

**Zeitschrift:** Cementbulletin  
**Band:** 68 (2000)  
**Heft:** 3

**Artikel:** Zerstörungsfreie Prüfmethode für Betonbauwerke, Teil 2  
**Autor:** Hermann, Kurt  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-153858>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. [Voir Informations légales.](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. [See Legal notice.](#)

**Download PDF:** 17.11.2024

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Zerstörungsfreie Prüfmethode für Betonbauwerke, Teil 2

**Ultraschall-Impuls-Echo- und Impulsradar-Messungen sind weitere Beispiele für zerstörungsfreie Prüfmethode im Baubereich.**

Zwischen dem im letzten «Cementbulletin» [13] behandelten Impact-Echo-Verfahren und den nachfolgend beschriebenen Ultraschall-Impuls-Echo- und dem Impuls- oder Georadar-Verfahren bestehen viele Ähnlichkeiten. Sie unterscheiden sich vor allem in den Wellenlängenbereichen – und damit auch in den Wellenfrequenzbereichen –, die eingesetzt werden.

Der Artikel basiert zu einem wesentlichen Teil auf Referaten [3, 4], die anlässlich der TFB-Veranstaltung «Praxistaugliche Prüfmethode für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» gehalten wurden (siehe Kasten «Zu diesem Artikel»).

## Ultraschall-Impuls-Echo

Mechanische Schwingungen der Materie oberhalb der Hörgrenze des Menschen (Frequenz  $> 20$  kHz) werden als Ultraschall bezeichnet. Ultraschall-Impuls-Echo-Messungen gehören bei der zerstörungsfreien Prüfung von homogenen Materialien wie Metallen sowie in der medizinischen Diagnostik seit Jahrzehnten zu den Standardverfahren. Entsprechend hoch ist hier auch der Entwicklungsstand.

Erste Ultraschall-Messungen an Betonbauteilen wurden im Transmis-

sionsverfahren durchgeführt, wenn die Ober- und die Unterseite zugänglich waren. Brauchbare Resultate mit dem Ultraschall-Impuls-Echo-Verfahren (auch Ultraschall-Puls-Echo genannt) werden seit ungefähr zehn Jahren erzielt.

### Ultraschall im Beton

Ultraschallwellen werden während ihrer Ausbreitung in Betonen an den Grenzflächen zwischen Zuschlägen und dem Zementstein sowie an Luftporen reflektiert oder gestreut und abgeschwächt. Das Wellenbild wird dadurch schon nach einem kurzen Laufweg der einfallenden Welle diffus. Das Echo, das heisst die Signale der an den interessierenden Grenzflächen (Bauteilrückseite, Hüllrohr...) reflektierten Wellen, wird von vielen Echos aus den Reflexionen an Zuschlägen überlagert. Hinzu können weitere Wellen kommen, die die eigentlichen Signale ebenfalls überlagern. Ein Beispiel sind die auch beim Impact-Echo-Verfahren [13] auftretenden Oberflächenwellen (Rayleigh-Wellen).

Längere Schallwege in Betonen sind nur dann möglich, wenn die Ultraschall-Wellenlänge  $\lambda$  grösser als der Durchmesser des Grösstkorns ist. Typische Longitudinalwellen-Geschwindigkeiten  $v$  von Betonen liegen um 4000 m/s. Für Ultraschall-

Impuls-Echo-Messungen werden deshalb Wellen im einem Frequenzbereich von 50 bis 300 kHz eingesetzt, deren Wellenlängen  $\lambda$  etwa 80 bis 13 mm betragen ( $\lambda = v/f$ ;  $f$  = Frequenz) [3].

### Apparatives

Vereinfacht besteht eine Ultraschall-Impuls-Echo-Apparatur aus einem Sender, der elektrische Impulse erzeugt und einem Prüfkopf mit piezoelektrischem Wandler, der aus den elektrischen Impulsen mechanische Impulse erzeugt sowie die reflektierten Schallanteile wieder in elektrische Impulse umwandelt. Diese

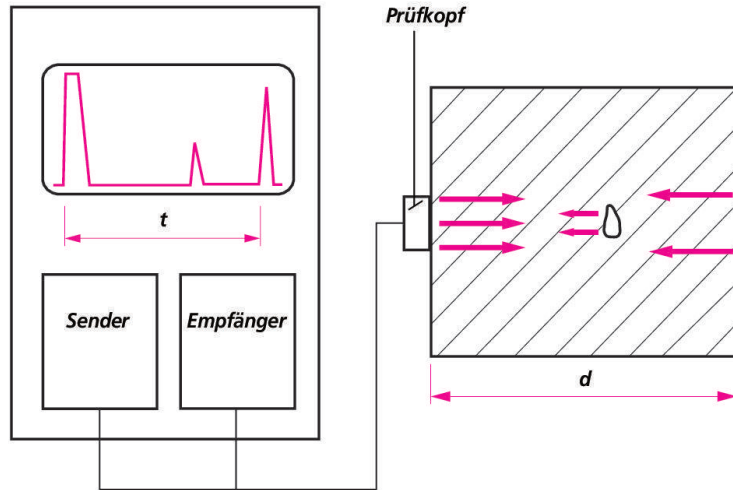
### Zu diesem Artikel

Der vorliegende Artikel basiert – wie sein erster Teil [13] – 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 Wildeggen gehalten wurden. Die Referenten waren:

- [1] Dr. Daniele Inaudi, Smartec SA, Grancia
- [2] Prof. Dr. Eugen Brühwiler, EPFL, Lausanne
- [3] Dr. Herbert Wiggerhauser, BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Berlin
- [4] Johannes Hugenschmidt, Empa, Dübendorf.

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

werden im Empfänger des Ultraschallgeräts verstärkt; auf einem Bildschirm kann der zeitliche Verlauf der Impulse (A-Bilder) verfolgt werden (siehe *Abbildung 6*).



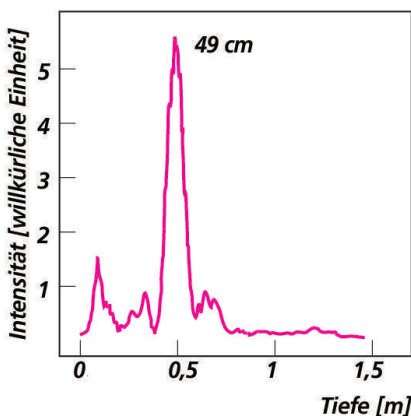
**Abb. 6 Schematische Darstellung einer Ultraschall-Impuls-Echo-Messung (nach [9]).**  
Zeichnung: TFB

Es wird zwischen mono- und bistatischen Messungen unterschieden, je nachdem ob die Ultraschall-Sender und -Empfänger nicht getrennt oder getrennt sind. Beim Impuls-Echo-Array werden mehrere – beispielsweise zehn – Schallköpfe wechselseitig als Sender und Empfänger betrieben. Grosse Anstrengungen werden zur Weiterentwicklung des Verfahrens unternommen. Beispiele sind Filter- und Computertechniken zur Verbes-

serung der Messresultate und der Auswertung [3].

### Ein einfaches Beispiel aus der Praxis [3, 10]

Ein Neubau sollte gegebenenfalls auf einer 2 m unter dem Grundwasserspiegel liegenden Sohlplatte eines Abbruchobjekts erstellt werden. Zur Überprüfung der Baupläne wurde eine Dickenmessung dieser Sohlplatte durchgeführt, die aus nahe liegenden Gründen zerstörungsfrei sein musste.



**Abb. 7 Bestimmung der Dicke einer Betonplatte, die in 50 cm Tiefe ein reflektierendes Element (Arbeitsfuge) enthält: Tiefenverteilung der rückgestreuten Ultraschall-Energie (nach [3, 10]).**  
Zeichnung: TFB

An einem rund 10 cm langen Bohrkern wurde die Geschwindigkeit  $v$  der Longitudinalwellen im Beton in unmittelbarer Nähe des Messfelds zu  $(4000 \pm 300)$  m/s bestimmt. Wichtig ist die gute Ankoppelung der Ultraschall-Messköpfe auf der Bauteiloberfläche. Das Messfeld (60 x 120 cm) wurde deshalb geschliffen. Die optimale Position der Messköpfe, die mit Vaseline angekoppelt wurden, wurde aufgrund einer Untersuchung des Felds mit einem Bewehrungssuchgerät ermittelt (Prüfköpfe sollten möglichst zwischen

Bewehrungsstäben lokalisiert sein). Insgesamt wurden 156 A-Bilder aufgezeichnet. Ihre Überlagerung und Integration ergab die in *Abbildung 7* dargestellte Tiefenverteilung der rückgestreuten Ultraschall-Energie. Erkennbar ist ein Maximum bei 49 cm, das auf einen Reflektor zurückgehen muss. Die weiteren Signale sind Rückstreuungssignale, die beispielsweise von der Bewehrung stammen könnten.

Dieses Ergebnis war überraschend. Beim Studium der Baupläne stellte sich aber heraus, dass die Sohlplatte in zwei Teilen gefertigt wurde, wobei bei 50 cm Dicke eine Arbeitsfuge vorgesehen war. Gemessen wurde somit die Reflexion an dieser Arbeitsfuge.

### Anwendungsbereiche

Ultraschall-Impuls-Echo-Messungen eignen sich für Dickenmessungen von Fundamenten und Sohlplatten, wenn gewisse Randbedingungen erfüllt sind. Abgesehen von der Zugänglichkeit, die bei vielen zerstörungsfreien Prüfungen ein Problem



sein kann, ist auch die Betonzusammensetzung wichtig. Bis zu einem Grösstkorn von 16 mm reichen oft relativ einfache Apparaturen aus, wenn die Bewehrungsraster nicht zu eng ( $> 10$  cm) sind. Unter diesen Voraussetzungen sind Dickenmessungen bis 1 m Tiefe möglich.

Möglich sind auch das Lokalisieren der Bewehrung und das Orten von Leerrohren aus Kunststoff, von Gleit-schalungskanälen sowie von Verdrängungskörpern in Brücken. Noch nicht praxisreif sind das Lokalisieren von Ablösungen (z. B. Beschichtungen) und von Verpressfehlern in Hüllrohren. Sowohl die Durchführung der Messungen als auch die Interpretation der Resultate stellen hohe Anforderungen [3].

## Impulsradar

Mit Impulsradar werden Objekte und Grenzen zwischen verschiedenen Materialien geortet, sofern sich diese ausreichend in ihren elektromagnetischen Eigenschaften unterscheiden. Für zerstörungsfreie Prüfungen ist ein hohes Auflösungsvermögen oft wichtiger als eine grosse Eindringtiefe. Da mit zunehmender Frequenz die Eindringtiefe ab-, die Auflösung jedoch zunimmt, werden elektromagnetische Impulse im

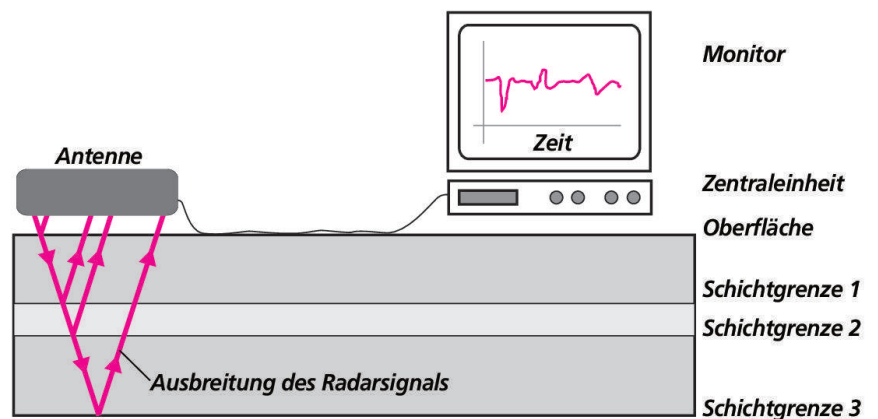


Abb. 8 Schematische Darstellung des Funktionsprinzips von Impulsradar-Messungen (nach [12]).

Zeichnung: TFB

Hochfrequenzbereich (ab ca. 1 GHz) mit einer Dauer von meist weniger als 1,0 ns erzeugt.

Diese werden durch eine Antenne abgestrahlt, an Grenzflächen von Materialien mit unterschiedlichen dielektrischen Eigenschaften reflektiert, transmittiert und absorbiert. Die reflektierten Impulse werden von der Antenne empfangen und nach Aufbereitung im PC bezüglich Laufzeit, Intensität sowie weiterer Kriterien ausgewertet (Abbildung 8). Zur Darstellung kommen:

- **Einzelspurbilder:** Darstellung einer Messung an einem Punkt, bei der die Intensität des Signals über die Zeit aufgetragen wird.
- **Radargramme (B-Bilder)** entstehen, wenn die vielen Einzelkurven aus

den Messungen entlang einer Linie zusammengesetzt werden.

- Messungen mit variablem Abstand zwischen Sende- und Empfangsantenne.

Die Ausbreitungsgeschwindigkeit  $v$  der elektromagnetischen Welle in Beton ist ungefähr bekannt; sie lässt sich auch durch Transmissionsmessungen bestimmen (Bohrkerne oder direkt am Bauteil, wenn dieses von der Rückseite zugänglich ist). Damit kann die Zeitskala in eine Tiefenskala umgewandelt werden, denn es gilt folgende Beziehung:

$$v = 2d/t = c_0 \cdot (\epsilon_r)^{1/2} \quad (7)$$

$d$ : Dicke des zu durchdringenden Stoffs  
 $t$ : Laufzeit der elektromagnetischen Welle im Stoff  
 $c_0$ : Lichtgeschwindigkeit im Vakuum  
 $\epsilon_r$ : Dielektrizitätszahl des Stoffs

Der Faktor 2 ergibt sich daraus, dass das Signal die untersuchte Struktur zweimal durchquert.

Zu beachten ist, dass die Dielektrizitätszahl von vielen Parametern beeinflusst wird, unter anderem von der Feuchte und dem Salzgehalt des Materials sowie von der Porosität und der Frequenz der elektromagnetischen Wellen. Ohne einzelne Bohrungen oder Sondierungen kommt man deshalb, insbesondere bei quantitativen Auswertungen, häufig nicht weiter.

#### Georadar [4]

Die zerstörungsfreie Untersuchung von Strassen und Brücken mit Impulsradar – in diesem Zusammenhang auch Georadar genannt – ist eine interessante Anwendung. Anlässlich der TFB-Veranstaltung über zerstörungsfreie Prüfmethoden wurde über Erfahrungen mit einer mobilen Georadar-Anlage berichtet (siehe *Titelbild*) [4]. An der Front des Fahrzeugs sind zwei Hornantennen mit einer Nominalfrequenz von 2,5 GHz im Abstand von 25 cm über dem Boden angebracht. Am Heck des Fahr-

zeugs befinden sich eine 900-MHz-Antenne sowie ein Weggeber. Der Rest der Apparatur ist im Wageninnern.

Diese Konfiguration der Georadar-Anlage erlaubt beispielsweise bei Messungen der Dicke von Betonbelägen Geschwindigkeiten  $\approx 80$  km/Std. ohne Verkehrsbeeinträchtigung. Zu berücksichtigen ist dabei, dass der Abstand zwischen den einzelnen Messungen (horizontale Auflösung) mit der Geschwindigkeit steigt; bei 50 km/Std. beträgt er 13 cm.

Wenn eine grosse horizontale Auflösung oder eine hohe Genauigkeit der Positionierung erforderlich ist, zum Beispiel bei der Untersuchung der Bewehrungslage in einer Brücke, muss die Fahrgeschwindigkeit auf rund 10 km/Std. reduziert werden.

In *Abbildung 9* sind die Überdeckung der Bewehrung und die Belagsdicke einer 209 m langen Brücke dargestellt. Sowohl die Reflexionen von der Belagsunterseite als auch die von der obersten Bewehrungslage verursachten Reflexionen sind deutlich zu erkennen. Die Auswertung ergab die in der Grafik wiedergegebenen Ergebnisse. Auskunft über die Genauigkeit der Messungen gaben Sondierungen

## LITERATUR

- [3] **Wiggenhauser, H.**, «Zerstörungsfreie Lokalisierung von Spanngliedern und Fehlstellen in Stahlbeton», Referat im Rahmen der TFB-Fachtagung Nr. 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethoden für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» vom 8. Dezember 1999 in Wildegg
- [4] **Hugenschmidt, J.**, «Georadar zur zerstörungsfreien Untersuchung von Strassen und Brücken», Referat im Rahmen der TFB-Fachtagung Nr. 994 360 «Praxistaugliche Prüfmethoden für zerstörungsfreie Qualitätsnachweise an Betonbauten» vom 8. Dezember 1999 in Wildegg
- [9] **Krieger, J., Krause, M., und Wiggenhauser, H.**, «Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethoden für Betonbrücken», Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft **B 18** (1998).
- [10] **Mielentz, F., Milman, B., Krause, H., und Wiggenhauser, H.**, «Praxiseinsatz eines Ultraschallecho-Verfahrens zur Strukturuntersuchung von Betonbauteilen», in «Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendungen Zerstörungsfreier Prüfungen», DGZfP-Berichtsband 66-CD, Plakat 3, Seiten 163–170 (1999).
- [11] **Krieger, J.** «Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethoden bei Betonbrücken», Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen, Brücken- und Ingenieurbau, Heft **B 9** (1995).
- [12] **Hugenschmidt, J.**, «Georadar in Strassenbau und Unterhalt. Anwendungsbeispiele – Berichtsperiode 1995–1997», Empa, Dübendorf (1997).
- [13] **Hermann, K.**, «Zerstörungsfreie Prüfmethoden für Betonbauwerke», Teil 1, Cementbulletin **68** [2], 3–7 (2000).



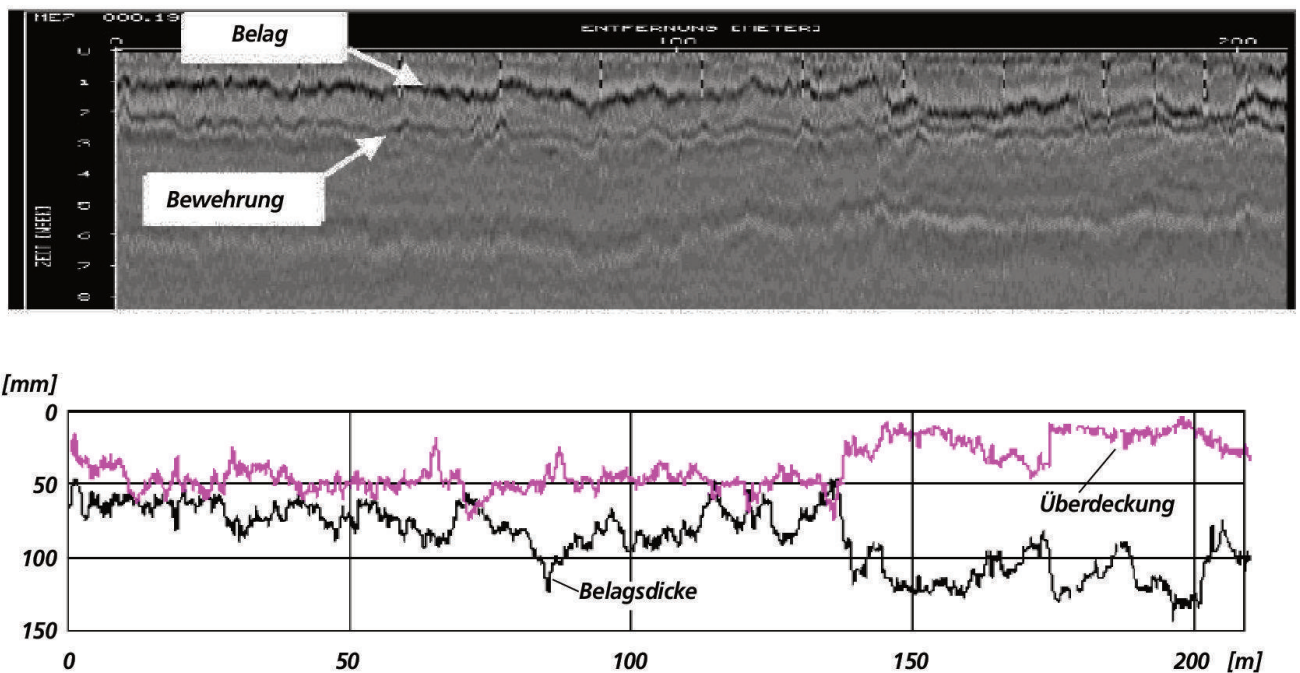


Abb. 9 Brückenuntersuchung: Datensatz (oben) sowie Belagsdicke und Bewehrungsüberdeckung (unten).

Abbildung Empa

und Bohrungen an 23 Stellen auf dieser und drei weiteren nahe gelegenen Brücken: Sie betrug  $\pm 6$  mm bei der Überdeckung und  $\pm 12$  mm bei der Belagsdicke. Georadar-Messungen haben sich bei vielen Untersuchungen von Strassen und Brücken bewährt. Erwähnt seien hier Bestimmungen der Gesamtdicken von Strassenbelägen und Dicken einzelner Strassenbelagschichten, von Bewehrungslagen in Betonstrassen und der Nachweis von Betonschäden unterhalb der Belagsoberfläche auf Brücken [4].

Zusatzinformationen, z.B. aus Bohrkernen, sind immer nützlich und oft unerlässlich. Nachteilig können sich die beschränkte Eindringtiefe der elektromagnetischen Wellen und die ebenfalls beschränkte Auflösung erweisen. Zudem können Radarsignale Metalle nicht durchdringen.

#### Fazit

Im Rahmen der TFB-Veranstaltung konnte nur eine kleine Auswahl von zerstörungsfreien Prüfmethoden für Betonbauwerke vorgestellt werden. Sowohl das Impact-Echo [13] als

auch das Impuls-Echo- und das Impulsradar-Verfahren erfordern einen hohen apparativen Aufwand. Gemessen wird viel, doch für viele Messungen und Auswertungen braucht es noch Spezialisten. In einigen Bereichen wurde aber bereits Praxisreife erreicht – man denke an das Georadar –, in anderen Bereichen bleibt bis zum Durchbruch noch viel zu tun.