

# Ultraschall-Untersuchungen zur Feststellung von Fehlstellen in Hüllrohren

Philipp OBERMEIER<sup>\*,</sup> Christian SODEIKAT<sup>\*</sup> <sup>\*</sup> Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH (Landsberger Straße 370, 80687 München, Tel.: 089/5463729-13 bzw. -29, e-mail: <u>obermeier@ib-schiessl.de</u> bzw. <u>sodeikat@ib-schiessl.de</u>)

**Kurzfassung**. Bei der Detektion von Fehlstellen in Hüllrohren mittels des zerstörungsfreien Ultraschallecho-Verfahrens wurden in den letzten Jahren deutliche Fortschritte erzielt. In diesem Beitrag werden die Ergebnisse und Erkenntnisse von Ultraschallmessungen an einbetonierten Hüllrohren im Rahmen einer Diplomarbeit an der Technischen Universität München und der Ingenieurbüro Schießl Gehlen Sodeikat GmbH erläutert. Die Ultraschallmessungen zeigen, dass es prinzipiell drei Bewertungskriterien zum Nachweis von Fehlstellen gibt.

# 1 Einführung

Eine besondere Bedeutung bei der Zustandsuntersuchung von Brückenbauwerken kommt der Lokalisierung und Bestimmung des Ausmaßes von Fehlstellen bei Spannkanälen zu. Die Tragfähigkeit, die Gebrauchstauglichkeit und die Dauerhaftigkeit eines Spannbetonbauteils mit nachträglichem Verbund hängen maßgeblich von der Qualität der Spannkanalinjektion ab. Die vollständige Verpressung des Spannkanals mit Einpressmörtel unter Baustellenbedingungen ist einer Vielzahl von Einflüssen ausgesetzt, die das Risiko einer mangelhaften Ausführung begünstigen.

Bisherige Methoden zur Untersuchung von Spannkanälen bestanden in der Endoskopie und ggf. bereichsweisen Öffnung der Hüllrohre. Neben dem massiven Eingriff in die Bausubstanz ist die Wiederherstellung eines ausreichenden Korrosionsschutzes des Spannstahls mit großem Aufwand verbunden. Das zerstörungsfreie Ultraschallecho-Verfahren eignet sich besonders für die Ortung von Fehlstellen in Hüllrohren, da für die Untersuchung keine visuell erkennbaren Schäden erforderlich sind. Auf Forschungsseite wurden in den letzten Jahren große Erfolge beim Ultraschallecho-Verfahren hinsichtlich der Messtechnik und Auswertung von Ultraschallmessungen erzielt. Neben der inzwischen zielsicher möglichen Ortung von Spanngliedern und der Bestimmung der Betondeckung liegt der Schwerpunkt der Forschung auf der bildgebenden Darstellung des IST-Zustandes des Hüllrohrinneren.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die im Rahmen einer Diplomarbeit an der Technischen Universität München in Zusammenarbeit und unter Leitung der Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH gewonnenen Erkenntnisse bei der Untersuchung von Spannkanälen an Probekörpern mittels des Ultraschallecho-Verfahrens.



## 2 Spannverfahren und Schadensbilder

#### 2.1 Vorspannung

Man unterscheidet nach dem Zeitpunkt des Aufbringens der Vorspannung zwischen der Spannbettvorspannung (sofortiger Verbund) und der Vorspannung mit nachträglichem Verbund. Im Gegensatz zur Vorspannung mit sofortigem Verbund, bei welcher der Korrosionsschutz durch den Beton gewährleistet wird, müssen die in Hüllrohren verlaufenden Spannlitzen bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund zur Sicherstellung des Korrosionsschutzes mit Einpressmörtel verpresst werden.

## 2.2 Qualität der Spannkanalinjektion

Die Einhaltung der korrekten Mörtelzusammensetzung und ausreichende Aufmischung des Mörtels sind Grundvoraussetzungen für die Herstellung einer qualitativ hochwertigen Spannkanalinjektion.

Darüber hinaus müssen bereits in der Planungsphase wichtige Punkte beachtet werden. Die aufgrund der unterschiedlichen Lage des Spannstahllitzenbündels im Hüllrohrquerschnitt an Hoch- und Tiefpunkten ungünstigen, nicht stetigen hydraulischen Verhältnisse werden durch ein falsch gewähltes Verhältnis der Spannstahlmenge  $A_P$  zum Hüllrohrdurchmesser  $A_H$  verstärkt. Starke Abweichungen von dem in Versuchen ermittelten idealen  $A_P/A_H$ -Verhältnis können zu Sedimentations- bzw. Drainageeffekte führen oder die einwandfreie Entlüftung des Einpressmörtels über die Fließstrecke behindern [1]. Die Anordnung einer ausreichenden Anzahl von Entlüftungs- und Einfüllöffnungen ist zudem entscheidend für eine ordnungsgemäße Verpressung von Spannkanälen.

Durch Fehler in der Ausführung kann die Qualität der Spannkanalinjektion weiter herabgesetzt werden. Neben einer falschen Gerätetechnik (z.B. zu hoher Einpressdruck) sind Beschädigungen der Hüllrohre (z.B. eingedrückte Hüllrohre) infolge unsachgemäßer Handhabung und undichte Hüllrohrstöße (z.B. Ansammlung von Blutwasser aus dem Bauwerksbeton) infolge nicht fachgerechter Montage Hauptgründe für Verpressfehler.

Die Kontrolle der Konsistenz des aus den Entlüftungsöffnungen fließenden Mörtels und die Kontrolle des verpressten Volumens sind einfache Mittel, um Verpressfehler in der Entstehung zu verhindern bzw. frühzeitig zu erkennen.

# 3 Das Ultraschallecho-Verfahren

#### 3.1 Grundlagen des Ultraschallecho-Verfahrens

Das Ultraschallecho-Verfahren zählt zu den indirekten Ultraschallprüfverfahren, bei denen sich Sender und Empfänger auf der gleichen Seite des Bauteils befinden. Dies bietet unter anderem den Vorteil, dass eine einseitige Zugänglichkeit des Bauteils ausreichend ist. Eine niederfrequente Ultraschallwelle (Frequenzbereich 20 – 200 kHz) wird über den am Bauteil angekoppelten Prüfkopf in das zu untersuchende Bauteil eingeleitet und die reflektierten Wellenanteile am Empfänger aufgezeichnet. Die Ultraschallwelle wird an Grenzflächen zu Inhomogenitäten (Änderung der akustischen Impedanz Z) im Bauteil wie z.B. Luftschichten, Bewehrung und Einbauteilen (Hüllrohre) reflektiert, vgl. **Bild 1**.



Bild 1: Prinzipskizze des Ultraschallecho-Verfahrens

Über die gemessene Laufzeit t der empfangenen Ultraschallwelle und der materialspezifischen Schallgeschwindigkeit c kann die Tiefe z der Reflexionsebene (Grenzfläche) berechnet werden. Da es bei der Reflexion der hier verwendeten Wellenart (*shear horizontal* Transversalwellen) an fluiden Medien wie Luft und Wasser zu einer Totalreflexion kommt, eignet sich das Ultraschallecho-Verfahren besonders für die Ortung von Hohlstellen. Aufgrund des gleichen Reflexionsverhaltens der Ultraschallwelle an Wasser und Luft kann jedoch nicht zwischen diesen beiden Medien unterschieden werden.

Die typischen Aufgabenfelder, bei denen das Ultraschallecho-Verfahren zum Einsatz kommt, sind [2]:

- Bestimmung von Bauteildicken und Ermittlung von Bauteilgeometrien
- Ortung von Spanngliedern und anderen Einbauteilen (Bewehrung, Rohrleitungen)
- Ortung von Verdichtungsmängeln (z.B. Kiesnester)
- Ortung von Rissen, Hohlräumen, Ablösungen
- Detektion unverpresster Bereiche in Hüllrohren.

# 3.2 Beschreibung des verwendeten Messgeräts

Für die in **Kap. 4** dieses Beitrags dargestellten, im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Ultraschallmessungen kam das Ultraschallgerät A1220 Monolith der Fa. Acoustic Control System zum Einsatz. Es handelt sich dabei um ein niederfrequentes Defektoskop, das speziell für die Prüfung von Betonbauteilen bis zu einer Dicke von etwa 0,7 m entwickelt wurde [3]. Der verwendete Prüfkopf M2502 ist ein Transversalwellen-Array (shear horizontal). Der Arrayprüfkopf verfügt über 12 Sender und 12 Empfänger, die akustisch voneinander getrennt in einem Gehäuse untergebracht sind.

Die Anordnung mehrerer Punktprüfköpfe hat neben der vergrößerten Sendeleistung den Zweck, das Signal-Rausch-Verhältnis zu verbessern. Durch eine Mittelung der empfangenen Signale wird der Einfluss von durch Inhomogenitäten ausgelösten Störsignalen reduziert. Ein weiterer Vorteil des Prüfkopfarrays ist die einfache Handhabung durch die DPC-Technologie (dry point contact). Bei der Trockenankopplung des Prüfkopfes entfällt das Aufbringen von Kopplungsmitteln (z.B. Vaseline).

**Bild 2** gibt einen Überblick über die möglichen Darstellungsarten der Ultraschallmessungen. Bei einer Einzelmessung (A-Scan) wird die Amplitude über die Laufzeit bzw. die Tiefe in einem Diagramm aufgetragen. Eine Linienmessung, der sogenannte B-Scan, entsteht durch die Aneinanderreihung mehrerer A-Scans auf einer Messlinie. Die Amplitudenhöhe der A-Scans wird durch Farbabstufungen im B-Scan visualisiert. Für die jeweilige Fragestellung nicht relevante Störungen sind in den B-Scans

besser zu interpretieren als in einer Einzelmessung. Der C-Scan ist die volumenaufgelöste Darstellung. Dabei werden A-Scans in x- und y-Richtung durch eine computergestützte Rekonstruktionsrechnung zusammengefügt.



Bild 2: Darstellung der Ultraschallmessungen; Messraster (oben); Ergebnisdarstellung (unten) [4]

# 4 Versuche zum Auffinden von Hohllagen in Hüllrohren

# 4.1 Vorbemerkung

Für die im Rahmen der Diplomarbeit durchgeführten Ultraschalluntersuchungen wurden insgesamt zehn schwach bewehrte Betonquader, jeweils mit einem einbetonierten Hüllrohr hergestellt. Die Komplexität des Untersuchungsprogramms wurde zum einen durch die Art der eingebauten Fehlstellen, zum anderen durch die Variation des Litzengehalts der Hüllrohre gesteuert. Im Folgenden werden einige Ergebnisse der Ultraschallmessungen vorgestellt.

# 4.2 Detektion von Fehlstellen – Ultraschallmessung am vollständig unverpressten Hüllrohr

Neben der hohen Amplitude der Reflexion an der Grenzfläche zu Luft kann ein sekundäres Echo als Nachweis für ein unverpresstes Hüllrohr herangezogen werden, wie **Bild 3** – eine Ultraschall-Linienmessung entlang eines vollständig unverpressten Hüllrohrs – zeigt.



Bild 3: Ultraschallmessung an einem vollständig unverpressten Hüllrohr

Die Ultraschallwelle wird an der Grenzfläche zum luftgefüllten Hüllrohr nach einer Laufzeit von rd. 54  $\mu$ s (entspricht der Tiefe z = 70 mm) teilreflektiert (Signal 1). Dabei bildet sich eine sogenannte Randwelle aus, die um das Hüllrohr läuft und am Empfänger nach einer Laufzeit von rd. 121  $\mu$ s (z = 155 mm) aufgezeichnet wird (Signal 2). Die Laufzeitdifferenz zwischen erster und zweiter Reflexion beträgt rd. 67  $\mu$ s (z = 85 mm). Dies entspricht der Laufzeit, die von der Ultraschallwelle für das Umlaufen des Hüllrohrs benötigt wird (der halbe Umfang des Hüllrohrs beträgt rd. 85 mm).

#### 4.3 Vollständig verpresstes Hüllrohr (ohne Litzen)

Bei der Ultraschallmessung von verpressten Hüllrohren stellt sich im Vergleich zur Messung unverpresster Hüllrohre neben der Reflexion der Ultraschallwelle an der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel (Signal 1) eine zweite Reflexion an der Hüllrohrrückwand (Signal 2) ein. Die Ultraschallwelle wird an der Hüllrohrrückwand, an der Grenzfläche Einpressmörtel/Beton, durch die Reflexion an einem schallhärteren Medium (Übergang Einpressmörtel/Beton) mit gesprungener Phase reflektiert, wie in Bild 4 (senkrecht zur Hüllrohrachse gemessener B-Scan eines vollständig verpressten Hüllrohrs) zu erkennen ist. Im Gegensatz zu Longitudinal- und SV-Transversalwellen, bei denen sich der Phasensprung bei der Reflexion an der Grenzfläche zu einem schallweicheren Medium (z.B. Beton  $\rightarrow$  Luft) einstellt, findet der Phasensprung bei den hier zur Anwendung gekommenen horizontal polarisierten SH-Transversalwellen bei einem schallharten Übergang (z.B. Beton  $\rightarrow$  Stahl oder Einpressmörtel  $\rightarrow$  Beton) statt [5, 6].

Das zweite Echo (Rückwand des Hüllrohrs) hat ebenfalls eine Verzerrung in hyperbolischer Form. Der Abstand der Tiefenlage der beiden Hyperbeln ist an jedem Messpunkt gleich. Die beiden Hyperbeln sind parallel. Da die Ultraschallmessung mit der für den Beton kalibrierten Schallgeschwindigkeit durchgeführt wurde, die Schallgeschwindigkeit des Mörtels jedoch geringer ist, wird der Hüllrohrdurchmesser im B-Scan quasi überschätzt. Der Abstand der beiden Reflexionen von rd. 83 mm entspricht somit nicht dem tatsächlichen Hüllrohrdurchmesser (d<sub>Hüll</sub> = 55 mm).



Bild 4: Ultraschallmessung an einem vollständig mit Einpressmörtel rheoment<sup>®</sup> verpressten Hüllrohr

# 4.4 Messung des Erhärtungsverlaufs von Einpressmörtel – Simulation der Mörtelqualität

Mit fortschreitender Erhärtung des Einpressmörtels steigt der E-Modul und damit die Schallgeschwindigkeit c sowie der Schallwiderstand Z ( $Z = c \ x \rho$ ). Die mit fortschreitender Erhärtung des Einpressmörtels steigende Schallimpedanz wurde zur Simulation der Mörtelqualität herangezogen. Dazu wurden Ultraschallmessungen während der Erhärtung des Einpressmörtels in Zeitintervallen von 3 h durchgeführt. **Bild 5** zeigt die überlagerten A-Scans der Ultraschallmessungen zu signifikanten Zeitpunkten.



Bild 5: Ultraschallmessung im Erhärtungsverlauf des Einpressmörtels rheoment®

Anhand der Pulsform, betrachtet über die Laufzeit des Ultraschallsignals, kann der Erhärtungsverlauf in drei Bereiche unterteilt werden:

- Bereich 1 (0 h 6 h): hohe Amplitude der Reflexion an der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel in einer Tiefe z von rd. 130 mm und deutliches Signal der Mehrfachreflexion der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel (z = 260 mm)
- Bereich 2 (9 h 12 h): Abnahme der Amplitude bei der Reflexion an der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel und der Mehrfachreflexion aufgrund des verringerten Reflexionsgrads durch die steigende Festigkeit des Einpressmörtels und die beginnende Fähigkeit des Mörtels zur Übertragung von Scherkräften;
- Bereich 3 (24 h x): weitere Abnahme der Amplituden bei der Reflexion an der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel; keine Mehrfachreflexion der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel; phasenverschobenes Echo der Rückwand der Einpressmörtelschicht (z = 215 mm) aufgrund der Übertragung von Scherkräften im festen Einpressmörtel.

In **Bild 6** sind quer zur Spanngliedachse aufgenommene Ultraschall-Linienmessungen zu den Zeitpunkten 0 h, 9 h, 24 h und 60 h im zeitlichen Verlauf der Erhärtung des Einpressmörtels gegenübergestellt.

Bei der Ultraschallmessung des Einpressmörtels zum Erhärtungszeitpunkt 0 h zeichnet sich die umlaufende Randwelle ab (**Bild 6 oben links**). Nach fortgeschrittener Erhärtung nimmt die Intensität des Randwellensignals weiter ab, da die Scherkraftübertragung des Mörtels einzusetzen beginnt, vgl. **Bild 6 oben rechts**. Nach 24 h Erhärtungszeit wird die Ultraschallwelle an der Hüllrohrrückwand phasenverschoben reflektiert (**Bild 6 unten links**). Der Vergleich der Ultraschallmessungen nach 24 h und 60 h Erhärtung zeigt, dass die Intensität der Reflexion an der Hüllrohrrückwand bei der Ultraschallmessung nach 60 h Erhärtung aufgrund der gestiegenen Festigkeit und damit verbundenen Fähigkeit zur Scherkraftübertragung stärker ist. Die höhere Festigkeit des Mörtels nach 60 h Erhärtung ist zudem durch den im Vergleich zur Messung nach 24 h im B-Scan erkennbar geringeren Abstand der beiden Hyperbeln zu erkennen. Grund hierfür ist, dass infolge der höheren Schallgeschwindigkeit des Einpressmörtels nach 60 h Erhärtung die Differenz zwischen kalibrierter Schallgeschwindigkeit und Schallgeschwindigkeit des Mörtels geringer ist.



oben links: Einpressmörtel 0 h erhärtet; oben rechts: Einpressmörtel 9 h erhärtet; unten links: Einpressmörtel 24 h erhärtet; unten rechts: Einpressmörtel 60 h erhärtet;

#### 4.5 Ultraschallmessungen an einem Hüllrohr mit entmischtem Einpressmörtel

Vorversuche zeigten, dass es bei deutlich erhöhten Wasser/Bindemittel-Werten zu einer Entmischung des Einpressmörtels und daraus resultierend zu einer Bildung von drei Phasen unterschiedlicher Festigkeit kommt. Während der Mörtel im unteren Bereich ordnungsgemäß erhärtet, bilden sich im oberen Bereich eine pastöse und eine wässrige Phase aus. Die Phasenbildung infolge der Mörtelentmischung konnte mittels des Ultraschallecho-Verfahrens detektiert werden, wie in **Bild 7** zu erkennen ist. Der B-Scan kann entsprechend der drei Phasen aus den Mörtelvorversuchen in drei Bereiche eingeteilt werden.

Im Bereich 1 (0 mm – 120 mm) wird die Ultraschallwelle am Spannstahl reflektiert, was durch das phasenverschobene Ultraschallsignal deutlich wird. Dies impliziert eine ausreichend hohe Festigkeit des Einpressmörtels, so dass eine Scherkraftübertragung und damit Weiterleitung der Ultraschallwelle möglich ist. Die Abgrenzung zum zweiten Bereich ist durch einen Knick in der Signalstruktur des B-Scans zu erkennen.

Die Reflexionen der Ultraschallwelle an der Grenzfläche zum Einpressmörtel ist in den Bereichen 2 und 3 nicht phasenverschoben, was zunächst auf eine sehr geringe Festigkeit des Mörtels hindeutet (keine Scherkraftübertragung). Ein weiteres Indiz für die Annahme eines Einpressmörtels in flüssigem/pastösem Zustand ist die im B-Scan in einer Tiefe von rd. 190 mm erkennbar um das Hüllrohr laufende Randwelle. Der Bereich 2 (120 mm - 280 mm) unterscheidet sich im B-Scan von Bereich 3 (280 mm – 500 mm) durch die schwächere Amplitude der Randwelle. Die in geringem Umfang mögliche Übertragung von Scherkräften im pastösen Mörtel führt zu einer Dämpfung der Randwelle, was die geringere Intensität der Randwelle im Bereich 2 erklärt.



Bild 7: Ultraschallmessung an einem Hüllrohr mit erhöhtem w/b-Wert

Das Hüllrohr wurde zur Verifizierung der Ultraschallmessungen aufgeschnitten. Die augenscheinliche Untersuchung des Mörtelzustands hat die Interpretation der Ultraschallmessung bestätigt, vgl. **Bild 8**.



Bild 8: links: Übergang Bereich 1/2; rechts Übergang Bereich 2/3

# 4.6 Einfluss des Litzengehalts – Beschreibung eines Sonderfalls

Bei einer Reflexion am Spannstahl, wie bei der Ultraschallmessung mit sedimentiertem Einpressmörtel aus **Kap. 4.5** gezeigt, kann jedoch nicht automatisch von Einpressmörtel mit ausreichend hoher Festigkeit ausgegangen werden. **Bild 9 rechts** zeigt einen Sonderfall – die Ultraschallmessung an einem Probekörper mit wassergefülltem und mit 8 Litzen bestücktem Hüllrohr. Zum Vergleich ist in **Bild 9 links** die Ultraschallmessung an einem wassergefüllten Hüllrohr ohne Litzen dargestellt.

Am wassergefüllten Hüllrohr ohne Litzen wird der Ultraschallimpuls total reflektiert, es findet kein Phasensprung statt. Nach einer Laufzeit von etwa 170  $\mu$ s (z = 215 mm) wird das Signal der um das Hüllrohr laufenden Randwelle empfangen

Beim wassergefüllten und mit 8 Litzen gefüllten Hüllrohr (**Bild 9 rechts**) findet hingegen ein Phasensprung statt, was zunächst auf ein ordnungsgemäß verpresstes Hüllrohr hindeutet. Jedoch ist der Grund des Phasensprungs nicht die ordnungsgemäße Verpressung des Hüllrohrs, sondern vielmehr die Tatsache, dass die Spannstahllitzen direkt an der Hüllrohrwandung anliegen und die Ultraschallwelle am Spannstahl reflektiert wird. Bei ungünstiger Position der Litzen im Hüllrohr, d.h. wenn die Spannstahllitzen direkt an der Hüllrohrwandung anliegen kann die Mörtelqualität also nicht indirekt über die Reflexion an Stahl beurteilt werden.



**Bild 9:** Einfluss der Litzen; linkes Bild: Hüllrohr wassergefüllt ohne Litzen; rechtes Bild: Hüllrohr wassergefüllt + 8 Litzen

# 5 Zusammenfassung und Ausblick

Die Qualität der Spannkanalinjektion bei der Vorspannung mit nachträglichem Verbund beeinflusst maßgeblich die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit von Spannbetonbauteilen. Aufgrund des physikalischen Prinzips und der auf Forschungsseite in den letzten Jahren erzielten Fortschritte im Bereich der Anwendungsmöglichkeiten von Ultraschall eignet sich das Ultraschallecho-Verfahren unter bestimmten Randbedingungen zur Ortung von Fehlstellen in Hüllrohren.

Prinzipiell stehen zur Beurteilung des Zustands eines Spannkanals drei Bewertungskriterien zur Verfügung. Das erste Kriterium ist die Amplitudenhöhe der Reflexion an der Grenzfläche Beton/Hüllrohr. Im Gegensatz zur Reflexion an einer Luftschicht ist die Amplitude des reflektierten Wellenanteils bei der Reflexion an Einpressmörtel aufgrund des höheren Durchlassgrads an der Grenzfläche Beton/Einpressmörtel geringer. Dabei muss beachtet werden, dass eine Beurteilung aufgrund der vielen Einflussfaktoren auf die Ultraschallmessung nur vergleichend möglich ist. Als zweites Kriterium können sekundäre Signale wie z.B. die Reflexion an der Hüllrohrrückwand als Nachweis eines verpressten Hüllrohrs oder die Randwelle als Nachweis eines unverpressten Spannkanals herangezogen werden. Bei der Reflexion der Ultraschallwelle am Spannstahl (3. Bewertungskriterium) kann der Zustand des Hüllrohrinneren nur indirekt beurteilt werden. Abgesehen von Sonderfällen, bei denen der Spannstahl direkt an der Hüllrohrwandung anliegt, kann bei der Reflexion an Spannstahl von einem Einpressmörtel mit ausreichend hoher Festigkeit (Scherkraftübertragung) ausgegangen werden.

## Referenzen

- Rostásy, F. S.; Gutsch A.-W.: Zuverlässigkeit des Verpressens von Spannkanälen unter Berücksichtigung der Unsicherheiten auf der Baustelle. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 476, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1997.
- [2]: DGZfP-Fachausschuß "Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen"; Unterausschuß Ultraschallprüfung; Merkblatt B4 – Merkblatt für Ultraschallverfahren zur zerstörungsfreien Prüfung mineralischer Baustoffe und Bauteile; 1999.
- [3]: ZFPBau-Kompendium der BAM (http://www.bam.de/microsites/zfp\_kompendium/welcome.html)
- [4]: Grosse, C., U.: Quantitative zerstörungsfreie Prüfung von Baustoffen mittels Schallemissionsanalyse und Ultraschall. Dissertation, Universität Stuttgart, 1996.
- [5]: Milmann, B.; Krause, M.; Mielentz, F.; Mayer, K.: Ultraschallecho-Verfahren für Spannbeton: Signifikanter Nachweis von Verpressfehlern mit Phasenauswertung. In: Berichtsband Fachtagung Bauwerksdiagnose, Poster 11, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin 2008.
- [6]: Krautkrämer, J.; Krautkrämer, H.: Werkstoffprüfung mit Ultraschall. 5. völlig überarbeitete Auflage, Springer Verlag, Berlin, 1986.
- [7]: Sodeikat, C; Dauberschmidt, C. (Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat): Anwendung von Georadar und Ultraschall – Fallbeispiele aus der Praxis eines Ingenieurbüros. In: Berichtsband Fachtagung Bauwerksdiagnose, Vortrag 13, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V., Berlin 2008.