



Ultraschallecho-Verfahren für Spannbeton: Signifikanter Nachweis von Verpressfehlern mit Phasenauswertung

B. MILMANN, M. KRAUSE, F. MIELENTZ,
Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
K. MAYER, Universität Kassel

Kurzfassung. Für den Nachweis von Verpressfehlern in Spannbetonkonstruktionen mit nachträglichem Verbund wird ein neues Auswertungsprinzip erläutert. Es beruht auf der Analyse der Phase des reflektierten Ultraschallpulses und erlaubt die signifikante Unterscheidung zwischen ordnungsgemäß verpressten und luftgefüllten Hüllrohrabschnitten, und zwar mit einer bildgebenden Auswertung.

In dem Beitrag wird das Prinzip zunächst anhand von Reflexionsmessungen an unterschiedlich dicken einbetonierten Metallplatten erläutert. Gezeigt wird dann die Anwendung an einbetonierten Hüllrohren mit künstlichen Verpressfehlern. An einigen Beispielen ergibt sich ein deutlich signifikanter Nachweis von Verpressfehlern gegenüber den bisher entwickelten Kriterien. Zusätzlich wird auf noch offene Fragen für die praxisorientierte Anwendung des Verfahrens für reale Spannsysteme eingegangen.

1 Einführung

Zu den sicherheitsrelevanten Prüfaufgaben für die Qualitätssicherung und Überprüfung von Ausführungsfehlern gehört die Lokalisierung von Verpressfehlern in Spannbetonkonstruktionen [1, 2]. Hier ist in den letzten zwei Jahren ein entscheidender Fortschritt für Spannbeton mit nachträglichem Verbund erreicht worden. Es ist nun möglich, die Reflexion der Ultraschallwellen an den Stahlritzen (hinter der Hüllrohrwand) in den ordnungsgemäß verpressten Spannkanalabschnitten qualitativ von der Reflexion an Hohlstellen (luftgefüllte Spannkanalabschnitte) zu unterscheiden, und zwar mit einem bildgebenden Verfahren.

Dabei wird der bekannte Effekt ausgenutzt, dass sich die Reflexion von Ultraschallwellen beim Übergang von Beton bzw. Verpressmörtel zu Stahl (akustisch dichteres Medium) anders darstellt als beim Übergang von Beton zu Luft (akustisch dünneres Medium). Zwischen beiden besteht unter idealen Bedingungen ein Phasenunterschied von 180° .

Da eine akustische Abbildung von Hüllrohren in der Praxis mit flächiger Messung und anschließender 3D-Rekonstruktionsrechnung (3D-SAFT) erfolgt, ist es erforderlich, diese Auswertung auf die entsprechenden Auswertungsmethoden zu übertragen. Dafür gibt es zwei Möglichkeiten: Eine Pulsformbetrachtung und die Berechnung des Phasenwertes in den rekonstruierten Ultraschallsignalen. Beide Möglichkeiten sind im Rahmen der DFG Forschergruppe FOR 384 entwickelt worden.

2 Kriterien zur Identifikation von Verpressfehlern

Die bisher angewendeten Kriterien zur Lokalisierung von Verpressfehlern mit Ultraschallechoverfahren beruhen

1. auf der hohen Amplitude des reflektierten Ultraschallsignals
2. auf der Tatsache, dass neben dem Eintrittsecho der Ultraschallpulse in ein Hüllrohr keine Signale aus dem Tiefenbereich der Rückseite des Hüllrohres messbar sind.

Wie in Abbildung 1 skizziert, besteht zwischen der Reflexion der Ultraschallpulse an den Stahllitzen und an einem Lufteinschluss ein deutlicher Unterschied des Reflexionskoeffizienten. Über eine bildgebende Darstellung der Hüllrohroberseite können dann die Verpressfehler über die Reflexionsintensität identifiziert werden [3].

Das Kriterium 2 beruht auf der Tatsache, dass die Ultraschallwellen bei guter Verpressung, also ohne Lufteinschlüsse, den Verpressmörtel und die Stahllitzen teilweise durchdringen bzw. an der Innenseite der Hüllrohrwand entlang laufen und sich Rückstreuungen aus dem Bereich der unteren Seite des Hüllrohres abbilden lassen. Im Hüllrohr vorhandene Lufteinschlüsse behindern nun die Schallausbreitung im Hüllrohr und unterdrücken damit diese Signale. Damit werden Verpressfehler indirekt angezeigt [3, 4]. Es muss noch ermittelt werden, für welche Spannsysteme dieser Effekt zuverlässig funktioniert.

Zur Verdeutlichung der beiden Kriterien sei auf ein schon länger bekanntes Beispiel an einem Bauteil mit einem künstlichen Verpressfehler verwiesen [3]: In Bild 2 ist der Tiefenschnitt aus einer flächigen Ultraschallmessung mit 3D-Rekonstruktion dargestellt, bei dem die Reflexionsintensität des luftgefüllten Hüllrohrabschnittes um 6 dB (2fach) höher liegt, als im benachbarten verpressten Abschnitt. Das unterbrochene Bild entsteht durch die Abschattung der Ultraschallpulse durch schlaffe Bewehrung.

Das links in Bild 2 erkennbare sehr intensive Signal aus einer Tiefe von 370 mm korrespondiert mit einem Lufteinschluss in der Messfläche abgewandten Seite des Hüllrohres (Foto Bild 2b). Auf welchem Weg die Ultraschallwellen die Rückseite des Hüllrohres genau erreichen, wurde mit Modellierungsrechnungen nachgebildet (Uni Kassel). Dabei treten noch offene Fragen auf.

Beide Kriterien sind in Laborversuchen an Probekörpern und in Praxisanwendungen sowohl experimentell als auch theoretisch eingehend untersucht und das Kriterium 1 mehrfach verifiziert worden. Es zeigt sich, dass die Deutlichkeit der Effekte von vielfältigen Kriterien abhängt, insbesondere vom Spannsystem (Hüllrohrgeometrie), der Betondeckung, der Qualität der Ultraschallanzeigen (Signal/Rausch-Verhältnis) und der bildgebenden Rekonstruktionsrechnung. Beide Kriterien unterliegen außerdem den Störeinflüssen am Bauwerk (schlaffe Bewehrung, Oberflächenbeschaffenheit, Betonrezeptur). Zusätzlich geht es bei den genannten Effekten um den Schalldurchgang und die Reflexion durch mehrere Schichten (Beton/Hüllrohr/Verpressmörtel/Spanndraht), bei denen an jeder Grenzfläche zusätzlich Wellenumwandlungen zwischen Druck- und Scherwellen (Longitudinal- und Transversalwellen) auftreten. Zur Weiterentwicklung des Verfahrens und zum vollständigen Verständnis aller Effekte wird die elastische Wellenausbreitung modelliert (EFIT: Elastodynamische Finite Integrationstechnik [5]).

Die Betrachtung des Phasenverhaltens der reflektierten Ultraschallpulse bietet nun ein neues Kriterium zur Lokalisierung von Lufteinschlüssen mit großer Aussagesicherheit.

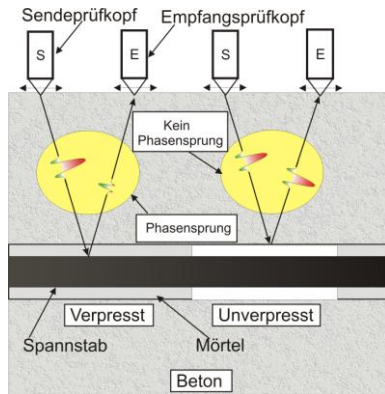
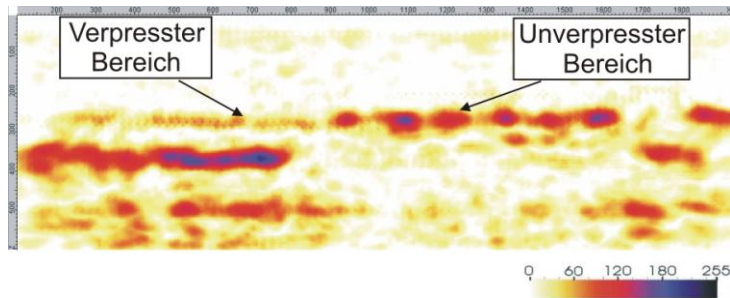
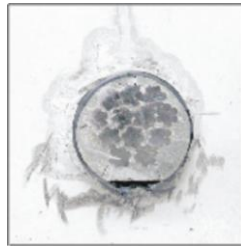


Bild 1 Reflexion von Ultraschallpulsen an einem Spannkanaal (Prinzipbild für SH-Scherwellen).



2a)



2b) Seitenansicht Hüllrohr 80 mm mit 12 Spannlitzen á 16 mm (Luftabschluss unten)

Bild 2 a) Ultraschall-3D Abbildung eines Bauteils mit künstlichen Verpressfehlern (Längsschnitt über einem Spannkanaal aus Ultraschall 3D-Rekonstruktion). b) Seitenansicht Hüllrohr

3 Prinzip des Phasensprunges an einbetonierten Metallplatten

Um sich der Frage der Ultraschallausbreitung und Reflexion in mehrschichtigen Systemen zu nähern, wurden zunächst Untersuchungen an einbetonierten Stahlplatten unterschiedlicher Dicke mit dahinter angebrachten Luft einschlässen vorgenommen. Um zu erklären, unter welchen Randbedingungen die Ultraschallpulse die Komponenten der Spannglieder (Hüllrohrwand, Verpressmörtel, Spannlitzen) durchdringen und/oder an ihnen reflektiert werden, enthält das untersuchte Bauteil einbetonierte Stahlplatten der Dicke 0,5 mm bis 40 mm, sowie Luft einschlässe (realisiert mit Styrodurplatten) und Spannlitzen (Probekörper BAM.NB.A1) (Bild 2) [6, 7]. Durch die flächige Konstruktion wird eine getrennte Betrachtung der Reflexionseffekte erreicht, weil die Streuung und Beugung an der geometrischen Form der Spannglieder vernachlässigt werden kann. Dieser Aufbau diente zum Studium sowohl der Ausbreitung der Ultraschallwellen, als auch der Erforschung der in der Literatur beschriebenen Abhängigkeit der Impact-Echo-Frequenz von der Reflexion am akustisch dünneren (Luft) oder dichterem Material (Stahl).

Die Ultraschallmessungen ergaben, dass die verwendeten Ultraschallpulse Stahlplatten von 0,5 mm und 2 mm Dicke ohne nennenswerte Reflexion durchdringen, und zwar unabhängig davon, ob sie profiliert oder glatt sind. Außerdem können die dahinter positionierten Litzen akustisch abgebildet werden. Luftgefüllte Bereiche unterscheiden sich deutlich von den Stahlplatten. Im Zusammenhang mit den Modellierungsrechnungen der Universität Kassel war daraus zu folgern, dass das Innere von Hüllrohren in Betonbauteilen mit Ultraschallwellen im Wellenlängenbereich um 5 cm prinzipiell analysiert werden kann.

Ein entscheidender Fortschritt wurde nun mit der Berücksichtigung der Phaseninformation der reflektierten Pulse in den rekonstruierten Daten erzielt. Durch die Betrachtung der Pulsform in der Reflexionsebene bzw. die Berechnung des Phasenwertes erhält man eine qualitative, mit Vorzeichenumkehr verbundene Unterscheidung zwischen Luft und Stahlreflexion, wie am Beispiel des Stahlplatten-Probekörpers in Bild 1 gezeigt ist (Bild 4, a und b). Hier konnte im Vergleich zur Intensitätsdarstellung eine Luftablösung im rechten Abschnitt der 15 mm dicken Platte eindeutig identifiziert werden.

Bild 5 zeigt ein Beispiel zur Pulsformanalyse des Reflexionspulses. Im unteren Teil des Bildes ist die Einhüllende des Reflexionssignals aus der Rekonstruktionsrechnung über der Tiefe an zwei unterschiedlichen Punkten verglichen: Links für den Schallübergang Beton/0,5 mm Stahl/Luft und rechts Beton/15 mm Stahl/Beton. Entsprechend der Einbautiefe der Stahlplatte von $z = 100$ mm erscheint das Reflexionsmaximum in der selben Tiefe. Betrachtet man dagegen die Wechselsignale aus der Rekonstruktionsrechnung (Bild 5 oben, so zeigt sich für die Reflexion am Übergang zur Luft die Vorzeichenfolge $-/+$ (grün/rot), während für den Übergang Beton / 15 mm Stahl die Vorzeichenfolge umgekehrt ist $+/-$ (rot/grün). Die Vorzeichenbetrachtung ist dabei symmetrisch zum Reflexionsmaximum der Einhüllenden und beide Signale haben die Phasendifferenz 180° . Sie kennzeichnen damit den erwarteten Phasensprung.

Ein Beispiel zur Berechnung des Phasenwertes ist in Bild 6 gezeigt, bei dem der Phasenwinkel aus dem rekonstruierten, reflektierten Ultraschallsignal farbkodiert dargestellt ist. Der Unterschied zwischen den Metallplatten mit 2 mm und 15 mm (Phasenwinkel 180°) und Luft (Styrodurplatten) (Phasenwinkel 0°) entspricht ziemlich genau dem theoretisch erwarteten Wert von 180° . Damit wird deutlich, dass die Unterscheidung von Reflexion an Stahl und Luft ab einer Plattendicke von 2 mm (ca. 5 % der Wellenlänge) bei ebenen Reflektoren sehr gut funktioniert [7, 8].

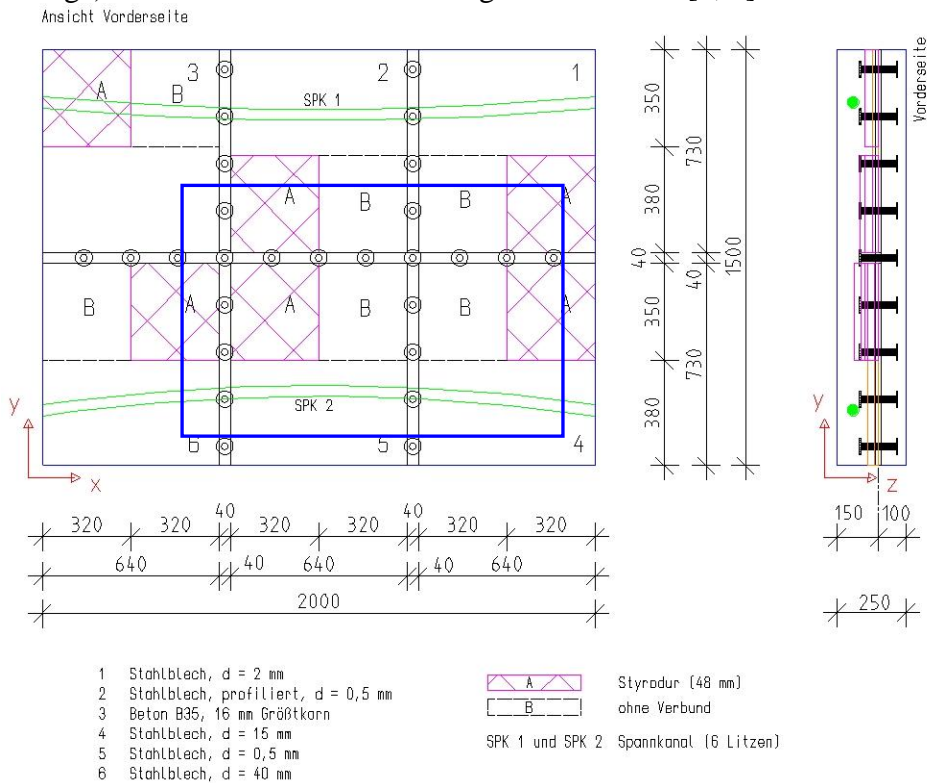


Bild 3 Konstruktionszeichnung Probekörper (oben: Ansicht Vorderseite)
unten: Foto der Rückseite vor dem Betonieren, die Styrodurplatten (gelb) stellen Lufteinschlüsse dar.

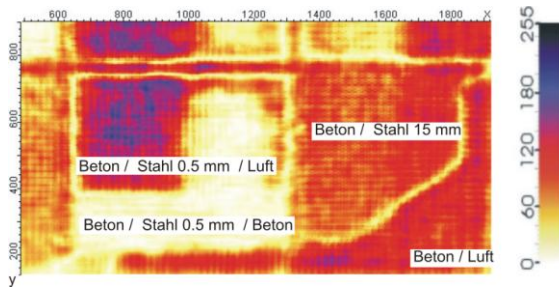


Bild 4 a) Ultraschall-Reflexion an einbetonierten Stahlplatten unterschiedlicher Dicke (0,5 mm bis 40 mm) Unterscheidung von Stahl und Luft über die Intensitätsdarstellung.

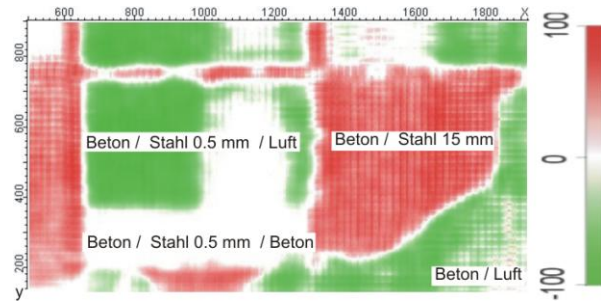


Bild 4 b) Messung wie Bild 4 a), farbcodierte Darstellung der Pulsform, dadurch qualitative Unterscheidung von Stahl und Luft über die Pulsform.

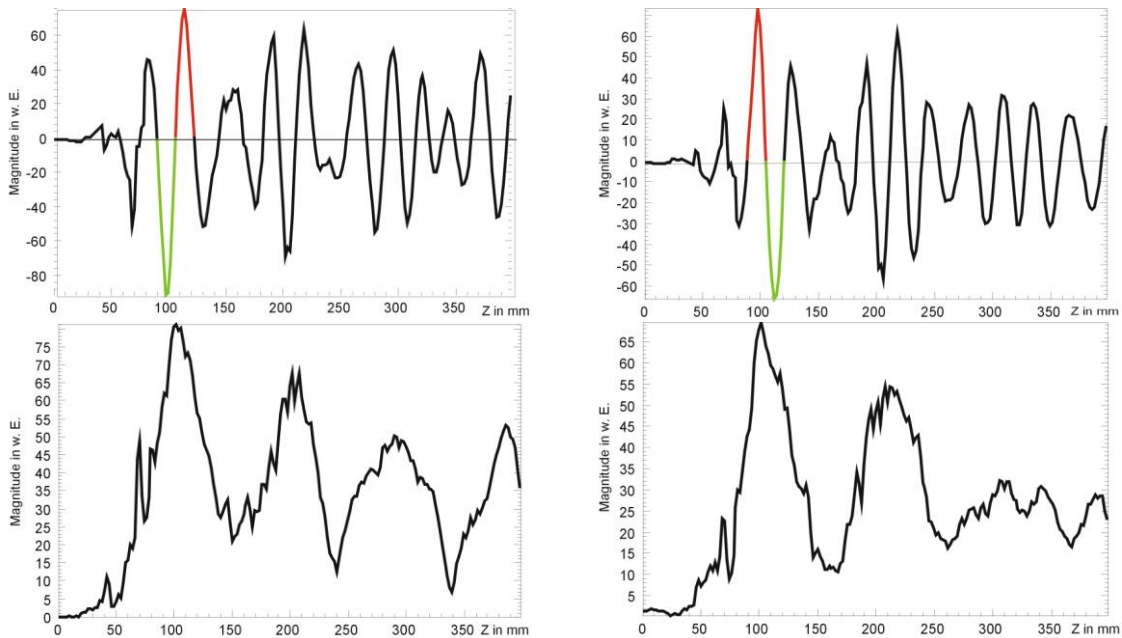


Bild 5 Pulsformänderung bei der Reflexion am dünneren Medium, gezeigt am Beispiel von Messpunkten am Metallplattenprobekörper (Bilder 3 und 4)

Unten: Einhüllende des reflektierten Pulses aus der SAFT-Rekonstruktion

links: Grenzfläche: Betone/Stahl 0,5 mm/Luft

rechts: Grenzfläche Betone/Stahl 15 mm

Oben: Nicht gleichgerichtete Kurvenform aus Bild 4

b) *Links:* -/+ Ungeänderte Pulsform: Betone/Luft

Rechts: +/- Phasensprung: Betone/Stahl;
Phasendifferenz: 180°.

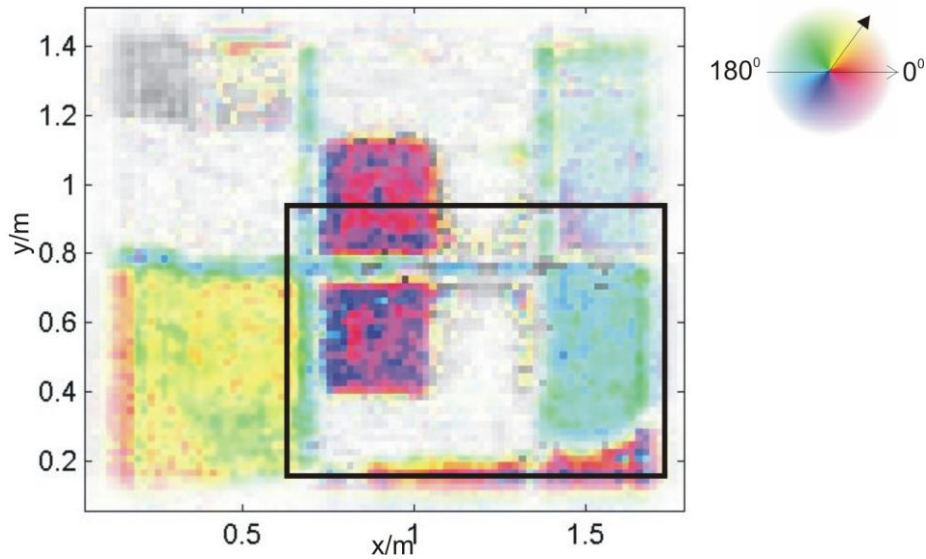


Bild 6 Phasenwinkelberechnung der Reflexion an einbetonierten Metallplatten (Ausschnitt wie Bild 4). Der Phasenwert wird berechnet wie in [7, 8] beschrieben. Reflexionen an Luft und Stahl unterscheiden sich durch eine Phasendifferenz von 180° .

4 Ergebnisse an einbetonierten Hüllrohren mit Verpressfehlern



Bild 7 Großer Betonprobekörper der BAM während des Verpressens der Hüllrohre.

Zur systematischen Untersuchung der Einflussbedingungen bei der Messung von Verpressfehlern gibt es seit 2003 in der BAM ein Testbauteil mit Spanngliedern verschiedenen Durchmessers und künstlichen Verpressfehlern unterschiedlicher Art, über den schon mehrfach berichtet wurde (Bild 7, **Großer Betonprobekörper** GBP, [9]). Für den vorliegenden Beitrag sind die Ergebnisse für zwei Hüllrohre, an denen sich das Potential der Phasendarstellung zur Lokalisierung von Verpressfehlern besonders gut demonstrieren lässt, exemplarisch dargestellt.

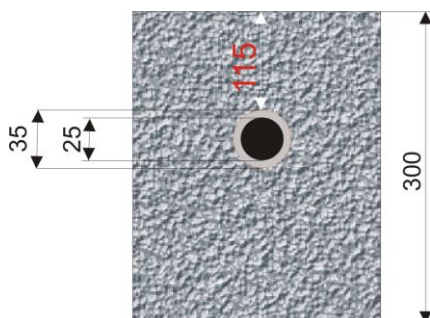


Bild 8 Geometrie Hüllrohr D3 am GBP.

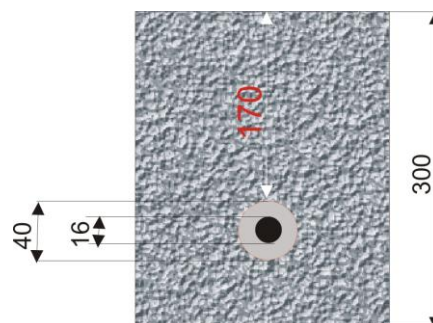


Bild 9 Geometrie Hüllrohr D2 am GBP.

Hüllrohr D3

Beim Spannglied D3 handelt es sich um einen 25 mm dicken Stabstahl in einem Hüllrohr mit 35 mm Durchmesser, beim Spannglied D2 um eine 16 mm Litze in einem Hüllrohr mit 40 mm Durchmesser (siehe Bild 8 und 9). Die Ultraschallmessungen erfolgten mit Transversalwellen der Mittenfrequenz 55 KHz mit einem Ultraschallmesskopf, der automatisiert ohne Koppelmittel betrieben wird. Genauere Informationen über solche Ultraschallechomessungen an Spannbetonbrücken findet man z. B. im Beitrag 14 (Brückenuntersuchung mit automatisierten Verfahren [10] in diesem Tagungsband bzw. in [11, 12]).

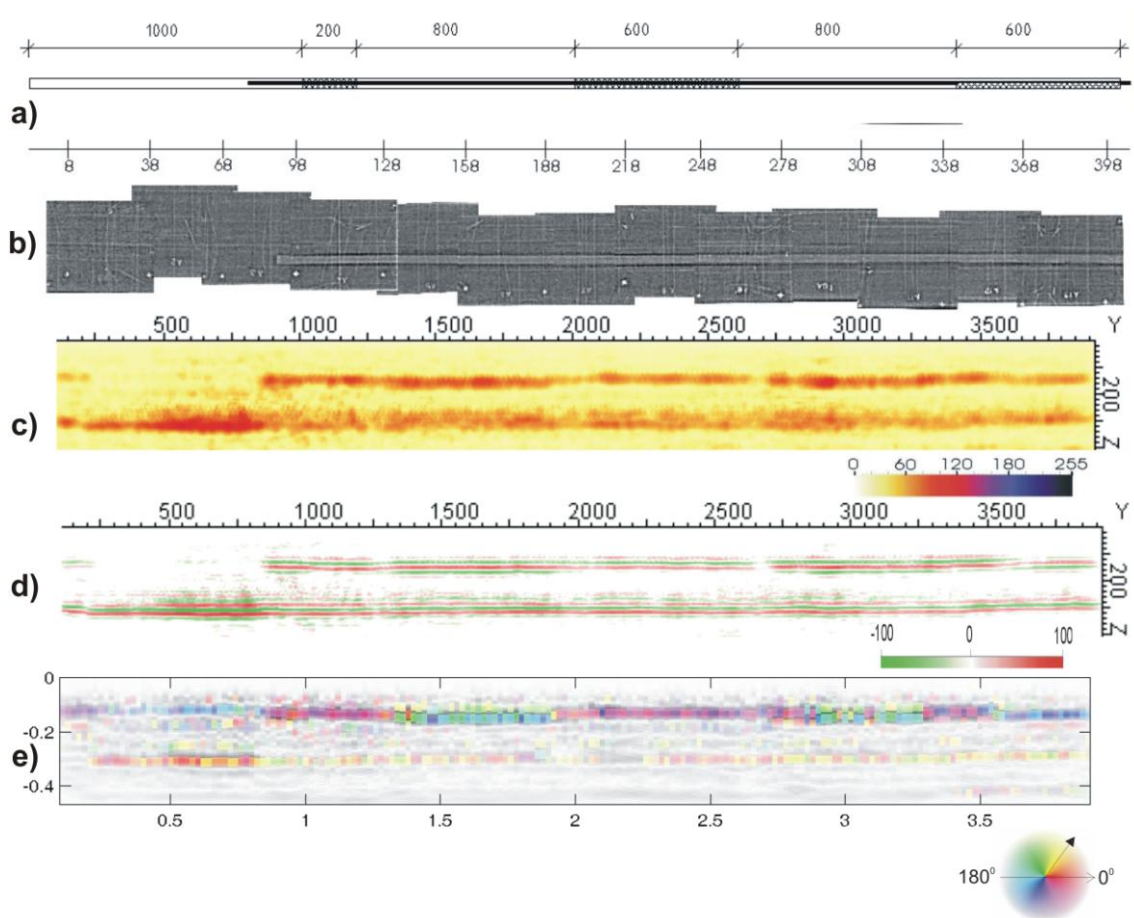


Bild 10 Ergebnis am Spannglied D2 (Bauteil GBP)

- a) Bauplan, b) Verifikation der Fehlstellen mit y-Radiographie (BAM VIII.3, Redmer)
- c) Ergebnis einer Messung mit Scanner und Messkopf 55 kHz Scherwellen, Polarisation parallel zum Hüllrohr (B-Bild aus SAFT-Rekonstruktion)
- d) Pulsformdarstellung (Wechselsignal) des gleichen Bereiches
- e) Phasenwert des reflektierten Pulses aus der FT-SAFT Rekonstruktion.

Im Bild 10 sind nun die Ergebnisse der bildgebenden Ultraschallmessungen für das Spannglied D3 im Vergleich mit dem Bauplan und der radiographischen Durchstrahlung, durchgeführt von BAM VIII.3, dargestellt.

Bild 10 a) zeigt die beabsichtigte Lage der künstlichen Verpressfehler, sie sind schraffiert. Bild 10 b) ist das Ergebnis der Radiographie, zusammengesetzt aus mehreren Einzelbildern, wobei hohe Schwärzung geringere Absorption kennzeichnet. Damit zeichnen sich die mit Luft statt mit Verpressmörtel gefüllten Abschnitte ab.

Bild 10 c) zeigt die Amplitude der Ultraschallreflexion in Falschfarbendarstellung. Dabei handelt es sich um die tiefenabhängige Intensität längs der Achse über dem Hüllrohr, dargestellt als Längsschnitt, in der Ultraschalltechnik wird das als (rekonstruiertes) B-Bild bezeichnet. In dieser Darstellung ist keine signifikante Erhöhung der Reflexionsamplitude im Bereich der Lufteinschlüsse abzulesen.

Dagegen ergibt sich aus der Phasenberechnung des Reflexionssignals ein eindeutiger Unterschied zwischen blau und rot. Gemäß Farbrad entspricht das einem Phasenunterschied von ungefähr 180° ähnlich wie in Bild 6. Damit sind die Lufteinschlüsse deutlich zu lokalisieren.

In Bild 10 d) ist die farbkodierte Signalform im Längsschnitt dargestellt. Die Vorzeichenfolge des Pulsmaximums entspricht grün/rot (-/+) für die luftgefüllten Abschnitte.

Das Ergebnis in diesem Hüllrohr zeigt also eine eindeutige Indikation der beiden mittleren Verpressfehler aus der phasenempfindlichen Auswertung. Aus der Intensitätsanzeige oder der Reflexionstiefe ist diese Unterscheidung hier nicht möglich. Die rechte Fehlstelle wird nur teilweise angezeigt, hier handelt es sich um einen nur halbseitig eingebrachten Verpressfehler.

Hüllrohr D2

Bei dem Hüllrohr D2 handelt es sich, wie in Bild 9 gezeigt, um ein Hüllrohr mit 40 mm Durchmesser, in das eine Litze von 16 mm Durchmesser eingebracht ist. Diese Anordnung entspricht zwar keinem üblichen Spannsystem, es sollte aber an diesem Hüllrohr untersucht werden, ob eine Reflexion von der Oberseite des Hüllrohres von der der inneren Reflexion an den Spanndrähten unterschieden werden kann.

Dies kann experimentell und rechnerisch bestätigt werden. Wie im Ultraschall B-Bild (Längsschnitt aus der Rekonstruktionsrechnung) in Bild 11 c) gezeigt, treten in den gut verpressten Abschnitten des Hüllrohres die Reflexionen aus einer Tiefe von 200 mm auf, während in den Bereichen mit Lufteinschlüssen die Betondeckung des Hüllrohres mit $z = 180$ mm erkennbar ist. Die Fehlstellen sind in der Radiographie (Bild 11 b)) deutlicher als für das Hüllrohr D3 zu erkennen, da hier die luftgefüllten Bereiche im Querschnitt größer sind.

In der farbcodierten Phasenwertdarstellung Bild 11 e) ergibt sich ein Unterschied zwischen den luftgefüllten und verpressten Bereichen von ca. 90° . Das ist signifikant, um die Fehlstelle anzuzeigen, aber kleiner als es der theoretischen Erwartung entspricht. Die Abweichung resultiert wahrscheinlich aus der Überlagerung mit Oberflächenwellen, die bei Hüllrohren mit geringer Betondeckung als Störeinfluss zunimmt.

Bild 12 zeigt zwei Details aus der Pulsformdarstellung aus Bild 11, und zwar einen Messpunkt an der luftgefüllten Stelle ($y = 2,50$ m) und einen an einem gut verpressten Punkt ($y = 3,00$ m). Die Pulsform zeigt deutlich eine Phasenumkehr zwischen beiden Punkten, sowie die gleichbleibende Pulsform des Rückwandechos bei $z = 300$ mm.

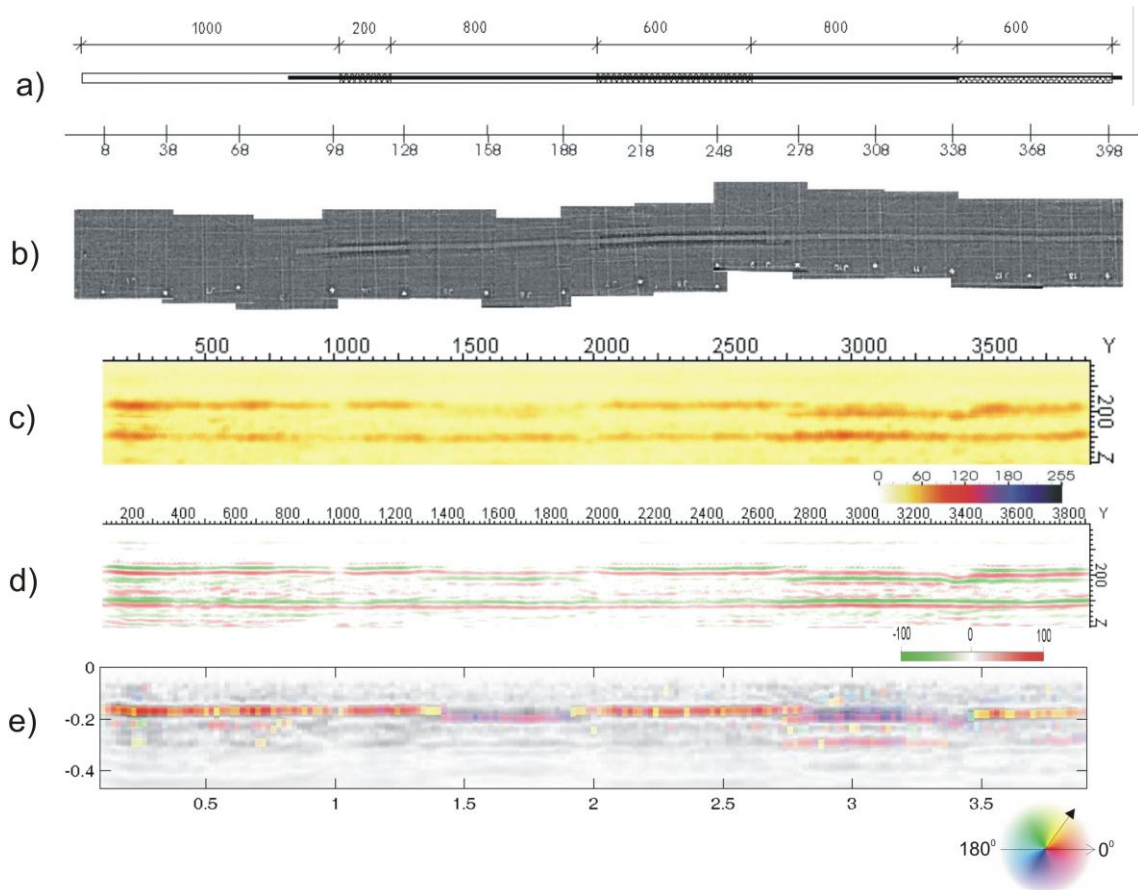


Bild 11 Ergebnisse am Spannkanal D3 (GBP):

- a) Bauplan, b) Verifikation der Fehlstellen mit y-Radiographie (BAM VIII.3, Redmer)
- c) Ergebnis einer Messung mit Scanner und Messkopf 55 kHz Scherwellen, Polarisation parallel zum Hüllrohr (B-Bild aus SAFT-Rekonstruktion)
- d) Pulsformdarstellung (Wechselsignal) des gleichen Bereiches
- e) Phasenwert des reflektierten Pulses aus der FT-SAFT Rekonstruktion.

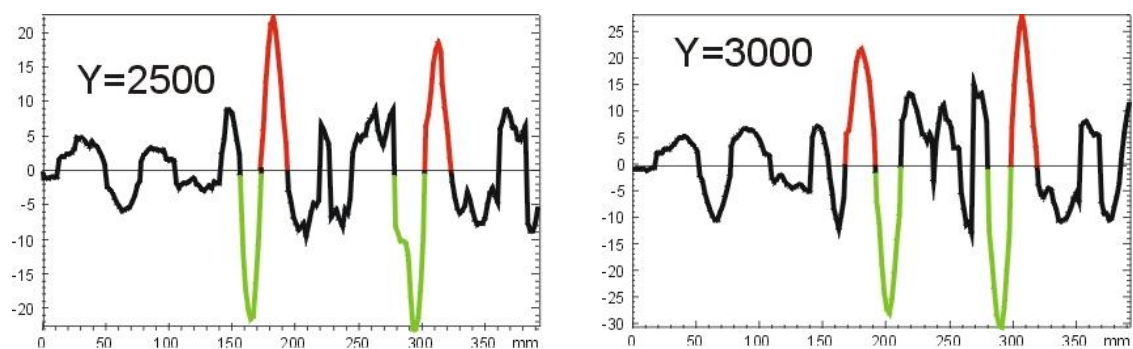


Bild 12 Pulsform des reflektierten Signals aus der Rekonstruktionsrechnung an 2 Stellen aus Bild 11 d):
 y = 2500 mm: Unveränderter Puls (-/+ , grün/rot) entspricht der Reflexion an Luft
 y = 3000 mm: Phasensprung (+/- , rot/grün) entspricht der Reflexion am Spannstahl.

5 Zusammenfassung und Ausblick

Die bildgebende Ultraschallmessung an Spannbetonkonstruktionen kann mit der Betrachtung der Pulsform der reflektierten Signale (Phasenauswertung) wesentlich verbessert werden. Neben der Auswertung der Reflexionsintensität gibt die Phasenlage eine Indikation, ob es sich um eine Reflexion an Luft oder an Stahl handelt. Dafür werden Beispiele an einbetonierten Stahlplatten und an Bauteilen mit künstlichen Verpressfehlern erläutert.

Das Verfahren wurde bereits erfolgreich an Spannbetonkonstruktionen getestet. Um die Einsatzmöglichkeiten zu erweitern, ist ein systematisches Studium der Randbedingungen und Störgrößen, wie z. B. der Betondeckung, des Einflusses der schlaffen Bewehrung und des Aufbaus der Spannglieder notwendig. Da es sich um eine komplexe Wechselwirkung von Ultraschallwellen mit einer Wellenlänge in Größenordnung der Hüllrohrabmessungen handelt, ist zum vollständigen Verständnis der Wellenausbreitung der mehrschichtige Aufbau der Bauteile zu beachten. An diesem Verständnis wird mit der 3-dimensionalen Modellierung der Wellenausbreitung mit EFIT (Elastodynamische Finite Integrationstechnik) gearbeitet.

6 Danksagung

Die Forschungsarbeiten wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft im Rahmen der Forschergruppe FOR 384 unterstützt (*Zerstörungsfreie Strukturbestimmung von Betonbauteilen mit akustischen und elektromagnetischen Echo-Verfahren*).

Die Radiographiemessungen wurden von der Fachgruppe VIII.3 unter der Leitung von Dipl.-Ing. B. Redmer durchgeführt.

Die Spannkanäle in den Betonbauteilen wurden von Dywidag Systems International (DSI, Dipl.-Ing H. Iven) praxisgerecht verpresst.

Allen Beteiligten und Förderern gilt unser herzlicher Dank.

7 Referenzen

[1] Eichinger, E., Diem, J., Kolleger, J.: Bewertung des Zustandes von Spanngliedern auf der Grundlage von Untersuchungen an Massivbrücken der Stadt Wien. Institut für Stahlbeton und Massivbau, Heft 1 (2000)

[2] Vogel, T.: Zustandserfassung von Brücken bei deren Abbruch – Erkenntnisse für Neubau und Erhaltung. Bauingenieur 77 (2002) 12, S. 559-567

[3] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Mayer, K.: Objektabbildung mit scannenden Ultraschallecho-Verfahren. Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 8, S. 543-555

[4] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Streicher, D., Müller, W.: Ultrasonic imaging of concrete elements: State of the art using 2D synthetic aperture. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, V51, Berlin (2003)

[5] Langenberg, K., Mayer, K. und R. Marklein: Zerstörungsfreie Prüfung von Beton: Modellierung und Abbildung, Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 6, S. 518-536

- [6] Krause, M., Mielentz, F., Milmann, B., Streicher, D., Mayer, K.: Ultrasonic reflection properties at interfaces between concrete, steel and air: imaging and modelling. In: Al-Quadi, I. and G. Washer (eds.); Proceedings of the NDE Conference on Civil Engineering, 14.-18.08.2006, St. Louis, MO, USA, pp. 472-479
- [7] Mayer, K., Langenberg, K.-J., Krause, M., Maierhofer, Ch., Milmann, B., Kohl, Ch.: Characterization of Ultrasonic and Radar Reflector Types in Concrete by Phase Evaluation of the Signal and the Reconstructed Image. In: Proceedings of the 9th European Conference on NDT, September 25-29, 2006, Berlin: DGZfP, BB 103-CD, We.1.3.4
- [8] Patentanmeldung DE 10 2006 027 132.7: Verfahren zum Detektieren von Fehlstellen in Betonbauteilen.
- [9] Taffe, A., Borchardt, K., Wiggenhauser, H.: Specimen for the improvement of NDT-methods - Design and construction of a Large Concrete Slab for NDT methods at BAM. In: DGZfP (ed.); International Symposium Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE) in Berlin, Germany, September 16-19, 2003, Proceedings on BB 85-CD, P11, Berlin (2003)
- [10] Wiggenhauser, H., Taffe, A., Streicher, D.: Brückenuntersuchungen mit automatisierten Verfahren - Neue Entwicklungen. In: Tagungsband zur Bauwerksdiagnose 2008, Berlin, 21.-22.02.2008, DGZfP BB auf CD, Vortrag 14
- [11] Streicher, D., Kohl, Ch., Wiggenhauser, H., Taffe, A.: Automatisierte zerstörungsfreie Zustandsuntersuchungen von Brückenbauwerken. Beton- und Stahlbeton 101 (2006) 5, S. 330-342
- [12] Streicher, D., Wiggenhauser, H.: Zustandsuntersuchungen an Spannbetonbrücken. Bergmeister, K., Wörner, J.-D. (Hrsg.); BetonKalender 2007, Verkehrsbauten-Flächentragwerke. Berlin: Verlag Ernst & Sohn, Bd. 1, Kapitel V Echoverfahren in der zerstörungsfreien Zustandsuntersuchung von Betonbauteilen, Absch. 13, S. 581-588