

# Die Zerstörungsfreie Messung von Materialparametern in der Bauwerksprüfung

Dr.-Ing. Andrei Walther  
BauConsulting Brandenburg, 14770 Brandenburg an der Havel,  
E-Mail: walther@bauconsulting.com

## 1. Kurzfassung

Für die Beurteilung des Istzustand des Bauwerks und für die Ermittlung von Qualität und Beständigkeit der Baustoffe werden Prüfungen am Bauteil bzw. am Bauwerk durchgeführt. Prüfungen sind ebenso bei Schädigungen oder auch bei Verdacht auf Schädigungen notwendig. Einige Verfahren sind genormt (z. B. Rückprallprüfung nach DIN 1048, Magnetpulverprüfung nach DIN 54 130), andere sind nicht genormt aber zählen zum Stand der Technik (z. B. Heft 422, DAfStb) oder sie sind Resultat eines außerordentlich stark innovativen Marktsegments (z. B. Radar, Remanenzmagnetismus-Verfahren, Bewehrungsortung mittels induktiver Methoden). Im Bereich der Betoninstandsetzung ist die Diagnose zur Feststellung des Istzustandes eine vor der Sanierung durchzuführende Maßnahme. Daraufhin kann erst in Abstimmung mit dem Bauherren der Soll-Zustand festgelegt und ein Instandsetzungskonzept entwickelt werden. Eine Einschaltung eines sachkundigen Planers, sowie bei speziellen Diagnoseverfahren eines Sonderfachmannes, ist bei Arbeiten an standsicherheitsrelevanten Konstruktionen unabdingbar. Aufgezeigt werden der Einsatz moderner zerstörungsfreier Prüfmethoden, wie Radar, Ultraschall, Aktive Thermografie und magnetische

Streifeldmessungen in der Bauwerksprüfung nach DIN 1076 sowie in der Überprüfung von Konstruktionen nach VDI 6200.

## 2. Einleitung

In der Baupraxis wird unter zerstörungsfreier Prüfung (zfP) häufig nur eine Sichtprüfung und die Anwendung des Rückprallhammers verstanden. Zusätzlich zu diesen relativ einfachen Verfahren stehen für die Bestandsuntersuchung noch eine große Anzahl von zerstörungsfreien Prüfverfahren zur Verfügung. In den letzten Jahren haben sich zum Beispiel Radar, Ultraschall und Radiographie etabliert. Eine grobe Zusammenstellung der verwendeten Verfahren kann Tabelle 1 entnommen werden. Eine umfangreiche Liste der zfP-Bau-Verfahren kann dem Kompendium der Bundesanstalt der Materialforschung- und prüfung [1], dem Bauphysikkalender [2] oder Ingenieurblatt [3] entnommen werden.

Tabelle 1: Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (zfPBau) [4]

Elektromagnetische Verfahren:	Akustische Verfahren:	Sonstige Verfahren:
Radar	Ultraschall-echo	Bohrwiderstand
Thermographie (passiv / aktiv)	Impact Echo	Bewehrungsortung
Durchstrahlung	Pfahlprüfung	

Im weitere werden daher einige speziellen Prüfmethode vorgestellte und an Hand von Beispielen aufgezeigt, welche Materialparameter ermittelt werden können.

### 3. Georadar (Impulsradar)

Im Bauwesen kommen Primärradargeräte zum Einsatz, bei denen die Sendeantenne einen Primärimpuls in das Bauteil sendet und die Empfangsantenne die passive Rückstrahlung aus Reflexionen (Echos) detektiert (siehe Abbildung 1). Die Sendeantenne sendet einen Impuls mit einer Dauer von weniger als 1ns, der als elektromagnetische Welle in das zu untersuchende Material eindringt. Dieses Primärsignal wird an Grenzflächen reflektiert, gebrochen oder gebeugt und die passiven Echos werden von der Empfangsantenne detektiert.

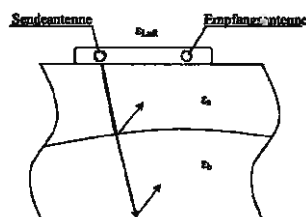


Abbildung 1: Prinzip des Radarverfahrens [1]

Nach Auswertung der reflektierten Impulsen können Angaben bezüglich Schichtaufbau, Schichtdicken und Bauteildicken getroffen werden. Weiterhin können Inhomogenitäten, wie Bewehrung oder Hohlstellen, geortet und qualitative Feuchtemessungen im Beton durchgeführt werden. Radarverfahren eignen sich für nichtmetallische Baustoffe und metallische Baustoffe. Da elektromagnetische Wellen an

Metallen vollständig reflektiert werden können Bewehrungsseisen oder auch Stahlträger sehr gut geortet werden. Allerdings ist die Radartechnik nicht zur Ortung von Objekten unter metallkaschierten Abdichtungsfolien geeignet.

### Anwendung

Bei dem im Bauwesen häufig zutreffenden Bauen im Bestand sind die Fragestellungen häufig nach der Materialbeschaffenheit von Decken und Wänden in Gebäuden ohne Bestandsplanung. Bei dem vorliegenden Beispiel einer Umbaumaßnahme ergab sich unverhofft, dass entgegen der Annahme in einer Stahlbetonwand nur eine äußere, vordere Bewehrung befindet. Die Ergebnisse der folgenden dargestellten Radarmessungen mit einer sehr genauen, hochfrequenten Radarantenne (1,6GHz, GSSI) bestätigten diese Vermutung flächig.

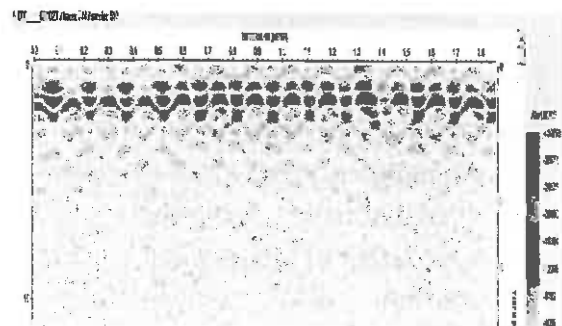
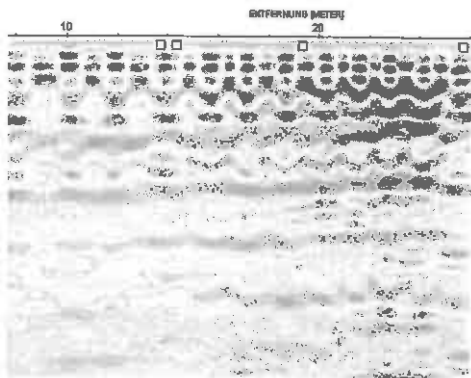


Abbildung 2: Ergebnis einer Radarmessung (hochfrequent, sehr genau auflösend 1,6GHz) Bewehrungsseisen deutlich zu erkennen, Eindringtiefe (ca. 0,5m)

Vor Ort wurde die Vermutung geäußert, dass die hochfrequente Radarantenne eine zu geringe

Eindringtiefe besitzen würde und so die vorhandene Bewehrung nur nicht lokalisiert werden könne.

Eine weitere Messung mit einer niederfrequenten, 400MHz Radarantenne bestätigte die bisherigen Messungen und konnten darstellen, dass sich bis in eine Tiefe von mindestens 1,5m keine Bewehrung befindet (angenommene Wandstärke 40cm). So konnte mit einer zwar nicht so hoch auflösenden, aber dafür weiter reichenden Radarantenne die Fragestellung geklärt werden.



**Abbildung 3:** Ergebnis einer Radarmessung (niederfrequent, ungenau auflösend 400MHz) Bewehrungseisen schwach zu erkennen, keine tiefer liegende Bewehrung Eindringtiefe (ca. 1,5m)

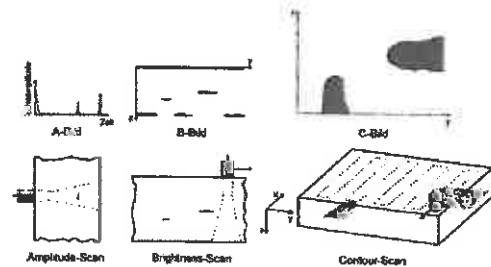
#### 4. Ultraschallecho

Die Ultraschall-Echotechnik beruht auf der Reflexion von Schallwellen an Diskontinuitäten wie Werkstoffinhomogenitäten, Grenzflächen, Hohlstellen oder der Bauteilrückwand. Im Bauwesen kann Ultraschallecho an Beton [3], [5] und Holz [4] angewendet werden zur

- Bestimmung von Bauteilabmessungen (gleichmäßige Dicke, Aussparungen),
- Ortung von Schäden (Hohlstellen, Kies-nester, Ablösungen, Rissen

parallel zur Oberfläche, Fäulnis, Äste) sowie

- Ortung von Schichtwechselln und stofflichen Inhomogenitäten.



**Abbildung 4:** Darstellungsmöglichkeit der Ultraschallmessungen [2]

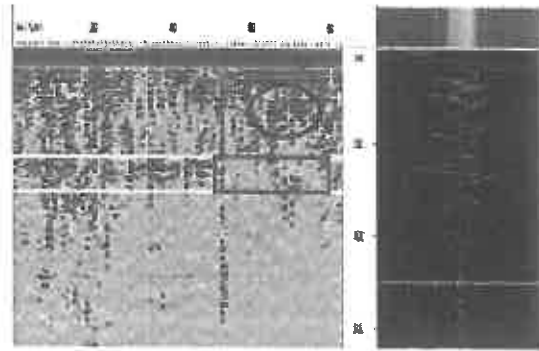
Bei Vorhandensein eines Echosignals von der Bauteilrückseite kann davon ausgegangen werden, dass das Bauteil ungeschädigt ist und sich keine inneren Schäden im Bauteil befinden. Diese Aussage gründet physikalisch darauf, dass das ausgesendete Schallsignal eine ungestörte Struktur für die Schalleitung benötigt und für ein Echosignal von der Bauteilrückseite der Schall das Bauteil ungehindert zweimal durchlaufen muss. Ist dies möglich, ist die innere Struktur ungeschädigt. Wird bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen kein Echosignal von der Bauteilrückseite empfangen, besteht ein Verdacht auf eine innere Schädigung. Mit einem indirekten Verfahren wie Ultraschallecho kann keine eindeutige Aussage über die tatsächliche Art der Schädigung getroffen werden. Daher werden z. B. bei Holzbauwerken unklare Bereiche markiert und zerstörungsarm mit der Bohrwiderstandsmethode an dieser Stelle eine punktuelle Untersuchung durchgeführt (vgl. gesonderten Abschnitt 4 über die Besonderheiten

bei der Begutachtung von Holzbauwerken). Grenzen von Ultraschallecho liegen zum einen in der Unerreichbarkeit des Bauteils (direktes Ankoppeln an das Bauteil ist erforderlich), zum anderen wenn eine Materialschicht auf dem zu untersuchenden Bauteil aufgebracht ist (z. B. Estrich und Folie auf einer Betonplatte).

### Anwendung

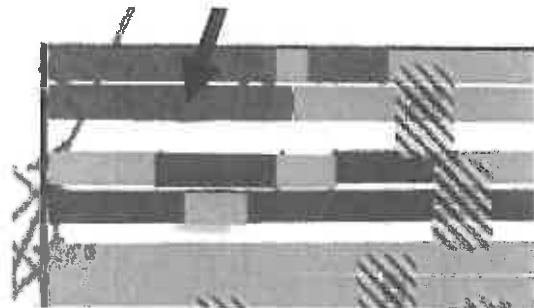
Bei dem folgenden Beispiel kam es zu einem Einbruch in der Betondecke eines Brückenauflegerbauwerks durch eine Überlastung und strukturelle Schäden im Inneren der Konstruktion. Da weitere innere Schäden befürchtet wurden und es sich um ein verkehrstechnisch bedeutsames Brückenbauwerk handelt, wo Sperrzeiten für den Verkehrsfluss sehr stören sind, sollte zerstörungsfrei nachgewiesen werden, dass sich keine weiteren Schäden im Inneren des Bauwerkes befinden.

Es wurde flächig Messspuren mit einem Abstand der Messspuren von 0,3m durchgeführt. Folgend ist eine Messspur dargestellt, wo ein Schaden vermutet wurde.



**Abbildung 5:** Ergebnis einer Ultraschallechomessung im Raum 1A an der Deckenuntersicht (Messpunktabstand 5cm, Messspurlänge etwa 410cm), Lage der Echos der Oberseite der Betondecke (bei ca. 25cm Tiefe) mit weißem Kasten markiert, deutliche Echos mit teilweise leichten Inhomogenitäten im Deckenaufbau zu erkennen, klare Echos an horizontale Reflektionsebene (roter Kreis), Bereich ohne Rückwandecho mit rotem Rechteck markiert

Um den möglichen Schaden zu verifizieren, wurde ein Bohrkern entnommen. Der Bohrkern ergab einen Hohlraum, der verpresst wurde. Ein Ausschnitt der flächigen Messungen ist in ABB dargestellt.



**Abbildung 6:** Darstellung der Ergebnisse der Ultraschallechomessung an Betondecke (grün: gutes Echo, kein Schaden vermutet, rot: kein Echo, Bohrkernentnahme mit Pfeil markiert, schraffiert singulärer Bereich ohne Echo, benachbarter Bereich mit guten Echos)

Durch die flächige Untersuchung konnten weitere Schäden ausgeschlossen werden. An Messpunkten ohne Rückwandecho wurde das Umfeld in engem Raster untersucht und so konnte der auffällige Bereich stark eingegrenzt werden und so als nicht gefährlich definiert werden.

## 5. Impuls-Thermografie

Die Impuls-Thermografie wird angewendet, um Hohlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen zu orten. Das Bauteil wird durch einen inneren oder äußeren Wärmeimpuls in einen thermisch instationären Zustand gebracht. Innere Impulse sind z.B. die Hydratationswärme des Zements oder die über elektromagnetische Induktion erwärmte Bewehrung [Hillemeier]. Äußere Wärmequellen sind beispielsweise Infrarotstrahler oder die Sonne. Die Wärmequellen für die Impuls-Thermografie sollten eine möglichst große, homogen verteilte Wärmestromdichte besitzen und die Wärmeenergie in möglichst kurzer Zeit einbringen. Bei einer äußeren Erwärmung staut sich die Wärme vor Fehlstellen in Bauteilen, wenn die Fehlstellen einen geringeren Wärmeindringkoeffizienten  $b$  als das umgebende Material haben. Es gilt:

$$b = \sqrt{\rho \cdot \lambda \cdot c}$$

mit der Rohdichte  $\rho$  in [kg/m<sup>3</sup>], der Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  in [W/(m·K)] und der spezifischen Wärmekapazität  $c_p$  in [J/kg·K]. Je kleiner der Wärmeindringkoeffizient  $b$  der Fehlstelle gegenüber der des ungestörten Materials ist, desto deutlicher bildet sich die Fehlstelle auf der Bauteiloberfläche als Bereich erhöhter Temperatur ab [6].

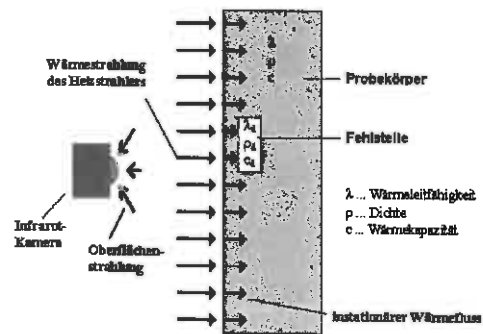
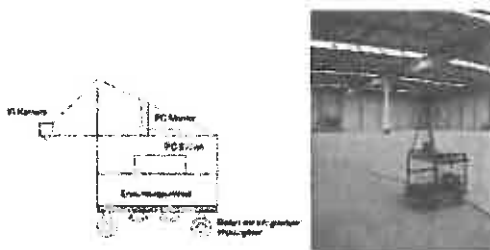


Abbildung 7: Prinzip der Impuls-Thermografie [10]

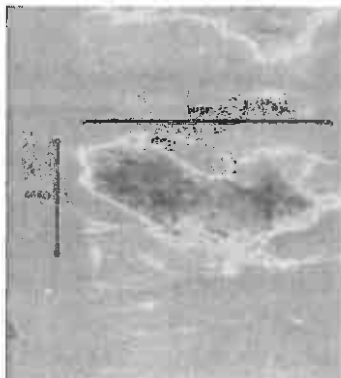
## Anwendung

Industriefußböden in Fertigungshallen sowie Lagerhallen sind hohen Belastungen aus Gabelstaplerverkehr, Lager- und Maschinenlasten ausgesetzt. Damit keine Schäden im Fußbodenbereich entstehen, werden Estriche für Industriefußböden häufig als zementgebundene Hartstoffestriche nach DIN 18560-7 ausgeführt. Diese Estriche mit einer Dicke bis zu 10 mm sind hochbeanspruchbar und können Belastungen bis 40 N/mm<sup>2</sup> in die Betontragschicht übertragen. Auf die Betontragschicht werden die Estriche in aller Regel „frisch in frisch“ aufgebracht. Das bedeutet, dass in den jungen noch frischen Beton die Hartstoffestrichschicht eingearbeitet wird. Dadurch entsteht ein monolithischer Verbund. Durch zu schnelle Bauabläufe oder betontechnologisch nicht abgestimmte Mischungen kommt es zu Störungen des Verbunds zwischen Hartstoffestrichschicht und Betontragschicht. Diese Verbundstörungen können zur besseren Dokumentation mittels Impuls-Thermografie detektiert werden.

Für Messungen vor Ort wird die Impuls-Thermografie-Einheit (Wärmestrahler und IR Kamera) auf einem Messwagen aufgebaut. An diesem Messwagen bestimmen inkrementale Impulsgeber die Wegänderung. Die Weglänge sowie die dazugehörige IR- Aufnahme werden im PC verarbeitet. Dadurch entsteht ein thermografisches Abbild der Hartstoffestrichoberfläche. Warme Bereiche auf dem Infrarotbild deuten auf Delaminationen der Hartstoffestrichschicht hin.



**Abbildung 8:** Aufbauschema des Messsystems sowie Prototyp bei Messungen.



**Abbildung 9:** Thermogramm der Delamination der Hartstoffschicht (rot=warm=hohlliegend)

## 6. Magnetische Streufeldmessung

Der aus Gründen der Verkehrssicherheit bis heute unumgängliche Einsatz von Tausalzen kann zu gravierenden Korrosionsschäden an der Bewehrung von Brückenbauwerken führen. Besonders betroffen von dieser Korrosionsgefahr sind Querspannglieder in Brückenplatten (Bild 10).



**Abbildung 10:** Durch Tausalze hervorgerufene Korrosionsschäden an einem Querspannglied einer Brückenplatte

Eine erforderliche Überprüfung von Querspanngliedern der Fahrbahnplatte einer Brücke lässt sich häufig dennoch nicht durchführen, weil der Verkehr nicht über den erforderlichen Zeitraum umgeleitet werden kann. Ziel der hier geschilderten Geräteentwicklung war es, das magnetische Streufeldverfahren zur Ortung von Spanndrahtbrüchen [7], [8] mit einer erhöhten Messgeschwindigkeit anwenden zu können, die es erlaubt, eine komplette Brückentafel in einer Nacht messtechnisch zu erfassen, um so die Behinderung des Verkehrs weitestgehend zu vermeiden. Für die Untersuchung der meisten Brücken wäre es inzwischen ausreichend, den Verkehr während verkehrsarmer Zeiten durch Sperrung einzelner Fahrspuren

einzu­schränken, um die Querspannglieder auf Spanndrahtbrüche zu untersuchen.

### **Anwendung**

Die Spannglieder werden mit speziell für diesen Zweck entwickelten Elektromagneten aufmagnetisiert. Zur Messung der magnetischen Flussdichte werden Hallsonden verwendet, die sich bei ausreichender Empfindlichkeit durch eine baustellengerechte Robustheit und einfache Handhabbarkeit auszeichnen. Die Messvorrichtung ist mit einem Hallsonden-Feld bestückt. Die Signale werden auf einem Messrechner wegabhängig dargestellt und für die Dokumentation abgespeichert. Es stehen Hilfskonstruktionen zur Verfügung, um die Geräte bei Balken und Unterzügen auf der oberen, seitlichen und unteren Betonoberfläche exakt entlang dem Spanngliedverlauf zu. Für die Stromversorgung ist ein normaler Netzanschluss (230 V, 16 A) ausreichend.

Anders verhält es sich bei der Messung von der Oberseite eines Bauteils, wie sie bei der Überprüfung von Querspanngliedern in Brückenplatten durchgeführt wird. Dafür wurde für das kurze Zeitfenster, das bei Brücken in der Regel für Untersuchungen nur zur Verfügung steht ein selbstfahrender Magnetwagen mit Sensoreinheit gebaut. Der an der TU Berlin entwickelte Magnetwagen fährt pro Nacht bis zu 4.000 m<sup>2</sup> Verkehrsflächen ab. Dieser Magnet mit

elektrohydraulischem Antrieb ist mit 3,50 m Breite auf eine Fahrbahnbreite abgestimmt (Abb 11.). Die Fahrgeschwindigkeit kann bis zu 5 km/h gewählt werden [8]. Um das magnetische Streufeld der aufmagnetisierten Querspannglieder zu messen, muss die gesamte Breite von 3,50 m während der kontinuierlichen Fahrt überstrichen werden. Die vom IZFP in Saarbrücken entwickelte Sensoreinheit ist dem Magnetwagen angehängt und besteht aus einem Rotoscan mit 2 Umdrehungen pro Sekunde, an dessen Enden 5 Hallsensoren pro Rotationsarm eingebaut sind mit einem Auflösungsvermögen von 1mT bei 1 cm<sup>2</sup> Ortsauflösung [7]. In der Fahrbewegung wird die Breite von 3,50 m überstrichen (Bild 11).



Abbildung 11: Messtechnik auf einem Parkdeck mit Rotationsscanner (B) und Magnetwagen (A).

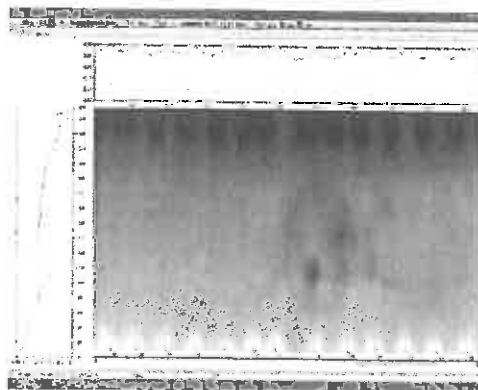


Abbildung 12 Typisches Messergebnis: Markierung eines Bruchbereichs in Querspanngliedern mit Komplettbruch eines Spanngliedes sowie Bruch des halben Querschnitts. [7]

## 7. Zusammenfassung

Es wurden Sonderprüfmethoden vorgestellt, die aufzeigen, dass mit der zerstörungsfreien Prüfung die substanzschonende nutzorientierte Bausanierung optimiert werden kann. Mit den hier präsentierten Beispielen wurde gezeigt, dass Materialparameter vorhandener Bauwerke zerstörungsfrei ermittelbar sind. Die Anwendungsmöglichkeiten und Grenzen der zerstörungsfreien Prüfverfahren Radar, Ultraschallecho, Impuls-Thermografie und Streufeldmessung wurden im Text dargestellt und anhand verschiedener Anwendungsbeispiele erklärt. So wurden mit aktiver Thermografie Hohllagen in Industrieestrichfußböden, mit Radar die Lage von Bewehrung in neuen bzw. historischen Bauwerken und mit Ultraschallecho Risse in einer Betonplatte lokalisiert. Die magnetische Streufeldmessung kann zur Lokalisation von Spanndrahtbrüchen in Brücken dienen und somit zur Ermittlung der Standsicherheit wichtige Parameter liefern. Ziel der detaillierten zerstörungsfreien Prüfungen ist es, belastbare Daten für die Planungs- und Sanierungsprozesse zu erlangen, um so mit einer realistischen Planung auf die Anforderungen und Bedürfnisse des zukünftigen Nutzers eines Bauwerkes eingehen zu können.

## Literatur

- [1] Maierhofer, C. ; Radaranwendungen im Bauwesen, ZfP Zeitung 72, DZFP Eigenverlag, 12 / 2000
- [2] Hasenstab A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation TU Berlin (2005)
- [3] Straußberger, D., Hartmann, I., Hasenstab, A.: Straßenuntersuchungen mit Radar, Ultraschallecho und FWD. Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Poster 13, Berlin
- [4] Hasenstab, A.: Ultraschall-Echo, ein ZfP-Verfahren zum Lokalisieren von Fehlstellen in Brettschichtholz (BSH) und Vollholz – Praxisbeispiele. Bauwerksdiagnose Berlin, 21.-22.02.2008, Berlin
- [5] Hasenstab A., Hillemeier B., Homburg S., Walther A., Intigritätsprüfung statisch relevanter Bereiche von Spannbetonbrücken mit dem Ultraschallecho, Radar und Remanenzmagnetismus Verfahren, Dach DGZfP Jahrestagung, Graz 2012
- [6] Arndt R., Hillemeier B., Maierhofer Ch., Rieck C., Röllig M., Walther A.; Zerstörungsfreie Ortung von Fehlstellen und Inhomogenitäten in Bauteilen mit der Impuls-Thermografie, Bautechnik, Volume 81, Issue 10, pages 786–793, October 2004
- [7] Walther, A.: "NDT of Prestressing Steel Fractures in Post-Tensioned Concrete Bridges", 12th International