

# Ultraschall-Echo zur Ortung von Rissen in Brettschichtholz (BSH)

Andreas HASENSTAB, TÜV Rheinland (LGA), Nürnberg

**Kurzfassung.** Neben nicht sichtbaren Schäden in Holz wie Innenfäule stellen nicht sichtbare Oberflächenfäule und Risse ein Problem bei Vollholz und Brettschichtholz dar.

Nach der Norm darf Holz von einer Oberfläche aus bis zu  $1/6$  des Querschnitts eingerissen sein – was bedeutet, dass der Riss von der gegenüberliegenden Oberfläche auch nur  $1/6$  des Querschnittes betragen darf. Praktisch heißt dies, dass erst wenn das Bauteil um mehr als  $1/6$  von beiden Bauteilseiten eingerissen ist, Handlungsbedarf besteht. Da eine spätere Inspektion der Träger meist bei der Planung nicht vorgesehen war, ist eine beidseitige Zugänglichkeit bei vielen Konstruktionen aus Trägern mit großen Abmessungen nicht gewährleistet. In der Praxis bedeutet dies, dass Risse von der nicht zugänglichen Seite unentdeckt bleiben.

Forschungsarbeiten an der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung mit dem Ultraschallecho-Verfahren ergaben, dass es möglich ist, Fäule von einer ungeschädigten Bauteilseite aus zu orten. Darauf aufbauende praktische Versuche an der LGA zeigen, dass bei einer ungeschädigten, rissarmen Oberfläche mit dem Ultraschallecho-Verfahren Risse auf der nicht zugänglichen Bauteilseite geortet werden können. Ergebnisse der Untersuchungen werden im Artikel vorgestellt.

## 1. Einleitung und Problemstellung

Seit dem Einsturz einer Halle in Bad Rechenhall im Januar 2005 wurden eine Vielzahl von Hallen auf Schäden hin untersucht. Dabei fielen bei Holzhallen häufig auch vorhandene Risse auf, die bis zu bestimmten Grenzwerten unbedenklich sind [1] und keine Sanierung wie Rissverpressung erforderlich machen. In Zahlen bedeutet dies dass im biegezug- und schubbeanspruchten Bereich die Risstiefe pro Seite  $1/6$  des Querschnitts, d.h. in der Summe  $1/3$  des Querschnitts betragen darf. Praktisch heißt dies, dass, wenn sichergestellt ist, dass von der Rückseite an dieser Stelle kein Riss vorhanden ist, der Riss von einer Bauteilseite  $1/3$  des Querschnitts betragen darf [1, 2].

Diese Auslegung ist in der Praxis sehr wichtig, da so auch bei Risstiefen über  $1/6$  und unter  $1/3$  der Querschnittsbreite von einer Seite noch keine Sanierung erforderlich ist.

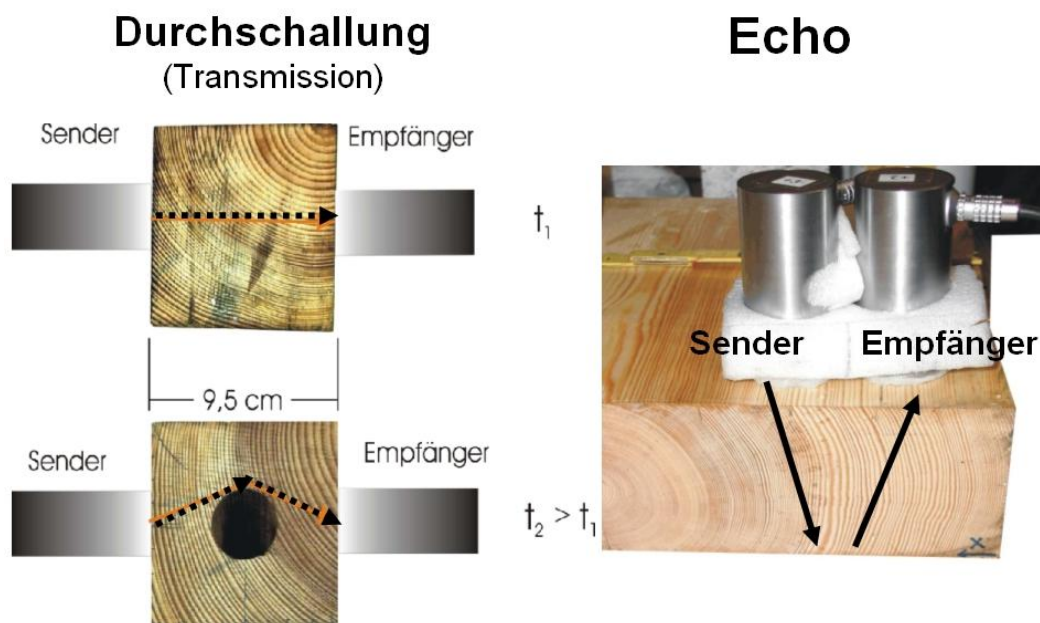
## 2. Stand der Technik der Prüfverfahren für Holz

Zur zerstörungswarmen und zerstörungsfreien Prüfung von Holz stehen eine Reihe von Prüfverfahren zur Verfügung. So wird beispielsweise Innenfäule in Holz zerstörungswarm vor allem mit der Bohrwiderstandsmethode [3] und Bohrkernentnahme lokalisiert. Bei den Ergebnissen handelt es sich um Punktmessungen, welche bei der Interpretation viel Erfahrung erfordern. Selten wird auch der Auszieh- oder Eindringwiderstand mit der Auszieh- oder Eindringwiderstandsmessung oder Penetrationsanalyse untersucht [4].

Zerstörungsfrei wird neben der visuellen Prüfung auch der Belastungsversuch, die Durchstrahlungstechnik und Ultraschalltechnik verwendet [4], [5], [6], [7]. Bei der Ultraschall-Durchschallungstechnik (Abbildung 1) und der Durchstrahlungstechnik ist eine beidseitige Zugänglichkeit des Bauteils erforderlich. Ultraschall-Durchschallung erfordert zudem eine beidseitige direkte Ankopplung am Bauteil, was die Anwendbarkeit des Verfahrens stark begrenzt.

Für Untersuchungen mit der Ultraschall-Echotechnik (Abbildung 2) muss nur eine Bauteilseite zugänglich sein.

Für die Lokalisierung von Rissen ist von den zerstörungsarmen Prüfverfahren nur die Bohrkernentnahme geeignet, von den zerstörungsfreien Prüfverfahren vor allem die visuelle Prüfung und Ultraschallecho-Methode. Ob mit Ultraschall-Durchschallung Risse in BSH in der Praxis geortet werden können ist dem Autor nicht bekannt – besonders die Verwendung von Longitudinalwellen ist aufgrund der später erläuterten Anisotropie des Holzes besonders schwierig. Erfolgreiche Labormessungen sind von der MPA Stuttgart veröffentlicht.



**Abbildung 1:** Prinzip der Ultraschall-Durchschallung, Auswertung der Schalllaufzeiten.

**Abbildung 2:** Prinzip bei Ultraschall-Echotechnik mit Ankopplung der Longitudinalwellenprüfköpfe mit Verbindungslinie zwischen den Prüfköpfen senkrecht zur Faser.

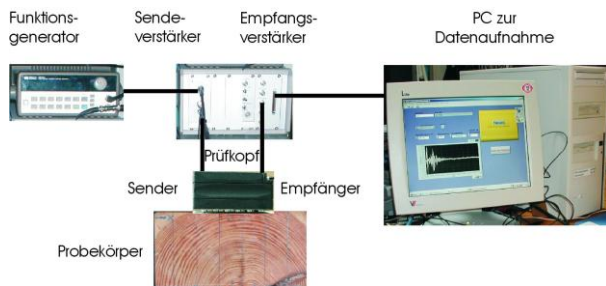
### 3. Methodik

Ultraschall-Echo beruht auf der Reflexion der Schallwellen an Werkstoffinhomogenitäten wie der Bauteilrückwand oder an anderen Grenzflächen. Aus den empfangenen Signalen kann indirekt eine Aussage über den Bauteilzustand oder innere Schäden getroffen werden, wobei die relativen Messergebnisse mittels einer Kalibrierung durch bekannte Bauteilabmessung oder eine Bohrwiderstandsmessung in Absolutwerte umgerechnet werden können.

An Beton wird dieses Verfahren bereits seit einigen Jahren eingesetzt [8], [9], an Holz erst seit wenigen Jahren [5], [6].

Die geringe Dichte von Holz ( $\rho_{\text{Kiefer}} \ll \rho_{\text{Beton}} \ll \rho_{\text{Stahl}}$ ) wird durch eine hohe Lufteinschlussdichte verursacht, was leistungsstarke, niederfrequente Prüfköpfe (50-200 kHz) erforderlich macht.

Eine niedrige Frequenz ergibt eine geringe Dämpfung des Signals, hat aber eine große Wellenlänge zur Folge, was mit einer größeren Mindestgröße des noch detektierbaren Fehlers einher geht.

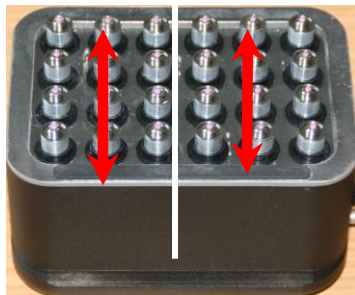


**Abbildung 3:** Versuchsaufbau mit Geräten (Funktionsgenerator zur Signalerzeugung, Sende- und Empfangsverstärker, Prüfkopf und PC mit Messwerterfassungskarte (Analog-Digital-Umsetzkarte)) und hier mit Transversalwellen-Sende-Empfangseinheit A1220 der Firma Spectrum.



**Abbildung 4:** Handgerät hier mit Transversalwellen-Sende-Empfangseinheit A1220 der Firma Spectrum.

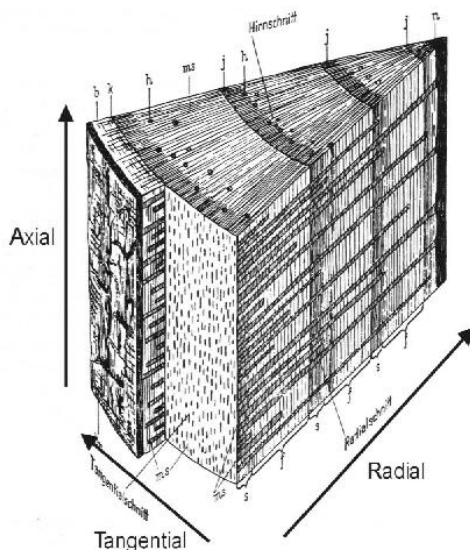
Aus der Laborapparatur der BAM (Abbildung 3) wurde eine stromquellenunabhängige, baustellentaugliche Anwendungsapparatur entwickelt, welche für die folgenden Untersuchungen angewendet wurde (Abbildung 4).



**Abbildung 5:** Transversalwellenprüfkopf mit einem Array von Punktkontaktprüfköpfen zum Betrieb ohne Koppelmittel, roter Pfeil entspricht Polarisierung der Transversalwellen

Zum Anregen der Transversalwellen wird eine Sende-Empfangseinheit bestehend aus 12 Punktkontakt-Prüfköpfen als Sender und 12 Prüfköpfen als Empfänger verwendet (Abbildung 5). Dieser Prüfkopf hat den Vorteil, dass kein Koppelmittel erforderlich ist und somit eine schnellere Messung ohne Verunreinigung der Messfläche durch Koppelmittel möglich ist. Der Prüfkopf wird mit 55 kHz angeregt, was bei einer Messrichtung senkrecht zur Faser mit  $v = 1,4 \text{ km/s}$  und  $\lambda = \frac{c}{f}$  bei Holz eine Wellenlänge von 2,5 cm ergibt.

#### 4. Anisotropie von Holz



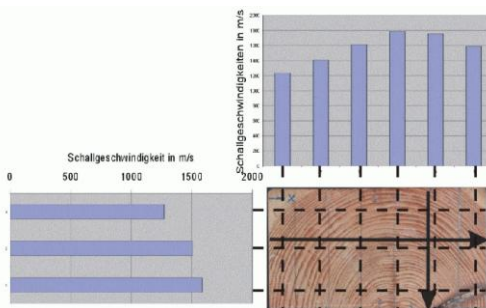
**Abbildung 6:** Radial- und Tangentialschnitt einer vierjährigen Kiefer [10].

Auch durch seinen anisotropen und inhomogenen Aufbau unterscheidet sich Holz von anderen Baustoffen.

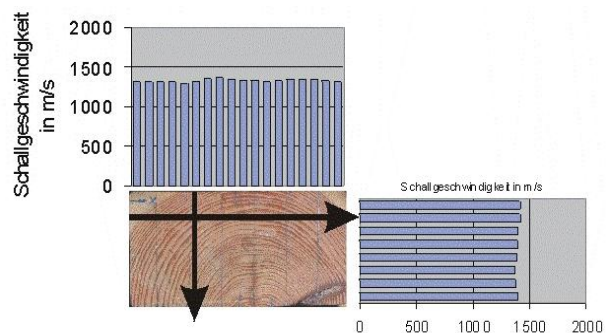
Die Holzstruktur selbst besteht aus Fasern, die größtenteils längs zur Achse des Stammes orientiert sind. Senkrecht zur Faser gesehen sind die Fasern in Jahresringen angeordnet (Abbildung 6). Durch den Aufbau sind die Materialeigenschaften in den drei anatomischen Richtungen unterschiedlich. üblicherweise benennt man diese drei Richtungen axial, radial und tangential (Abbildung 6). Dabei bedeutet axial bzw. longitudinal die Materialeigenschaft in Faserrichtung. Senkrecht zur Longitudinalrichtung wird noch in tangential, d. h. entlang des Jahresrings und radial, d. h. durch den Kern unterschieden.

Besonders auf Longitudinalwellen hat dieser anisotrope Aufbau einen großen Einfluss – was sich in einer Zunahme der Schallgeschwindigkeit

von tangentialer über radialer zu axialer Schallaufrichtung äußert (Abbildung 7). Für die Anwendung am Bauteil bedeutet dies, dass die Messung immer mit gleicher Position zur Faser durchgeführt werden sollte.



**Abbildung 7:** Unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten bei Transmissionsmessungen mit Longitudinalwellen in Abhängigkeit des Schallwegs relativ zur Faser.



**Abbildung 8:** kaum Unterschiedliche Schallgeschwindigkeiten bei Transmissionsmessungen mit Transversalwellen in Abhängigkeit des Schallwegs relativ zur Faser.

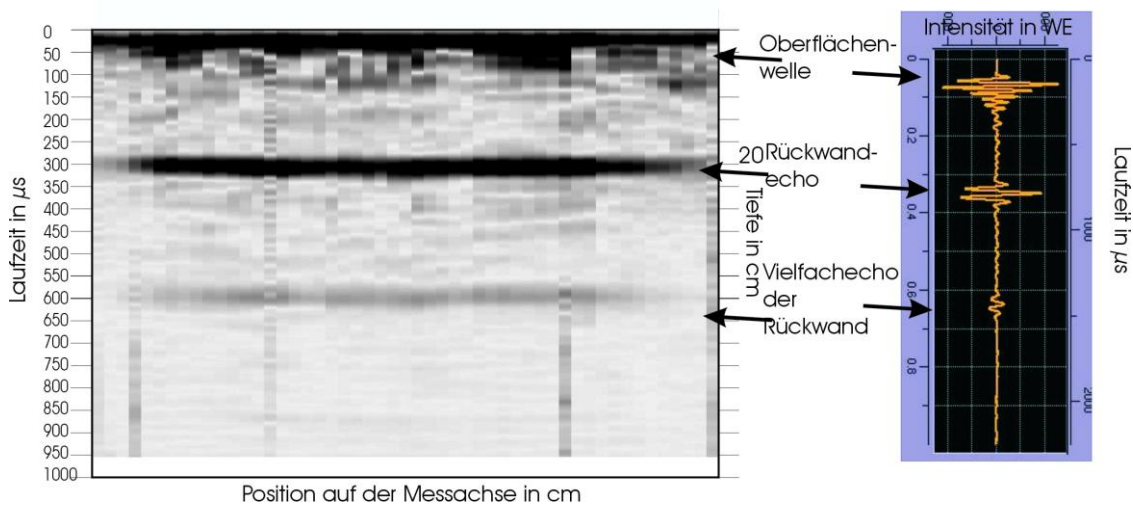
Messungen an der BAM ergaben, dass diese Effekte bei Kiefernholz für Transversalwellen nicht zutreffen. So zeigte sich, dass bei einer Polarisation der Transversalwelle parallel zur Faser die Unterschiede zwischen tangential und radial sehr gering sind und für eine Messung mit dem beschriebenen Prüfkopf (Abbildung 5) bestehend aus 24 Einzelprüfköpfen vernachlässigbar ist (Abbildung 8). Holz stellt sich für Transversalwellen mit einer Wellenlänge im Zentimeterbereich als axial isotrop dar, d. h. für die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Transversalwelle ist nur die Polarisation in Bezug auf die Faser ausschlaggebend.

Anschaulich stark überzeichnet wirkt Holz auf die Transversalwelle mit seinen Fasern wie ein Bündel Spagetti, ohne Unterschied von tangential oder radial zum Holzkörper.

## 5. Ergebnisse

### 5.1. Ergebnisse an Bauteil aus Vollholz ohne Schäden

Mit den bereits ausführlich beschriebenen Punktkontaktprüfköpfen (Abbildung 5) und einer koppelmittelfreien Ankoppelung wurde ein Bauteil untersucht und ergab das in Abbildung 9 dargestellte Bild auf dem sowohl das Rückwandecho in einer Tiefe von 20 cm als auch ein Vielfachecho zu sehen sind. Exemplarisch ist in Abbildung 10 ein Laufzeit-Intensitätsbild (A-Bild) dargestellt.



**Abbildung 9:** Ergebnis einer Transversalwellenmessung an einem ungeschädigten Probekörper (Bauteildicke: 20 cm) mit ungestörtem Rückwandecho und einem Vielfachecho.

**Abbildung 10:** A-Bild einer Transversalwellenmessung mit Echo und Vielfachecho.

### 5.2. Ergebnisse an Bauteil aus BSH mit Riss

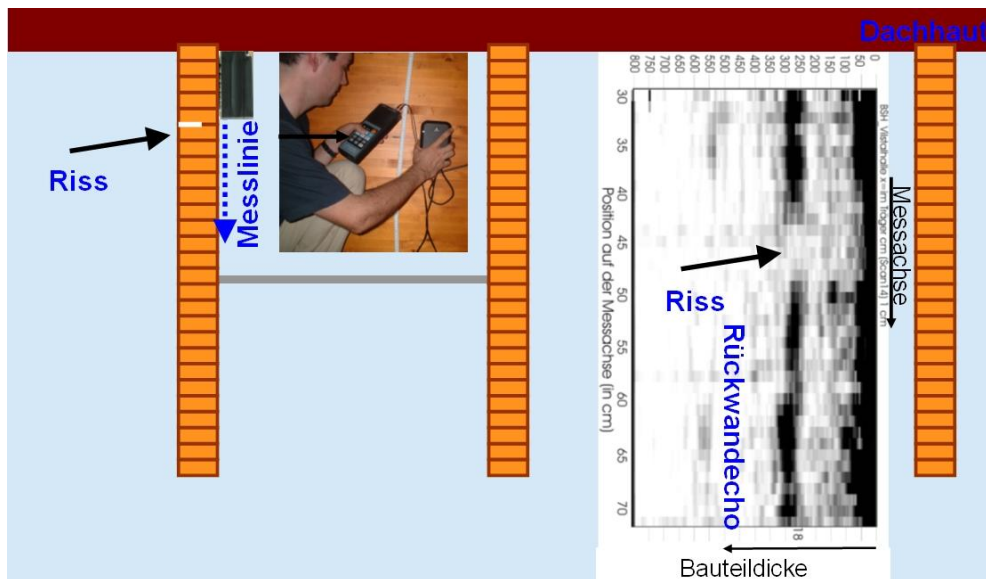
Die Untersuchungen an der BAM ergaben, dass Ultraschall-Echo sowohl an Vollholz als auch an Brettschichtholz (BSH) möglich ist [10].

Im Rahmen einer Halleninspektion durch die LGA Bautechnik GmbH – Fachzentrum Baubegutachtung - von einer BSH-Halle fielen Risse in einem BSH-Binder auf.

Konstruktionsbedingt kann häufig nur eine Seite der BSH-Binder problemlos direkt untersucht werden, die gegenüberliegende Seite ist nur mit größerem Aufwand zu erreichen. Zusätzlich zur gängigen Prüfung (visuell, Risstiefe, Rissbreite, Risslänge, Feuchte) wurde die Ultraschallecho-Methode eingesetzt.

Dabei wurden Ultraschallecho-Messungen an den BSH-Bindern von oben nach unten senkrecht zu den Lamellen durchgeführt.

Das Ergebnis ist in Abbildung 11 rechts dargestellt, wobei neben dem deutlichen Rückwandecho zu Beginn und Ende der Messung auch eine Abschattung der Rückwand auffällt. Aus Vergleichsmessungen im Rahmen der Dissertation [11] ist bekannt, dass es sich hierbei um einen Riss senkrecht zur Oberfläche und parallel zur Faser (Spannrichtung des Trägers) handelt.



**Abbildung 11:** Untersuchung in der Mehrzweckhalle an BSH Trägern (145 cm x 18 cm) mit der Ultraschallecho-Technik;  
links Messung mit Messlinie am Bauteil  
rechts: Ergebnis der Ultraschallecho-Messung mit deutlichem Rückwandecho

Eine etwaige Fäulnis kann durch eine Signalanalyse ausgeschlossen werden. Eine genaue Untersuchung dieses Bereiches von der gegenüberliegenden Seite mit einem Gerüstwagen ergab, dass sich genau in der Mitte der Abschattung des Rückwandechos ein Riss mit einer Breite von 4 mm befindet.

Somit ist es möglich, Schäden wie Risse im BSH von einer Bauteilseite aus zu detektieren, bzw. nachzuweisen, dass sich keine Riss auf der nicht zugänglichen Bauteilrückseite befinden. Dies bedeutet, dass die zulässige Risstiefe von 1/6 des Querschnitts pro Seite auf 1/3 des Querschnitts angehoben werden darf, wenn sichergestellt ist, dass kein Riss von der Bauteilrückseite vorhanden ist.

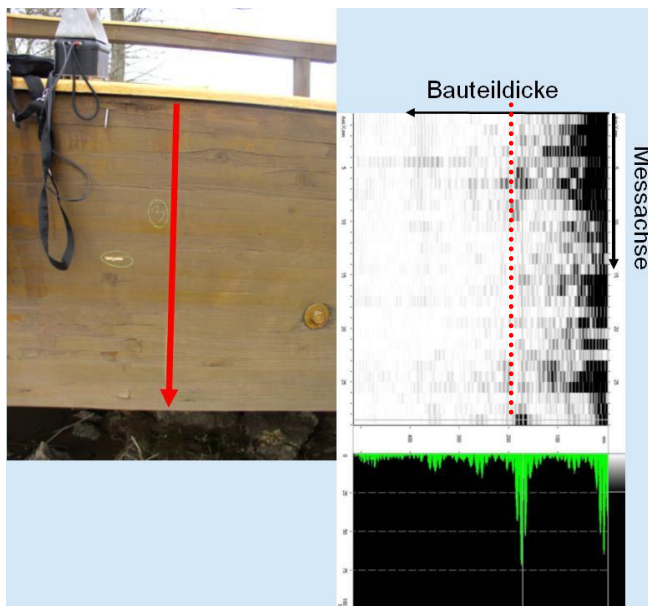
### 5.3. Ergebnisse an Bauteil aus BSH mit Innenfäule

Im Rahmen einer Bauwerksuntersuchung sollte geklärt werden, warum eine kleine Fußgängerbrücke Risse im Hauptbinder aufweist und welche Folgen dies für das Bauwerk hat. Bei diesem Ortstermin wurden auch zerstörungsfreie Prüfungen mit Ultraschall-Echo durchgeführt.

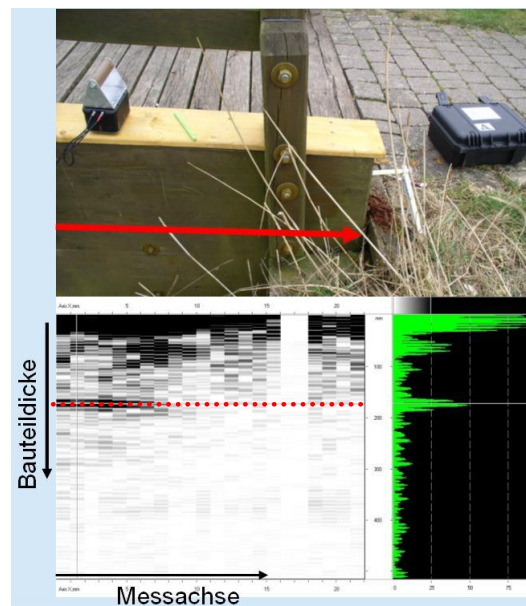
Die Sichtprüfung ergab Fruchtkörper von Pilzen, die dem Zaunblättling zugeordnet werden können und von außen nicht sichtbare Innenfäule verursachen. Das Ausmaß der inneren Schädigung wurde erst durch die Ultraschallecho-Messungen deutlich.

In Abbildung 12 (links) ist eine Messung entlang der Trägerhöhe von oben nach unten zu sehen, deren Ergebnisse in Abbildung 12 (rechts) dargestellt sind. Im Gegensatz zu den bisher vorgestellten Ergebnissen fällt auf, dass bis auf dem Bereich der sichtbaren Unterkante effektiv keine Echos von der Bauteilrückwand zu sehen sind.

Da an anderen Bereichen der Brücke deutliche Echos der Bauteilrückseite empfangen werden konnten muss davon ausgegangen werden, dass bei sonst Gleichbleibenden äußeren Bedingungen ein innerer Schaden vorliegen muss. Eine gezielte zerstörende Prüfung ergab ausgeprägte innere Schädigungen.



**Abbildung 12:** Ultraschallecho-Messung entlang der Trägerhöhe ergab, dass Echos von der Bauteilrückseite (Lage der erwarteten Echos gestrichelte Linie) fast nicht vorhanden sind und eine innere Schädigung vorliegt.



**Abbildung 13:** Ultraschallecho-Messung im Auflagerbereich, zu Beginn deutliche Echos die in Richtung des Auflagers abnehmen (Lage der erwarteten Echos gestrichelte Linie)

Die Auflagerbereiche müssen bei einer Brückenprüfung immer besonders beachtet werden. Eine Messung im Auflagerbereich ergab, die in Abbildung 13 dargestellten Ergebnisse. Dabei zeigten sich zu Beginn der Messung deutliche Reflexionen an der Bauteilrückseite, die entlang der Messlinie in Richtung des Auflagers abnehmen. Da ein fehlendes des Rückwandecho bei sonst Gleichbleibenden Bedingungen auf einen Schaden schließen lässt muss von einer Schädigung von ca. 0,5 m ab dem Auflager ausgegangen werden. Eine Untersuchung der Stirnseite ergab, dass Innenfäule vorhanden ist. Mit den Ultraschallmessungen ist es möglich, die innere Ausbreitung der Schäden zu dokumentieren, was für eine etwaige Sanierung sehr wichtig ist.

## 6. Zusammenfassung und Ausblick

Nach mehreren Jahren Forschung und Entwicklung an der BAM ist es nun möglich, Niederfrequenz-Ultraschall in Echotechnik an Vollholz und BSH erfolgreich anzuwenden. Damit ist es möglich, Störstellen und Minderdicken auch dann zu lokalisieren, wenn nur eine Bauteilseite zugänglich ist.

So können große Bereiche schnell zerstörungsfrei untersucht werden und eine mögliche Schädigung eingegrenzt und markiert werden.

Mit detaillierten Untersuchungen mittels Bohrwiderstandsmethode oder Bohrkernentnahme können dann die Tiefenlage und den Art des Defekts genauer bestimmt werden. Sehr detaillierte Aussagen können zusätzlich mit Radiografie erzielt werden [7].

Die beschriebenen Ergebnisse zeigen, dass sowohl Vollholz als auch BSH mit Abmessungen über 30 cm mit Ultraschall-Echo untersucht werden können.

Trotz der Vielfalt der Holzbauteile wie z. B. Holzart, individuell unterschiedliches Wachstum, Anteil Kernholz und Splint, Art des Sägens aus dem Stamm kann das Verfahren sehr gut zur vergleichenden Messung an einem Bauteil angewendet werden. Praktisch wird das Verfahren inzwischen als Ingenieurleistung vom TÜVRheinland / LGA angewendet, und gemeinsam mit der BAM (Fachgruppe VIII.2) weiterentwickelt.

Somit steht dem Prüfer bei Bedarf ein neues zerstörungsfreies Prüfverfahren zur Untersuchung von Holz zur Verfügung.

Bauteile, die bisher als „nicht prüfbar“ und deshalb auf der „sicheren“ Seite liegend, hinsichtlich evtl. vorhandener Risse auf der nicht einsehbaren Seite, beurteilt wurden können nun mit ausreichender Sicherheit untersucht werden.

Zu beachten ist, dass die Anwendung der zerstörungsfreien Prüfung ein enormes fachliches Wissen erfordert und nicht jeder Anbieter auch belastbare Ergebnisse erzielt. Für Rückfragen: [9].

## 7. Literatur

- [1] B. Radovic und T. Wiegand: Oberflächenqualität von Brettschichtholz, Bauen mit Holz (2005), H. 7
- [2] Studiengemeinschaft Holzleimbau: Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz Juli 2006
- [3] Görlacher, R., Hättrich, R.: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz (1990), H. 6, S. 455-459]
- [4] Wenzel, F., Kleinmanns, J.: Sonderforschungsbereich 315, Historische Holztragwerke, Untersuchungen, Berechnungen und Instandsetzen. Universität Karlsruhe (1999)
- [5] Hasenstab, A., Rieck, C., Hillemeier, B., Krause, M.: Hohlstellenortung in Holzbalken mit dem Ultraschallverfahren. DGZfP-Jahrestagung 06.-08. Mai 2002 in Weimar, DGZfP-Berichtsband auf CD: Plakat 32, Berlin (2002)
- [6] Hasenstab, A., Krause, M.: Ultraschallechoverfahren an Holz. Cziesielski, E. (Hrsg.); Bauphysik-Kalender 2004, Berlin: Ernst und Sohn (2004) Kap. C1, 2 Strukturaufklärung, Abschn. 2.5, S. 352-358
- [7] Hasenstab, A., Osterloh, K., Robbel, J., Krause, M., Ewert, U., Hillemeier, B.: Mobile Röntgenblitzröhre zum Auffinden von Holzschäden, DGZfP-Jahrestagung 17.-19. Mai 2004 in Salzburg, DGZfP-Berichtsband auf CD: Plakat 15, Berlin (2004)
- [8] Krause, M., Mielentz, M., Milmann, B., Wiggenhauser, H., Müller, W., Schmitz, V.: Ultrasonic image of concrete members using an array system. NDT & E International 34 (6) (2001) pp. 403-408
- [9] Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM): ZfPBau-Kompodium. <http://www.bam.de/zfpbau-kompodium.htm> (2004)
- [10] Kollmann, F., Technologie des Holzes und der Holzwerkstoffe, 2. Auflage, Berlin: Springer Verlag (1951)
- [11] Hasenstab A.: Integritätsprüfung von Holz mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation TU Berlin (2005)