



# Verfahren und Aussagemöglichkeiten bei der Begutachtung von Holzkonstruktionen

Simon AICHER, MPA Universität Stuttgart

**Kurzfassung:** Die Akzeptanz und das Vertrauen in Ingenieurtragwerke unterschiedlicher Materialien hängt neben einer weitestgehend schadensfreien Erfüllung der Tragwerksfunktionen wesentlich davon ab, welche Aussagemöglichkeiten Begutachtungsverfahren bei Inspektionen der Konstruktionen aus gegebenem Schadensanlass oder bei routinemäßigen Kontrollen ermöglichen. In dem Beitrag werden aus der Menge aller bekannten Begutachtungsverfahren insgesamt sechs der wichtigsten Methoden für die Begutachtung von Holzkonstruktionen erläutert und die Aussagemöglichkeiten basierend auf quantitativen Bewertungskriterien, sofern vorhanden, dargestellt. Neben der rein visuellen Inspektion, den Feuchtemessungen sowie den Rissgrößen- und Risslagebestimmungen wird das zerstörende Verfahren der Bohrkernentnahme mit Scherfestigkeits- und Faserbelagsprüfungen sowie die quasi zerstörungsfreie Bohrwiderstandsmeßmethode dargestellt. Aus dem Bereich der zerstörungsfreien Methoden werden die Ultraschall-basierten Verfahren angeschnitten und der neueste Stand der Technik betreffend Detektion klaffender Risse und Fehlverklebungen bei Holzkonstruktionen aufgezeigt.

## 1 Einleitung

Der Anlass für die Begutachtung einer Holzkonstruktion kann wie bei Tragwerken aus anderen Materialien unterschiedliche Gründe haben. Zum einen kann die Begutachtung ohne Vermutung oder effektives Vorliegen eines akuten Schadens routinemäßiger Natur sein (Brückenbauten, Hochbauinspektionen gemäß Empfehlungen der Gebäuderichtlinie). Zum anderen, und bislang überwiegend, erfolgen Begutachtungen in Verbindung mit bekannt gewordenen Schäden. Die für die (Schadens-)Begutachtungen eingesetzten Verfahren und die damit verbundenen Aussagemöglichkeiten hängen sodann wesentlich von der Art des speziellen Holzbaustoffs (u. a. Vollholz, Brettschichtholz, plattenförmige Holzwerkstoffe, Brettsperrholz und Holzverbundbauteile), vom Bauwerk und von den jeweiligen Schadensarten ab, die bezüglich Ursache und Auswirkung sehr unterschiedlich sein können. Im folgenden werden nach einem Abriss über Schadensarten und –merkmale insgesamt sechs der wichtigsten Begutachtungsverfahren und deren Aussagemöglichkeiten basierend, sofern vorhanden, auf quantitativen Bewertungskriterien behandelt.

## 2 Schadensarten und –merkmale

Die Schäden bei Holzbauteilen/Holzkonstruktionen lassen sich grob in einige deutlich unterschiedliche, nachfolgend benannte Schadensarten untergliedern.

## 2.1 Rissbildungen

Die Rissbildungen können im Holz und / oder in Klebfugen auftreten. Zu unterscheiden ist zwischen Rissbildungen, die vergleichsweise großflächig in den Bauteilseitenflächen sichtbar sind und solchen Rissbildungen, die entweder lokal im Bereich von Anschlüssen oder zwischen starr gekoppelten Anschlüssen mit (mechanischen) Verbindungsmitteln auftreten. Rissbildungen stehen in engem Zusammenhang mit vom Werkstoff nicht aufnehmbaren Zwangsspannungen, die meist klimatische und konstruktive Ursachen haben.

## 2.2 Schäden infolge hoher Holzfeuchten

Infolge der ausgeprägten Abnahme aller Steifigkeits- und Festigkeitseigenschaften mit zunehmender Holzfeuchte und bedingt durch die Gefahr eines Befalls holzerstörender Pilze oder durch gesundheitsschädigende Schimmelpilze bei sehr hohen Holzfeuchten kommt der mittleren und lokalen Holzfeuchte bei dem Werkstoff eine zentrale (Schadens-)Bedeutung zu. Durch zu hohe Holzfeuchten können auch Klebfugen spezieller Klebstofffamilien nachhaltig degradiert werden.

# 3 Begutachtungsverfahren

## 3.1 Visuelle Inspektion

Die visuelle Begutachtung stellt vor allen nachfolgend genannten quantitativen Verfahren die primäre Grundlage jeder Bauwerksinspektion dar. Wesentlich ist, dass visuelle Begutachtungen im Hinblick auf belastbare Erkenntnisse grundsätzlich handnah durchzuführen sind. Ein wichtiger Punkt bei der visuellen Begutachtung betrifft im Falle von Rissen, insbesondere in Klebfugen, Feststellungen (sofern durch die Größe der Rissöffnungsweite möglich) zur Art der Bruchfläche betreffend Holzfaserbelag und rissuferüberbrückender Faserbündel. Die visuelle Inspektion liefert die Grundlage für die Wahl der Bauteilstellen und Verfahren, die im Detail mittels quantitativer Verfahren zu untersuchen sind. Die Ausagemöglichkeiten einer ausschließlichen visuellen Inspektion betreffend Standsicherheit bzw. Ertüchtigungsmaßnahmen und -umfang sind mit Ausnahme von Sonderfällen, z. B. offensichtlicher Bruch eines Traggliedes, extreme Pilzfruchtkörperausbildung etc., jedoch eingeschränkt.

## 3.2 Feuchtemessungen

### 3.2.1 Allgemeines

Die Feuchtemessungen werden am geeignetsten mittels Einschlagfeuchtemessgeräten basierend auf dem holzfeuchteabhängigen elektrischen Widerstandsprinzip gemessen. Von erheblicher Bedeutung ist die Bestimmung der Holzfeuchte in unterschiedlichen Querschnittstiefen (Entfernungen von der Oberfläche) zur Bestimmung der Feuchte- und damit Eigenspannungsgradienten. Zweckmäßige Messtiefen sind 1, 2 und 4 cm. Da die Holztemperatur und die Holzart einen entscheidenden Einfluss auf das Feuchtemessergebnis haben, ist in jedem Falle ein Messgerät mit Temperaturkompensation und Holzartwahl zu verwenden.

### 3.2.2 Bewertungskriterien und Aussagemöglichkeiten

Die absoluten Werte der Holzfeuchte und das Ausmaß der Holzfeuchtegradienten in den oberflächennahen Bauteilbereichen liefern wesentliche Erkenntnisse für die Ursachenfeststellung vorhandener Schäden respektive für die Bewertung der Wahrscheinlichkeit zukünftiger Schäden. In sehr grober Näherung gilt, dass bei Holzfeuchten im Bereich von rd. 6 % – 9 % sehr häufig mit schwindungsbedingten Trocknungsrisse zu rechnen ist. Ein Holzfeuchtebereich von rd. 11 % – 16 % in Verbindung mit geringen Feuchtedifferenzen in den äußeren Bereichen der Querschnittsbreite bezeichnet ein geringes feuchtebedingtes Rissbildungspotential. Holzfeuchten im Bereich von rd. 18 % bis rd. 24 % kennzeichnen entweder die Einwirkung sehr hoher Luftfeuchten oder häufige Kondensatbildung an der Oberfläche. Im genannten Feuchtebereich sind feuchteempfindliche Klebstoffe, wie z. B. Harnstoff-Formaldehydharze, zunehmend problematisch. Im Holzfeuchtebereich oberhalb von rd. 24 % ist latent von einer Pilzbefallsgefahr auszugehen, die ab rd. 28 % Holzfeuchte akut gegeben ist.

### 3.3 Rissgrößen- und Risslagemessungen

#### 3.3.1 Allgemeines

Die absolute Größe von Rissen wird durch die beiden für Holzbauteile wichtigsten Kenngrößen, die

- Risslänge  $l_R$  und die
- Risstiefe  $t_R$  (gemessen an mehreren Stellen der Risslänge)

charakterisiert. Daneben kann speziell bei Rissen ausgehend von Bohrungen für stiftförmige und dübelartige Verbindungsmittel die Rissweite  $w_R$  an der Oberfläche bedeutsam sein.

Neben den absoluten Rissgrößen ist sodann die Lage des Risses im Bauteil von entscheidender Bedeutung. Dies betrifft einerseits die globale Lage des Risses im Bauteil, z. B. gemessen von Trägerunterkante oder vom Auflagerrand etc., und andererseits die lokale Lage (siehe nachfolgend) und Form des Risses. Von entscheidender Bedeutung ist insbesondere, ob die Risse überwiegend, ausschließlich oder mit bestimmten Häufigkeiten im Holz und / oder in Klebfugen auftreten.

Die Messung von Risstiefen erfolgt am geeignetsten mittels einer metallischen Fühlermesslehre mit einer Dicke von rd. 0,15 mm. In Verbindung mit der quantitativen Bestimmung der Rissgrößen hat auch, soweit möglich, die unter Abschnitt 3.1 aufgeführte Bewertung der Fugenoberflächen zu erfolgen.

#### 3.3.2 Bewertungskriterien und Aussagemöglichkeiten

Die Bewertung der gemessenen Rissgrößen und –häufigkeiten ist für jeden Einzelfall durchzuführen. Im speziellen sind hierbei auch der Tragwerkstyp / das statische System, die Bedeutung des Bauteils für die Standsicherheit des gesamten Tragwerks (Unterschiede bzgl. Haupt- und Nebenträger), die Nutzung und die klimatischen Randbedingungen einzu beziehen. Innerhalb der bauwerksspezifischen Randbedingungen ist insbesondere zwischen Rissen in primär schub- oder querzugbeanspruchten Bereichen zu differenzieren.



vorliegender (Kleb-)Fugen obliegt die Oberflächencharakterisierung und –bewertung heute ausschließlich der begutachtenden Stelle. Bei Oberflächen von Interfaces, die im Rahmen der genannten Scherfestigkeitsprüfungen erhalten werden, liefert DIN EN 386:2002 Bewertungskriterien, die als Stand der Technik anzusehen sind.

Nach DIN EN 386 erfolgt die Bewertung von Scherfestigkeitsprüfungen durchweg im Hinblick auf eine Verknüpfung der beiden Kenngrößen Scherfestigkeit  $f_v$  und Faserbelag FB [in %]. Bei Nadelholz gelten für Einzelwerte die folgenden Regelungen:

Scherfestigkeiten  $f_v < 4 \text{ N/mm}^2$  sind unabhängig vom Faserbelag als völlig unzureichend zu bewerten. Für Scherfestigkeiten  $\geq 4 \text{ N/mm}^2$  gelten die folgenden Mindestanforderungen:

$$\begin{array}{ll} 4 \leq f_v [\text{N/mm}^2] < 6 & \text{mit } \text{FB} = 100 [\%] \\ 6 \leq f_v [\text{N/mm}^2] < 10 & \text{mit } \text{FB} = 153,3 - 13,3 \cdot f_v [\%] \end{array}$$

### 3.5 Bohrwiderstandsmessungen

#### 3.5.1 Allgemeines

Der Rückschluss von Bohrwiderstandsmessungen, die als quasi zerstörungsfreie Prüfmethode zu bezeichnen sind, auf die mechanischen Eigenschaften des Werkstoffes Holz respektive dessen Degradation beruht auf dem grundlegenden Sachverhalt, dass die Oberflächenhärte und der Eindringwiderstand eng mit der lokalen Rohdichte korreliert sind; letztere weist eine hohe Korrelation mit allen Festigkeits- und Steifigkeitseigenschaften des Holzes auf. Durch holzerstörenden Pilz- und Insektenbefall wird die Rohdichte stark/extrem herabgesetzt.

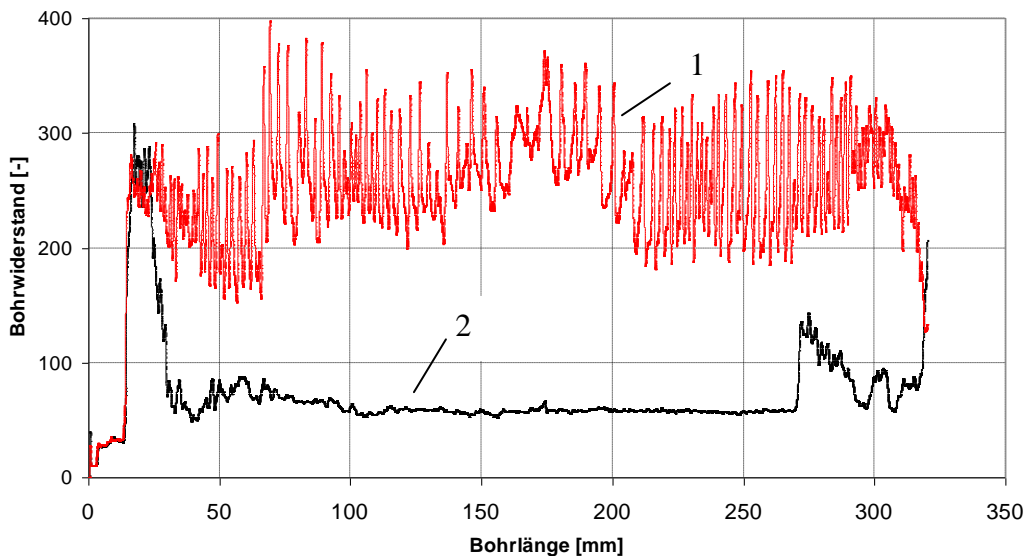
Das Bohrverfahren der heute verfügbaren Geräte (z. B. Resistograph) misst den Eindringwiderstand einer dünnen bis zu 1,5 m langen Bohrnadel (Bohrkopfbreite 3 mm, Nadelschaftdurchmesser 1,5 mm), die mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in das zu untersuchende Holz eingebohrt wird. Hierbei wird die Leistungsaufnahme (Stromaufnahme) des Nadeldrehmotors als Maß für den Bohrwiderstand aufgezeichnet. Der Messwert setzt sich aus unterschiedlichen Anteilen, wie der Zerspanungs- und Verdrängungsarbeit der Nadelspitze und der Reibung des Schaftes zusammen und entspricht in bestimmtem Rahmen der lokalen Rohdichte ([1], [2], [3]).

#### 3.5.2 Bewertungskriterien und Aussagemöglichkeiten

Ungeachtet der Tatsache, dass das Messergebnis durch viele gerätetechnische Parameter (z. B. Abnutzung der Bohrspitze) und falsche Messungsdurchführung (z. B. schräge Bohrungen) erheblich beeinflusst bzw. verfälscht werden kann, lassen sich speziell bei Nadelhölzern zweifelsfreie Unterschiede zwischen ungeschädigten und stark pilz- oder insektenfraßbefallenen Hölzern abbilden. Bei intaktem, unbefallenem Nadelholz zeichnen sich die Jahrringübergänge durch extreme Bohrwiderstandsunterschiede aus, da sich die Rohdichten des zuletzt gebildeten Spätholzes und der ersten Frühholzschichten bis zu einem Faktor 4 – 10 unterscheiden. Bei pilzbefallbedingt degradiertem Holz liegt zum einen das gesamte mittlere Bohrwiderstandsniveau deutlich niedriger und zum anderen sind die diskontinuierlichen Früh-Spätholzunterschiede weitestgehend reduziert.

Bild 1 zeigt exemplarisch Untersuchungsergebnisse gutachtlicher Untersuchungen der MPA Universität Stuttgart an einem 30 cm dicken, am unteren Ende in einem Betonfundament eingespannten runden Vollholzmasten eines großflächigen Holzmastebauwerks, bei dem teilweise über der Oberkante des Fundaments 40 cm kiesartiger Boden

aufgeschüttet war. Bei der skizzierten, völlig unsachgemäß ausgeführten Konstruktion war zu prüfen, in welchem Umfang eine äußerlich nicht sichtbare pilzbefallbedingte Materialdegradation fortgeschritten ist.



**Bild 1:** Bohrwiderstandskennlinien im ungeschädigten und geschädigten äußerlich nicht sichtbar pilzbefallenen Bereichen einer 30 cm dicken Rundholzstütze

- a) Kurve 1: ungeschädigter Bereich rd. 70 cm über Bodenniveau
- b) Kurve 2: stark befallener Bereich rd. 30 cm unter Bodenniveau

Die beiden gezeigten Bohrwiderstandsverläufe repräsentieren Bohrungen durch den Mittelpunkt des Stammquerschnitts, zum einen 30 cm unterhalb der Kiesbodenoberkante (Bodenniveau) und zum anderen 70 cm oberhalb Bodenniveau. Die Bohrwiderstandskennlinie 1 bei + 70 cm zeigt den oben beschriebenen typischen Verlauf in intaktem Holz. Im Gegensatz dazu liegt der Bohrwiderstand (Linie 2) bei -30 cm im überwiegenden Querschnittsbereich im Mittel um den Faktor 5 niedriger und die Frühholz-Spätholz-Widerstandsunstetigkeiten sind weitestgehend ausnivelliert. Weitergehende zerstörende Untersuchungen belegten den durch die Bohrwiderstandsmessungen identifizierten, weit fortgeschrittenen Pilzbefall im überwiegenden Querschnittsbereich.

### 3.6 Zerstörungsfreie Ultraschall-basierte Prüfverfahren

#### 3.6.1 Allgemeines

Ultraschall(US)-basierte ZiP-Verfahren zur Beurteilung von Holzbauteilen repräsentieren wie bei anderen Materialien vielversprechende Methoden [4], [5]. Die im Stahl- und (Stahl-)Betonbau angewandten Messverfahren und Geräte sind jedoch nicht unmittelbar auf den Werkstoff Holz oder auf Holzbauteile, sodann mit meist sehr vielen Klebfugen, übertragbar. Die Gründe hierfür liegen im wesentlichen in der zylindrischen Anisotropie, der Inhomogenität, den ausgeprägten Dämpfungseigenschaften und der Hygroskopizität des Werkstoffs. Eine wesentliche Rolle spielen auch, vergleichbar mit anderen Materialien, die Lage und Größe der zu detektierenden Schäden/Risse. Bedeutsam ist, ob klaffende Fugen vorliegen oder ob es sich um partiell/völlig gerissene Grenzflächen handelt, die trotz starker Schädigung die Druckkomponente bei Longitudinalwellen übertragen können.



Die Anwendung von US-basierten Verfahren auf die in-situ Analyse von Holzbauteilen ist zum heutigen Zeitpunkt noch nicht Stand der Technik, sie wurden in Einzelfällen jedoch erfolgreich zur Detektion von Fäulnis-bedingten Schäden angewandt (z. B. [6]). Neuere umfangreiche vor kurzem abgeschlossene und laufende Forschungsvorhaben an der MPA Universität Stuttgart und bei der BAM haben die erfolgreiche und reproduzierbare Detektierbarkeit von bestimmten Schadensklassen eindeutig aufgezeigt [8], [9], [10], [11].

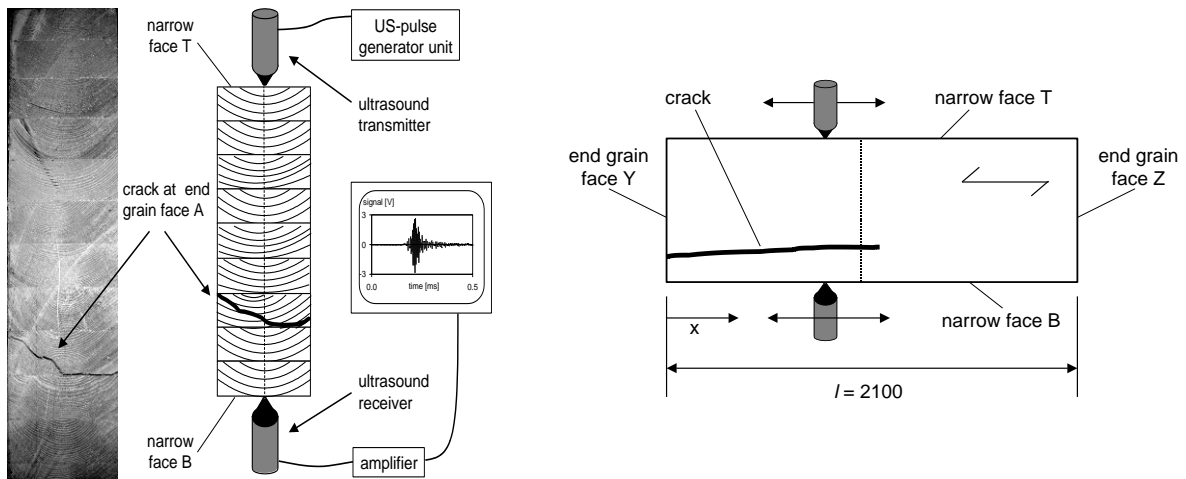
### 3.6.2 Aussagemöglichkeiten bei klaffenden Rissen

Die Detektion von diskreten klaffenden Rissen, die nicht über die gesamte Querschnittsbreite reichen müssen, wurde in jüngeren Untersuchungen bis zu Bauteilhöhen von rd. 1 m erfolgreich durchgeführt [8], [9]. Die Feststellung derartiger Risse, vgl. Bild 2, kann mittels US-Transmissionsmessungen rechtwinklig zur Bauteillängsachse und – faserrichtung unter Verwendung von Longitudinal- bzw. Kompressionswellen erfolgen. Voraussetzung bei den als Linien-Scans (B-Scans) durchgeführten/durchzuführenden Messungen ist eine an allen Messpunkten gleiche Kopplung von US-Geber- und Empfänger-sensoren, z. B. mittels einer definierten Federkraft, die bei ausreichend ebenen Oberflächen ohne Kopplungsmittel vorgenommen werden kann.

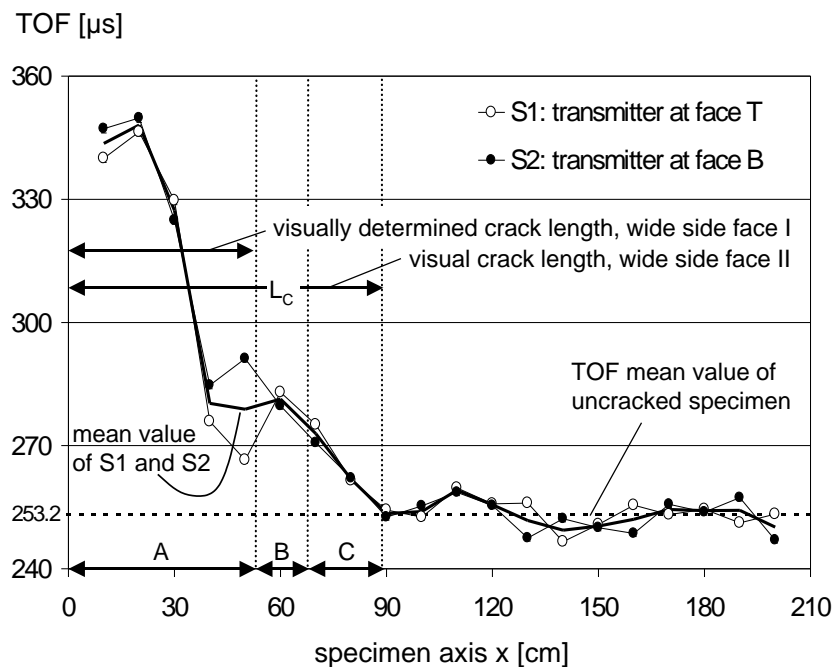
Gerätetechnisch ist ein Ultraschallgenerator mit hoher Pulsenergie bei begrenzter Pulslänge von rd. 1 ms erforderlich; eine der anwählbaren Hauptfrequenzen des Pulsers sollte bei rd. 110 kHz liegen (Anmerkung: Marktübliche Pulser im Bereich des niederfrequenten Ultraschalls liefern Puls-Hauptfrequenzen im Bereich von 20 kHz bis 350 kHz). Die piezo-elektrischen Ultraschallprüfköpfe sollten einfach- oder mehrfach-resonant sein; ein Prüfkopfpaar mit einer Zentralfrequenz von 110 kHz liefert gut reproduzierbare Ergebnisse. Eine Verstärkung der gemessenen Pulse mit einem Faktor von rd. 100 dB ist im allgemeinen erforderlich. Zur Unterdrückung des Verstärkerrauschens repräsentieren Mehrfachmessungen (z. B. 25 – 50 Mehrfachmessungen in Abhängigkeit von der Durchschallungslänge) eine sehr leistungsfähige Methode. Aus der Summe der potenziell geeigneten US-Signalparameter wie

- Signallaufzeit (TOF = time of flight)
- Signalstärke Differenz zwischen den Spannungswerten des absoluten Maximums und Minimums des gesamten angezeichneten Schallsignals
- Erstampplitude maximale oder minimale Amplitude des zuerst angezeichneten Signalausgangs

stellte sich die Signallaufzeit als der Signalparameter heraus, der bis zu Bauteilhöhen von rd. 1 m die größte Trennschärfe zwischen den nicht gerissenen und gerissenen Trägerbereichen ergab (vgl. Bild 3).



**Bild 2:** Prüfkörper- und US-Meßkonfiguration zur Detektion von Rissen in einem großformatigen BSH-Bauteil



**Bild 3:** Ergebnis der Ultraschall-Transmissionsmessungen mit Kompressionswellen an einem BSH-Prüfkörper mit Längsriss gemäß Bild 2; siehe [8]

### 3.6.3 Aussagemöglichkeiten bei Fehlverklebungen in BSH-Fugen

Jüngere Untersuchungen [9] belegten, dass mittels geeigneter Prüf- und Gerätetechnik (Transmissionsmessungen, Scherwellen, Schrägeinstrahlung, Hochvoltpulsern) eine Detektion von fehlverklebten Fugen in Brettschichtholz und vergleichbaren Holzbauprodukten prinzipiell möglich ist. Die bisherigen erfolgversprechenden labormäßigen Erkenntnisse werden im Rahmen eines anlaufenden, an der MPA Universität Stuttgart durchgeführten AIF-Forschungsvorhabens vertieft und für praxisrelevante Anwendungen aufbereitet.



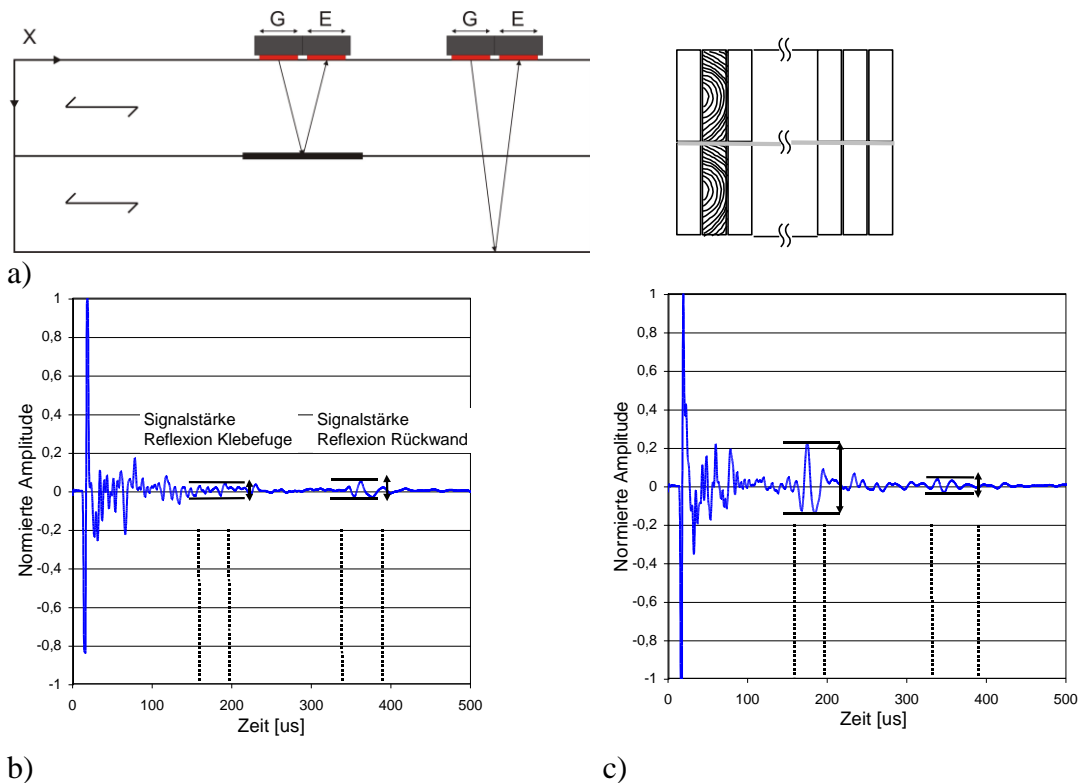
### 3.6.4 Aussagemöglichkeiten bei Fehlverklebungen in verklebten Verbundbauteilen aus Brettschichtholz

Verklebte Verbundbauteile aus Brettschichtholz (BSH) bestehen aus mehreren miteinander längs der Breit- oder Schmalseiten verklebten Brettschichtholzträgern. Fugen zwischen den einzelnen miteinander verklebten BSH-Trägern werden als sog. Blockfugen bezeichnet. BSH-Verbundbauteile weisen bei Längen bis zu 60 m und Querschnittsabmessungen bis zu rd. 0,8 m x 3 m Tragfähigkeiten auf, die bislang Stahl- und Stahlbeton-Bauweisen vorbehalten waren. Den Blockfugen kommt eine zentrale Rolle bei der Tragwirkung und Standicherheit der Bauteile zu. Die Detektion von Fehlverklebungen in Blockfugen mittels US-Verfahren kann heute als geklärt betrachtet werden [9]. Voraussetzungen für eine erfolgreiche Fehlerdetektion in Blockfugen sind im wesentlichen die folgenden Elemente:

- Einsatz von Transversal- bzw. Scherwellen mit Polarisation der Schwingrichtung rechtwinklig zur Faserrichtung
- US-Reflexionsmessungen
- Normierung der Reflexionsmessungen auf Ergebnisse von Transmissionsmessungen
- Verwendung von Hochvoltpulsern niedriger bis mittlerer Frequenzbereiche (50 – 300 kHz) zur Erzeugung hoher Ultraschallintensitäten
- Entrauschung der gemessenen Signale durch Mehrfachmessungen oder digitale Filter, z. B. basierend auf Fuzzy logic Algorithmen [11].

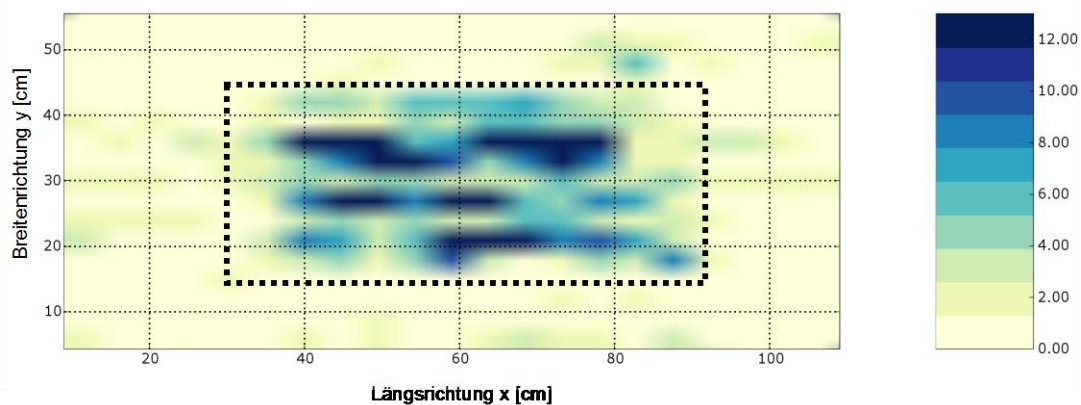
Die Bilder 4 b, c zeigen ein auf den oben beschriebenen Untersuchungsbestandteilen basierendes Prüfergebnis einer Fehlverklebungsstelle in einem 2teiligen BSH-Verbundbauteil mit einer im inneren Bereich der Fugenebene eingeschlossenen „praxisnah“ ausgeführten Fehlverklebung (Bild 4 a). Der Vergleich der Bilder 4b und 4c zeigt anschaulich, wie sich die Reflexionssignale der Blockfuge im intakten und defektbehafteten Bereich unterscheiden.

Bild 5 zeigt eine 2dimensionale Falschfarbendarstellung der normierten Reflexionsergebnisse des US-Flächen-Scans. Die Detektion der gestrichelt eingezeichneten Fehlverklebungsfläche ist evident. In dem Forschungsvorhaben [9] wurden alle Spezifikationen für ein prinzipiell industriell umsetzbares Prüfverfahren für den Praxiseinsatz entwickelt.



**Bild 4:** Prüfkonfigurationen und Messergebnisse von US-Reflexionsmessungen an einem BSH-Verbundbauteil aus 2 Brettschichtholzträgern

- a) Bauteil und Prüfkonfiguration  
(Bauteildicke: 2 x 100 mm, Fehlstellungsgröße 300 mm x 400 mm)
- b) US-Reflexionsmessergebnis im Bereich der intakten Blockfuge
- c) US-Reflexionsmessergebnis im Bereich der Fehlverklebung



**Bild 5:** Falschfarbendarstellung der normierten Reflexionsergebnisse des Prüfkörpers in Bild 4 a

## Referenzen

- [1] Rinn, F. (1989): Eine neue Bohrmethode zur Holzuntersuchung. Holzzentralblatt Nr. 34, S. 529 – 530
- [2] Görlacher, R., Hättich, R. (1990): Untersuchungen von altem Konstruktionsvollholz: Die Bohrwiderstandsmessung. Bauen mit Holz. H. 6, S. 455 - 459
- [3] Rinn, F. (1992): Chancen und Grenzen bei der Untersuchung von Konstruktionshölzern mit der Bohrwiderstandsmethode. Bauen mit Holz, H. 9, S. 745 - 758
- [4] Wilcox, W. W. (1988): Detection of early stages of wood decay with ultrasonic pulse velocity. Forest Prod. J. , 38 (5), S. 68 - 73
- [5] Klingsch, W. (1989): Zerstörungsfreie Lokalisierung äußerlich nicht sichtbarer Holzschädigungen. Bauen mit Holz 6, S. 421 - 423
- [6] Emerson, R. N., Pollock, D. G., Mchean, D. I., Fridley, K. J. (1999): Nondestructive testing of large bridge timbers. Proc. 11th Int. Symp. on Nondestructive Testing of Wood, S. 175 - 184
- [7] Beall, F. C. (2002): Overview of the use of ultrasonic technologies in research on wood properties. Wood Science and Technology, 36, S. 197 - 212
- [8] Aicher, S., Dill-Langer, G., Ringger, T. (2002): Non-destructive detection of longitudinal cracks in glulam beams. Otto-Graf-Journal, Vol. 13, S. 165 – 181, Universität Stuttgart
- [9] Dill-Langer, G., Bernauer, W., Aicher, S. (2006): Zerstörungsfreie Detektion von Fehlverklebungen bei geklebten Holzbauteilen. Schlussbericht AIF-Forschungsvorhaben Nr. 13865 N, MPA Universität Stuttgart
- [10] Hasenstab, A., Krause, M., Hillemeier, B., Rieck, C. (2006): Ultraschallecho-Messungen an Holz. Holz als Roh- und Werkstoff 64, S. 475 - 481
- [11] He, Y., Manful, D., Dill-Langer, G., Bárdossy, A., Aicher, S. (2005): Application of Fuzzy Logic to signal processing of ultrasound measurements. Proc. 14th Intern. Conf. on Nondestructive Testing of Wood, S. 277 – 286, Hannover, Shaker Verlag