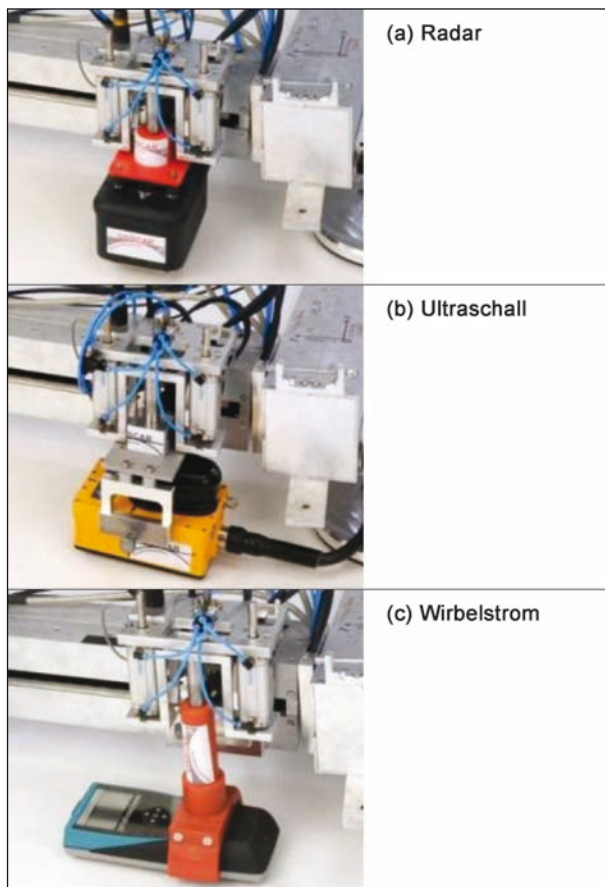


Bild 14: Methode zum Erzeugen dreier kongruenter Messflächen. Das Zentrum der Radarantenne, des Wirbelstromsensors und des Ultraschallprüfkopfs befindet sich jeweils genau im Befestigungspunkt des Prüfkopfhalters. Alle Verfahren haben somit einen Bezugspunkt [16]

bestmögliche bildgebende Darstellung erforderlich sind. Die Verwendung von Servomotoren erlaubt es, die Oberfläche millimetergenau mit den Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom abzutasten, wobei Abweichungen und Störungen wie bei Schrittmotoren nicht auftreten können. Darüber hinaus ist der OSSCAR-Scanner so konzipiert, dass Radarantenne, Ultraschallprüfkopf und Wirbelstromsensor genau auf einen Bezugspunkt ausgerichtet werden (Bild 14). Damit entstehen drei kongruente Messflächen. Dies ist bei der Datenfusion der Ergebnisse der drei Verfahren hinsichtlich der Ergebnisqualität von Vorteil.

Der OSSCAR-Bauwerkscanner zeichnet sich dadurch aus, dass er ein Paket aus Soft- und Hardware, bestehend aus den Komponenten zur Steuerung, Datenaufnahme und bildgebender Darstellung, umfasst (Bild 15). Das Herzstück des Softwarepakets ist das Programm OSSCAR.exe

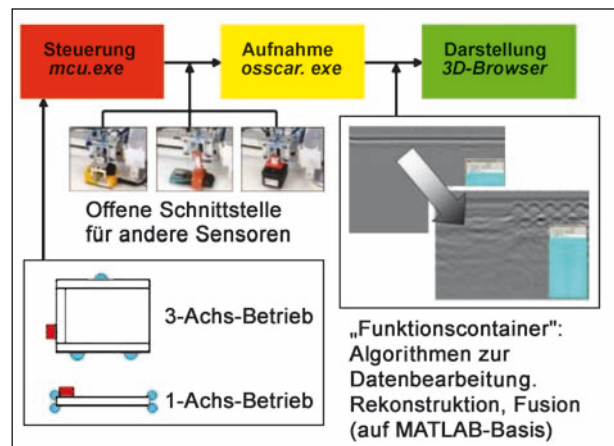


Bild 15: Softwarekonzept des OSSCAR-Bauwerkscanners. Scannersteuerung, Datenaufnahme und Darstellung der Ergebnisse erfolgen alle unter einer Oberfläche [16]

zur Kontrolle der Datenaufnahme. Dort werden alle Angaben zu Koordinaten des Messfelds, Messpunktabstand, Anordnung der Messspuren und alle wichtigen Geräteparameter festgelegt. Grafisch kann der Messfortschritt verfolgt werden.

Die Datenverarbeitung nimmt bei der Auswertung der Ergebnisse zur bildgebenden Darstellung eine besondere Stellung ein. Bei der Auswertung sind intelligente Auswertungsalgorithmen, wie z. B. SAFT-Rekonstruktion (Ultraschall) [15], Migration (Radar) sowie Algorithmen zur Datenfusion [14] erforderlich, um aussagekräftige Ergebnisse mit bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion zu erhalten. Diese sind bislang wie auch Standardfunktionen wie Verstärkungsfunktionen, Filter usw. Bestandteil von Spezialsoftwarepaketen, die entweder teuer oder nicht kommerziell erhältlich sind. Diesem Umstand soll durch die Idee des in Bild 15 dargestellten „Funktionscontainers“ abgeholfen werden. Im Funktionscontainer sollen Algorithmen zur Datenbearbeitung, Rekonstruktion und Fusion enthalten sein. Diese können z. B. auf MATLAB-Basis vorliegen und können über eine vom IZFP entwickelte Schnittstelle in den Datenaufbereitungsprozess eingebunden werden. Das Einbinden von Algorithmen in den Funktionscontainer ist ebenso Gegenstand des Vorhabens wie Modifikationen an der Software zur Ergebnisdarstellung (3D-Browser). Diese Arbeiten sind Gegenstand des an das IZFP im 7. Monat erteilten Unterauftrags an das IZFP (AP4).

Schlussfolgerungen für AP1 – Anpassung des Bauwerkscanners an das Anforderungsprofil einer OSA

Wie bereits in Kapitel 2.2 beschrieben, wurden Anpassungen der Höheneinstellung der FüÙe, der pneumatischen Prüfkopfhalterung samt Anpressdruck und der Kabelführung vorgenommen, um einen reibungslosen Betrieb über Kopf sicherzustellen. Darüber hinaus wurde ein Konzept zum unkomplizierten Versetzen des Scanners mithilfe von Distanzstücken und Auflagerungsbohlen umgesetzt, sodass ein schnelles Umsetzen des Scanners von etwa 5 Minuten auf der Arbeitsbühne des Brückenuntersichtgeräts erreicht wurde (siehe auch Kapitel 5.1).

Schlussfolgerungen für AP2 – Festlegung eines geeigneten Bauwerks

Die Grumbachtalbrücke im Zuge der Autobahn A 6 hat sich als sehr gut geeignetes Objekt zur Untersuchung von Brückenplatten herausgestellt, da zusätzlich zu den Scannermessungen an der Unterseite großflächige Radarmessungen von der Oberseite der Brückenplatte durchgeführt wurden.

4.3.3 Weiterentwicklung der Steuerungssoftware des OSSCAR-Scanners

Das in Kapitel 4.3.2 beschriebene Softwarepaket wurde auf dem Stand des abgeschlossenen Forschungsvorhabens OSSCAR übernommen. Dabei werden die Komponenten mcu.exe und oscar.exe nur in einem geringen Maß angepasst. Die Hauptarbeit liegt in der Integration möglichst vieler Auswertelgorithmen in den Funktionscontainer und der Weiterentwicklung des 3D-Browsers und wird in Kapitel 4.3.4 beschrieben.

Schlussfolgerungen für AP4 – Modifikation des Bauwerkscanners

Wie in Kapitel 2.5 bereits beschrieben, wurden für die Anforderung der Messungen gerätetechnische Umbauten durchgeführt. Des Weiteren wurden umfangreiche Modifikationen an der Scannersoftware, vor allem der Entwicklung eines Funktionscontainers für die Aufbereitung der Messdaten, und der Weiterentwicklung eines 3D-Browsers durchgeführt.

4.3.4 Entwicklung des Funktionscontainers und des 3D-Browsers

Schlussfolgerungen für AP3 – Bauwerksuntersuchungen zur Verbesserung der Datenaufnahme

Die erreichten Ergebnisse sind in Kapitel 2.4 beschrieben.

Der Scanner hat seine Einsetzbarkeit für Überkopf-Messungen aus einem Brückenuntersichtgerät heraus unter Beweis gestellt. Damit ist ein Einsatz im Rahmen einer OSA möglich.

Durch bauliche Anpassungen des Scanners an Überkopf-Messungen und Optimierung der Verfah- und Absetzgeschwindigkeiten von Radarantenne und Ultraschallprüfkopf konnte eine Verkürzung der Messzeit insbesondere bei Ultraschall erzielt werden. Für Ultraschallmessungen mit einem Messraster von 2,5 cm und Radarmessungen mit zwei Polarisationsrichtungen und einem Spurbstand von 5 cm werden für eine Detailuntersuchung der Fläche von 0,5 x 1,0 m² einschließlich Umsetzen des Scanners zur nächsten Messposition rd. 1,5 Stunden benötigt.

Schlussfolgerungen für AP4 – Modifikation des Bauwerkscanners

Die erreichten Ergebnisse sind in Kapitel 2.5 beschrieben.

Aus den Erfahrungen des Messeinsatzes an der Grumbachtalbrücke sind gerätetechnische Umbauten erforderlich gewesen, die umgesetzt wurden. Des Weiteren waren Softwareergänzungen notwendig, sodass die gezeigten Ergebnisbilder auch mit der entwickelten Scannersoftware erhalten werden können.

Wie in Kapitel 5 ausgeführt, dienen automatisierte bildgebende Inspektionsmethoden zur Verbesserung der Prüfaussage. Aufgrund der Tatsache, dass eine automatisierte Aufzeichnung der Daten und eine anschließende Auswertung voneinander entkoppelte Arbeitsvorgänge sind, musste das Softwarekonzept dem Rechnung tragen (Bild 16).

Die technischen Anforderungen einer automatisierten Datenanalyse während der Datenerfassung sind vielfältig und damit teilweise technisch anspruchsvoll, sodass man sich bei der Umsetzung der Softwarearchitektur darauf konzentrierte, zunächst

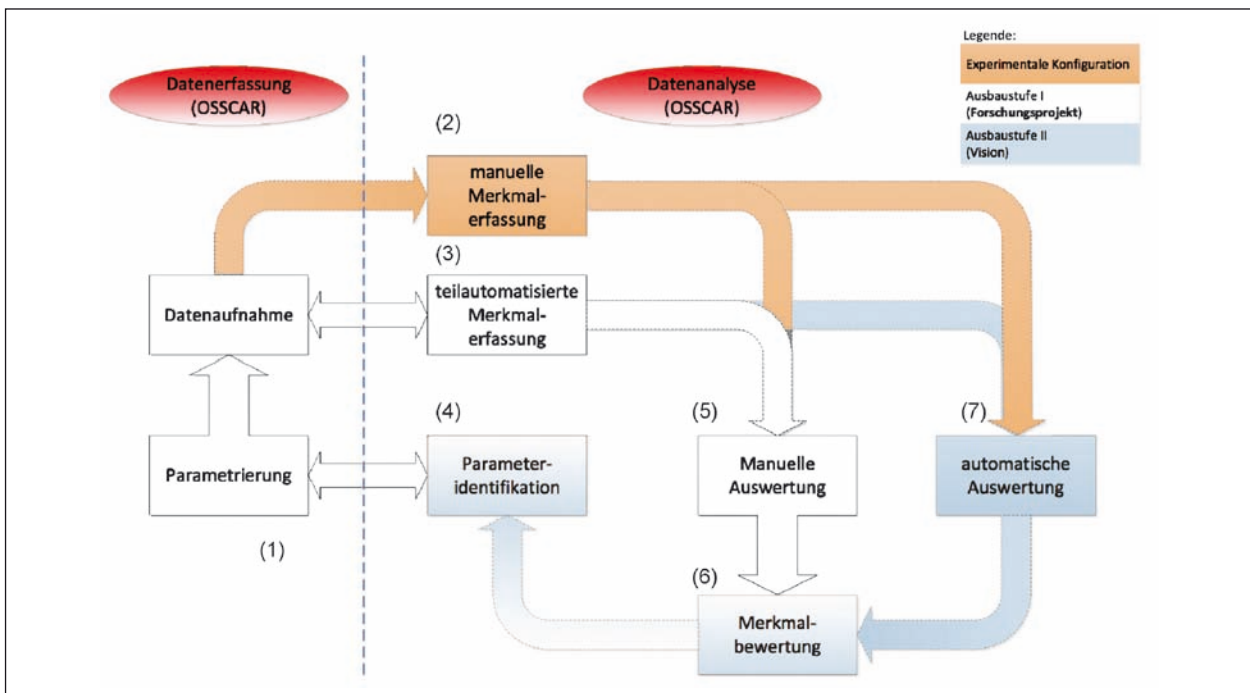


Bild 16: Prozesse bei Datenerfassung und -analyse

eine hochwertige und optimierte Datenerfassung zu entwickeln. In einem Post-Prozess werden dann im Anschluss die gewonnenen Daten ausgewertet und visuell aufbereitet (Bild 16).

Dieses Vorgehen eröffnete gerade bei Modifikationen des Scanners viele Möglichkeiten zur optimalen Abstimmung von Algorithmen bezüglich der Ergebnisse und der Parameteridentifizierung für die latente Anpassung der Prüftechnik an verschiedene Aufgabenstellungen (Bild 16, {2-7}). Ziel ist jedoch, die Anwendbarkeit und Flexibilität der Algorithmen sukzessive so zu optimieren, dass das Gesamtsystem schließlich eine vollautomatische Datenauswertung (OSSCAR-3D-Messdaten des Verfahrens Ultraschall und Radar) verwenden kann. Zu diesem Zweck wurde in diesem Vorhaben zunächst ein Softwarekonzept gesucht, das annähernd vergleichbare Flexibilität aufweist wie der Einsatz einer Algorithmen-Toolbox unter mathematischen Programmen wie z. B. Mathematica oder MATLAB. Das heißt, es sollte ein Konzept gefunden werden, das eine automatisierte 2D- oder 3D-Visualisierung mit einer beliebigen Anzahl von Auswerteargorithmen kombiniert.

Das Grundkonzept folgt einer lose gekoppelten Softwareanbindung, wie sie früher besonders in Middleware-Systemen genutzt wurde (Bild 17 und Bild 18). Der Mechanismus besteht sowohl aus einer Interface-Definition, die als Modul in das An-

wenderprogramm geladen wird, als auch einer zu entwickelnden Bibliothek. Im Anschluss hat man in der Bibliothek das definierte Interface abzuleiten und gemäß der Vorlage zu implementieren. Das Anwenderprogramm sucht bei einer dynamischen Bindung nach Ableitungen der Interfacedefinition und bindet diese als Instanzen ein. Da die Interface-Definition sowohl Attribute als auch Methoden der Objekte definiert, arbeitet das Anwenderprogramm stets mit demselben Befehlsvorrat und kann so beliebig viele Algorithmen auf diese Art dynamisch einbinden. Unter der .NET-Plattform ist dieser Mechanismus als Interface-Injektion bekannt.

Zur Auswahl standen zwei Produkte, die mit ein wenig technischer Unterstützung der Hersteller diese Kriterien zum Teil erfüllen konnten:

- HWDB der Firma Wüstner Software (Bild 19 und Bild 20) sowie
- I-DEAL-Viewer (Bild 21 und Bild 22).

Bei der Anwendung HWDB stellten sich aber bei der Umsetzung im Laufe der programmier-technischen Anpassung technologische Hürden ein, die das Softwaresystem für eine Fortführung der Arbeiten letztendlich ausschloss (Kapitel 2.5).

Aus diesem Grund wurde das Produkt I-DEAL-Viewer, dessen Entwicklung bereits auf der

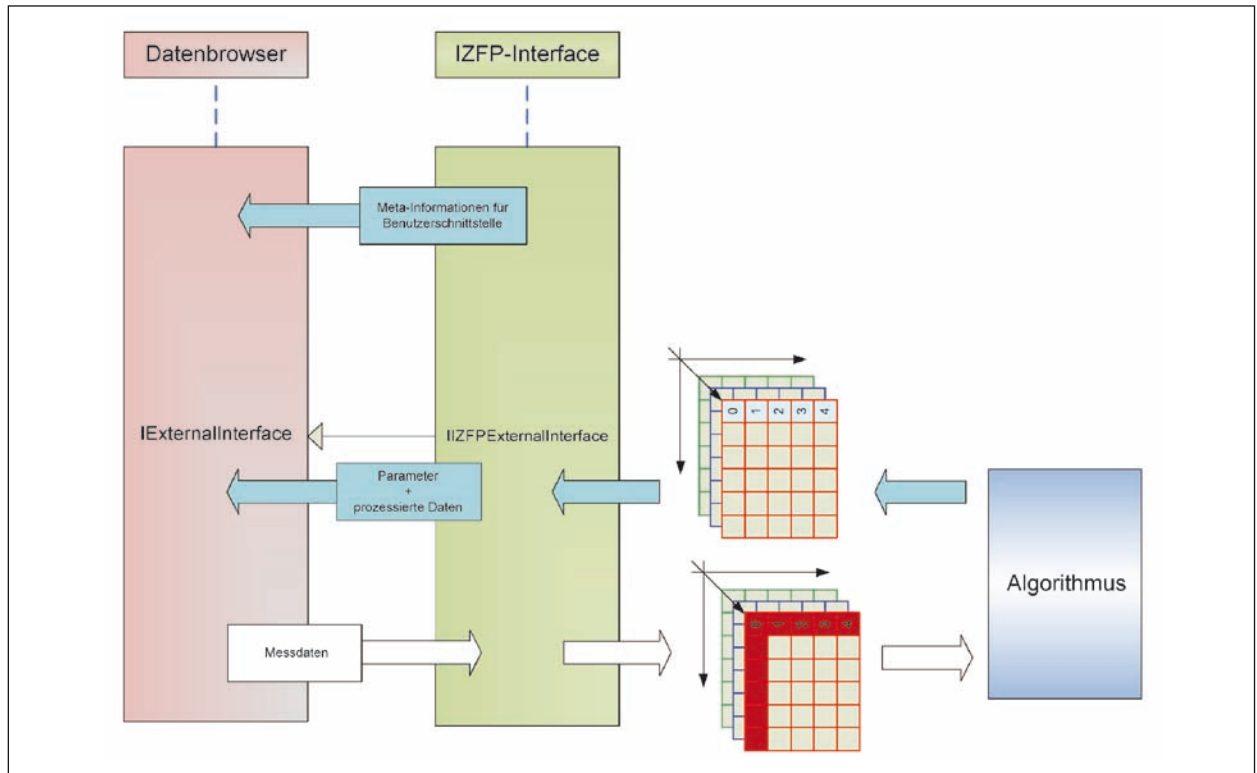


Bild 17: Grundkonzept der lose gekoppelten Softwareanbindung

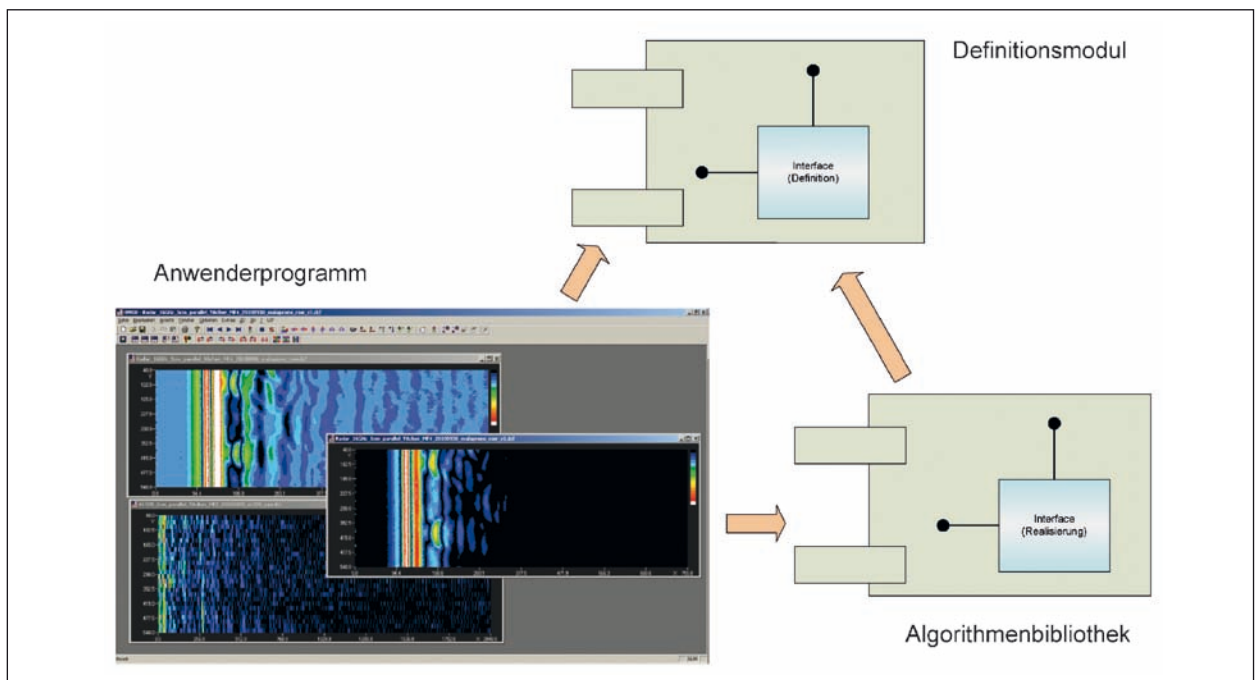


Bild 18: Grundkonzept der lose gekoppelten Softwareanbindung

.NET-Plattform basiert, als Testumgebung für eine teilautomatisierte Datenanalyse der OSSCAR-Daten vorgesehen. Der Viewer der Firma I-Deal verfügt über eine 3D-Visualisierung, die ihre Renderingdaten auf einer vorhandenen GPU (Graphic

Processor Unit) berechnet. Dies spart CPU-Zeit und ermöglicht gleichzeitig auch eine andere Art der Datenverarbeitung, da die Strukturen der GPU (speziell wie hier der NVIDIA-Chipsatz) im Besonderen parallele Verarbeitungsprozesse stark unterstützt.

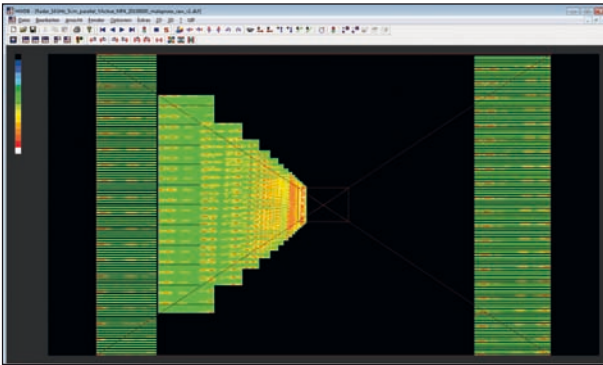


Bild 19: 3D-Ansicht des HWDB (realisiert mit Visual C 6.0 und MFC 4.2)

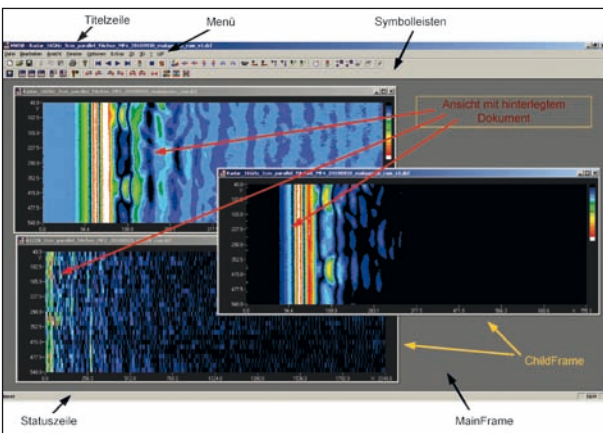


Bild 20: B-, C-Bilder mit Schnittfunktion der HWDB (realisiert mit Visual C 6.0 und MFC 4.2)

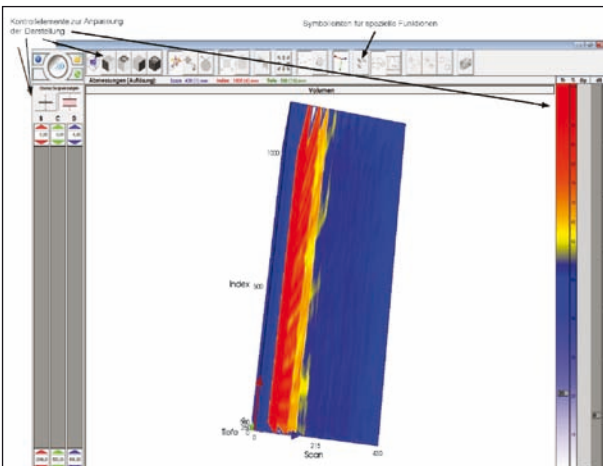


Bild 21: I-DEAL-Viewer mit Rohdaten (GPR-Verfahren) der Datenaufnahme

Ein weiterer Vorteil des I-DEAL-Viewers als Visualisierungsplattform ist, dass seine technische Ausführung bereits den modernen Paradigmen des Softwareengineering folgt und das Interface-Injection als seine Grundstruktur bereits implementiert hat.

Für die Verbesserung der Bildlegendentechnik des OSSCAR-Systems wurde zwei Verfahren ausgewählt: Ultraschall und Georadar.

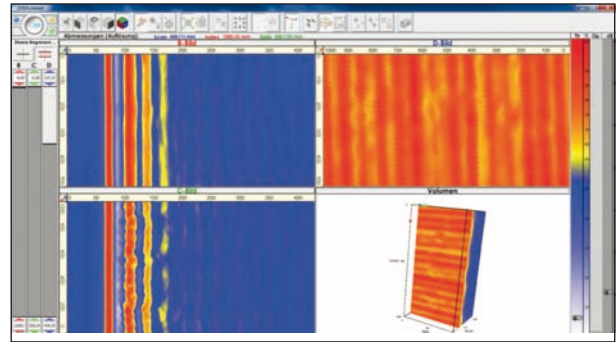


Bild 22: Prozessierte Messergebnisse (GPR-Verfahren)

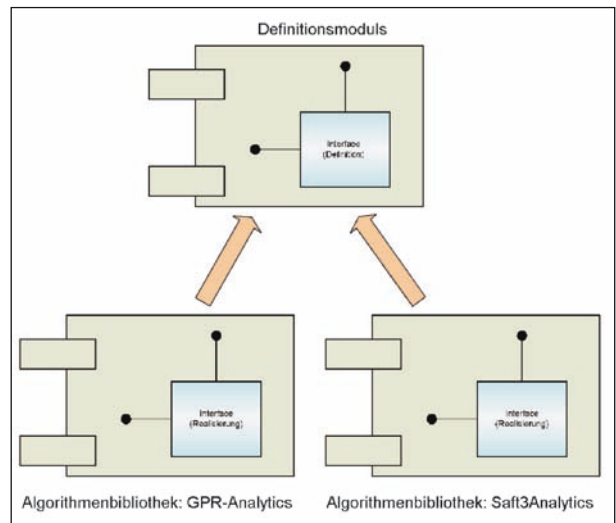


Bild 23: Bibliotheken für ausgewählte ZFP-Verfahren

Die Grundstrukturen (Bild 23) und die Verwendung der Bibliotheksmodule ähneln sich so stark, dass daher in der Folge keine Unterschiede bei der Darstellung der Bibliotheken gemacht werden müssen. Die Struktur besteht aus einem interaktiven Modul zur manuellen Auswahl der Messdaten und Auswerteparameter, mehreren Modulen zur Steuerung und Verwaltung der internen Abläufe sowie den eigentlichen Auswertelgorithmen und einer Datenzugriffsebene der Messdaten und Parameter.

Die eingesetzten Programmiersprachen orientieren sich an ihren jeweiligen Stärken bezogen auf die notwendigen Aufgaben. Für die Visualisierung (Bild 24) und die Interface Implementierung wurde C# verwendet, die bezogen auf die Aufgabenstellung sehr einfach anwendbar ist.

In Bild 25 und Bild 26 sind die Oberflächen für die Prozessabwicklung dargestellt. Dort können für die Prozessierung der Messdaten die Parameter der Messung angezeigt und verschiedene Einstellungen vorgenommen werden, bevor für die Daten im Anschluss eine Rekonstruktionsberechnung durchgeführt wird.

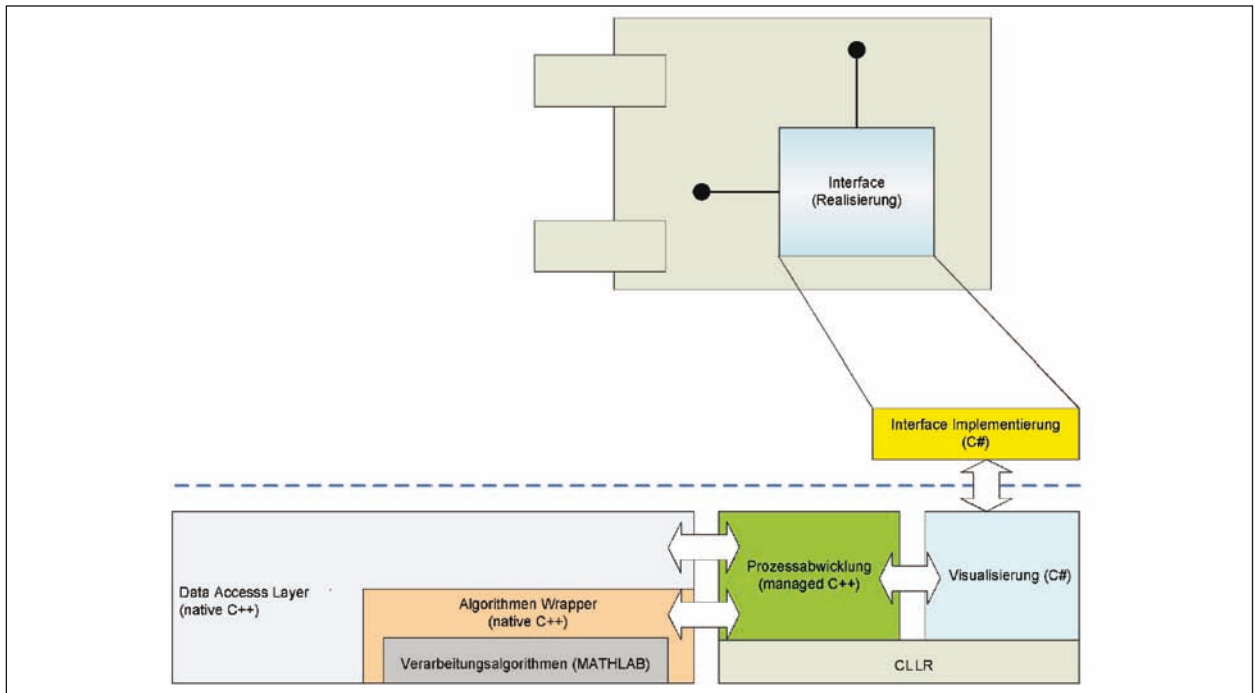


Bild 24: Bibliotheken für ausgewählte ZFP-Verfahren

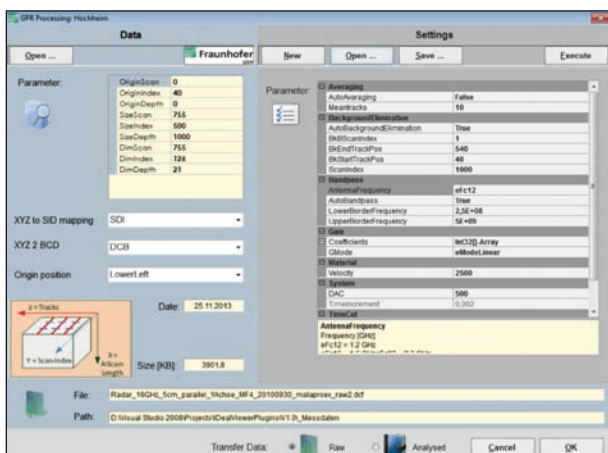


Bild 25: Bibliotheken für ausgewählte ZFP-Verfahren: hier Georadar

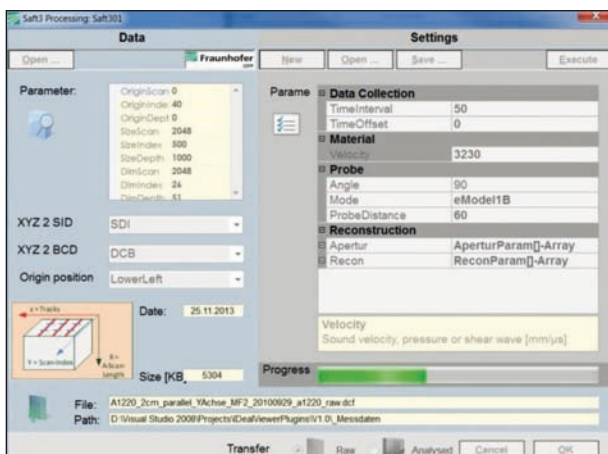


Bild 26: Bibliotheken für ausgewählte ZFP-Verfahren: hier Ultraschall

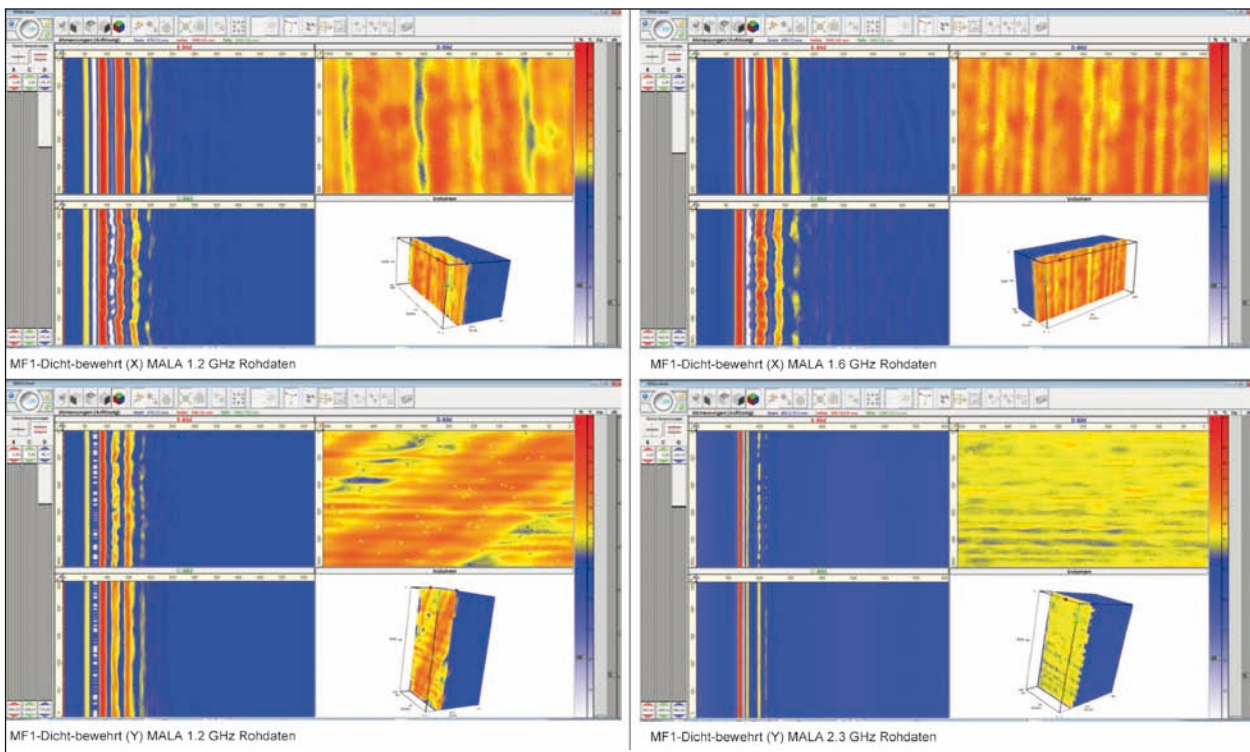
In den Ebenen darunter wurde sich auf C++ gestützt, um die notwendige Performance zu erhalten. Bei den eigentlichen Algorithmen wurde exemplarisch auf Skripte (MATLAB) zurückgegriffen, um eine möglichst sichere Vergleichbarkeit der Auswertung zu erlangen.

Schlussfolgerungen für AP5 – Bauwerksuntersuchungen zur verbesserten bildgebenden Darstellung der Ergebnisse

Betrachtet man den Stand vor der aktuellen Weiterentwicklung, stellt sich folgende Situation dar: Nach der automatisierten Datenerfassung werden die Messergebnisse in einer spezifizierten Art und Weise auf Dateiebene dokumentiert. Diese Dateien wurden in der Experimentalphase im Anschluss von Softwaremodulen gelesen und sequenziell verarbeitet (siehe Tabelle 4 und Tabelle 5).

Trotz der Modifikationen an den Algorithmen und der Komplexität, die Einzug hält, wenn so viele unterschiedliche Programmiersprachen und -technologien aufeinandertreffen, zeigten bereits die ersten Tests eine Reduktion des Arbeitsaufwandes. Anhand der einfachen 3D-Visualisierung und der Möglichkeiten, die der I-DEAL-Viewer bietet, wurde ein simples und sehr handliches Werkzeug geschaffen.

Der aktuelle Stand der Auswertung muss noch einige Optimierungen erfahren, bevor letztendlich eine Marktreife erlangt werden kann. Zum einen muss



Tab. 1: Radarergebnisse des Messfeldes MF1 an dem IZFP-Brückenplattenelement

aufgrund des Speicherbedarfs über eine Portierung zu 64-Bit-Plattformen nachgedacht werden. Aber auch die Prozessabläufe und die Algorithmen müssen verschlankt werden, um optimale Ergebnisse zu erzielen.

Schlussfolgerungen für AP6 – Kombinierte Datenauswertung und bildgebende Darstellung

Erste Ergebnisse liegen vor und Werkzeuge zur kombinierten Datenauswertung sind im Aufbau bzw. werden nachfolgend erprobt.

5 Ergebnisse der Bauwerksuntersuchungen

5.1 Scannermessungen von unten an der Grumbachtalbrücke

Die Grumbachtalbrücke verläuft im Zuge der Autobahn A 6 zwischen den Anschlussstellen St. Ingbert und Bischmisheim. Sie überspannt als Verbundbrücke mit Schubverbund das gleichnamige Tal und besteht aus einer in Querrichtung vorgespannten Fahrbahnplatte und einem Unterbau aus vier in Längsrichtung verlaufenden Stahlträgern. Jeweils zwei Träger sind auf rechteckigen Stützen aufgelagert (Bild 27).

Die Scannermessungen wurden auf beiden Richtungsfahrbahnen vom Seitenstreifen aus von einem Brückenuntersichtgerät durchgeführt (Bild 27). Dabei ist jeweils die Unterseite der Fahrbahnplatte im Bereich zwischen Kappe und äußerem Stahlträger untersucht worden (Bild 28).

Der Scannerrahmen wurde vormontiert und zusammen mit der Steuerungskiste (Bild 29a, links vorne) in die Arbeitsbühne verladen, um dann an der Unterseite der Brückenplatte mit den Saugfüßen befestigt (Bild 29a) zu werden. Der zugehörige Kompressor wurde auf der Brücke belassen und lediglich ein Druckschlauch zum Scanner verlegt. Mithilfe von Bohlen und Distanzstücken wurde der Scannerrahmen unterfangen, sodass dieser schnell versetzt werden konnte und im Fall eines Druckverlustes nur wenige Zentimeter absackt.

Von der Ankunft auf der Baustelle bis zum Beginn der Scannermessung dauern der Aufbau, die Installation der Messelektronik und die Platzierung des Scanners etwa 60 Minuten. Dabei waren etwa 30 Minuten für das Verladen der Scannerkomponenten und weitere 30 Minuten für Anbau und Einrichten des Scannerrahmens notwendig. Der Scanner konnte so präzise eingerichtet werden, dass die Radarantenne mit einem Luftspalt zwischen Antennenunterseite und Bauteiloberfläche von im Mittel 10 mm (Spannweite aufgrund von

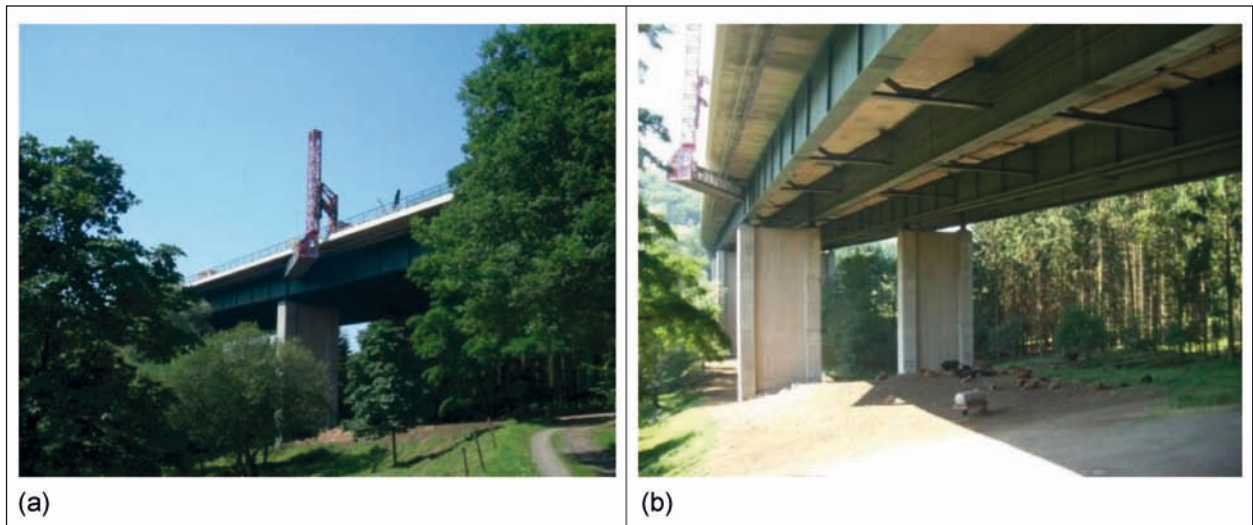


Bild 27: (a) Ansicht der Grumbachtalbrücke von Süden; (b) Untersicht der Grumbachtalbrücke vom östlichen Widerlager

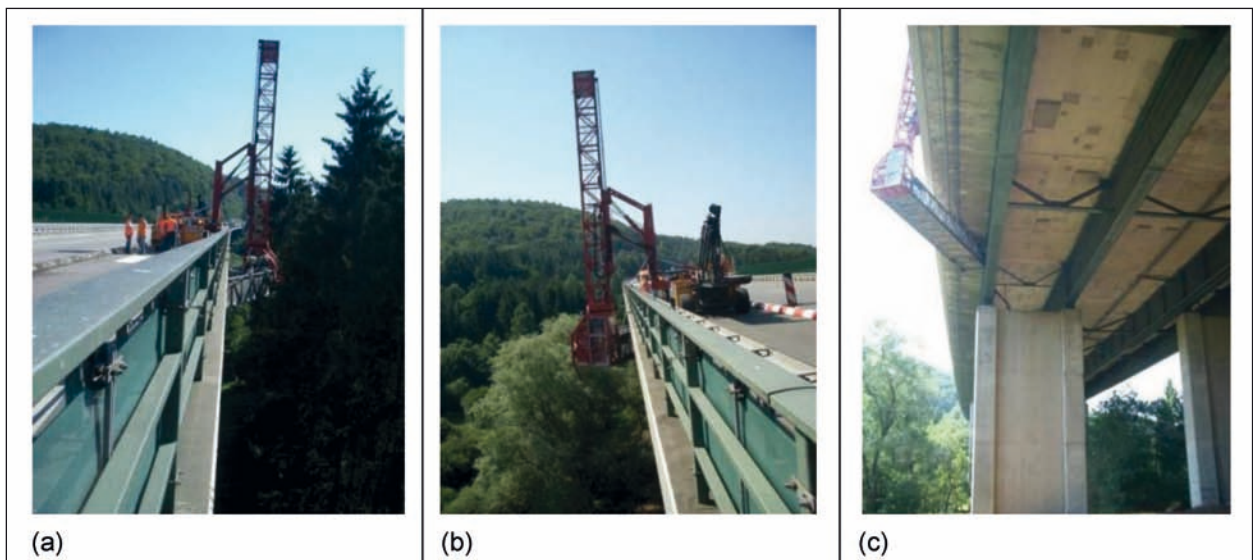


Bild 28: Zugang zur Unterseite der Fahrbahnplatte mit einem Brückenuntersichtgerät: (a) nördliche Seite; (b) südliche Seite; (c) Untersicht der südlichen Seite

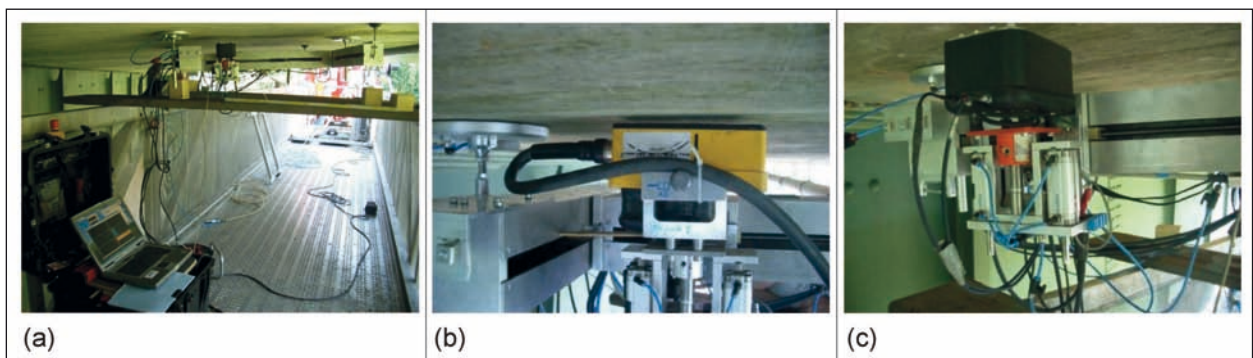


Bild 29: (a) OSSCAR-Bauwerksscanner an der Unterseite der Fahrbahnplatte; (b) Radarantenne zum berührungslosen Überfahren der Bauteiloberfläche; (c) Ultraschallprüfkopf zur direkten Ankopplung ohne Koppelmittel (Punkt-Kontakt-Prüfköpfe)

Unebenheiten und Schalkanten von 0 bis 20 mm angebracht werden konnte (Bild 29b). Wie bereits in Kapitel 2.4 beschrieben, konnten durch die Op-

timierung der Verfahrensgeschwindigkeit der Radarantenne und der Anpassung des Auf- und Absetzvorgangs des Ultraschallechoprüfkopfs die folgen-

den Zeiten für die Messfläche von $0,5 \times 1,0 \text{ m}^2$ erreicht werden:

- Radarmessung, Spurbstand 5 mm, Polarisationsrichtung 1: 10 Minuten,
- Umbau der Antenne: 3 Minuten,
- Radarmessung, Spurbstand 5 mm, Polarisationsrichtung 2: 10 Minuten,
- Umbau von Radar und Ultraschall: 7 Minuten,
- Ultraschallecho, Messraster 2,5 cm: 40 Minuten,
- Umbau von Ultraschall auf Radar: 5 Minuten.

Damit sind für die gesamte Messfläche von $0,5 \times 1,0 \text{ m}^2$ für Ultraschall (Messraster 2,5 cm) und Radar (zwei Polarisationsrichtungen, Spurbstand 5 cm) etwa 75 Minuten notwendig. Einschließlich Verfahren des Brückenuntersichtgeräts und erneutem Ansetzen des Scanners ergeben sich weitere 15 Minuten, sodass für eine Messfläche etwa 1,5 Stunden erforderlich sind. Soll zusätzlich noch Wirbelstrom zum Einsatz kommen, worauf aus Zeitgründen bei diesem Messeinsatz verzichtet wurde, sind für eine Messfläche etwa 2 Stunden erforderlich.

Der gesamte Messzyklus umfasst dabei folgende Arbeitsschritte:

1. Rahmen zusammenbauen und mit Montagerahmen neben Messfläche lagern,
2. Steuerungs- und Pneumatikkabel verbinden,
3. Druckluftkabel verlegen und Luftzufuhr anschließen,
4. Steuerungslaptop anschließen und mit USB-2-CAN verbinden,
5. Scanner ansaugen, ausrichten, Montagerahmen entfernen,
6. Pneumatikkopf montieren,
7. Ultraschallgerät A1220 und Prüfkopf montieren, Kabel verbinden und Messung im Steuerungsprogramm einstellen und starten, anschließend abbauen,
8. Radargerät Mala Pro-Ex und Radarantenne anschließen, Kabel verbinden (Kabelführung unbedingt wie in Bild 29b) und Messung im Steuerungsprogramm starten, Polarisationsrichtung ändern, Messung erneut starten, anschließend abbauen,
9. Betondeckungsmessgerät (Wirbelstrom) Proceq Profoscope anschließen, Kabel verbinden

und Messung im Steuerungsprogramm starten, Polarisationsrichtung ändern, Messung erneut starten, anschließend abbauen,

10. Ecken des Messfelds (0/0; 0/500; 1.000/500; 1.000/0; in mm) mit Scanner anfahren und auf Bauteil Lage des Messfelds markieren.

Die Schritte 1 bis 4 sind einmalig bei der Montage des Scannerrahmens vorzunehmen. Die Schritte 5 bis 10 sind für jedes Messfeld erforderlich. Auf Schritt 9 wurde beim Messeinsatz Grumbachtalbrücke zugunsten von insgesamt sechs statt vier erzielbarer Messfelder verzichtet. Die Schritte 1 bis 10 werden in einer Arbeitsanweisung abgefasst.

Beim Messeinsatz Grumbachtalbrücke wurden insgesamt sechs Messfelder mit Ultraschallecho und Radar untersucht. Drei Messfelder (MF1 bis MF3) lagen unterhalb der nördlichen Richtungsfahrbahn, drei (MF4 bis MF6) unter der südlichen Richtungsfahrbahn. Lage und Beschreibung der Messfelder sind in Bild 30, Tabelle 2 und Tabelle 3 dokumentiert.

Links in Tabelle 4 sind die Ergebnisse der Ultraschallmessung ($0,5 \times 1,0 \text{ m}^2$) des OSSCAR-Scanners den Radarmessungen ($0,6 \times 0,6 \text{ m}^2$) auf der rechten Seite gegenübergestellt, die mit einem bildgebenden Handgerät (Hilti PS1000) aufgenommen wurden.

In den B-Bildern der Ultraschallergebnisse sind gleichermaßen Rückwand (gestrichelt) und Querspannglieder erkennbar. Mit zunehmender Y-Koordinate nimmt die Dicke der Kappe (Randbereich der Brückenplatte) ab. Die Rückwand erscheint schräg. Tatsächlich ist aber die Messfläche an der Kappunterseite schräg, da die Dicke der Kappe zum Rand (in Richtung der Y-Achse) hin abnimmt. Damit kann die abnehmende Bauteildicke der Fahrbahnplatte im Randbereich, d. h. der Kappe, ermittelt und die Geometrie rekonstruiert werden.

Die C-Bilder zeigen, dass in diesem Bereich der Brückenplatte (im Vergleich zu MF4 bis MF6 etwas weiter zum Rand hin) jeweils nur zwei Querspannglieder pro Messfeld zu sehen sind. Deren Abstand untereinander beträgt rd. 50 cm. In MF3 ist im C-Bild nur das linke Querspannglied deutlich zu sehen. Ab einer X-Koordinate von 700 mm beginnt eine Stelle mit Reprofiliermörtel (siehe Foto in Tabelle 2). Als Folge davon ist keine Rückwand mehr erkennbar und das Spannglied kann allenfalls erahnt werden.

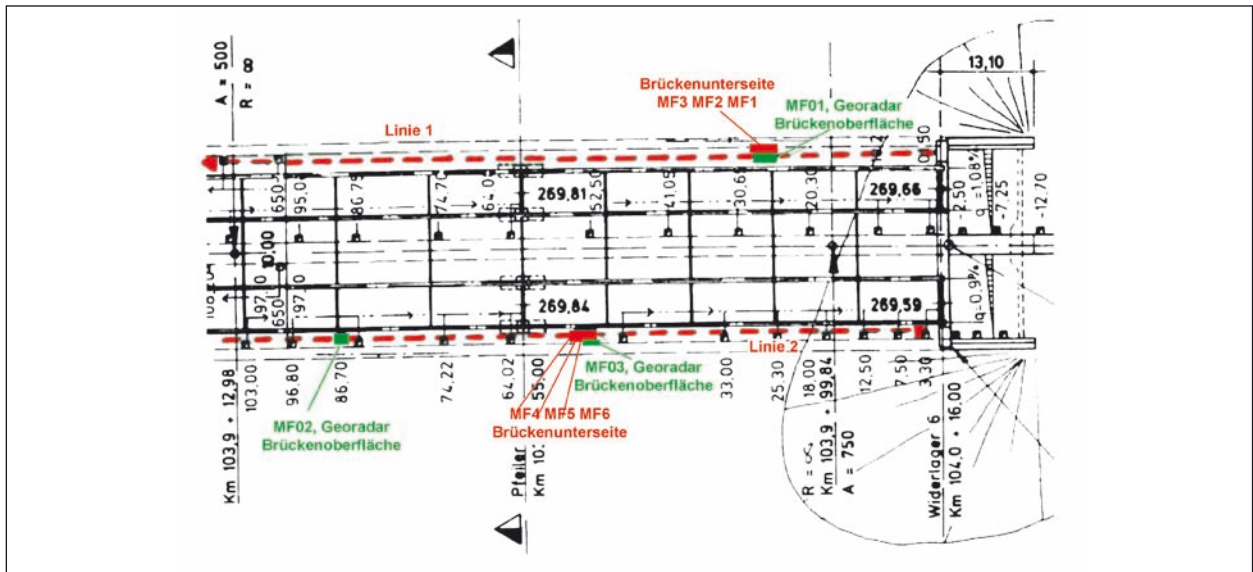


Bild 30: Lage der Messfelder 1 bis 3 und 4 bis 6 unterhalb der nördlichen und südlichen Richtungsfahrbahn

Nr.	Lage	Besonderheit	Foto
MF1	Nördliche Seite zwischen Kappe und äußerem Stahlträger; MF1-MF3 nebeneinander; rd. 25,60-28,60 m vom östlichen Widerlager entfernt; Bereich, in dem 2. Querspannnglied beginnt	keine	
MF2		keine	
MF3		30 % der Fläche mit Reparaturmörtel	

Tab. 2: Beschreibung und Lage der Messfelder unterhalb der nördlichen Richtungsfahrbahn

Nr.	Lage	Besonderheit	Foto
MF4	Südliche Seite zwischen Kappe und äußerem Stahlträger; MF4-MF6 nebeneinander; rd. 2,20-5,20 m von Mitte der 1. Stütze entfernt; Bereich, in dem beide Querspannngliedlagen verlaufen	keine	
MF5		keine	
MF6		30 % der Fläche mit Reparaturmörtel	

Tab. 3: Beschreibung und Lage der Messfelder unterhalb der nördlichen Richtungsfahrbahn

In Bild 31 sind die Ergebnisse der Radarmessungen mit der 2.3-GHz-Antenne für die Messfelder 1-3 dargestellt. Durch die Polarisationsabhängigkeit der Detektionsmöglichkeit der Bewehrung sind zwei Polarisationsrichtungen (X und Y) dargestellt. In der Darstellung vom C-Bild für die Polarisation Y

sind die querliegenden oberflächennahen Bewehrungsstäbe zu erkennen. Darunter ist ein Radargramm (B-Bild (x)) als Schnitt dazu dargestellt. Hier ist gut zu erkennen, dass im Vergleich mit dem Radargramm (B-Bild (y)) diese Bewehrungslage die oberflächennähere ist, also die Betondeckung

geringer ist als für die längs liegenden Bewehrungsstäbe. Die längs liegenden Bewehrungsstäbe sind im C-Bild mit der Polarisation X dargestellt.

In Bild 31 ist die Lage der oberflächennahen Bewehrung deutlich zu erkennen. Durch die Verwendung der 2.3-GHz-Antenne sind aber die Eindringtiefe und die damit verbundene Detektionstiefe von Reflektoren relativ gering. Gleichzeitig ist aber die Auflösungsgenauigkeit relativ hoch, sodass auch der Übergreifungsstoß auf der rechten Seite im C-Bild mit der Polarisationsrichtung X gut aufgelöst wird. Durch die geringe Eindringtiefe ist es aber nicht möglich, die tiefer liegenden Querspannglieder wie bei den Ultraschallergebnissen (Tabelle 4) zu detektieren.

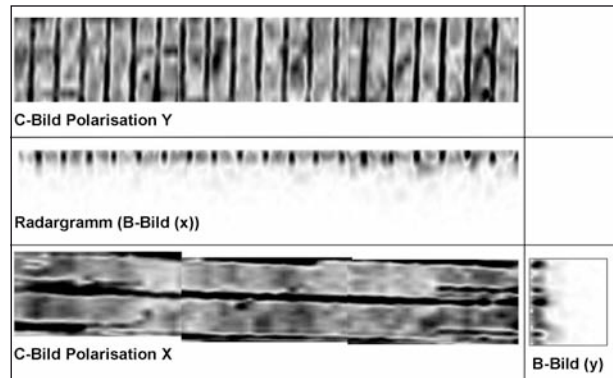
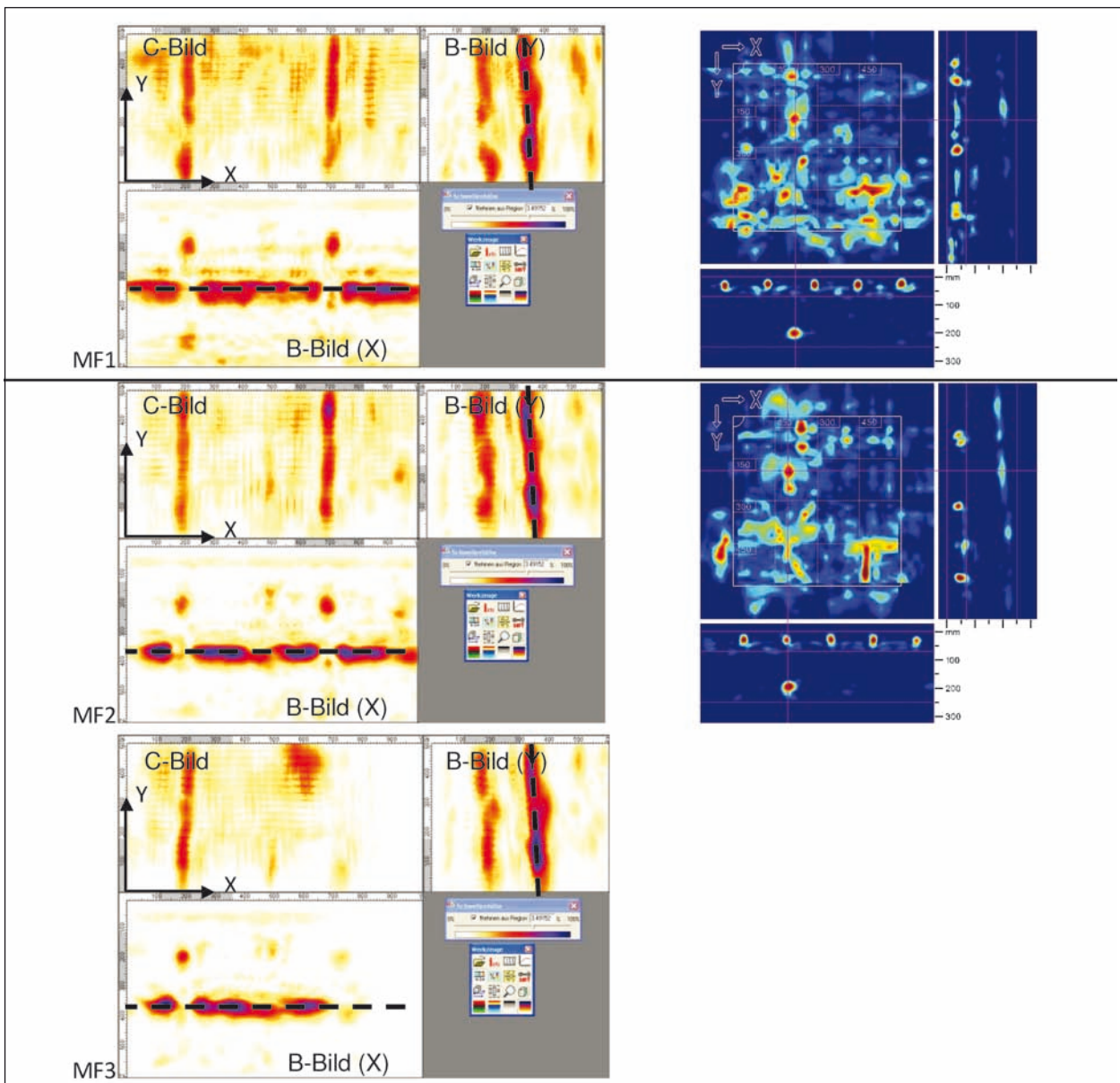


Bild 31: Ergebnisse der Radarmessungen mit einer 2.3-GHz-Antenne für die Messfelder 1-3. Dargestellt sind für Polarisation Y die Querlage sowie für die Polarisation X die Längslage der schlaffen Bewehrung. Zusätzlich ist die Tiefenlage der schlaffen Bewehrung in den B-Bildern verdeutlicht



Tab. 4: Ultraschallergebnisse der Messfelder MF1 bis MF3

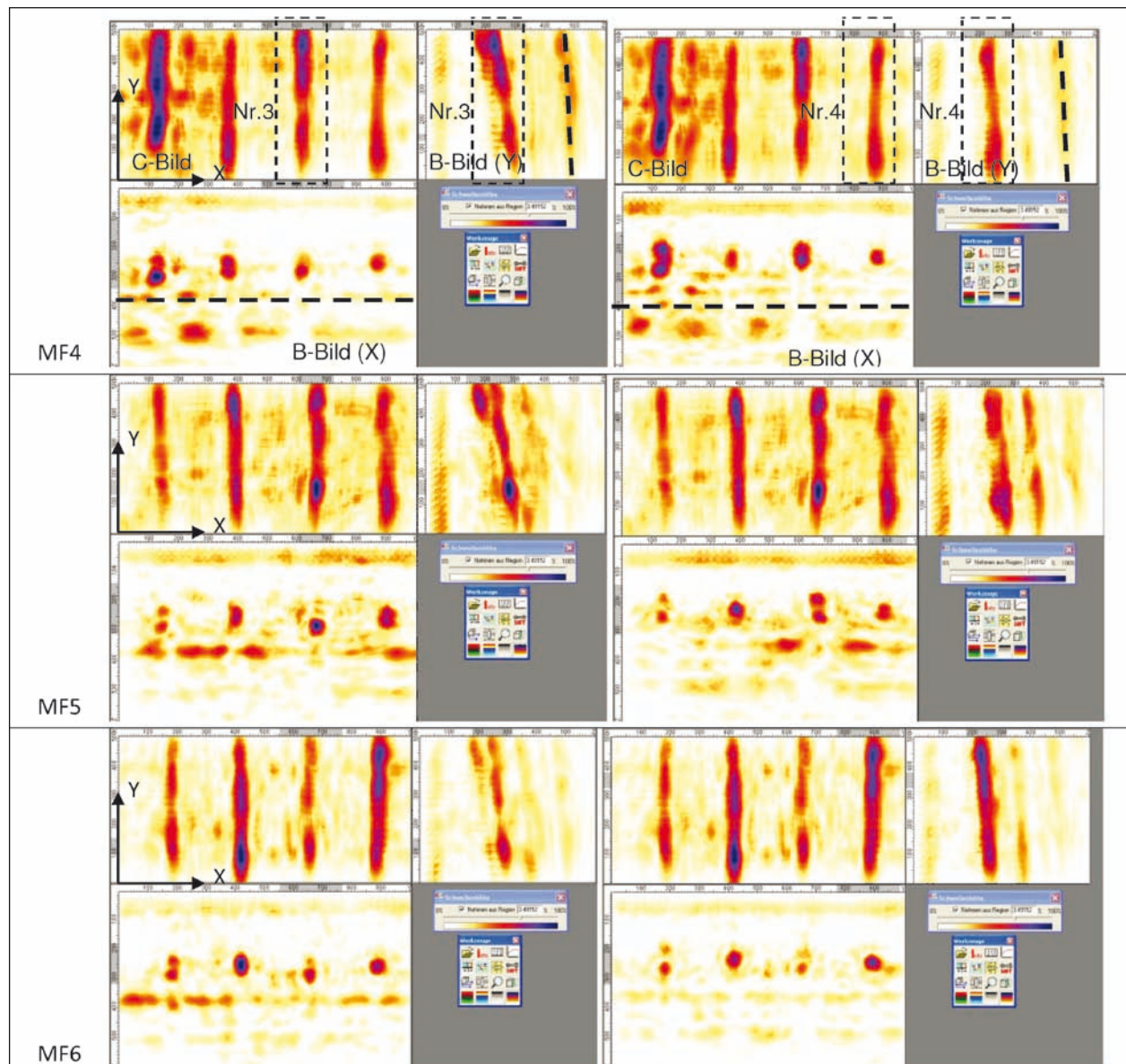
Die quer liegenden Bewehrungsstäbe (Polarisation Y) haben einen lichten Abstand von etwa 14 ... 16 cm und die horizontalen Bewehrungsstäbe (Polarisation X) einen von etwa 14 ... 17 cm.

Auffällig ist, dass im gesamten Bereich des Messfeldes 3 die schlaife Bewehrung detektierbar ist. Hier ist der Einfluss durch den Reprofiliermörtel wie bei den Ultraschallergebnissen nicht vorhanden. Bei der Verwendung einer Radarantenne mit einer geringeren Frequenz (z. B. 1.2 GHz) könnten durch die höhere Eindringtiefe (bis ca. 35 cm) auch die Querspannglieder detektiert werden [34].

Im Gegensatz zu den Ultraschallergebnissen der Messfelder MF1-MF3 sind hier bei den Messfeldern MF4-MF6 in allen Feldern jeweils vier Querspann-

glieder mit einem Abstand von rd. 25 cm untereinander zu erkennen. MF4-MF6 liegen etwas weiter vom Rand der Brücke entfernt. In diesem Bereich werden zusätzlich zu den Querspanngliedern, die vermutlich am Rand beginnen und mit einem Abstand von 50 cm verlaufen, zwei zusätzliche Querspannglieder eingefädelt, die untereinander ebenfalls einen Abstand von 50 cm haben, sodass hier vier Spannglieder im Abstand von 25 cm verlaufen.

Bei einer Detailuntersuchung der B-Bilder (Y) fällt auf, dass die Spannglieder unterschiedlich geneigt sind. Stellvertretend für die Messfelder MF4-MF6 ist in der oberen Zeile von Tabelle 5 für MF4 dargestellt, wie Querspannglied Nr. 3 im Vergleich zu Nr. 4 recht steil verläuft. Steil bedeutet hier mit zunehmender Y-Koordinate (d. h. zum Rand hin) zu ge-



Tab. 5: Ergebnisse der Messfelder MF4 bis MF6

ringerer Überdeckung hin. Das ist nachvollziehbar, wenn die Querspannglieder dem Momentenverlauf der Brückenplatte folgen. Das Auflager in Form der Längsträger aus Stahl befindet sich etwa 70 cm in negativer Y-Richtung, sodass das Querspannglied in diese Richtung nach oben, d. h. zu größeren Überdeckungen verläuft.

Im Vergleich zu MF1-MF3 ist ebenfalls auffällig, dass die Rückwand weniger kontrastreich abgebildet wird. Das kann Hinweise auf den akustischen Kontakt zwischen Konstruktionsbeton und dem darüber befindlichen Belag geben. In diesem Fall liegen Informationen zum Aufbau der Fahrbahnplatte vor, wonach keine Abdichtungslage vorhanden ist und der Asphalt direkt auf den Konstruktionsbeton aufgebracht wurde. Daher ist ein eher geringerer Kontrast zu erwarten, sofern der Belag gut auf dem Beton haftet. Im Bereich von MF4-M6 könnte dies ein Hinweis auf Beeinträchtigungen des Verbunds des Asphalts zum Beton sein. Inwieweit dies zutreffend ist, könnte im Zuge der anstehenden Instandsetzung der Fahrbahnplatte eine Verifizierung erfolgen, sofern der Baulastträger Zugang zum Bauwerk oder zu Informationen gewährt.

In Bild 32 ist für die Messfelder 4-6 wie auch schon für die Messfelder 1-3 (Bild 31) die schlaffe Bewehrung deutlich dargestellt. Auch hier ist der Informationsgewinn durch die Kombination beider Verfahren vorhanden und führt zu einer besseren Rekonstruktion des inneren Aufbaus der Brückenplatte für den untersuchten Bereich. Im Messfeld 5 ist zu erkennen, dass die quer liegende oberflächennahe Bewehrung zum unteren Rand des C-Bildes (Polarisation Y) hin verschwindet. Durch die Aufnahme des Messfeldes und nicht einer Messspur können

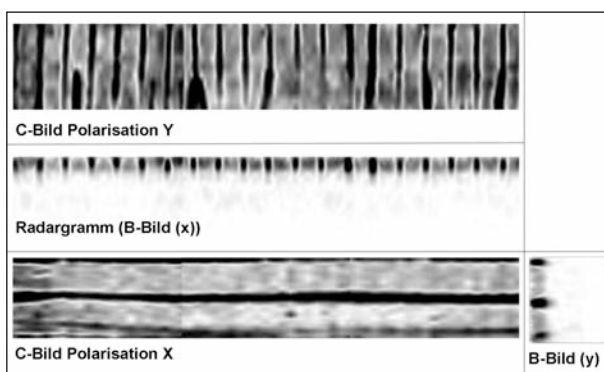


Bild 32: Ergebnisse der Radarmessungen mit einer 2,3-GHz-Antenne für die Messfelder 4-6. Dargestellt sind für Polarisation Y die Querlage sowie für die Polarisation X die Längslage der schlaffen Bewehrung. Zusätzlich ist die Tiefenlage der schlaffen Bewehrung in den B-Bilder verdeutlicht

verschiedene C-Bilder, die unterschiedliche Tiefen darstellen, konstruiert und darüber festgestellt werden, ob die Bewehrungsstäbe in diesem Bereich verbogen sind und es lokal zu einer stark abnehmenden Betondeckung oberhalb der Bewehrungsstäbe kommt.

Vergleicht man die beiden Verfahren Ultraschall und Radar, so wird hier deutlich, dass durch die Kombination der Messdaten der Informationsgewinn über die innere Konstruktion deutlich zunimmt. So ist die Lage der oberflächennahen Bewehrung gut mit Radar darstellbar, wohin gegen Ultraschall hier keinerlei Ergebnisse liefert. Für Einbauten in einer größeren Tiefe ist hingegen Ultraschall das Verfahren, welches eine genaue geometrische Lage von Konstruktionselementen liefert.

Bei der Auswertung beider Verfahren ist zu beachten, dass der Mittelpunkt der Darstellungen von Bewehrung und Spanngliedern nicht der reale Mittelpunkt, sondern die Reflektionsoberfläche auf den Stäben und Spannstäben ist.

5.2 Handmessungen von oben an der Grumbachtalbrücke

Zeitgleich zu den Scannermessungen an der Grumbachtalbrücke (Kapitel 5.1) fanden im Auftrag des Baulastträgers (Landesbetrieb für Straßenbau, Saarland LfS) Radaruntersuchungen von der Oberseite der Brückenplatte statt. Der Baulastträger hat einer Verwendung eines Teils der Radarmessungen zugestimmt, sodass diese hier veröffentlicht werden können. Konkret handelt es hier um die Aufnahme von Radardaten entlang von Messlinien in Fahrtrichtung. Solche großflächigen Radaruntersuchungen haben sich bei vergangenen Messeinsätzen in Kombination mit Detailmessungen durch den Bauwerkscanner bewährt.

Auf der Fahrhahnoberseite wurden in beiden Fahrtrichtungen jeweils Radarmessungen durchgeführt (Bild 33 und Bild 34). Diese bestanden aus zwei Linienscans mit zwei Antennen mit gekreuzten Polarisierungen über die gesamte Brückenlänge. Ziel der Untersuchungen war die beispielhafte Überprüfung der Lage der Querspannglieder in der Betonfahrbahn. Es wurde jeweils eine Messlinie (ca. 350 m) auf der Standspur für beide Fahrrichtungen aufgenommen, um das Vorhandensein und die zwei Lagen der Querspannglieder zu bestätigen. Laut Planungsunterlagen beträgt der Abstand

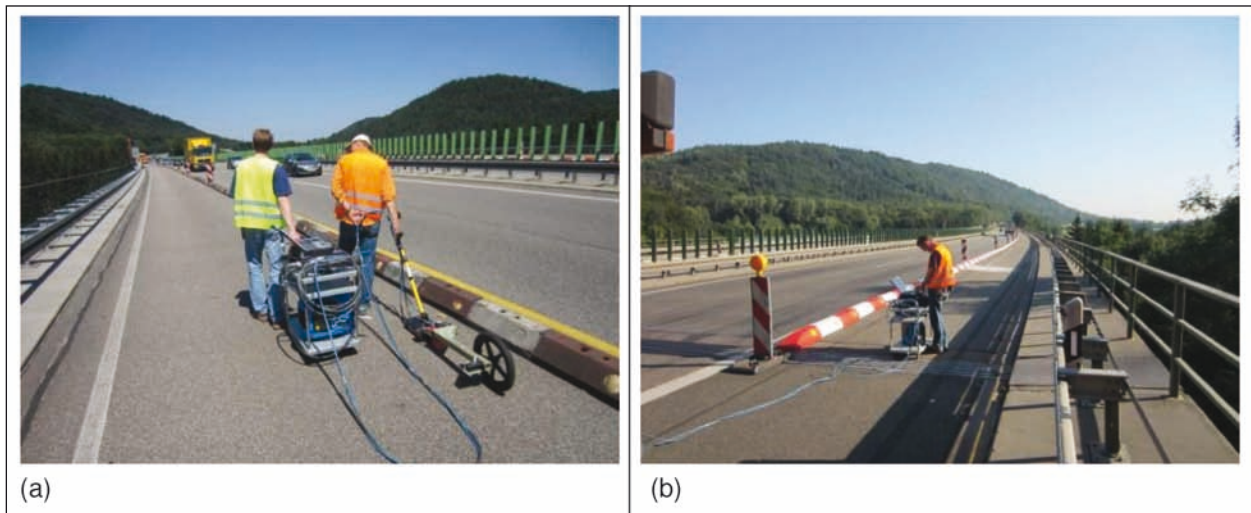


Bild 33: Aufnahme der Radardaten entlang (a) Messlinie 1 auf der nördlichen Fahrbahn; (b) Messlinie 2 auf der südlichen Fahrbahn

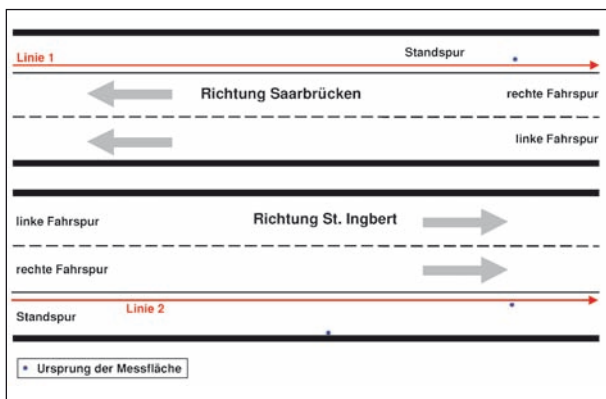


Bild 34: Anordnung der Messlinien mit Radar von der Fahrbahn aus gemessen

zwischen den Querspanngliedern 0,25 m und die Tiefenlage variiert über den Querschnitt im Bereich von 0,10 m bis 0,30 m.

Die hier dokumentierten Ergebnisse wurden mit dem Radargerät SIR 20 mit zwei 2-GHz-Palm-Antennen (GSSI) aufgenommen. Es wurden zwei Antennen mit zueinander um 90 Grad gedrehter Polarisation gleichzeitig verwendet. Beide Antennen wurden über dieselbe Messlinie mit einem Versatz von 0,10 m geführt. Diese Antennenkonfiguration wurde gewählt, um die Reflexionen an der schlaffen Bewehrung besser von den Reflexionen an den Querspanngliedern aufgrund der unterschiedlichen Querschnitte unterscheiden zu können.

Im Radargramm von Bild 35 können dem Schichtübergang Asphalt/Beton (grüner Pfeil/oben), der schlaffen Bewehrung (rote Linie) und den Querspanngliedern (rote Pfeile) jeweils Reflexionen zugeordnet werden. Die Reflexionen sind mit Pfeilen

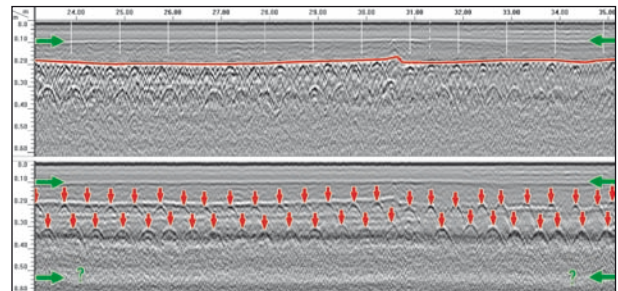


Bild 35: Radargramm entlang Linie 2 (Teilausschnitt) mit einer Betonüberdeckung von ca. 8 cm

hervorgehoben worden. Die Reflexion in einer Tiefe von ca. 55 cm gibt vermutlich nicht die Rückwand der Betonfahrbahn wieder, sodass zur Feststellung der Geometrie Scannermessungen von der Unterseite unabdingbar sind. Die Querspannglieder sind in zwei Lagen mit unterschiedlichen Tiefen eingebaut. Der Abstand zwischen den Querspanngliedern beträgt im Mittel etwa 25 cm, wobei vereinzelt Abweichungen auftreten. Die Dicke der Asphalt-schicht liegt im Bereich von 8-12 cm. Die Betonüberdeckung der schlaffen Bewehrung variiert zwischen 0 und 8 cm.

Vergleicht man den oberen und den unteren Bildteil von Bild 35, erkennt man, dass im unteren Bildteil die oberflächennahe nicht vorgespannte Bewehrung nahezu vollständig ausgeblendet ist und die obere Reihe der Querspannglieder sehr deutlich dargestellt wird. Auch die tiefer liegenden Querspannglieder sind etwas deutlicher erkennbar. Dies wurde durch gezielten Einsatz von den zwei Polarisationsrichtungen der Antennen erreicht und wird detailliert im Rahmen einer Veröffentlichung der DGZfP-Jahrestagung 2013 beschrieben.

5.3 Scannermessungen an dem IZFP-Brückenplattenelement

Brücken mit Verdrängungskörpern sind bei Bestandsbrücken von besonderem Interesse, da diese beim Betonieren ihre statisch geplanten Positionen nicht immer beibehalten. Dadurch können sich die Widerstandsmomente erheblich von den berechneten aus den Bestandsplänen unterscheiden, was den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und den Grenzzustand der Tragfähigkeit verschlechtern kann.

Wie schon in Kapitel 5.1 gezeigt wurde, ist die Eindringtiefe von Ultraschall und Radar unterschiedlich, wobei für das zweitgenannte Verfahren Eindringtiefen von etwa 30 cm möglich sind [34]. Da Verdrängungskörper meistens bei massiv ausfallenden Brücken mit einer großen Plattendicke eingesetzt werden, kommen hier die Vorteile beider Verfahren in Kombination zum Tragen, um damit den inneren Konstruktionsaufbau aufzuzeigen. So ist das Ultraschallverfahren gut geeignet, um die tiefer liegenden Verdrängungskörper und die Rückwand zu detektieren, und das Radarverfahren zur Darstellung der oberflächennahen Bewehrung. Um dies zu zeigen, wurde die IZfP-Platte, welche beim IZfP in Saarbrücken lagert, ausgewählt.

Dafür sind Messungen an einem Plattenstück einer Brücke mit Verdrängungskörpern mit dem OSSCAR-System mit beiden Verfahren durchgeführt worden (Bild 36a).

Bei dem Brückenelement ist die oberflächennahe Bewehrung der Unterseite der Fahrbahnplatte sehr dicht verlegt. Die verwendeten Bewehrungsstäbe haben einen Durchmesser von 28 mm und sind zum Teil mit einem sehr geringen lichten Abstand zueinander (< 7 cm) angeordnet (Bild 36b). Die luftgefüllten metallischen Verdrängungskörper liegen in der Schwerachse der Platte, haben einen Durchmesser von 60 cm und einen Abstand vom Plattenrand nach oben wie unten von etwa 20 cm. Es wurden Messungen von der Ober- und Unterseite mit Ultraschall (50 kHz) und verschiedenen Radarfrequenzen (1.2, 1.6 und 2.3 GHz) durchgeführt.

Da sich in den meisten Fällen bei den Brückenuntersuchungen auf der Oberseite der Brücke der Fahrbahnbelag mit seinem mehrschichtigen Aufbau und der integrierten Fahrbahnabdichtung befindet, was Messungen mit Ultraschall verhindert, wurde zuerst die Unterseite mit dem OSSCAR gemessen und die Daten ausgewertet.

In Bild 37 und Bild 38 sind drei Radargramme von den für die Messungen verwendeten Radarfrequenzen dargestellt. Diese wurden durch Datenbearbeitung in ihrer Qualität verbessert, damit Informationen aus einer größeren Tiefe deutlicher werden, so wie es z. B. in [34] beschrieben wird.

In Bild 37 sind C-Bilder der 1.2- und 2.3-GHz-Antenne für die beiden Polarisationsrichtungen dargestellt. Im Vergleich auch mit den Radargrammen aus Bild 38 für die beiden Antennenfrequenzen ist

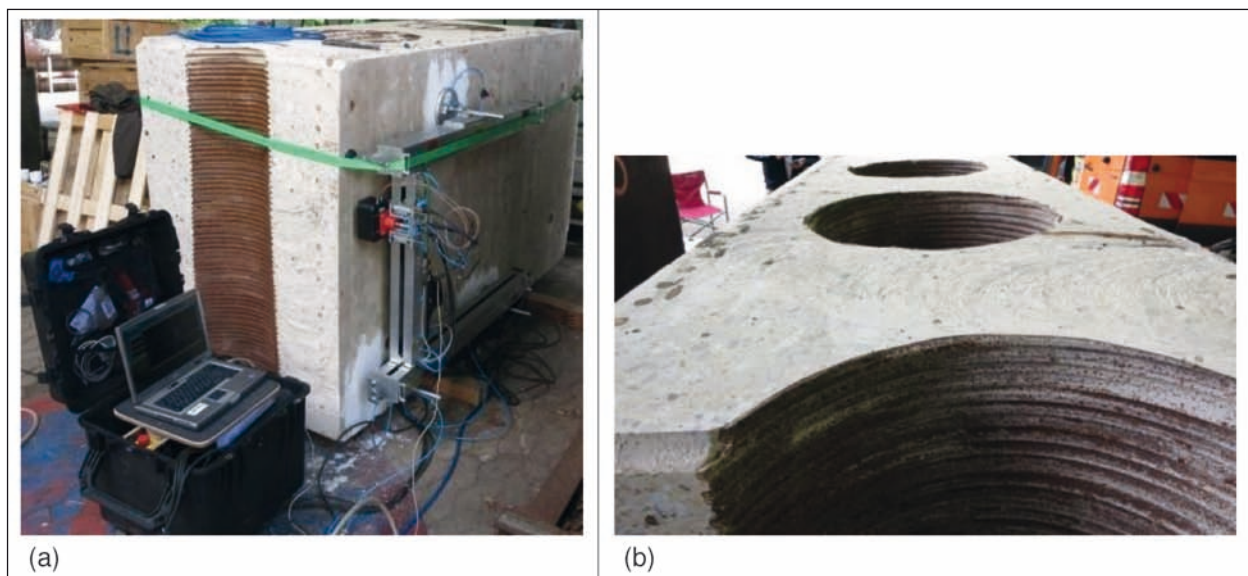


Bild 36: a) Brückenplattenelement mit Verdrängungskörpern und dem OSSCAR-System auf der Unterseite der Brücke; b) links erkennbar die dichte oberflächennahe Bewehrung der Unterseite der Platte, mittig der metallische Verdrängungskörper (Durchmesser 60 cm) und rechts die oberflächennahe Bewehrung der Fahrbahnseite (Oberseite)

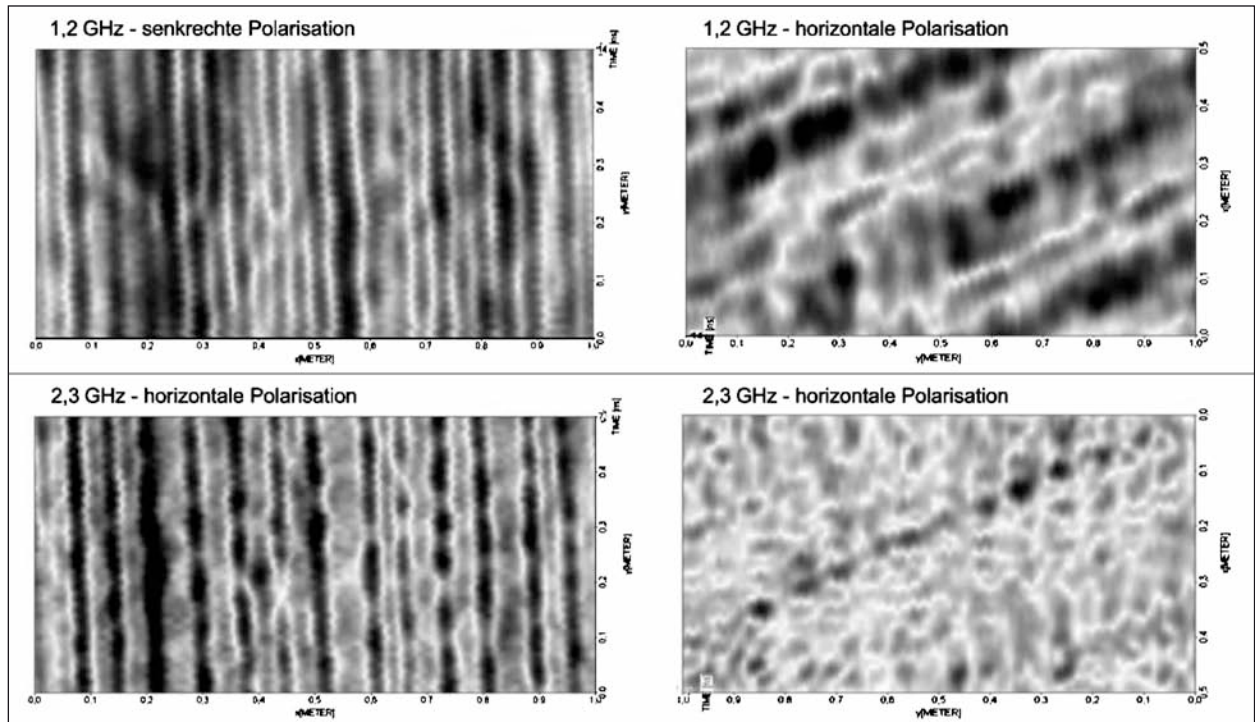


Bild 37: C-Bilder in der Tiefe der oberflächennahen Bewehrung für Messungen mit der 1.2- und 2.3-GHz-Antenne für beide Polarisationsrichtungen

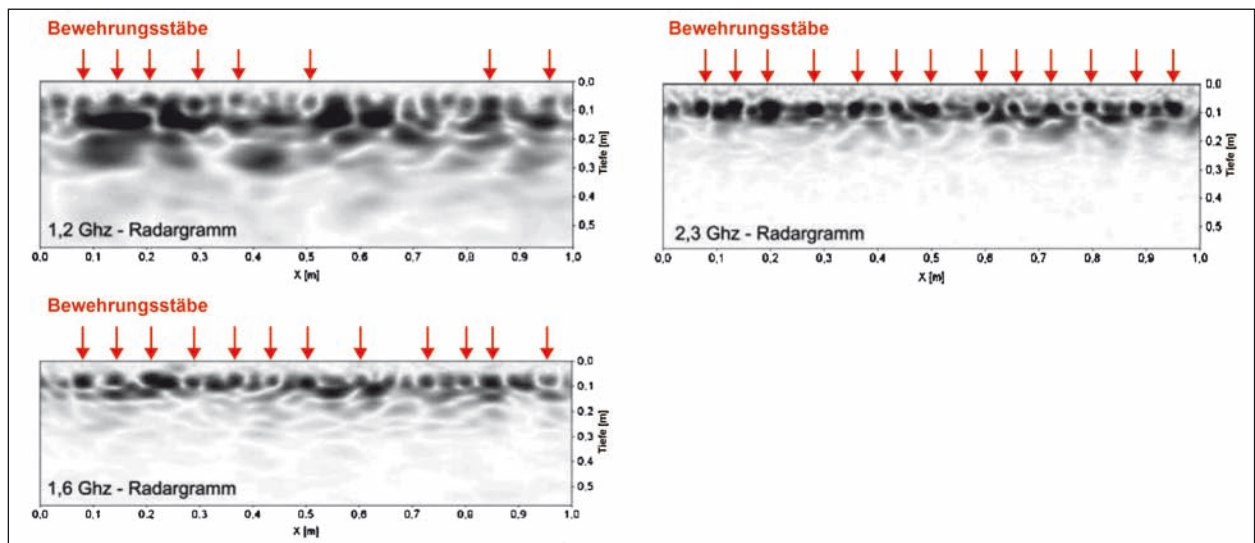


Bild 38: Radargramme einer Messspur senkrecht zur Schwerachse der Verdrängungskörper für verschiedene Radarfrequenzen (1.2, 1.6 und 2.3 GHz). Zunahme der lateralen Auflösung der dicht verlegten oberflächennahen Bewehrung auf der Unterseite der Platte

erkennbar, dass die einzelnen Bewehrungsstäbe bei der senkrechten Polarisation mit der 1.2-GHz-Antenne schlecht voneinander unterschieden werden können. Bei der 2.3-GHz-Antenne sind hingegen die Stäbe deutlich unterscheidbar. Dafür ist die quer dazu verlaufende Bewehrung, die hier leicht schräg verläuft, mit der 1.2-GHz-Antenne noch ganz gut erkennbar (3 Stäbe), wohingegen mit der 2.3-GHz-Antenne nur noch ein Stab einigermaßen gut dargestellt wird. Dies liegt daran, dass diese

Stäbe in einer Tiefe von etwa 8 ... 11 cm liegen und somit die Grenze der Eindringtiefe der 2.3-GHz-Antenne erreicht wird.

Beim Vergleich der drei Abbildungen in Bild 38 ist erkennbar, dass mit zunehmender Frequenz die Abbildungsschärfe der oberflächennahen Bewehrung besser wird und bei einer Frequenz von 2,3 GHz die einzelnen Stäbe deutlich voneinander unterschieden werden können. Bei einer Frequenz

von 1,2 GHz sind die Stäbe schlecht oder gar nicht identifizierbar. Durch das Prozessieren der Rohdaten kommt es weiterhin bei den niedrigeren Frequenzen zur Bildung von Artefakten in einer etwas größeren Tiefe als die oberflächennahe Bewehrung, welche unter anderem durch die Grenze des lateralen Auflösungsvermögens von Radar zweier Stäbe hervorgerufen wird. Die Detektion des Verdrängungskörpers in einer Tiefe von etwa 20 cm bei allen verwendeten Frequenzen ist von der Unterseite der Platte nicht möglich. Hierbei ist bestimmend, dass der Abstand der Stäbe zueinander, bei der Verwendung der niedrigen Frequenzen (1.2 und 1.6 GHz), in etwa dem Mindestabstand entspricht, bei dem zwei Stäbe als Einzelne detektierbar sind. Dabei wird an der oberflächennahen Bewehrung der größte Teil der Radarsignale reflektiert, sodass kaum Informationen über tiefere Einbauten wahrgenommen werden können. Bei der Frequenz von 2.3 GHz ist die Eindringtiefe des Signales zu gering, um an dem Verdrängungskörper eine detektierbare Information zurückzuerhalten.

Im weiteren Verlauf des Projektes wurden außerdem Messungen von der Oberseite der Platte, der Fahrbahnseite, durchgeführt. Dadurch soll ein Vergleich möglich sein, warum Messungen auch von der Oberseite infrage kommen. Generell wird dies nötig sein im Bereich von Auflagern, da dort ein Zu-

gang von der Unterseite der Fahrbahnplatte nur schwer bis gar nicht möglich ist. Für Messungen wäre es von Vorteil, wenn eventuelle Fahrbahnsanierungen dazu ausgenutzt werden können, sodass der Fahrbahnbelag bereichsweise oder auf großen Flächen nicht vorhanden ist und somit ein guter Zugang an die tragende Betonbrückenkonstruktion von oben möglich ist.

Im Folgenden sind Darstellungen von Messungen mit dem OSSCAR von oben an der IZfP-Platte abgebildet. Beim Vergleich der prozessierten Messdaten der Radarmessungen von der Unterseite zur Oberseite (Bild 40) ist der Verdrängungskörper unterhalb der oberflächennahen Bewehrung bei den Messdaten von der Oberseite für 1.2 und 1.6 GHz deutlich zu detektieren. Durch die Bearbeitung der Rohdaten der Messungen konnte dabei die Signalqualität entsprechend verbessert werden. Bei 1.6 GHz ist dabei das Signal schon schwächer und somit der Verdrängungskörper schlechter zu detektieren. Für eine Frequenz von 2.3 GHz ist die Dämpfung des Signales im Beton zu stark, sodass nur die oberflächennahe Bewehrung, aber nicht mehr der Verdrängungskörper detektierbar ist (Bild 40).

Vergleicht man die C-Bilder für 1.2 und 2.3 GHz aus Bild 39, so ist erkennbar, dass die Bewehrungsstäbe bei Beiden gut erkennbar sind – dies auch bei den horizontal verlaufenden schlaffen Stäben.

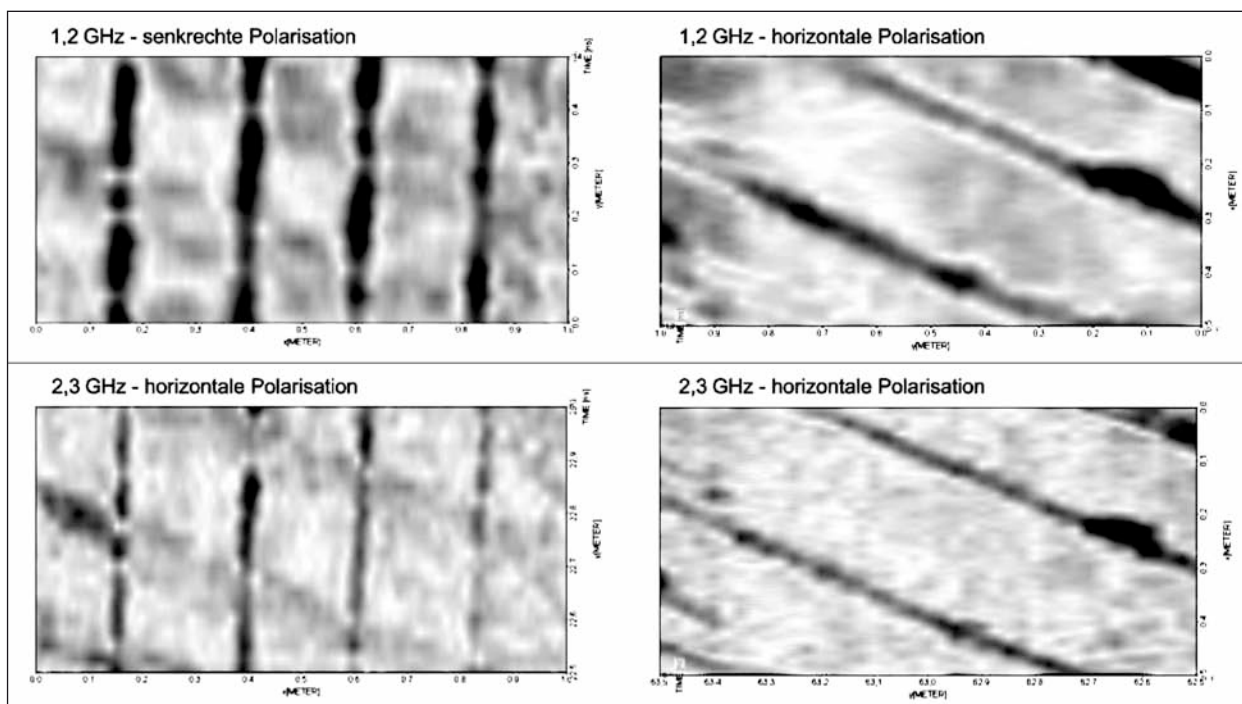


Bild 39: C-Bilder in der Tiefe der oberflächennahen Bewehrung für Messungen mit der 1.2- und 2.3-GHz-Antenne für beide Polarisationsrichtungen

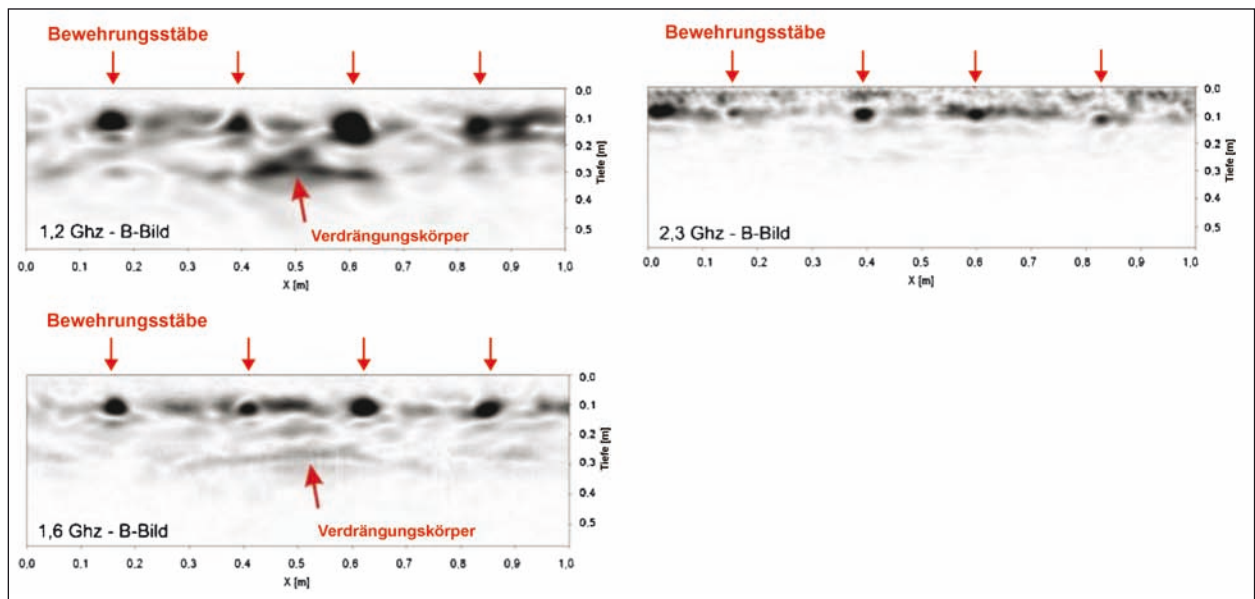


Bild 40: Radargramme einer Messspur senkrecht zur Schwerachse der Verdrängungskörper für verschiedene Radarfrequenzen (1.2, 1.6 und 2.3 GHz). Abnahme der Eindringtiefe und der damit verbundenen Detektionsmöglichkeit des Verdrängungskörpers von der Oberseite der Platte

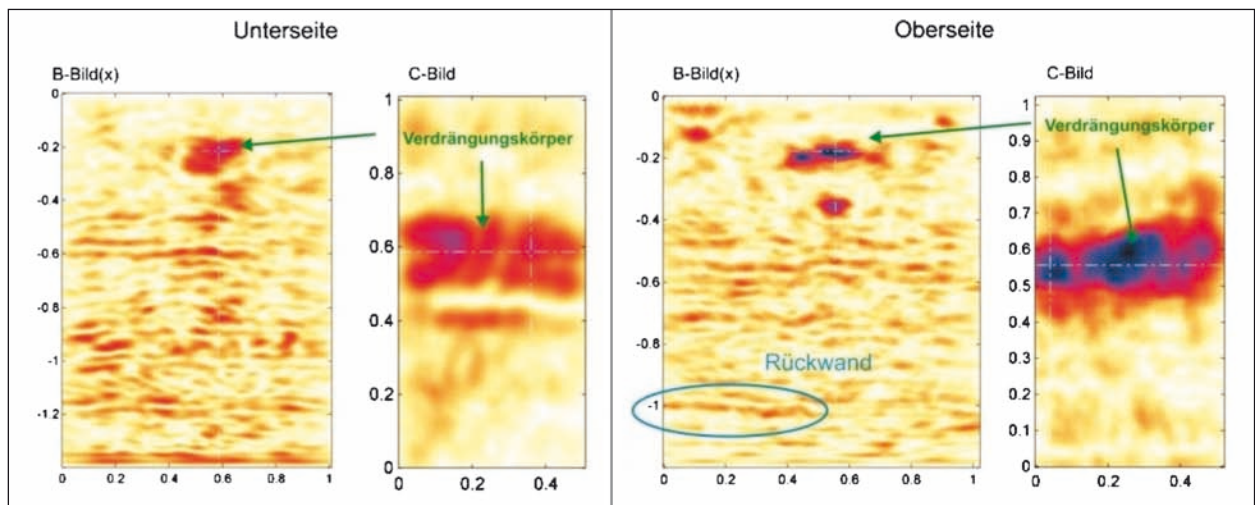


Bild 41: Ultraschalldatensätze von der Unter- und Oberseite. Bei beiden ist die Reflexion der Schallwellen an der Oberseite des Verdrängungskörpers detektierbar und in der Darstellung der Zeitscheibe als durchgängiger Reflektor in einer Tiefe von etwa 20 cm erkennbar (grüne Pfeile). In einer Tiefe von etwa 100 cm ist im B-Bild auf der rechten Seite die Rückwandreflexion (hier die Unterseite des Brückenplattenelementes) erkennbar

Dieselben Messfelder auf der Ober- und Unterseite des Brückenplattenelementes wurden mit Ultraschall gemessen. Diese Ergebnisse sind in Bild 41 dargestellt. An den Rohdaten wurde im Anschluss eine SAFT-Rekonstruktion durchgeführt. Deutlich zu erkennen ist, dass bei beiden Datensätzen für die Ober- und Unterseite bei Ultraschall die oberflächennahe Bewehrung nicht erkennbar ist, sich aber der Verdrängungskörper in einer Tiefe von etwa 20 cm deutlich darstellt (grüne Pfeile). Das Reflexionssignal ist beim Datensatz von der Oberseite (rechts) jedoch stärker, sodass gegenüber der lin-

ken Seite von Bild 41 beim B-Bild ein deutlicheres Ergebnis erkennbar ist. Dabei ist sogar die Oberflächenwölbung des Verdrängungskörpers in Ansätzen abgebildet. Beim Vergleich der beiden Zeitscheiben (C-Bilder) im Bild 41 ist des Weiteren die Signalintensität auf der rechten Seite (Oberseite) deutlich stärker ausgeprägt.

In dem B-Bild des Datensatzes von der Oberseite ist in einer Tiefe von etwa 100 cm ein lineares Signal zu erkennen. Unterhalb des Reflexionssignales des Verdrängungskörpers ist es im weite-

ren Verlauf nicht mehr vorhanden. Dabei kann es sich um die Reflexion an der Rückwand handeln. Dies stimmt mit der eigentlichen Bauteildicke von 98 cm relativ gut überein.

Deutlich wird am Beispiel des Brückenelements mit Verdrängungskörpern und großer Bauteildicke, dass eine Verfahrenskombination von Radar und Ultraschall die innere Struktur von Baukonstruktionen sehr gut darstellen kann. So sind oberflächennahe Bewehrungen gut mit dem Radarverfahren zu detektieren. Selbst wenn wie in dem hier beschriebenen Bauteil die Bewehrung sehr dicht verlegt ist, kann diese mit der Wahl einer hochfrequenten Radarantenne dargestellt werden. Etwas tiefer liegende Einbauten bis etwa 25-30 cm sind mit dem Radarverfahren noch gut detektierbar, wenn die Daten, wie in [34] beschrieben, rekonstruiert werden, die oberflächennahe Bewehrung eine größere lichte Weite besitzt und niedrigere Antennenfrequenzen gewählt werden. Für den Bereich ab 20 cm und für Einbauten hinter dicht verlegter oberflächennaher Bewehrung kommt jedoch das Ultraschallverfahren immer mehr infrage.

Schlussfolgerungen für AP3 – Bauwerksuntersuchungen zur Verbesserung der Datenaufnahme

Die erreichten Ergebnisse sind in Kapitel 2.4 beschrieben.

Der Scanner hat seine Einsatzbarkeit für Überkopf-Messungen aus einem Brückenuntersichtgerät heraus unter Beweis gestellt. Damit ist ein Einsatz im Rahmen einer OSA möglich.

Durch bauliche Anpassungen des Scanners an Überkopf-Messungen und Optimierung der Verfah- und Absetzgeschwindigkeiten von Radarantenne und Ultraschallprüfkopf konnte eine Verkürzung der Messzeit insbesondere bei Ultraschall erzielt werden. Bei Ultraschallmessungen mit einem Messraster von 2,5 cm und Radarmessungen mit zwei Polarisationsrichtungen und einem Spurabstand von 5 cm wird für eine Detailuntersuchung der Fläche von 0,5 x 1,0 m² einschließlich Umsetzen des Scanners zur nächsten Messposition rd. 1,5 Stunden benötigt.

Schlussfolgerungen für AP4 – Modifikation des Bauwerkscanners

Die erreichten Ergebnisse sind in Kapitel 2.5 beschrieben.

Aus den Erfahrungen des Messeinsatzes an der Grumbachtalbrücke sind gerätetechnische Umbauten erforderlich gewesen, die umgesetzt wurden. Des Weiteren sind Softwareergänzungen notwendig, sodass die gezeigten Ergebnisbilder auch mit der entwickelten Scannersoftware erhalten werden können. Diese Entwicklung des Funktionscontainers und des 3D-Browsers ist in Kapitel 4.3.4 dargestellt

5.4 Kombinierte Untersuchungen mit Radar und US an hergestellten Betonbauteilen

Ein weiterer Schritt ist das gleichzeitige Aufbereiten der Messdaten von Ultraschall und Radar, um die Informationen beider Verfahren in einem 3D-Datensatz darzustellen. So können die Lage von Spanngliedern zur Oberfläche oder die Lage der Rückwand zur Messoberfläche durch die Fusion der Datensätze und der daraus resultierenden 3D-Ergebnisdarstellung besser verdeutlicht, wenn nicht sogar erst möglich gemacht werden. In Bild 42 ist verdeutlicht, was durch die Fusion zweier Datensätze von zwei Messverfahren erreicht werden kann. Auf der linken Seite ist das B-Bild einer Radarmessung dargestellt. Deutlich sind die oberflächennahen Bewehrungsstäbe erkennbar sowie ein etwas tiefer liegendes Hüllrohr. Die Rückwand kann hier die Radarmessung nicht mehr auflösen. Damit die Datensätze der Ultraschall- und Radarmessungen miteinander fusioniert werden können, müssen die Radardatensätze nach der Prozessierung noch migriert werden. Dabei verschwinden die Reflexionshyperbeln und es werden Reflexionsbereiche dargestellt, die die Reflexionsoberfläche der Einbauteile darstellen. Für Ultraschalldatensätze wird eine SAFT-Rekonstruktion durchgeführt.

Rechts in Bild 42 sind zwei solche Datensätze für Radar und Ultraschall dargestellt. In der Bilderreihe darunter wurden diese Ergebnisse in einer Isoflächendarstellung wiedergegeben. Hier erkennt man, dass mit Radar die oberflächennahen Konstruktionsbauteile gut dargestellt werden, aber schnell mit zunehmender Tiefe keine Informationen erhalten werden. Im Ultraschalldatensatz sind hingegen die oberflächennahen Einbauten (schlaaffe Bewehrung) nicht detektierbar, jedoch tiefer liegende Stäbe und die Rückwand des Objektes. In der Darstellung rechts unten in Bild 42 wurden diese beiden Datensätze miteinander fusioniert. Hier ist deutlich der gesamte Anteil der inneren Konstruktion, welche

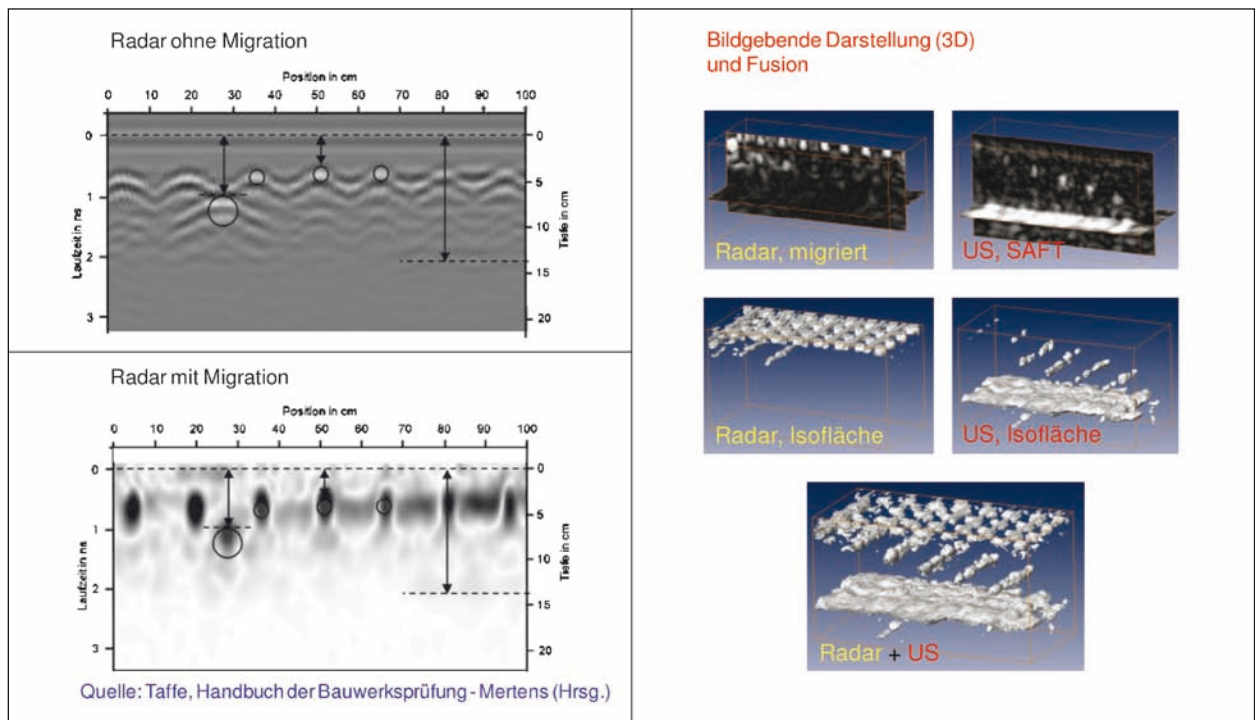


Bild 42: Darstellung von B-Bildern einer Radarmessung. Dort sind die oberflächennahen Bewehrungen und ein Hüllrohr detektierbar. Auf der rechten Seite sind 3D-Datensätze von Radar- und Ultraschallmessungen als Isoflächen dargestellt. Unten rechts Darstellung eines fusionierten Datensatzes mit oberflächennaher Bewehrung sowie tiefer liegende Einbauteile und die Rückwand [35]

durch die kongruenten Messflächen mit den beiden Messverfahren aufgenommen wurden, dargestellt. Daraus resultiert ein deutlicher Gewinn an Informationen, da hier z. B. auch der Abstand der Rückwand zur schlaffen Bewehrung vermessen werden kann (wichtig zur Bestimmung des inneren Hebelarmes oder der Druckzonenhöhe im Querschnitt).

Damit der Vorteil der Datenfusionierung deutlich wird, wurden Messungen mit dem OSSCAR an einem Bauteil mit bekannter innerer Konstruktion durchgeführt. Dieses Untersuchungsobjekt ist in Bild 43 rechts oben, bevor es mit Beton verfüllt wurde, dargestellt. In diesem Bauteil wurden Bewehrungsmatten über die Hälfte der Oberfläche verlaufend eingelegt und quer zur oberen Bewehrungsmatte darunter ein Hüllrohr. Im hinteren Bereich wurde zusätzlich noch eine Minderdicke mithilfe einer Styroporplatte eingebaut. Insgesamt wurden drei Datensätze mit Ultraschall und Radar aufgenommen, einer mit Ultraschall und zwei mit Radar, da hier beide Polarisationsrichtungen betrachtet werden sollten. Außerdem handelt es sich um Datensätze von kongruenten Messflächen. Diese Datensätze wurden, wie in Kapitel 5 beschrieben, aufbereitet. Die mit SAFT bearbeiteten Ultraschalldaten sind in Bild 43 dargestellt. Deutlich ist hierbei das Hüllrohr im C- und B-Bild(y) zu erkennen. In den B-Bildern ist des Wei-

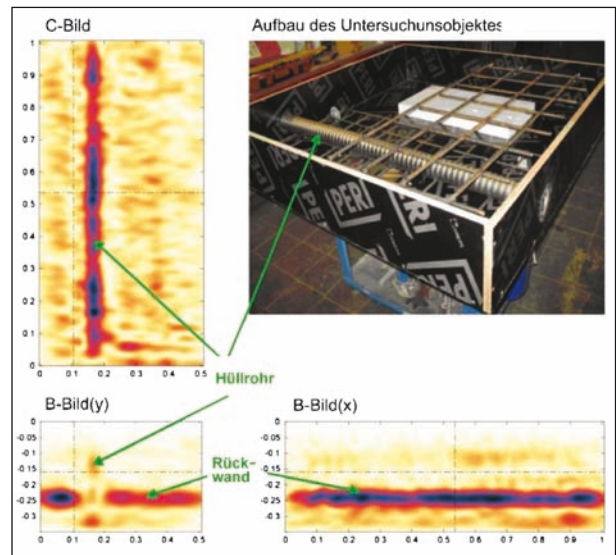


Bild 43: SAFT-rekonstruierte Ultraschallergebnisse (B- und C-Bilder) von Messungen mit dem OSSCAR und dem A1220 an einem Bauelement mit integrierter schlaffer Bewehrung und tiefer liegendem Hüllrohr

teren die Rückwand des Bauteiles deutlich dargestellt. Die Lücke in der Darstellung der Rückwand unterhalb des Hüllrohres im B-Bild(y) kommt dadurch zustande, da das Hüllrohr luftgefüllt ist und damit für akustische Wellen an der Grenze zur Luft eine Totalreflexion stattfindet. Die oberflächennahe Bewehrungsmatte ist nicht erkennbar.

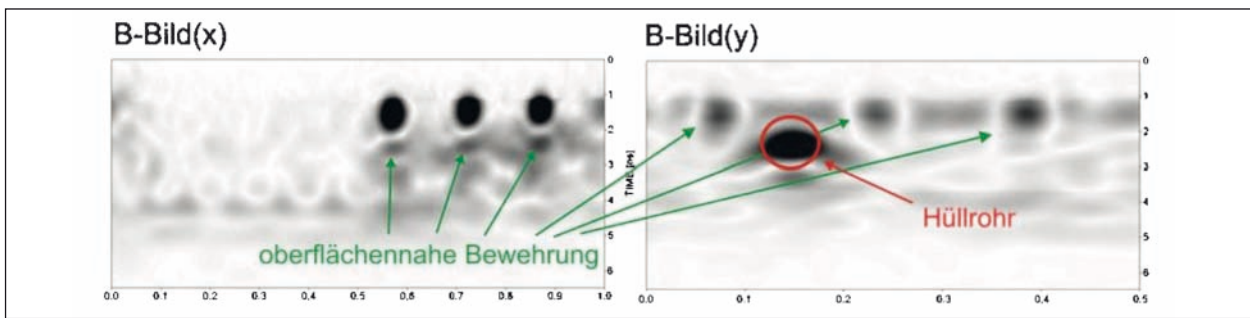


Bild 44: Mit Migration rekonstruierte Radardaten einer Messung mit 1.6-GHz-Frequenz. Links ist ein Schnitt mit erkennbarer oberflächennaher Bewehrung parallel zum Hüllrohr dargestellt. Rechts sind die oberflächennahe Bewehrung und das Hüllrohr erkennbar

In Bild 44 sind die Ergebnisse der Radarmessungen mit der 1.6-GHz-Antenne als B-Bilder dargestellt. Hier ist die oberflächennahe Bewehrung deutlich für beide Polarisationsrichtungen erkennbar. Auch das Hüllrohr kann mit der gewählten Frequenz der Antenne gut aufgelöst werden. Jedoch ist die Rückwand des Bauteiles hier nicht mehr erkennbar. Eventuell ist die rückseitige Bewehrung im B-Bild(x) auf der linken Seite in einer Tiefe von etwa 4 ns noch zu erkennen. Doch ist die Anzeige nicht deutlich genug, um eine klare Aussage zu treffen.

In Bild 45 ist das Ergebnis der Fusion der drei Datensätze als Isoflächen dargestellt. Deutlich sind hier alle Einbauteile wie die oberflächennahe Bewehrungsmatte und das darunter liegende Hüllrohr sowie die Rückseite des Bauteils erkennbar. Durch die Kombination der Datensätze ist hier eine bessere Aussage möglich, wie die Einbauteile räumlich zueinander liegen, und diese können damit auch besser mit vorhandenen Bestandsunterlagen verglichen werden und Abweichungen in der Lage einzelner Elemente sind klarer erkennbar.

Das Verfahren der Datenfusion wurde weiterhin mit einem Datensatz der Messungen an der Grumbachtalbrücke durchgeführt. Dafür wurden die Ergebnisse von dem MF1 genommen, welche durch Messungen kongruenter Flächen von der Unterseite der Brücke gewonnen worden sind (Kapitel 5.1). Die durch SAFT rekonstruierten Ultraschalldaten und durch Migration rekonstruierten Radardaten sind in Bild 46 dargestellt. In der oberen Bilderzeile sind die Radardaten für beide Polarisationsrichtungen und in der unteren auf der linken Seite die Ultraschalldaten visualisiert in einem C-Bild. Darüber wurde die Isoflächendarstellung des fusionierten Datensatzes gelegt, um einen direkteren Vergleich zu erhalten. Deutlich ist vor allem bei den Radardaten erkennbar, dass durch die Fusion die

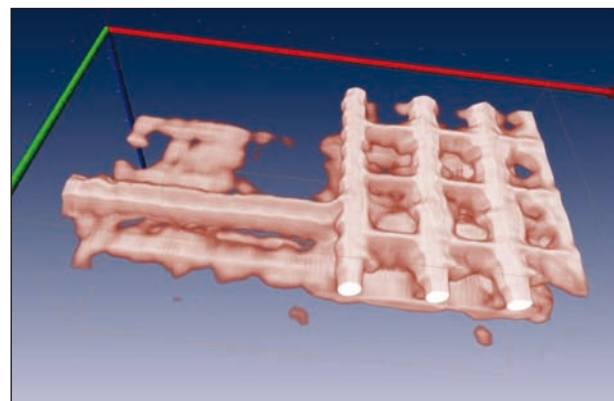


Bild 45: Fusionierter Datensatz der Messungen mit Ultraschall und Radar einer kongruenten Messfläche. Die Darstellung der fusionierten Daten erfolgt als Isoflächen

Abstände der quer zueinander laufenden schlaffen oberflächennahen Bewehrung und die Maschenweite aufgezeigt werden können.

Wie schon in Kapitel 5.1 festgestellt wurde, nimmt die Bauteildicke zu und die Flächen der Ober- und Unterseite sind nicht parallel zueinander. Durch die Fusion der Datensätze von Radar und Ultraschall ist es nun möglich, den Neigungswinkel in etwa zu bestimmen, so wie diese Flächen zueinander stehen. Genauso sind auch die Neigung des Spanngliedes sowie dessen räumlicher Abstand zu den Flächen der Ober- und Unterseite bestimmbar.

Auch hier ist erkennbar, dass durch die Datenfusion ein Zuwachs an Informationen gewonnen werden kann. So ist die räumliche Lage von Bewehrungsstäben und Spanngliedern zueinander und zu den Flächen der Ober- und Unterseite besser bestimmbar. Dies ist nur dadurch möglich, da Konstruktionseinbauten, die nah zur Mesoberfläche (Radar) und die tiefer liegen (Ultraschall), durch die Datenfusion und die Darstellung der Ergebnisse als Isofläche direkt miteinander verglichen werden können (Bild 46, rechts unten).

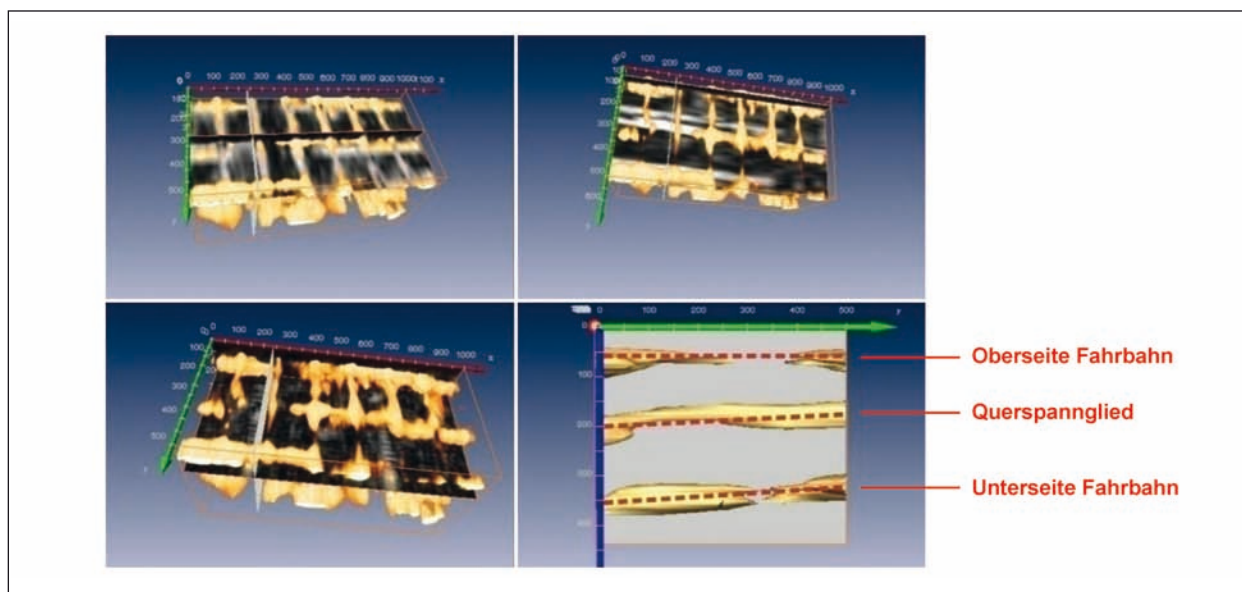


Bild 46: Isoflächendarstellung der fusionierten Daten (Ultraschall und beide Polarisierungen Radar) des MF1 der Grumbachtalbrücke. Oben: C-Bilder der Radarmessung mit darüber gelegter Isoflächendarstellung. Unten links: C-Bild der Ultraschallmessung mit darüber gelegter Isoflächendarstellung. Rechts unten: B-Bild(y) der fusionierten Daten

Schlussfolgerungen für AP6 – Kombinierte Datenauswertung und bildgebende Darstellung

Die erreichten Ergebnisse sind in Kapitel 2.7 beschrieben.

Es konnte anhand der Fusion dreier Datensätze (1 Ultraschalldatensatz, 2 Radardatensätze) an kongruenten Messflächen, welche an einem Bauwerksteil mit bekannten Konstruktionselementen gewonnen wurden, gezeigt werden, dass ein Mehrwert erreichbar ist. Für bestimmte Fragestellungen ist dadurch die räumliche Lage oberflächennaher Einbauten zu den Ober- und Unterseiten der Bauteile bestimmbar. Der direkte Vergleich von nur mit Ultraschall detektierbaren Bereichen (> 5 ... 8 cm Tiefenlage) zu denen, welche nur mit Radar detektierbar sind (< max. 35 cm), war so bisher kaum möglich.

6 Schlussfolgerungen aus den Messergebnissen

Als Ziel in dem Forschungsvorhaben stand die Integration von ZfPBau-Verfahren in den Untersuchungsprozess nach DIN 1076 bzw. der nachfolgenden OSA im Vordergrund. Dafür sollte die Leistungsfähigkeit des Bauwerkscanners OSSCAR für Prüfaufgaben im Rahmen der OSA verbessert und die Einsetzbarkeit praxisorientierter gestaltet werden.

Um dieses zu erreichen und einen größtmöglichen Nutzen aus der Verwendung des OSSCAR-Scanners zu erhalten, wurde sich auf die automatisierte Datenaufnahme und die kombinierte Datenauswertung durch den Vergleich von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom konzentriert.

Damit die automatisierte Datenaufnahme verbessert und praxistauglicher ablaufen konnte, wurden Geräteparameter wie Messpunktabstand für die einzelnen Verfahren, die Messzeit an einem Punkt und die Verfahrensgeschwindigkeit der Scannerachsen möglichst ideal den unterschiedlichen Bauteilbedingungen angepasst. Außerdem wurde eine Strategie erarbeitet, um die Rüstzeit und Messzeit pro Messfeld zu verkürzen.

Weiterhin wurde gezeigt, dass durch den Vergleich der Messergebnisse der Verfahren Radar, Ultraschall und Wirbelstrom ein Mehrwert an Information der inneren Konstruktion erreicht werden konnte.

So wurde zuerst der Scanner den Anforderungen einer Über-Kopf-Messung an horizontalen Flächen baulich angepasst, wie dies bei Brückenplattenuntersuchungen von unten der Fall ist. Dafür wurden unter anderem ideale höhenvariable Einstellungen der Saugfüße bestimmt, um eine möglichst große Toleranz gegenüber Unebenheiten beim Messen zu haben. Des Weiteren wurde der Anpressdruck für den Ultraschallkopf angepasst um den Anforderungen der Über-Kopf-Messungen zu entsprechen. Des Weiteren wurde ein Konzept erstellt, mit dem

der Scanner bei Messungen aus dem Unterflurfahrzeug mit möglichst geringem Aufwand umgesetzt werden kann (Kapitel 2.2).

Es erfolgten weiterhin, resultierend aus den Erfahrungen von Messungen an der Grumbachtalbrücke, an dem Scanner Umbauten der Endschalter und Modifikationen der Scannerachsen gegen Verdrillung (Kapitel 2.5).

Außerdem wurden die benötigten Messzeiten für eine Messfläche mit allen Verfahren reduziert. So wurde die Absetzzeit beim Ultraschallverfahren verkürzt, ohne Qualitätseinbußen der Ergebnisse zu erhalten. Die Verfahrszeiten für das Radarverfahren wurden so weit erhöht, dass es zu keiner Verschlechterung der Messergebnisse kommt (Kapitel 2.4).

Um die bestmöglichen Einstellungen für die Messgeräte der Verfahren zu erhalten und des Weiteren die Positionen zu bestimmen, an denen sinnvolle Scannermessungen nötig sind, wurden im Vorfeld Handmessungen durchgeführt.

Die Möglichkeit der ZfPBau in der OSA konnte gut an geeigneten Fragestellungen und Bauwerken gezeigt werden. So konnten Messungen an der Grumbachtalbrücke im Zuge der Autobahn A 6 durchgeführt werden. Hierbei wurden insgesamt sechs Messfelder aufgenommen mit Radar (beide Polarisationsrichtungen) und Ultraschall. Gleichzeitig wurden auch Messungen von der Oberseite der Brücke per Hand durchgeführt. Außerdem wurden Messungen an einem Brückenelement (IZfP-Brückenplattenelement) von der Ober- und Unterseite durchgeführt. Um zusätzlich zu untersuchen, ob durch eine Fusion der Messdaten von kongruenten Messflächen ein weiterer Gewinn an Erkenntnissen möglich ist, wurden außerdem Messungen an einem definiert hergestellten Betonbauteil durchgeführt (Kapitel 2.3).

So konnte bei den Messungen an der Grumbachtalbrücke von unten gezeigt werden, dass durch die Kombination der beiden Verfahren Radar und Ultraschall eine gute Darstellung der inneren Konstruktion möglich war. So können die oberflächennahe Bewehrung und eventuell nicht allzu tief liegende Spannglieder bei nicht zu dicht verlegter oberflächennaher Bewehrung gut aufgezeigt werden. Für Detektionen aus größeren Tiefen ist das Radarverfahren weniger gut geeignet. Hier ist das Ultraschallverfahren deutlich besser. So konnten bei den Messungen die Rückwand (Oberseite) der Brückenplatte und der Verlauf der Querspannglie-

der gut detektiert werden (Kapitel 5.1). Nachteilig ist hierbei, dass bei Ultraschallmessungen der Zeitaufwand deutlich größer ist.

Das IZfP-Brückenplattenelement ist in diesem Forschungsvorhaben generell interessant, da Brücken mit Verdrängungskörpern oftmals schadensanfällig sind. Bei den durchgeführten Messungen von der Unterseite konnte gezeigt werden, dass für die Darstellung der oberflächennahen Bewehrung das Radarverfahren sehr gut geeignet ist. Ist diese sehr dicht verlegt worden, so ist eine verbesserte Auflösung der einzelnen Bewehrungsstäbe durch eine höhere Antennenfrequenz gut möglich. Jedoch leidet dann die Eindringtiefe. Des Weiteren konnte gezeigt werden, dass bei niedrigeren Frequenzen (1.2 und 1.6 GHz) der Antennen durch das Erreichen der Grenze des lateralen Auflösungsvermögens und der damit verbundenen starken Reflexion eines Großteils der ausgesendeten Wellen keine Informationen aus größerer Tiefe erhalten werden kann. Somit eignet sich bei dicht bewehrten Elementen das Radarverfahren vor allem zur genauen Detektion der oberflächennahen Bewehrung mit einer höheren Radarfrequenz. Das Ultraschallverfahren konnte aber die tiefer liegenden Verdrängungskörper gut darstellen, sodass mit der kombinierten Auswertung der beiden Messverfahren ein gutes Abbild der inneren Konstruktion erhalten werden kann. Die Grenze von Ultraschall war aber bei der Messung von der Unterseite die Detektion der Rückwand, die hier nicht mehr dargestellt werden konnte. Eventuell wäre hier auch die Wahl einer anderen Frequenz zum Ergebnis führend (Kapitel 5.3).

Wenn von unten bei dicht bewehrten Oberflächen bei Brückenelementen kein Ergebnis erreicht werden kann, so müssen Messungen von der Oberseite durchgeführt werden. Bei den Messungen an dem IZfP-Brückenplattenelement konnte hierbei gezeigt werden, dass bei normal verlegter oberflächennaher Bewehrung diese und auch der tiefer liegende Verdrängungskörper gut abgebildet werden. Jedoch ist mit der 2.3-GHz-Antenne die Eindringtiefe zu gering. Mit Ultraschall ist von oben auch die Detektion der Rückseite möglich, sodass auch eine Information über die Dicke der Platte erhalten wird. Auch hier ist durch die Kombination beider Verfahren erst eine gute Darstellung der inneren Konstruktion möglich (Kapitel 5.3). Bei Messungen von der Oberseite sollten die Messungen wenn möglich während Abdichtungsarbeiten durchgeführt werden (DIN 1076). Hier ist aber das enge Zeitfenster zu beachten und bestmöglich zu nutzen.

Aus den Untersuchungen an der Grumbachtalbrücke erfolgt eine Strategie, an welchen Stellen Bauwerkscanner bestmöglich eingesetzt werden können und wie die Rüstzeit hierzu (Befestigungspunkte des Scanners lokalisieren, Anbringen und Versetzen des Scanners) verkürzt werden kann (Kapitel 5.1).

Hierbei ist eine wesentliche Erkenntnis, dass zuerst großflächige Untersuchungen mit Radar als Grid-Projekt durchgeführt werden. Des Weiteren sollten im Vorfeld Bereiche per Hand mit Ultraschall gemessen werden. Der Einsatz von dem Bauwerkscanner OSSCAR erfolgt dann gezielt für definierte Bereiche, die eine deutliche Klärung der inneren Konstruktion benötigen.

Die bei den Messungen an der Grumbachtalbrücke festgelegten Messzeiten (Kapitel 5.1) haben sich auch bei den Messungen an dem IZfP-Brückenplattenelement als gut erwiesen. So wird für die Messungen mit Ultraschall für ein Messfeld von $100 \times 50 \text{ cm}^2$ und einem Messpunktabstand von 2,5 cm eine Zeit von etwa 40 Minuten benötigt. Für Radar wird eine Messzeit von etwa 10 Minuten pro Polarisationsrichtung bei einem Messspurabstand von 2,5 cm benötigt.

Jedoch konnte eine leichte Verbesserung der Ergebnisse bei einer Verkleinerung des Messpunktabstandes für die Messungen von der Unterseite (stark bewehrt) erreicht werden. Hier muss dann für den Einzelfall entschieden werden, ob dieser Mehrgewinn mit der deutlichen Zunahme der Messdauer für ein Messfeld ausgeglichen wird.

Durch die Bearbeitung der Messdaten von Radar und Ultraschall durch verschiedene Auswertalgorithmen konnten die Ergebnisse deutlich optimiert werden. So wurden die Radardaten mit einem Migrationsalgorithmus und die Ultraschalldaten mit einem SAFT-Algorithmus bearbeitet.

Durch Fusion der Ergebnisse der Verfahren Radar und Ultraschall, die auf der Basis von kongruenten Messflächen an einem Bauteil mit bekannter innerer Struktur gewonnen wurden, konnte gezeigt werden, dass eine bessere Darstellung des Aufbaus eines Bauteiles realisierbar ist. Hier können deutlich auch die Lageverhältnisse von oberflächennahen Elementen zu tiefer liegenden und zu den Bauteiloberflächen dargestellt werden (s. Kapitel 5.4). Auch können die inneren Strukturen nun gut mit den vorhandenen Bestandsunterlagen abgeglichen und Abweichung davon festgestellt werden.

7 Verfahrensanweisung

Verfahrensanweisung OSSCAR-Scannerverwendung

Zeiten für die Messfläche von $0,5 \times 1,0 \text{ m}^2$:

- Radarmessung, Spurabstand 5 mm, Polarisationsrichtung 1:10 Minuten,
- Umbau der Antenne: 3 Minuten,
- Radarmessung, Spurabstand 5 mm, Polarisationsrichtung 2:10 Minuten,
- Umbau von Radar und Ultraschall: 7 Minuten,
- Ultraschallecho, Messraster 2,5 cm:40 Minuten,
- Umbau von Ultraschall auf Radar:5 Minuten.

Grundlage für eine detaillierte Verfahrensanweisung sind die in Kapitel 5.1 zusammengefassten Arbeitsschritte des gesamten Messzyklus:

1. Rahmen zusammenbauen und mit Montagerahmen neben Messfläche lagern,
2. Steuerungs- und Pneumatikkabel verbinden,
3. Druckluftkabel verlegen und Luftzufuhr anschließen,
4. Steuerungslaptop anschließen und mit USB-2-CAN verbinden,
5. Scanner ansaugen, ausrichten, Montagerahmen entfernen,
6. Pneumatikkopf montieren,
7. Ultraschallgerät A1220 und Prüfkopf montieren, Kabel verbinden und Messung im Steuerungsprogramm starten, anschließend abbauen,
8. Radargerät Mala Pro-Ex und Radarantenne anschließen, Kabel verbinden (Kabelführung unbedingt wie in Bild 29 (b) und Messung im Steuerungsprogramm starten, Polarisationsrichtung ändern, Messung erneut starten, anschließend abbauen,
9. Betondeckungsmessgerät (Wirbelstrom) Proceq Profoscope anschließen, Kabel verbinden und Messung im Steuerungsprogramm starten, Polarisationsrichtung ändern, Messung erneut starten, anschließend abbauen,
10. Ecken des Messfeldes (0/0; 0/500; 1.000/500; 1.000/0; in mm) mit Scanner anfahren und auf Bauteil Lage des Messfeldes markieren.

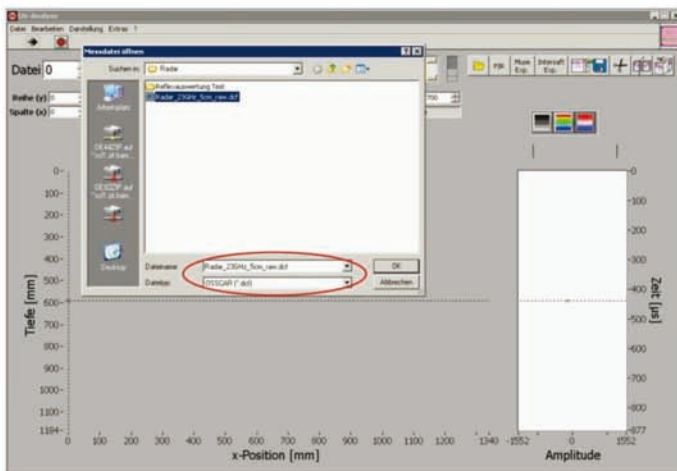
Damit sind für die gesamte Messfläche von 0,5 x 1,0 m² für Ultraschall (Messraster 2,5 cm) und Radar (zwei Polarisationsrichtungen, Spurbestand 5 cm) etwa 75 Minuten notwendig. Einschließlich Verfahren des Brückenuntersichtgeräts und erneuten Ansetzens des Scanners ergeben sich weitere 15 Minuten, sodass für eine Messfläche etwa

1,5 Stunden erforderlich sind. Soll zusätzlich noch Wirbelstrom zum Einsatz kommen, sind für eine Messfläche etwa 2 Stunden erforderlich.

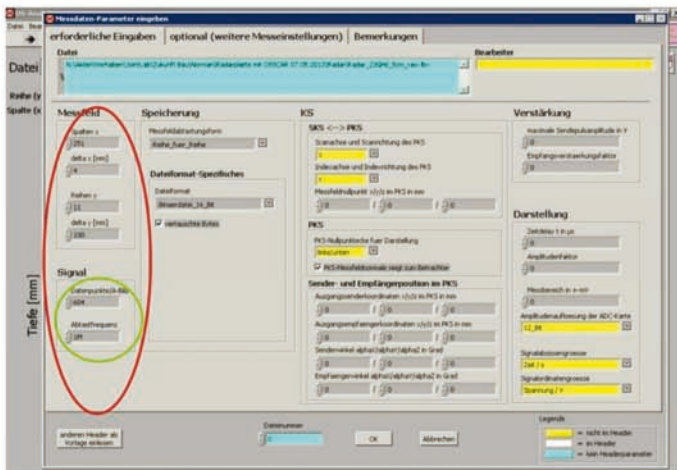
Die Schritte 1 bis 4 sind einmalig bei der Montage des Scannerrahmens vorzunehmen. Die Schritte 5 bis 10 sind für jedes Messfeld erforderlich.

Verfahrensanweisung Datenauswertung Radar

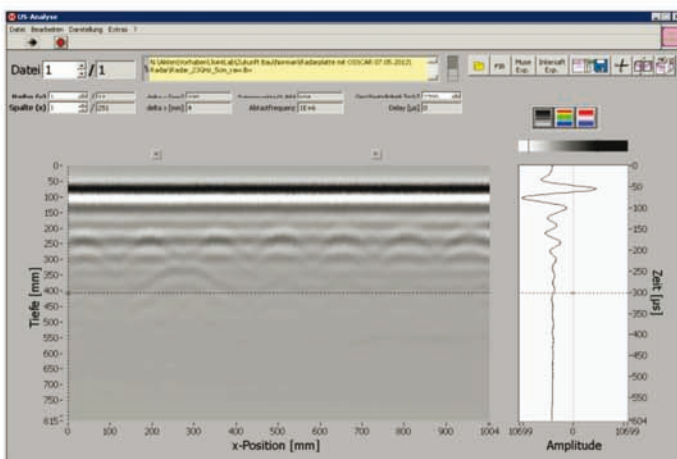
Programm US Analyse starten zum Einlesen der OSSCAR-Messdaten



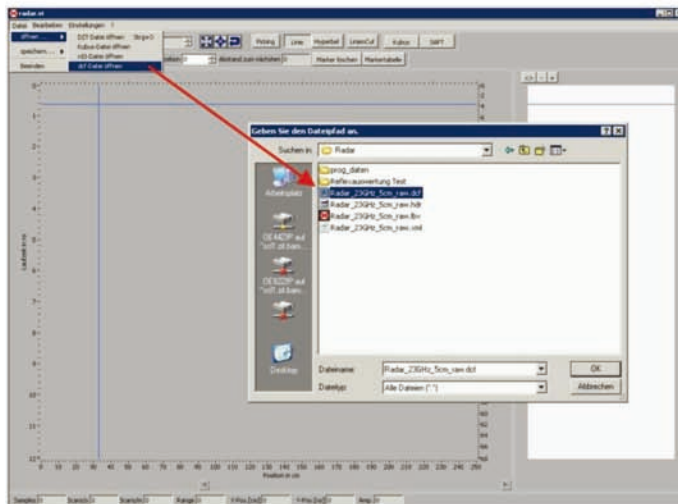
Einlesen der Radardaten in US Analyse → für die Normierung der Zeitachse **sehr wichtig**



Angaben der Parameter delta x und delta y an die Messeinstellungen anpassen, damit die automatisch neu erstellte *.lbv Datei die korrekten Parameter beinhaltet

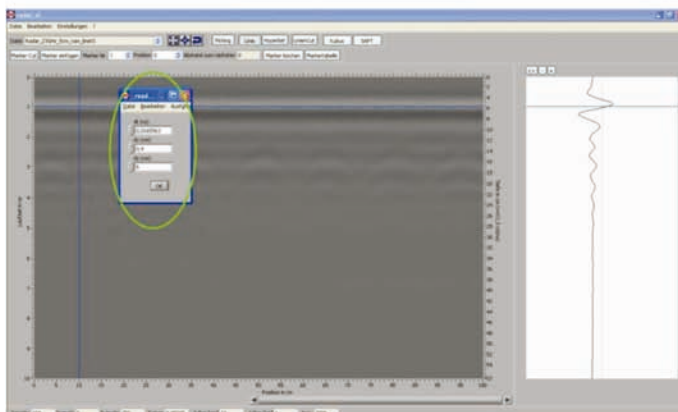


Nach Einlesen der OSSCAR *.dcf Files Möglichkeit der Überprüfung der richtigen Messspurlänge. Schließen von US Analyse.

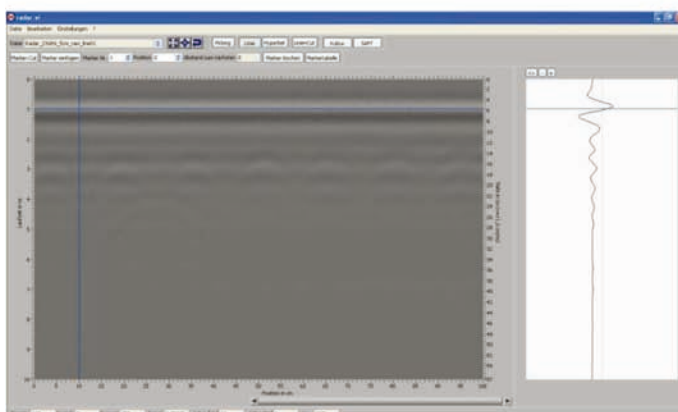


Radar DCF:

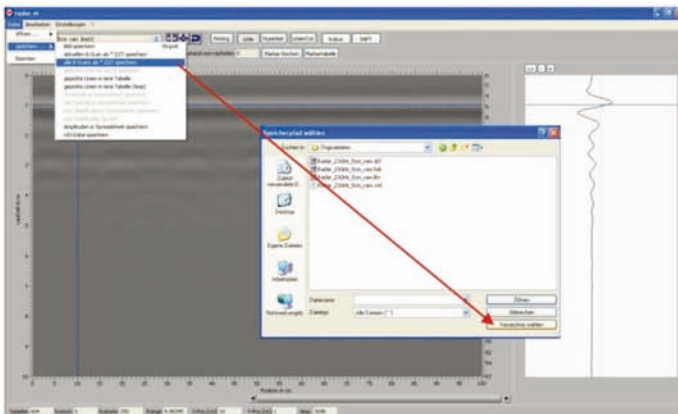
Programm RadarNeu in LabView-Ordner starten:
OSSCAR *_raw.dcf Files öffnen.



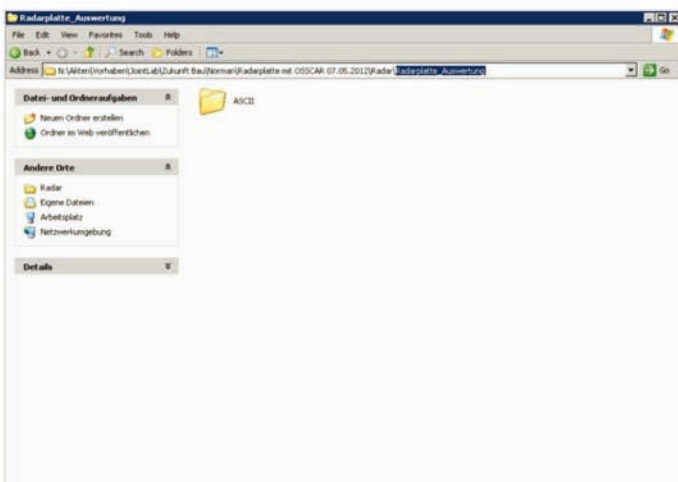
Parameter eingeben (dt = TimeWindow/
Samples); dx = Traceabstand; dy = Spurbestand),
Länge von TimeWindow sowie die Samples aus
*.xml (header) oder über Messprotokol.



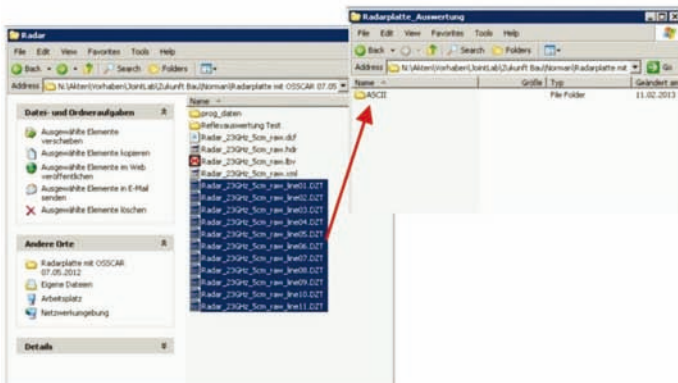
Eingelesene Dateien



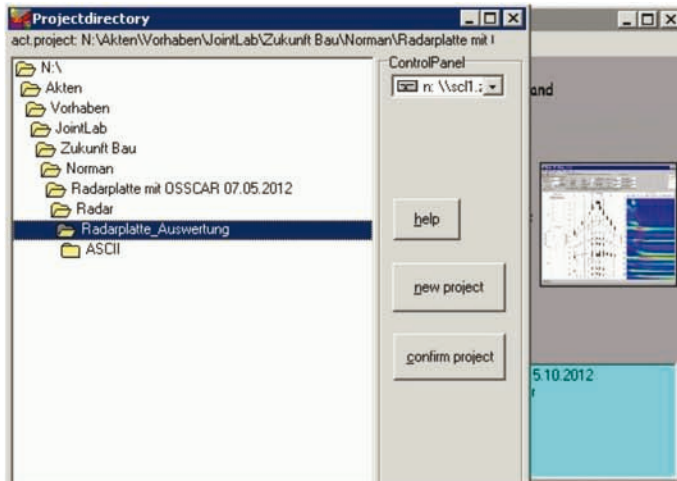
Die Radargramme werden nun abgespeichert. Dafür wird in radar.vi alle „B-Scans als *.dzt speichern“ gewählt und dann beim Speicherpfad in das entsprechende Verzeichnis gewechselt und anschließend auf „Verzeichnis wählen“ geklickt (roter Pfeil).



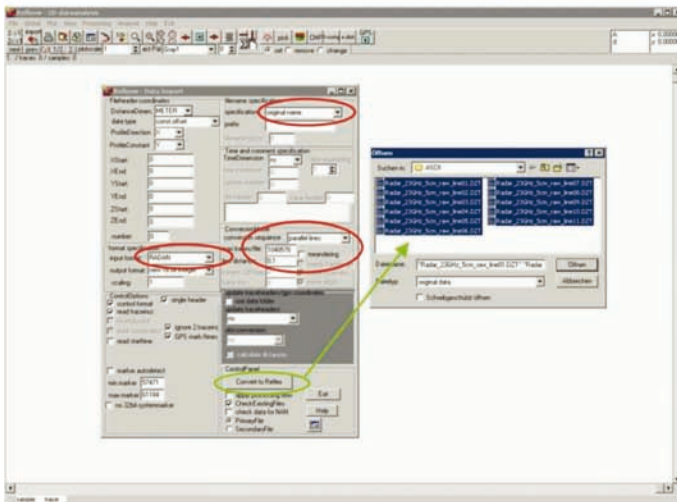
Anlegen eines Projektordners mit integriertem Unterordner, der die Bezeichnung „ASCII“ erhält.



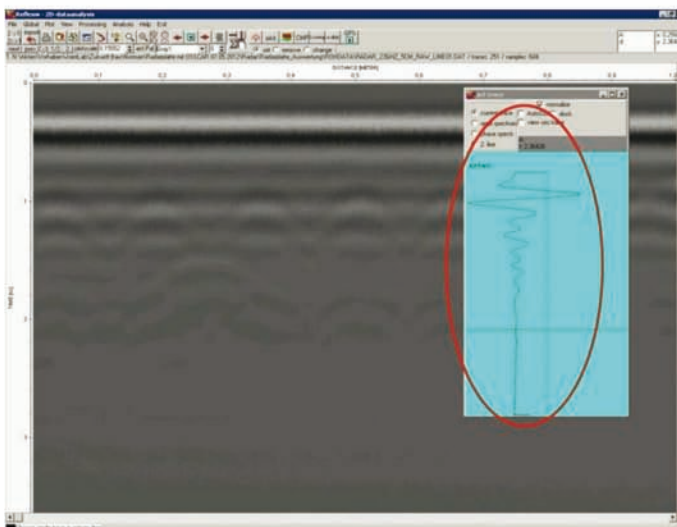
Abgespeicherte Messspuren als *.dzt files → diese in einen Projektordner in den Unterordner ASCII speichern. Alternativ wäre auch das Anlegen eines Unterordners „Originaldateien“ möglich.



ReflexW starten und Pfad zu neu angelegten Projektordner benutzen. Danach auf **confirm project** gehen und im Anschluss **2D data analysis** unter *modules* wählen.

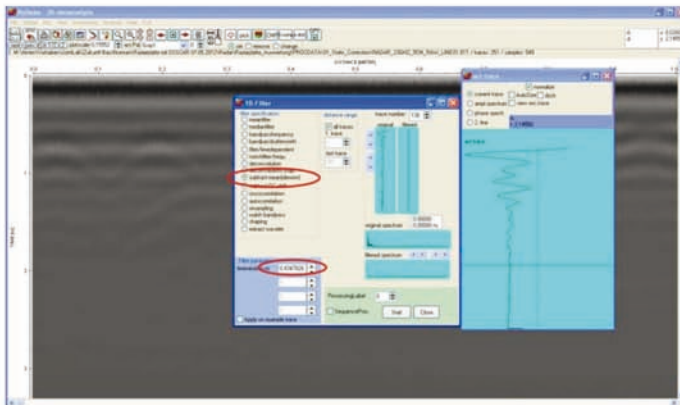


Datenimport auswählen, bei den Einstellungen Originalnamen (**original name**) wählen, des Weiteren ob die Messspuren parallel (**conversion sequence – parallel lines**) aufgenommen wurden und deren Abstand (**line distance**) und als Format **radan** (rote Kreise). Danach auf **Convert to Reflex** und alle Messspuren auswählen (grüner Pfeil).

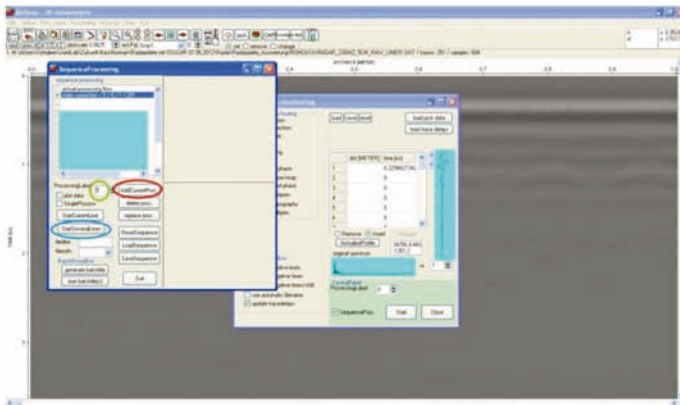


Im A-Bild (act trace) ist eine Verschiebung des Signals (roter Kreis) sowie eine Vorlaufzeit des Signals bis zum Oberflächensignal zu sehen.

Die eingelesenen Daten werden nun in mehreren Schritten bearbeitet.

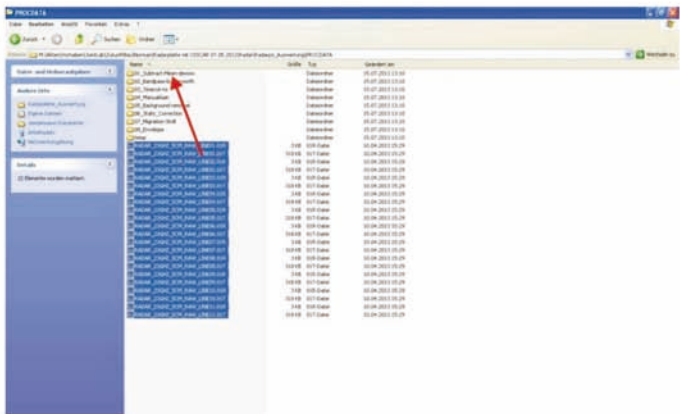


1. Subtract mean (dewow)
 unter 1D-Filter (alternativ kann auch **subtract-DC-Shift** verwendet werden); das Zeitfenster **time-window** wird auf $1/\text{Antennenfrequenz}$ eingestellt.
 (1.2 GHz = 0,83333; 1.6 GHz = 0,625;
 2.3 GHz = 0,4347826)

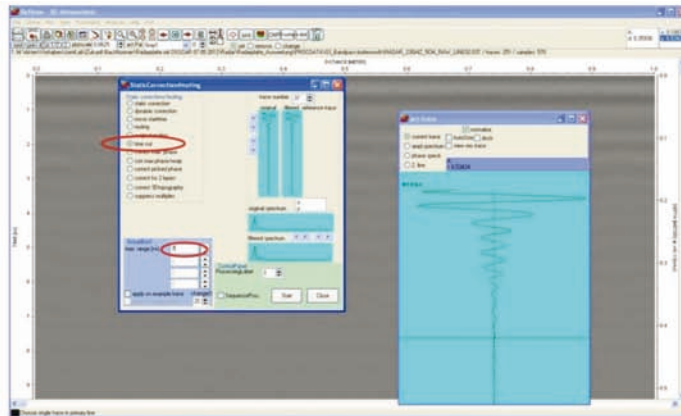


Dann Sequence Processing markieren, und ein neues Fenster geht auf.

Den Prozess durch **AddCurrentProc.** (roter Kreis) den durchzuführenden Prozessen hinzufügen. Das **ProcessingLabel** (grüner Kreis) um eins erhöhen. Danach auf **StartSeveralLines** (blauer Kreis) und alle Messspuren auswählen.

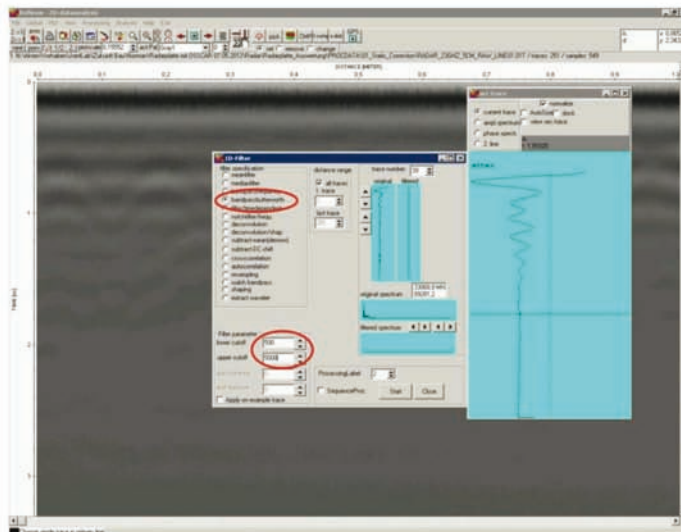


Im Projektordner und dem Unterordner **PROCDATA** werden Ordner für die einzelnen Bearbeitungsschritte angelegt und die bearbeiteten Daten (blau markiert) in diese entsprechend kopiert (roter Pfeil).

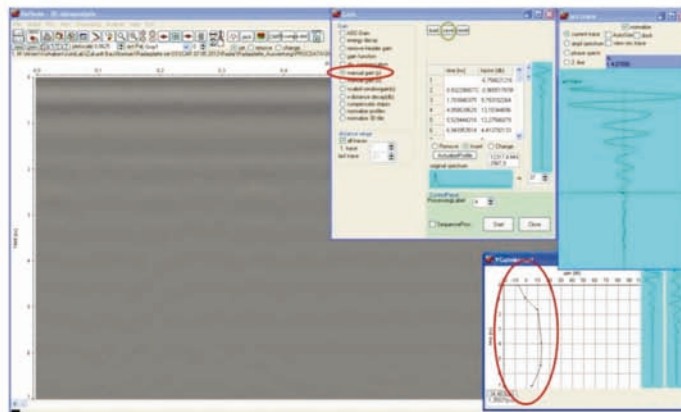


2. Bandpassbutterworth – Reduzierung des Signalausens (Frequenzfilter); **lower cutoff:** $\frac{1}{4}$ Mittenfrequenz; **upper cutoff:** 2fache der Mittenfrequenz

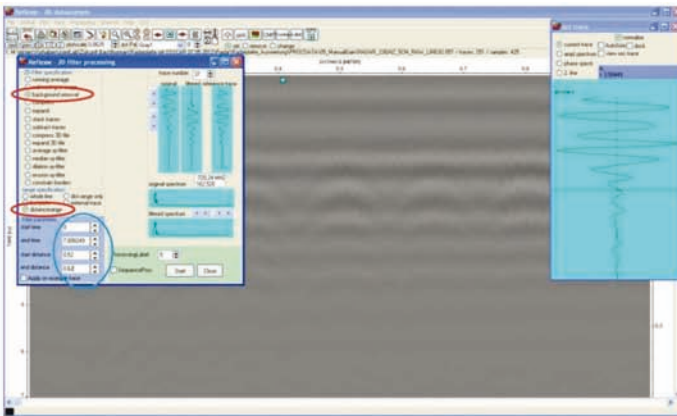
(lower cutoff: 1,2 GHz = 150-250; 1,6 GHz = ca. 350; 2,3 GHz = 500 Upper cutoff: für alle bei etwa 5.000)



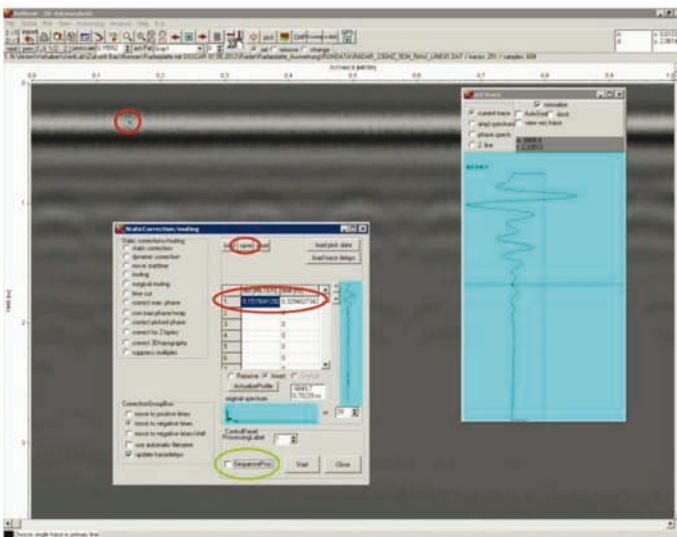
3. TimeCut – Verkürzung der Zeitachse. Dabei ist darauf zu achten, mögliche Rückwandreflexionen nicht zu entfernen. Eher etwas großzügiger wählen oder wenn unsicher, ganz darauf verzichten.



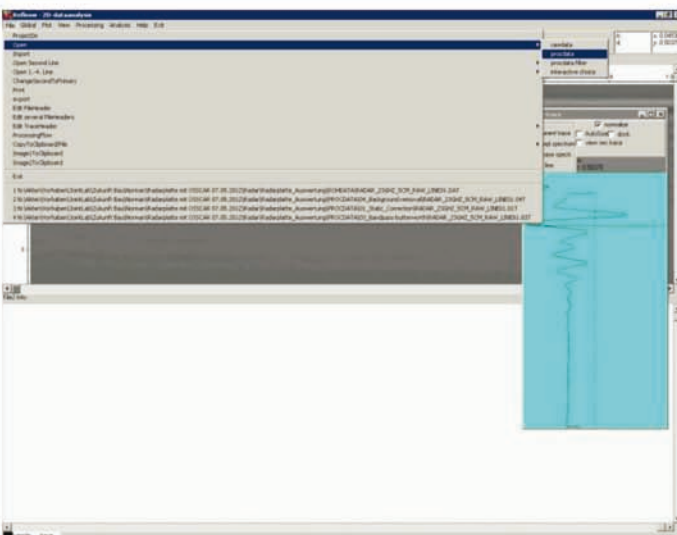
4. ManualGain – Tiefenabhängige Verstärkung der Signale. Dabei werden die Verstärkungen im Fenster „YGainManual“ (roter Kreis) definiert und müssen dann über „save“ abgespeichert werden (grüner Kreis).



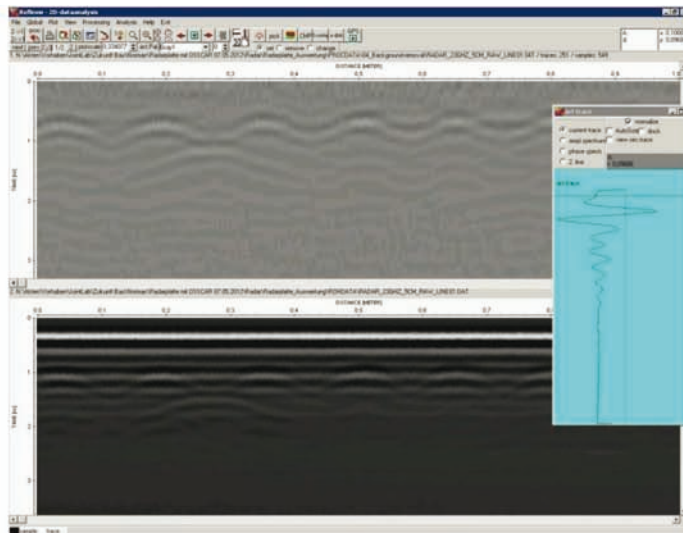
5. Background removal: Dort distancerange auswählen und einen Bereich zwischen 2 Hyperbeln nehmen (blauer Kreis). Über die gesamte Laufzeit prozessieren, wenn keine Rückwand zu erkennen ist, wenn Rückwand zu erkennen, dann in end time Laufzeit vor der Rückwandreflexion eintragen und dann wieder Seq. Proc.



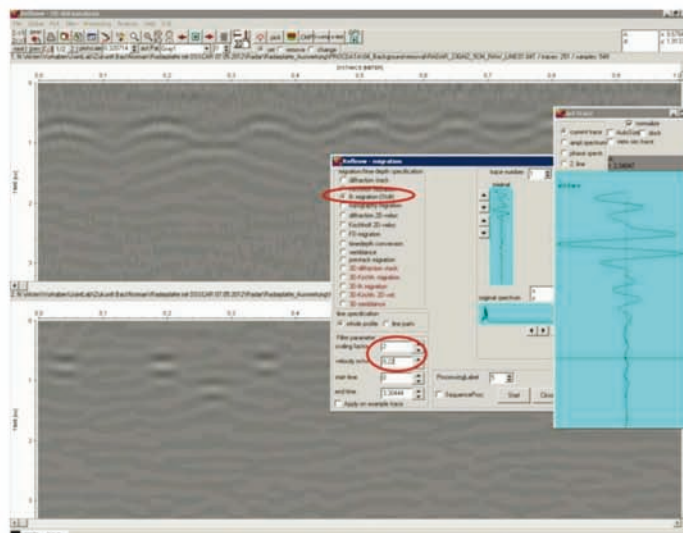
6. static correction → in Oberflächensignal klicken (roter kleiner Kreis im Radargramm) und die Laufzeit wird dann über den Save-Button abgespeichert.



Öffnen der prozessierten Messdaten.



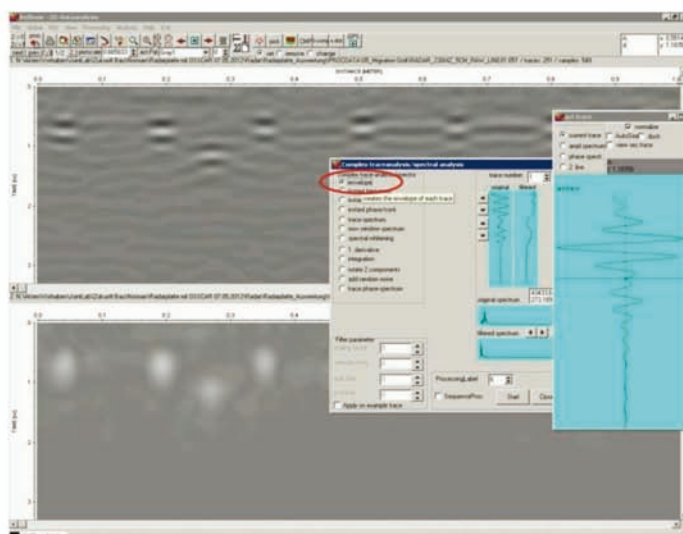
Im oberen Radargramm die prozessierten Messdaten und im unteren die Rohdaten.



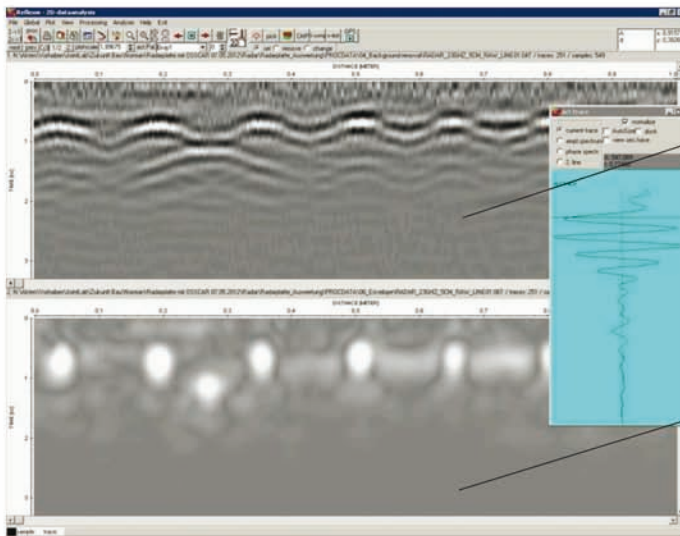
Nun wird die Migration durchgeführt:

7. fk-migration (Stolt):

(Achtung: Geschwindigkeit hier sehr hoch gewählt!!!) → probieren, liegt meist im Bereich von 0,1 bis 0,13 m/ns.



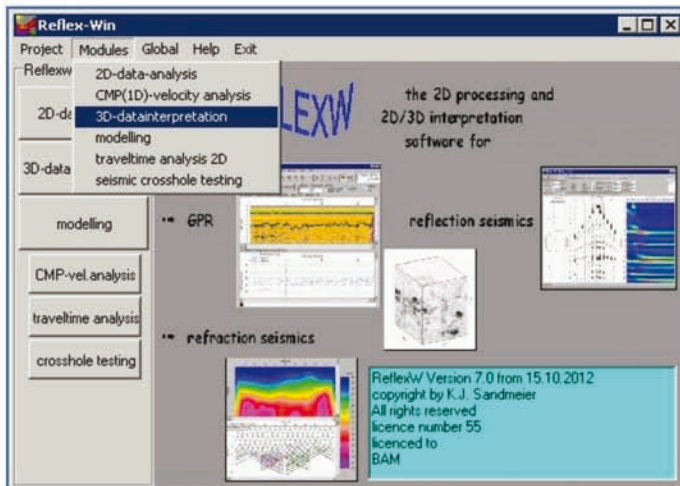
8. Envelope → (Complex Traceanalysis)



Prozessierte Daten;

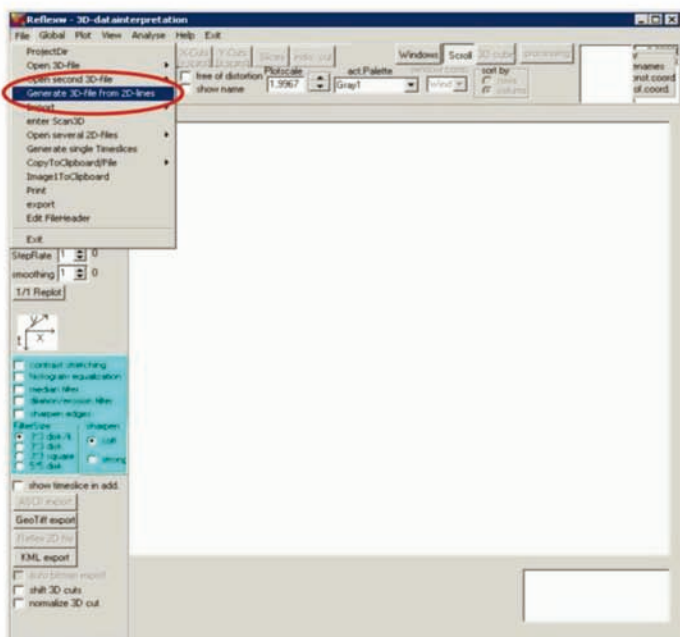
Aufbereitete Daten für die folgende 3D-Cube-Darstellung.

Nun 2D-Dataanalysis schließen. Man kommt wieder zum Hauptmenü von ReflexW.

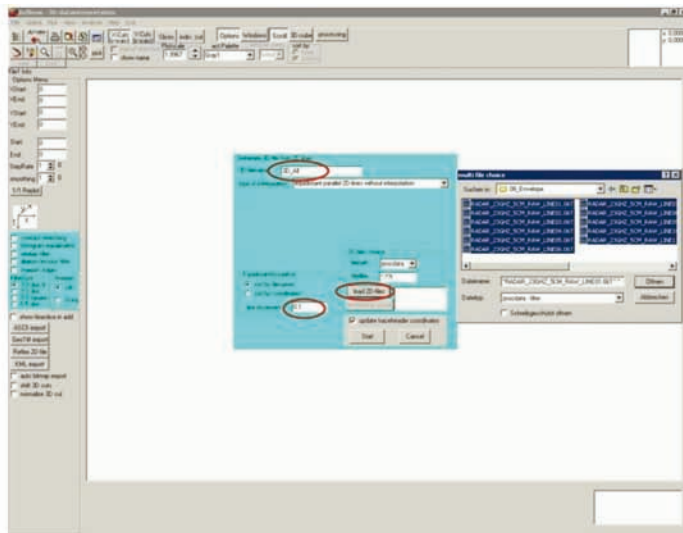


Datendarstellung als 3D-Cube

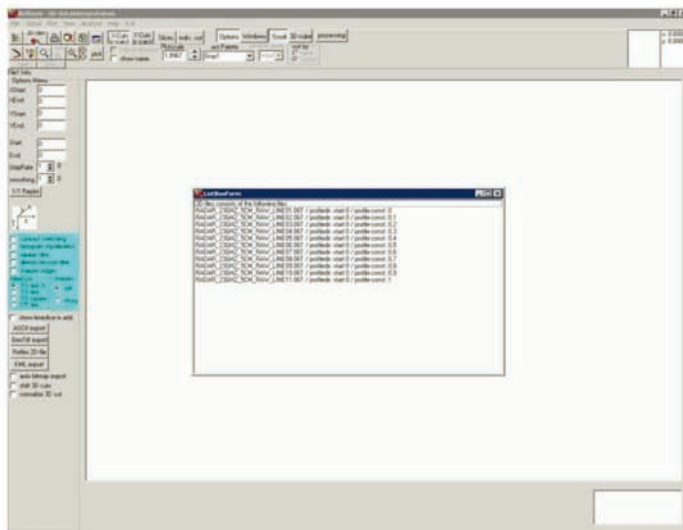
Modul für die 3D-datainterpretation öffnen.



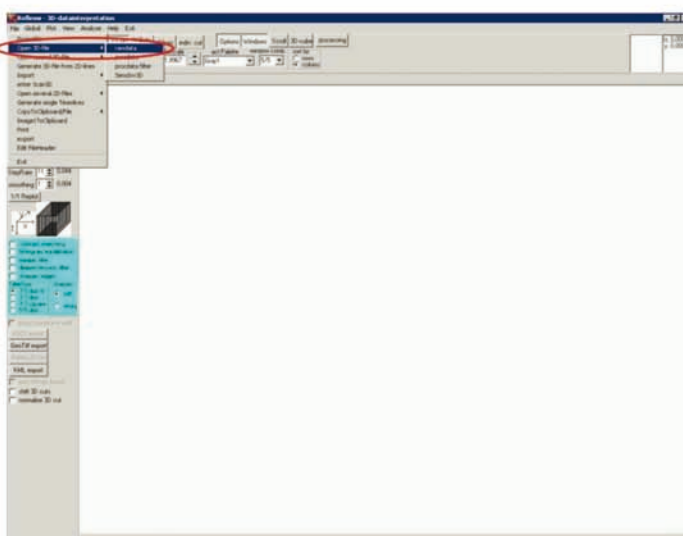
Generate 3D-file from 2D-lines auswählen, um aus 2D-Linien 3D-Objekte zu erstellen



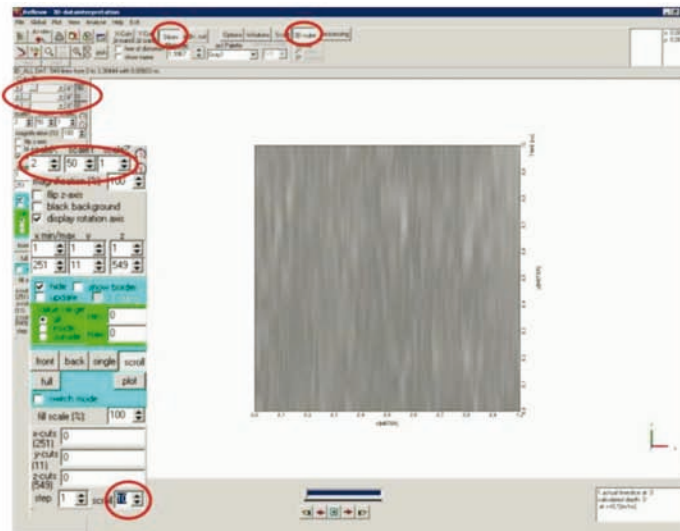
3D-Objekt benennen, Abstand der Messlinien bei **line-increment** angeben und die 2D-Files laden → Start



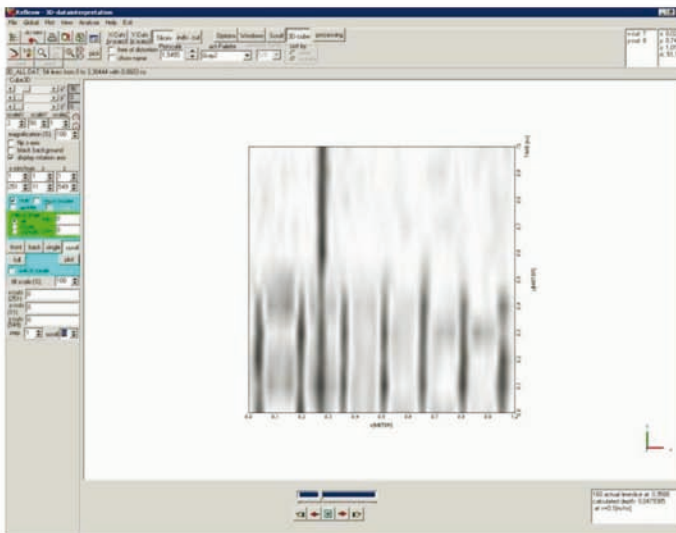
Kontrolle, ob Daten korrekt eingelesen sind



Erzeugtes 3D-Objekt öffnen (Name: 3D)



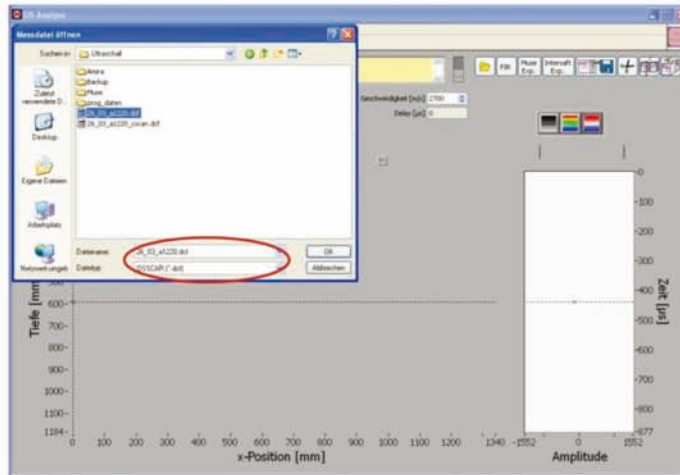
Slices und 3D-Cube auswählen, 3D-Cube skalieren und in die richtige Position drehen → mit **Scroll** werden mehrere slices zusammengeschoben.



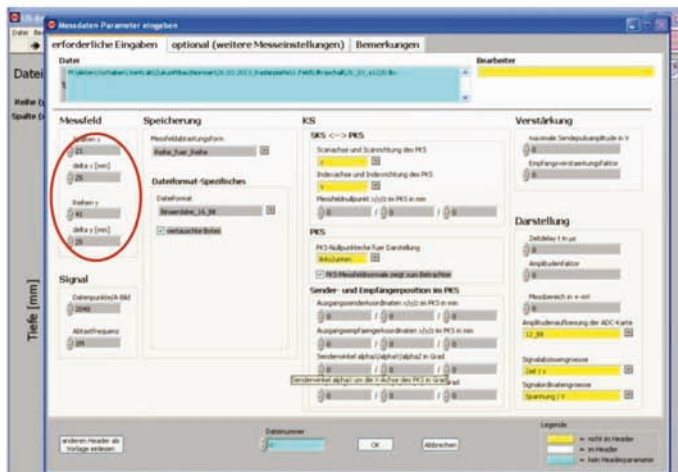
Ergebnisbild – Hüllrohr und oberflächennahe Bewehrung im unteren Teil

Verfahrensanweisung Datenauswertung Ultraschall

US Analyse



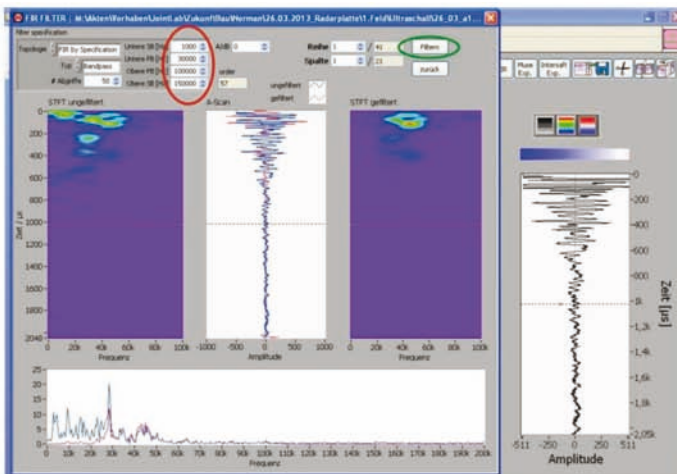
Einlesen der Ultraschalldaten in US Analyse



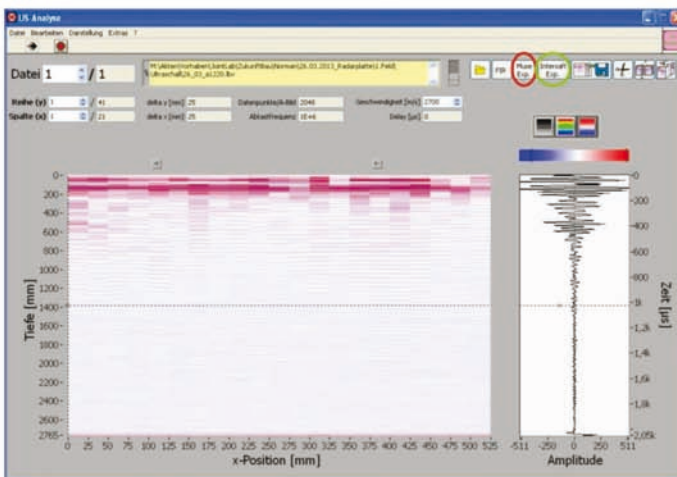
Angaben der Parameter delta x und delta y an die Messeinstellungen anpassen, damit neu erstellte *.Ibv Datei die korrekten Parameter beinhaltet



Nach Einlesen der OSSCAR *.dcf Files werden die Daten bearbeitet. Dafür wird der Button „FIR“ gedrückt (roter Kreis)



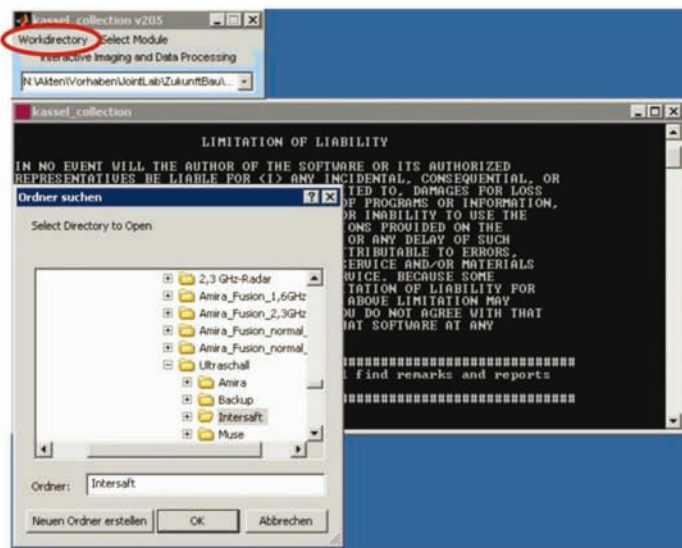
Ultraschalldaten werden üblicherweise mit Typ „Bandpass“ und den Grenzen (untere PB) 15.000 bis 30.000 Hz und (obere PB) 100.000 Hz gefiltert. (PB: Passband; SB: Sperrband) (roter Kreis). Nach Eingabe der Einstellungen auf „Filtern“ (grüner Kreis) klicken.



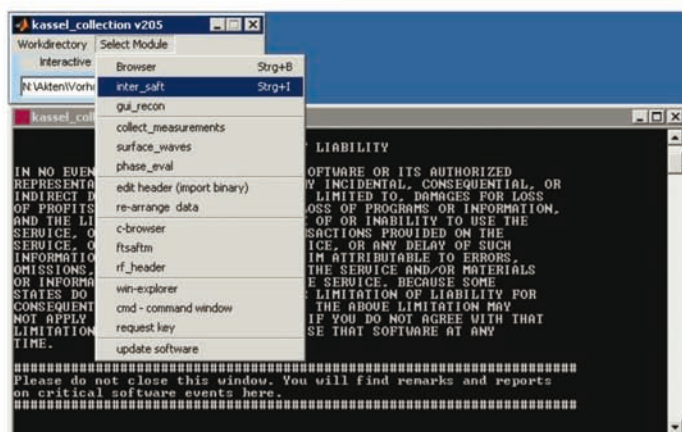
Nach der Filterung werden die Daten für die weitere Bearbeitung exportiert. Hierbei stehen 2 Varianten zur Auswahl.

So kann der Datensatz in ein Format für „Muse“ (roter Kreis) oder für „Intersaft“ (grüner Kreis) exportiert werden. Standard ist ein Export nach „Intersaft“. Falls dies nicht zur Verfügung steht, wird nach „Muse“ exportiert.

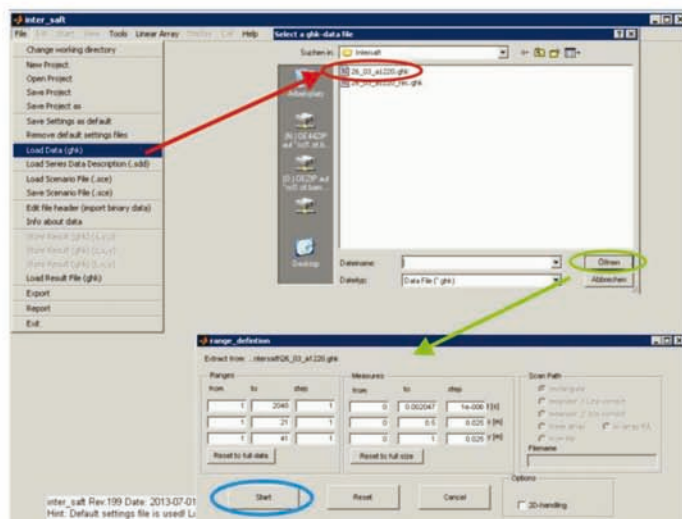
Datenbearbeitung in Intersaft



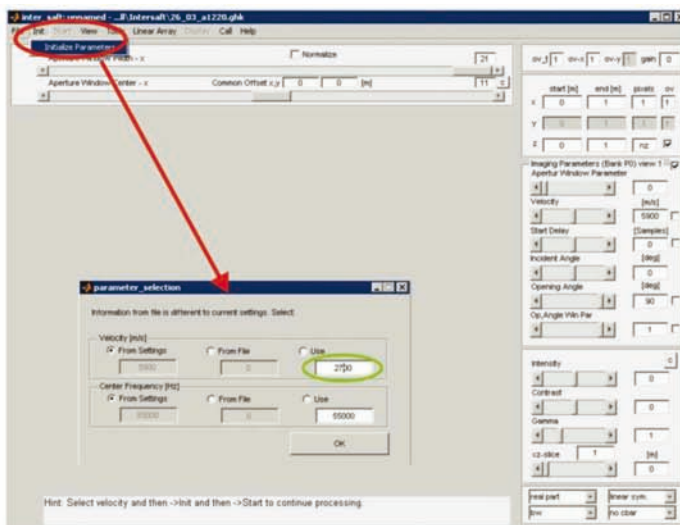
Starten von Intersaft und auswählen des Workdirectory (roter Kreis).



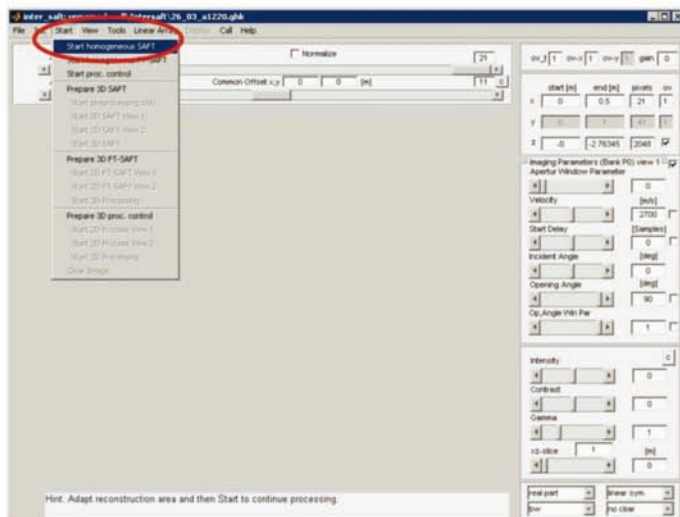
Über den Reiter „Select Module“ das Modul „inter_saft“ auswählen, um den Datensatz aufzubereiten.



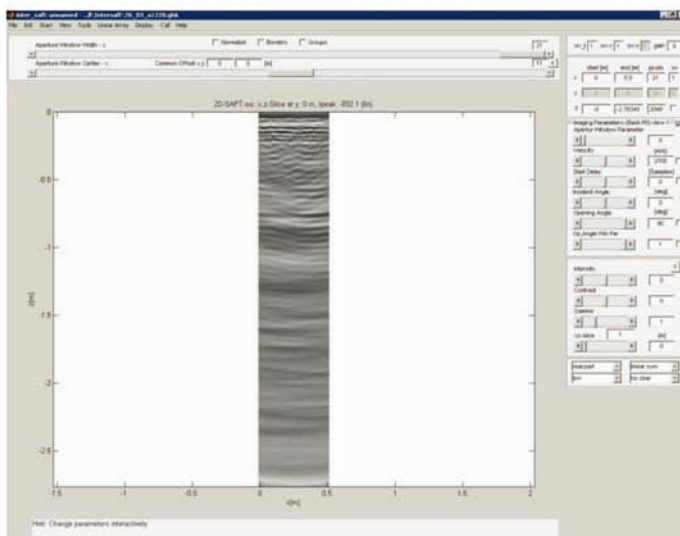
Nach dem Starten des Modules den Reiter „File“ aufklappen und im Scroll-downmenü „Load Data (ghk)“ auswählen. Im sich öffnenden Fenster (roter Pfeil) das vorher in US Analyse exportierte File (roter Kreis) auswählen und öffnen (grüner Kreis). Im sich nun öffnenden Fenster (grüner Pfeil) x und y range überprüfen und dann Button „Start“ (blauer Kreis) anklicken.



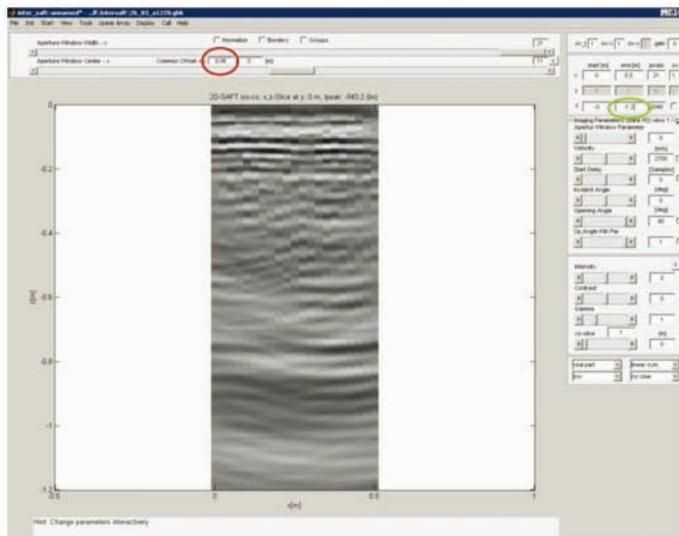
Den Reiter „Init“ wählen und dort auf „Initialize Parameters“ auswählen. Im nun sich öffnenden Fenster (roter Pfeil) die Geschwindigkeit und eventuell die Messfrequenz eingeben (grüner Kreis). Dann mit dem Button „OK“ bestätigen.



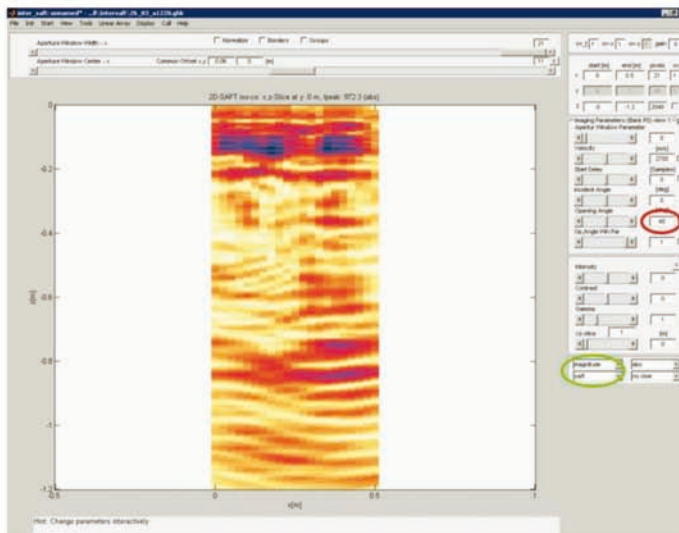
Nun den Reiter „Start“ anklicken und im Scroll-downmenü „Start homogeneous SAFT“ (roter Kreis) auswählen.



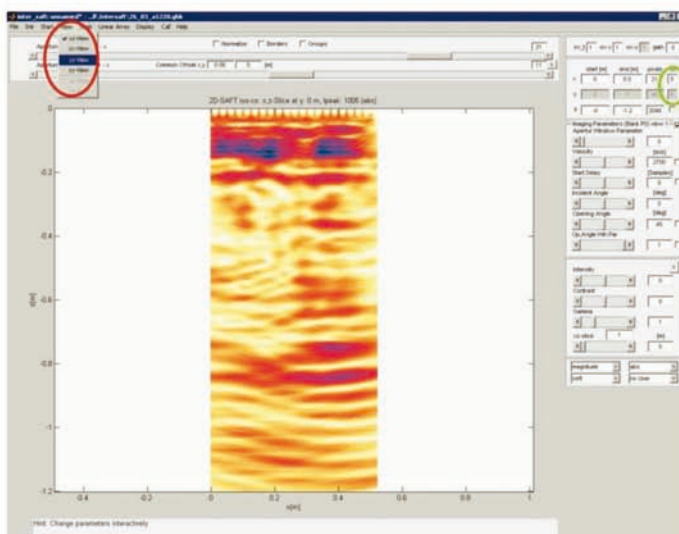
Nun ist der Datensatz eingeladen worden und kann über verschiedene Parametereinstellungen bearbeitet werden. Davor müssen noch ein paar Einstellungen, welche gerätespezifisch sind, geändert werden.



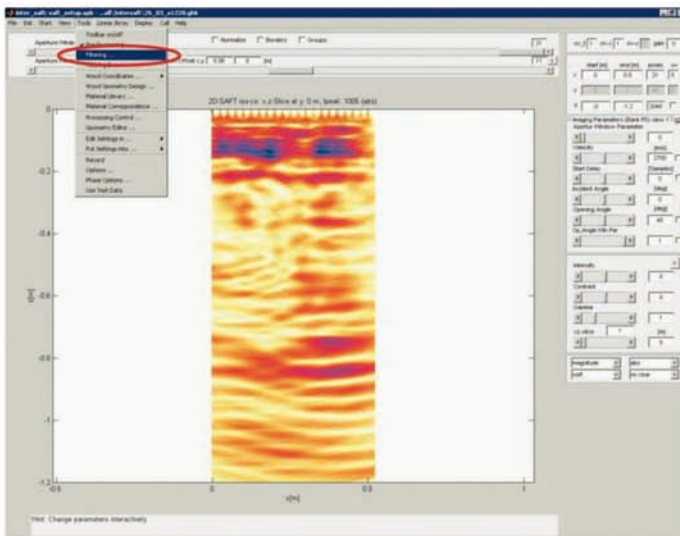
Als erstes wird ein Common Offset von 0,06 mm (roter Kreis) eingetragen. Dies beachtet den Abstand des Empfängers zum Sender. Des Weiteren wird die Tiefe (Z-Achse) reduziert (grüner Kreis). Dabei wird ein Wert eingetragen, der etwas größer als die Bauteildicke (bekannt oder geschätzt) sein sollte.



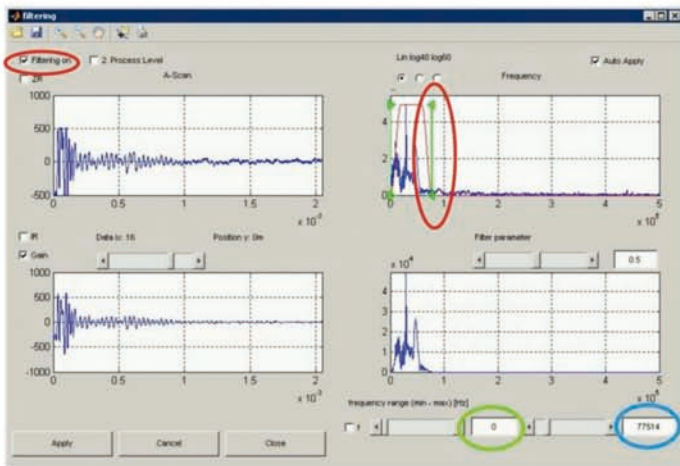
Bei „opening angle“ (roter Kreis) wird ein Wert von etwa 40 bis 60 eingetragen. Als geeignet hat sich 45° erwiesen. Des Weiteren wird „magnitude“ und „sft“ (grüner Kreis) eingestellt.



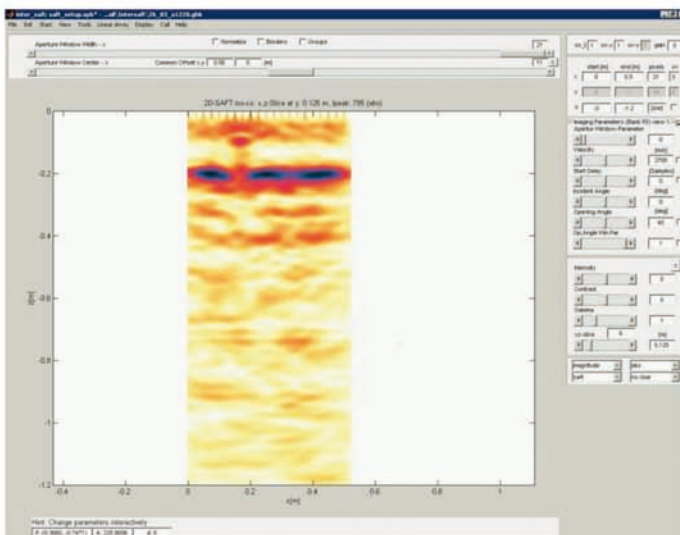
Nun wird für die beiden Achsen (X und Y) bei „ov“ jeweils 5 eingetragen (grüner Kreis). Um zwischen den beiden Achsen zu wechseln, wird der Reiter „View“ gewählt und für die X-Achse „xz-View“ und für die Y-Achse „yz-View“ angeklickt.



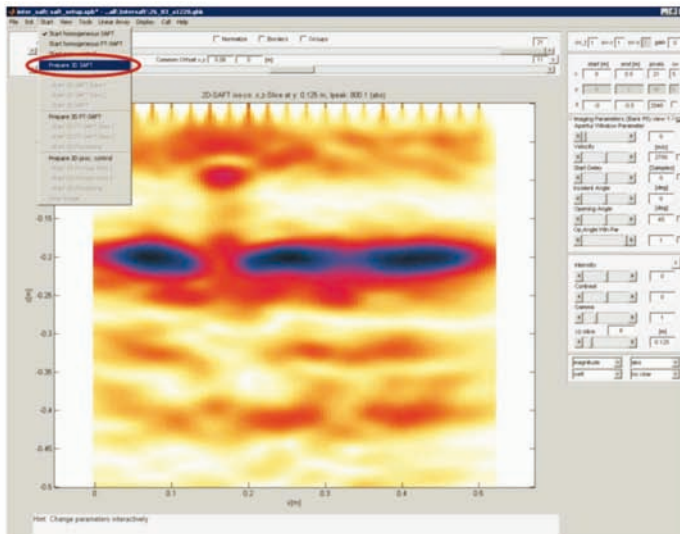
Auf den Reiter „Tools“ gehen und dort „Filtering“ anklicken, um das Tool Filtern zu aktivieren.



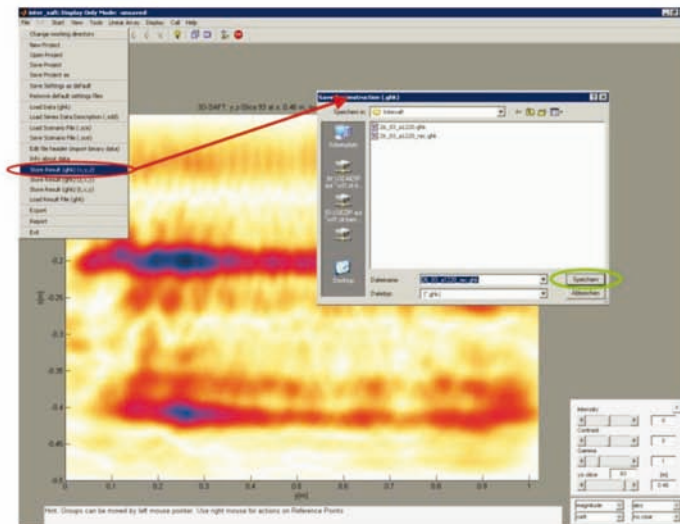
Im sich öffnenden Fenster „Filtering on“ (roter Kreis) aktivieren (Häkchen setzen). Dann unten rechts die „frequency range“ eingeben. Die min. range (grüner Kreis) wird dabei zwischen 0 bis 30.000 Hz und die max. range (blauer Kreis) zwischen 75.000 bis 100.000 Hz gewählt. Zum Beenden auf „Apply“ und dann „Close“ klicken.



Daten nach der Bearbeitung



Nun auf den Reiter „Start“ und „Prepare 3D Saft“ starten, danach noch einmal auf den Reiter „Start“ und nun „Start 3D Saft“ aktivieren.



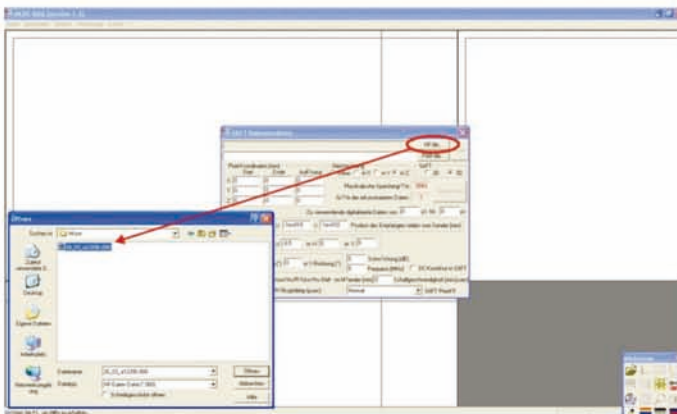
Nachdem der Prozess „3D-Saft“ durchgelaufen ist, geht man auf den Reiter „File“ und öffnet „Store Result (ghk)(x, y, z)“ (roter Kreis). In dem sich öffnenden Fenster wird der richtige Speicherort ausgesucht und der Datensatz mit Name und dem Kürzel rec (zur Verdeutlichung, dass es eine bearbeitete Datei ist) über den Button „Speichern“ (grüner Kreis) abgespeichert.

Datenbearbeitung in Muse

Wenn Intersaft nicht zur Verfügung steht, können die Ultraschalldaten alternativ mit dem Programm „Muse“ mit einem SAFT-Algorithmus bearbeitet werden.



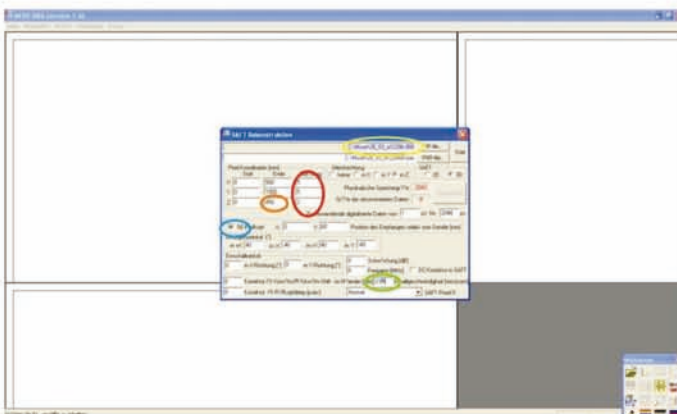
Im Startfenster von Muse auf die Auswahloption „Rekonstruktion“ gehen (roter Kreis).



In der sich öffnenden Oberfläche in dem Fenster „SAFT Rekonstruktion“ auf den Button „HF-file ...“ (roter Kreis) klicken und im entsprechenden Verzeichnis die Datei *.000 auswählen und dies mit dem Button „Öffnen“ bestätigen.

Wichtig:

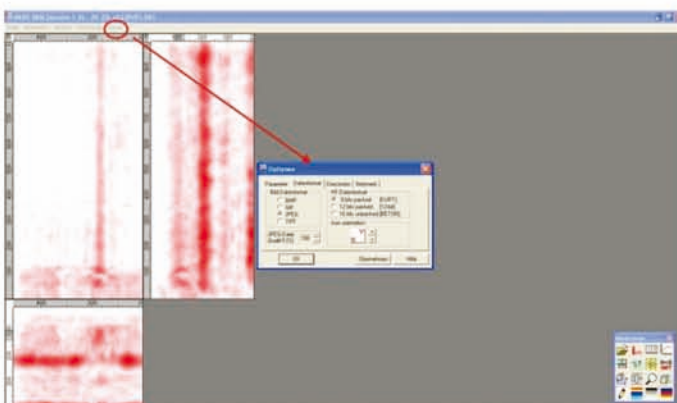
Den Pfad zur Datei und Dateiname (im folgenden Bild – gelber Kreis) möglichst kurz halten, da ab einer bestimmten Länge Muse diese sonst nicht mehr einlesen kann.



Im Fenster „SAFT Rekonstruktion“ werden folgende Einstellungen geändert:

- Auflösung: X = 5 mm, Y = 5 mm, Z = 2 mm (roter Kreis)
- Ende: X und Y behalten vorgegebene Werte, Z = Bauteildicke + ca. 10 mm (oranger Kreis)
- Häkchen aktivieren bei SE-Prüfkopf und Abstand auf 60 mm setzen (blauer Kreis)
- Ausbreitungsgeschwindigkeit eventuell anpassen (grüner Kreis)

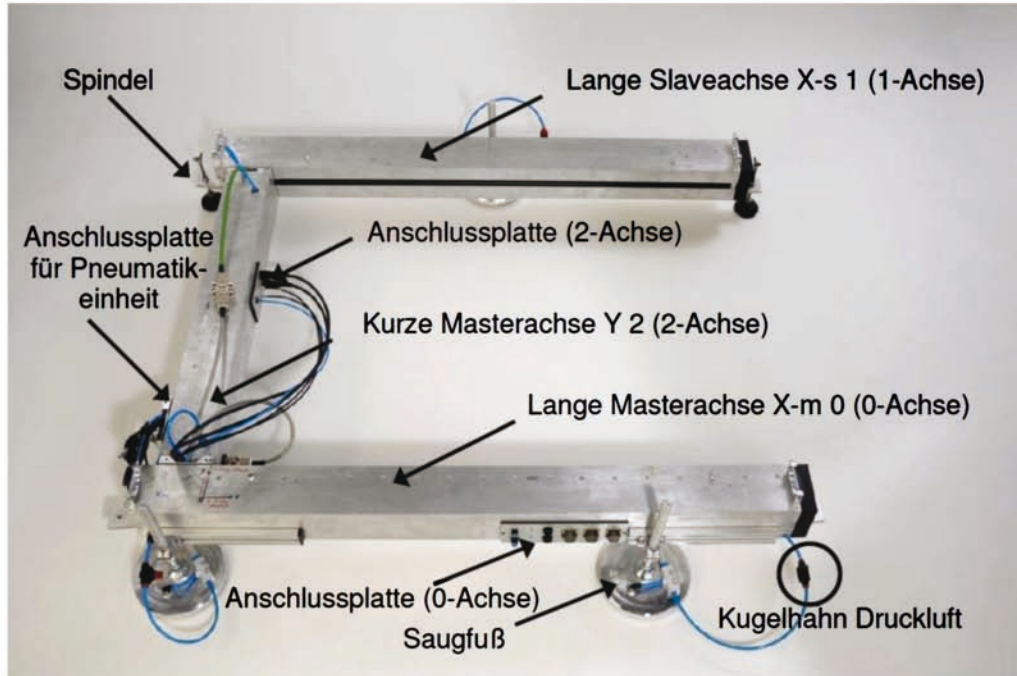
Danach auf den Button „Start“ klicken.



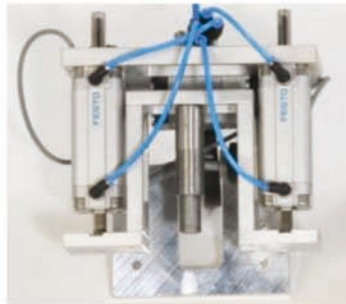
Nachdem die Rekonstruktion durchgelaufen ist, kann die Lage des Koordinatensystems verändert werden. Dies erfolgt über das Auswählen des Reiters „Extra“ (roter Kreis) und dem Anklicken des Feldes „Optionen“. In dem sich öffnenden Fenster den Reiter „Datenformat“ auswählen und dort dann das entsprechende Koordinatensystem auswählen.

Verfahrensanweisung Aufbau des On-Site-Scanners OSSCAR

Bauteile des Scannerrahmens



Montagehilfe



Pneumatikeinheit mit Befestigung der Prüfkopfhalterungen



Steuerungsrechner in Transportkoffer



Prüfkopfhalterungen für Radar, Ultraschall und Wirbelstrom

Zusammenbau des Scannerrahmens

Der Scannerrahmen besteht aus drei modularen Trägern, die wie in Bild 47 zusammengesetzt werden.

Der Aufbau beginnt mit Schritt 1 und der langen Masterachse auch 0-Achse, die mit den zwei Saugfüßen bestückt ist. Daran wird in Schritt 2 die kurze Masterachse, auch 2-Achse, angeschlossen. In Schritt 3 erfolgt der Anschluss der langen Slaveachse oder 1-Achse. Die Verbindung erfolgt durch jeweils drei Inbusschrauben am Übergang von langer zu kurzer Achse (Bild 47, Schritt 3). In Schritt 4 erfolgt der Anbau der Montagehilfe. Sie dient nur der parallelen Ausrichtung der beiden langen Achsen.

Sicherheitshinweis:

Die Verschraubung der Montagehilfe erfolgt an 4 Punkten gemäß Bild 48b und c bzw. Bild 47, Schritt 4. Die Montageschrauben müssen immer fest angezogen werden, damit der Scannerrahmen sicher bewegt und ausgerichtet werden kann.

Mit der Montagehilfe und den fest angezogenen Montageschrauben kann der Scannerrahmen später an der Messfläche angesetzt werden.

Die blauen Luftdruckleitungen müssen mit den Saugfüßen verbunden sein. Sämtliche Kugelhähne der Druckluft müssen geschlossen sein, bevor die Druckluft angeschlossen wird (Bild 49a).

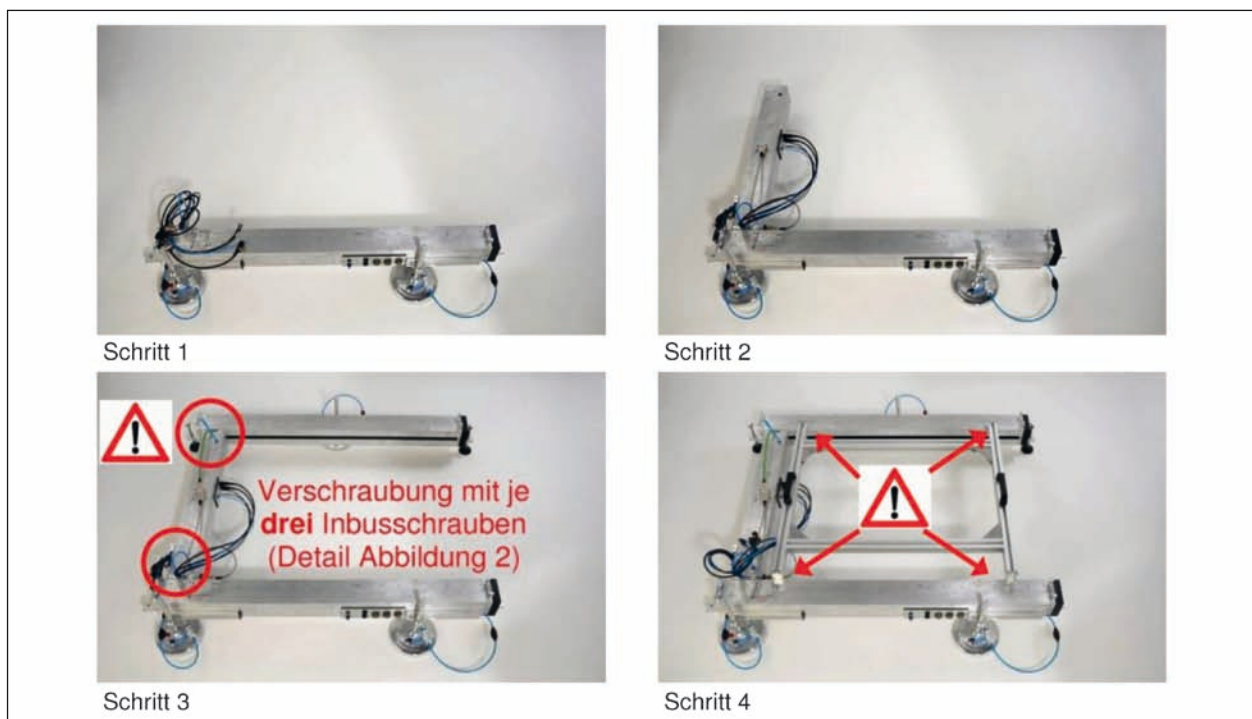


Bild 47: Zusammenbau des Scannerrahmens aus drei modularen Trägern. Die Montagehilfe in Schritt 4 dient nur der parallelen Ausrichtung der beiden langen Masterachsen. Montageschrauben immer fest anziehen!

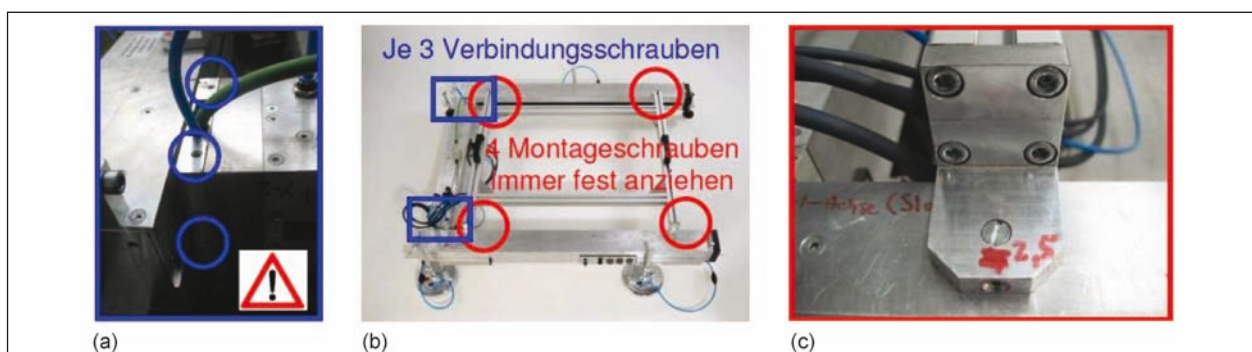


Bild 48: (a) Verschraubung der kurzen Masterachse (2-Achse) mit den langen Achsen über drei Inbusschrauben; (b) Scanner mit Montagehilfe; (c) Befestigungsschrauben

Sicherheitshinweis:

Nicht verbundene oder fixierte Druckleitungen können nach Einschalten der Druckluft zu Verletzungen führen!

Nun erfolgt der Anschluss aller Kabel und Druckleitungen

- an den Scannerrahmen
=> Anschließen des Drucklufthauptahns gemäß Bild 49b.

Sicherheitshinweis:

Der Hauptahn muss geschlossen sein!

- an den Achsen untereinander
=> Alle 9 Kabelverbindungen sind mit „Stecker x“ und „Buchse x“ bezeichnet.

Hinweis:

Beim Verbinden von „Stecker 6“ und „Stecker 9“ besteht Verwechslungsgefahr, da beide Stecker so-

wohl in Buchse 6 als auch 9 passen und die Zahlen auf dem Kopf stehen (s. Bild 50).

Nachdem der Scanner zusammengebaut und verkabelt ist, erfolgt die Befestigung des Scannerrahmens am Bauwerk.

Sicherheitshinweis:

Der Scanner darf außer auf horizontalen Messflächen niemals ohne Sicherungsgurt betrieben werden! Es bestehen sonst schwere Verletzungsgefahr und ein Totalschaden des Rahmens.

Vorbereiten der Druckluft zum Ansaugen des Scanners

Der Anschluss des Kompressors erfolgt nach Durchführung folgender Schritte, die weiter oben beschrieben wurden:

- Zusammenbau des Rahmens und Festziehen der Montagehilfe,

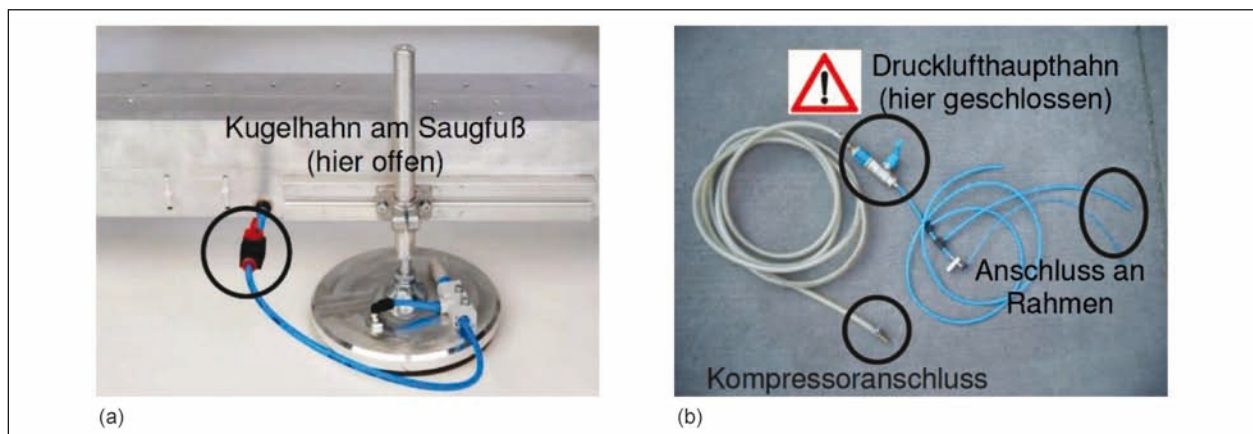


Bild 49: (a) Kugelhahn für Druckluft am Saugfuß; (b) Drucklufthauptahn mit Anschluss an Kompressor und an Scannerrahmen

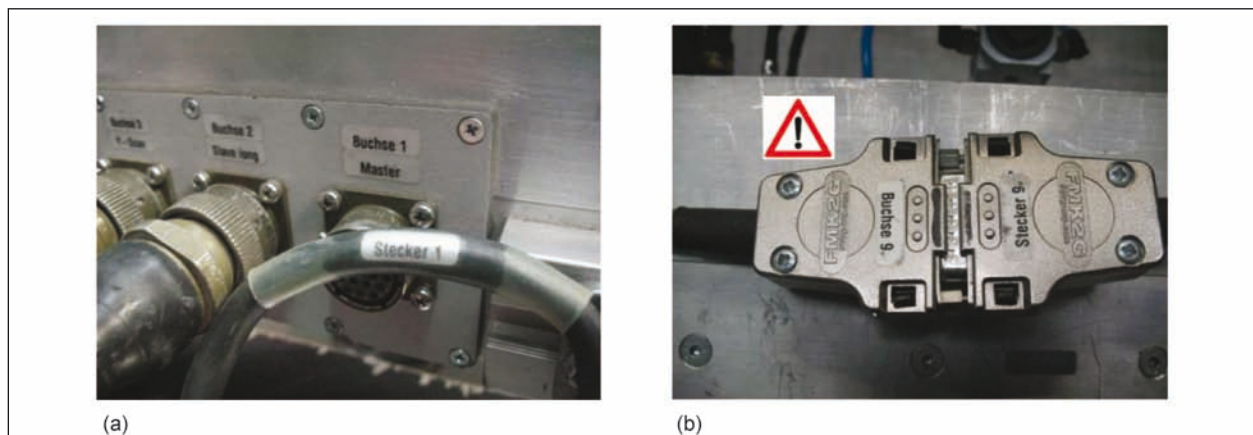


Bild 50: (a) Beispiel für Kennzeichnung von Stecker und Buchse an der Anschlussplatte; (b) Kennzeichnung von Stecker 9 und Buchse 9 (Vorsicht: Verwechslungsgefahr mit Buchse 6, in die Stecker 9 auch passt!)

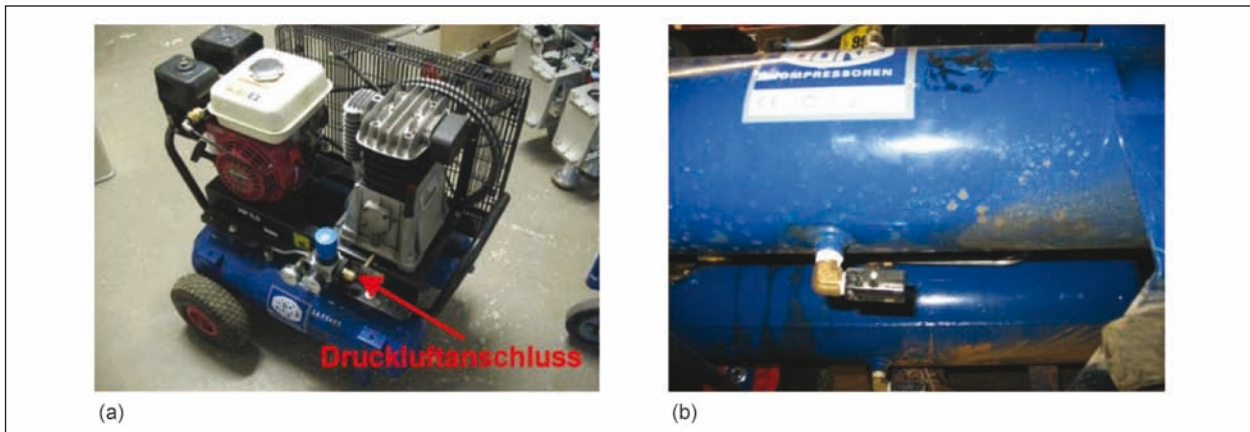


Bild 51: (a) Kompressor mit Druckluftanschluss; (b) einer der beiden Kugelhähne an der Unterseite des Kompressors zum Ablassen der Feuchte

- Verbindung aller Druckleitungen an den Saugfüßen mit dem Scannerrahmen,
- Schließen aller Kugelhähne (3 an den Saugfüßen, 1 an der Pneumatikeinheit),
- Anschluss des Drucklufthauptahns und Verbindung der dünnen und dicken blauen Druckleitung am Scannerrahmen,
- Schließen des Hauptahns (Bild 49b).

Die Druckluftzuleitung wird bei geschlossenem Drucklufthauptahn (Bild 49b) an den Druckluftanschluss des Kompressors wie in Bild 51a angeschlossen. Dazu wird eine dünne Schlauchleitung mit Schnellkupplung (Steckverbindung) auf einer Schlauchtrommel benötigt.

Hinweis:

Beim Betrieb des Kompressors muss spätestens nach einer Stunde Wasser aus den Kugelhähnen an der Unterseite des Kompressors abgelassen werden (Bild 51b).

Sicherheitshinweis:

Vor Beginn des Kompressorbetriebs müssen ausreichend Kraftstoff und ein Einfülltrichter vorhanden sein. Als Kraftstoffgemisch darf nur Superbenzin verwendet werden. Zweitaktgemisch darf nicht verwendet werden. Vor Beginn des Messeinsatzes ist die Eignung des Kraftstoffs zu prüfen!

Wenn der Scannerrahmen am Bauwerk befestigt ist, wird der Drucklufthauptahn geöffnet, der Scannerrahmen ausgerichtet und dann werden

nacheinander die Kugelhähne der drei Saugfüße geöffnet.

Hinweis:

Für Außeneinsätze muss zur Trocknung der Druckluft der in Bild 52 beschriebene Kältetrockner verwendet werden, da sonst Wasser aus den Druckleitung der Saugfüße und der Pneumatikeinheit austritt.

Der Anschluss des Kältetrockners in Kombination mit dem Kompressor ist in Bild 52 dargestellt.

Befestigung des Scanners am Bauwerk

Der erforderliche Platzbedarf (Ansetzfläche) zur Montage des Scanners an Bauteilen mit seitlicher Begrenzung (z. B. Unterzug mit Fahrbahnplatte darüber) ist in Bild 53 angegeben.

Die Saugfüße sind seitlich verschiebbar. Die möglichen Positionen der Saugfüße sind in Bild 54 angegeben. Aus dieser Abbildung geht auch der minimale Platzbedarf für nicht begrenzte Bauteile, z. B. Stützen, hervor.

Aus Bild 55 geht hervor, dass die Messfläche an drei von vier Seiten bestimmte Abstände zu Bauteilkanten hat. Soll der Prüfkopf genau entlang einer Kante geführt werden (Störsignale in Kantennähe beachten!), so ist der Scanner so zu befestigen, dass die y-Achse entlang der aufzunehmenden Kante verläuft.

Aus den Abmessungen von Bild 53 bis Bild 55 ergeben sich die gemäß Bild 56 möglichen Einsatzsituationen und die minimal erforderlichen Bauteilhöhen bzw. -breiten

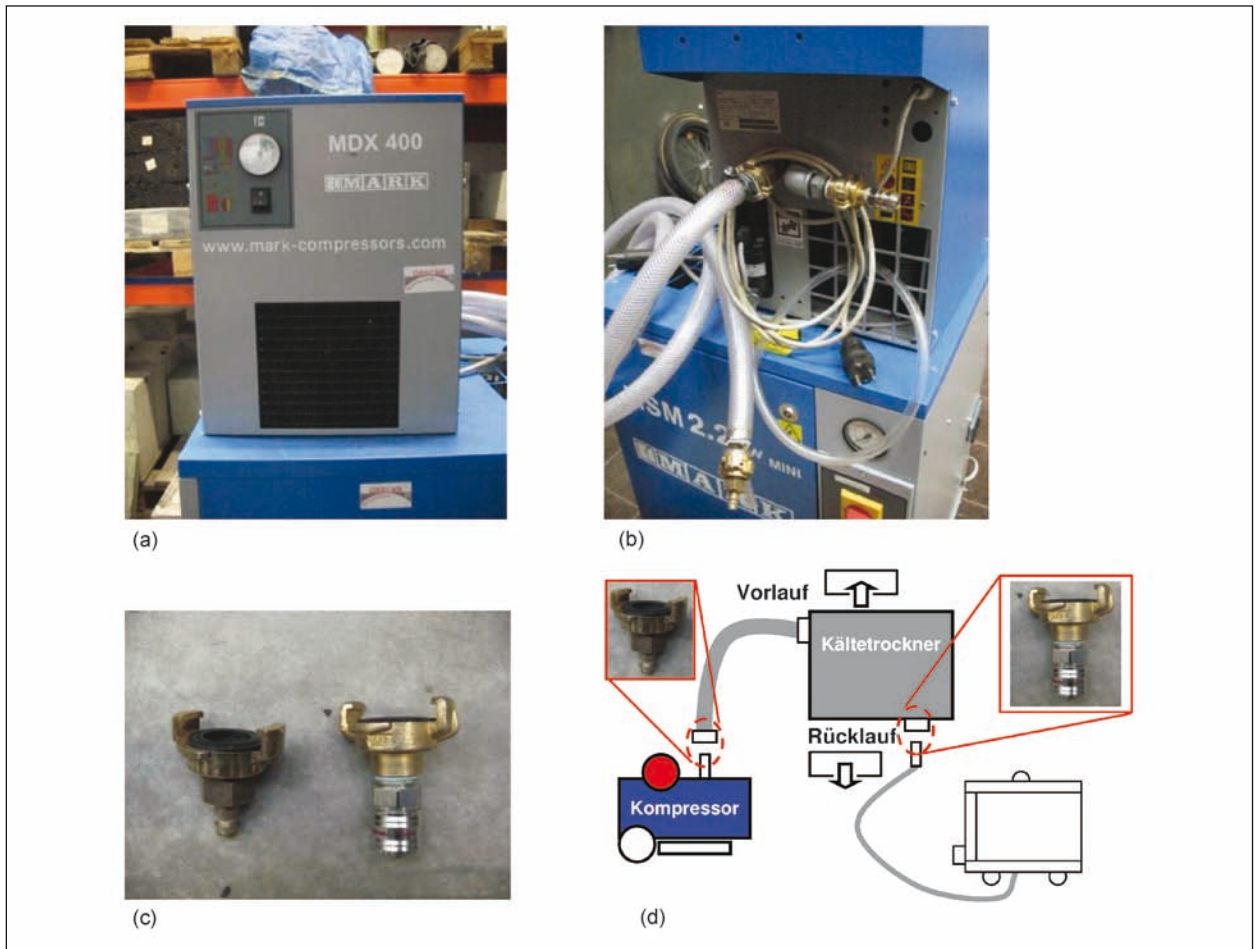


Bild 52: (a) Kältetrockner mit (b) Anschlüssen an der Rückseite, der dicke Druckschlauch befindet sich am Vorlauf (kompressorseitig), am Rücklauf wird der Scannerrahmen angeschlossen; (c) zur Verbindung der Druckschläuche (Anschluss Vorlauf an Kompressor) und Anschluss Druckluftkabel scannerseitig werden Adapter benötigt; (d) Anschlusskizze

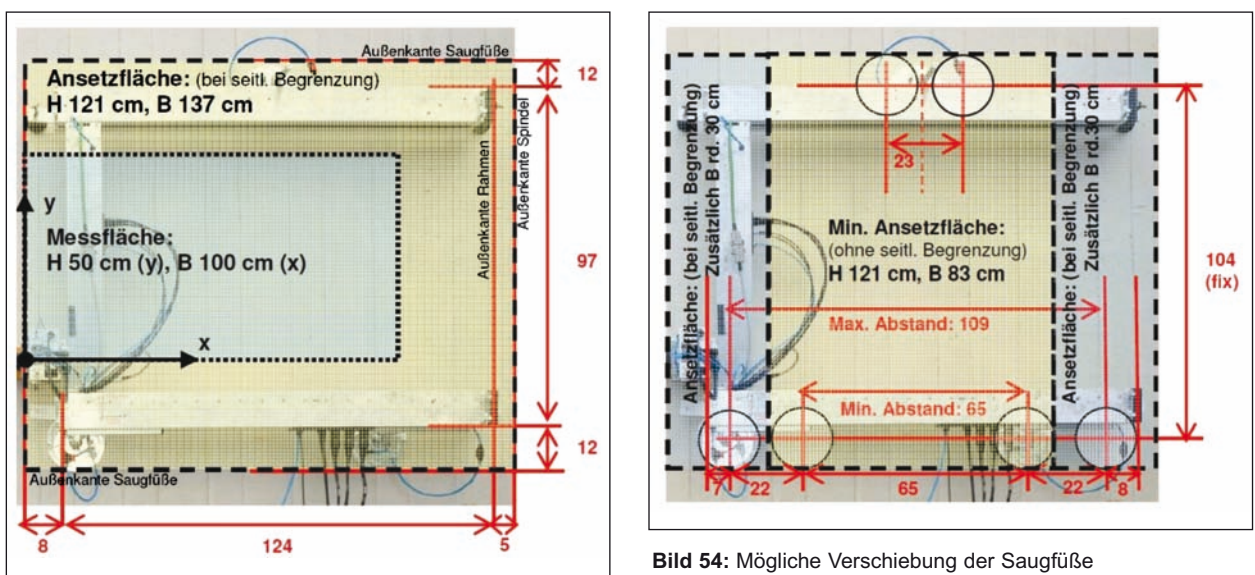


Bild 53: Erforderlicher Platzbedarf für die Scannermontage an Bauwerken (perspektivisch bedingt unmaßstäblich; alle Angaben in cm)

Bild 54: Mögliche Verschiebung der Saugfüße

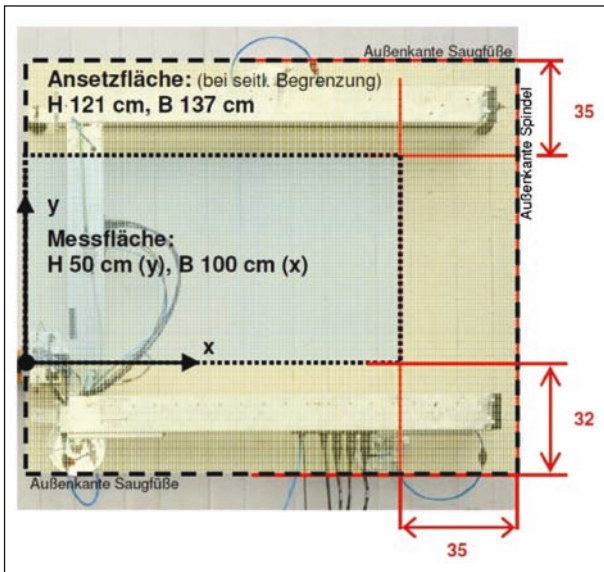


Bild 55: Minimal mögliche Abstände der Messfläche von Bauteilkanten. Die y-Achse kann genau auf der Kante verlaufen

Für die Befestigung des Scannerrahmens sind die in Bild 57 dargestellten Teile und entsprechendes Bohrwerkzeug erforderlich

Folgende Komponenten sind wie in Bild 58a zu befestigen:

- Scannerrahmen mittels zwei Gurten,
- Kabelstrang und Druckluftzuleitung mit Drucklufthaupthahn.

Der Scannerrahmen muss am Bauwerk immer mit zwei Sicherungsgurten mit Ratschen befestigt werden (Bild 58a). Die Gurte werden zunächst mit den Karabinerhaken an vier Punkten im Bauwerk durch Ringschrauben oder Ringmuttern mit Gewinde M10 befestigt (Bild 58b). Die Sicherungsgurte müssen immer auf der Oberseite der langen Achsen verlaufen. Dazu sind die Gurte durch die

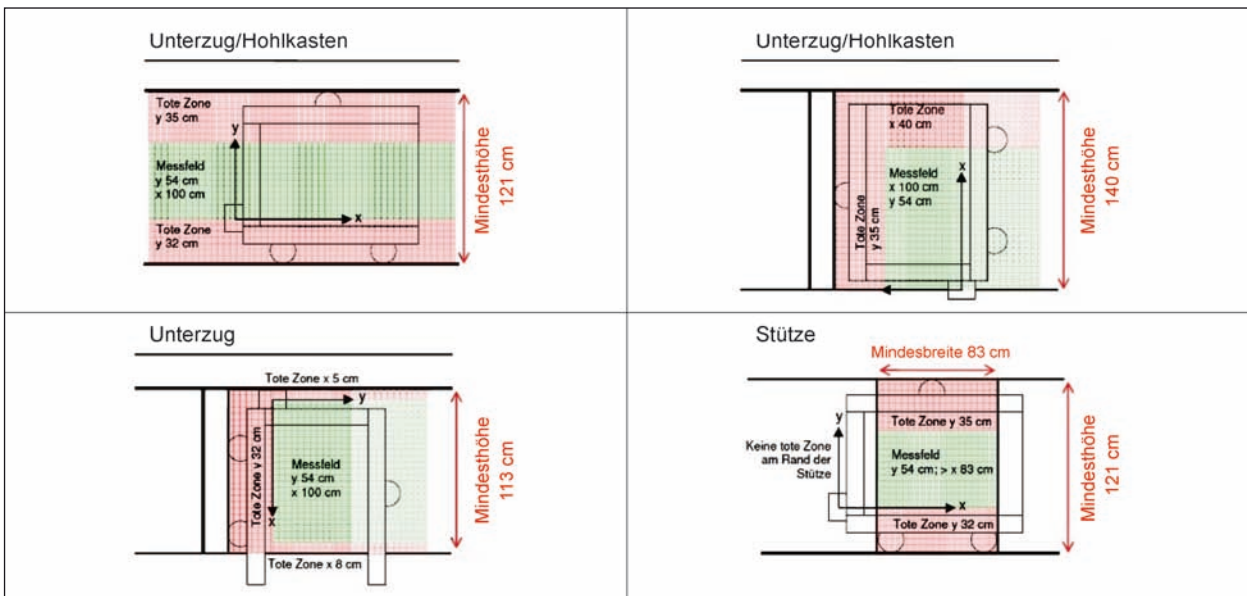


Bild 56: Minimale erforderliche Bauteilabmessungen für verschiedene Einsatzsituationen

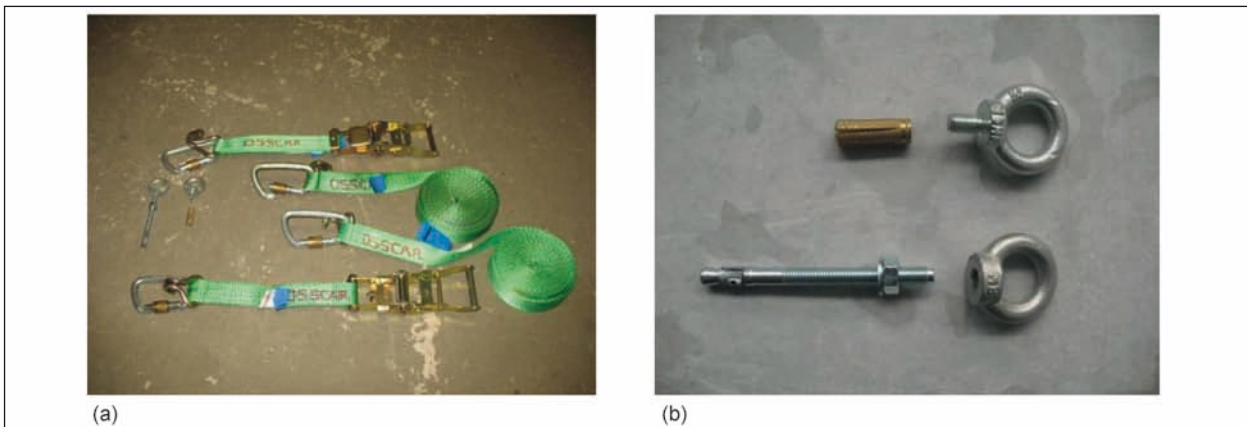


Bild 57: (a) Gurte mit Ratschen und Karabinerhaken zur Scannersicherung; (b) Befestigungselemente zur Verankerung im Bauwerk

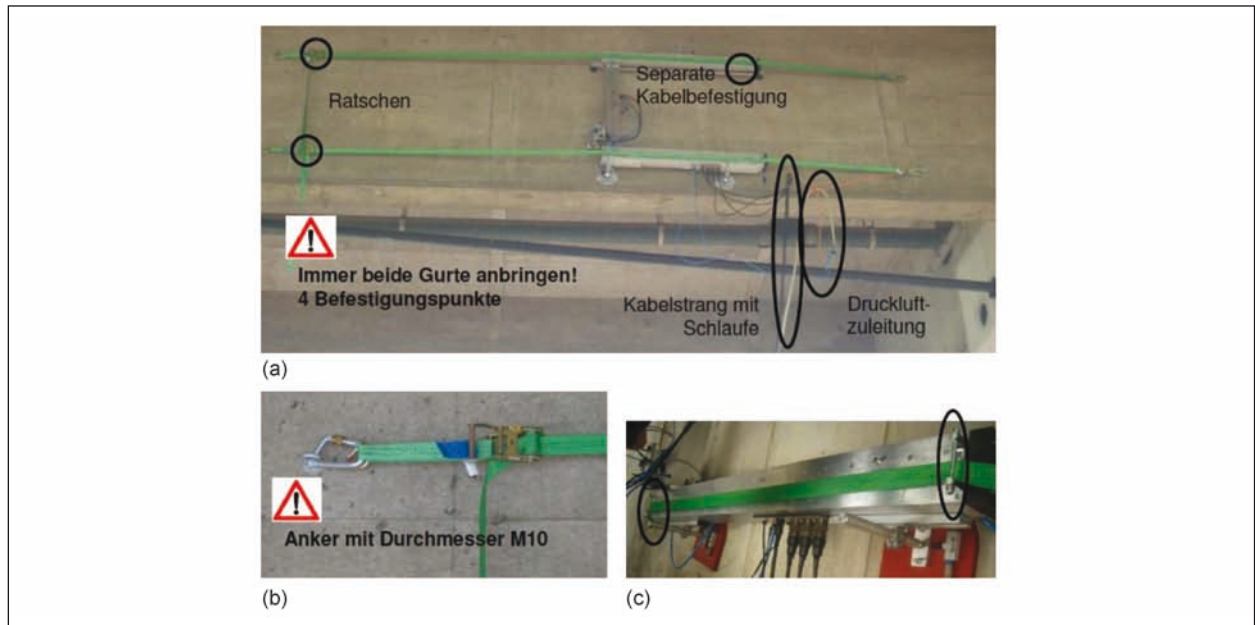


Bild 58: (a) Scannersicherung über Befestigungsgurt (Detail eines der vier Befestigungspunkte am Bauwerk); (c) Schlaufen an der langen Scannerachse zum Durchführen der Sicherungsgurte

Schlaufen am Anfang und Ende der Achse zu führen (Bild 58c).

Sicherheitshinweis:

Der Scanner darf außer auf horizontalen Messflächen niemals ohne Sicherungsgurt betrieben werden! Es bestehen sonst schwere Verletzungsgefahr und ein Totalschaden des Rahmens.

Wenn die Sicherungsgurte am Bauwerk befestigt sind und durch die Schlaufen des Scannerrahmens (Bild 58c) geführt sind, werden die Ratschen so weit angezogen, dass der Scanner an der Messfläche noch so viel Spiel hat, damit er verschoben werden kann.

Nach Anschluss der Druckluft an den Kompressor wird dieser gestartet und der Scannerrahmen wird bei geschlossenen Kugelhähnen an die Messfläche angesetzt. Dann werden die Kugelhähne nacheinander geöffnet, sodass sich die Füße an der Bauteiloberfläche festsaugen können.

Hinweis:

Die Pneumatikeinheit mit Befestigung für die Prüfkopfhalterungen soll erst an die Aufnahmeplatte der y-Achse angebaut werden, wenn der Scanner am Bauwerk befestigt ist.

8 Literatur

- [1] DIN 1076: Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen
- [2] Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse, OSA, BAST 2004 (Download unter www.bast.de Stichwort: Fachthemen)
- [3] KRIEGER, J., KASCHNER, R., P. HAARDT, P.: Die objektbezogene Untersuchung und Bewertung von Brücken im Rahmen des Bauwerks-Management-Systems. Bautechnik 77 (2000) 7, S. 453-463
- [4] KRIEGER, J., KRAUSE, M., WIGGENHAUSER, H. (1998): Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 18, Bremerhaven:Wirtschaftsverlag NW
- [5] KRIEGER, J., KRAUSE, M., WIGGENHAUSER, H. (2002): Materialtechnische Untersuchung beim Abbruch der Talbrücke Haiger, Durchführung von Ultraschall- und Impact-Echo-Messungen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 38, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW

- [6] HOLST, R., STREICHER, D., GARDEI, A., KOHL, C., WÖSTMANN, J., WIGGENHAUSER, H.: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung für Brückenbauwerke (Brückenbauwerk A 66 Eichenzell). Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Reihe Brücken- und Ingenieurbau, Heft B 48, Bremerhaven: Wirtschaftsverlag NW
- [7] FRIESE, M., TAFFE, A., WÖSTMANN, J., ZOËGA, A.: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A 1 – Hagen/Schwerte. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen, Brücken- und Ingenieurbau Heft B 65, Bergisch Gladbach: Wirtschaftsverlag NW, April 2009, CD-ROM, 52 Seiten
- [8] STREICHER, D., ALGERNON, D., BEHRENS, M., KOHL, Chr., WÖSTMANN, J., WIGGENHAUSER, H., PETZ, J.: Großflächige ZfPBau-Untersuchungen an Hohlkastenbrücken der A 23 – Südosttangente Wien. BAM-Forschungsbericht (2006) 278, 46 Seiten; Wirtschaftsverlag NW/Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven (Hrsg.), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
- [9] STREICHER, D., KOHL, Chr., WIGGENHAUSER, H., TAFFE, A.: Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken. In: Zeitschriftenartikel: Beton- und Stahlbetonbau 101 (2006) 5, 330-342; Ernst, Berlin
- [10] STOPPEL, M., MIELENTZ, F., WIGGENHAUSER, H.: Automatisierung in der zerstörungsfreien Prüfung. In: BERGMESTER, K., WÖRNER, J.-D. (Hrsg.), Beton-Kalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Ecoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 10, S. 562-567
- [11] STREICHER, D., WIGGENHAUSER, H., HOLST, R., HAARDT, P.: Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen – Automatisierte Messungen mit Radar, Ultraschallecho und Impact-Echo an der Fuldataalbrücke. In: Beton- und Stahlbetonbau 100 (2005) 3, 216-224; Ernst & Sohn Verlag für Architektur und technische Wissenschaften GmbH & Co. KG, Berlin
- [12] STREICHER, D., ALGERNON, D., BEHRENS, M., KOHL, Chr., WÖSTMANN, J., WIGGENHAUSER, H., PETZ, J.: Großflächige ZfPBau-Untersuchungen an Hohlkastenbrücken der A 23 – Südosttangente Wien. BAM-Forschungsbericht (2006) 278, 46 Seiten; Wirtschaftsverlag NW/Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven (Hrsg.), Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin
- [13] TAFFE, A., GARDEI, A., KRAUSE, M., MAIERHOFER, C., WIGGENHAUSER, H.: Automatisierung zerstörungsfreier Prüfverfahren für das Bauwesen. Materialprüfung 46 (2004) 10, S. 397-403
- [14] KOHL, C., KRAUSE, M., MAIERHOFER, C., WÖSTMANN, J., WIGGENHAUSER, H.: Datenfusion komplementärer Impuls-Echo-Verfahren zur zerstörungsfreien Untersuchung von Betonbauteilen. In: DACH-Jahrestagung, 17.-19. Mai 2004, Salzburg, A, Berlin: DGZfP BB-CD 89
- [15] SCHICKERT, M.: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion. In: BERGMESTER, K. (Hrsg.), Beton-Kalender 2007, Berlin: Ernst und Sohn (2007), Kap. V, Abschnitt 7, S. 536-543
- [16] TAFFE, A., KIND, Th., STOPPEL, M., KURZ, J.: OSSCAR-Bauwerksscanner – Automatisierte Datenaufnahme von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an Spannbetonbauteilen mit bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion. In: Berichtsband der DGZfP-Jahrestagung 2011, Bremen, 30.05.-01.06.2011, BB 127-CD
- [17] TAFFE, A., KIND, Th., STOPPEL, M., KURZ, J.: Bauwerksscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011) 4, S. 267-276
- [18] Merkblatt für das Ultraschall-Impuls-Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile (B4). DGZfP – Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (1999)
- [19] KRAUTKRÄMER, J., KRAUTKRÄMER, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. Berlin: Springer-Verlag (1986)

- [20] 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
- [21] KRAUSE, M., MIELENTZ, F., MILMANN, B., MAYER, K.: Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren. In: BERGMEISTER, K., WÖRNER, J.-D. (Hrsg.), Beton-Kalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V – Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 8, S. 543-555
- [22] SHEVALDYKIN, V., KOZLOV, V., SAMOKRUTOV, A.: Inspection of Concrete by Ultrasonic Pulse-Echo Tomograph with Dry Contact. In: Proceedings 7th ECNDT Conference, Copenhagen, 26-29 May 1998, pp. 816-821 (1998)
- [23] SCHICKERT, M.: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.), Beton-Kalender 2007, Berlin: Ernst und Sohn (2007), Kap. V, Abschnitt 7, S. 536-543
- [24] MILMANN, B., KRAUSE, M., MIELENTZ, F., MAYER, K.: Ultraschallecho-Verfahren für Spannbeton – Signifikanter Nachweis von Verpressfehlern mit Phasenauswertung. In: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, 21.-22.02.2008, DGZfP BB 112-CD, Poster 11
- [25] Merkblatt über das Radarverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (B10). DGZfP Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Berlin (2008)
- [26] KIND, T., MAIERHOFER, C.: Das Impuls - radarverfahren – Ein Verfahren zur zerstörungsfreien Strukturaufklärung in Bauwerken. In: CZIESIELSKI, E. (Hrsg.), Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.3, S. 333-341
- [27] FLOHRER, C.: Orten der Bewehrung und Messen der Betondeckung. In: CZIESIELSKI, E. (Hrsg.), Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.8, S. 370-379
- [28] SCHICKERT, G., KRAUSE, M., WIGGENHAUSER, H.: ZfPBau-Kompendium. Internetpräsenz: www.bam.de/zfpbau-kompendium.htm (2004)
- [29] Forschungsvorhaben FE 15.372/2002/HRB im Auftrag des BMVBW: Erarbeitung eines RI-EBW-PRÜF-kompatiblen Verfahrenskatalogs zur Anwendung im Rahmen der objektbezogenen Schadensanalyse bei der Erhaltungsplanung von Brücken- und Ingenieurbauwerken. Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Schlussbericht 2003, Verfahrenskatalog als lauffähiges Programm auf CD-ROM erhältlich
- [30] 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 (2008), Dissertation
- [31] KRIEGER, J.: Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren bei Betonbrücken. Bautechnik 73 (1996) 1, S. 23-31
- [32] SCHICKERT, M.: Grundlagen der Ultraschall-SAFT-Rekonstruktion. In: BERGMEISTER, K. (Hrsg.), Beton-Kalender 2007, Berlin: Ernst und Sohn (2007), Kap. V, Abschnitt 7, S. 536-543
- [33] KÖPP, C., MAIERHOFER, C., A. WENDRICH, A.: Entwicklung zerstörungsfreier und zerstörungssarmer Prüfverfahren zur Untersuchung historischen Mauerwerks. Mauerwerk 9 (2005) 3, S. 102-107
- [34] KIND, Th., FEISTKORN, S., TRELA, Ch., WÖSTMANN, J.: Impulsradar für schadensfreie Kernbohrungen an Spannbetonbrücken. Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009) 12, S. 876-881
- [35] TAFFE, A.: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau). In: MERTENS (Hrsg.), Handbuch der Bauwerksprüfung, 2015

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2010

B 71: Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau
Kuhlmann, Euler € 22,50

B 72: Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen
Weschpfennig, Kropf, von Witzhausen € 13,50

B 73: Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 21,00

B 74: Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk
Müller € 14,00

B 75: Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

B 76: Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00

B 77: Anpassung von DIN-Fachberichten „Brücken“ an Eurocodes
Teil 1: DIN-FB 101 „Einwirkung auf Brücken“
Teil 2: DIN-FB 102 „Betonbrücken“
Teil 3: DIN-FB 103 „Stahlbrücken“
Teil 4: DIN-FB 104 „Verbundbrücken“
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 29,50

B 78: Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien
Kuhlmann, Günther, Krauss
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 18,50

B 79: Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbetonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden. € 15,50

B 80: Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00

B 81: Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse
Müller, Vogel, Neumann € 14,50

B 82: Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand
Freundt, Böning € 16,00

B 83: Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00

B 84: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

B 85: Entwicklung von Verfahren einer zuverlässigkeitsbasierten Bauwerksprüfung
Zilch, Straub, Dier, Fischer € 19,50

B 86: Untersuchungen an Bauwerken aus hochfesten Beton
Nguyen, Freitag € 13,50

2012

B 87: Vermeidung von Glättebildung auf Brücken durch die Nutzung von Geothermie
Feldmann, Döring, Hellberg, Kuhnhenne, Pak, Mangerig, Beucher, Hess, Steinauer, Kemper, Scharnigg € 17,00

B 88: Anpralllasten an Schutzeinrichtungen auf Brücken – Anpassung der DIN-Fachberichte „Stahlbrücken“ und „Verbundbrücken“ an endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Kuhlmann, Zizza, Günther € 15,50

B 89: Nachrechnung von Betonbrücken zur Bewertung der Tragfähigkeit bestehender Bauwerke
Maurer, Heeke, Kiziltan, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg, Fitik € 19,50

B 90: Fugenbewegung an der Ruhrtalbrücke Mintard
Eilers, Quaas, Staack € 14,00

2013

B 91: Priorisierung und Nachrechnung von Brücken im Bereich der Bundesfernstraßen – Einfluss der Einwirkungen aus Verkehr unter besonderer Berücksichtigung von Restnutzungsdauer und Verkehrsentwicklung
Freundt, Böning € 15,00

B 92: Kriterien für die Anwendung von unbewehrten Innenschalen für Straßentunnel
Kaundinya € 14,00

B 93: Querkrafttragfähigkeit von Fahrbahnplatten – Anpassung des DIN-Fachberichtes „Betonbrücken“ an die endgültige Eurocodes und nationale Anhänge einschließlich Vergleichsrechnungen
Hegger, Reißer € 17,50

B 94: Baulicher Brandschutz für Tunnel in offener Bauweise – Rechnerischer Nachweis
Peter, Knief, Schreyer, Piazzola
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 95: Erfahrungen mit selbstverdichtendem und hochfestem Beton im Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 17,00

B 96: Geothermischen Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken
Adam € 17,00

B 97: Einfluss der veränderten Verkehrsführung bei Ertüchtigungsmaßnahmen auf die Bauwerksbeanspruchungen
Freundt, Böning € 15,00

2014

B 98: Brückenseile – Gegenüberstellung von vollverschlossenen Seilen und Litzenbündelseilen

Friedrich

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 99: Intelligente Brücke – Zuverlässigkeitsbasierte Bewertung von Brückenbauwerken unter Berücksichtigung von Inspektions- und Überwachungsergebnissen

Fischer, Schneider, Thöns, Rücker, Straub

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 100: Roadtraffic Management System (RTMS)

Freundt, Vogt, Böning, Pierson, Ehrle € 15,00

B 101: Adaptive Spannbetonstruktur mit lernfähigem Fuzzy-Regelungssystem

Schnellenbach-Held, Fakhouri, Steiner, Kühn € 18,50

B 102: Adaptive ‚Tube-in-Tube‘-Brücken

Empelmann, Busse, Hamm, Zedler, Girmscheid € 18,00

B 103: Umsetzung des Eurocode 7 bei der Bemessung von Grund- und Tunnelbauwerken

Briebrecher, Städing € 14,00

B 104: Intelligente Brücke – Konzeption eines modular aufgebauten Brückenmodells und Systemanalyse

Borrmann, Fischer, Dori, Wild

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 105: Intelligente Brücke – Machbarkeitsstudie für ein System zur Informationsbereitstellung und ganzheitlichen Bewertung in Echtzeit für Brückenbauwerke

Schnellenbach-Held, Karczewski, Kühn

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 106: Einsatz von Monitoringsystemen zur Bewertung des Schädigungszustands von Brückenbauwerken

Freundt, Vogt, Böning, Michael, Könke, Beinersdorf € 17,00

B 107: Materialeigenschaften von Kunststoffdichtungsbahnen bestehender Straßentunnel

Robertson, Bronstein, Brummermann € 16,00

B 108: Fahrzeug-Rückhaltesysteme auf Brücken

Neumann, Rauert € 18,50

B 109: Querkrafttragfähigkeit bestehender Spannbetonbrücken

Hegger, Herbrand € 17,00

B 110: Intelligente Brücke – Schädigungsrelevante Einwirkungen und Schädigungspotenziale von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Miedzinski

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 111: Erarbeitung von Modellen zur Bestimmung der Schadensumfangsentwicklung an Brücken

Müller € 15,00

B 114: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brenninger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 115: Auswirkungen von Lang-Lkw auf die sicherheitstechnische Ausstattung und den Brandschutz von Straßentunneln

Mayer, Brenninger, Großmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 116: Überwachungskonzepte im Rahmen der tragfähigkeitsrelevanten Verstärkung von Brückenbauwerken aus Beton

Schnellenbach-Held, Peeters, Brylka, Fickler, Schmidt

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 117: Intelligente Bauwerke – Prototyp zur Ermittlung der Schadens- und Zustandsentwicklung für Elemente des Brückenmodells

Thöns, Borrmann, Straub, Schneider, Fischer, Bügler

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 118: Überwachungskonzepte für Bestandsbauwerke aus Beton als Kompensationsmaßnahme zur Sicherstellung von Stand-sicherheit und Gebrauchstauglichkeit

Siegert, Holst, Empelmann, Budelmann

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 119: Untersuchungen zum Brandüberschlag in Straßentunneln

Schmidt, Simon, Guder, Juknat, Hegemann, Dehn in Vorbereitung

B 120: Untersuchungen zur Querkrafttragfähigkeit an einem vorgespannten Zweifeldträger

Maurer, Gleich, Heeke, Zilch, Dunkelberg

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

B 121: Zerstörungsfreie Detailuntersuchungen von vorgespannten Brückenplatten unter Verkehr bei der objektbezogenen Schadensanalyse

Diersch, Taffe, Wöstmann, Kurz, Moryson

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2015

B 112: Nachhaltigkeitsberechnung von feuerverzinkten Stahlbrücken

Kuhlmann, Maier, Ummenhofer, Zinke,

Fischer, Schneider € 14,00

B 113: Versagen eines Einzelelementes bei Stützkonstruktionen aus Gabionen

Placzek, Pohl

Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Alle Berichte sind zu beziehen im:

Carl Schünemann Verlag GmbH

Zweite Schlachtpforte 7

28195 Bremen

Tel. (0421) 3 69 03-53

Fax (0421) 3 69 03-48

www.schuenemann-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.