

# Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Betonbauwerke, Teil 1

Autor(en): **Hermann, Kurt**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Cementbulletin**

Band (Jahr): **68 (2000)**

Heft 2

PDF erstellt am: **11.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-153857>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Betonbauwerke, Teil 1

**Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren und Impact-Echo-Messungen sind Beispiele für erfolgreich eingesetzte zerstörungsfreie Prüfmethoden im Baubereich.**

Neuere zerstörungsfreie Prüfungen werden im Baubereich eher zurückhaltend eingesetzt, obwohl damit viele Aufgaben bei Qualitätssicherungen, Zustandsanalysen, und Überwachungen gelöst werden könnten. Zu den Gründen hierfür gehört neben der oft anspruchsvollen Technologie die Unkenntnis über die vorhandenen Systeme. Mit der Beschreibung ausgewählter zerstörungsfreier Prüfmethoden im Rahmen des «Cementbulletins» sollen deren Einsatz-

möglichkeiten und Grenzen aufgezeigt werden.

## Glasfasersensoren

Lichtwellenleiter wurden ursprünglich für die Telekommunikation entwickelt. Sie bestehen aus Fasern aus Glas oder Faserverbundwerkstoffen, die Licht leiten und dank deren Stabilität für Messsensoren ausgenutzt werden können [1, 5].

Dank Lichtwellenleitern können

Lichtwellen – und damit auch Informationen – über weite Distanzen mit sehr kleinen Verlusten transportiert werden: In einem 10 km langen Kabel beträgt der Lichtverlust lediglich 50 %. In Lichtwellensensoren können die Fasern entweder als Übertragungssysteme allein oder als Mess- und Übertragungssystem dienen. Mit Glasfasersensoren lassen sich viele Parameter messen. Beispiele sind Spannungen, Dehnungen, Verformungen, Kräfte, Beschleunigungen

Sensortyp	Messprinzip/Eigenschaften	Gemessene Parameter	Stadium/bis heute installierte Sensoren
Sofo	Interferometrie in niedriger Kohärenz (s. Text)	Verformung	kommerziell/> 1000
Microbending	Ein Glasfaserstrang wird von Glasfasern oder metallischen Drähten umschlungen. Wenn der Lichtwellenleiter gedehnt wird, nimmt die Intensität des durchgehenden Lichts ab. / Gut für dynamische Messungen geeignet. Die Auflösung beträgt 30 µm (kurzfristig) bzw. 100 µm (Dauerbetrieb).	Verformung	kommerziell/ca. 500 Bspl.: Überwachung von Staudamm (USA)
Bragg-Gitter	In den Faserkern sind Bragg-Gitter eingearbeitet. Wenn weisses Licht in die Faser eingestrahlt wird, wird Licht derjenigen Wellenlänge reflektiert, die dem Abstand der Reflexionsebenen entspricht; der Rest des Lichts geht durch. Da die Periode des Gitters von der Temperatur und der Dehnung der Faser abhängt, können diese Parameter durch die Analyse des reflektierten Lichts gemessen werden. In einer einzelnen Faser können bis zu 16 Gitter (Messstellen) integriert werden. Die Auflösung liegt in der Größenordnung von 1 µm und 0,1 °C.	Verformung Temperatur	Feldtests/ca. 200 Bspl.: Überwachung der CFK-Hängeseile der Storchenbrücke in Winterthur
Fabry-Pérot	Durch Teilen einer Glasfaser entsteht ein enger Spalt. Ein Faserteil wird fixiert, der andere ist beweglich. Licht, das durch die Faser geschickt wird, wird an den Übergängen Faser/Luft und Luft/Faser beim Spalt reflektiert. Durch Überlagerung der Reflexionen entsteht ein Interferenzmuster mit periodischer Intensitätsänderung. Eine Verschiebung der beweglichen Faser bewirkt eine Änderung des Interferenzmusters. / Sensorlänge: 10–25 mm, Sensordurchmesser 0,5 mm; Messbereich: -2 % < . < +2,5 %	Verformung	Feldtests/ca. 100 Bspl.: Überwachung von Vorspannkabeln in Berliner Brücke
Brillouin	Die Wechselwirkung zwischen optischen Wellen (Licht) und Schallwellen hängt von der Dehnung und der Temperatur der Faser ab. Grosse Messstrecken (bis 50 km) mit zahlreichen Messpunkten pro Faser möglich: – räumliche Auflösungen 1 m über 10 km bzw. 10 m über 100 km. – Dehnungsauflösung: 20 µm/m; Temperatureauflösung ± 1 °C	Verformung Temperatur	Feldtests/ca. 5 Bspl.: Temperaturmessung in aufbetoniertem Teil von Luzzone-Staudamm

**Tab. 1 Einsatz von Lichtwellensensoren in Europa (Stand 1999) [1].**

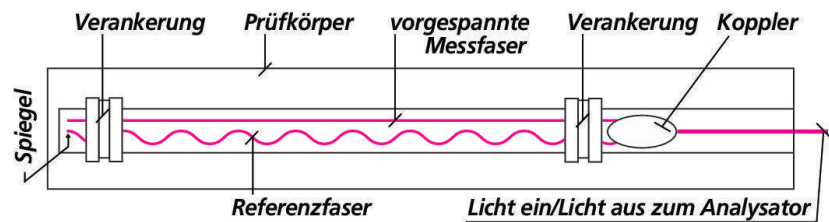


Abb. 1 Aufbau eines Sofo-Sensors (s. Text), nach [1].

Zeichnungen: TFB

und Rotationen sowie chemische Konzentrationen. Entsprechend vielfältig sind auch ihre Einsatzgebiete: Sie reichen von Anwendungen in der Medizin und der elektrischen Industrie über die Überwachung industrieller Prozesse bis hin zur Überwachung von Luft- und Raumfahrtmitteln. Und immer bedeutender werden die Anwendungen in der Überwachung von Bauwerken [1]. Für Glasfasersensoren sprechen unter anderem die geringe Korrosionsanfälligkeit und die Unempfindlichkeit gegenüber elektromagnetischen Feldern (Hochspannungsleitungen, Eisenbahnen, Gewitter), die kleinen Dimensionen und die Möglichkeit, in Überwachungssystemen eingesetzt werden zu können.

In Europa werden verschiedene Arten von Lichtwellensensoren zur Deformationsmessung eingesetzt. Eine Auswahl ist in *Tabelle 1* zusammengefasst. Auf das in der Schweiz entwickelte Sofo-Messsystem wird nachstehend ausführlicher eingegangen.

### Das Sofo-Messsystem [1]

Sofo ist das französische Akronym für *Surveillance d'ouvrages par fibres optiques* (Bauwerksüberwachung mit optischen Glasfasern). Es basiert auf dem Prinzip der Interferometrie in niederer Kohärenz. Der Sensor enthält zwei Fasern (*Abbildung 1*):

- Die Messfaser ist vorgespannt und an zwei Punkten befestigt. Mit ihr werden die Deformationen gemessen

(Verlängerungen bis +1 %, Verkürzungen bis -0,5 %)

- Die Referenzfaser ist lose parallel zur Messfaser installiert. Sie dient zum Temperaturengleich.

Licht, das über einen Koppler in die beiden Messfasern eingeleitet wird, wird durch Spiegel am Ende der Fasern reflektiert, im Koppler zusammengeführt und zum Analysator geleitet [6].

Die üblichen Messstrecken betragen zwischen 20 cm und 10 m; Spezialsensoren können bis zu 50 m lang sein. Die Auflösung von 0,2 % ist unabhängig von der Messstrecke. Eine Kalibrierung ist nicht erforderlich. Die Genauigkeit ist besser als 0,2 % der Verformung.

Die Sofo-Sensoren können entweder einbetoniert oder auf der Aussenseite des Bauteils befestigt werden. Sie sind bei zahlreichen Bauvorhaben eingesetzt worden – vor allem in der Schweiz [1, 6]. Ein einfaches Anwendungsbeispiel ist die Überwachung von Hybridstrukturen, die an der ISS-EPFL in Lausanne untersucht wurde (*Abbildung 2*).

Zu diesem Zweck wurden unter anderem Probekörper mit Sofo-Sensoren hergestellt, deren Zusammensetzung etwa einem 40 Jahre alten Beton entsprach. Auf die mit Hochdruckwasser aufgeraute Oberfläche

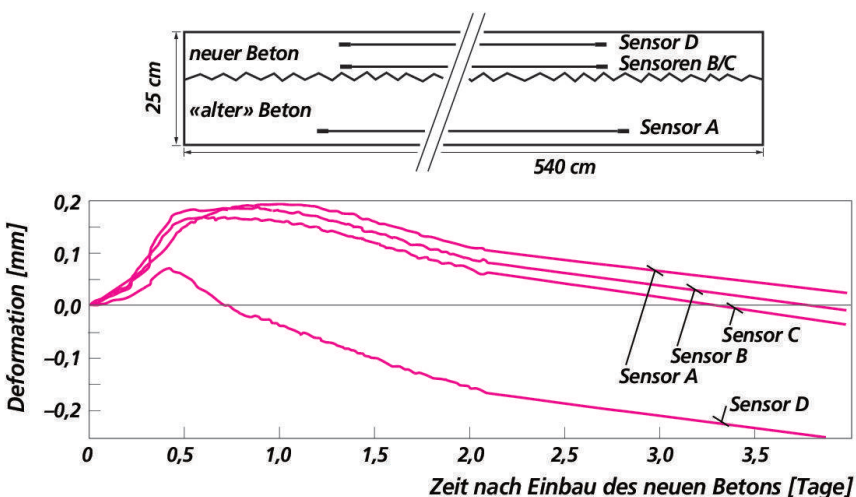


Abb. 2 Nachweis der Wechselwirkungen zwischen «altem» und neuem Beton mit Sofo-Sensoren (nach [1]).



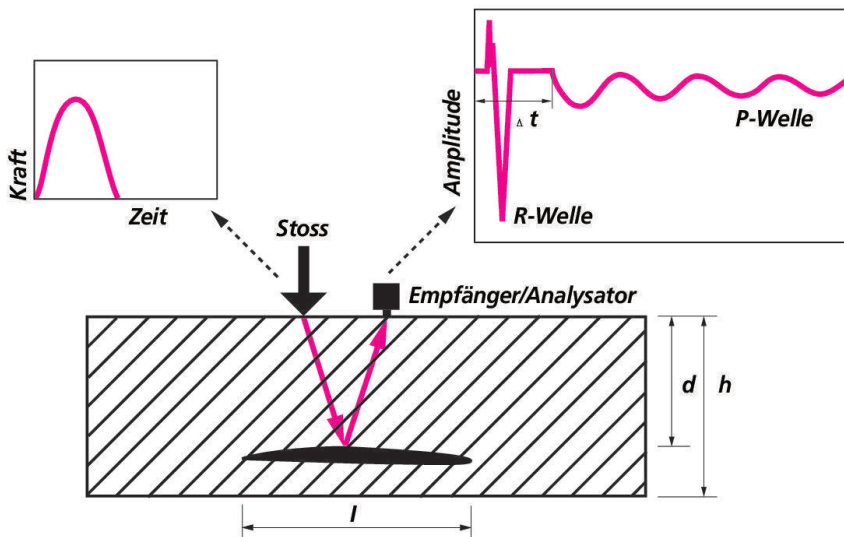


Abb. 4 Schematische Darstellung der Reflexion von P-Wellen an einer Fehlstelle in Beton. Der Empfänger in der Nähe des Impacts detektiert die R-Welle sowie die reflektierten P-Wellen [2, 7].

wurde eine neue Betonschicht aufgebracht, in der ebenfalls Sofo-Sensoren eingebaut wurden. Die Verformungen während der ersten Tage sind in *Abbildung 2* dargestellt. Sie lassen sich folgendermassen interpretieren: Sowohl der Sensor A im alten Beton als auch die in der Nähe liegenden Sensoren B und C zeigen einen sehr ähnlichen Deformationsverlauf an, was auf einen guten Verbund schliessen lässt.

Nach einer anfänglichen thermisch bedingten Ausdehnung beginnt das Schwinden. Ganz anders sind die Verhältnisse beim Sensor E in Oberflächennähe: Hier setzt das Schwinden bereits nach einer kurzen thermischen Expansion ein, da sich die

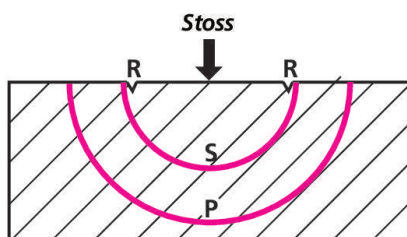


Abb. 3 Schematische Darstellung der durch einen Stoss auf ein Bauteil ausgelösten Wellen [2, 5].

äußere Betonschicht schneller als die innere abkühlt und ihre Verformung nicht durch den «alten» Beton behindert wird.

## Impact-Echo

Beim einfachsten Impact-Echo-Verfahren wird mit einer an einem Stab befestigten Stahlkugel auf die Betonoberfläche geschlagen. Dadurch werden Wellen erzeugt, die im Idealfall an Phasenübergängen und damit auch an der Untersicht des Bauteils reflektiert werden. Wellen mit ausreichender Energie bewegen sich dabei mehrmals zwischen Oberseite und Reflexionsebene hin und her. Sie können mit geeigneten Messgeräten neben dem Stosspunkt erfasst werden.

Die Impact-Echo-Methode wurde bereits für zahlreiche Anwendungen eingesetzt. Als Werkstoffe eignen sich Betone (nicht bewehrt, schlaff bewehrt und vorgespannt), Mauerwerk sowie Fels. Einige Anwendungsmöglichkeiten sind:

- Erkennen und Lokalisieren von Hohlstellen und Kiesnestern

- Bestimmung von Bauteil- und Schichtdicken
- Erkennen und Lokalisieren von Ablösungen (z.B. im Verbundbereich)
- Auffinden von Leerstellen in Hüllrohren von Spanngliedern
- Bestimmung von Risttiefen.

In der Schweiz wurden Untersuchungen durchgeführt, um die Zuverlässigkeit und Grenzen des Verfahrens besser abschätzen zu können [2].

### Theorie

Eine Kugel, die auf die Oberfläche eines Bauteils geschlagen wird, löst beim Stoss drei Arten von Wellen aus (siehe *Abbildung 3*):

- R-Wellen (Rayleigh-Wellen) breiten sich an Oberfläche kreisförmig aus
- S-Wellen (Scherwellen) kugelförmige Ausbreitung
- P-Wellen (Kompressionswellen) kugelförmige Ausbreitung.

Beim Impact-Echo interessieren vor allem die reflektierten P-Wellen, die in der Nähe des Stosspunktes dominieren. Sie werden mit einem Beschleunigungsaufnehmer erfasst (*Abbildung 4*). Für die Auswertung werden die Amplitudenspektren durch doppelte Integration in Frequenzspektren umgewandelt. Zwei wichtige Parameter des Impacts sind die Dauer des Stosses und die Amplitude der entstehenden P-Wellen.

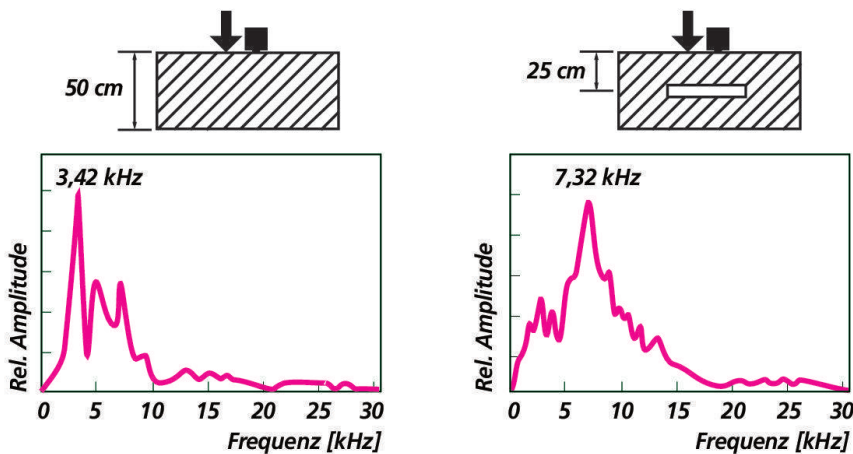


Abb. 5 Frequenzspektren für eine 0,50 m dicke Betonplatte (links) sowie für eine 0,50 m dicke Betonplatte, die in 0,25 m Tiefe einen Hohlraum aufweist (nach [8]).

le. Sie hängen von der Grösse der Kugel ab: Je kleiner die Kugel ist, desto kürzer ist die Kontaktzeit beim Stoss und desto grösser ist die Frequenz der erzeugten Wellen.

Bewährt haben sich Kugeln mit Durchmessern zwischen 5 und 25 mm. Die damit erzeugten Kompressionswellen (P-Wellen) haben folgende Eigenschaften:

- Frequenzen zwischen 60 und 9 kHz
- Wellenlängen  $\lambda$  ungefähr 70 bis 450 mm
- Geschwindigkeiten in Beton um 4000 m/s.

Betone und andere Materialien verhalten sich beim Durchgang derartiger Wellen wie homogene elastische Systeme.

Der einfachste Fall einer Impact-Echo-Messung besteht darin, die Dicke  $h$  einer Betonplatte zu bestimmen, die keine Fehlstellen aufweist. Die durch den Impact erzeugte P-Welle wird an der Bauteilunterseite reflektiert und trifft mit einer bestimmten zeitlichen Verzögerung

$\Delta t$  auf den Beschleunigungsaufnehmer. Ihre Geschwindigkeit ist  $v_P$ . Unter idealisierten Bedingungen gelten die folgenden Beziehungen:

- theoretische Rückkehrzeit  $\Delta t$  der Druckwelle:  $\Delta t = 2 h/v_P$  (1)

- Wiederholfrequenz:  $f_P = 1/\Delta t \rightarrow \Delta t = 1/f_P$  (2)

- Bauteildicke:  $h = \Delta t \cdot v_P/2 = v_P/2f_P$  (3)

Aus Gleichung (3) geht hervor, dass aus  $\Delta t$  die Dicke  $h$  eines Bauteils berechnet werden kann, wenn die Fort-

pflanzungsgeschwindigkeit  $v_P$  der P-Welle bekannt ist.

Illustriert ist dies in *Abbildung 5*: Eine 0,50 m dicke Betonplatte hatte bei einer Impact-Echo-Messung eine Wiederholfrequenz  $f_P$  von 3,42 kHz. Aus Gleichung (3) folgt:

$$v_P = d \cdot 2f_P = 0,50 \cdot 2 \cdot 3420 \text{ m/s} = 3420 \text{ m/s} \quad (4)$$

Im gleichen Bauteil war an einer anderen Stelle eine Fehlstelle (Hohlraum) eingebaut. Hier wurde eine Wiederholfrequenz  $f_P$  von 7,32 kHz gemessen. Unter Verwendung der mittels Gleichung (4) berechneten Fortpflanzungsgeschwindigkeit  $v_P$  ergibt sich für die Fehlstellentiefe  $d$ :

$$d = v_P/2f_P = 3420/2 \cdot 7320 \text{ m} = 0,23 \text{ m} \quad (5)$$

## LITERATUR

- [1] Inaudi, D., «Deformationsmessungen mit Glasfasersensoren», Referat im Rahmen der TFB-Fachveranstaltung Nr. 994360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» vom 8. Dezember 1999 in Wildegg.
- [2] Brühwiler, E., «Impact-Echo: Bedeutung und Möglichkeiten», Referat im Rahmen der TFB-Fachveranstaltung Nr. 994360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» vom 8. Dezember 1999 in Wildegg.
- [5] «ZfP-Baukompendium», herausgegeben von der Bundesanstalt

für Materialforschung und -prüfung, Berlin (BAM), Neuauflage 1999, [www.bam.de/a\\_vii/vii\\_3/kompendium/welcome.html](http://www.bam.de/a_vii/vii_3/kompendium/welcome.html)

- [6] Kronenberg, P., und Casanova, N., «Sofo: Bauwerksüberwachung mit Glasfasersensoren», Schweizer Ingenieur und Architekt 115 [47], 968–973 (1997).
- [7] Sansalone, M., Lin, J.-M., and Streett, W.B., «A procedure for determining P-wave speed in concrete for use in impact-echo-testing using a P-wave speed measurement technique», ACI Materials Journal 94 [6], 531–539 (1997).
- [8] <http://ciks.cbt.nist.gov/~carino/ieprin.html>



	Messgenauigkeit	Interpretierbarkeit	Zuverlässigkeit	Eignung
Dickemessungen	sehr gut	sehr gut	sehr gut	sehr gut
Verbundqualität	gut	gut	mittel	gut
Kiesnester	mittel	schlecht	mittel	mittel
Injektion von Hüllrohren (Vorspannung)	gut	mittel	schlecht	schlecht
Risstiefen	gut	gut	sehr gut	gut

**Tab. 2 Anwendungsbereiche der Impact-Echo-Methode [2].**

Dies ist in guter Übereinstimmung mit dem korrekten Wert von 0,25 m. Es muss betont werden, dass es sich hier um ein vereinfachtes Vorgehen handelt. In Wirklichkeit muss auch die Geometrie des Bauteils berücksichtigt werden. Dies geschieht durch die Einführung eines Faktors  $\beta$  in Gleichung (3):

$$\begin{aligned} \text{Bauteildicke } h &= \beta \cdot \lambda \cdot t \cdot v_p / 2 \\ &= \beta \cdot v_p / 2f_p \end{aligned} \quad (6)$$

Die Werte von  $\beta$  hängen vom Quotienten  $h/b$  (Dicke/kleinste Längenausdehnung) ab. Zwei Beispiele: Für rechteckige Bauteile, deren Länge

mindestens 5 Mal grösser als die Dicke ist, beträgt  $\beta$  0,96, für zylindrische Elemente gilt  $\beta = 0,92$ .

#### Grenzen des Messverfahrens [2]

Die Analyse der Daten aus Impact-Echo-Messungen ist in der Regel recht schwierig; sie erfolgt unter Zuhilfenahme von Rechnern und geeigneten Auswertungsprogrammen. Im Weiteren werden an die Erfahrung der Anwender hohe Anforderungen gestellt.

Schwerpunktthema des Referats über das Impact-Echo-Verfahren [2] war eine kritische Untersuchung der Anwendungsmöglichkeiten. Die wichtigsten Aussagen sind in *Tabelle 2* zusammengefasst. Sie werden nachfolgend noch ergänzt. Damit Hohlstellen und Ablösungen mit einer minimalen Länge  $l$  in einer Tiefe  $d$  (siehe *Abbildung 4*) nachgewiesen werden können, muss  $l$  mindestens 25 % der Wellenlänge  $\lambda$  betragen und in einer Tiefe zwischen 50 % der Wellenlänge  $\lambda$  und 300 % der minimalen Länge  $l$  liegen. Kiesnester können nachgewiesen werden, wenn die folgenden Voraussetzungen erfüllt sind:

- Die Oberfläche muss eine gute Qualität aufweisen.
- Die Bauteildicke muss bekannt sein.

Die Tiefe von Rissen, die bis zur Bauteiloberfläche verlaufen, können bis zu einer Rissbreite von rund 0,1 mm gut erfasst werden.

Laborversuche mit vollständig und nicht verfüllten Spannglied-Hüllrohren ergaben gute Ergebnisse. Beim Feldversuch (Autobahnüberführung aus vorfabrizierten Elementen) waren die Sondierergebnisse ungenügend: Voraussagen aufgrund der Impact-Echo-Messungen konnten nur in gut der Hälfte der Fälle bestätigt werden; Risse im Untersuchungsbe- reich können die Messung verunmöglichen.

Wichtige Voraussetzungen für das Gelingen von Impact-Echo-Messungen sind eine gute Zugänglichkeit und relativ einfache Geometrien der Bauteile. Die Untersuchungen müssen gut vorbereitet werden. Die Auswertung der Messergebnisse ist aufwändig.

#### Zu diesem Artikel

Der vorliegende Artikel basiert in weiten Teilen auf Referaten, die anlässlich der TFB-Fachveranstaltung Nr. 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» am 8. Dezember 1999 in Wildegg gehalten wurden. Die Referenten waren:

[1] Dr. Daniele Inaudi, Smartec SA, Grancia  
[2] Prof. Dr. Eugen Brühwiler, EPFL, Lausanne

[3] Dr. Herbert Wiggenhauser, BAM, Bundesamt für Materialforschung, Berlin

[4] Johannes Hugenschmidt, Empa, Dübendorf

Ergänzungen aus der Literatur sind im separaten Verzeichnis auf Seite 6 zusammengestellt.