

## **Untersuchung der inneren Struktur einer Spannbetonbrücke mit Hilfe des Impact-Echo- und des Radar-Verfahrens**

Ralf Beutel, Florian Finck, Christian U. Große, Hans-Wolf Reinhardt  
Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart

### **Abstract**

Zur Untersuchung von neu errichteten sowie bereits bestehenden Bauwerken aus Stahlbeton kommen in der Praxis immer häufiger zerstörungsfreie Prüfmethode zum Einsatz. Sie haben den Vorteil, dass man einen Einblick über das Bauteilinnere bekommen kann, ohne das Bauteil durch aufwendige Kernbohrungen schädigen zu müssen. Das Impact-Echo- sowie das Radar-Verfahren sind zwei dieser zerstörungsfreien Prüfmethode, die an großflächigen Bauwerken erfolgreich eingesetzt werden. Diese Verfahren werden im Bauwesen zur Dickenmessung von nur einseitig zugänglichen Bauteilen, zum Auffinden von Hohlstellen (Kontrolle der Bauteilhomogenität) und zur Ortung von einbetonierten Rohren und Spannkänen angewendet. Für die Überprüfung der Solldicke von Tunnelinnenschalen ist vom Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen (BMVBW) unter Mithilfe der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) bereits 2001 eine Richtlinie für die zerstörungsfreie Prüfung erlassen worden [14]. Dadurch rücken die Verfahren in den Mittelpunkt des Interesses von Anwendern und Entwicklern. Dem stehen jedoch derzeit oftmals noch eine ungenügende Aussagesicherheit und die mangelhafte Handhabbarkeit der kommerziell erhältlichen Geräte entgegen.

Um die Aussagefähigkeit dieser Verfahren und deren Wirtschaftlichkeit zu verbessern, wurden Messungen in-situ an einem Bauwerk durchgeführt. Dafür stand eine Brücke in Stuttgart-Heslach im Rahmen einer Rückbaumaßnahme zur Verfügung. Der Rückbau wurde von der Universität Stuttgart wissenschaftlich begleitet, um Aufschlüsse über das Langzeitverhalten von Spannbetonbrücken zu gewinnen.

### **Grundlagen**

Das *Impact-Echo-Verfahren* gehört zu den akustischen Prüfmethode. Durch einen mechanischen Stoß (Impact) mittels einer Stahlkugel auf die Oberfläche des Bauteils, wird ein akustischer Schallimpuls angeregt. Die dadurch erzeugte Schallwelle (mechanische Welle) breitet sich im Bauteil aus und wird an Grenzflächen zweier Materialien reflektiert. Dies geschieht z. B. an der Rückseite einer Wand (Beton/Luft) oder an der Grenzfläche zu einem Hohlraum. Durch Mehrfachreflexionen zwischen der Ober- und Unterseite des Bauteils entstehen niederfrequente Wellenfelder, die durch Überlagerungen Resonanzen hervorrufen. Die an der Oberfläche mit einem Sensor registrierten Schallwellen werden auf vorhandene Dicken- bzw. Tiefenresonanzen hin untersucht [1-4, 9, 11].

Aufgezeichnet werden diese reflektierten Wellen in der Nachbarschaft des Anregungspunktes mittels eines Sensors, i.d.R. eines Beschleunigungsaufnehmers, mit Punktkontakt zur Oberfläche des Untersuchungsobjekts (*Abb. 1*). Zur Verbesserung der Schallübertragung wird der Sensor mit einem Koppelmittel (dünne Bleiblättchen, Kunststoffe oder Wachs) am Bauteil angebracht.

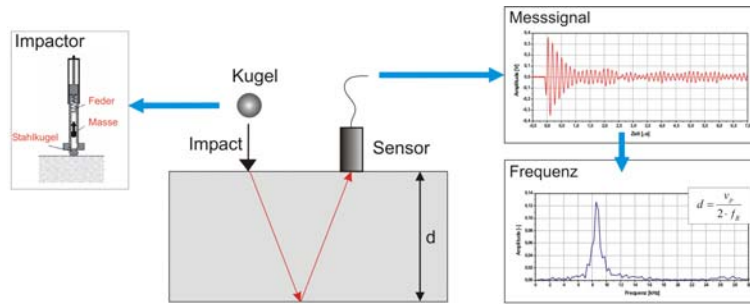


Abb. 1: Impact-Echo-Prinzip

Mit Hilfe einer Fouriertransformation ermittelt man den Frequenzinhalt der aufgezeichneten Signale. Die Tiefe  $d$  eines Reflektors im Bauteil wird aus der im Frequenzspektrum auftretenden Maximalamplitude bestimmt. Die zu dieser Maximalamplitude gehörende Frequenz  $f_R$  entspricht einer Welle, deren halbe Wellenlänge ( $\lambda/2$ ) mit der Tiefe des Reflektors bzw. der Dicke des Bauteils übereinstimmt. Es gilt folgende Beziehung:

$$d = \frac{v_p}{2 \cdot f_R} \quad [m] \quad (Gl. 1)$$

In einem Vorversuch muss hierzu die P-Wellengeschwindigkeit  $v_p$  am Bauteil ermittelt werden. Die Bestimmung der Geschwindigkeit kann über eine Umformung der Gleichung (1) nach  $v_p$  erfolgen. Hierzu muss an einem von beiden Seiten zugänglichen, ungestörten Bauwerksabschnitt mit bekannter Dicke  $d$  eine Referenzmessung durchgeführt werden. Mit Hilfe der gemessenen Dickenresonanz  $f_R$  kann dann  $v_p$  bestimmt werden. Ist eine solche zugängliche Stelle nicht vorhanden, kann zur Bestimmung von  $v_p$  auch eine Messung an einem Bohrkern ( $\varnothing$  10 cm) in Transmission durchgeführt werden. Bei bekannter Bohrkernlänge  $l$  und ermittelter Laufzeit  $t$  kann über  $v_p = l/t$  [m/s] die Geschwindigkeit berechnet werden. Für Normalbeton beträgt  $v_p$  etwa 4000 m/s. Eine weitere Möglichkeit für die Ermittlung der Schallgeschwindigkeit besteht in einer Messung entlang der Oberfläche des Bauteils. Dabei wird ein Impact in Verlängerung der Achse zweier im Abstand von  $s = 30$  cm an der Oberfläche angebrachter Sensoren erzeugt. Die Geschwindigkeit lässt sich aus der Zeitdifferenz der Ersteinssätze  $t_1$ ,  $t_2$  und dem Abstand  $s$  der beiden Sensoren berechnen:

$$v_p = \frac{s}{t_2 - t_1} \quad [m/s] \quad (Gl. 2)$$

Niedrige Prüffrequenzen (etwa 1 bis 80 kHz) und damit große Wellenlängen reduzieren die Schallstreuung im Beton. Gleichzeitig vergrößert sich jedoch auch die Ausdehnung eines Defekts (oder eines Einbauteils wie z. B. eines Spanngliedes) der gerade noch aufgelöst werden kann. Kleinere Objekte können also nicht mehr detektiert werden. *Abbildung 2* (links) zeigt den Einsatz des Impact-Echo-Verfahrens.

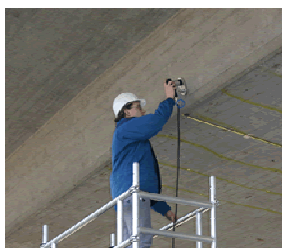


Abb. 2: Messdurchführung am Bauwerk; links: Impact-Echo, rechts: Radar

Das *Radarverfahren* dagegen ist ein elektromagnetisches Prüfverfahren. Für Untersuchungen an Bauwerken werden kurze elektromagnetische Impulse im Hochfrequenzbereich (500 MHz bis 2 GHz) in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet [12, 15, 16]. Ein Teil der eingebrachten Energie wird an inneren Strukturen bei einem vorhandenen Dielektrizitätskontrast reflektiert. Ein großer Teil der Energie wird allerdings vom Material absorbiert. In Abhängigkeit von der Aufgabenstellung und der verwendeten Antennenkonfiguration, werden reflektierte (z. B. Reflexionsverfahren) oder transmittierte (z. B. Transmissionsverfahren, Tomografie) Signale aufgezeichnet. Bei den in diesem Beitrag dargestellten Messungen wurde eine monostatische Antenne in Reflexionstechnik eingesetzt. Aus verschiedenen B-Scans (Radargrammen) wurden die Laufzeiten der reflektierten Wellenphasen bestimmt. Ausbreitungsgeschwindigkeit und Anteil reflektierter Energie bei der Reflexion sind von den dielektrischen Eigenschaften des jeweiligen Materials abhängig. Für die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  in sogenannten verlustfreien Medien, d.h. Materialien mit geringer elektrischer Leitfähigkeit wie z. B. trockener Beton, gilt näherungsweise:

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon}} \quad [m/s] \quad (Gl. 3)$$

Dabei ist  $c$  die Lichtgeschwindigkeit im Vakuum ( $3 \cdot 10^9$  m/s) und  $\varepsilon$  die Dielektrizitätszahl (z. B.  $\varepsilon_{\text{Luft}} = 1$ ,  $\varepsilon_{\text{trockener Beton}} = 6-8$ ,  $\varepsilon_{\text{Wasser}} = 81$ ). Reflexionen entstehen in Beton vorwiegend an der Bauteiloberfläche, an metallischen Inhomogenitäten (Bewehrung, Spannkanäle), sowie an Hohlstellen.

Bereits aus den unbearbeiteten Radargrammen können erste Rückschlüsse über Strukturen des untersuchten Objektes abgeleitet werden. Durch eine Migration [z. B. 17] ist es möglich, Artefakte aus den Daten zu beseitigen und den Laufzeiten Reflektortiefen zuzuordnen. *Abbildung 2* (rechts) zeigt ein Radargerät im Einsatz.

### Beschreibung des Bauwerks

Die Brücke wurde Ende der 60er Jahren in Stuttgart-Heslach mit einem Brückenüberbau von insgesamt 96 m Länge errichtet und bestand aus einem Hohlplattenquerschnitt mit einer Dicke von 1,10 m. Der Überbau lag auf den Widerlagern und zwei Pfeilerpaaren auf, so dass sich Spannweiten von 31 m, 34 m und 31 m ergaben. Im Grundriss verlief die Brücke in einem Bogen mit einem Radius von ca. 80 m (*Abb. 3*).



*Abb. 3: Brückenansicht*

Im Überbau der Brücke waren zur Gewichtsreduzierung gewellte Rohre in fünf Reihen eingebaut (*Abb. 4*). Diese Hohlkörper erstreckten sich jeweils über eine Länge von etwa 7 m, wobei sie in Längsrichtung auf ca. 1 m unterbrochen waren.

Im Jahr 2004 wurde die Brücke infolge einer veränderten Verkehrsführung nicht mehr benötigt und zum Rückbau freigegeben. Durch die Überwachung der Abbruchmaßnahmen vor Ort konnten die untersuchten Bauteile begutachtet werden und ermöglichten dadurch eine Verifizierung der Messergebnisse.

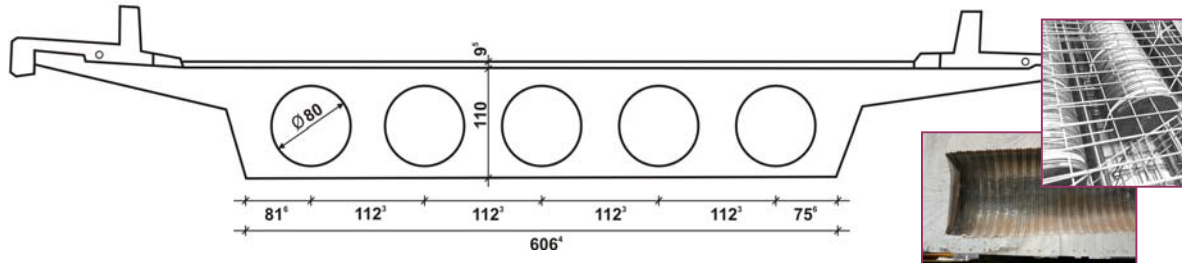


Abb. 4: Brückenaufbau: Mitte: Querschnitt, rechts: Hohlkörper, beim Einbau und als Sägeschnitt beim Rückbau der Brücke (Maße in cm)

## Messergebnisse

Zur Verbesserung der Aussagefähigkeit der *Impact-Echo-Messungen* empfiehlt sich, Messungen entlang von Linien durchzuführen. Für die Auswertung werden dann die berechneten Frequenzspektren der einzelnen Punktmessungen in einem Linienscan zusammengefasst. Die Amplituden werden farblich in einem Konturplot bzw. Impact-Echogramm aufgetragen. In den *Abbildungen 5* und *6* sind zwei Messungen an der Brückenunterseite, quer und längs zur Fahrbahnrichtung dargestellt. Das Impact-Echogramm der Messung quer zur Fahrbahnrichtung zeigt die Unterseite eines Hohlkörpers in Form eines Halbkreises. Im hier dargestellten Frequenzspektrum wird die untere Hälfte des Rohres spiegelverkehrt dargestellt (Reflektortiefe  $d \sim 1/\text{Frequenz } f_R$ ). Die Bestimmung der Tiefenlage des Rohres im Scheitel (in *Abb. 5* bei  $y = 520 \text{ cm}$ ) lässt sich aus der oben genannten Formel (*Gl. 1*) und der im Vorfeld an der Oberfläche der Brücke ermittelten P-Wellengeschwindigkeit von  $v_p = 4162 \text{ m/s}$  (nach *Gl. 2*) berechnen zu:

$$d = \frac{v_p}{2 \cdot f_R} = \frac{4162 \text{ m/s}}{2 \cdot 15 \text{ kHz}} = 14 \text{ cm}$$

Beim Rückbau der Brücke konnte eine Tiefenlage der Rohre zwischen 14 und 15 cm gemessen werden. Die im Frequenzspektrum auftretende Resonanz bei 6 kHz ist ersten Untersuchungen nach auf eine Eigenschwingung des Messsystems zurückzuführen. Die Dicke des Brückenüberbaus konnte im vorliegenden Fall mit dem Impact-Echo-Verfahren nur im Bereich des Kragarms ermittelt werden. Im Bereich der eingebauten Hohlkörper überschreitet die vorhandene Bauteildicke den messbaren Bereich des Verfahrens, Dickenmessungen sind nur bis 1 m Dicke möglich. Zudem werden die Wellen bei der hier vorliegenden Struktur zu sehr gestreut, so dass mit einem Schallwellen-Verfahren eine messbare Reflexion der Schallwellen von der Bauteilrückwand nicht zu erwarten ist.

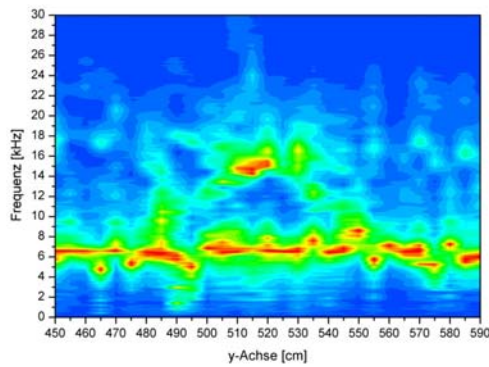


Abb. 5: Impact-Echogramm eines eingebauten Rohres, im Stützenbereich quer zur Fahrbahnrichtung

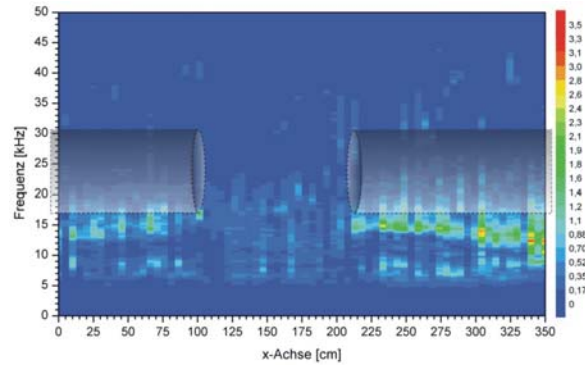


Abb. 6: Impact-Echogramm zweier Rohre, längs zur Fahrbahnrichtung entlang des Scheitels.

Ein Ergebnis der Impact-Echo-Messungen entlang der Brückenunterseite des Kragarms zeigt *Abbildung 7*. Im Bereich zwischen 190 cm und 100 cm auf der y-Achse ist die kontinuierliche Zunahme der Dicke gut im Impact-Echogramm zu sehen. Der zweilagige Aufbau des Kappenbereiches zwischen 10 cm und 100 cm ist in den Frequenzdaten nur teilweise lokalisierbar. Die Amplitude der zur Dicke des Kragarms zugehörigen Resonanzfrequenz wird zum Kragarmende hin geringer. Die gesamte Dicke des Aufbaus (Kragarm und Kappe) lässt sich nur im äußeren Bereich zwischen 10 und 40 cm eindeutig bestimmen. Im Bereich von 50 bis 100 cm sind die gemessenen Resonanzen bei 6 kHz nicht eindeutig zuzuordnen. In diesem Bereich ist der zwischen der Kappe und dem Kragarm liegende Vlies weniger stark zusammengepresst als im außenliegenden Bereich, so dass sich hier die schalldämpfenden Eigenschaften des Vlieses stärker bemerkbar machen. Das eingebaute Abwasserrohr konnte nicht geortet werden, hierzu wäre ein engeres Messraster notwendig gewesen.

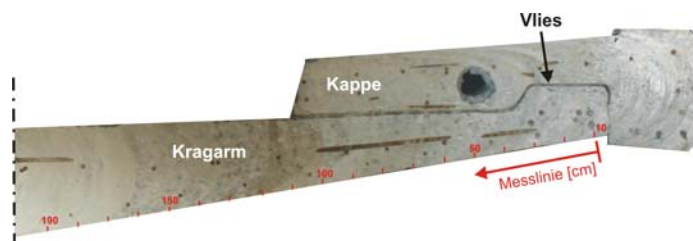
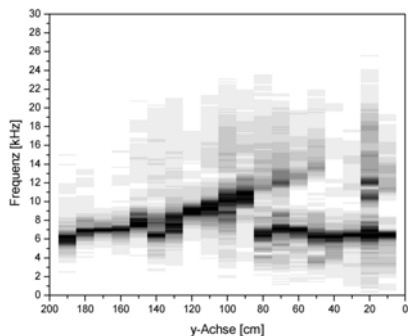


Abb. 7: Kragarm. links: Impact-Echogramm; rechts: Ansicht im Sägeschnitt

Mit dem *Radarverfahren* wurden jeweils Messungen von der Ober- und Unterseite der Brücke durchgeführt. Es wurde hauptsächlich eine Antenne mit einer Mittenfrequenz von 1600 MHz eingesetzt. In *Abbildung 8* ist eine migrierte Sektion quer zur Fahrbahn dargestellt. Sie wurde von der Oberseite aufgezeichnet. In diesem Bild ist zunächst die obere Bewehrungslage zu erkennen. Diese liegt in einer Tiefe von ca. 12-15 cm unter der Asphaltdecke. Die Bewehrungsmatte scheint in Brückenmitte etwas durchzuhängen, es ist aber auch möglich, dass die Fahrbahndicke dort am größten ist. Dagegen spricht, dass die fünf Reflexionen der Hohlkörper in nahezu gleicher Tiefe (ca. 18-20 cm) geortet wurden. Diese Reflexionen sind sehr stark, da die Hohlkörper aus Metall bestehen. Aus den Bereichen neben den Metallrohren konnten keine weiteren Informationen aus dem Bauteil gewonnen werden.

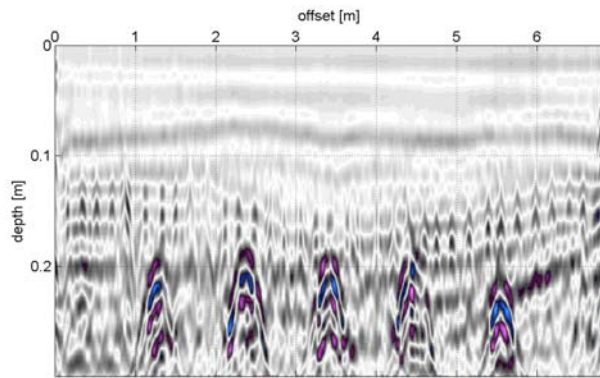


Abb. 8: Radargramm (migriert, 0.1 m/ns)  
von der Oberseite, quer zur Fahrbahn.

In *Abbildung 9* ist eine migrierte Sektion längs zur Fahrbahn dargestellt. Auch diese Messung wurde von der Oberseite her durchgeführt. Das Radargerät wurde so eingestellt, dass in diesem Beispiel längere transiente Signale aufgezeichnet wurden. Wieder ist die obere Bewehrungslage in einer Tiefe von ca. 15 cm zu erkennen. Das Profil lag ungefähr über dem First einer Reihe von Hohlkörpern, die in einer Tiefe von ca. 22 cm geortet wurden. Die Unterbrechung dieser Rohre auf einer Länge von ca. 1 m ist ersichtlich. Die Aufwölbung der Reflexion des Rohres auf der linken Seite der Abbildung ist dadurch entstanden, dass das Messprofil nicht genau parallel zum First verlief. Zwischen den Rohren sind keine weiteren Reflexionen zu erkennen. Weder die Rückwand des Bauteils noch Bewehrungselemente im unteren Teil des Bauteils konnten geortet werden. Da die Eindringtiefe der verwendeten Antenne in Beton erfahrungsgemäß bei ca. 40 cm liegt, war dies zu erwarten.

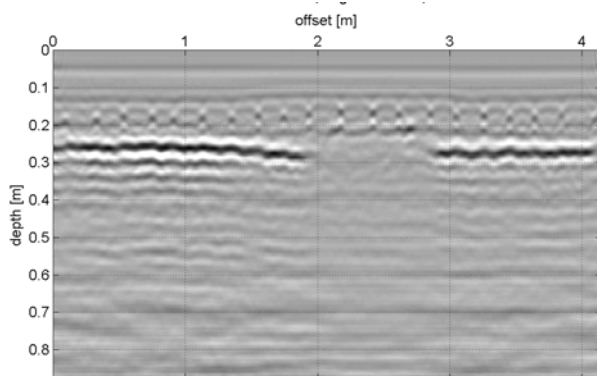


Abb. 9: Radargramm (migriert, 0.1 m/ns)  
von der Oberseite, längs zur Fahrbahn.

*Abbildung 10* zeigt schließlich Ergebnisse der Messungen von der Unterseite der Brücke. Das Profil wurde quer zur Fahrbahn aufgezeichnet. Dargestellt ist ein Ausschnitt der migrierten Daten dieser Messung. Die Länge der vertikalen Achse entspricht ca. 80 cm. Im unteren Teil des Bildes ist die Struktur des Bauteils in diesem Bereich schematisch dargestellt. Neben der Reflexion des Hohlkörpers in ca. 20 cm Tiefe sind Reflexionen zu erkennen, die von den Spanngliedern (schwarze Punkte) herrühren. Bei Messungen mit einer höheren Auflösung waren diese noch besser zu separieren. Die Spannglieder liegen direkt unter der schlaffen Bewehrung in einer Tiefe von wenigen Zentimetern.

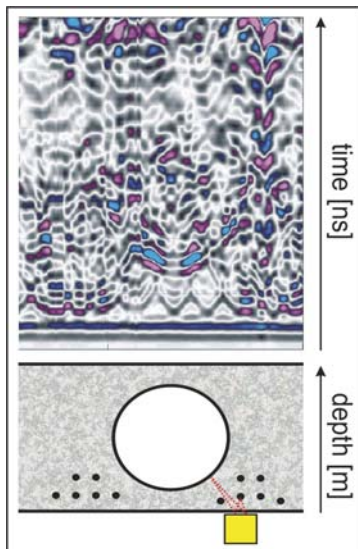


Abb. 10: Radargramm (migriert, 0.1 m/ns)  
von der Unterseite, quer zur Fahrbahn.

## Bewertung der Verfahren

Das *Impact-Echo-Verfahren* eignet sich zum Auffinden von Minderdicken und größeren Hohlstellen bzw. eingebauten Hohlkörpern in nur einseitig zugänglichen Bauteilen. Abhängig von der jeweiligen Randbedingung (Bauteilgeometrie etc.) können Dicken bis zu 1 m ermittelt werden.

Der Reflexionsgrad einer mechanischen Welle wird vom Impedanzunterschied zweier Materialien bestimmt. Hohlräume, wie die hier im untersuchten Objekt eingebauten Hohlkörper, haben einen sehr hohen akustischen Impedanz (Beton-Luft) und reflektieren daher die Schallwellen sehr gut. Des Weiteren hängt die Eindringtiefe der Schallwellen und das Auflösungsvermögen der inneren Struktur mit der Streuung und Absorption der Ultraschallwellen zusammen. Ist die Wellenlänge  $\lambda$  der Signale klein gegenüber der inneren Struktur, so werden die Signale reflektiert. Es können also nur Strukturen oder Fehlstellen im Bauteil aufgelöst werden, die größer sind als die halbe Wellenlänge. Damit die Streuung der Wellen an den Zuschlägen des Betons möglichst gering ist, muss die Wellenlänge deutlich größer als der Durchmesser der Zuschläge im Beton sein. Für das Impact-Echo-Verfahren ergeben sich daraus für Messungen an Betonen mit den üblichen Sieblinien Wellenlängen von 5 cm bis wenigen Metern. Die Dicke der Hüllrohrwandung und die der einzelnen Spanngliedlitzen lagen unterhalb des Wellenlängenbereichs, Direktreflexionen waren daher nicht zu erwarten.

Spannglieder können mit diesem Verfahren nur indirekt über eine Verschiebung der zur Rückwand zugehörigen Resonanzfrequenz im Impact-Echogramm lokalisiert werden [5, 7, 10-11]. Da die Dicke des Überbaus größer als der mögliche Messbereich des Verfahrens für die Dickenmessung war, konnten hier selbst oberflächennahe Spannglieder nicht geortet werden. Aussagen über den Verpresszustand von Hüllrohren sind generell nur unter bestimmten Bedingungen möglich.

Der Asphaltbelag auf der Brückenoberseite führte zu einer starken Dämpfung der Schallwellen, so dass keine verwertbaren Ergebnisse erzielt wurden und die Messungen nur von der Brückenunterseite erfolgen konnten.

Das *Radar-Verfahren* eignete sich dagegen für Messungen von beiden Seiten der Brücke. Die Streu- und Dämpfungseigenschaften von elektromagnetischen Wellen hängen von der Dielektrizitätszahl des jeweiligen Mediums und der Struktur des Bauteils ab. Elektromagnetische Wellen werden durch die Asphaltsschicht nur

geringfügig gedämpft, so dass auch Messungen durch die Asphaltsschicht möglich waren. Allerdings besteht beim Radar-Verfahren der Nachteil, dass Bewehrung und metallische Körper die Wellen stark reflektieren und damit eine Auflösung darunter liegender Strukturen verhindern.

Hohlkörper und Bewehrungselemente konnten von der oberen und unteren Seite des Überbaus lokalisiert werden. Die Auflösung und Tiefenbestimmung von Reflektoren lässt sich beim Radar-Verfahren mit Hilfe einer Migration verbessern. Der Vorteil des Radar-Verfahrens besteht in der Möglichkeit, große Profilstrecken zügig vermessen zu können. Für eine Online-Darstellung der Messergebnisse eignen sich beide Verfahren.

## **Zusammenfassung und Ausblick**

Zur qualitativen Bewertung des Impact-Echo- und des Radar-Verfahrens wurden Untersuchungen an einer Spannbetonbrücke in Stuttgart durchgeführt. Die in den vorangehenden Kapiteln erläuterten Messverfahren lieferten gute Ergebnisse als bildgebende Verfahren zur zerstörungsfreien Prüfung an Spannbetonbauwerken. Die inneren Strukturen konnten lokalisiert und ihre Tiefenlage bestimmt werden. Mit den durchgeführten Messungen konnten keine außerplanmäßigen Unregelmäßigkeiten in der Struktur des Bauwerkes, wie z. B. Korrosion der Bewehrung bzw. der Spannglieder oder Verdichtungsmängel festgestellt werden. Insgesamt zeigte sich beim Rückbau der Brücke der nach wie vor gute Zustand des Bauwerkes. Die Spannglieder waren sehr gut verpresst; Korrosion und Fehlstellen waren an den besichtigten Stellen nicht zu erkennen.

Um den Einfluss der Bewehrung auf die Messergebnisse besser verifizieren zu können, werden weitere Messungen an Probekörpern mit eingebauten Fehlstellen und unterschiedlichem Bewehrungsgrad durchgeführt. Zudem soll im Rahmen der durch die DFG geförderten Forschergruppe FOR 384 [13] eine quantitative Bewertung verschiedener ZfP-Methoden anhand vorgegebener Fragestellungen erfolgen. Dadurch ist zu erwarten, dass eine wirtschaftlichere Messdurchführung am Bauwerk erreicht werden kann und die Akzeptanz solcher Verfahren zur Qualitätssicherung in der Bauwirtschaft zunehmen wird.

## **Danksagung**

Für die Ermöglichung der in diesem Rahmen mit zerstörungsfreien Prüfmethode durchgeführten Messungen und der guten Kooperation möchten wir uns bei den Mitarbeitern des Tiefbauamtes der Stadt Stuttgart bedanken. Die vorliegende Arbeit wurde im Rahmen der Rückbaumaßnahmen der Brücke durch die Stadt Stuttgart von der Universität Stuttgart wissenschaftlich begleitet.

## **Literatur**

[1] BUJARD, V.; BAILEY, S.F.; BRÜHWILER, E.: *Applicabilité de la méthode Impact-Echo*. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation/ Bundesamt für Straßen. Schweiz, Februar 2001.



- [2] GROSSE C. U.; BEUTEL R.; KRÜGER M.; KURZ J.; SCHUBERT F.: *Verbesserung des Impact-Echo-Verfahrens hinsichtlich Riss- und Fehlstellenerkennung*. In: DACH Jahrestagung 2004, Salzburg, Österreich, BB89. DGZfP. Berlin: 2004.
- [3] GROSSE, C. U.; REINHARDT, H.-W.: *The resonance method- application of a new nondestructive technique which enables thickness measurements at remote concrete parts*. Otto Graf Journal 3 (1992), pp 75-94
- [4] GROSSE, C. U.; WEILER, B.: *Analyse von Vielfachreflexionen nach mechanischer Pulsanregung - Impakt-Echo-Verfahren (FMPE)*. In: "Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfverfahren für Betonbrücken", Abschlussbericht FE-Nr.: 9.94241 F1 der Bundesanstalt für Materialprüfung BAM, H. B18, Berlin, 1997, pp. 116-123.
- [5] GROSSE, C. U.; WIGGENHAUSER, H.; ALGERNON, D.; SCHUBERT, F.; BEUTEL, R.: *Impact-Echo, Stand der Technik und Anwendungen des Verfahrens*. In: Zerstörungsfreie Prüfverfahren und Bauwerksdiagnose im Betonbau. DAfStb Fachtagung 2005, Berlin; BAM, 10.-11.03.2005, Berlin. S. A11-A18.
- [6] KRIEGER, J.; KRAUSE, M.; WIGGENHAUSER, H.: *Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode für Betonbrücken*. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Brücken- und Ingenieurbau, Heft B18, Wirtschaftsverlag NW, 1998.
- [7] LAUSCH, R.; WIGGENHAUSER, H.; SCHUBERT, F.: *Geometrieeffekte und Hüllrohrortung bei der Impaktecho-Prüfung von Betonbauteilen - Experimentelle und modelltheoretische Ergebnisse*. Proc. DGZfP Annual meeting, Weimar, BB80-CD, NDT.net, Vol. 7, No. 11, 2002.
- [8] MOTZ, M.; KRÜGER, M.; GROSSE, C. U.; HALLER, P.; BEUTEL, R.: *Impact-echo: New developments regarding hard- and software*. In: Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE). Non-Destructive Testing in Civil Engineering (NDT-CE), DGZfP & BAM, September 16-19, 2003, Berlin. Berlin: 2003.
- [9] SANSALONE, M.; STRETT, W. B.: *Impact-Echo, Nondestructive Evaluation of Concrete and Masonry*. Bullbrier Press, Ithaca, N. Y., 1997.
- [10] SCHUBERT, F.; WIGGENHAUSER, H.; GARDEI, A.; LAUSCH, R.; GROSSE, C.; BEUTEL, R.: *Bildgebende Darstellung von Impact-Echo-Daten bei der zerstörungsfreien Betonprüfung*. In: DACH Jahrestagung 2004, Salzburg, Österreich, BB89. DGZfP. Berlin: 2004.
- [11] WIGGENHAUSER, H.; TAFFE, A.; ET AL.: *Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen*. In: Cziesielski, E. (Hrsg.), Bauphysikkalender. Berlin: Ernst & Sohn, 2004, pp. 305-418.
- [12] MAIERHOFER, C.: *Radaranwendungen im Bauwesen*. ZfP-Zeitung der DGZfP, ÖGfZP und der SGZP, Ausgabe 72, Dezember 2000.
- [13] <http://www.for384.uni-stuttgart.de> (2005)

[14] RI-ZFP-TU: *Richtlinie für die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung von Tunnelinnenschalen*. Bundesanstalt für Straßenwesen, Reg.-Nr. 05.72, Verkehrsblatt-Dok. Nr. S 1050 - Vers. 03/01, Ausgabe 2001.

[15] REYNOLDS, J. M.: *An Introduction to Applied Geophysics*. John Wiley and Sons Ltd., 1997.

[16] FINCK, F.: *Introduction of a ground Penetrating radar system for investigations on concrete structures*. Otto Graf Journal 14 (2003), pp 35-44

[17] SANDMEIER, K. J.: *ReflexW, V2.5, Program for Processing and Interpretation of Reflection and Transmission data*. Software and Documentation, Karlsruhe, 2002.