

# Einsatz von Ultraschallecho bei der Untersuchung von Spannbetonbrücken in der Praxis

Sebastian SCHULZE  
Hupfer Ingenieure, Hamburg  
schulze@hupfer-ingenieure.com

**Kurzfassung.** Anhand zweier Praxisbeispiele unterstreicht dieser Beitrag die Bedeutung des Ultraschallecho-Verfahrens bei der Lösung komplexer Aufgabenstellungen der Zerstörungsfreien Prüfung im Bauwesen (ZfPBau).

In massiven Plattenbalken einer per externer Vorspannung zu verstärkenden Spannbetonbrücke waren vor Befestigung der Ankerblöcke sämtliche internen Spannlieder exakt zu lokalisieren. Dieses Beispiel zeigt neben der Mächtigkeit des Verfahrens auch dessen Grenzen auf und belegt die Vorteile einer direkten grafischen Ergebnisvisualisierung.

Als Ausblick, momentan noch eher auf den aktuellen Stand der Forschung als den der Praxis, wird im zweiten Beispiel die Nutzung der bildgebenden Phasenauswertung zur Gewinnung weiterer Informationen aus Ultraschallmessdaten, insbesondere zur Identität von Reflektoren in Beton, erläutert. An einer neu erbauten Spannbetonbrücke in Hohlkastenbauweise konnte damit die Lage eines Hüllrohrverstopfers lokalisiert und die Ausdehnung der Blockade im Hüllrohr abgeschätzt werden.

Beide Messeinsätze erfolgten unter baustellenüblichen zeitlichen und räumlichen Rahmenbedingungen. Für die Datenaufnahme wurde jeweils ein flexibel einsetzbares Handgerät verwendet. Datenbearbeitung und Ergebnisdarstellung wurden mit einer praxisgerechten Forschungssoftware realisiert. Von der Umsetzbarkeit her ist das Ultraschallecho-Verfahren damit endgültig in der Praxis angekommen.

## 1. Einführung

Bei der Untersuchung von Spannbetonbauteilen ist das bildgebende Ultraschallecho-Verfahren in vielen Fällen die einzig zielführend einsetzbare zerstörungsfreie Untersuchungsmethode. Eine hohe Eindringtiefe in Beton und die Fähigkeit, in bzw. hinter akustisch angekoppelte stählerne Einbauteile zu „blicken“, macht Ultraschall zum optimalen, nicht selten gar zum einzig einsetzbaren Verfahren für derartige Bauteile.

Dennoch kann selbst die Lageortung von Spanngliedern schwierig sein, wenn diese hinter sehr dichter Bewehrung oder in größeren Tiefen liegen. Beides ist bei den üblicherweise interessierenden neuralgischen Punkten einer Spannbetonkonstruktion, im Bereich von Koppelstellen oder Endverankerungen, häufig der Fall.

Eine weitere häufig gestellte Aufgabe ist die Einschätzung des Verpresszustands von Hüllrohren. Die Nutzung der Phaseninformation von Reflexionsanzeigen, bei großen Messbereichen idealerweise farbkodiert im untersuchten Volumen abgebildet, hat sich

hierbei als besonders wertvoll zur Unterscheidung von Stahl und Luft in Beton erwiesen [1].

## **2. Ultraschalluntersuchung von Stahlbeton**

### *2.1 Geschichte*

Ultraschallprüfungen waren im Ingenieurwesen jahrzehntlang nur an homogenen Werkstoffen wie Stahl möglich. Erst mit der Entwicklung von Niederfrequenzprüfköpfen wurde die Verwendung zu Forschungszwecken auch an Betonprobekörpern möglich. Da stets Koppelmittel für das Einbringen von Schallenergie in den Beton erforderlich und nur punktuelle Messungen möglich waren, war ein praxisgerechter Einsatz an Bauteilen realitätsnaher Größe nicht möglich. Dennoch konnte erheblicher wissenschaftlicher Fortschritt bei der Entwicklung von Rekonstruktionsalgorithmen, Modellen und Simulationen erzielt werden. Meilensteine auf dem Weg zu einer praxisgerechten Untersuchungsmethode sind schließlich die Entwicklung koppelmittelfrei arbeitender Punktkontaktprüfköpfe [2] und eine Beschleunigung der Messdatenaufnahme mit automatisierten Scannern [3] und multistatischen manuellen Geräten. Auch die Entwicklung spezialisierter Software für die Verarbeitung und Visualisierung von Ultraschallmessdaten schreitet weiter voran [4].

### *2.2 Gegenwärtiger Stand und Ausblick*

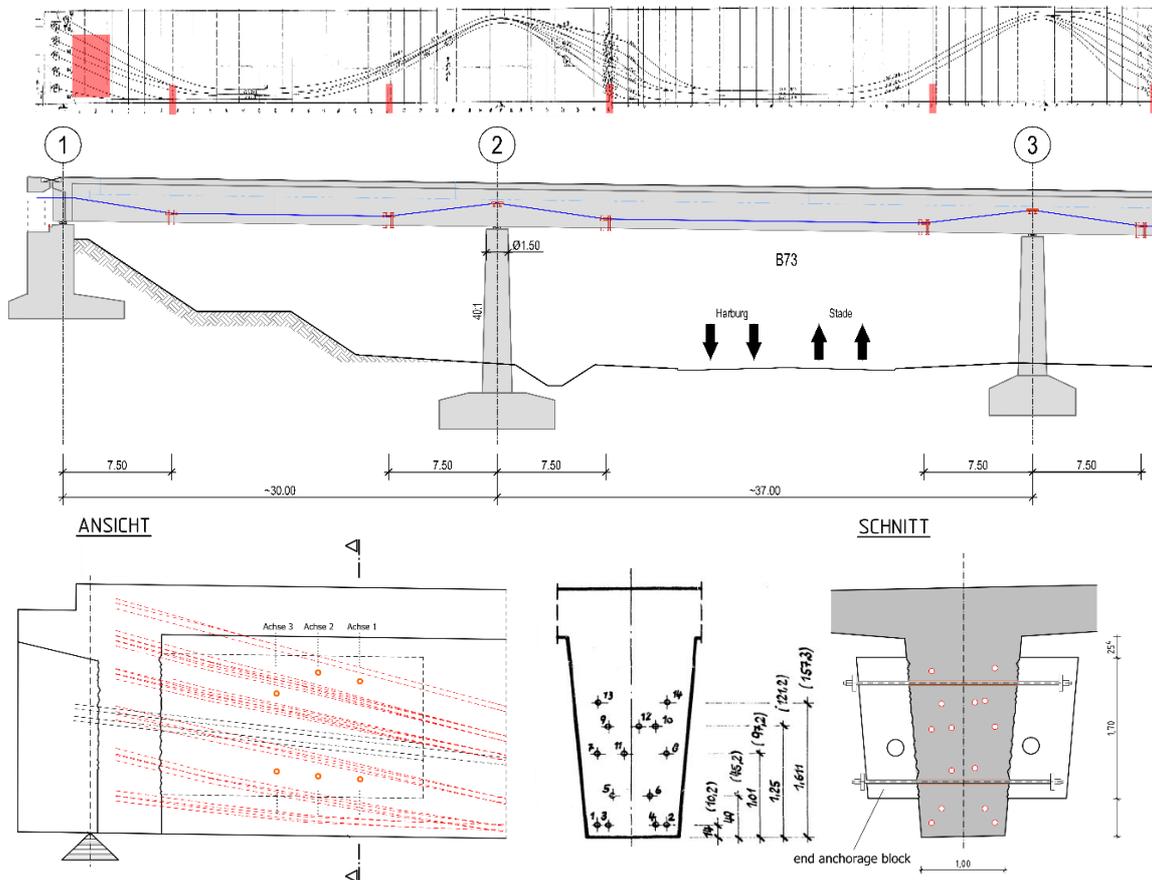
Mittlerweile ist das Ultraschallecho-Verfahren zu einem leistungsfähigen Werkzeug der ZfPBau geworden. Mit den jüngsten Entwicklungen der Gerätetechnik wurde insbesondere die Messgeschwindigkeit, von jeher das größte Hemmnis eines auch wirtschaftlich sinnvollen Einsatzes von Ultraschall im Bauwesen, deutlich verbessert. Mit dem Verfahren können nun Einbauteile wie Bewehrung und Spannglieder auch in großen Tiefen mit vertretbarem Aufwand detektiert werden. Die Dickenmessung von Bauteilen ist bis in mehrere Meter Tiefe möglich. Dies ermöglicht die Rekonstruktion ganzer Bauteilquerschnitte in relativ kurzer Zeit. Als ein aktuelles Forschungsthema auf dem Gebiet der Ultraschalluntersuchung kann die Entwicklung von Prüfköpfen für luftgekoppelte Einschallung von Ultraschallwellen genannt werden [5], welches eine erhebliche Beschleunigung der Messgeschwindigkeit bedeuten könnte.

## **3. Praxisfall 1: Effiziente Spanngliedortung in Plattenbalken [6]**

### *3.1 Aufgabenstellung*

In Hamburg war die 1970 erbaute A7-Brücke über die B73 mittels externer Vorspannung für die Verkehrslasten des 21. Jahrhunderts zu ertüchtigen. Diese aus zwei Überbauten bestehende, siebenfeldrige zweistegige Plattenbalkenbrücke mit einer Gesamtlänge von 245 m besitzt trapezförmige Balken mit einer Breite von ca. 1,0 m bis 1,4 m und 14 internen Längsspanngliedern. Abb. 1 oben zeigt für die äußeren Felder einen Überblick zur Lage der internen Spannglieder. Markiert sind die vorgesehenen Umlenk- und Verankerungsstellen der externen Spannglieder, deren Verlauf den statischen Erfordernissen gemäß weitgehend mit jenem der internen Spannglieder übereinstimmen muss (Abb 1 oben/mitte). Abb. 1 unten zeigt die Soll-Lage der zu den Ankerkörpern hin aus der Regel-Tieflage im Feld auffächernden internen Spannglieder gemäß originärer Pläne und die darauf abgestimmte Lage der Bohrungen zur Quervorspannung der

Endverankerungsblöcke, welche für die Einleitung der externen Vorspannkraft in den Balken erforderlich sind. Der minimale lichte Abstand zwischen den Soll-Lagen der internen Spannglieder und der Querbohrungen liegt bei ca. 5 cm. Dies zeigt die Notwendigkeit, die Lokalisierungsgenauigkeit der internen Spannglieder zu maximieren - auch für die zum Teil verdeckt liegenden, d.h. abschnittsweise durch andere Spannglieder abgeschatteten Hüllrohre.



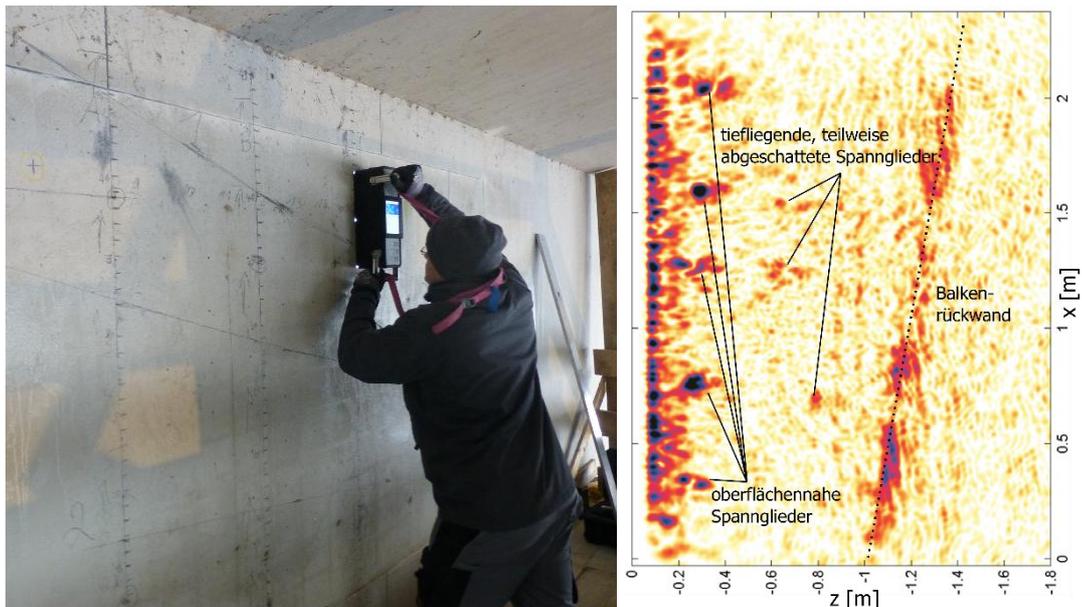
**Abb. 1.** Zeichnungen zur Lage der internen und externen Vorspannung und der Bohrungen der Quervorspannung der Endverankerungsblöcke.

### 3.2 Messdatenaufnahme

Die Ortung der oberflächennahen Spannglieder an den Umlenkstellen im Feld war mit Impuls-Radar als quasi standardisierte Messaufgabe möglich. Am Ende der Längsträger war der Gehalt schlaffer Bewehrung höher, Radarverfahren waren nicht zielführend einsetzbar. Hier wurden ausschließlich Ultraschallmessungen mit einem manuell einsetzbaren multistatischen Messgerät ausgeführt, über die gesamte zugängliche Balkenhöhe in der Achse der drei geplanten Bohrungen (vgl. Abb. 1 unten links und Abb. 2 links). Gewählt wurde ein sehr enges Messraster, um die Sichtbarkeit von Reflektoren auch in größeren Tiefen zu maximieren.

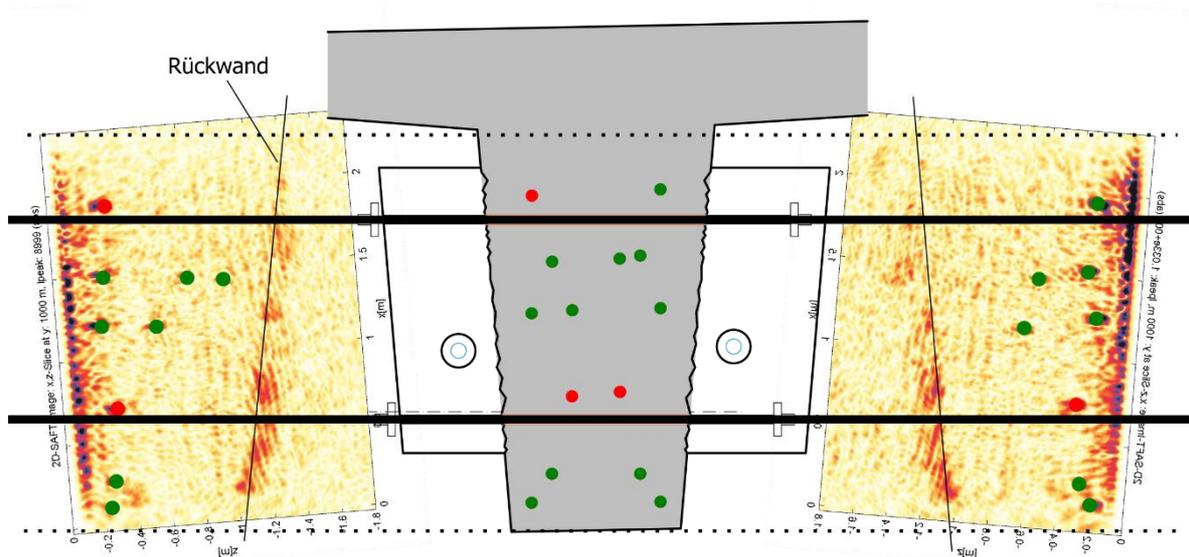
### 3.3 Ergebnisdarstellung und Bewertung

Abb. 2 rechts zeigt die Rekonstruktion einer einzelnen Messspur. Markiert sind alle detektierbaren Reflektoren - sämtliche oberflächennahen und mehrere tiefer liegende Spannglieder sowie die Rückwand. Letztere wird aufgrund der trapezform des Balkens schräg dargestellt, was die Verortung der detektierten Spannglieder im Bauteil erschwert.



**Abb. 2.** Messung mit multistatischem Handgerät und rekonstruiertes Ultraschallbilder einer Messlinie mit Markierung aller identifizierbaren Reflektoren

Eine elegante praktische Lösung war die grafische Darstellung der Resultate am gezeichneten Bauteilquerschnitt. Abb 3 zeigt den Balken in einem der untersuchten Querschnitte. Die Ultraschallbilder wurden beidseits des Balkens orientierungs-, positions- und maßstabsgetreu dargestellt, um einen direkten Abgleich der horizontalen Ist-Lage der Spannglieder im Balken in Bezug auf die Bohrachsen (schwarze Linien) zu ermöglichen. Auf diese Weise konnten sämtliche Spannglieder ihren Soll-Lagen zugeordnet und hinsichtlich der Lage zu den Soll-Bohrachsen bewertet werden.



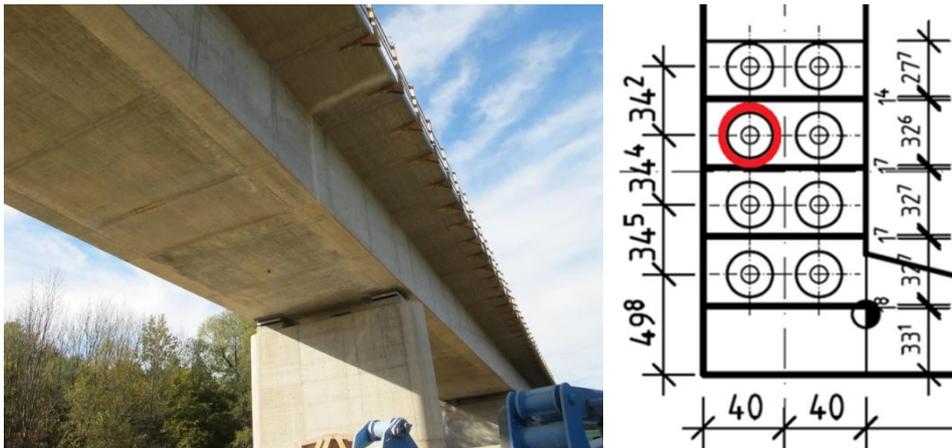
**Abb. 3.** Orientierungstreue Kombination von Soll-Bestandsplan und Ultraschallbildern (schwarze Linien: verlängerte Bohrachsen; grüne/rote Punkte: Markierung und Lagebewertung detektierter Spannglieder)

Ein wesentlicher Vorteil dieser rein grafischen Ergebnisdarstellung war die klare Nachvollziehbarkeit für alle Projektbeteiligten, ohne dass diese vertiefte Kenntnisse der Ultraschallprüfung im Bauwesen besitzen mussten. Dies trug bei den Beteiligten signifikant zu einer verbesserten Akzeptanz der ZiFBau bei.

## 4. Praxisfall 2: Effiziente Spannliedortung in Plattenbalken [7]

### 4.1 Aufgabenstellung

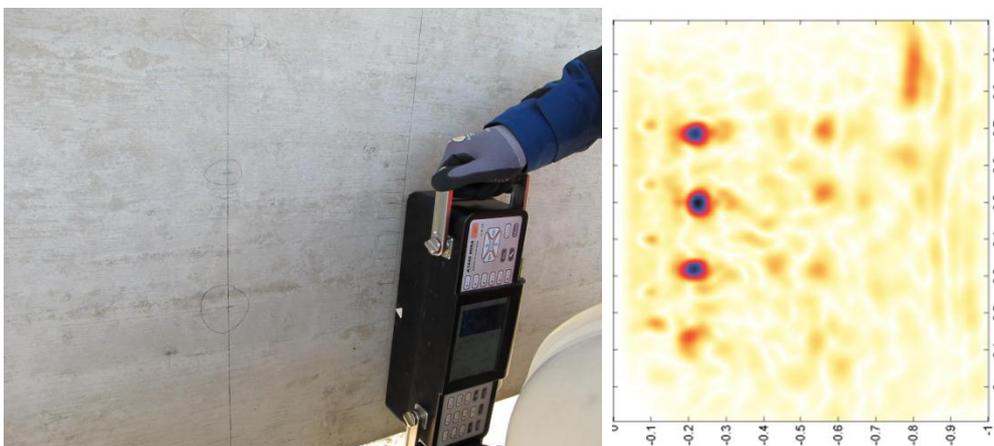
Bei Aufbringen der Vorspannkkräfte an einem Abschnitt einer neu erbauten Spannbetonbrücke in Hohlkastenbauweise wurden an einem Spannlied (Abb. 4) die errechneten Dehnwege des Litzenstahls nicht erreicht. Das Spannungs-Dehnungs-Verhältnis war etwa doppelt so hoch wie erwartet, weshalb auf eine Blockade der Spannlitzen etwa mittig im Spannabschnitt geschlossen wurde. Aufgabe war es, die Blockadestelle zerstörungsfrei zu lokalisieren und, sofern möglich, ihre Ausdehnung abzuschätzen. Dafür kam nur das Ultraschallecho-Verfahren infrage.



**Abb. 4.** Untersicht der Brücke mit Bauabschnittsfuge und Planausschnitt des Hohlkastenquerschnitts mit Darstellung der Spannlieder an der Koppelstelle (markiert: fragliches Spannlied)

### 3.2 Messdatenaufnahme

Sämtliche Messungen am Hohlkastensteg wurden von einem Hubsteiger aus durchgeführt. Zunächst wurden Kalibriermessungen vorgenommen, um geeignete Geräte, Frequenzen und Schrittweiten für die folgenden Messungen festzulegen. Eingesetzt wurden sowohl bistatische als auch multistatische Handgeräte. Abb. 5 zeigt die Datenaufnahme am Hohlkastensteg mit dem multistatischen Messgerät. Die relevanten Reflektoren (oberflächennahe Bewehrung, erste und zweite Spannliedlage und Rückwand des Hohlkastens ab ca. 0,7 m Höhe) sind gut erkennbar.



**Abb. 5.** Multistatische Datenaufnahme am Hohlkastensteg und Ultraschallbild (B-Bild) des Stegquerschnitts

Die Untersuchung des fraglichen Hüllrohrs wurde durchgeführt, indem über eine Länge von ca. 16 m um den Mittelpunkt des Spannabschnitts dem Hüllrohrverlauf folgend mit konstanter Schrittweite Ultraschallmessungen durchgeführt wurden. In Abb. 6 ist der für die Bewertung relevante, etwa 9 m lange Abschnitt des Spannglieds markiert. Die vertikale Markierung zeigt die Lage der Kalibriermessung.

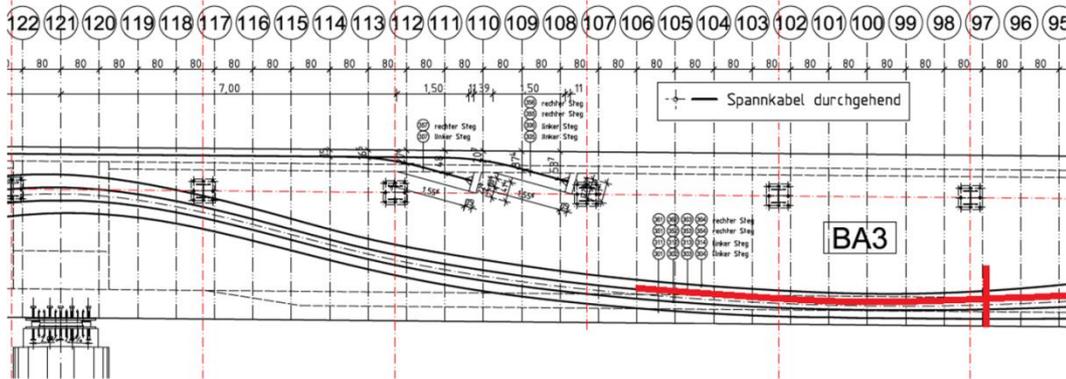


Abb. 6. Lageplan der Spannglieder im Hohlkastensteg mit Markierung der relevanten Messbereiche

Nach Zusammenfügen aller Messdaten zu einem Datenvolumen war die in Abb. 7 gezeigte Darstellung möglich. Da die Datenaufnahme dem Spanngliedverlauf folgte, ist die Abbildung des untersuchten Hüllrohrs nun linearisiert. Dargestellt sind vertikale Tiefenschnitte durch den Hohlkastensteg in Intensitäts- und Phasendarstellung.

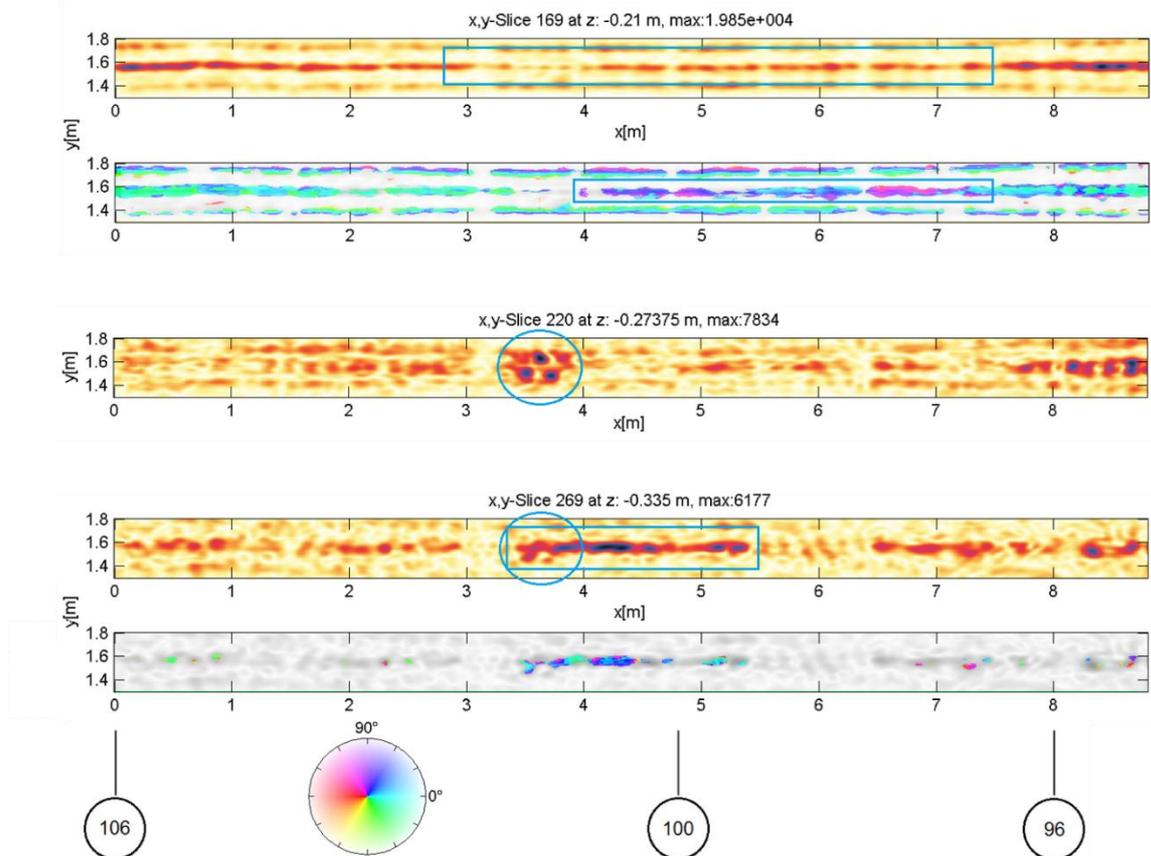


Abb. 7. Tiefenschnitte (C-Scans) in Intensitäts- und Phasendarstellung im relevanten Spanngliedabschnitt in der Tiefe der Hüllrohroberseite (ca. 21 cm), der Anzeige der Einbruchsstelle (ca. 27 cm) und der Hüllrohrrückwand (ca. 34cm)

Im Längsschnitt in der Tiefe der Hüllrohroberseite (Abb. 7 oben) ist die geringe Reflexionsintensität im markierten Bereich ein erstes Indiz für einen möglichen Schadbereich. Die Anzeige deutet darauf hin, dass im Gegensatz zu den umliegenden Bereichen keine vollständige Reflexion an der Grenze zu Luft (leeres Hüllrohr, Stahl im Hüllrohr ohne akustische Ankopplung an den umgrenzenden Beton) erfolgt, sondern hier ein Teil der Schallenergie in das gefüllte Hüllrohr eindringt. Die Reflexionsintensität ist dementsprechend geringer. Während die Interpretation der reinen Intensitätsanzeige oft grenzwertig ist, liefert die Darstellung der Phasenlage einen starken Hinweis: Der gegenüber der Anzeige in den umliegenden Bereichen (Reflexion an Luft) deutlich abweichende Phasenwert deutet auf eine Reflexion am nun akustisch angekoppelten Spannstahl.

Die auffällige Anzeige in Abb. 7 mitte weist auf eine Beschädigung des Hüllrohrs hin, mutmaßlich entstanden vor oder während der Betonage durch Aufreißen der Hüllrohrwandung durch einen Fremdkörper. Die Einbruchstelle wurde damit mit hoher Wahrscheinlichkeit lokalisiert. Die Phasenanzeige enthielt hier keine weiteren Informationen.

Abb 7. unten zeigt einen Längsschnitt etwa in der Tiefe der Rückwand der Hüllrohre. Die erhöhte Intensität im markierten Bereich passt zur Lokalisierung der Einbruchstelle, die Phasenlage deutet auf eine Reflexion an einem akustisch weicherem Medium. Von der Einbruchstelle aus ist offenbar der eingebrochene Beton in Richtung des Tiefpunkts des Hüllrohrverlaufs (Achse 100, vgl. Abb. 6) geflossen und dann erstarrt.

## **5. Fazit**

Die Fallbeispiele zeigen das Potential der (phasengestützten) Ultraschallechomessung bei der Lösung von Sonderfragen in der ZfPBau. Mit den jüngsten Fortschritten in Messtechnik, Datenauswertung und Visualisierung ist mittlerweile auch der Einsatz unter realistischen Praxisbedingungen zielführend möglich. Der Zeitaufwand vor Ort hielt sich jeweils in vertretbaren Grenzen: An der zu verstärkenden Brücke konnten an zwei Einsatztagen insgesamt acht Endverankerungen für je sechs Bohrungen untersucht werden. Die Messdatenaufnahme für die Fehlbereichsortung am Brückenneubau war innerhalb eines Tages möglich. Beide Einsätze fanden baubegleitend statt.

Bei allen Untersuchungen in der Praxis zeigt sich immer wieder, dass der Zustand des Bauwerks erheblichen Einfluss auf Machbarkeit und Aussagefähigkeit von Ultraschallmessungen hat. Insbesondere Rissbildung und schlechte Verdichtung haben in der Regel stark negative Auswirkungen auf Messergebnisse. Unter guten Randbedingungen aber ist das Ultraschallecho-Verfahren eine erhebliche Erweiterung für das Portfolio der zerstörungsfrei lösbaren Aufgabenstellungen in der ZfPBau.

## **6. Danksagung**

Die beschriebenen Resultate und Erkenntnisse wurden durch Forschungsarbeit an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung (BAM) in Berlin, am Fachbereich 8.2 Zerstörungsfreie Schadensdiagnose und Umweltmessverfahren unter Leitung von Herrn Dr. Herbert Wiggenhauser ermöglicht. Der Schwerpunkt Ultraschall wird im Fachbereich von Herrn Dr. Martin Krause bearbeitet. Sämtliche gezeigten Ultraschallbilder wurden mit einer am Fachgebiet Theorie der Elektrotechnik und Photonik der Universität Kassel von Herrn Dr. Klaus Mayer und seiner Gruppe entwickelten Software erarbeitet. Den genannten, und den (ehemaligen) Kollegen am Fachbereich 8.2 der BAM, gilt höchster Dank für Ihre Anleitung und Unterstützung.

## Referenzen

- [1] Milmann, B., Krause, M., Mielentz, F., Mayer, K.: Ultraschallecho-Verfahren für Spannbeton: Signifikanter Nachweis von Verpressfehlern mit Phasenauswertung. In: Tagungsband der Fachtagung Bauwerksdiagnose 2008, DGZfP. Beitrag zu Poster 11.
- [2] Shevaldykin, V., Samokrutov, A., Kozlov, V.: Ultrasonic Low-Frequency Short-Pulse Transducers with Dry Contact. In: Proceedings of the International Symposium “Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE)”, DGZfP. 2003
- [3] Taffe, A., et. al.: Bauwerksscanner zur automatisierten und kombinierten Anwendung zerstörungsfreier Prüfverfahren im Bauwesen. Beton- und Stahlbetonbau 106 (2011), H. 4, S. 267-276.
- [4] Mayer, K.: Softwarepaket InterSAFT zur bildgebenden Auswertung von Ultraschallechomessungen an Holzbauteilen. Im Auftrag der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung BAM (2008)
- [5] Maack, S.: Untersuchungen zum Schallfeld niederfrequenter Ultraschallprüfköpfe für die Anwendung im Bauwesen. Doktorarbeit, Technische Universität Berlin, 2012.
- [6] Schulze, S.: Einsatz von Ultraschallecho zur Spanngliedortung bei der Verstärkung von Brückenbauwerken. Beton- und Stahlbetonbau 110 (2015), H. 8, S. 521-528.
- [7] Schulze, S., Mayer, K., Krause, M.: Spannbetonuntersuchung mit bildgebenden Ultraschallecho-Verfahren, Beton- und Stahlbetonbau, 108 (2013), H. 12, S. 845-853.