

Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Straßenbau Heft S 138

bast

Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

von

Robin Groschup
Christian Große

Technische Universität München
Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Lehrstuhl für Zerstörungsfreie Prüfung

Martin Eger
Stephan Freudenstein

Technische Universität München
Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Lehrstuhl und Prüfamts für Verkehrswegebau

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Straßenbautechnik Heft S 138

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 Ed. Schünemann KG, 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 08.0238/2015/CRB:

Scannendes Prüfgerät zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Fachbetreuung

Christoph Becker

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Fachverlag NW in der
Carl Ed. Schünemann KG
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 0943-9323

ISBN 978-3-95606-472-2

Bergisch Gladbach, August 2019

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken

Ein bedeutender Teil (ca. 30%) der Bundesautobahnen ist in Betonbauweise hergestellt. An solchen Fahrbahnen können spezielle Schadensbilder auftreten, die in Zusammenhang mit chemischen Reaktionen (insbesondere Schädigung aufgrund Alkali-Kieselsäure-Reaktion) oder mechanischer und thermischer Beanspruchung stehen (z.B. Hitzeschäden). Zur zerstörungsfreien Zustandserfassung im Hinblick auf substanzielle Schäden von Fahrbahndecken aus Beton steht derzeit noch kein wirtschaftlich sinnvoll einsetzbares Prüfsystem zur Verfügung, das als Entscheidungsgrundlage für Instandsetzungsmaßnahmen dienen könnte. Zwar gibt es Systeme mit denen z.B. die Tragfähigkeit oder der komplette Straßenaufbau (Georadar) repräsentativ und auch mit hohen Scangeschwindigkeiten abgebildet werden kann. Jedoch ist die Abbildung von auf der Oberfläche nicht sichtbaren horizontalen Rissen und Delaminationen im Inneren der Betondecke nur mit großem Aufwand messtechnisch durchführbar.

Deshalb wurde im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsvorhabens ein scannendes Messverfahren entwickelt und in einem Prototypensystem implementiert. Das System erlaubt die Durchführung von Messungen auf Basis von elastischen Wellen- und Schwingungsphänomenen, die direkt mit strukturellen Eigenschaften wie z. B. dem Vorhandensein von Rissen korrelierbar sind.

Das entwickelte Messsystem nutzt als Grundlage das sog. Impakt-Echo-Verfahren, bei dem durch einen mechanischen Impakt elastische Wellen im Betonkörper ausgelöst, mit geeigneter Sensorik empfangen und mit Methoden der Datenverarbeitung im Hinblick auf Informationen bezüglich Materialkennwerten und Schäden analysiert werden. Im Laufe der Entwicklungsarbeiten wurden messtechnische Komponenten wie Sensorik, Signalquellen und Messelektronik für die speziellen Erfordernisse scannender Messungen an Betonfahrbahndecken im Bestand konzeptioniert, hergestellt und optimiert. Insbesondere wurde zur Realisierung der scannenden Funktionsweise eine luftschallbasierte Signalaufzeichnung implementiert. Darüber hinaus

wurden auf Basis numerischer Simulationen und Realmessungen Methoden zur Datenverarbeitung und korrekten Interpretation der Messdaten erarbeitet. Testmessungen wurden sowohl an ausgebauten Fahrbahnplatten als auch an ausgewählten Fahrbahnen im Bestand durchgeführt. Mit dem System konnten an Fahrbahnen unterschiedlicher Bauart Messergebnisse erzielt werden, die Rückschlüsse auf das Vorhandensein horizontaler Risse ermöglichen. Bei Vorliegen mehrerer Rissebenen ergibt sich durch das Messprinzip die Einschränkung, dass nur die oberste Rissebene detektierbar ist. Die Messergebnisse konnten an ausgewählten Stellen durch Kernbohrungen verifiziert werden. Wo keine direkte Verifikation möglich war, ergab sich eine gute Übereinstimmung mit alternativen Messverfahren (Ultraschall) oder eine plausible Übereinstimmung mit dem allgemeinen Fahrbahnzustand, der z. B. durch Ausbesserungsstellen im umgebenden Bereich der Messlokationen ersichtlich war.

Das Prototypensystem erlaubt erstmals eine scannende Erfassung struktureller Schädigung durch horizontale Risse und Delaminationen in Betonfahrbahndecken von einer beweglichen Plattform aus. Obwohl noch Optimierungsmöglichkeiten v.a. hinsichtlich der Scangeschwindigkeit bestehen, ergab sich durch die Bearbeitung des Forschungsvorhabens eine wesentliche Verbesserung bestehender Prüftechnik zur Abbildung kleinskaliger Schäden in Fahrbahndecken aus Beton.

Development of a scanning test tool to detect delaminations in concrete pavements

A considerable part – approximately 30% – of the German highway network is built of concrete. This construction type is prone to specific types of damage related to chemical reactions, e.g. alkalisilica-reaction, or mechanical and thermal stress, e.g. heat induced damage.

Detection of such damage at an early stage could help administrators make decisions about repair measures. However, due to the lack of appropriate testing tools, nondestructive evaluation of these structures is still a laborious and expensive task.

Therefore, this study presents a new method and apparatus for the scanning evaluation of concrete pavements. The approach makes use of mechanical

waves that interact with structural properties of the concrete slab under examination.

The system is based on the so called Impact-Echo method, where stress waves excited by a mechanical impact on the concrete surface are analyzed to deduce material properties and damage. During the project, components like measurement electronics, sensors and impact sources were developed, optimized and tailored towards specific aspects of scanning measurements on concrete pavements. As a key component to allow contactless sensing of mechanical waves a microphone array sensor was implemented. Furthermore, concepts and methods for data processing and interpretation were developed by utilizing numerical and field data. A prototype device was tested on disassembled plate sections and also on selected sections of highways in operation. The system appeared capable of detecting horizontal cracks. If multiple delaminations are present, only the uppermost delamination layer can be detected due to the measurement principle.

Test results were verified by core drilling at selected locations. If direct confirmation by drilling was not possible, a reasonable agreement with ultrasound pulse-echo measurements or overall pavement condition was found.

The developed prototype system enables scanning detection of horizontal cracks and delaminations in concrete pavements in continuous motion. Though there is still potential for improvements, e.g. regarding scanning velocity, the system represents a significant improvement over existing nondestructive testing techniques applicable to concrete pavements.

Summary

Development of a scanning test tool to detect delaminations in concrete pavements

1 Task

Concrete pavements may have defects that do not exhibit symptoms that are visible on the surface, for example delamination and horizontal cracking. To conduct an efficient non-destructive evaluation of the internal condition of concrete pavements, NDT (non-destructive testing) methods that can be applied in scanning way are necessary. NDT scanning devices currently used to assess the structural integrity of concrete elements (e.g. pavements) can only be applied to specific sections or do not have the necessary resolution to detect small scale cracking. Scanning NDT methods mainly employ electric, magnetic or electromagnetic measuring principles (e.g. ground penetrating radar, eddy current, potential field mapping). Scanning applications of other techniques often operate on a stop-and-go basis and are very time consuming. Very often tailor made scanner frames must be constructed to meet job-specific requirements. Thus, the efficient detection of horizontal cracking in a scanning manner remains a challenge.

In general, elastic wave based methods are capable of detecting internal cracks with small widths. This is the case for ultrasound testing, which can be applied to the detection of cracks in concrete. However, this method has the drawback that it is very time consuming when applied to large structures or areas. In most instances extrapolation of results to locations that have not been directly evaluated by measurements will lead to incorrect conclusions about the actual condition of a structure. Therefore a prototype scanner was developed during this study to identify horizontal cracks and delaminations on continuous measurement profiles. By utilizing the developed prototype scanner, portions of roadways with critical damage can be quickly identified.

2 Research methodology

In order to identify and evaluate existing NDT techniques with respect to their potential to map horizontal cracks in concrete pavements, a literature study was performed. Special focus of the literature

study was to evaluate whether and at what expense the NDT technique could be automated and applied while in continuous motion. These aspects are crucial for the creation of a scanning device.

Based on these parameters the air coupled impact echo (IE) technique was selected for further development within this study. The underlying physical phenomena led to the conclusion that a scanning device could be constructed based on an optimized air-coupled impact echo strategy. Similar to ultrasonic testing, impact echo utilizes elastic waves that interact with zones of weakness (i.e. cracks).

As a first step in the development, numerical simulations were performed with the goal to verify the sensitivity of the air-coupled impact echo principle to relevant and typical damage. Mechanical impacts cause flexural vibrations of delaminated regions. The simulations allowed for an estimation of measurement frequencies that correspond to damage parameters such as depth and size of delaminations. The excited vibrations emit sound in the audible frequency range.

In later development stages a prototype system was constructed based on the air-coupled IE technique and continually improved during the project. For testing purposes the prototype was deployed on different test specimens (concrete slab cast with internal defects and disassembled road sections) and on sections of in situ pavements.

The concrete pavements that were tested with the scanner exhibited horizontal cracking in the vicinity of joints. In most cases the cause of this damage was unknown whereas in some instances cracking was induced by ASR (Alkali-Silica-Reaction). Wherever possible diagnostic findings deduced from data from the prototype scanner were compared to reference measurements obtained from ultrasound pulse echo or core drillings. Based on this procedure, data processing of scanner raw-data was iteratively adapted and refined with respect to the detection target.

3 Results

The prototype scanner developed in this project utilizes the air-coupled impact echo principle. A microphone array built with 35 individual MEMS

(micro-electro mechanical systems) microphones acts as a sensing element. The arrangement of individual microphones ensures a favorable directivity pattern to suppress unwanted ambient noise from surrounding traffic or noise caused by the impact device. Largest possible sensitivity is achieved for signals radiating from the concrete surface. This positive directivity is most effective at frequencies above 2000 Hz. For impact generation an impact device was developed utilizing double solenoids with tailor made control electronics. The entire prototype system is based on a modular concept. Number of impact devices as well as total sensor arrays can be freely chosen (within certain reasonable limits). In the final development stage up to three sensor arrays, each with three impact devices that were operated in parallel were tested. This enables parallel and simultaneous data acquisition from three adjacent profiles.

The mechanical impact causes flexural vibrations of pavement sections above delaminations. In turn, these vibrations emit airborne sound that is recorded by the sensor system in the scanning device. During data processing, raw data are transformed from time to the frequency domain. Spectral features correlate with properties of the concrete slab, e.g. its thickness or crack condition. Criteria for data interpretation were developed based on test measurements and results of the numerical simulations.

A clear observable thickness resonance mode i.e. a single frequency peak that can be related to the thickness of the examined pavement slab, is an indication of an undamaged state. If the P-wave velocity (ultrasound velocity of compression waves) is known, the thickness can be calculated from the position of the observed frequency peak.

In the vicinity of pavement joints weakening of the thickness resonance peak will occur. This effect becomes less pronounced for shallow cut joints. Due to effects caused by superposition of mechanical surface waves and body waves the thickness resonance can be shifted to lower frequencies at joints. Frequency peaks with high amplitudes and lower frequency than the resonance mode can be attributed to flexural vibrations of delaminated areas. In the case of small delaminations (< 5 cm) and slab thickness greater than 30 cm overlapping of thickness resonance modes and flexural modes can occur. Residual stiffness, depth of delaminations as well as the size and geometry of a delaminated area affect measured frequencies. Therefore it is not possible

to measure the exact depth of a delamination. Horizontal cracks near joints can also cause a gradual decrease of the thickness resonance frequency and a weakening of its amplitude.

4 Conclusion and recommendations for practical application

During the presented research project a prototype system for scanning measurements on concrete pavements was designed and constructed. The prototype scanner allows for detection of horizontal cracks and delaminations while continuously in motion. The system is based on the impact-echo method, where stress waves excited by a mechanical impact on the concrete surface are analyzed to deduce material properties and damage.

Though there is still potential for improvements, e.g. regarding scanning velocity, the scanner represents a significant improvement over existing non-destructive testing techniques used for evaluation of concrete pavements. Due to the underlying physical principles certain constraints have to be considered for practical application:

In the presence of multilayer delaminations (i.e. multiple parallel horizontal cracks) only the uppermost crack will attribute to the measuring effect. Therefore, for positive crack indications, no assumptions can be made about the existence of deeper delaminations below the uppermost crack/delamination.

The overall spatial resolution is limited by the wavelengths and overall design of the device (the size of the sensor array significantly affects spatial resolution). Since only a limited amount of data is available at the time of report generation the final resolution is still a matter of research work. The smallest detectable feature has to be determined with more measurements.

In its present state the scanning system can be applied in an efficient way to evaluate the structural health of individual road sections. It seems worthwhile to evaluate the applicability of the developed device to different structures such as bridge decks, asphalt pavements, tunnels and airfields. Future development should focus on automation of data processing, improvement of system durability and scanning speed.

Inhalt

1	Einleitung	9	8.3.2	Messungen auf der A 92 bei Unterschleißheim	32
2	Stand von Wissenschaft und Technik	9	8.3.3	Messungen A 38 und A 14	34
2.1	Verfahren mit eingeschränktem Potenzial.	10	8.4	Zusammenfassende Beurteilung der Testmessungen	36
2.2	Verfahren mit Potenzial zum scannenden Einsatz auf Beton- fahrbahnen	11	9	Überlegungen zur Robustheit und Optimierung der Scan- geschwindigkeit	37
3	Forschungskonzept und geplantes Vorgehen	12	10	Vorschläge für weiterführende Entwicklungen	39
4	Allgemeine Grundlagen zum Impakt-Echo-Verfahren	13	10.1	Alternative Anwendungsgebiete	39
5	Simulationsverfahren	15	11	Zusammenfassung	39
5.1	Eigenfrequenzanalysen	15	Literatur		40
5.2	Simulationen der Wellenausbreitung im Zeitbereich	16	Bilder		42
6	Beschreibung des entwickelten Messgeräts	19	Tabellen		45
6.1	Sensorelement	20			
6.2	Impaktorelement	21			
6.3	Architektur der Messelektronik	22			
6.3.1	Mess-PC	22			
6.3.2	Impaktorsteuerung	23			
6.3.3	Impaktortreiber	23			
6.3.4	Zusätzliche optionale Sensorik	24			
6.4	Vorgehen bei der Messdurchführung ..	24			
7	Datenauswertung	25			
8	Durchgeführte Messungen	27			
8.1	Ausbaustücke in Freilager	27			
8.2	Ausbaustücke auf dem Gelände der BAST	27			
8.3	Messungen an Fahrbahnen im Betriebszustand	30			
8.3.1	Messungen A 92, Freising Ost	30			

1 Einleitung

In Betonbauweise erstellte Bundesautobahnen (ca. 30 % des Autobahnnetzes [1]) sind zum Teil von potenziell gefährlichen Schadensbildern betroffen, welche die Restlebensdauer der Fahrbahnen entscheidend herabsetzen oder sogar die Betriebssicherheit gefährden. Zu solchen Schädigungen zählen Delaminationsstörungen und horizontale Risse im Inneren der Fahrbahndecke. Diese Schädigungen können ohne jegliche auf der Oberfläche erkennbare Anzeichen auftreten. Als Entstehungsmechanismen für derartige Schäden kommen verschiedene Ursachen – wie mechanische, thermische und chemische Beanspruchung – und deren Kombinationen in Betracht. So traten z. B. im Sommer 2013 vermehrt Schäden in Form von Abplatzungen des Oberbetons im Bereich der Fugen auf. Als Ursachen gelten hier thermische Spannungen aufgrund von Hitze und hoher solarer Einstrahlung. Daneben trat das in den Medien als „Blow-Up“ bezeichnete Schadensbild – in allerdings weit geringerer Häufigkeit – auf. Bei Fahrbahndecken die vom chemischen Phänomen AKR (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) betroffen sind, wurden vermehrt Horizontalrisse in unterschiedlichen Tiefen im Fugenbereich beobachtet. Bei weiterem Fortschreiten der Degradation oder ungünstigen Kombinationen mit anderen Einflüssen (z. B. hohe Verkehrslasten) kann es auch hier zu Abplatzungen von Betonteilen kommen.

Bei Verdacht auf solche Schadensfälle ist der Einsatz zerstörungsfreier Prüfverfahren angezeigt, um gefährdete Bereiche durch Risse im Entstehungsstadium vor dem geschilderten mechanischen Versagen der Betondecke zu detektieren. Eine weitere Untersuchung der ursächlichen Schadensmechanismen wird im hier bearbeiteten Forschungsvorhaben nicht angestrebt. Vielmehr soll ein System zur zerstörungsfreien Detektion vorhandener Schäden entwickelt werden. Eine Schadensdetektion und Lokalisierung ist v. a. in wirtschaftlicher Hinsicht von Interesse, da eine Instandsetzung oder ein Neubau von geschädigten Straßenabschnitten oft nicht flächendeckend erfolgen kann. Die zerstörungsfreie Detektion geschädigter Abschnitte stellt sich in der Praxis allerdings als schwierig dar. Eine zweifelsfreie Lokalisierung und aussagefähige Bewertung der Art, des Umfangs und der Ausprägung des Schadens ist i. d. R. nur durch die Entnahme von Bohrkernen aus der Fahrbahndecke möglich. Dies gilt insbesondere für die Detektion von Rissen mit sehr geringen Rissoffnungsweiten. Für die Analyse von Streckenab-

schnitten mit diesem zerstörenden, stationären und punktuellen Verfahren ist auf Grund des notwendigen Stichprobenumfanges ein hoher personeller sowie gerätetechnischer Aufwand notwendig.

Trotz einiger vielversprechender und in aktueller Literatur diskutierter Ansätze existiert zur Bild der in diesem Forschungsvorhaben relevanten Schädigungen noch kein etabliertes Messverfahren. Übliche Verfahren zur Untersuchung von Betonbauteilen, wie z. B. Potenzialfeldmessung, Georadar oder Ultraschall weisen zwar einen hohen Verbreitungs- und Automatisierungsgrad auf, für die Detektion der erwähnten Schäden in Betonfahrbahnen sind sie jedoch aufgrund entscheidender Nachteile, wie z. B. zu geringem Auflösungsvermögen oder zu langsamer Messgeschwindigkeit, i. d. R. ungeeignet.

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist deshalb die Entwicklung und Erprobung eines Messprinzips einschließlich der Umsetzung in einen Funktionsprototyp, der scannende Messungen auf Betonfahrbahnen erlaubt, um Bereiche mit horizontalen Rissen und Delaminationen zu identifizieren. Mithilfe der Messergebnisse sollen Bereiche eingegrenzt werden können, in denen kritische Schädigungen vorliegen. Autobahnbetreiber können so gezielt Instandsetzungsmaßnahmen einleiten und die Betriebssicherheit und Restlebensdauer von Betonfahrbahnen erhöhen.

2 Stand von Wissenschaft und Technik

Zur Bild und Charakterisierung des inneren Zustands von Strukturen aus Beton stehen verschiedene zerstörungsfreie Verfahren zur Verfügung. Eine (nicht vollständige) Übersicht über Verfahren mit Bewertungskriterien im Hinblick auf die im Forschungsvorhaben vorliegende Problemstellung gibt Tabelle 1. Neben der grundsätzlichen Eignung des physikalischen Messprinzips für die Fragestellung, muss vor allem auch die Automatisierbarkeit im Hinblick auf die zu bearbeitende Messaufgabe beurteilt werden. Unter den aufgezählten Verfahren sind generell Verfahren, die auf elastischen bzw. mechanischen Prinzipien beruhen mit größerem Potenzial für die Fragestellung des vorliegenden Forschungsvorhabens einzustufen als z. B. elektromagnetische Verfahren. Aufgrund dieser Überlegungen wurde eine Bewertung der Verfahren im Hinblick auf das Potenzial für das vorliegende Forschungsvorhaben getroffen (siehe Tabelle 1).

Verfahren	Eignung zur Abbildung von Delaminationen	Automatisierbarkeit	Anwendbarkeit auf große Streckenabschnitte	Kosten	Komplexität
Georadar	Auflösung / Sensitivität gängiger Systeme zu gering	gut	gut, schnelle Scangeschw.	hoch	hoch, aber Integrierte Systeme schon am Markt verfügbar
Infrarotthermographie	nur flache Delam.	gut	gering, zu starke Abhängigkeit von Umgebungsbedingungen	hoch	gering
ERT	Forschungsbedarf	eher gering	schlecht	unbekannt	gering, aber schwer automatisierbar
Ultraschall, kontaktgebunden	gut, Einschränkungen je nach Rissweite	Systeme vorhanden, messtechnisch aufwendig	Kontaktverfahren, verhindert kontinuierliche Messfahrt	hoch	mittel, weit verbreitet
Ultraschall luftgekoppelt	Einschränkungen je nach Rissweite	gut	eher Laboranwendung	hoch	aufwändiger Aufbau (konstante Einschallwinkel nötig)
“Chain Drag”	nur flache Delam.	gering	sehr gering	gering	sehr gering
Oberflächenwellen	Forschungsbedarf	gut (kombinierbar mit IE)	eher gering	s. IE	s. IE
Impakt-Echo (IE)	gut	gut	kombinierbar mit luftgekoppelter Sensorik, damit scannender Einsatz möglich	vergleichsweise gering	Optimierungsbedarf bei Signalzu-Rausch-Verhältnis

Tab. 1: Übersicht zerstörungsfreier Prüfverfahren mit Potenzial zur vorliegenden Fragestellung

2.1 Verfahren mit eingeschränktem Potenzial

Ein wichtiges Kriterium in Bezug auf die Automatisierbarkeit eines Verfahrens stellen die für eine Einzelmessung nötigen Randbedingungen dar. Diese Einschränkung betrifft z. B. das Thermographie-Verfahren. KEE et al. [2] zeigen beispielsweise die grundsätzliche Eignung thermographischer Aufnahmen zur Bild von Delaminationen und verweisen dabei auf bestehende US-amerikanische Standards [3]. Jedoch wirkt sich bei diesem Verfahren eine Abhängigkeit von der Erwärmung der Fahrbahndecke durch den Sonnenstand negativ aus. Dadurch ist eine routinemäßige und automatisierte Anwendung auf lange Streckenabschnitte nicht möglich.

Andererseits existieren Systeme, wie z. B. Georadar, die zwar sehr schnelle, automatisierte Messungen erlauben, die aber für die hier relevanten Störungen nicht empfindlich genug sind. Außerdem sind die Reflexionsamplituden, die beim Radarverfahren für die Interpretation genutzt werden, abhängig vom Feuchtegehalt sowohl des Betons als auch vom Feuchtegehalt abzubildender Risse oder Del-

aminationen [4]. Dadurch wird eine korrekte Interpretation im Hinblick auf Risse deutlich erschwert.

Ein in der Praxis noch wenig etabliertes Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung von Beton ist das ERT-Verfahren (Electrical Resistivity Tomography). Zur ERT sind vergleichsweise wenige, grundlegende Studien mit bislang hauptsächlich akademischen bzw. Labor-Anwendungen bekannt [5-7]. Messtechnisch sind diese Ansätze noch nicht routinemäßig an Beton anwendbar. Hauptgründe liegen in der problematischen Einkopplung der nötigen Messströme und den unklaren Effekten von realen Delaminationen. Einige Studien behandeln nur künstlich erzeugte Delaminationen und Risse [8]. Eine Umsetzung in ein automatisiertes Prüfsystem wäre mit aufwändiger Grundlagenforschung verbunden. In CHOTEAU et al. [9] finden sich hierzu Ansätze.

Gefügeänderungen beeinflussen die Ausbreitung mechanischer Wellen. Deshalb ist das Ultraschallverfahren in Transmissions- oder Echo-Anordnung ein effektives Mittel zur Detektion von Rissen in Betonstrukturen. Gängige Ultraschall-Prüffrequenzen für Beton erstrecken sich über einen Bereich von 20

bis 500 kHz. Für dieses Verfahren existieren neben Prüfköpfen, die ein Koppelmittel zur Ankopplung brauchen, auch Sensoren, die trocken angekoppelt werden. Jedoch ist für eine Einzelmessung der Prüfkopf in Kontakt mit der Oberfläche der untersuchten Struktur zu bringen. Dadurch werden scannende Messungen in kontinuierlicher Bewegung erschwert.

Neben kontaktgebundenen Ultraschallgeräten stehen auch luftgekoppelte Systeme zur Verfügung [10 – 11]. Bei dieser Technik ist kein direkter Kontakt zwischen Prüfköpfen und Betonoberfläche nötig. Verfahrensbedingt weisen die Quellpulse relativ lange Ein- und Ausschwingzeiten auf, wodurch sich bei Plattenstrukturen Probleme mit Mehrfachechos ergeben. Die Signalausbreitung innerhalb des zu prüfenden Betons ist aufgrund des großen Impedanzkontrastes sehr stark vom Einschallwinkel abhängig. Außerdem ergeben sich bei Messungen in Echo-Anordnung messtechnische Probleme durch den direkten Schallpfad vom Sender zum Empfänger.

Weitere Verfahren, die zur Detektion von Delaminationen eingesetzt werden können, stellen die manuellen Verfahren der Klopfprüfung mit manueller Hammeranregung und der Chain-Drag-Test dar [12]. Diese Methoden sind allerdings ungeeignet für tiefe Delaminationen [13] und unterliegen einer hohen Subjektivität in der Bewertung durch den Ausführenden.

2.2 Verfahren mit Potenzial zum scannenden Einsatz auf Betonfahrbahnen

Bei einer Untergruppe von mechanischen Wellenverfahren, die vielfach zur Untersuchung von Fahrbahndecken, Brückendecken oder anderen plattenförmigen Betonbauteilen zum Einsatz kommen, werden spezielle elastische Wellentypen, sog. Lamb-Wellen oder einzelne Moden dieser Wellentypen gezielt angeregt und zur Schadensdetektion genutzt. Zu diesen Verfahren gehören das sog. Impakt-Echo-Verfahren (IE) [14 – 15] und das SASW bzw. MASW-Verfahren (SASW: Spectral Analysis of Surface Waves, MASW: Multichannel Analysis of Surface Waves [16 – 18]). Das Impakt-Echo-Verfahren bietet einige operationelle und messtechnische Vorteile:

(1) Die Erzeugung der elastischen Wellen kann durch einen mechanischen Impakt erfolgen. Diese

Form der Anregung ist technisch relativ einfach umsetzbar und automatisierbar.

(2) Die zur Bild von Delaminationen relevanten Wellentypen (z. B. Lamb-Wellen) haben geringere Frequenzen als Ultraschallwellen. Dadurch werden diese Wellen weniger stark gedämpft.

(3) Als Konsequenz strahlen diese Wellentypen auch signifikant Energie in die Luft ab. Somit ist eine luftgekoppelte Messung möglich [19]. Luftgekoppelt bedeutet, dass kein direkter Kontakt des Sensorelements zum untersuchten Bauteil nötig ist. Dies ist eine wichtige Voraussetzung für ein scannendes Messsystem.

Da sich die für Impakt-Echo-Messungen relevanten Frequenzen (ca. 1 – 20 kHz) im hörbaren Schall-Bereich befinden, haben die nötigen messtechnischen Komponenten eine breite Verfügbarkeit und sind verglichen mit Ultraschallmesstechnik relativ preiswert. Aufgrund der Anregung durch einen mechanischen Impakt entstehen beim Impakt-Echo-Verfahren auch Oberflächenwellen, die ebenfalls zur Auswertung im Hinblick auf Störungen eines Fahrbahndeckenaufbaus analysiert werden können.

Sowohl ältere Studien wie auch aktuelle Arbeiten weisen die Eignung des Impakt-Echo-Verfahrens zur Bild von Delaminationen und dünnen Rissen nach. CHENG und SANSALONE geben eine minimale Rissweite von 0.025 mm an, die mit dem Impakt-Echo-Verfahren abbildbar ist [20]. OH und ZHU bilden durch luftgekoppelte Impakt-Echo-Messungen künstliche Delaminationsstörungen ab [19, 21]. Shokouhi liefert numerische Analysen zu erwartender Messeffekte bei Impakt-Echo-Signalen an Brückendecken aus Beton mit Delaminationsschäden [22].

Es existieren bereits Automatisierungen der Impakt-Echo- bzw. Oberflächenwellen- Verfahren zur Anwendung auf Betonstrukturen und Fahrbahnen [23 – 25]. Im Ansatz von TINKEY und OLSON [23] werden auf Basis des Impakt-Echo-Verfahrens Delaminationen in scannender Weise detektiert. Allerdings wird zur Registrierung der elastischen Wellen kontaktgebundene Sensorik eingesetzt. Dadurch ergibt sich eine sehr hohe mechanische und elektrische Komplexität der Messapparatur. Als problematisch wird in dieser Studie die Verwendung von luftgekoppelten Sensoren bewertet, da deren Daten stärker von Umgebungsrauschen und Störungen

durch Impaktgeräusche überlagert sind. In einer Studie von POPOVICS [25] wird ein Schwerpunkt auf die akustische Dämmung der Impaktoren gelegt. Hier wird die Signalqualität der luftgekoppelten Aufzeichnungen sogar besser als die Signalqualität der kontaktgebundenen Sensoren bewertet.

Alternative Ansätze für scannende Messverfahren mit akustischer Signalaufzeichnung beschränken sich auf die Auswertung der Dispersion von Oberflächenwellen, da hier im Gegensatz zur Impakt-Echo-Methode eine größere räumliche Separation zwischen luftgekoppelter Sensorik und Impaktquellen möglich ist [26–27]. Diese Ansätze legen einen Schwerpunkt auf die Identifikation von Schichtaufbauten von Fahrbahndeckensystemen und auf die Extraktion von Materialparametern. Die Detektion von Delaminationsstörungen steht in diesen Studien nicht im Vordergrund. Die Geschwindigkeiten mit denen die Geräte eingesetzt wurden, werden in diesen Studien nicht genau quantifiziert sondern nur mit Schrittgeschwindigkeit umschrieben.

Als zusammenfassende Bewertung der verfügbaren Verfahren kann festgestellt werden, dass das Impakt-Echo-Verfahren gegenüber anderen Verfahren entscheidende Vorteile für die Entwicklung eines scannenden Systems zur Detektion von Delaminationsstörungen in Betonfahrbahnen aufweist. Zum einen ist aufgrund des physikalischen Messprinzips das Verfahren in der Lage, Delaminationen abzubilden. Zum anderen ist das Messprinzip automatisierbar und die Messung kann über luftgekoppelte Sensoren erfolgen. Da die mechanische Anregung an der Oberfläche der untersuchten Plattenstruktur erfolgt, ergibt sich als Einschränkung des Verfahrens, dass nur eine oberste Rissebene abgebildet werden kann. Tieferliegende Störungen können aufgrund der mechanischen Entkopplung durch eine näher an der Oberfläche liegenden Rissebene nicht mehr mit dem durch den Impakt erzeugten Wellenfeld wechselwirken.

Eine luftgekoppelte Aufzeichnung birgt potenziell Probleme hinsichtlich des Signal-Rausch-Verhältnisses der aufgezeichneten Signale. Diese Sensoreigenschaft zu optimieren wird daher ein wichtiger Forschungsinhalt sein. Dabei kann auf Erfahrungen aus eigenen Arbeiten und anderen Arbeiten zu luftgekoppelten Sensoren zurückgegriffen werden [28–30].

3 Forschungskonzept und geplantes Vorgehen

Ausgehend von der Bewertung des Potenzials bestehender Verfahren wird eine Weiterentwicklung des Impakt-Echo-Verfahrens angestrebt. Dabei sind spezielle Randbedingungen für die Anwendung auf Betonfahrbahnen zu berücksichtigen. Dies gilt sowohl für zu erwartende physikalische Parameter, wie z. B. Dicken der Betonplatten oder Ausdehnung von Fehlstellen. Ebenso müssen operationelle Randbedingungen berücksichtigt werden. So sollen mit dem zu erstellenden Messgerät insbesondere Messungen in kontinuierlicher Bewegung auf in Betrieb befindlichen Autobahnen möglich sein.

Vor der eigentlichen Implementierung eines Messsystems wurde durch numerische Simulationen verifiziert, dass das gewählte physikalische Messprinzip sensitiv auf relevante Schadensbilder reagiert. Verschiedene numerische Verfahren werden in Kapitel 5 beschrieben.

Um ein Impakt-Echo-basiertes Verfahren in kontinuierlicher Bewegung und somit „scannend“ anwenden zu können, ist neben der Optimierung des einzusetzenden Sensorelements auch eine zuverlässige Automatisierung einer geeigneten Anregungsquelle notwendig.

Sensorseitig wird eine luftgekoppelte Aufzeichnung angestrebt. Dieser Begriff ist kontrastierend zu konventionellen Aufzeichnungsstrategien zu verstehen, wo ein Sensor (ggf. auch mehrere) in direkten Kontakt mit der Oberfläche des zu prüfenden Objekts gebracht werden muss. Eine Ankopplung über die Luft bedeutet also, dass kein mechanischer Kontakt des Sensors zur Oberfläche nötig ist. Dies ist eine wesentliche Voraussetzung für den scannenden Einsatz des zu entwickelnden Verfahrens.

Bei der luftgekoppelten, akustischen Signalaufzeichnung besteht allerdings die Gefahr, dass das Messsignal durch Umgebungseinflüsse (wie z. B. geräteinterne Vibrationen, Rollgeräusche, Störgeräusche durch den Impaktgeber) oder äußere Störquellen (z. B. Verkehrslärm) verschlechtert wird. Sensortechnisch ergibt sich also die Schwierigkeit ein ausreichend großes SNR (Signal-zu-Rausch-Verhältnis) zu erzielen, d. h. Störeinflüsse müssen gegenüber dem gewünschten Messsignal unterdrückt werden. Hier wird ein Ansatz über eine Arrayanord-

nung mehrerer Einzelsensoren (MEMS-Mikrofone) verfolgt (siehe Kapitel 6.1 u. [30]).

Die Impakt-Anregung muss folgende Kriterien erfüllen:

(1) Anregung eines passenden Frequenzbereichs um die Detektionsziele anzuzeigen zu können.

(2) Anregung mit ausreichend großer Energie um ein verwertbares SNR am Sensor zu erzeugen.

(3) Anregung mit ausreichender zeitlicher Wiederholungsfrequenz, um auch bei Messungen in Bewegung eine möglichst große räumliche Dichte an Anregungspunkten erzielen zu können.

Um diese Anforderungen in einem Prototypen umzusetzen, wurde eine Microcontroller-gesteuerte Impaktoreinheit auf der Basis eines Doppelhubmagneten entwickelt (siehe Kapitel 6.2).

Neben diesen Grundanforderungen an Sensor und Quelle galt es, eine feldtaugliche Plattform zu erstellen, die alle genannten Komponenten einschließlich der dafür nötigen Elektronik, Stromversorgung und Benutzerinterface enthält (siehe Kapitel 6.3).

Parallel zur Optimierung der messtechnischen Komponenten wurde eine Strategie zur Datenverarbeitung und Ergebnisdarstellung erstellt, die es ermöglicht, schadensrelevante Information aus den Messdaten visuell für Interpretationen durch geschulte Nutzer des Systems aufzubereiten (siehe Kapitel 7). Ein unter den genannten Gesichtspunkten erstellter und iterativ verbesserter Prototyp wurde schließlich an verschiedenen Objekten zur Anwendung gebracht (siehe Kapitel 8).

4 Allgemeine Grundlagen zum Impakt-Echo-Verfahren

Beim Impakt-Echo-Verfahren werden durch einen mechanischen Impakt auf der Oberfläche des zu untersuchenden Bauteils elastische Wellen angeregt. Diese erzeugen im Bauteil Resonanzeffekte, die mit speziellen Oberflächenwellenmoden theoretisch beschrieben werden können [31]. Dadurch ist das Impakt-Echo-Verfahren besonders geeignet für Dickenmessungen von plattenförmigen Bauteilen. Aber auch für andere Einsatzzwecke wie z. B. Risstiefenbestimmungen, die Detektion von lokalen Delaminationen oder die Ermittlung von Hinterfüll-

lungszuständen von Betonteilen kann das Verfahren zur Anwendung gebracht werden [21, 32-33].

Im Gegensatz zu klassischen Ultraschallverfahren nutzt das Impakt-Echo-Verfahren geringere Messfrequenzen. Die damit verbundenen längeren Wellenlängen führen zwar im Allgemeinen zu geringeren Auflösungen als bei Ultraschallverfahren. Da die Signale einer Impakt-Echo-Messung zur Auswertung in den Frequenzbereich transformiert werden, sind bei korrekter Berücksichtigung von Randeffekten und genauer Kenntnis der Materialparameter jedoch Dickenmessungen mit sehr hoher Genauigkeit möglich. Weiterhin ergibt sich aus den bei Impakt-Echo relevanten Frequenzen ein messtechnischer Vorteil: Die für die Auswertung relevanten elastischen Wellenstrahlen Schallenergie im hörbaren Frequenzbereich in die Luft ab. Damit ist eine luftgekoppelte Sensorik auf Basis kostengünstiger Mikrofonmesstechnik realisierbar. Der Hauptvorteil einer luftgekoppelten Aufzeichnungsmethode ist in der Möglichkeit zu sehen, ein scannendes Messgerät zu implementieren, das in kontinuierlicher Bewegung eingesetzt werden kann.

Erfolgt ein mechanischer Impakt auf einer Plattenstruktur mit ausreichend großer lateraler Ausdehnung (Seitenlänge jeweils länger als fünffache Plattendicke), so wird das in unmittelbarer Umgebung des Anregungspunktes gemessene Vibrationssignal an der Plattenoberfläche von der sog. Dickenresonanz dominiert. Es handelt sich dabei genau genommen um eine symmetrische Plattenwellenmode mit Gruppengeschwindigkeit von Null. Zur Ermittlung der Frequenz f_r dieser Wellenmode wird das Signal in den Frequenzbereich transformiert (siehe Bild 1). Mittels der Beziehung

$$f_r = \frac{\beta \cdot v_p}{2 \cdot d} \quad \text{Gl. 1}$$

(v_p : Kompressionswellengeschwindigkeit in Beton, $\beta=0.96$) kann die Frequenz der Dickenresonanz mit der Plattendicke (d) korreliert werden. Historisch wurde die Dickenresonanz zunächst als Mehrfachreflexion von Kompressionswellen interpretiert, die zwischen den Plattenbegrenzungen mehrfach reflektiert werden. Aus der genauen Analyse von Messdaten wurde dann für Dickenmessungen der Korrekturfaktor β empirisch abgeleitet. Die Relation zwischen Messfrequenz und Kompressionswellengeschwindigkeit kann jedoch auch über die Lamb-Wellen-Theorie hergestellt werden [31]. So ergibt sich außerdem eine Abhängigkeit des Kor-

rekturfaktors β von der Poissonzahl. Für typische, auch im Straßenbau verwendete Betone, stellt die Verwendung von $\beta=0.96$ eine ausreichend genaue Näherung dar.

Für scannende Untersuchungen mit dem Impakt-Echo-Verfahren muss die Anregung und Signalaufzeichnung jeweils an mehreren Punkten wiederholt werden. Zur Ergebnisdarstellung kann statt der Darstellung eines Frequenzgraphen ein farblicher kodierter Frequenzverlauf verwendet, und so eine zweidimensionale Repräsentation von Frequenzverlauf und Messposition erzeugt werden.

Zur Darstellung der Messergebnisse in folgenden Kapiteln wird die in Bild 1 gezeigte Farbskala verwendet. Bei Kenntnis der Kompressionswellengeschwindigkeit kann die Frequenzachse mit der oben genannten Beziehung in den Dicken- bzw. Tiefenbereich transformiert werden. Diese Umrechnung gilt allerdings nur für die Dickenresonanz. Für Frequenzanzeigen, die durch andere physikalische Effekte hervorgerufen werden, gilt diese Tiefenangabe nicht.

Aufgrund von Variationen des Energieübertrags von kinetischer Energie des Impaktorelements in elasti-

sche Wellenenergie müssen Impakt-Echo-Daten in der Regel normiert werden. Diese Normierung kann entweder im Zeit- oder im Spektralbereich erfolgen. Aufgrund dieser Normierung trägt die Amplitudenachse der spektralen Darstellungen i. d. R. keine Einheit mit direkter physikalischer Bedeutung.

Neben der speziellen Plattenmode der Dickenresonanz können durch die mechanische Impaktanregung auch andere Resonanzeffekte entstehen. Dies trifft für lokale Delaminationen zu, wo mechanisch vom Rest der Platte abgekoppelte Bereiche durch den Impakt zu flexuralen (Biege-) Moden angeregt werden (Bild 2). Bei solchen Biegemoden kann außerdem nicht nur die Grundmode zum Schwingen angeregt werden, sondern es können auch höhere Schwingungsmoden über delaminierten Bereichen angeregt werden.

Zwar können über delaminierten Zonen auch Wellenmoden vom Typ einer Dickenresonanz entstehen, die sich nur innerhalb des delaminierten Bereichs ausbilden. Jedoch haben diese dann bei Delaminationstiefen von wenigen Zentimetern (wie es im Fall von Betonfahrbahnen vorkommen kann) relativ hohe Frequenzen, die schwächer angeregt werden, da die Impaktoren im Normalfall darauf

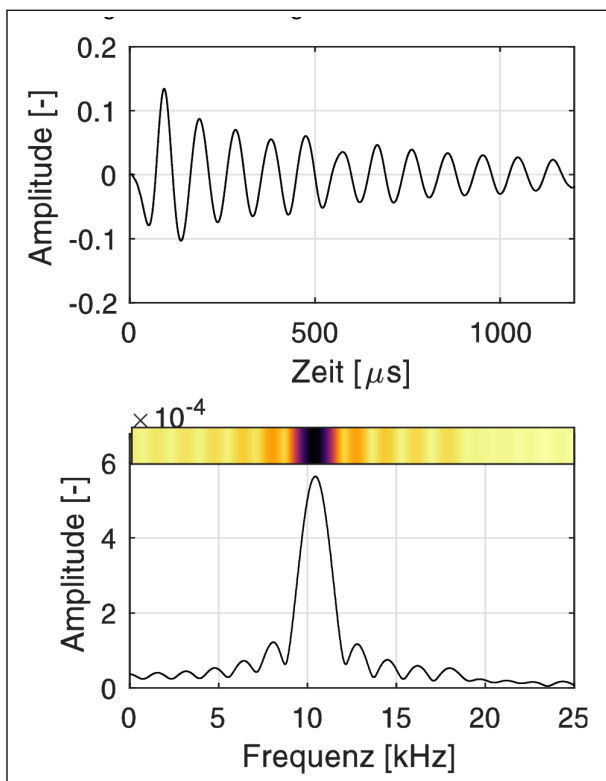


Bild 1: Schematische Darstellung eines Impakt-Echo-Signals (oben) und seine Transformation in den Frequenzbereich als Graph bzw. farblich kodierter Intensitätsplot (unten)

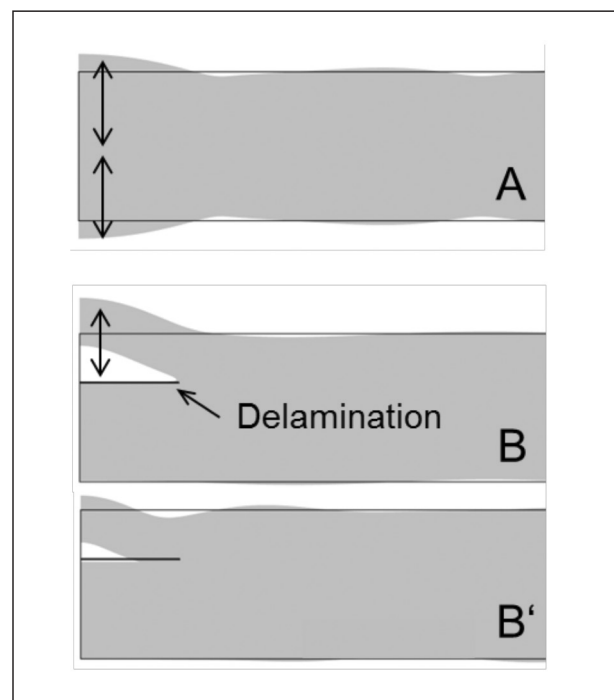


Bild 2: Schematische Darstellung von Schwingungsmoden einer Betonplatte. A: dynamische Deformation einer Platte aufgrund der Dickenresonanz. B: dynamische Deformation über einem delaminierten Bereich in der Grundmode. B': dynamische Deformation über einem delaminierten Bereich in einer höheren Mode

ausgelegt sind, die Dickenresonanz der ungestörten Platte gut anzuregen. Da im Weiteren mit akustischen Impakt-Echo-Messungen gearbeitet wird, ist außerdem zu beachten, dass gewöhnliche Mikrofonmesstechnik nur im Frequenzbereich des hörbaren Schalls (20–20000 Hz) empfindlich ist. Weiterhin nimmt die Dämpfung in Luft bei hohen Frequenzen zu.

Aus diesen grundsätzlichen Phänomenen bei Impakt-angeregten Messungen an Betonplatten leitet sich ein zentraler Interpretationsansatz für die Messergebnisse des hier verfolgten Messprinzips ab: Weisen die Messdaten ein klar erkennbares Frequenzmaximum auf, das mit der Dicke der Platte korrelierbar ist, so ist von einer ungestörten Plattenstruktur auszugehen. Dominieren tiefere Frequenzen das Messsignal, können flexurale Vibrationen aufgrund delaminierter Bereiche vorliegen.

Aufgrund des Messprinzips der mechanischen Impaktanregung können nur Teile der untersuchten Struktur zu Schwingungen angeregt werden, die ausreichend steif mit dem Bereich verbunden sind, wo der Impakt erfolgte. Bei Impaktanregungen an der Oberseite von Fahrbahnplatten ergibt sich in der Praxis daraus die Einschränkung, dass bei mehrschichtigen horizontalen Trennrissen nur eine oberste Rissebene detektiert werden kann.

5 Simulationsverfahren

Das Impakt-Echo-Verfahren analysiert das dynamische Verhalten von Strukturen nach einer Impaktanregung. Der mechanische Impakt erzeugt dabei Phänomene, die sowohl über Modelle der Wellenausbreitung als auch über eine Analyse des Schwingungsverhaltens der Gesamtstruktur beschrieben werden können. Dementsprechend können verschiedene Simulationsmethoden zur Anwendung kommen, um die zu erwartenden Messeffekte bei Fahrbahnplatten aus Beton abzuschätzen und zu charakterisieren.

Ziel der durchgeführten Simulationen war neben der Erarbeitung der Simulationsmethodik an sich, vor allem die Abschätzung zu erwartender Messfrequenzen und Randeffekte bei Vorliegen von typischen, idealisierten Delaminationsstörungen. Diese Abschätzung ist für die weiteren Entwicklungsschritte von großer Wichtigkeit, da die Signalanregung, Sensorik, Aufzeichnungselektronik und Datenverarbeitung darauf abgestimmt werden müssen. Zu

unterscheiden sind Delaminationen im Platteninneren und Delaminationen an Begrenzungen von Platten, insbesondere an Fugen. In diesen Fällen bewirken andere Zwangskräfte, die auf den delaminierten Bereich wirken, jeweils andere Formen der Wellen- und Schwingungsausbreitung und somit variierende Messfrequenzen. Mit dieser Zielsetzung wurden vereinfachte Modelle von Betonfahrbahndecken mit idealisierten Delaminationen erstellt und mit verschiedenen numerischen Methoden untersucht. Die Simulationen sind generell als qualitative Abschätzung prinzipieller Phänomene aufzufassen. Quantitative Abweichungen von Messergebnissen sind z. B. aufgrund von unbekanntem Materialparametern (z. B. dynamischer E-Modul) und variierenden Randbedingungen (z. B. Materialien an Plattenunterseiten, Abweichungen der Parallelität von Messspuren zu Begrenzungskanten, Resthaftung an Rissen, etc.) zu erwarten. Die in diesem Arbeitsabschnitt erarbeiteten Methoden wurden auch in späteren Projektschritten zur Evaluierung und Interpretation realer Messdaten herangezogen.

5.1 Eigenfrequenzanalysen

Erfolgt eine impulsartige Anregung über delaminierten Bereichen einer Betondecke, so kann dieser Bereich zu freien Eigenschwingungen angeregt werden. Die Auslenkung der Oberfläche durch den Impakt erfolgt dabei senkrecht zur Platte. Dadurch werden hauptsächlich Biegemoden (flexurale Moden) angeregt (siehe Kapitel 4).

Aufgrund dieses Zusammenhangs wurden Eigenfrequenzanalysen an radialsymmetrischen Plattenmodellen durchgeführt. Die gewählte Symmetrie er-

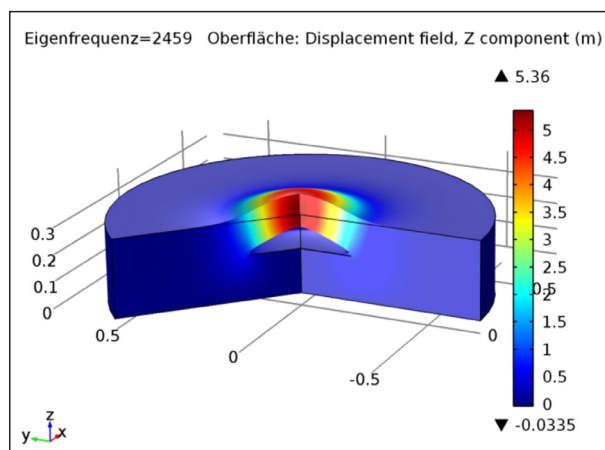


Bild 3: Simulation der vertikalen Deformation bei der ersten Eigenschwingform einer flexuralen Mode bei 2,5 kHz über einem delaminierten Bereich in einer radialsymmetrischen Betonplatte

laubt eine effiziente Simulation von Eigenfrequenzen und Eigenformen kreisförmiger Delaminationen. Die idealisierten Delaminationen wurden als komplett getrennte Schichten, die nur an den seitlichen Begrenzungen einen Verbund zum übrigen Betonkör-

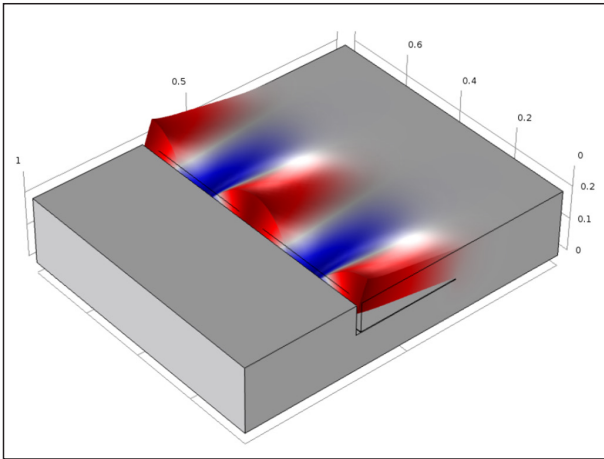


Bild 4: Eigenform bei 2846 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge

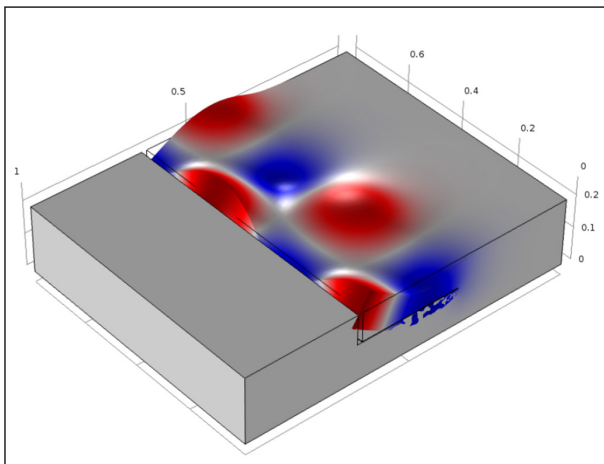


Bild 5: Eigenform bei 3225 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge

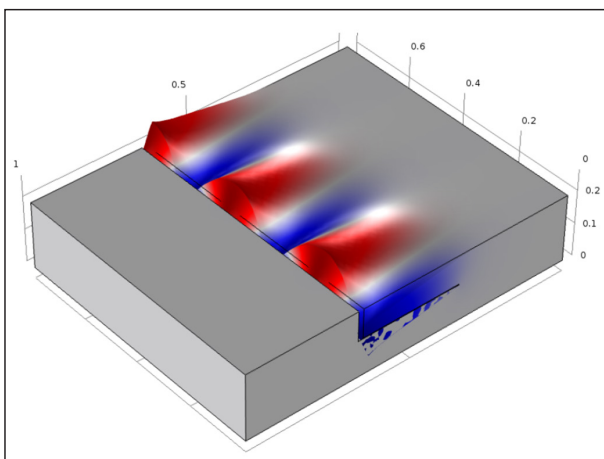


Bild 6: Eigenform bei 3968 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge

per haben, angenommen. Exemplarisch zeigt Bild 3 die erste Eigenform einer Delamination mit 40 cm Durchmesser in 13 cm Tiefe in einer 30 cm dicken Betonplatte (E-modul 25 GPa, Dichte 2.300 kg/m³). Da im Forschungsvorhaben ein akustisch arbeitendes Messverfahren angestrebt wird, ist nur die vertikale Komponente der Eigenformen von Interesse. Nur die Normalkomponente von Schwingungen der Plattenoberfläche kann zur Abstrahlung von Schallenergie in die Luft beitragen.

Delaminationen an Plattenfugen sind relevante Detektionsziele für das zu entwickelnde Messverfahren, weisen allerdings andere Eigenschwingformen auf als isolierte Delaminationen im Inneren von homogenen Plattenbereichen. Deshalb wurden auch für solche Szenarien Simulationen von möglichen Eigenfrequenzen durchgeführt. Bild 4 bis Bild 6 stellen exemplarisch einige relevante Eigenmoden delaminierter Bereiche an einer Plattenfuge dar. Zusammenfassend für die Eigenfrequenzanalysen von Delaminationen an Plattenfugen kann als Ergebnis festgehalten werden, dass sich für durchgängige Delaminationen mit Erstreckungen von 5 - 35 cm flexurale Moden im Frequenzbereich von 2 - 6 kHz ergeben. Somit sind diese Frequenzen im für Impact-Echo-Messungen relevanten Frequenzbereich und akustisch messbar.

5.2 Simulationen der Wellenausbreitung im Zeitbereich

In Ergänzung zur Simulation von Eigenfrequenzen kann auch das Schwingverhalten bzw. die Ausbreitung elastischer Wellen nach einem Impact explizit im Zeitbereich simuliert werden. Da derartige Simulationen wesentlich zeit- und rechenintensiver als modale Eigenfrequenzsimulationen sind, bietet es sich an, das Simulationsmodell auf zwei Raumdimensionen (2D) zu reduzieren. Mit diesem Ansatz können scannende Messungen simuliert werden, da Quell- und Sensorpunkte explizit angegeben werden. Dadurch können z. B. sog. Geometrieeffekte abgeschätzt werden. Darunter sind Einflüsse auf das Messsignal zu verstehen, die durch Reflexionen an Plattenrändern und geometrischen Abweichungen von der idealen Plattenstruktur hervorgerufen werden. Besonders der Einfluss von Fugen kann so beobachtet werden, da als wichtiges Schadensbild horizontale Risse im Bereich der Fugen von dem zu entwickelnden Messgerät abgebildet werden sollen.

Zur Simulation einer scannenden Messdurchführung wurden mit dem FDTD-Verfahren (Finite-Difference-Time-Domain, [34]) mehrere Impaktanregungen an aufeinanderfolgenden Positionen simuliert (Quellpunktabstand 2 cm). Als Simulationsergebnis wird die resultierende Schwingung an der Plattenoberseite in der Umgebung des Quellpunktes aufgezeichnet und in den Frequenzbereich transformiert (siehe Kapitel 4). Da das angestrebte Messverfahren die Signale mit einem Sensor-Array aufzeichnen wird, werden hier auch die vertikalen Komponenten der Plattenschwingungen in einem Bereich von 18 cm auf einer Seite des Quellpunktes gemittelt. Mehrere Ergebnisse solcher Einzelsimulationen werden dann farblich kodiert in einem Flächenplot entlang der simulierten Messstrecke dargestellt. Die 2D-Simulationen wurden mit einem ideal elastischen homogenen Betonmodell mit 20 cm Dicke und absorbierenden Rändern durchgeführt (keine Dämpfung, P-Wellengeschwindigkeit 4300 m/s, Poissonzahl 0,26). Aufgrund der nicht modellierten intrinsischen Dämpfung und der im dreidimensionalen

Fall unterschiedlichen sphärischen Divergenz sind Unterschiede zu realen Messungen zu erwarten. Trotzdem können Phänomene der Anzeigen im Scanverlauf qualitativ interpretiert werden. Die Unterschiede der sphärischen Divergenz betreffen vor allem das Amplitudenverhältnis von Raum- zu Oberflächenwellen. Während im dreidimensionalen Fall Oberflächenwellen auf zylindrischen Wellenfronten divergieren, erfahren diese Wellentypen im zweidimensionalen Fall keine geometrische Dämpfung, da sie sich linear entlang der Begrenzungskante ausbreiten. Deshalb sind Effekte, die auf der Interferenz von Oberflächenwellen mit Raumwellen beruhen, in der 2D-Simulation stärker ausgeprägt, als sie bei Realmessungen zu erwarten wären.

In Bild 8 bis Bild 11 sind simulierte Scanergebnisse an Platten mit variierender Kerbschnitttiefe dargestellt (Breite des Kerbschnitts jeweils 1 cm). Man

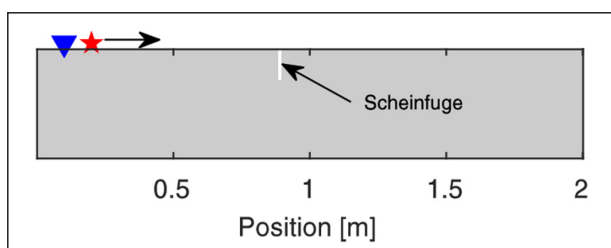


Bild 7: Plattenmodell mit Querscheinfuge für zweidimensionale Simulation von Impaktanregung (Stern) und Aufzeichnung (Dreieck)

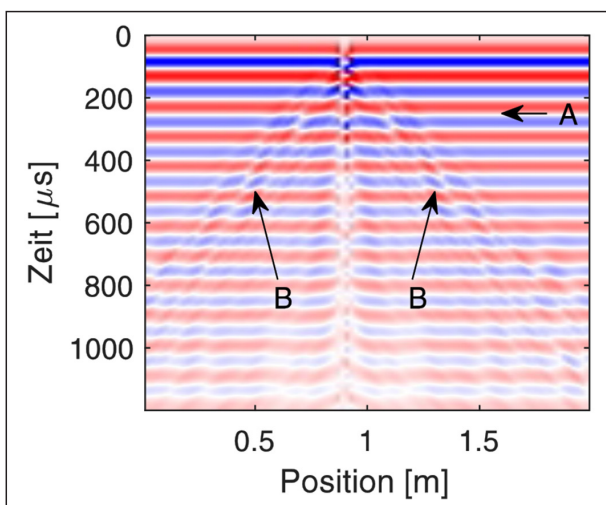


Bild 8: Zeitliche Darstellung simulierter IE-Messungen an dem Plattenmodell in Bild 7. (rot: maximale positive Auslenkung, blau: maximale negative Auslenkung der vertikalen Oberflächenverschiebung.) A: oszillierendes Wellenfeld der Dickenresonanz. B: an der Scheinfuge reflektierte Oberflächenwellen

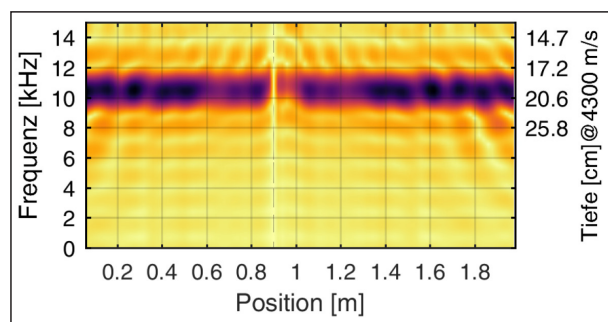


Bild 9: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 4 cm Kerbschnitttiefe

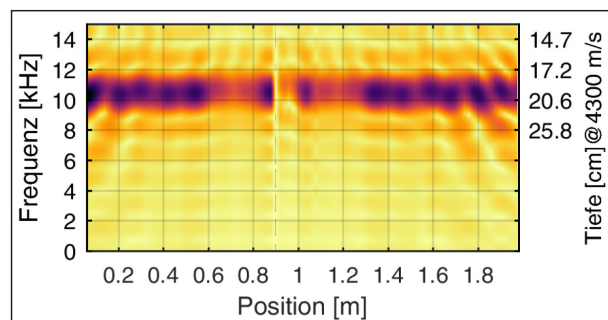


Bild 10: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe

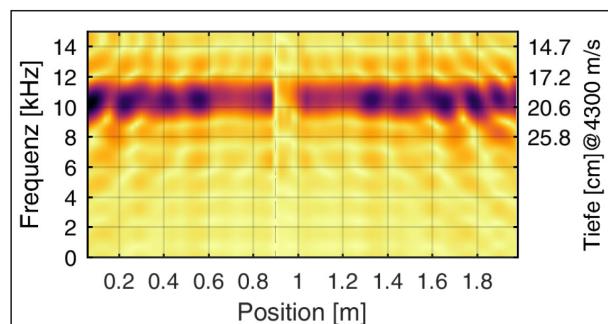


Bild 11: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 8 cm Kerbschnitttiefe

erkennt, dass im Bereich der Fuge die Dickenresonanz abgeschwächt wird. Je tiefer die Fuge ist, desto stärker variiert die Amplitude der Dickenresonanz. Dies ist auf Interferenzen zwischen Raumwellen und Oberflächenwellen, die an der Fuge reflektiert werden, zurückzuführen (siehe Bild 8).

In der Realität tritt an der Stelle der Fuge in der Regel ein durchgehender Vertikalriss auf (siehe Bild 12). Bei der Modellierung eines solchen Risses tritt neben dem geometrisch komplexen Verlauf die Schwierigkeit auf, dass der Riss keine vollständige

Unstetigkeit darstellt, sondern dass sich gerade für die im IE-Verfahren relevanten Wellenlängen eine Reststeifigkeit ergibt. Diese ist durch die Verfüllung des Risses bzw. Verzahnung der Rissflanken durch Zuschlagsmaterialien bedingt. Dies kann in der numerischen Simulation dadurch berücksichtigt werden, dass der Riss nicht als vollständige Trennung des Materials, sondern als ein Bereich mit stark verminderter Steifigkeit und verminderter Dichte angenommen wird (Annahmen für Materialparameter im gerissenen Bereich: P-Wellengeschwindigkeit 3400 m/s Scherwellengeschwindigkeit 150 m/s Dichte 0.5 t/m³).

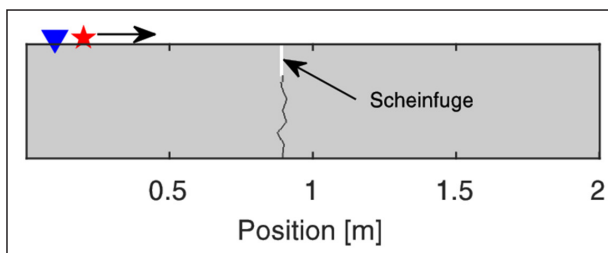


Bild 12: Plattenmodell mit Querscheinfuge (Kerbschnitttiefe 6 cm) und durchgehendem Vertikalriss

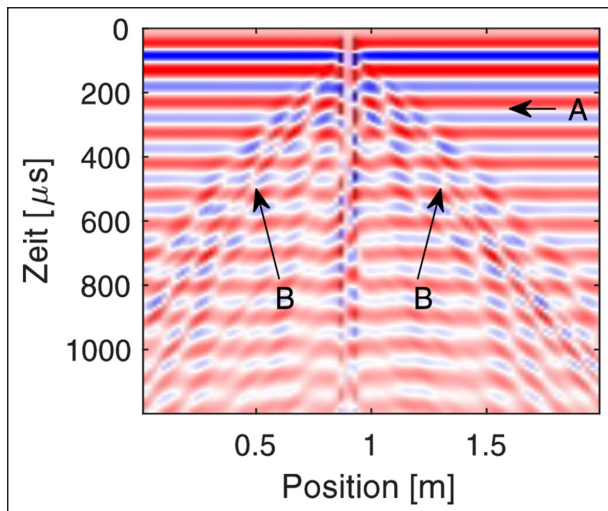


Bild 13: Zeitliche Darstellung simulierter IE-Messungen an dem Plattenmodell in Bild 12. A: oszillierendes Wellenfeld der Dickenresonanz. B: an der Scheinfuge reflektierte Oberflächenwellen

Aufgrund der nun stärkeren Reflexionen von Oberflächenwellen (siehe Bild 13) ergeben sich stärkere Variationen der Dickenresonanzanzeige. Bei veränderten Rissverläufen (Bild 14 bis Bild 16) sind außerdem Variationen der Frequenzanzeigen im Bereich der Fugen zu beobachten. Der Vertikalriss wurde jeweils als zufälliger Polygonzug im Geometriemodell eingefügt. Es lässt sich festhalten, dass sich durch unterschiedliche Verläufe des vertikalen Risses zwar jeweils leicht variierende Frequenzanzeigen an der Fugenposition ergeben. Die Charakteristik der gesamten San-Bild über die Fuge hinweg bleibt aber insgesamt erhalten. D. h. eine qualitative Interpretation der Anzeige wird durch Variationen im Rissverlauf nicht beeinflusst.

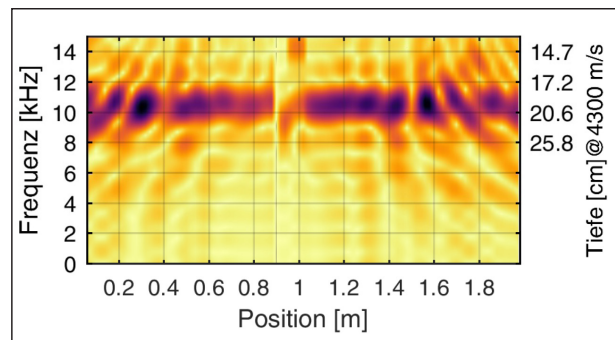


Bild 15: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und anderem zufälligem Rissverlauf

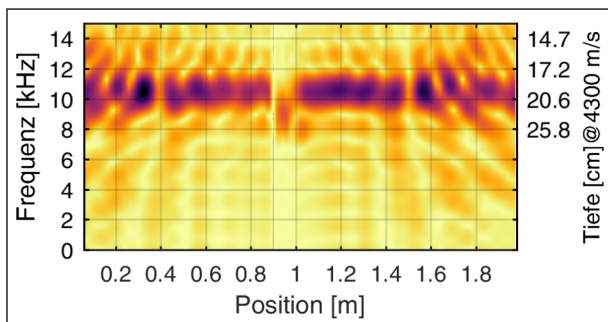


Bild 14: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und vertikalem Riss wie in Bild 12

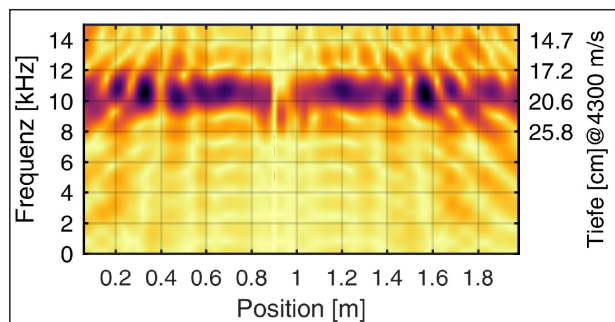


Bild 16: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und anderem zufälligem Rissverlauf

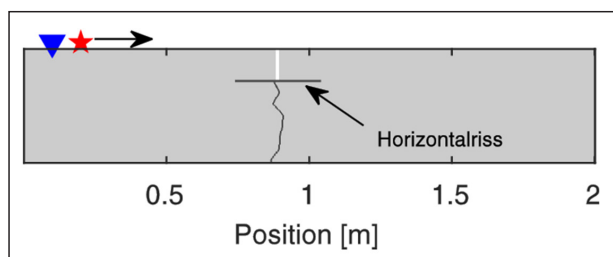


Bild 17: Plattenmodell mit Querscheinfuge (Kerbschnitttiefe 6 cm), durchgehendem Vertikalriss und im Kerbschnittgrund ansetzender Delamination (Horizontalriss variierender Länge)

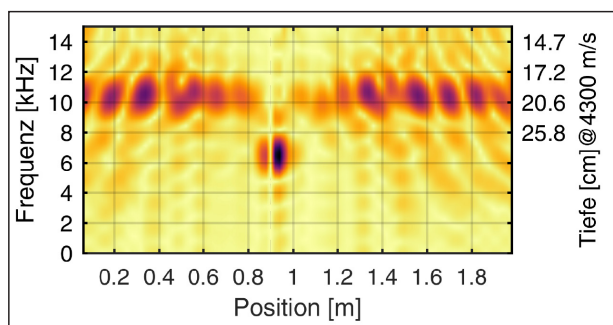


Bild 18: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 5 cm)

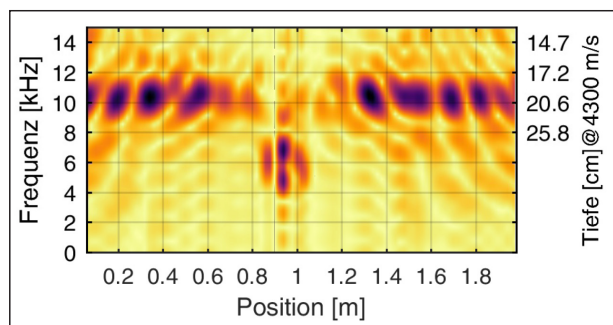


Bild 19: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 10 cm)

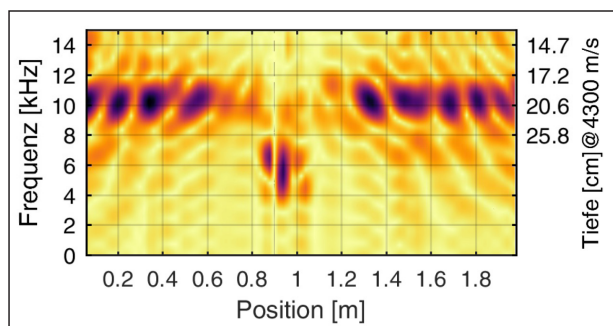


Bild 20: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 15 cm)

Als wichtiges Schadensbild wurde weiterhin der Einfluss von horizontalen Rissen im Bereich einer Fuge simuliert (siehe Bild 17). Bild 18 bis Bild 20 zeigen den Einfluss von horizontalen Delaminationen verschiedener Länge. Man erkennt deutliche Frequen-

zanzeigen im Bereich der Delaminationen, die mit flexuralen Schwingungen der delaminieren Bereiche zusammenhängen. Hier decken sich qualitativ die Ergebnisse der modalen Simulationen und der Simulation im Zeitbereich: Die delaminierten Bereiche werden lokal zu Eigenschwingungen angeregt. Diese Eigenschwingungen liegen bei tieferen Frequenzen als die Resonanzfrequenzen ungestörter Plattenbereiche.

Die an diesen simulierten Scanergebnissen gemachten Beobachtungen sind als qualitative Abschätzungen von Messeffekten zu verstehen. Bei Realmessungen kann nun darauf geachtet werden, Einflüsse von Fugen und Vertikalrissen bzw. deren Effekte im Messsignal zu erkennen und nicht im Sinne von Schadensanzeigen zu interpretieren. Außerdem kann bei Realmessungen die Frequenzauflösung erhöht werden, indem die Aufzeichnungsdauer, welche in die Erstellung der Einzelspektren eingeht, länger gewählt wird als in den hier erstellten Simulationen.

6 Beschreibung des entwickelten Messgeräts

Der im Forschungsvorhaben entwickelte Prototyp beruht auf dem Impakt-Echo-Verfahren mit akustischer Signalaufzeichnung. Um scannende Messungen zu ermöglichen, müssen multiple Anregungen mit hoher zeitlicher Wiederholfrequenz erfolgen. Gleichzeitig muss das Sensorsystem in kontinuierlicher Messfahrt zuverlässig ein verwertbares Messsignal registrieren können. Um diese Anforderungen in die Praxis umzusetzen, wurden modular erweiterbare elektronische und mechanische Komponenten entworfen. Dazu war die Entwicklung einer flexiblen, an die speziellen Erfordernisse der Messaufgabe angepassten Mess- und Steuerungselektronik nötig, die auf einer erweiterbaren fahrbaren Plattform integriert wurde. Das System wurde für den manuellen Betrieb, d. h. Messdurchführung durch Schieben des Messwagens und direkte Bedienbarkeit durch den Benutzer, ausgelegt. Es wurde ein Messwagen hergestellt, der alle messtechnischen Komponenten und Elemente zur Stromversorgung enthält (siehe Bild 21, 22). Als Grundgerüst wurde ein Rahmen aus Aluminium-Systemprofilen konstruiert, weil damit eine größtmögliche Flexibilität hinsichtlich der Lage von Befestigungspunkten der Einzelkomponenten realisiert werden konnte. Außerdem hat die Gesamtstruktur so eine ausreichend hohe Steifigkeit, um Resonanzeffekte durch Schwingungen im



Bild 21: Erstellter Prototyp des Messgeräts



Bild 23: Paralleler Betrieb von drei einzelnen Messwagen

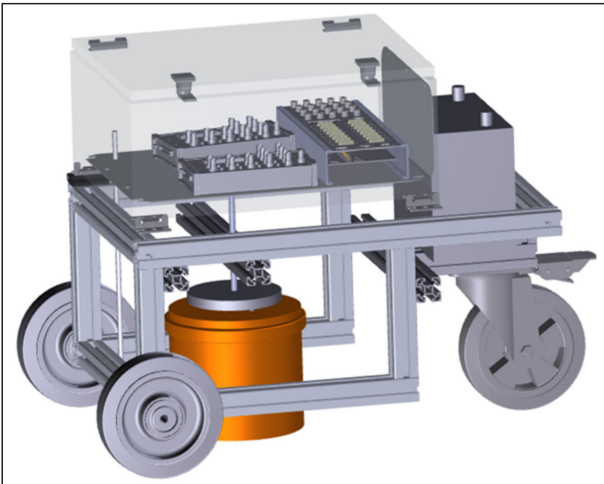


Bild 22: Dreidimensionale Skizze des Messwagens. Das Gehäuse für das Mikrofonarray ist orange dargestellt.

Fahrbetrieb auszuschließen und alle Komponenten mechanisch zu tragen.

Bei den Rollen wurde auf möglichst leise laufendes Material Wert gelegt, um Störungen durch Rollgeräusche oder Vibrationen möglichst gering zu halten. Mehrere solcher Messwagen können parallel betrieben werden, um einen breiteren Fahrbahnbereich gleichzeitig zu prüfen (siehe Bild 23). (Hinweis: Im Projektverlauf konnte die Option mit drei parallel betriebenen Messwagen aus zeitlichen Gründen nicht mehr auf realen Betonfahrbahnen zum Einsatz gebracht werden.)

6.1 Sensorelement

Bei der Auswahl und Anpassung des Sensorelements konnte auf Vorarbeiten [30] zurückgegriffen werden. Ein für luftgekoppelte Impakt-Echo-Messungen spezialisiertes Sensorsystem muss eine hohe Empfindlichkeit für Signale haben, die vom Betonkörper abgestrahlt werden. Alle anderen akustischen Quellen sollten möglichst ausgeblendet werden. Unter Berücksichtigung dieser Anforderung wurde ein Mikrofonarray, bestehend aus MEMS-Mikrofonen (Mikro-Elektro-Mechanische-Systeme), entwickelt. Bild 24 zeigt das Sensorelement, das aus 35 MEMS-Mikrofonen besteht. Neben ihrem geringen Preis haben solche Sensoren den Vorteil, dass individuelle Einzelmikrofone nur sehr geringe Fertigungstoleranzen aufweisen. Das ist eine wichtige Voraussetzung dafür, dass die Signale der Einzelmikrofone analog summiert werden können. Die Summation erfolgt dabei über eine Verschaltung mit rauscharmen Operationsverstärkern. Durch die spezielle Anordnung der Mikrofone wurde ein guter Kompromiss zwischen erforderlicher Empfindlichkeit und Fertigungsaufwand gefunden. Das Sensorboard trägt neben den Mikrofonen auch Operationsverstärker zur Summation der Signale der Einzelmikrofone auf der Leiterplatte. Nicht besetzte Bereiche der Leiterplatte wurden entfernt, um im Betrieb unerwünschte Schallreflexionen zwischen Leiterplattenmaterial und getesteter Oberfläche zu minimieren.

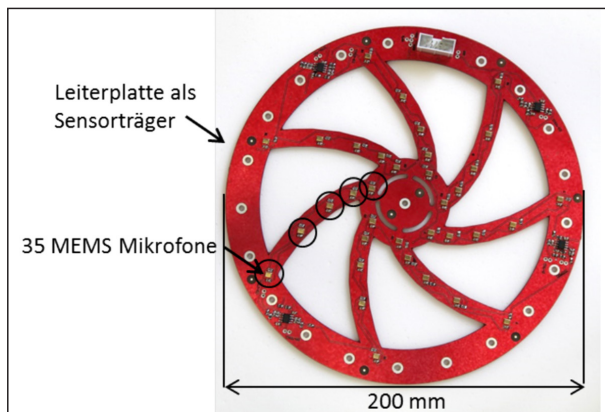


Bild 24: Sensorboard mit 35 MEMS-Mikrofonen in Array Anordnung

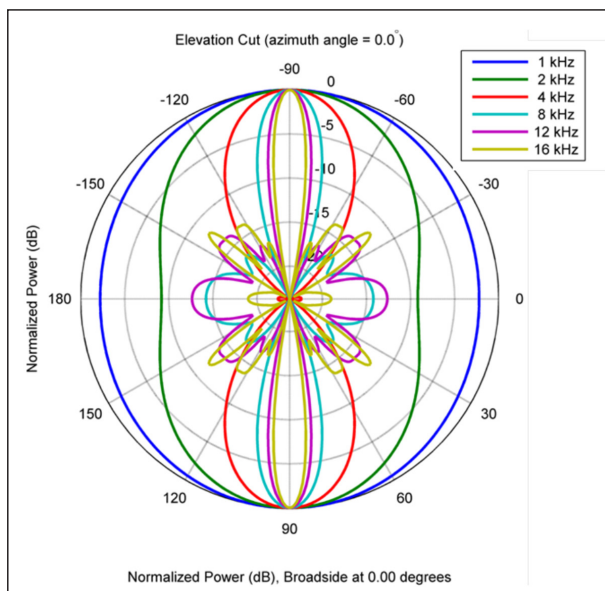


Bild 25: Berechnete Richtcharakteristik des Mikrofonarrays [30]

Aufgrund der speziell gewählten Anordnung der Einzelmikrofone ergibt sich eine für die vorliegende Messaufgabe sehr vorteilhafte Richtcharakteristik (siehe Bild 25). Darunter ist die Empfindlichkeit auf Schallsignale aus unterschiedlichen Richtungen zu verstehen. Das Mikrofon-Array hat eine optimale Empfindlichkeit auf Wellenfronten die parallel zur Array-Ebene einfallen. Wellenfronten aus anderen Richtungen werden mit geringerer Sensitivität aufgezeichnet. Somit wird das gewünschte Messsignal gegenüber Störgeräuschen von den Seiten verstärkt. Für das Mikrofonarray wurde ein Gehäuse erstellt, in welchem die Leiterplatte über Gummipuffer schwingungstechnisch entkoppelt in einem nach unten geöffneten Rohrstück aufgehängt ist.

Im Inneren des Rohrs wurden schallabsorbierende Schäume angebracht, um Resonanzen im Rohr zu unterdrücken. Das Gehäuse hat an dem Sensor

abgewandten Ende Öffnungen für Kabelausgänge. Diese Öffnungen dienen gleichzeitig zum Druckausgleich um Staudruckeffekte zu verhindern. Das gesamte Gehäuse ist ebenfalls über Gummipuffer am Strebenprofil des Messwagens aufgehängt.

6.2 Impaktorelement

Um für die Impakt-Echo-Methode ein optimales Signal zu erzeugen, sollte die Anregung des zu prüfenden Bauteils durch einen rein elastischen Stoß erfolgen. In der Praxis kommt man durch das freie Fallenlassen einer Stahlkugel dieser Anforderung am nächsten. Wirken äußere Zwangskräfte auf einen Impaktor während der Kontaktzeit mit der Oberfläche, sind die Bedingungen eines rein elastischen Stoßes nicht mehr gegeben. Dies kann negative Auswirkungen wie z. B. ein Prellen des Impaktors (d. h. mehrfaches Aufschlagen) zur Folge haben. Dadurch würde sich die Datenqualität verschlechtern und das Signal wäre u. U. nicht mehr eindeutig auswertbar. Diese Gesichtspunkte müssen bei der Konstruktion einer automatisierten Impakt-Echo-Quelle berücksichtigt werden. Weiterhin sollte es bei einem automatischen Impakt-Echo-System möglich sein, einzelne Anregungen reproduzierbar (also mit möglichst gleicher Energie und Kontaktzeit) und mit hoher zeitlicher Wiederholfrequenz durchzuführen. Aufgrund der Anforderung, dass das Messsystem in kontinuierlicher Bewegung einsetzbar sein soll, muss auch der Hub des Impaktorelements ausreichend groß sein, dass nicht die Gefahr des Schleifens besteht, während sich der Impaktor in einer Ausgangsposition befindet. Die genannten Anforderungen lassen sich gut mithilfe von Hubmagneten passender Größe erfüllen. Zur Implementierung im Funktionsprototyp wurde ein Doppelhubmagnet (Typ Tremba ZM2-2080-16-09.001, siehe Bild 26) mit spezieller elektronischer Ansteuerung ausgewählt. Durch eine pulsweitenmodulierte und zeitlich exakt steuerbare Stromversorgung der Spulen kann ein mit dem Tauchkern verbundener Impaktor schnell beschleunigt und nach dem Impakt ohne zu prellen wieder zuverlässig in einer Ruheposition gehalten werden.

Dank der flexiblen Steuerungsoptionen und der elektromechanischen Effizienz des eingesetzten Doppelhubmagneten kann in Kombination mit einer Variation der Impaktormasse der Frequenzgehalt der erzeugten elastischen Wellen gesteuert werden. Die Bauform des Doppelhubmagneten erlaubt durch die beidseitige Zugänglichkeit des Tauchkerns auch

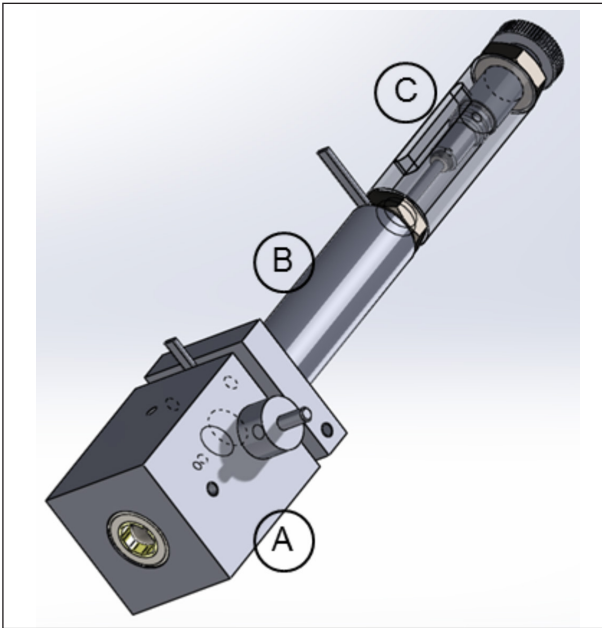


Bild 26: Impaktorelement bestehend aus A: Lagerblock zur Aufhängung im Messwagen über Gummipuffer, B: Doppelhubmagnet, C: Gehäuse mit hinterem gedämpfem Anschlag

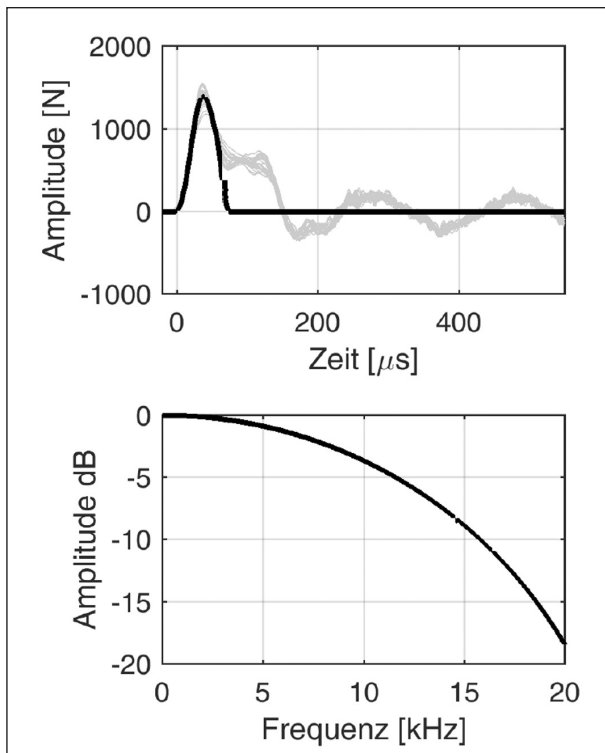


Bild 27: Oben: gemessener Kraftverlauf beim Impact auf einer Betonoberfläche (Kontaktzeit ca. 70 ms, graue Kurven: 30 Einzelanregungen, schwarze Kurve: gefensterter und gemittelter Signal). Unten: Spektrum des gefensternten Kraftverlaufs

eine vorteilhafte Positionierung eines Triggersensors, der zur Impactdetektion und zur zeitlichen Referenzierung (Triggerung) der akustischen Signale benutzt werden kann.

Der Kraftverlauf, der mit dem konstruierten Impaktor auf einer Betonoberfläche als Anregungssignal erzeugt werden kann, wurde mithilfe einer in den beweglichen Teil des Hubmagneten eingebauten Kraftmessdose gemessen (siehe Bild 27). Durch die nötigen mechanischen Verbindungselemente und die Kraftmessdose selbst erhöht sich die Masse des Impaktors. Deshalb ist davon auszugehen, dass die durch diese Messung angezeigte Kontaktzeit länger ist als im Normalbetrieb ohne eingebaute Kraftsensorik. An der Frequenztransformation des Kraftsignals (Bild 27, unten) lässt sich ablesen, dass das angeregte Signal nutzbare Frequenzen bis ca. 14 kHz enthält (Abfall um 6 db bezüglich Maximum bei 0 Hz). Bei 20 cm dicken Betonplatten ist eine Dickenresonanz bei ca. 10 kHz zu erwarten. Somit wird ein für die vorliegende Messaufgabe sinnvoller Frequenzbereich angeregt.

6.3 Architektur der Messelektronik

Das Konzept der Messelektronik erlaubt den gleichzeitigen Betrieb mehrerer Einheiten, bestehend aus der Kombination von Impaktoren und Mikrofonarrays an einem zentralen Mess-PC. Bild 28 veranschaulicht das elektrische Verbindungsdiagramm der einzelnen Komponenten der Messapparatur. Das System ist so aufgebaut, dass zum gegenwärtigen Ausbaustand acht Mikrofon-Arrays und 16 einzelne Impaktorelemente gleichzeitig betrieben werden können. Auf Sensorebene ist neben der Hauptsensorik, bestehend aus Mikrofonarrays und Impaktoren, auch noch der Betrieb weiterer Komponenten wie Videobilderfassung und kapazitiver Sensorik zur Erfassung der Fugenlage berücksichtigt. Die Systemarchitektur ist so konzipiert, dass alle zeitkritischen Steuerungsfunktionen durch Microcontroller-Bausteine abgearbeitet werden. Konfigurierung von Messparametern und Datenspeicherung erfolgen PC-basiert.

6.3.1 Mess-PC

Das System wird über einen feldtauglichen Laptop gesteuert und bedient. Hier wurde aufgrund der mechanischen Robustheit und der Möglichkeit PCI-Karten zu verwenden ein GETAC X500 Laptop ausgewählt. Ein PCI-basiertes System wurde aufgrund der guten Verfügbarkeit von Messkarten mit diesem Schnittstellentyp und der potenziell hohen Datendurchsatzrate favorisiert. Im Laptop wurden eine Messkarte vom Typ NI-6143 (National Instruments) zur Digitalisierung der analogen Mikrofonsignale und eine Messkarte vom Typ NI 6254 zur Erfassung digi-

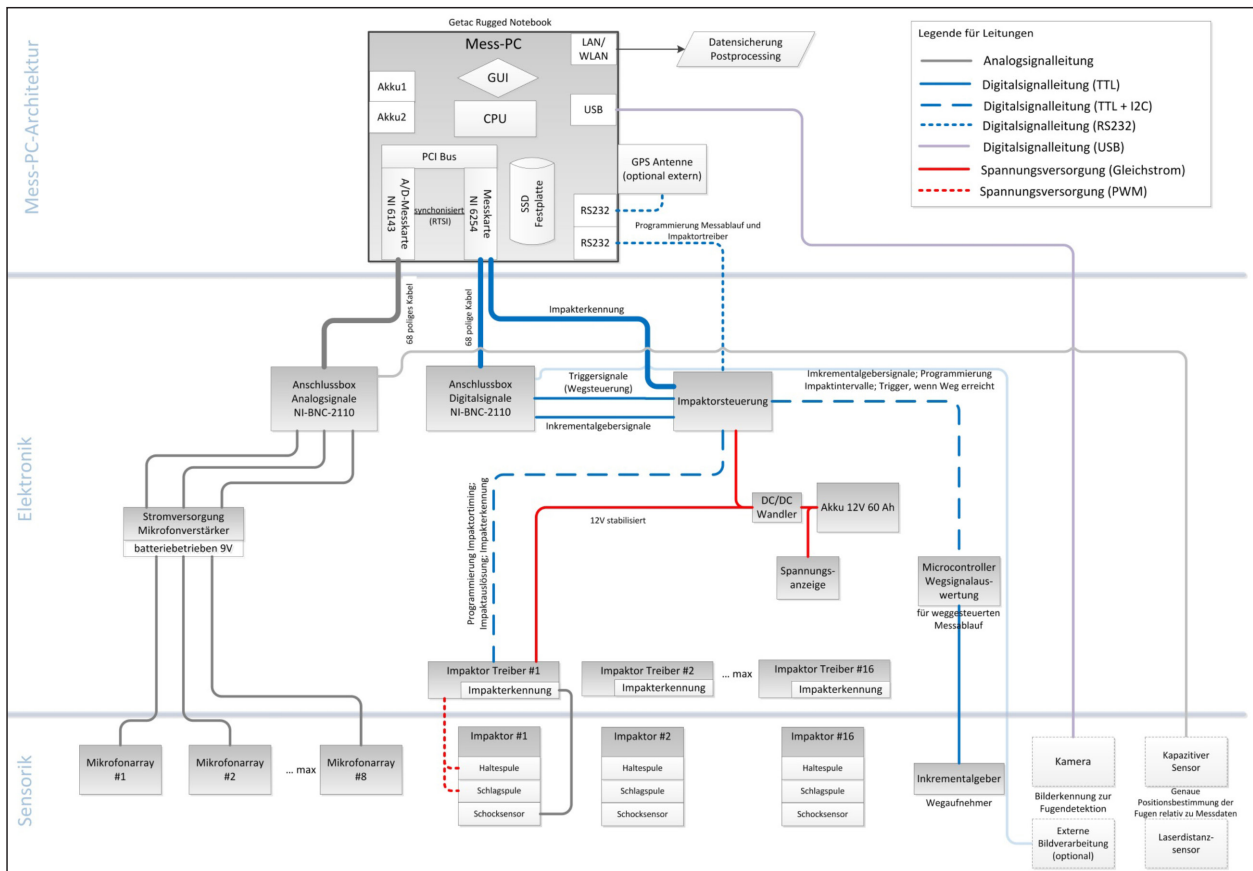


Bild 28: Systemarchitektur der Messelektronik (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der GPS Sensor auf Niveau des Mess-PCs eingezeichnet, obwohl auch der Einsatz einer externen GPS Antenne möglich ist)

taler Signale eines Inkrementalgebers (Wegsensor) und der Impakterkennung verbaut. Über eine serielle Schnittstelle (RS-232) können Befehle mit einem Microcontroller (Impaktorsteuerung siehe Kapitel 6.3.2) ausgetauscht werden, der Signale zur Impakt auslösung an die einzelnen Hammersteuerungen (Impaktor-Treiber, siehe Kapitel 6.3.3) sendet.

Der Mess-Laptop beinhaltet eine eingebaute GPS-Antenne, die ebenfalls über die serielle Schnittstelle eingebunden ist. Es kann entweder die im GETAC X500 eingebaute GPS-Antenne oder eine externe Antenne verwendet werden. Zur automatischen Fugenerkennung ist der Anschluss einer Kamera über einen USB-Port möglich. Der Laptop kann per Akku oder mittels 12 V Netzteil über das Bordnetz eines Fahrzeugs betrieben bzw. geladen werden.

6.3.2 Impaktorsteuerung

Die Ansteuerung zur Programmierung und Aktivierung der einzelnen Impaktoren geschieht über einen Microcontroller (Arduino-Plattform, Chip AT-mega328P). Über die RS-232 Schnittstelle am

Mess-PC kann die Ansteuerung der einzelnen Magnetspulen programmiert, und ein Impaktschema (Reihenfolge der Ansteuerung einzelner Hubmagnete) vorgegeben werden. Die Impaktorsteuerung ist direkt mit einem weiteren Microcontroller verbunden, der Signale eines Inkrementalgebers (Wegsensor) auswertet. Dadurch kann ein weggesteuerter Messablauf programmiert werden (z. B. Vorgabe der Anzahl einzelner Impaktanregungen nach definierbarem Wegintervall). Weiterhin kommuniziert die Impaktorsteuerung über das I2C-Protokoll mit den einzelnen Impaktortreibern. Neben diesen Steuerungsfunktionen übernimmt der Microcontroller auch die Aufgabe, die Signale der Impakterkennung und die Signale des Wegsensors an die Messkarte NI-6254 im Mess-PC weiterzuleiten.

6.3.3 Impaktortreiber

Die Impaktortreiber (Bild 29) steuern die einzelnen Spulen des Hubmagneten über eine PWM-Bestromung (Pulsweitenmodulation) an. Zur Programmierung werden Parameter für die elektrische Leistung und den zeitlichen Ablauf der Bestromung der Einzelspulen in den Speicher einer Zwei-Kanal-Mag-

netzsteuerung (Typ Tremba MST 1630) geschrieben. Folgende Parameter können definiert werden: Leistung der Schlagspule, Dauer der Bestromung für Schlagspule, Wartezeit, kurzzeitige Leistung für Haltespule, Dauer der kurzzeitigen Leistung, Leistung für Haltespule im Dauerbetrieb. Mit diesen Parametern ist eine exakte Steuerung des Doppelhubmagneten möglich. Somit ermöglicht diese Art der Programmierung und Ansteuerung auch den Einsatz alternativer Hubmagnete. Für die Auslösung des Impakts kann die Schlagspule (d. h. Spule, die Impaktormasse nach unten beschleunigt) übersteuert betrieben werden (d. h. mit größerer Spannung als für den Dauerbetrieb geeignet).

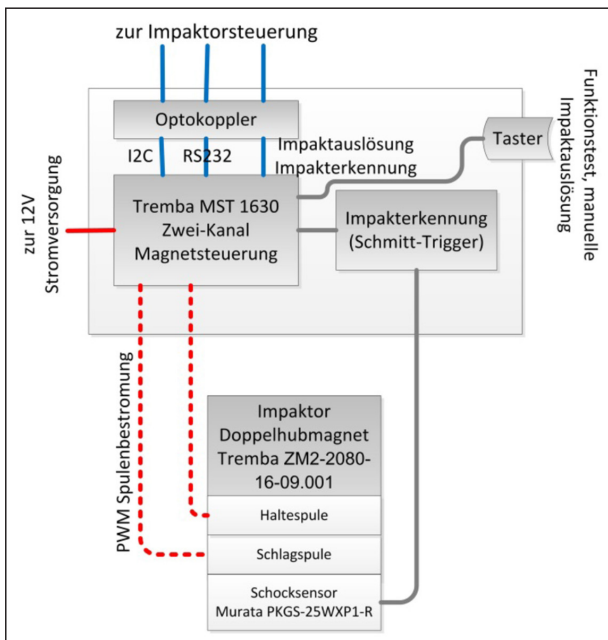


Bild 29: Blockschaltbild der Impaktortreiber

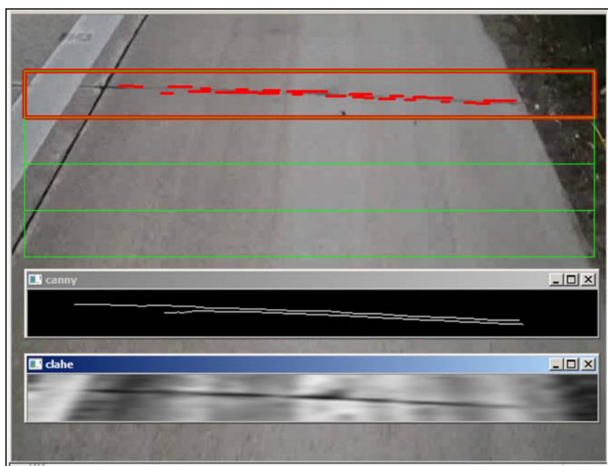


Bild 30: Screenshot einer Echtzeitbildverarbeitung, die während der Messfahrt Querfugen detektiert

In der Impaktormasse ist ein Schocksensor (Typ Murata PKGS-25WXP1-R) verklebt. Ein Schmitttrigger vergleicht das Ausgangssignal dieses Sensors mit einer einstellbaren Schaltschwelle. Dadurch wird ein Triggersignal erzeugt, das den exakten Impaktzeitpunkt definiert. Eine Bestimmung des Impaktzeitpunktes über die Spulenbestromung wäre aufgrund von Toleranzen in der Startposition des Impaktors und Variationen im Abstand zur Betonoberfläche zu ungenau.

Zur galvanischen Entkopplung (zum Schutz der anderen angeschlossenen Komponenten) werden die Verbindungsleitungen zur Impaktorsteuerung über Optokoppler geführt.

6.3.4 Zusätzliche optionale Sensorik

Um eine genauere Positionsbestimmung der exakten Fugenlage innerhalb der Messaufzeichnungen zu ermöglichen, können weitere Sensoren angeschlossen werden. Testweise wurde ein kapazitiver Sensor eingesetzt, dessen analoges Ausgangssignal, durch die dielektrischen Eigenschaften der Fahrbahnoberfläche beeinflusst wird. Durch die Änderung dieser Materialeigenschaft an einer Fuge kann diese gegenüber massiven Plattenbereichen identifiziert werden. Außerdem kann durch einen Laserdistanzsensor eine Fuge anhand des veränderten Oberflächenprofils identifiziert werden. Versuchsweise wurde auch der Einsatz einer Kamera zur videobildgestützten Fugenidentifikation und Messauslösung getestet. (Bild 30).

6.4 Vorgehen bei der Messdurchführung

Vor einer Messfahrt müssen Parameter zur Impaktsteuerung und zur Signalaufzeichnung vom Benutzer vorgegeben werden (siehe Tabelle 1). Die einzelnen Impaktoren können weggesteuert ausgelöst werden. Es besteht die Möglichkeit pro Wegintervall mehrere Impaktoren auszulösen (mehrere Impaktorauslösungen innerhalb eines Wegintervalls werden im Folgenden als Impaktsequenz bezeichnet). Die Optionen zur Datenspeicherung erlauben sowohl eine abschnittsweise Messdurchführung als auch eine kontinuierliche Messfahrt. Die Rohdaten werden im TDMS-Format gespeichert. Neben den Signalen der angeschlossenen Mikrofonarrays enthalten sie Zeitstempel, Weginformation (relativ zum Beginn der Messstrecke), GPS-Daten, eine Identifikationsnummer des ausgelösten Impaktors und die

Hardwarelevel	Parameter	typischer Wert
Mess-PC	Abtastrate	200 kHz
	Aufzeichnungslänge	10 ms
	Abtastintervall Zusatzsensorik	2 ms
Impaktorststeuerung	Wegintervall zum Start einer Impaktsequenz	1 – 10 cm
	Impaktzeitpunkte innerhalb Sequenz	max. alle 20 ms
Impaktortreiber	Leistung Spulen- bestromung	100 %
	Dauer der Bestromung	15 ms
	Leistung Haltemagnet im Ruhezustand	10 %

Tabelle 2: Die wichtigsten zum Betrieb zu definierenden Parameter

Daten des kapazitiven und Laserdistanzsensors. Da im Forschungsvorhaben hauptsächlich Fugenbereiche bzw. relative kurze Ausbaustücke untersucht wurden, wurde mit der Option der abschnittweisen Messung gearbeitet. D. h. der Messwagen wurde an der gewünschten Startposition positioniert und die Messung manuell gestartet. Positionswerte des Wegaufnehmers gelten so immer relativ zur Position am Start einer neuen Messdatei.

7 Datenauswertung

Da bei dem im Prototyp implementierten Messverfahren Eigenschwingungs- und Resonanzphänomene interpretiert werden sollen, muss als zentrale Messgröße aus den aufgezeichneten Schalldaten ein repräsentativer Frequenzverlauf abgeleitet und für eine graphische Darstellung aufbereitet werden. Als Basis für die Interpretation werden aus den prozessierten Daten zunächst flächenhafte Darstellungen des Frequenzverlaufs entlang der vom Messgerät überfahrenen Strecke erstellt. Diese Art der Darstellung kann in Anlehnung an Ultraschallscans auch als „Frequenz-B-Scan“ bezeichnet werden. Auf Basis solcher Darstellungen können dann Frequenzanzeigen im Hinblick auf die untersuchte Struktur (hier Fahrbahnplatten) bzw. Schäden darin interpretiert werden. Die Auswertung erfolgt mithilfe von skriptbasierten Programmen, die in MATLAB erstellt wurden.

Als erster Schritt in der Datenauswertung wird eine Bandpassfilterung vorgenommen. Ein Abschneiden des unteren Frequenzbereichs bis 2 kHz bewirkt eine effektive Unterdrückung von Umweltge-

räuschen, die das Messsignal überlagern. Trotz der optimierten Richtcharakteristik des Arrays könne diese Störquellen nicht vollständig ausgeblendet werden. Zur Ermittlung des Frequenzbereichs dieser Störeinflüsse wurden Messungen auf einer Autobahn im Betriebszustand analysiert. Bild 31 zeigt das Durchschnittsspektrum mehrerer Einzelmessungen (420 Impaktauslösungen) auf dem Standstreifen der A 92 bei der Messstelle Freising Ost (siehe Kapitel 8.3.1).

Zur Erstellung dieses Spektrums wurden nicht die Daten unmittelbar nach den Impaktzeitpunkten ausgewählt, sondern ein Zeitbereich, ab dem die Schwingungen durch elastische Phänomene im Beton bereits weitestgehend abgeklungen waren (ab 10 ms nach dem Impakt). D. h., das zur Erstellung des Spektrums verwendete Signal ist dominiert vom Verkehrslärm und von Geräuschen des Messwagens selbst (Rollgeräusche und Geräusche von den Impaktorelementen, insbesondere das Zurückziehen der Impaktoren in die Ausgangsposition). Man erkennt, dass diese Signale ihre größte Amplitude in einem Frequenzbereich unterhalb von 2 kHz haben. Diese Frequenz wird als untere Grenze für eine Bandpassfilterung der Rohdaten verwendet. Als Obergrenze der Bandpassfilterung wird eine Frequenz von 2 – 3 kHz oberhalb der erwarteten Dickenresonanz gewählt, da i. d. R. diese Resonanz die höchste Frequenz im Messsignal liefert.

Im Folgenden werden die weiteren Schritte der Datenverarbeitung anhand eines Beispieldatensatzes, der an einem künstlichen Betonprobekörper mit bekannten Fehlstellen erzeugt wurde, erläutert. Bild 32 zeigt einen schematischen Schnitt durch den Betonprobekörper. Der rechte Bereich ist schwingungsmäßig durch eine Gummimatte vom Fundament entkoppelt. In diesem Bereich wurden durch zwei kreisförmige Teflonfolien künstliche Delaminationsstörungen eingebracht. Der linke Bereich der Platte liegt direkt auf einem Betonfundament auf.

Für den Testdatensatz wurde der Prototyp mit 3 Impaktoren betrieben; der Abstand zwischen einzelnen Anregungspunkten betrug 1 cm. Vor der weiteren Datenauswertung wird die Qualität der Rohdaten überprüft. Dies kann an einzelnen Signalen oder an einer flächigen Darstellung aller Rohsignale entlang der Messlinie geschehen. Bild 33 zeigt bandpassgefilterte Signale (2 – 10 kHz) einer Messung über den Probekörper. Bei Profilkordinaten 2,6 – 2,9 m und

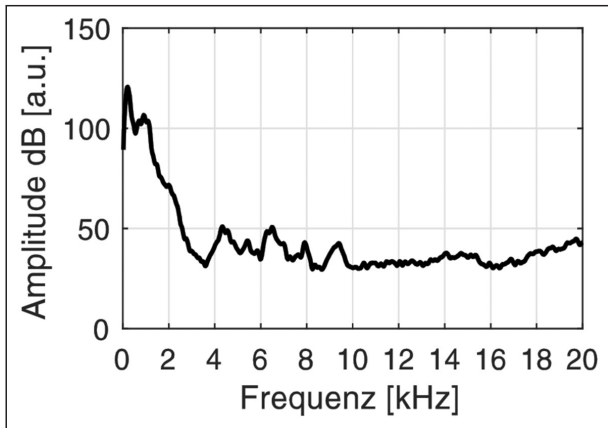


Bild 31: Frequenzspektrum von als Rauschen gewerteten Signanteilen einer Messfahrt mit 420 Impaktauslösungen

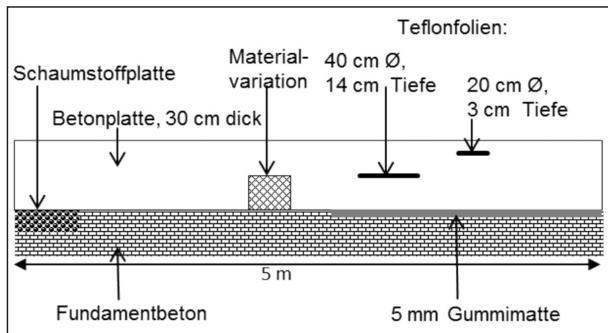


Bild 32: Schnitt entlang der Messlinie durch den Betonprobekörper

3,3–3,4 m erkennt man deutlich den Einfluss der Delaminationen.

Vor der Transformation der Daten in den Frequenzbereich mittels FFT (Fast-Fourier-Transformation) wird noch eine Autokorrelation der Einzelsignale durchgeführt. Dadurch wird die Frequenzauflösung verbessert und periodische Signalanteile werden verstärkt. Nach der Frequenz-Transformation werden die Daten räumlich entlang der Messspur gemittelt (Mittelungsintervall hier 3,5 cm, Summation der Daten in einem Intervall und Division durch die Anzahl der Impaktanregungen in diesem Intervall).

Aufgrund der schwankenden Signalamplitude ist es nötig, die Daten zu normieren. Bei gewöhnlichen Impakt-Echo-Auswertungen wird meist auf die Maximalamplitude der FFT-Spektren normiert. Das Ergebnis dieses Vorgehens ist in Bild 34 dargestellt. Man erkennt z. B. bei Profilkordinaten 3,6–4,4 m eine deutliche Anzeige bei 8 kHz. Diese Frequenz kann als Dickenresonanz der 30 cm dicken Betonplatte identifiziert werden. Im Bereich zwischen 0 und 2,2 m ist keine eindeutige Frequenzanzeige ablesbar. Da die Platte in diesem Bereich gut mit

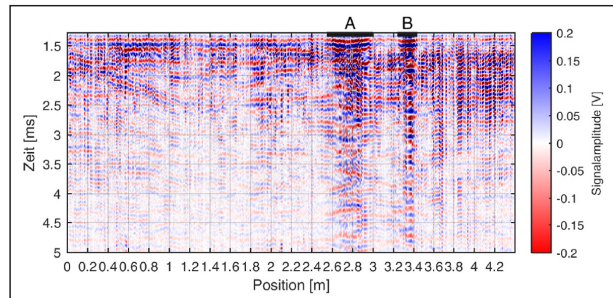


Bild 33: Bandpassgefilterte Rohsignale am künstlichen Delaminations-Probekörper aus Bild 32. A: Messspuren über Bereich mit künstlicher Delamination (40 cm Durchmesser in 14 cm Tiefe), B: Messspuren über Bereich mit künstlicher Delamination (20 cm Durchmesser in 3 cm Tiefe)

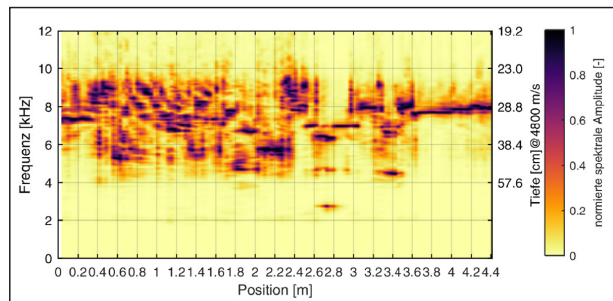


Bild 34: Normierter Frequenz-B-Scan erzeugt aus den Rohsignalen aus Bild 33

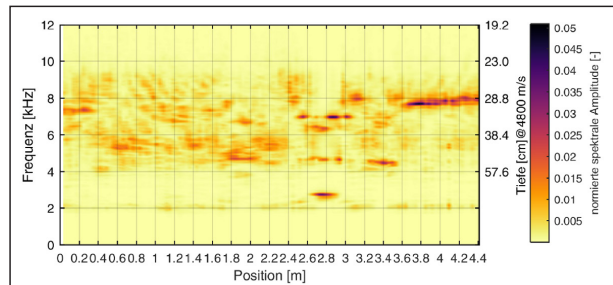


Bild 35: Energienormierter Frequenz-B-Scan erzeugt aus den Rohsignalen aus Bild 33

dem Fundament verbunden ist, kann sich keine Dickenresonanz ausbilden. Lediglich die durchgeführte Normierung verursacht hohe Amplitudenwerte, die aber nicht zwangsläufig mit strukturellen Eigenschaften der Betonplatte in Verbindung stehen. Um bei unbekanntem Prüfobjekt Normierungsartefakte bzw. falsche Interpretationen zu vermeiden, wird deshalb eine alternative Normierung implementiert. Bild 35 zeigt das Messergebnis, bei dem die FFT-Spektren auf die Gesamtenergie (Integral über den Bereich des gewählten Frequenzbandpasses) normiert wurden.

Hier treten dann hohe Amplitudenwerte nur noch in Bereichen auf, wo tatsächlich Plattenbereiche zu Eigenschwingungen angeregt werden. Dies ist über

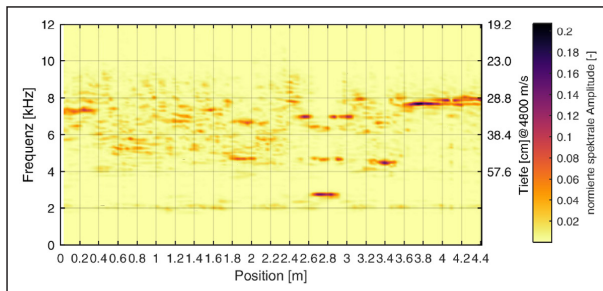


Bild 36: Energienormierter Frequenz-B-Scan erstellt aus rosspektren der Rohsignale aus Bild 33

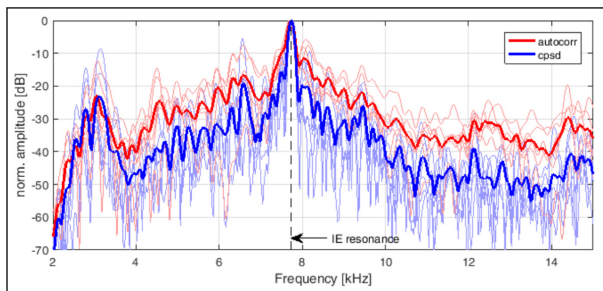


Bild 37: Vergleich der Dickenresonanzanzeigen (aus Abbildung 35 und Abbildung 36 im Bereich 3,6 m–4,4 m.) Rote Kurve: nur Autokorrelation der Einzelspektren, blaue Kurve: Berechnung über Crossspektren

den Delaminationen und im ungestörten Plattenbereich der Fall. Als weitere Möglichkeit der Extraktion relevanter Schwingungen können sog. „Crossspektren“ analysiert werden. Ein Crossspektrum zweier Signale liefert hohe Werte, wo beide Signale ähnliche Frequenzen aufweisen. Dadurch kann das Hintergrundrauschen in den Darstellungen reduziert werden (siehe Bild 36 und Bild 37). Hierzu werden Signale innerhalb eines Mittelungsintervalls paarweise kreuzkorreliert und die so entstandenen Spektren anschließend arithmetisch gemittelt. Die erläuterten Methoden werden bei der Analyse von Messdaten auf Betonfahrbahnen komplementär und ergänzend zum Einsatz gebracht. Dadurch können Normierungsartefakte erkannt und Anzeigen, die durch Störeffekte verursacht werden, von strukturell bedingten Anzeigen unterschieden werden.

8 Durchgeführte Messungen

Messungen am künstlichen Probekörper erwiesen sich für entwicklungsbegleitende Funktionstests und Weiterentwicklungen von Messtechnik und Auswerterroutinen als sehr hilfreich. Darüber hinaus wurden Messeinsätze mit dem Prototyp sowohl an Ausbaustücken aus Betonfahrbahnen als auch an Fahrbahnen im Betriebszustand durchgeführt. Bei den Messungen an den Fahrbahnen lag der Fokus auf der Untersuchung der Fugenbereiche (insbe-

sondere Querscheinfugen), da Schäden dort besonders kritisch sind und bevorzugt dort zuerst auftreten bzw. sichtbar werden. Zusätzlich zu Messungen mit dem Prototyp wurden Ultraschallmessungen durchgeführt. Für die Ultraschallmessungen stand ein Scherwellenarray zur Verfügung (Pundit PL 200). Das Gerät muss an jedem Messpunkt manuell auf die Oberfläche angedrückt und eine Einzelmessung ausgelöst werden. Aufgrund des zeitlich hohen Aufwands konnten Ultraschallmessungen deshalb nur an ausgewählten Stellen durchgeführt werden. Neben dem Ultraschallverfahren wurden an einzelnen Messstellen auch Messungen mit handgeführten Radarantennen mit 1,6 GHz und 2,7 GHz Antennenfrequenz durchgeführt. Das Radarverfahren kann metallische Einbauteile (wie Dübel und Anker) und Plattenrückwände i. d. R. sehr gut abbilden, jedoch sind keine direkten Bildern von Rissen möglich.

8.1 Ausbaustücke in Freilager

Auf Freilagerflächen der Autobahnmeisterei Weißenfels (Sachsen-Anhalt) standen AKR-geschädigte Ausbaustücke von Betonfahrbahnen mit sichtbaren horizontalen Rissbildungen zur Verfügung. An diesen konnten in einer ersten Messkampagne die erwarteten Effekte bei Auftreten von Rissbildungen prinzipiell bestätigt werden. Der Prototyp wurde hierbei in einer ersten Ausbaustufe mit einem einzelnen Impaktor und noch mit einer vereinfachten Messelektronik und Software betrieben. Die Ausbauteile hatten jeweils Abmessungen von ca. 2,0 m auf 2,5 m. Bild 38 und Bild 39 zeigen das Messergebnis einer Platte bei der an einem Ende ein deutlicher Horizontalriss in ca. 10 cm Tiefe beobachtbar war. Das andere Plattenende zeigte augenscheinlich keine Schädigung (s. Bild 40). Es ist also davon auszugehen, dass der beobachtbare horizontale Riss im Inneren der Platte ausläuft (aufgrund der Lagerungssituation der Platte waren die Seitenwände für eine photographische Dokumentation nicht zugänglich, visuell war keine Rissbildung an den Seitenwänden erkennbar).

8.2 Ausbaustücke auf dem Gelände der BAST

Auf dem Gelände der BAST (Halle 9) standen zwei Bohrscheiben (Durchmesser 1,6 m), die aus AKR-geschädigten Fahrbahnen ausgebaut wurden, für Testmessungen zur Verfügung. Die Bohrscheiben sind auf Sand gebettet und die Oberflächen schließen bündig mit dem asphaltierten Boden der

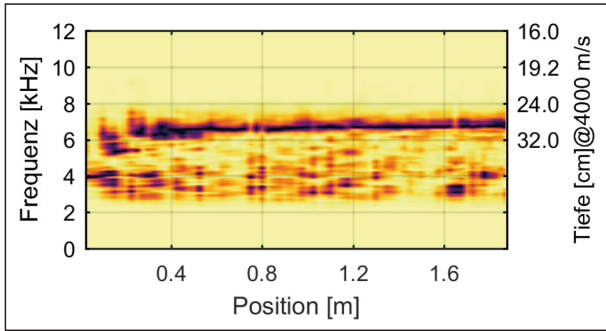


Bild 38: Messergebnis an einer ausgebauten Farbahnplatte (normierte Darstellung), ausbleibende Dickenresonanz und tiefe Frequenzanzeigen im Bereich mit Horizontalriss

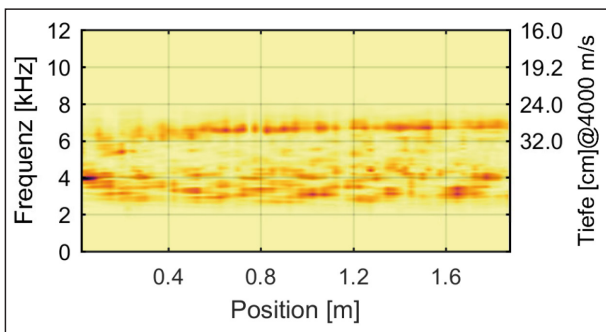


Bild 39: Messergebnis an einer ausgebauten Fahrbahnplatte (energienormierte Darstellung), ausbleibende Dickenresonanz und tiefe Frequenzanzeigen im Bereich mit Horizontalriss

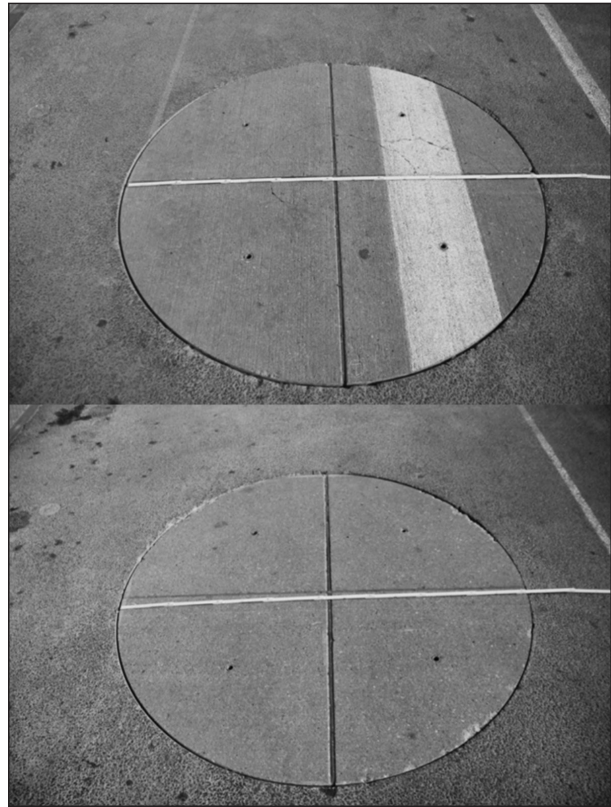


Bild 41: Bohrscheiben mit 1,6 m Durchmesser. Oben Bohrscheibe beschriftet mit „1“; unten: Bohrscheibe „3“



Bild 40: Visueller Befund an den Schnittkanten der Ausbauplatten („Vorne“: Start des Messprofils)

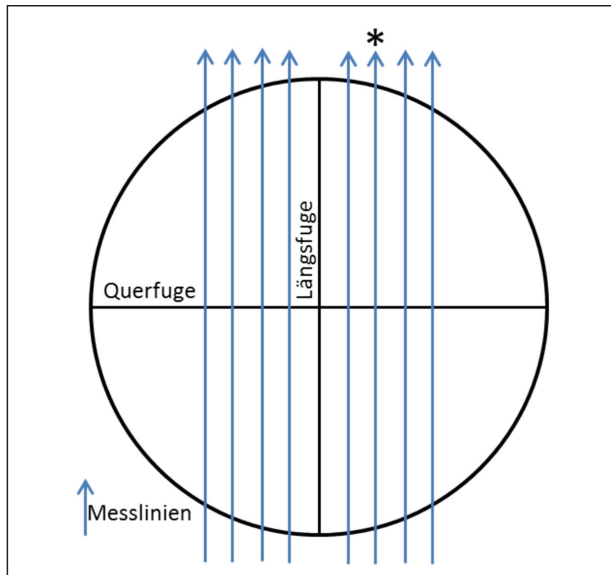


Bild 42: Mit dem Prototyp abgefahrne Messlinien, der Stern markiert das in Bild 43 dargestellte Messprofil.

Prüfhalle ab (siehe Bild 41). Dadurch ist trotz der geringen Größe der Bohrscheiben ein realitätsnaher Einsatz des entwickelten Prüfgeräts möglich. Die Bohrscheiben wurden an Fugenkreuzen entnommen. Entlang der Fugen kam es vermutlich in verschiedenen Tiefen zu horizontalen Rissbildungen (da die Ausbaustücke für weitere Blindtests zer-

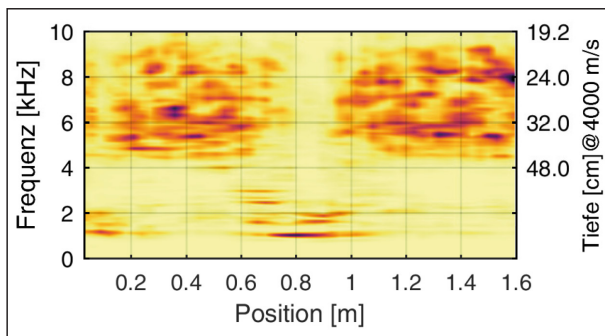


Bild 43: Messergebnis 20 cm rechts der Längsfuge von Bohrscheibe „3“

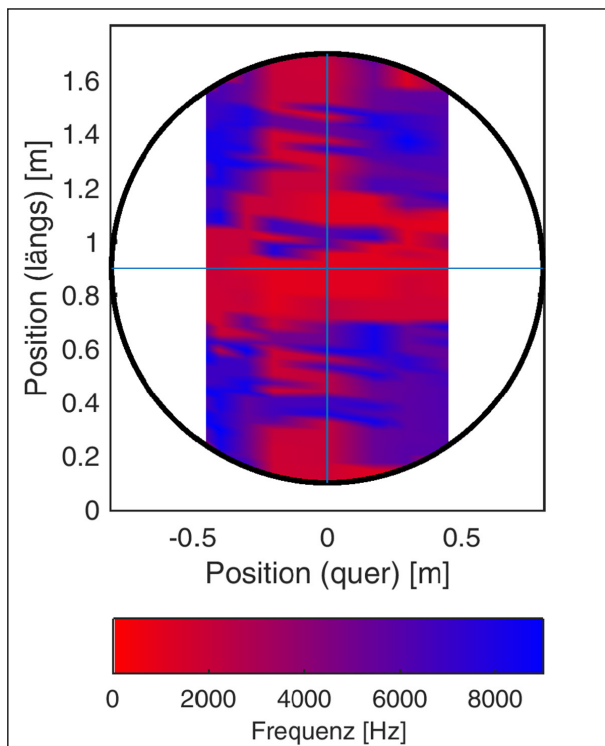


Bild 44: Interpolierte flächenhafte Darstellung der maximalen Frequenzanzeigen an Bohrscheibe 1

störungsfreier Prüfverfahren zur Verfügung stehen sollen, wurden keine näheren Informationen zu Art und Ausmaß der Schädigung vorgelegt).

An den Bohrscheiben wurden mehrere parallele Überfahrten mit dem Prototyp entlang der Längsfuge durchgeführt (siehe Bild 42). Bei der Auswertung der Messungen ist zu beachten, dass sich aufgrund der geometrischen Abmessungen der Bohrscheiben Überlagerungen von strukturellen Eigenfrequenzen der Scheiben mit der Dickenresonanz oder mit Messeffekten aufgrund der Schäden ergeben können.

Als auffälligstes Merkmal in den Ergebnissen der einzelnen Messlinien fallen hohe Amplitudenwerte bei relativ tiefen Messfrequenzen (ca. 1 – 2 kHz)

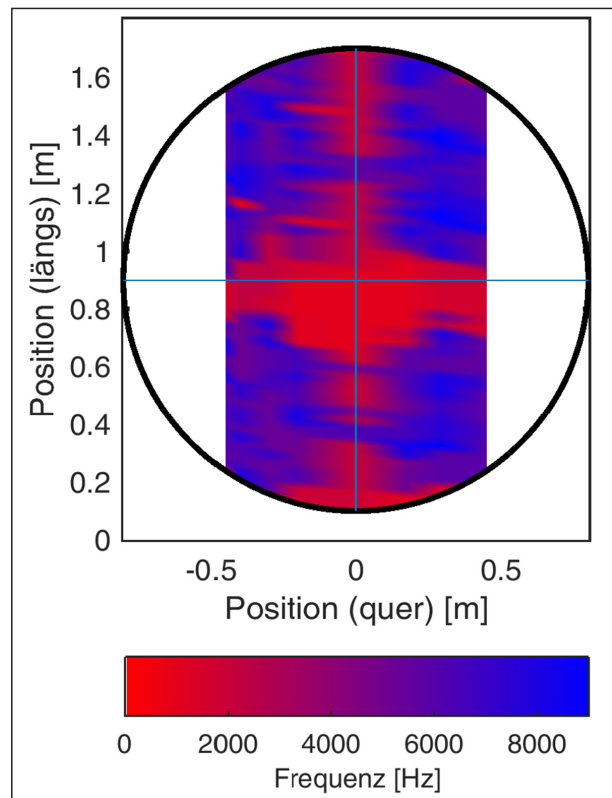


Bild 45: Interpolierte flächenhafte Darstellung der maximalen Frequenzanzeigen an Bohrscheibe 3

im Fugenbereich auf (z. B. Messlinie 20 cm rechts der Längsfuge an Bohrscheibe 1, Bild 43). In Messbereichen weiter entfernt von der Fuge ergeben sich Frequenzanzeigen im Bereich von 6 kHz und höher. Während die hohen Messfrequenzen auf die zu erwartende Dickenresonanz bzw. auf Überlagerung dieser mit Schwingungen der gesamten Bohrscheibe zurückzuführen sind, stehen die tiefen, besonders im Fugenbereich auftretenden Frequenzanzeigen im Zusammenhang mit flexuralen Schwingungsformen von Bereichen über horizontalen Rissbildungen.

Unter Berücksichtigung aller aufgezeichneten Messlinien kann über dem gemessenen Bereich ein interpolierter Flächenplot der maximalen Messfrequenz erstellt werden (siehe Bild 44 und Bild 45).

Bei Bohrscheibe 1 wäre nach dieser Darstellung ein etwas größerer geschädigter Bereich zu erwarten. Bei dieser Bohrscheibe waren um das Fugenkreuz an der Oberfläche Risse zu beobachten. An Bohrscheibe 3 traten an der Oberfläche keine Risse auf. Die Messergebnisse werden abschließend so interpretiert, dass an beiden Bohrscheiben jeweils im Bereich um Quer- und Längsfugen horizontal verlaufende Rissbildungen vorliegen. Ob diese Rissbil-

dungen, wie oft bei AKR-Schädigungen beobachtet, in mehreren Ebenen vorliegen, kann mit dem im Prototyp verwendeten Verfahren nicht abgebildet werden.

8.3 Messungen an Fahrbahnen im Betriebszustand

8.3.1 Messungen A 92, Freising Ost

Im Bereich der Anschlussstelle Freising Ost, auf der A 92 Fahrtrichtung München, entstand im Rahmen von Installationen zur Erfassung von Spannungszuständen und Temperaturen in Betonfahrbahnen der Verdacht auf horizontale Risse im Bereich der Querscheinfugen. Dort wurde an einer Fuge im Standstreifenbereich an einer Kernbohrung ein horizontaler Riss festgestellt. Aufgrund dieses Befundes wurde dieser Bereich für Testmessungen ausgewählt. Nach erfolgten Messungen konnten an ausgewählten Stellen weitere Kernbohrungen durchgeführt werden. Die Messstellen befinden sich auf der Bundesautobahn A 92 unmittelbar nordöstlich der Brücke der Straße „Südring“, auf der Fahrbahn Richtung München. Die Fahrbahnplatten des ersten Fahrstreifens (rechte Fahrspur) sind am rechten Rand mit Nummern versehen (siehe Bild 46). Die Messungen wurden an Platten der Bereiche bis 9637 bis 9659 durchgeführt. Messungen auf dem

Standstreifen wurden mit der benachbarten Plattennummer des Fahrstreifens gekennzeichnet. Es wurden mehrere Messprofile in Fahrtrichtung jeweils über einzelne Fugen hinweg aufgezeichnet (Bezeichnung nach Plattennummer am Ende der Messlinie).

Beim Start der Messprofile befindet sich die Hinterachse des Messwagens 1 m vor den Fugen. Es wurden Messprofile mit einer Länge von 2,1 m aufgezeichnet. Die Interpretation der Impakt-Echo-Daten erfolgt im Hinblick auf die Frequenzen im Fugenbereich. Tiefere Frequenzen als die Dickenresonanz (hier bei ca. 10 kHz) deuten auf delaminierte Bereiche hin.

Das bei Horizontalrissen im Fugenbereich erwartete Messergebnis trat z. B. bei einer Messung an der Fuge von Platte 9657 im Standstreifenbereich auf (siehe. Bild 48). Dieses Ergebnis wird als positive Anzeige eines Risses gewertet und konnte durch eine Kernbohrung bestätigt werden. Bild 50 zeigt eine Messung im Fahrstreifenbereich, wo keine Rissbildung festgestellt wurde (bestätigt durch Bohrung). Hier weist die Dickenresonanz im Fugenbereich lediglich eine leichte Schwächung auf.

Insgesamt konnten 10 Kernbohrungen (siehe Tabelle 3) zur Verifikation der Messergebnisse durchgeführt werden. Alle Messdaten zeigten eine gute



Bild 46: Plattenkennzeichnung A 92

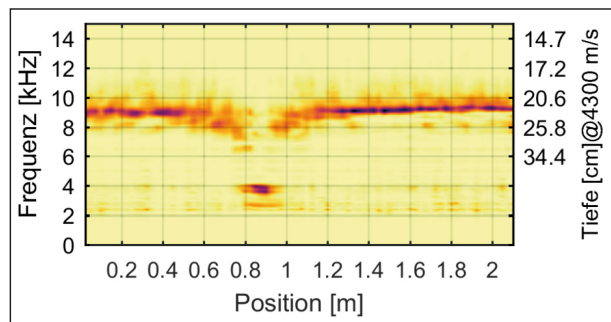


Bild 48: Messergebnis A 92, Standstreifen Platte 9657. Position der Querscheinfuge bei 0,9 m. Die hohen Amplitudenwerte bei 3,8-4 kHz an der Fugenposition stellen die Anzeige eines Horizontalrisses dar.

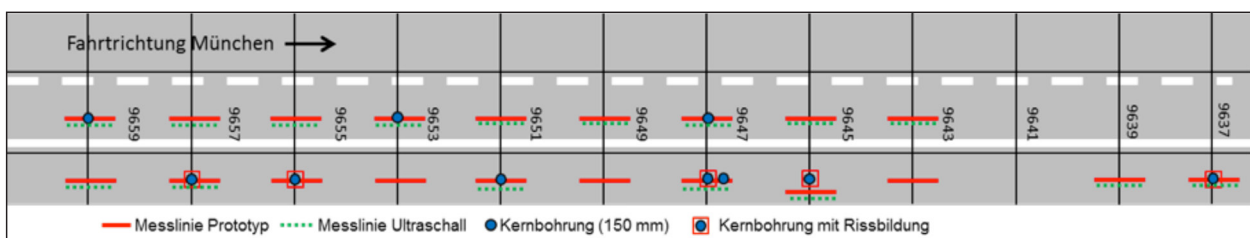


Bild 47: Messpositionen auf der A 92 im Bereich Anschlussstelle Freising Ost; Plattennummerierung auf rechtem Fahrstreifen



Bild 49: Ansicht der Bohrlochwand einer Kernbohrung an der Fuge der Messung in Bild 48. Auf der Höhe des Kerbschnittgrundes ist ein deutlicher Riss erkennbar.

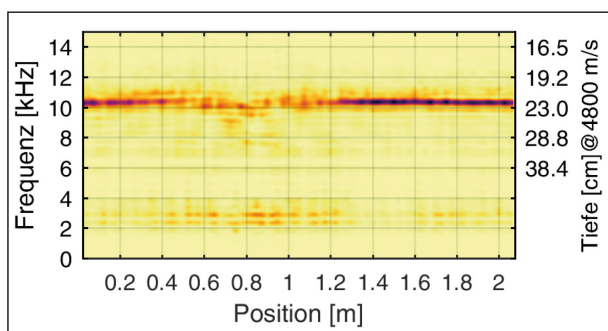


Bild 50: Messergebnis A 92, re. Fahrspur Platte 9647. Position der Querscheinfuge bei 0,9 m

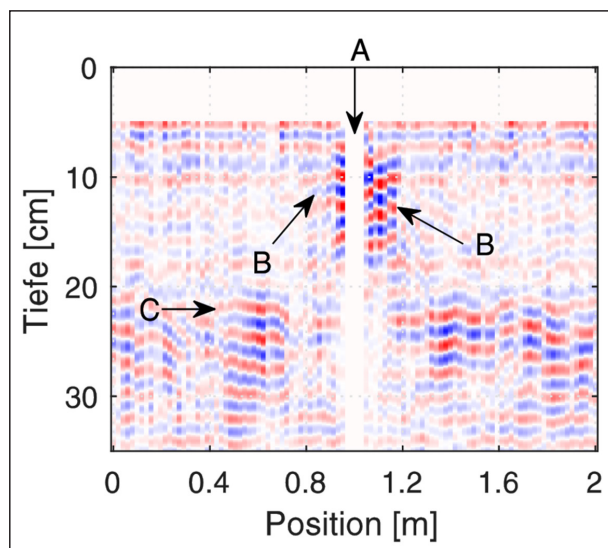


Bild 51: Ergebnis einer Ultraschallmessung über Fuge zu Platte 9647, Standstreifen (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz – 65 kHz, Ersteinsätze gemutet). A: Fugenposition, B: Rissanzeigen, C: Rückwandechos

Korrelation mit den Befunden aus den Bohrungen (siehe Tabelle 4). Lediglich an einer Fuge zeigte das Messergebnis keine Hinweise auf Rissbildungen, obwohl diese im Bohrkern sichtbar waren. Dies ist

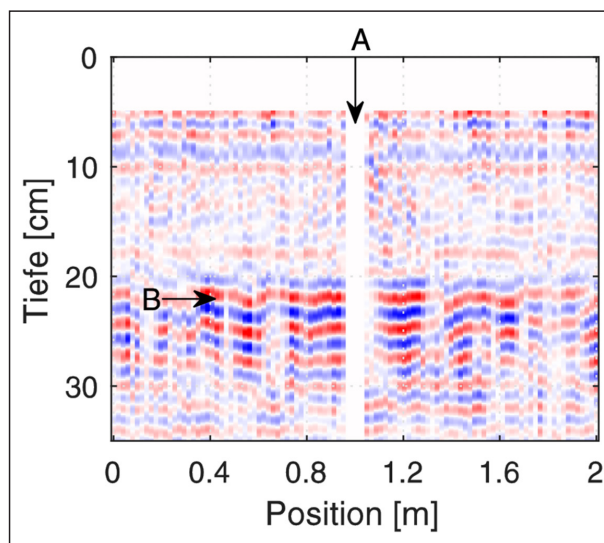


Bild 52: Ergebnis einer Ultraschallmessung über Fuge zu Platte 9651, Standstreifen (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz – 65 kHz, Ersteinsätze gemutet). A: Fugenposition, B: Rückwandechos. Im Vergleich zu Bild 51 keine erhöhten Amplituden im Fugenbereich

Bohrkernposition (Plattennr., Spur, Abstand vom rechten Plattenrand in cm)	Plattendi- cke [cm]	Riss
9659, Fuge, re. Fs, 200	23,5	nein
9657, Fuge, St., 120	-	ja
9655, Fuge, St., 120	-	ja
9653, Fuge, re. Fs, 200	23,0	nein
9651, Fuge, St., 120	23,0	nein
9647, Fuge, re. Fs, 200	22,0	nein
9647, Fuge, St., 120	23,0	ja
9647, in Platte, St., 120	23,0	nein
9645, Fuge, St., 120	-	ja
9637, Fuge, St., 120	23,0	ja

Tab. 3: Positionen (re. Fs: rechte Fahrspur; St.: Standstreifen) der Bohrkerne und Befund hinsichtlich Rissbildung; Angabe der Plattendicke falls Bohrkern komplett geborgen werden konnte

wahrscheinlich durch eine geringe Risslänge (Ausbreitung in Plattenlängsrichtung) bedingt.

An ausgewählten Stellen konnten zusätzlich Messungen mit dem Ultraschall-Puls-Echo-Verfahren mit Array-Prüfkopf (Pundit PL-200) durchgeführt werden (manuelles Andrücken und Verschieben des Prüfkopfes, Messpunktabstand 2 cm). Die Ultraschalldaten lieferten bei vorhandenen Rissen meist gut interpretierbare Anzeigen. Bild 51 zeigt ein Ultraschall-B-Scan an einer Fuge mit Rissbildung (bestätigt durch Kernbohrung). Eine gleich durchgeführte

Position	Anzeige Prototyp	Anzeige Ultraschall	Übereinstimmung mit Ultraschall	Übereinstimmung mit Kernbohrung
9659 Standsp.	-	Verdacht auf Riss < 10 cm	✘	/
9657 Standsp.	+	+	✓	✓
9655 Standsp.	+	/	/	✓
9653 Standsp.	-	/	/	/
9651 Standsp.	-	-	✓	✓
9649 Standsp.	-	+	✘	/
9647 Standsp.	+	+	✓	✓
9647 Standsp. in Platte	-	-	✓	✓
9645 Standsp.	-	-	✓	✘
9639 Standsp.	+	+	✓	/
9637 Standsp.	+	+	✓	✓
9659 Fahrsp.	-	-	✓	✓
9657 Fahrsp.	-	-	✓	/
9655 Fahrsp.	-	-	✓	/
9653 Fahrsp.	-	-	✓	✓
9651 Fahrsp.	-	-	✓	/
9649 Fahrsp.	-	-	✓	/
9647 Fahrsp.	-	-	✓	✓
9645 Fahrsp.	-	-	✓	/
9643 Fahrsp.	-	-	✓	/

Tab. 4: Validierung der Anzeigen des Prototyps mit Befund der Bohrkernentnahme bzw. Vergleich mit Ultraschallmessungen („-“: keine Rissanzeige, „+“ Rissanzeige vorhanden, „/“ keine Messung bzw. keine Bohrung durchgeführt, ✓: Übereinstimmung vorhanden, ✘: keine Übereinstimmung)

Messung an einer Fuge ohne Rissbildung (ebenfalls bestätigt durch Bohrkernbefund) zeigt dagegen keine Auffälligkeiten im Fugenbereich (siehe Bild 52).

8.3.2 Messungen auf der A 92 bei Unterschleißheim

Als weitere Lokation für Testmessungen wurde ein Bereich auf der A 92 gewählt, wo im Rahmen von Erneuerungsmaßnahmen der rechte Fahrstreifen ausgebaut wurde (Betriebskilometer 7,75 bis 8,865; Fahrtrichtung Deggendorf). In einem Bauzustand als der linke Fahrstreifen entlang der Längsfuge offen lag (rechte Fahrspur ausgebaut), fielen an den Plattenunterseiten im Bereich der Fugen keilförmige Abplatzungen bzw. Rissbildungen auf (siehe Bild 53).

An einigen Fugen in diesem Streckenabschnitt wurden Messungen mit dem Prototyp und Ultraschall durchgeführt (siehe Bild 54). Nach der Erneuerung



Bild 53: Rissbildungen an Plattenunterseite im linken Fahrstreifen (Foto: Autobahndirektion Südbayern)

des rechten Fahrstreifens wurde die gesamte Fahrbahn mit dem Grinding-Verfahren profiliert. Die so entstandene Oberfläche ist für das entwickelte Verfahren nicht optimal, da die mechanischen Impaktoren zwischen den Rippen auf der Fahrbahnoberfläche prellen können, und so der Energieübertrag

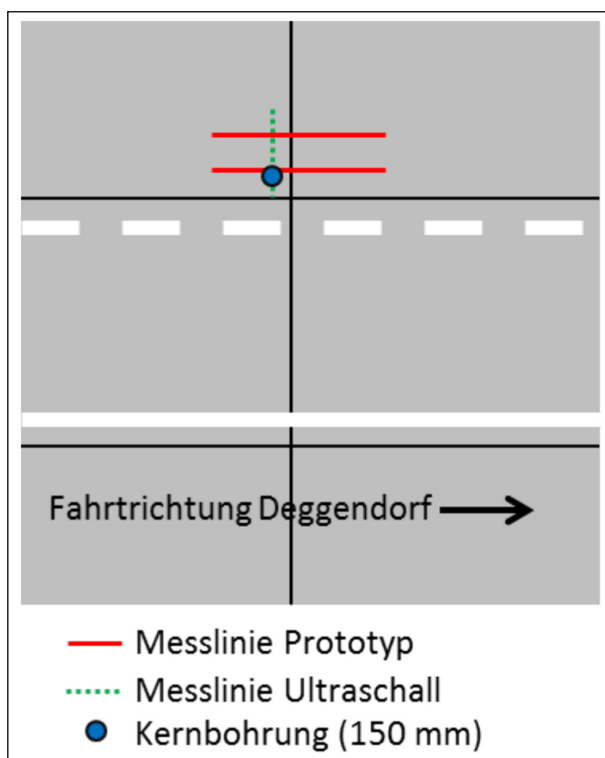


Bild 54: Repräsentative Lage von Messlinien und Kernbohrungen auf A 92 bei Oberschleißheim, Fahrtrichtung Deggendorf, Betriebskilometer 8,215-8,245

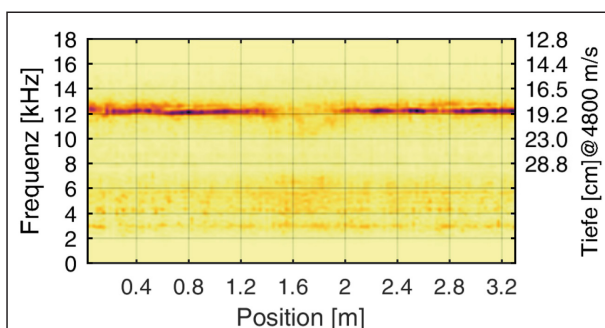


Bild 55: Messung entlang Längsfuge der Platte in Bild 53 (BK 8,245), Position der Querscheinfuge bei 1,6 m

zur Erzeugung der mechanischen Wellen in die Betonplatte beeinflusst wird. Deshalb wurde der Funktionsprototyp mit vier Impaktoren ausgestattet um mehr Rohdaten für Mittelungen zu erzeugen. Auf diese Weise konnten trotz der nachteiligen Bauteiloberflächen verwertbare Ergebnisse erzielt werden.

Bild 55 zeigt ein Messergebnis mit dem Prototyp für den in Bild 53 fotografisch dokumentierten Fugenbereich einer Fahrbahnplatte. Zum Zeitpunkt der Messung war der rechte Fahrstreifen bereits wieder instand gesetzt. Der Messwagen wurde in Fahrtrichtung (mit der Mittelachse 30 cm links der Längsfuge) über die Querscheinfuge geführt. Die Dickenreso-

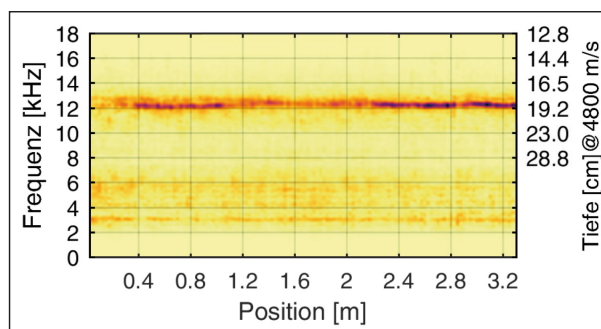


Bild 56: Messung an Platte in Bild 53 (BK 8,245) mit 70 cm Abstand zur Längsfuge, Position der Querscheinfuge bei 1,6 m

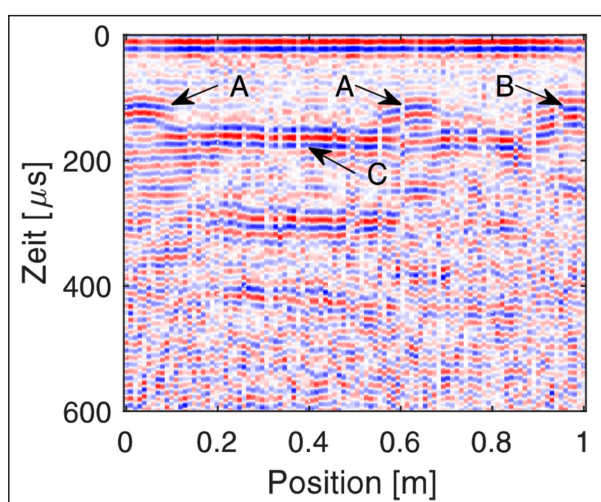


Bild 57: Ultraschallmessung parallel zur Querscheinfuge (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz – 65 kHz). A: Reflexionen der Dübel, B: Reflexionen aus Überlagerung von Dübel und Riss, C: Rückwandechos

nanz bei ca. 12,4 kHz ist im ungestörten Plattenbereich klar erkennbar. Im Bereich der Fuge ist keine eindeutige Frequenz identifizierbar. Dagegen erscheint bei einer Messung, bei der der Messwagen entlang einer Messlinie mit 70 cm Abstand vom Plattenrand bewegt wurde, die Dickenresonanz über das gesamte Messprofil hinweg ohne ausgeprägte Auffälligkeit im Fugenbereich (siehe Bild 56).

In keinem Fall ist eine deutliche Variation der Lage der Dickenresonanz oder ein zusätzliches Auftreten von Anzeigen bei tieferen Frequenzen zu beobachten. Dieser Befund lässt sich so deuten, dass sich die beobachteten Rissbildungen auf den Bereich um das Fugenkreuz beschränken und nicht sehr weit in die Fahrspurmitte hineinziehen. Die geschilderte Interpretation der Messdaten gilt auch an anderen Fugen in der unmittelbaren Umgebung, wo ebenfalls Messungen durchgeführt wurden (bei Betriebskilometer (BK) 8,215; 8,220; 8,225; 8,235 und 8,245). Für BK 8,215; 8,235; 8,240 und 8,245 lagen foto-

grafische Dokumentationen vor, auf denen jeweils Rissbildungen zu erkennen waren.

Zur Validierung der aus den Messergebnissen des Prototyps abgeleiteten Aussage, dass sich die beobachteten Risse auf den unmittelbaren Bereich um das Fugenkreuz beschränken, wurden Ultraschallmessungen durchgeführt (manuelles Andrücken und Verschieben des Prüfkopfes, Messpunkt Abstand 1 cm). Der in Bild 57 gezeigte Ultraschall-B-Scan verläuft parallel zur Querschnittsfuge. Das Profil endet genau an der Längsfuge, an der ein Riss beobachtet wurde (siehe Bild 53). Die Darstellung der Spuren im Zeitbereich zeigt Reflexionen der Rückwand und Reflexionen der Dübel und der Rückwand. Im Bereich des rechten Profilendes verschwimmen die Reflexionen eines Dübels mit möglichen Reflexionen eines Risses. Durch Transformation der Ultraschalldaten mittels SAFT (Syn-

thetic-Apperture-Focusing-Technique) können die Reflexionen besser fokussiert und schlüssig zugeordnet werden: Am Profilende fällt nun eine getrennte Reflexion vom Dübel und eine weitere Reflexion, die vom Riss stammen muss, auf (siehe Bild 58). Man erkennt deutlich, dass sich der Riss nicht weiter ins Platteninnere fortsetzt (Risslänge < 10 cm). Somit liefern Ultraschall- und IE-Messungen ein übereinstimmendes Ergebnis.

Im Nachgang zu den Messungen wurden Bohrkern an den Fugenbereichen gezogen. Keiner dieser Bohrungen zeigte einen durchgängigen Riss. Lediglich an einem der Bohrkern ließ sich ein auslaufender Haarriss erkennen (Bild 59). Die Bohrkernbeurteilung bestätigt also die aus den Messergebnissen abgeleitete Interpretation, dass sich die beobachteten Risse auf den Bereich unmittelbar um das Fugenkreuz konzentrieren und nicht weiter in die linke Fahrspur hineinziehen.

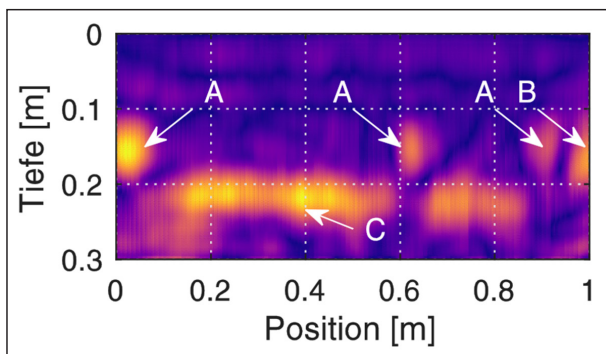


Bild 58: SAFT-Bearbeitung des Datensatzes in Bild 57. A: Dübel, B: Rissanzeige, C: Rückwandanzeige

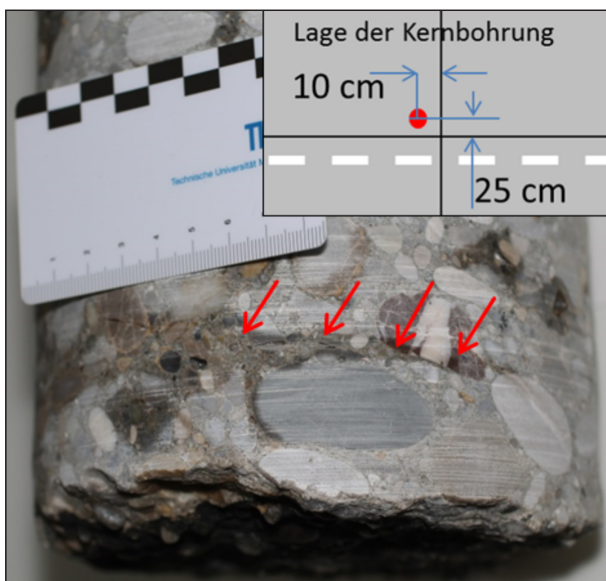


Bild 59: Bohrkern aus Fugenkreuzbereich wo eine Rissbildung an der Plattenunterseite sichtbar war (siehe Bild 53). Die Pfeile markieren einen auslaufenden Riss.

8.3.3 Messungen A 38 und A 14

Die Bundesautobahnen A 38 und A 14 weisen Schadensbilder auf, die in Zusammenhang mit AKR-induzierter (Alkali-Kieselsäure-Reaktion) Betondegradation zu betrachten sind. Insbesondere entstehen bevorzugt an Fugen und Fugenkreuzen horizontale Risse. Es sollte geklärt werden, ob mit dem entwickelten Verfahren auch solche Schäden erfasst werden können. Zu den operationellen Randbedingungen muss erwähnt werden, dass die Messungen an den BAB A 38 und A 14 bei Niederschlag und nasser Fahrbahnoberfläche durchgeführt wurden. Dadurch wurde die Datenqualität der Messungen mit dem Prototyp durch einen erhöhten Hintergrundgeräuschpegel (Rollgeräusche auf nasser Fahrbahn) negativ beeinflusst. Ein Flüssigkeitsfilm auf der Oberfläche beeinflusst darüber hinaus den Energieübertrag der Impaktoren. Trotzdem war eine Auswertung der Daten im Hinblick auf Rissbildungen möglich. Messungen mit dem Ultraschallverfahren waren durch die feuchten Oberflächen allerdings stärker negativ beeinflusst. Liegt ein Flüssigkeitsfilm auf der zu prüfenden Oberfläche wird aufgrund der verschlechterten Ankopplungsbedingungen nur noch sehr wenig Scherwellenenergie in das Bauteil eingestrahlt. Dadurch wurde bei den meisten hier durchgeführten Ultraschallmessungen eine Interpretation der Daten unmöglich.

Die zur Verfügung stehenden Sicherungsmaßnahmen erlaubten Messungen auf dem Standstreifen

und im Bereich des Fugenkreuzes zwischen Standspur und rechtem Fahrstreifen (auf A 38 Bereich ab BK 189,85 Fahrtrichtung Dresden und A 14 Bereich ab BK 84,50 Fahrtrichtung Magdeburg, s. Bild 60).

Exemplarisch zeigt Bild 61 das Ergebnis einer Messung auf der A 38 (Messspurachse 20 cm rechts der Längsfuge zwischen rechter Fahrspur und Standstreifen). Das Messprofil zeigt eine Dickenresonanz, die mit einer Plattendicke von ca. 30 cm korrespondiert. Im Fugenbereich treten tieffrequente Anzeigen auf, die wie bei den Messungen auf der A 92, als flexurale Schwingungen über delaminierten Bereichen interpretiert werden. Leichte Versätze in der Frequenz auf unterschiedlichen Seiten der Querscheinfuge (im Messprofil bei 1 m) deuten auf unterschiedliche Risslängen oder Risstiefen hin.

Ein weiteres Beispiel, das als Fuge mit Rissbildung interpretiert werden kann, zeigt Bild 62. Die Mes-

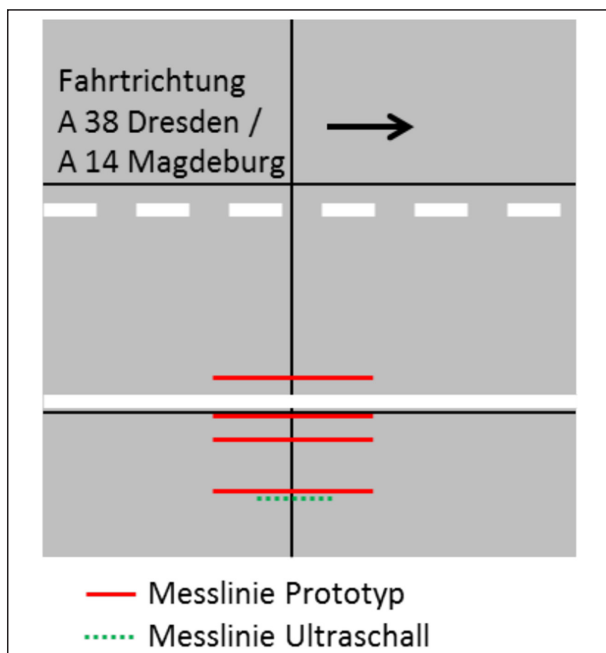


Bild 60: Repräsentative Lage der Messlinien auf A 38 und A 14

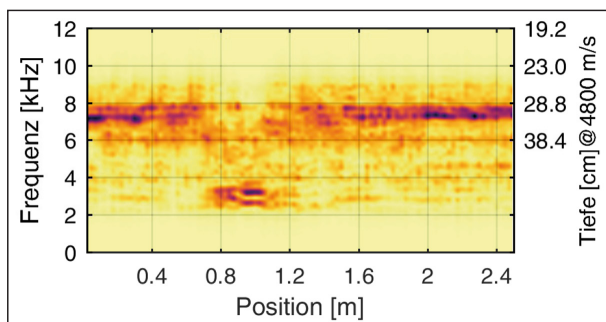


Bild 61: Messergebnis A 38, Profilbeginn auf Platte 3302, Position der Querscheinfuge bei 1 m

sung wurde in der Mitte des Standstreifens durchgeführt. Oberflächlich waren hier keine Schäden sichtbar.

Im Bereich des rechten Fahrstreifens und am Fugenkreuz zwischen rechter und linker Fahrspur wurden schon Ausbesserungsmaßnahmen durchgeführt. Die Möglichkeit, dass auch im Standstreifen Risse vorhanden sind, scheint also gegeben.

Bild 64 zeigt eine Messung, bei der der Messwagen direkt über der Längsfuge (zwischen Standspur und rechter Fahrspur) bewegt wurde. Die stärksten Frequenzanzeigen befinden sich bei 2–3,5 kHz. Dies kann so interpretiert werden, dass ein Riss entlang der Längsfuge läuft. Diesen Schluss könnte man auch aus dem fotografischen Befund in einer Abtrocknungsphase der Fahrbahn ziehen (siehe Bild 63). Im Bereich um die Fugen hält sich die Feuchtigkeit länger. Der Übergang von trockenen zu feuchten Bereichen zeichnet möglicherweise den Rissverlauf nach.

Auf der A 14 konnten weitere Messungen ab BK 87,00 durchgeführt werden. Die Dickenresonan-

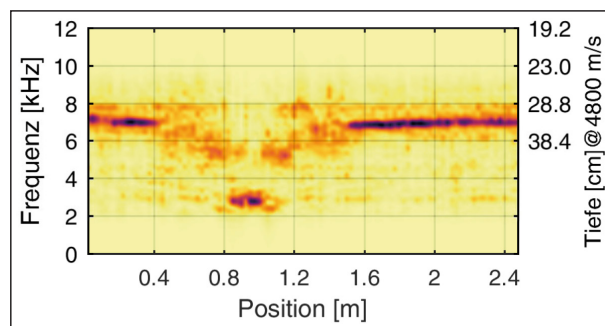


Bild 62: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 0369, Position der Querscheinfuge bei 1 m

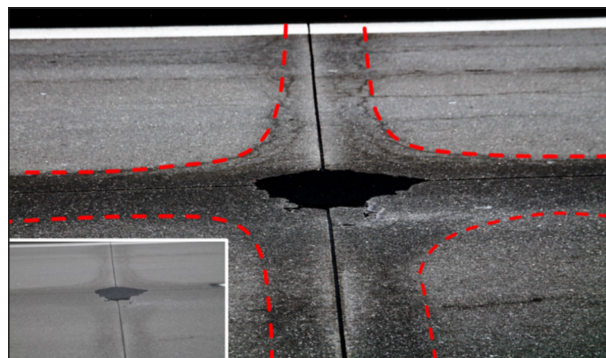


Bild 63: Kontrastverstärkte photographische Aufnahme eines Fugenkreuzes auf der A 14 bei Plattenr. 0370, links unten: unbearbeitetes Foto. Die Aufnahme entstand, als die Fahrbahn noch leicht feucht war. Um die Fugen hält sich die Feuchtigkeit länger.

anzeige weist hier mit 5,7 kHz geringere Frequenzen auf als im Bereich der Platten 0369 (hier Dickenresonanz bei ca. 7 kHz). Dafür kann entweder eine Erhöhung der Platendicke oder eine geringere Steifigkeit des verbauten Betons bzw. eine Kombination dieser Einflüsse verantwortlich sein. Im Messbeispiel einer Messung auf Platte 600 (siehe Bild 65) zeichnet sich die Dickenresonanzanzeige bis sehr nah an die Querscheinfuge (im Messprofil bei 1 m) ab. Deshalb ist davon auszugehen, dass die Frequenzanzeigen im unmittelbaren Bereich um die Fuge (Position im Messprofil 0,9 m – 1 m) hauptsächlich durch Geometrieeffekte bedingt sind und somit keine Rissbildung abgebildet wird. Als Anzeige einer Rissbildung kann dagegen das Messergebnis an einer benachbarten Platte im Fahrstreifenbereich interpretiert werden (Bild 66). Hier weist die Dickenresonanz eine deutliche Unterbrechung im Fugenbereich auf. Zusätzlich treten tiefere Frequenzen im Messsignal stärker hervor.

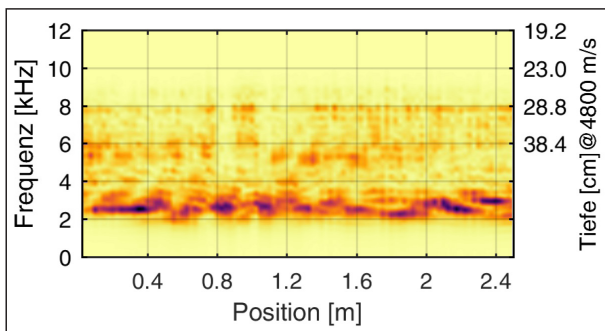


Bild 64: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 0370, Position der Querscheinfuge bei 1 m, Messung direkt über Längsfuge

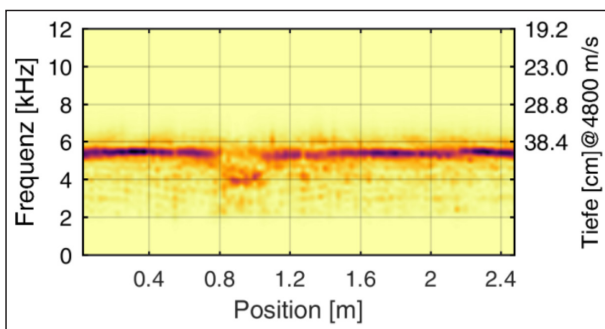


Bild 65: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 600, Position der Querscheinfuge bei 1 m

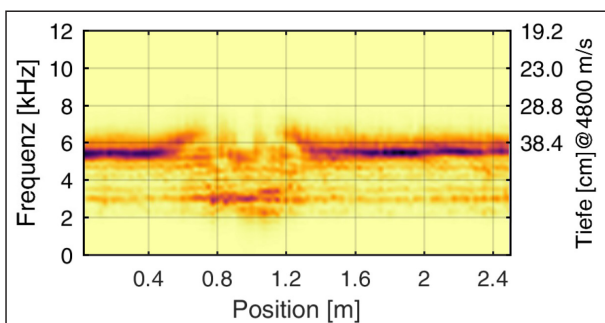


Bild 66: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 601, Position der Querscheinfuge bei 1 m

fenbereich interpretiert werden (Bild 66). Hier weist die Dickenresonanz eine deutliche Unterbrechung im Fugenbereich auf. Zusätzlich treten tiefere Frequenzen im Messsignal stärker hervor.

Diese Befunde können sehr gut in Übereinstimmung mit Ultraschallmessungen erklärt werden, die in einem Fall durch unregelmäßig verlaufende Reflexionen deutliche Hinweise auf Rissbildungen liefern (Bild 67 – Bild 68).

8.4 Zusammenfassende Beurteilung der Testmessungen

Nach der Datenverarbeitung und der graphischen Darstellung der Messergebnisse kann eine Interpre-

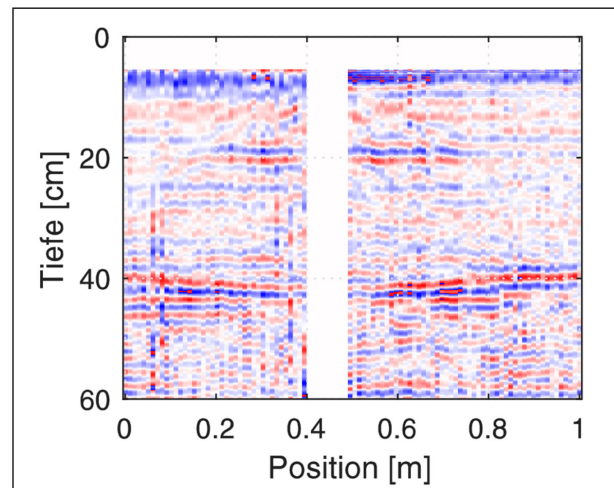


Bild 67: Ultraschallmessung ohne Rissanzeigen an Fuge von Bild 65. Fugenposition bei 0,4 m. (horizontal verlaufende, erhöhte Amplitudenwerte im Fugenbereich in ca. 19 cm Tiefe werden durch Bewehrungselemente hervorgerufen)

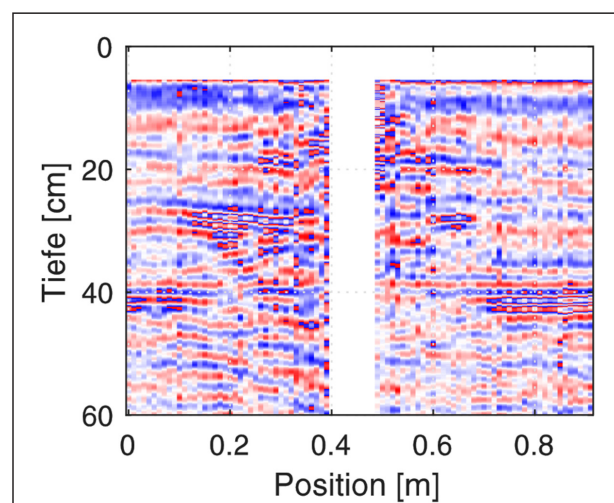


Bild 68: Ultraschallmessung mit Reflexionen an möglichen Horizontalrissen an Fuge von Bild 66, Fugenposition bei 0,4 m

tation im Hinblick auf Schäden erfolgen. Ein Hauptfokus der im Forschungsvorhaben durchgeführten Messungen lag dabei auf Schädigungen im Umfeld der Querscheinfugen und Fugenkreuze. Aus den Testmessungen und aus den Beobachtungen in den Simulationen wurden Kriterien zur Interpretation abgeleitet:

- Identifikation einer Dickenresonanz im Platteninneren

Ist eine eindeutige Dickenresonanz identifizierbar, d. h. es wird ein einzelnes Frequenzmaximum angezeigt, das mit der Dicke der Betondecke korreliert, so kann die Platte als unbeschädigt angesehen werden. Bei bekannter P-Wellengeschwindigkeit des vorliegenden Betons ist so eine Dickenbestimmung möglich. (siehe Kapitel 4).

- Im Fugenbereich ist eine Abschwächung der Dickenresonanz zu erwarten. Je flacher die Kerbschnitttiefe, desto geringer ist dieser Effekt.
- Eine Querscheinfuge kann aufgrund von Geometrieeffekten (Überlagerung von Oberflächenwellen, mit Körperschallwellen) eine Verschiebung der Dickenresonanz im Fugenbereich zu tieferen Frequenzen hervorrufen.
- Frequenzanzeigen mit hoher Amplitude und mit deutlich geringerer Frequenz als der Dickenresonanz können als flexurale Vibrationen delaminierter Bereiche interpretiert werden.
- Bei kurzen Delaminationen (< 5 cm) und dicken Platten (> 30 cm) kann es zu Überlagerungseffekten von Dickenresonanz und flexuralen Moden kommen.
- Reststeifigkeit, Delaminationstiefe und Größe des delaminierten Bereichs beeinflussen die gemessene Frequenz. Eine direkte Tiefenbestimmung einer Delamination ist deswegen nicht möglich.
- Risse im Fugenbereich bewirken neben der Entstehung einer flexuralen Vibrationsmode oft eine graduelle Verringerung der Dickenresonanzfrequenz und Abschwächung ihrer Amplitude in einem größeren Bereich um die Fuge.

Bei allen Messdaten war bei geeigneter Wahl der Verarbeitungsparameter (zeitliche Fensterung,

Wahl des Bandpasses, Normierungsverfahren) eine korrekte Interpretation im Hinblick auf den Schadenszustand möglich, sofern hierzu ausreichende Validierungsinformationen verfügbar waren. Bei den Messungen auf der A 92 konnten die Ergebnisse durch Bohrkernentnahmen direkt verifiziert werden. Bei den Messungen auf der A 14 und der A 38 ergab sich ein plausibler Zusammenhang mit dem allgemeinen Erhaltungszustand der Fahrbahnplatten.

9 Überlegungen zur Robustheit und Optimierung der Scangeschwindigkeit

Im Fokus der Entwicklungsarbeiten stand zunächst eine Optimierung der Datenqualität und Aussagekraft im Hinblick auf die Detektion von Schäden. Bei den durchgeführten Testmessungen wurde der Prototyp ausschließlich manuell über die zu untersuchenden Bereiche bewegt. Die Datenqualität wurde während der Messfahrt durch den Bediener des Messgeräts beurteilt. Dadurch ergaben sich variierende Scangeschwindigkeiten im Bereich von 0,5–2 km/h. In der Regel wurde mit der schnellstmöglichen Impaktfrequenz gemessen. So konnten in der letzten Ausbaustufe, bei der der Messwagen mit 4 Impaktoren betrieben wurde, zwei Anregungen (Einzelimpakts) pro Zentimeter Messstrecke erfolgen.

Für eine weitere Optimierung hinsichtlich der Scangeschwindigkeit ist vor allem die nötige Anzahl von einzelnen Impaktanregungen pro Streckenintervall zu betrachten. Bei höheren Messgeschwindigkeiten würde sich aufgrund der begrenzten maximal möglichen Wiederholrate der Einzelimpakts das Streckenintervall pro Impakt erhöhen. Aus der Überlegung, dass mindestens ein Impakt über einem zu detektierenden delaminierten Bereich erfolgen muss, kann unter Zugrundelegung einer maximalen Impaktfrequenz eine maximale Scangeschwindigkeit angegeben werden. Bei Betrieb des Messgeräts mit vier einzelnen Impaktoren kann ca. alle 20 ms ein Impakt ausgelöst werden. Soll nun z. B. als Richtgröße mindestens alle 5 cm ein Impakt erfolgen, so ergäbe sich als maximale Messgeschwindigkeit 9 km/h (5 cm / 20 ms). Durch Weglassen von Rohdaten in der Verarbeitung bestehender Datensätze kann der Einfluss der Impaktanzahl pro Streckenintervall untersucht werden. Bild 69 zeigt eine Darstellung eines Messergebnisses mit Fehlstellenanzeige (vermuteter Horizontalriss) bei der alle

vorhanden Daten benutzt wurden (im Mittel eine Impaktanregung pro 5 mm Wegintervall).

Bild 70 zeigt eine analoge Aufbereitung, wobei der Datensatz durch Weglassen von Rohdaten auf eine Impaktanregung pro 5 cm Wegintervall reduziert wurde.

Nimmt man allein das Ausbleiben der Dickenresonanz als Kriterium zur Schadensdetektion, so kann in dem gezeigten Beispiel auch mit der reduzierten Rohdatendichte noch eine Aussage zur Rissbildung entlang der Fuge getroffen werden.

Bild 71 und Bild 72 zeigen ein analoges Beispiel einer Verarbeitung mit allen vorhandenen Daten und reduziertem Datensatz (wie oben Reduzierung auf ein Impakt pro 5 cm) an einer Fuge, an der keine Schäden vorliegen. Die Dickenresonanz weist zwar im reduzierten Datensatz deutliche Variationen im Messprofil auf, aber über die Fuge hinweg ist keine veränderte Charakteristik beobachtbar.

Eine Durchführung der Messung mit nur einem Impakt auf 5 cm Messstrecke hätte also in den gezeigten Beispielen zur gleichen Interpretation der Anzeigen geführt. Wie oben erläutert, hätte eine Messung mit diesem Impaktintervall mit maximal 9 km/h durchgeführt werden können.

Bei der Erhöhung der Scangeschwindigkeit muss weiterhin berücksichtigt werden, dass es zu einem Schleifen der Impaktorspitze während der Kontaktzeit mit der Betonoberfläche kommen kann. Die Kontaktzeit bei der hier verwendeten Konfiguration beträgt ca. 70 ms (siehe Kapitel 6.2). Würde man eine Messung mit 9 km/h durchführen, hätte das zur Folge, dass sich der Aufhängepunkt des Impaktors während der Kontaktzeit um ca. 0,2 mm bewegt. Dieser Versatz könnte durch das Lagerspiel des Gleitlagers, in dem der Impaktor geführt wird, und die flexible Aufhängung kompensiert werden. Es ist allerdings davon auszugehen, dass durch das resultierende Schleifen der Impaktorspitze während der Kontaktzeit sowohl ein stärkerer mechanischer Verschleiß als auch eine Verschlechterung der Energieübertragung entstehen würde, was sich negativ auf die Signalqualität auswirken kann.

Als weiterer limitierender Faktor für eine Obergrenze der Scangeschwindigkeit, muss außerdem die an einem Anregungspunkt nötige Messdauer Beachtung finden. Als typischer Wert, wurde hier bei der

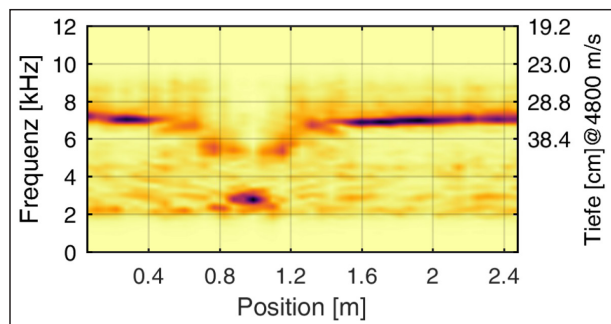


Bild 69: Messergebnis mit Rissanzeige unter Verwendung aller Rohdaten

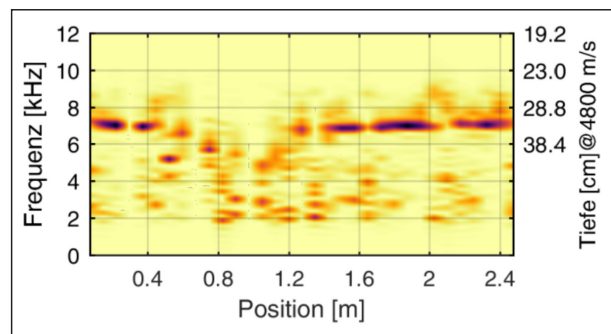


Bild 70: Messergebnis wie in Bild 69, jedoch durch Weglassen von Rohdaten auf 1 Impakt pro 5 cm reduziert

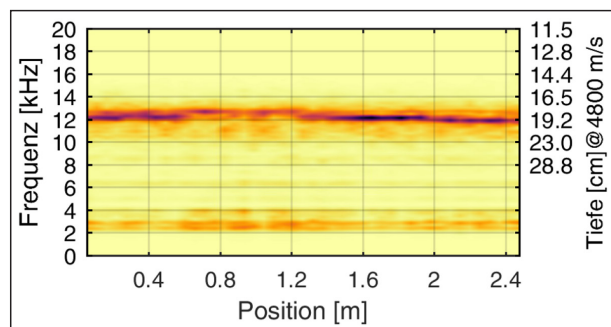


Bild 71: Messergebnis ohne Rissanzeige unter Verwendung aller Rohdaten

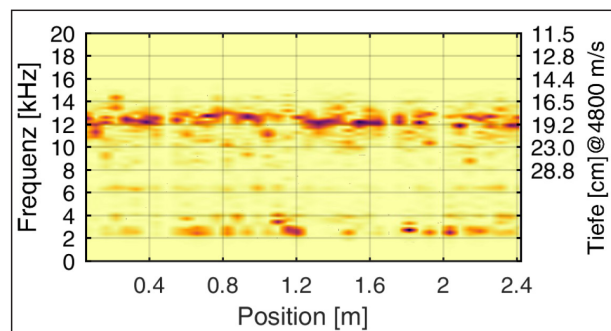


Bild 72: Messergebnis wie in Bild 71, jedoch durch Weglassen von Rohdaten auf 1 Impakt pro 5 cm reduziert

Verarbeitung der Daten meist 3–5 ms verwendet. Legt man z. B. 5 cm als kleinste noch aufzulösende Fehlstelle zu Grunde, so dürfte eine Messgeschwindigkeit von ca. 18 km/h nicht überschritten werden

(2,5 cm / 5 ms), da sich die Position des Sensorelements nur um die Hälfte der Fehlstellenausdehnung bewegen sollte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die maximal mögliche Scangeschwindigkeit sowohl von der Ausdehnung der zu detektieren Fehlstellen (d. h. kleinste Fehlergrößen) als auch von der maximal möglichen Impaktfrequenz abhängt. Für spätere Ausbaustufen des Messsystems könnte die Anzahl der Messmodule erhöht werden, um so durch eine mehrfache Überführung des selben Messbereichs die Impaktanzahl pro Streckenintervall zu erhöhen.

10 Vorschläge für weiterführende Entwicklungen

Zum gegenwärtigen Entwicklungsstadium beruht das System auf der Interpretation graphischer Aufbereitungen der Messdaten durch einen geschulten Prüfer (ähnlich der Interpretation radiologischer Aufnahmen in der Medizin). Es wird empfohlen im Rahmen weiterer Entwicklungsarbeiten Methoden zur vollautomatischen Datenauswertung zu etablieren.

Als Erschwernis bei der Interpretation der Messdaten muss die Schwierigkeit Erwähnung finden, Geometrieeffekte eindeutig von flexuralen Schwingungen delaminierter Bereiche zu differenzieren. Diese Problematik kann besonders bei dicken Plattenstrukturen ($> \sim 30$ cm) und kurzen ($< \sim 10$ cm) horizontalen Rissen im Fugenbereich die Interpretation erschweren, bzw. zu falschen Vorhersagen führen. Hier wurden zwar Ansätze durch Simulationen und Plausibilitätsbetrachtungen an realen Messdaten aufgezeigt, die Problematik sollte aber durch weitere Testmessungen mit anschließenden Bohrkernproben weiter untersucht werden.

Potenzial für weitere Entwicklungsarbeiten gibt es außerdem im Hinblick auf eine Steigerung der Scangeschwindigkeit. Diese ist momentan durch die maximal mögliche Impaktfrequenz und durch eine zu erwartende Verschlechterung der übertragenen Impaktenergie bei schnelleren Messgeschwindigkeiten begrenzt. Hier sollten im Rahmen von anschließenden Arbeiten alternative, verbesserte Mechanismen zur mechanischen Anregung eruiert bzw. optimiert werden. Denkbar wäre z. B. eine Evaluation laserbasierter Anregungsquellen. Damit wäre theoretisch eine vollkommen kontaktfreie Messung möglich. Auch könnte geprüft werden, inwieweit sich Neuentwicklungen auf dem Gebiet fokus-

sierter Luftultraschallquellen für die hier relevanten Fragestellungen eignen.

10.1 Alternative Anwendungsgebiete

Die luftgekoppelte IE-Messtechnik könnte auch an anderen Strukturen zur Klärung struktureller Eigenschaften Anwendung finden. So wäre z. B. der Einsatz zur Detektion von Delaminationen in Fahrbahnaufbauten aus Asphalt denkbar. Hierzu müsste vor allem durch eine Modifikation der Impaktormassen der Frequenzbereich der Anregung angepasst werden.

Außerdem wäre ein Einsatz zur Detektion korrosiv bedingter Delaminationseffekte (an Brücken, Parkdecks, Tiefgaragen), zur Dickenmessung (z. B. Bodenplatten) und der Einsatz zur Qualitätssicherung von Betonstrukturen, bei denen Materialverbünde überprüft werden müssen (z. B. Tübbinge im Tunnelbau), möglich. Hier erscheinen eine Weiterführung der Entwicklungsarbeiten und eine Anpassung auf die speziellen Prüfsituationen auch wirtschaftlich sinnvoll, da für viele Anwendungen keine scannend einsetzbaren, zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verfügung stehen.

11 Zusammenfassung

Aktuell stehen zur Substanzbewertung in kontinuierlicher Messfahrt nur Systeme zur Bewertung der Tragfähigkeit (z. B. Fallgewichtsdeflektometrie) oder für elektromagnetische Verfahren (Georadar) zur Bild des gesamten Fahrbandenaufbaus zur Verfügung. Systeme, mit ausreichend hoher Empfindlichkeit und Auflösung, um horizontale Risse zu detektieren, können Messungen nur im Stillstand durchführen. Scannende Messungen waren deshalb bisher nur im schrittweisen Betrieb möglich. Im Rahmen des bearbeiteten Forschungsvorhabens wurde ein Prototyp eines scannenden Prüfsystems zur Anwendung an Fahrbahndecken aus Beton erstellt. Mit dem hier entwickelten System steht erstmals ein feldtaugliches Gerät zur Verfügung, welches auf Basis eines akustischen Messprinzips kleinräumige Rissbildungen und Delaminationsstörungen in scannender Weise qualitativ abbilden kann. Somit konnte eine wesentliche Verbesserung bestehender Prüftechnik erreicht werden.

Das System beruht auf dem sog. Impakt-Echo-Verfahren – einem etablierten zerstörungsfreien Prüfverfahren für Betonbauteile. Es erweitert jedoch dieses Prüfverfahren sensorseitig um ein neues

akustisches Sensorkonzept. Die kontaktfreie Signalaufzeichnung mit einer Arrayanordnung von MEMS-Mikrofonen ist wesentliche Grundvoraussetzung zur scannenden Datenakquisition in kontinuierlicher Messfahrt. Um einen scannenden Einsatz auch anregungsseitig zu gewährleisten, wurde ein flexibel einsetzbares Impaktormodul auf Basis eines Doppelhubmagneten entwickelt. Damit können mechanische Impaktanregungen mit hoher Wiederholfrequenz ausgelöst werden.

Bei der Entwicklung des Systems wurden alternative Ansätze bei der Datenauswertung und Interpretation der Rohdaten konzipiert. Ausgehend von Simulationen der Ausbreitung mechanischer Wellen und Simulationen von Eigenschwingformen wurden zu erwartende Effekte bei Auftreten von horizontalen Rissen untersucht. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden zur Anpassung des Sensorsystems und zur Optimierung der Datenverarbeitung verwendet.

Neben Messungen an einem Probekörper mit bekannten Fehlstellen wurden Testmessungen mit Schrittgeschwindigkeit im Handbetrieb an Ausbaustücken aus Fahrbahnen und an Fahrbahnen verschiedener Bauweise im Bestand (BAB A 92, A 14, A 38) durchgeführt. Das Messgerät ist in der Lage Rissbildungen im Fugenbereich anzuzeigen. Bei den Messungen auf der A 92 konnte dies durch Kernbohrungen verifiziert werden. An anderen Messstellen, in deren Umgebung schon viele Schädigungen oberflächlich sichtbar wurden (z. B. auf der A 38, AKR-bedingte Verfärbungen und Ausbrüche an Fugen), können die erstellten Befunde gut in Übereinstimmung mit dem allgemeinen Fahrbahnzustand gebracht werden.

Aufgrund des physikalischen Messprinzips sind für den Praxiseinsatz gewisse Einschränkungen zu beachten. Bei Vorliegen mehrerer horizontaler Rissebene trägt nur die oberste Rissebene zum Messeffekt bei. D. h. das Verfahren kann bei Detektion einer Rissbildung keine Aussage darüber liefern, ob unter einem detektierten Riss noch weitere Rissebenen vorliegen. Außerdem ergibt sich durch die kombinierten Effekte von verwendeten Wellenlängen, Ausdehnung des verwendeten Sensorarrays und des gesamten Prüfaufbaus eine Auflösungsrenze in Bezug auf die kleinste abbildbare räumliche Ausdehnung einer Rissbildung. Diese Auflösungsrenze kann zum gegenwärtigen Stand der Arbeiten noch nicht abschließend absolut angegeben werden und sollte weiter systematisch untersucht werden.

Auch wenn ein flächendeckender Einsatz aufgrund von Limitationen durch die maximale Scangeschwindigkeit noch nicht möglich ist, kann das System ökonomisch sinnvoll zur Bewertung des Erhaltungszustands von Fahrbahndecken aus Beton eingesetzt werden. Hierzu wäre z. B. die stichprobenhafte Prüfung ausgewählter Fugenbereiche in Autobahnabschnitten gleicher Bauart zu empfehlen, um repräsentative Aussagen über den Bauwerkzustand zu gewinnen.

Darüber hinaus sollte geprüft werden, inwiefern das entwickelte Messprinzip mit Modifikationen auch an anderen Strukturen (z. B. Brücken, Fahrbahnen in Asphaltbauweisen) zur Anwendung kommen kann. Die Entwicklungsarbeiten sollten mit Fokus auf Automatisierung, Steigerung der Robustheit und Messgeschwindigkeit fortgesetzt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] MALÁRICS, V. und MÜLLER, H.S. (2012). Numerical investigations on the deformation behavior of concrete pavements. Tagungsband 7th RILEM International Conference on Cracking in Pavements. RILEM Bookseries, vol 4. Dordrecht: Springer.
- [2] KEE, S.H.; OH, T.; POPOVICS, J.S.; ARNDT, R.W. und ZHU, J.Y. (2012). Nondestructive Bridge Deck Testing with Air-Coupled Impact-Echo and Infrared Thermography. *Journal of Bridge Engineering*. 17(6), 928–939.
- [3] ASTM (1997). D4788-97 Standard test method for detecting delaminations in bridge decks using infrared thermography, DOI: 10.1520/D4788-88R97.
- [4] GERARDO, G.C. (2003). Short-Pulse Radar Methods. In *Handbook on Nondestructive Testing of Concrete Second Edition*, S. 13–1–13–21. Boca Raton: CRC Press.
- [5] KARHUNEN, K. (2013). Electrical resistance tomography imaging of concrete. (Dissertation). University of Eastern Finland.
- [6] REICHLING, K.G. (2014). Bestimmung und Bewertung des elektrischen Widerstands von Beton mit geophysikalischen Verfahren.

- (Dissertation). Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen.
- [7] CHOUTEAU, M.; BEAULIEU, S. (2002). An Investigation on Application of the Electrical Resistivity Tomography Method to Concrete Structures. Tagungsband The 2nd Annual Conference on the Application of Geophysical and NDT Methodologies to Transportation Facilities and Infrastructure. Los Angeles, CA.
- [8] MORALES, M. (2015). Experimental Investigation of the Effects of Embedded Rebar, Cracks, Chloride Ingress and Corrosion on Electrical Resistivity Measurements of Reinforced Concrete. (Masterthesis). Oregon State University.
- [9] CHOUTEAU, M.; VALLIÈRES, S. und TOE, E. (2003). A multi-dipole mobile array for the non-destructive evaluation of pavement and concrete infrastructures: a feasibility study. Tagungsband Non-Destructive Testing in Civil Engineering 2003. Berlin.
- [10] SCHEMPP, F. (2013). Fully Non-Contact, Air-Coupled Generation and Detection of Ultrasound in Concrete for Nondestructive Testing. (Masterthesis). Georgia Institute of Technology.
- [11] GRÄFE, B. (2008). Luftgekoppeltes Ultraschallecho-Verfahren für Betonbauteile. (Dissertation). Technische Universität Berlin.
- [12] ASTM (2012). ASTM D4580/D4580M-12, Standard Practice for Measuring Delaminations in Concrete Bridge Decks by Sounding, DOI: 10.1520/D4580_D4580M-12.
- [13] GUCUNSKI, N.; AREZOO, I.; ROMERO, F.; NAZARIAN, S.; YUAN, D.; WIGGENHAUSER, H.; SHOKOUHI, P.; TAFFE, A. und KOTRUBES, D. (2013). Nondestructive Testing to Identify Concrete Bridge Deck Deterioration. National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press.
- [14] CARINO, N.J. und SANSALONE, M. (1990). Flaw Detection in Concrete Using the Impact-Echo Method. Bridge Evaluation, Repair and Rehabilitation. 187, 101–118.
- [15] SCHUBERT, F. und KOHLER, B. (2008). Ten lectures on impact-echo. Journal of Nondestructive Evaluation. 27(1–3), 5–21.
- [16] PARK, C.B.; MILLER, R.D. und XIA, J. (1999). Multichannel analysis of surface waves. Geophysics. 64(3), 800–808.
- [17] RYDEN, N., PARK, C.B., ULRIKSEN, P. und MILLER, R.D. (2004). Multimodal approach to seismic pavement testing. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. 130(6), 63–645.
- [18] RYDEN, N. und LOWE, M.J.S. (2004). Guided wave propagation in three-layer pavement structures. Journal of the Acoustical Society of America. 116(5), 2902–2913.
- [19] ZHU, J.Y. und POPOVICS, J.S. (2007). Imaging concrete structures using air-coupled impact-echo. Journal of Engineering Mechanics-Asce. 133(6), 628–640.
- [20] CHENG, C. und SANSALONE, M. (1993). The Impact-Echo Response of Concrete Plates Containing Delaminations – Numerical, Experimental and Field Studies. Materials and Structures. 26(159), 274–285.
- [21] OH, T.; POPOVICS, J.S. und SIM, S.H. (2013). Analysis of vibration for regions above rectangular delamination defects in solids. Journal of Sound and Vibration. 332(7), 1766–1776.
- [22] SHOKOUHI, P. (2005). Comprehensive Evaluation of Concrete Bridge Decks Using Impact Echo. (Dissertation). The State University of New Jersey.
- [23] TINKEY, Y. und OLSON, L.D. Vehicle-Mounted Bridge Deck Scanner, Final Report for Highway IDEA Project 132. 2010, Transportation Research Board.
- [24] TINKEY, Y.; OLSON, L.D.; MILLER, P. und HERGERT, M. (2011). Advances in Stress Wave Scanning of Decks and Pavements. Tagungsband Engineering Mechanics Institute Conference. Boston, MA, USA.
- [25] POPOVICS, J.S. Investigation of a Full-Lane Acoustic Scanning Method for Bridge Deck Nondestructive Evaluation, Final Report for Highway IDEA Project 134. 2010, Transportation Research Board.
- [26] RYDEN, N.; LOWE, M.J.S. und CAWLEY, P. (2009). Non-contact surface wave testing of pavements using a rolling microphone array. Tagungsband NDTCE'09, Non-Destructive

Testing in Civil Engineering Nantes, France.

- [27] LU, Y.; ZHANG, Y.; CAO, Y.; GREGORY MCDANIEL, J. und WANG, M.L. (2013). A mobile acoustic subsurface sensing (MASS) system for rapid roadway assessment. *Sensors*. 13(5), 5881–5896.
- [28] HAM, S. und POPOVICS, J. (2015). Application of Micro-Electro-Mechanical Sensors Contactless NDT of Concrete Structures. *Sensors*. 15(4), 9078–9096.
- [29] GROSCHUP, R. und GROSSE, C.U. (2014). Neue Ansätze zur Anwendung der Impakt-Echo-Methode. Tagungsband DGZfP Jahrestagung 2014. Potsdam, Germany: DGZfP.
- [30] GROSCHUP, R. und GROSSE, C.U. (2015). MEMS Microphone Array Sensor for Air-Coupled Impact-Echo. *Sensors*. 15(7), 14932–14945.
- [31] GIBSON, A. und POPOVICS, J.S. (2005). Lamb wave basis for impact-echo method analysis. *Journal of Engineering Mechanics-Asce*. 131(4), 438–443.
- [32] KRÜGER, M. und GROSSE, C.U. (2006). Crack Depth Determination using Advanced Impact-Echo Techniques Tagungsband Proceedings of 9th European Conference on Nondestructive Testing. Berlin, Germany.
- [33] RYDEN, N.; AURELL, O.; NILSSON, P. und HARTLÉN, J. (2012). Impact echo Q-factor measurements towards non-destructive quality control of the back fill in segmental lined tunnels. In *Nondestructive Testing of Materials and Structures*, RILEM Bookseries, S. 915–919. Dordrecht: Springer.
- [34] BOSSY, E.; TALMANT, M. und LAUGIER, P. (2004). Three-dimensional simulations of ultrasonic axial transmission velocity measurement on cortical bone models. *Journal of the Acoustical Society of America*. 115(5 Pt 1), 2314-24.

Bilder

- Bild 1: Schematische Darstellung eines Impakt-Echo-Signals (oben) und seine Transformation in den Frequenzbereich als Graph bzw. farblich kodierter Intensitätsplot (unten)
- Bild 2: Schematische Darstellung von Schwingungsmoden einer Betonplatte. A: dynamische Deformation einer Platte aufgrund der Dickenresonanz. B: dynamische Deformation über einem delaminierten Bereich in der Grundmode. B': dynamische Deformation über einem delaminierten Bereich in einer höheren Mode
- Bild 3: Simulation der vertikalen Deformation bei der ersten Eigenschwingform einer flexuralen Mode bei 2,5 kHz über einem delaminierten Bereich in einer radialsymmetrischen Betonplatte
- Bild 4: Eigenform bei 2846 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge
- Bild 5: Eigenform bei 3225 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge
- Bild 6: Eigenform bei 3968 Hz an einer 30 cm breiten Delamination entlang einer Fuge
- Bild 7: Plattenmodell mit Querscheinfuge für zweidimensionale Simulation von Impaktanregung (Stern) und Aufzeichnung (Dreieck)
- Bild 8: Zeitliche Darstellung simulierter IE-Messungen an dem Plattenmodell in Abbildung 7. (rot: maximale positive Auslenkung, blau: maximale negative Auslenkung der vertikalen Oberflächenverschiebung.) A: oszillierendes Wellenfeld der Dickenresonanz. B: an der Scheinfuge reflektierte Oberflächenwellen
- Bild 9: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 4 cm Kerbschnitttiefe
- Bild 10: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe
- Bild 11: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 8 cm Kerbschnitttiefe

- Bild 12: Plattenmodell mit Querscheinfuge (Kerbschnitttiefe 6 cm) und durchgehendem Vertikalriss
- Bild 13: Zeitliche Darstellung simulierter IE-Messungen an dem Plattenmodell in Bild 12. A: oszillierendes Wellenfeld der Dickenresonanz. B: an der Scheinfuge reflektierte Oberflächenwellen
- Bild 14: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und vertikalem Riss wie in Bild 12
- Bild 15: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und anderem zufälligem Rissverlauf
- Bild 16: Simuliertes IE-Scanergebnis bei 6 cm Kerbschnitttiefe und anderem zufälligem Rissverlauf
- Bild 17: Plattenmodell mit Querscheinfuge (Kerbschnitttiefe 6 cm), durchgehendem Vertikalriss und im Kerbschnittgrund ansetzender Delamination (Horizontalriss variierender Länge)
- Bild 18: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 5 cm)
- Bild 19: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 10 cm)
- Bild 20: Simuliertes IE-Scanergebnis mit horizontalem Riss im Kerbschnittgrund (Risslänge 15 cm)
- Bild 21: Erstellter Prototyp des Messgeräts
- Bild 22: Dreidimensionale Skizze des Messwagens. Das Gehäuse für das Mikrofonarray ist orange dargestellt.
- Bild 23: Paralleler Betrieb von drei einzelnen Messwagen
- Bild 24: Sensorboard mit 35 MEMS-Mikrofonen in Array-Anordnung
- Bild 25: Berechnete Richtcharakteristik des Mikrofonarrays [30]
- Bild 26: Impaktorelement bestehend aus A: Lagerblock zur Aufhängung im Messwagen über Gummipuffer, B: Doppelhubmagnet, C: Gehäuse mit hinterem gedämpftem Anschlag
- Bild 27: Oben: gemessener Kraftverlauf beim Impakt auf einer Betonoberfläche (Kontaktzeit ca. 70 ms, graue Kurven: 30 Einzelanregungen, schwarze Kurve: gefensterter und gemittelter Signal). Unten: Spektrum des gefensterten Kraftverlaufs
- Bild 28: Systemarchitektur der Messelektronik (aus Gründen der Übersichtlichkeit ist der GPS Sensor auf Niveau des Mess-PCs eingezeichnet, obwohl auch der Einsatz einer externen GPS Antenne möglich ist)
- Bild 29: Blockschaltbild der Impaktortreiber
- Bild 30: Screenshot einer Echtzeitbildverarbeitung, die während der Messfahrt Querfugen detektiert
- Bild 31: Frequenzspektrum von als Rauschen gewerteten Signalanteilen einer Messfahrt mit 420 Impaktauslösungen
- Bild 32: Schnitt entlang der Messlinie durch den Betonprobekörper.
- Bild 33: Bandpassgefilterte Rohsignale am künstlichen Delaminations-Probekörper aus Bild 32. A: Messspuren über Bereich mit künstlicher Delamination (40 cm Durchmesser in 14 cm Tiefe), B: Messspuren über Bereich mit künstlicher Delamination (20 cm Durchmesser in 3 cm Tiefe)
- Bild 34: Normierter Frequenz-B-Scan erzeugt aus den Rohsignalen aus Bild 33
- Bild 35: Energienormierter Frequenz-B-Scan erzeugt aus den Rohsignalen aus Bild 33
- Bild 36: Energienormierter Frequenz-B-Scan erstellt aus Crossspektren der Rohsignale aus Bild 33
- Bild 37: Vergleich der Dickenresonanzanzeigen (aus Bild 35 und Bild 36 im Bereich 3,6 m–4,4 m.) Rote Kurve nur Autokorrelation der Einzelspektren, blaue Kurve: Berechnung über Crossspektren
- Bild 38: Messergebnis an einer ausgebauten Farbahnplatte (normierte Darstellung),

- ausbleibende Dickenresonanz und tiefe Frequenzanzeigen im Bereich mit Horizontalriss
- Bild 39: Messergebnis an einer ausgebauten Fahrbahnplatte (energienormierte Darstellung), ausbleibende Dickenresonanz und tiefe Frequenzanzeigen im Bereich mit Horizontalriss
- Bild 40: Visueller Befund an den Schnittkanten der Ausbauplatten („Vorne“: Start des Messprofils)
- Bild 41: Bohrscheiben mit 1,6 m Durchmesser. Oben Bohrscheibe beschriftet mit „1“; unten: Bohrscheibe „3“
- Bild 42: Mit dem Prototyp abgefahrenen Messlinien, der Stern markiert das in Bild 43 dargestellte Messprofil.
- Bild 43: Messergebnis 20 cm rechts der Längsfuge von Bohrscheibe „3“
- Bild 44: Interpolierte flächenhafte Darstellung der maximalen Frequenzanzeigen an Bohrscheibe 1
- Bild 45: Interpolierte flächenhafte Darstellung der maximalen Frequenzanzeigen an Bohrscheibe 3
- Bild 46: Plattenkennzeichnung A 92
- Bild 47: Messpositionen auf der A 92 im Bereich Anschlussstelle Freising Ost, Plattennummerierung auf rechtem Fahrstreifen
- Bild 48: Messergebnis A 92, Standstreifen Platte 9657, Position der Querscheinfuge bei 0,9 m. Die hohen Amplitudenwerte bei 3,8–4 kHz an der Fugenposition stellen die Anzeige eines Horizontalrisses dar.
- Bild 49: Ansicht der Bohrlochwand einer Kernbohrung an der Fuge der Messung in Bild 48. Auf der Höhe des Kerbschnittgrundes ist ein deutlicher Riss erkennbar.
- Bild 50: Messergebnis A 92, re. Fahrspur Platte 9647, Position der Querscheinfuge bei 0,9 m
- Bild 51: Ergebnis einer Ultraschallmessung über Fuge zu Platte 9647, Standstreifen (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz–65 kHz, Ersteinsätze gemutet). A: Fugenposition, B: Rissanzeigen, C: Rückwandechos
- Bild 52: Ergebnis einer Ultraschallmessung über Fuge zu Platte 9651, Standstreifen (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz–65 kHz, Ersteinsätze gemutet). A: Fugenposition, B: Rückwandechos. Im Vergleich zu Bild 51 keine erhöhten Amplituden im Fugenbereich
- Bild 53: Rissbildungen an Plattenunterseite im linken Fahrstreifen (Foto: Autobahndirektion Südbayern)
- Bild 54: Repräsentative Lage von Messlinien und Kernbohrungen auf A 92 bei Oberschleißheim, Fahrtrichtung Deggendorf, Betriebskilometer 8,215–8,245
- Bild 55: Messung entlang Längsfuge der Platte in Abbildung 53 (BK 8,245), Position der Querscheinfuge bei 1,6 m
- Bild 56: Messung an Platte in Abbildung 53 (BK 8,245) mit 70 cm Abstand zur Längsfuge, Position der Querscheinfuge bei 1,6 m
- Bild 57: Ultraschallmessung parallel zur Querscheinfuge (Bandpassgefilterte Rohdaten, Passband 30 kHz–65 kHz). A: Reflexionen der Dübel, B: Reflexionen aus Überlagerung von Dübel und Riss, C: Rückwandechos
- Bild 58: SAFT-Bearbeitung des Datensatzes in Bild 57. A: Dübel, B: Rissanzeige, C: Rückwandanzeige
- Bild 59: Bohrkern aus Fugenkreuzbereich wo eine Rissbildung an der Plattenunterseite sichtbar war (siehe Bild 53). Die Pfeile markieren einen auslaufenden Riss.
- Bild 60: Repräsentative Lage der Messlinien auf A 38 und A 14
- Bild 61: Messergebnis A 38, Profilbeginn auf Platte 3302. Position der Querscheinfuge bei 1 m

- Bild 62: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 0369. Position der Querscheinfuge bei 1 m
- Bild 63: Kontrastverstärkte photographische Aufnahme eines Fugenkreuzes auf der A 14 bei Plattenr. 0370, links unten: unbearbeitetes Foto. Die Aufnahme entstand, als die Fahrbahn noch leicht feucht war. Um die Fugen hält sich die Feuchtigkeit länger.
- Bild 64: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 0370, Position der Querscheinfuge bei 1 m, Messung direkt über Längsfuge
- Bild 65: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 600, Position der Querscheinfuge bei 1 m.
- Bild 66: Messergebnis A 14, Profilbeginn auf Platte 601, Position der Querscheinfuge bei 1 m
- Bild 67: Ultraschallmessung ohne Rissanzeigen an Fuge von Bild 65, Fugenposition bei 0,4 m (horizontal verlaufende, erhöhte Amplitudenwerte im Fugenbereich in ca. 19 cm Tiefe werden durch Bewehrungselemente hervorgerufen)
- Bild 68: Ultraschallmessung mit Reflexionen an möglichen Horizontalrissen an Fuge von Bild 66; Fugenposition bei 0,4 m
- Bild 69: Messergebnis mit Rissanzeige unter Verwendung aller Rohdaten
- Bild 70: Messergebnis wie in Bild 69, jedoch durch Weglassen von Rohdaten auf 1 Impakt pro 5 cm reduziert
- Bild 71: Messergebnis ohne Rissanzeige unter Verwendung aller Rohdaten
- Bild 72: Messergebnis wie in Abbildung 71, jedoch durch Weglassen von Rohdaten auf 1 Impakt pro 5 cm reduziert

Tabellen

- Tabelle 1: Übersicht zerstörungsfreier Prüfverfahren mit Potenzial zur vorliegenden Fragestellung
- Tabelle 2: Die wichtigsten zum Betrieb zu definierenden Parameter
- Tabelle 3: Positionen (re. Fs: rechte Fahrspur; St.: Standstreifen) der Bohrkern- und Befund hinsichtlich Rissbildung; Angabe der Plattendicke falls Bohrkern komplett geborgen werden konnte
- Tabelle 4: Validierung der Anzeigen des Prototyps mit Befund der Bohrkernentnahme bzw. Vergleich mit Ultraschallmessungen („-“: keine Rissanzeige, „+“ Rissanzeige vorhanden, „/“ keine Messung bzw. keine Bohrung durchgeführt, ✓: Übereinstimmung vorhanden, ✖: keine Übereinstimmung)

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Straßenbau“

2016

S 97: Einheitliche Bewertungskriterien für Elemente der Straßenverkehrsinfrastruktur im Hinblick auf Nachhaltigkeit – Straße und Tunnel

Fischer, Sauer, Jungwirth, Baumgärtner, Hess, Ditter, Roth, Xalter
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 98: Verifikation eines Europäischen Prüfverfahrens zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit von Asphalt

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

S 99: Ansprache und Steuerung von Healing-Effekten bei Asphalt

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

S 100: Probekörperherstellung für performance-basierte Asphaltprüfungen

R. Roos, C. Karcher, A. Wittenberg
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

S 101: Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS10 Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb

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

S 102: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Lysimeteruntersuchungen unter Laborbedingungen – Teil 1: Bodenmaterial

Kellermann-Kinner, Bürger, Marks € 16,50

S 103: Effizienz technischer Sicherungsmaßnahmen im Erdbau – Untersuchungen von Bauweisen in Freilandlysimetern – Teil 1: Untersuchungszeitraum 2010 – 2013

Brand, Tiffert, Endres, Schnell, Marks, Kocher € 19,50

S 104: Nachhaltige und effiziente Sanierung von Schlaglöchern

Thienert, Beckedahl, Koppers, Paffrath, Nafe € 15,00

2017

S 105: Untersuchungen zur Überprüfung des Luftporenanteils als Verdichtungsanforderung bei feinkörnigen Böden und bindigen Mischböden

Lypp, Birle, Heyer, Vogt € 20,50

S 106: Zusammenhang zwischen Bitumenchemie und straßenbautechnischen Eigenschaften

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

S 107: Baustoffe für standfeste Bankette

Koukoulidou, Birle, Heyer € 15,50

S 108: Neue Wege zur Finanzierung des Straßenbaus – Entwicklungen des europäischen Umweltrechts – Referate eines Forschungsseminars des Arbeitskreises „Straßenrecht“ am 21./22. September 2015 in Bonn

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

S 109: RIVA – Risikoanalyse wichtiger Verkehrsachsen des Bundesfernstraßennetzes im Kontext des Klimawandels

Korn, Leupold, Mayer, Kreienkamp, Spekat € 15,50

S 110: Vergleichbarkeit der Auslaugraten von Materialien mit und ohne Sandzumischung nach dem Säulenkurzverfahren (DIN 19528)

Lin, Linnemann, Vollpracht € 16,50

S 111: Bitumenextraktion aus Asphalt mit dem nachwachsenden Rohstoff Octansäuremethylester (Kokosester)

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

S 112: Nachweis der flächendeckenden Verdichtungskontrolle von Asphalt

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

S 113: Einfluss der Temperatur auf die Probekörperherstellung bei Niedrigtemperaturgussasphalt im Rahmen der Kontrollprüfungen

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

S 114: Studie zum Anwendungspotenzial von werksgemischten Kaltbauweisen – Asphalt

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

2018

S 115: Performance-orientierte Asphaltspezifikation – Entwicklung eines praxisingerechten Prüfverfahrens zur Ansprache des Verformungswiderstandes

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

S 116: Weiterführende Untersuchungen zur Beurteilung des Adhäsionsverhaltens zwischen Bitumen und Gestein

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

S 117: Bauzeitenverkürzung durch optimierten Asphalteinbau

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

S 118: Untersuchung der Dauerhaftigkeit unterschiedlicher Asphaltbinderkonzepte

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

- S 119: **Grundfragen des straßenrechtlichen Nutzungsregimes – Straßenrecht im Zeichen des Klimawandels**
Durner
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 120: **Temperaturuntersuchungen am und im Mobile Load Simulator MLS30 – Analyse des Temperatureinflusses während eines Dauerversuchs für weitere Versuchsprogramme**
Wacker, Scherckenbach, Jansen
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 121: **Repräsentative Ermittlung der performance-relevanten Asphalteeigenschaften als Grundlage neuer Vertragsbedingungen**
Roos, Plachkova-Dzhurova, Grafmüller, Milch, Hase, Schindler Schröter, Zumsande, Wörner, Kazakova, Patzak
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 122: **Ermittlung neuer Zuordnungswerte zur Einteilung bindiger Böden in Fest- und Lockergesteine**
Möller, Bundschuh, Birle, Heyer € 18,50
- S 123: **Bindemitteldesign für Asphaltstraßen – Definition eines chemisch-rheologischen Anforderungsprofils**
Stephan, Weigel € 19,00
- S 124: **Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte**
Müller, Schulte-Schrepping, Benra, Ludwig, Breitenbücher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 125: **Potenzial innovativer Messsysteme für den Erdbau – Literaturstudie**
Radenberg, Manke, Steeb, Jänicke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 126: **Bau und Messungen an einer Versuchsstrecke mit optimierter Kiestragschicht unter der Betondecke**
Freudenstein, Neudert
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 127: **Entwicklung eines Finite Elemente Modells für die rechnerische Dimensionierung von Straßen gemäß RDO Beton**
Villaret, Kiehne, Riwe, Villaret
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 128: **Reduzierung der Schwindverformungen des Straßenbetons durch den Einsatz neuartiger Schwindreduzierer**
Breitenbücher, Penttilä, Schulte-Schrepping
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 131: **Einfluss viskositäts- verändernder Zusätze auf den Zeitpunkt der Verkehrsfreigabe**
Radenberg, Gehrke
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 132: **Temperierte Straße Untersuchungen zur Realisierung eines Demonstrators auf dem duraBAST**
Oeser, Carreño, Renken, Kemper, Kneer, Höfler, Al-Sibai, Hess, Gouya, zu Dohna, Steins € 15,50
- S 133: **Beanspruchung der Straßeninfrastruktur durch Lang-Lkw – Stufe 2: Nacherhebung**
Wolf, Uhlig
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 134: **Temperatureinfluss auf die Sichtbarkeit von Substanzmerkmalen (Oberfläche)**
Skakuj, Balck, Beckedahl, Schrödter, Koppers, Ramadan
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 135: **Eignung von Boden-Bindemittel-Gemischen als Baustoff für den Hinterfüllbereich von Bauwerken**
Botor, Tost € 15,50
- S 136: **KiST-Zonen-Karte RDO und RSO Asphalt**
Augter, Kayser in Vorbereitung
- S 137: **Ressourcenschonung – Bedingungen für die Verwendung organogener und weicher Böden sowie von Sekundärbaustoffen als Massenbaustoffe im Erdbau**
Cudmani, Heyer, Engel, Schoenherr in Vorbereitung
- S 138: **Entwicklung eines scannenden Prüfgeräts zur Detektion von Delaminationen in Betonfahrbahndecken**
Groschup, Große, Eger, Freudenstein
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

2019

- S 129: **Verfahren zur Prognose des Alterungsverhaltens von Asphalt**
Hase, Beyersdorf, Hase, Rademacher
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.
- S 130: **Entwicklung einer Prüfsystematik für Porous Mastic Asphalt (PMA)**
Radenberg, Holzwarth
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann unter <http://bast.opus.hbz-nrw.de/> heruntergeladen werden.

Fachverlag NW in der Carl Ed. Schünemann KG
Zweite Schlachtpforte 7 · 28195 Bremen
Tel. +(0)421/3 69 03-53 · Fax +(0)421/3 69 03-63

Alternativ können Sie alle lieferbaren Titel auch auf unserer Website finden und bestellen.

www.schuenemann-verlag.de

Alle Berichte, die nur in digitaler Form erscheinen, können wir auf Wunsch als »Book on Demand« für Sie herstellen.