

Methoden der Zustandserfassung bei Holzbauwerken

Prof. Andreas Müller
Bernern Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
CH-Biel



Dr. Bettina Franke
Bernern Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau
CH-Biel



Methoden der Zustandserfassung bei Holzbauwerken

1. Einführung

Ein großer Teil der heutigen Bauaufgaben wird im Bestand durchgeführt. Die vorgängige Erfassung des Ist-Zustandes verringert die Gefahr von Kostensteigerungen während oder nach der Baumaßnahme. Eine Zustandsanalyse erfasst die konstruktiven Zusammenhänge des Gebäudes, beurteilt die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit, deckt Schäden an den Konstruktionsteilen auf. Dies bereitet Verstärkungs-, Sanierungs- sowie Überwachungsmaßnahmen vor.

Holzkonstruktionen haben den Vorteil, dass Problemfelder relativ einfach durch Verfärbungen oder Rissbilder visuell erkennbar sind. In Kombination mit der Holzfeuchtemessung kann so bereits eine gute Spezifizierung der Problemfelder erfolgen. Für eine vertiefende Analyse und detaillierte Messergebnisse stehen weiterführende Methoden zur Zustandserfassung zur Verfügung. Die Zustandserfassung muss mit großer Sorgfalt unter Anwendung von geeigneten Prüfmethoden und Hilfsmitteln durchgeführt werden. Sie hat stets periodisch und nach festgelegten Intervallen mit unterschiedlichen Fachkompetenzen und Prüftechniken zu erfolgen. Alle getroffenen Aussagen und Befunde müssen belegbar und überdies für den baufachlichen Laien, z. B. in einem Gerichtsprozess, nachvollziehbar dokumentiert und begründet sein. Die wichtigste Grundregel ist alle Bauteile handnah zu überprüfen. Eine stichprobenartige Untersuchung der Tragkonstruktion ist nicht ausreichend. Nur die flächige Überprüfung der gesamten Tragkonstruktion lässt eine fundierte Aussage über den Zustand zu und gibt sowohl den Eigentümern wie auch den Nutzern des Gebäudes die notwendige Sicherheit. Ferndiagnosen werden bei einem später eintretenden Schaden von den Gerichten als grobe Fahrlässigkeit gewertet. Den überprüfenden Ingenieur oder Fachmann trifft in diesem Fall die volle Haftung.

Tabelle 1: Übersicht zu den typischen Methoden der Zustandserfassung von Holzkonstruktionen [6]

Methoden	Verfahren	Zustand
Visuelle/handnahe Untersuchung	Fotoaufnahme, Lupe, Mikroskop Anklopfen und Anschlagen Massaufnahme, Einstechen, Anbohren Rissaufnahme Einfache chemische Prüfungen Holzfeuchtemessung	Querschnittsschädigung, Holzart, Holzqualität, Pilz- und Insektenbefall, Hohlräume, Risse, Oberflächenbehandlung, Klebstoffart, chemische Einwirkungen, Deformationen
Gängige Prüfverfahren	Bohrkernentnahme Bohrwiderstandsmessung Eindringwiderstandsmessung Prüfung der Klebfugenqualität Mechanische Bestimmung der Festigkeiten	Querschnittsschädigung, Holzdichte, Holzsteifigkeit, Klebfugenqualität, mechanische Eigenschaften
Spezielle Prüftechniken	Endoskopie Ultraschall Röntgen	Verdeckte Bauteile, Hohlräume, Anschlüsse, Pilz- und Insektenbefall
Belastungsversuche	In-situ Messungen	Verformung, Steifigkeit der Gesamtstruktur

Für die Erfassung des aktuellen Zustandes von Holzkonstruktionen steht eine breite Palette an zerstörungsfreien, zerstörungsarmen und gegebenenfalls zerstörenden Untersuchungsmethoden zur Verfügung. Die Methoden unterteilen sich in akustische und elektromagnetische sowie thermische und optische wie auch mechanische, zum Teil zerstörende, Techniken. Tabelle 1 gibt eine Übersicht zu den typischen Verfahren in der Zustandserfassung von Holzkonstruktionen. Primär erfolgt die Anwendung von zerstörungsfreien und zerstörungsarmen Prüfverfahren. Die verschiedenen Verfahren haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile und sind demnach für spezielle Anwendungen mehr oder weniger gut geeignet. Es ist daher wichtig, das für die durchzuführende Untersuchung am besten geeignete Verfahren anzuwenden. Oftmals erhöht die Kombination verschiedener Verfahren die Aussagefähigkeit.

Die Auswertung und Interpretation der erhaltenen Messergebnisse erfordert ein ausgeprägtes Fachwissen sowie eine langjährige Routine. Vertiefende Aussagen über die Leistungsfähigkeit eines Bauteils sind oft nur durch zerstörende Sondierungen oder Probenentnahmen mit anschließenden Laborprüfungen möglich. Es ist deshalb ratsam, vorab die Folgen des erforderlichen Eingriffs dem erzielbaren Nutzen gegenüberzustellen.

2. Was schädigt eine Holzstruktur?

In Gebäuden und Bauwerken mit Bauteilen aus Holz oder Holzwerkstoffen sind vorrangig die Holzfeuchten und eventuell auftretende Rissbilder zu überprüfen. Die Änderung der Holzfeuchte durch wechselnde klimatische Einwirkungen führt zum Schwinden und Quellen des Bauteils und hiermit verbunden auch zu eventuellen Rissen. Ferner ändern sich durch wechselnde Holzfeuchten die mechanischen Eigenschaften von Holz. Eine deutlich erhöhte Holzfeuchte über Fasersättigung führt zu einer Schädigung durch holzerstörende Pilze. Die Erfassung aufgetretener Rissbilder hat je nach Ausmaß und Ursache eine entscheidende Auswirkung auf die Beurteilung der Tragfähigkeit der Konstruktion (Abb. 1, Abb. 2, Abb. 3).

Eine auftretende Delaminierung von geklebten Bauteilen muss gegenüber andersartig verursachten Rissen (u.a. Schwindrisse) differenziert werden.

Eine Schädigung durch holzerstörende Insekten tritt heute im mitteleuropäischen Raum eher selten auf. Neuere Untersuchungen [4] zeigen, dass bei der Verwendung von technisch getrockneten Hölzern – dies betrifft alle konstruktiven Vollholzprodukte – durch eine Veränderung der Holzinhaltsstoffe die Gefahr eines Befalls mit holzerstörenden Insekten auszuschließen ist.

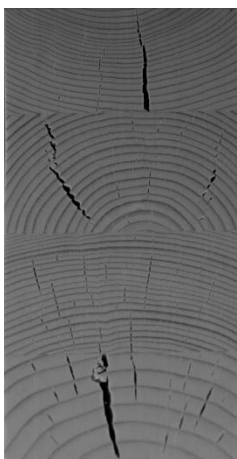


Abbildung 1: Schwindriss in einem Brett-schichtholz, [6]



Abbildung 2: Delaminierung in der Klebfuge, [6]



Abbildung 3: Schubriss, [6]

Dennoch sollten die Bauteile während der visuellen Überprüfung auch auf Ausflugslöcher bzw. auf einen aktiven Befall (Sägemehlreste) hin untersucht werden.

3. Vorbereitende Massnahmen

Für den eigentlichen Überprüfungstermin sollten die Örtlichkeiten gemeinsam mit einer für das Gebäude zuständigen Person vorab eingesehen werden. Alle erhältlichen Bauwerksdaten, wie Pläne, Baubeschreibungen und Nutzungsvereinbarungen, sollten hierfür zur Verfügung stehen.

Weiterführende Informationen über die Art und Weise der Nutzung seit der Errichtung sind oft hilfreich. So können z. B. die über den Jahresverlauf auftretenden Klimabelastungen und Einwirkungen auf das Bauwerk besser abgeschätzt werden. Von großer Bedeutung bei der Zustandserfassung und für das Nachvollziehen von Mängeln in der räumlichen Gebäudestruktur ist die Kenntnis des Tragverhaltens der Gesamtstruktur. Hierdurch sind oftmals auch Probleme bzw. Mängel in der Gesamtstabilität des Gebäudes zu erkennen. Zudem wurden mehrfach nachträglich bei Installationsarbeiten die wichtigen Stabilisierungsverbände kipp- und knickgefährdeter Bauteile durchtrennt oder aus Unkenntnis gar nicht erst eingebaut (Abbildung 5). Dies muss der verantwortungsbewusste Experte erkennen und entsprechende Maßnahmen einfordern. Für die Beurteilung einzelner Tragglieder muss die vollständige Zugänglichkeit gewährleistet sein. Die gesetzlichen Unfall- und Arbeitsvorschriften sind während der Zustandserfassung einzuhalten. Durch die oftmals stete Arbeit in großer Höhe wie bei Hallentragwerken sind Hebebühnen oder Fahrgerüste gegenüber Anlegeleitern vorzuziehen. Für eine vollständige Inspektion von Brücken ist in der Regel ein Brückenuntersichtgerät notwendig.



Abbildung 4: Zersetzung aufgrund zu hoher Holzfeuchte, [5]

Im Verlauf der Zustandserfassung sind für die spätere Beurteilung und Zuordnung der gewonnenen Messdaten, die zu prüfenden Bauteile systematisch zu nummerieren bzw. zu benennen.

Die Bezeichnung erfolgt entweder gemäß den Positionen oder den Achsen in den vorhandenen Planungsunterlagen oder durch vorab neu erstellte Pläne bei fehlender/lückenhafter Dokumentation.



Abbildung 5: Ausknicken von druckbeanspruchten Obergurten an Brettbindern, [5]

In der Praxis haben sich selbstklebende Nummern, mit denen die Untersuchungspunkte und Bauteile gekennzeichnet werden, bewährt (Abbildung 6). Dies erleichtert die Protokollierung der Messergebnisse und der Fotos sowie die Dokumentation der Beobachtung erheblich. Ferner wird dadurch eine gute Orientierung bei größeren und komplexen Tragwerken erreicht.

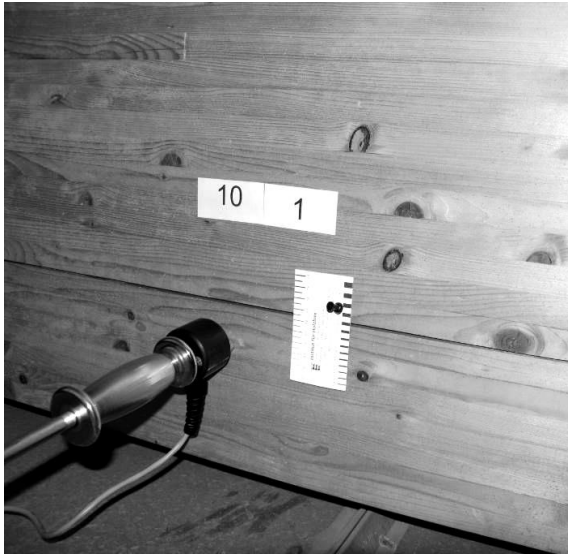


Abbildung 6: Nummerierung einer Prüfstelle, hier Hauptachse Nr.10, Nebenachse Nr.1, [5]

Weiterhin empfiehlt es sich, von den wichtigsten Bauteilen maßstäbliche Ansichten zu nutzen und Protokolle für die Holzfeuchtemessung, die Rissaufnahme und die Fotodokumentation vorzubereiten.

In Holzkonstruktionen lassen sich während regelmäßig durchgeführten Kontrollen die Problemfelder meist frühzeitig durch Verfärbungen und Risse erkennen. Ernsthafte Schäden können so einfach vermieden werden. Aus diesem Grund steht zu Beginn der Zustandserfassung immer eine sorgfältige visuelle, handnahe Überprüfung und Kontrolle aller Bauteile im Mittelpunkt. In Kombination mit der Holzfeuchtemessung können die erkannten Problemfelder spezifiziert und gegebenenfalls mit ergänzenden Prüfmethoden detailliert untersucht werden. Hierbei gilt es, dass der Aufwand für den Einsatz der spezifischer Messmittel und Prüfgeräte in einem vernünftigen Verhältnis zum Nutzen stehen sollte.

Ein iteratives bzw. stufenweises Vorgehen ist in der Art der Methode und hinsichtlich der Anzahl der Messstellen sinnvoll. Für eine statistisch abgesicherte Aussage sind mindestens 15 bis 20 Messergebnisse oder entnommene Proben erforderlich. Erfahrungsgemäß ist dies mit einem vertretbaren Aufwand und aufgrund der örtlichen Einschränkungen nicht möglich. Aus diesem Grund ist hinsichtlich der Anzahl der entnommenen Proben auch ein stufenweises Vorgehen zu empfehlen. Zeigt sich bei der in einem 1. Schritt entnommenen Prüfreihe von 6–8 Prüfkörpern eine geringe Varianz in den Ergebnissen, kann vielfach auf die Entnahme weiterer Proben verzichtet werden. Ist dies nicht der Fall, muss die Anzahl in einem zweiten Schritt zwingend erhöht werden.

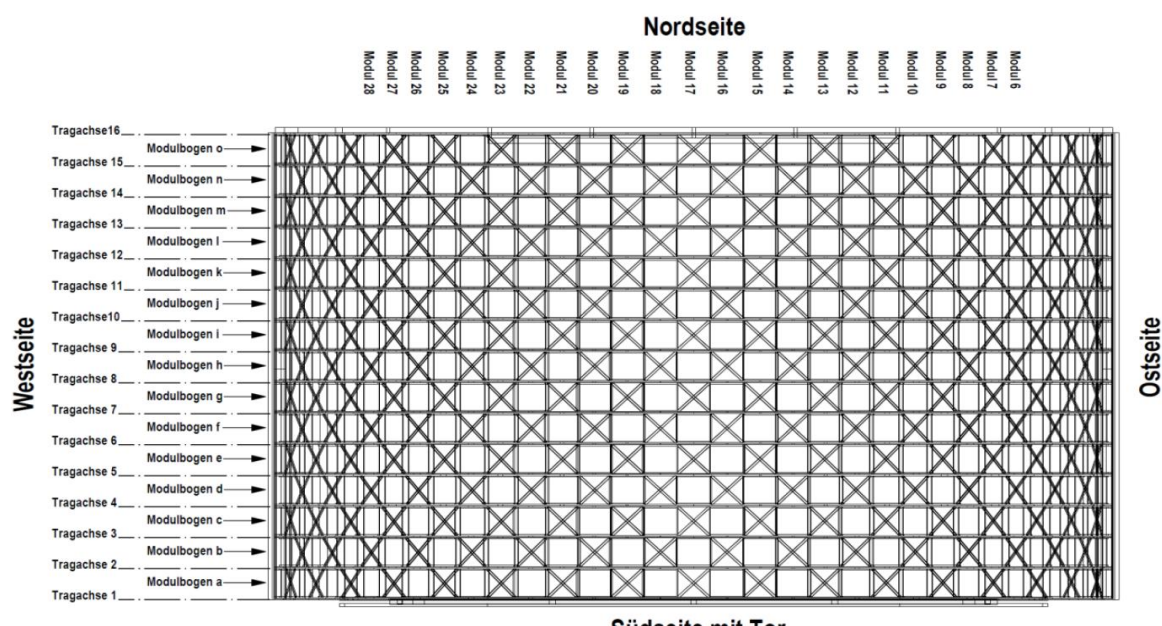


Abbildung 7: Definition der Achsen für ein Hallentragwerk, Fülleman et al. (2012), [6]

Verformungsverhaltens zusätzliche Belastungsversuche mit Erfassung der Verformung zweckmäßig sein [3, Anhang C]. Demgegenüber ist eine Dehnungsmessung in Holzbau- teilen mit den bekannten Methoden nur erschwert möglich und oft wenig aussagekräftig.

In besonderen Fällen, wie z. B. bei stark unterschiedlichen Nutzungen oder in Eissport- hallen, in denen die Klimabedingungen sehr unterschiedlich sind und über den Jahres- verlauf wechseln, ist die Zustandserfassung zu einem späteren Zeitpunkt zu wiederholen. Nur so können z. B. Risse und Delaminierungen, die im Winterhalbjahr im gequollenen und stark aufgefuechteten Zustand der Holzquerschnitte nicht erkennbar sind, nach einer Abtrocknungsphase im Sommer festgestellt werden.

4. Einflussfaktoren auf die Tragfähigkeit

4.1. Holzfeuchte

Die Holzfeuchte hat einen maßgebenden Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit von Holz. Holz reagiert aufgrund eines ausgeprägten hygroskopischen Materialverhaltens auf das Umgebungsklima mit einer Feuchtezu- oder -abnahme. Ein wichtiger Kenn- und Grenzwert ist der Fasersättigungspunkt. Fasersättigung definiert den Zustand von Holz, indem alle Hohlräume (= Kapillaren) der Zellwand mit flüssigem Wasser gefüllt sind. Dieser liegt bei den bei uns üblichen Holzarten bei ca. 26 – 32%. Nur bei Holzfeuchten unter dem Fasersättigungsbereich treten Schwind- und Quellvor- gänge auf. [6]

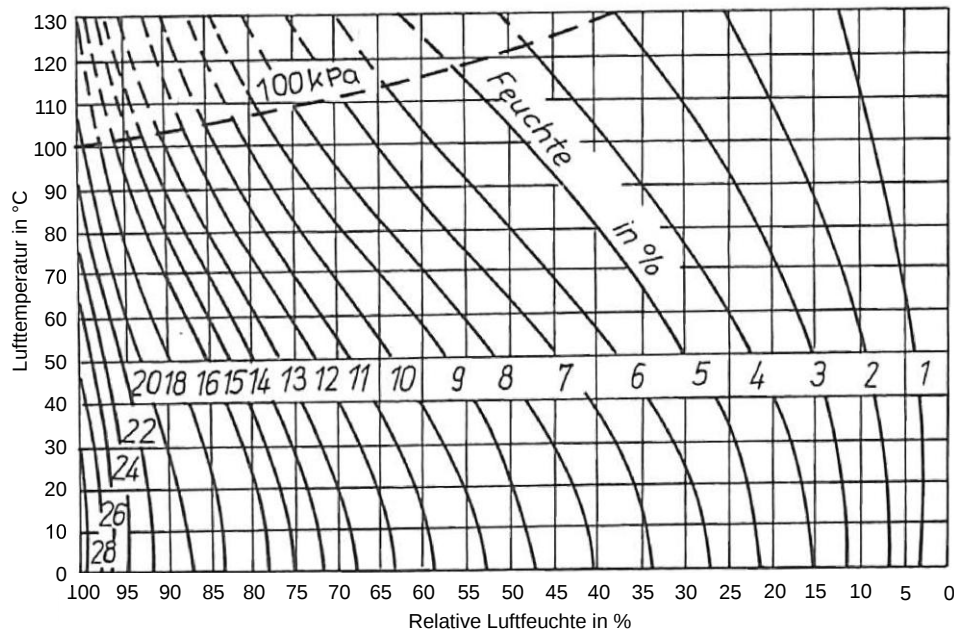


Abbildung 8: Ausgleichsfeuchte für Fichtenholz nach Keylwerth und Noack (1964), [7]

Die Holzfeuchte hat auf folgende Eigenschaften des Holzes einen Einfluss:

- Steifigkeit und Festigkeit,
- Gefährdung durch holzerstörende Pilze
- Formbeständigkeit
- Querschnittsbeständigkeit (→ Risse)

Je nach ausgesetztem Klima stellt sich bei Holz ein Gleichgewicht zwischen Holzfeuchte und relativer Luftfeuchtigkeit und Temperatur ein. Kurzzeitige (Stundenweise) Änderungen der Klimabedingungen beeinflussen die Holzfeuchte nur minimal und haben keine Auswirkungen auf die Gleichgewichtsfeuchte.

Die in den Bemessungsnormen angegebenen Festigkeitswerte für Holz gelten für eine Holzfeuchte von 12%. Insbesondere die Abnahme des Elastizitätsmoduls und der Biegefestigkeit bei zunehmender Holzfeuchte ist im Rahmen der Tragwerksplanung mit der entsprechenden Feuchteklasse zu berücksichtigen. [6]

4.2. Risse

In Holzkonstruktionen ist das Auftreten von Rissen nicht zu vermeiden. Die Abgrenzung zwischen Rissen, welche nur einen Einfluss auf die Ästhetik haben und Rissen die zur Reduzierung der Tragfähigkeit führen, ist entscheidend. Risse entstehen durch äußere Einwirkungen wie z. B. Feuchteänderungen oder Überbeanspruchungen und können hierüber klassifiziert werden. Eine Überbeanspruchung der Bauteile kann besonders bei konstruktionsbedingten Zugspannungen senkrecht zur Faser entstehen. Diese Risse sind in der Regel durch fehlerhafte Annahmen, Nutzungsänderungen oder Fehler in der statischen Berechnung bedingt. Zum Erkennen, Klassifizieren und Beurteilen dieser Rissbilder sind material- und fachspezifische Kenntnisse notwendig.

Risse sind in Abhängigkeit der Art, Größe und der Nachweise für die Ermittlung der Tragfähigkeit gemäß [3, Abschnitt 4.2], als Reduzierung der wirksamen Fläche oder Querschnitte zu berücksichtigen. Aus diesem Grund müssen für eine genaue Analyse die Rissbreiten und -tiefen sowie deren Lage im Bauteil sorgfältig aufgenommen und kartiert werden. Dabei muss beachtet werden, dass auch innenliegende und damit nicht erkennbare Risse auftreten können. [6]

Schwindrisse

Schwindrisse sind auf Eigenspannungen infolge der Trocknung des Holzes unterhalb des Fasersättigungsbereiches zurückzuführen, (Abb.1). Diese Risse sind i. d. R. nicht vermeidbar, da alle Tragkonstruktionen einem gewissen Klimawechsel ausgesetzt sind.

Die aktuellen Klimabedingungen sowie die in der Vergangenheit vorliegenden sind in der Zustandserfassung zu berücksichtigen, denn infolge des Auffeuchtens bzw. Abtrocknens

der Querschnitte treten unterschiedliche Spannungsverläufe auf, die z. B. im Fall einer starken äußerlichen Auffeuchtung zu innenliegenden und somit verdeckten Rissen führen konnten bzw. können. Im Gegensatz zum Auffeuchten entstehen beim Abtrocknen des Holzquerschnittes infolge der resultierenden Spannung äußerlich sichtbare Risse.

In Brettschichthölzern kann es bei extremen Klimabedingungen bzw. Wechselbeanspruchungen auch in direkter Nähe der Klebefuge zu einer Rissbildung kommen. Dieses Rissbild, mit vielen Faseranteilen auf den Rissflächen, ist deutlich von Delaminierungen der Klebfugen abzugrenzen. [6]

Delaminierungen

In Brettschichtholzträgern kommt es in seltenen Fällen zu einem Auflösen des Klebverbundes, den sogenannten Delaminierungen. Dieses Rissbild zeichnet sich dadurch aus, dass keine bzw. sehr wenig Fasern auf den Bruchflächen vorhanden sind, (Abb.2). Der Grund für die Delaminierung ist zumeist ein Ausführungsfehler im Rahmen der Brettschichtholzproduktion (Fehlverklebungen). Liegt eine Delaminierung vor, sind zusätzlich zur Kartierung der Risse, Kernproben in ausreichender Anzahl zur Beurteilung der Klebfugengüte zu entnehmen. [6]

Risse aufgrund von Querkzug

Querkzugrisse können im Firstbereich von gekrümmten Trägern, an Ausklinkungen und Durchbrüchen sowie bei quer zur Faser beanspruchten Anschlüssen auftreten. Die Rissbilder können aufgrund der Anatomie vom Holz im Bauteilinneren starten und zur Bauteiloberfläche wachsen. Ebenso können vorhandene Risse durch die gegenwärtige Beanspruchungssituation wieder geschlossen sein und eine Detektion erschweren. [6]

Risse aufgrund von Schub

Risse infolge erhöhter Schubbeanspruchung treten insbesondere im Auflagerbereich von Trägern, bei formschlüssigen Anschlüssen wie Versätzen oder bei Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln in Form von Blockschubversagen auf, (Abb.3). Schubrisse sind zumeist anhand des gegenseitigen Verschiebens der Fasern zu erkennen. Ein ausgeprägtes Rissbild ist durch einen deutlichen Versatz an den Stirnholzflächen erkennbar. [6]

4.3. Mechanische Schädigung

Mechanische Schädigungen sind Zug-, Druck-, Schub- und Biegeversagen eines Bauteils infolge von lokal oder global auftretenden erhöhten Beanspruchungen. Beispielsweise können nicht geplante aber durchgeführte Vergrößerungen eines Trägerdurchbruches oder eines ausgeklinkten Auflagerbereiches zu mechanische Schäden führen. Die typischen Versagensbilder sind zu meist äußerlich visuell gut erkennbar. [6]

4.4. Verbindungen

Die Tragfähigkeit von formschlüssigen Verbindungen oder Anschlüssen mit mechanischen Verbindungsmitteln wird durch zu kleine Abstände zwischen den Verbindungsmitteln und zu den belasteten Rändern, zu kleine Holzdicken, klaffende Fugen, fehlender Passgenauigkeit oder Lockerungen sowie Korrosion beeinträchtigt. Diese Einflussfaktoren gilt es aufzunehmen und mit den statischen Vorgaben abzugleichen.

In Verbindungen können weiterhin querschnittsmindernde Risse durch die Spaltwirkung der Verbindungsmittel, das Schwinden des Holzes sowie durch eine Überbeanspruchung entstehen. Die Rissbilder durch Überbeanspruchung unterteilen sich nach ihrer Entstehung in Längs- und Schubrisse oder Abscher- und Querkzugrisse. Eine Schädigung infolge von erhöhter Belastung kann aber auch plastische Verformungen, wie Eindrückungen, Stauchungen oder Deformationen der mechanischen Verbindungsmittel hervorrufen. Zusätzlich ist auf abgescherte oder hineingezogene Köpfe bzw. Unterlegscheiben zu achten. [6]

5. Methoden der Zustandserfassung

5.1. Holzfeuchtemessung

Widerstandsmessverfahren

Das Messverfahren beruht auf der elektrischen Leitfähigkeit von Holz, die mit zunehmendem Wassergehalt ansteigt. Zur Messung werden zwei Elektroden ins Holz eingebracht und der zwischen ihnen vorliegende elektrische Widerstand gemessen. Der Messwert der Holzfeuchte ist weiterhin von der Holztemperatur abhängig, die bei der Messung zu berücksichtigen ist. In den Messgeräten sind zumeist Kennlinien für die verschiedenen Holzarten und eine Temperaturkompensation integriert, so dass der Holzfeuchtegehalt direkt angezeigt wird. Im Messbereich von etwa 6 % bis ca. 25 % Holzfeuchte beträgt die Messgenauigkeit ± 2 %. Ab etwa 25 % Holzfeuchte liegt eine zunehmende Ungenauigkeit vor.

Zur Messung der Holzfeuchte sollten nur isolierte Elektroden verwendet werden. Mit diesen kann die Messung in unterschiedlichen Tiefen des Querschnittes (z. B. 10 mm, 25 mm, 40 mm) exakt erfolgen. Hierdurch wird die Möglichkeit geboten den Aufweichungs- vom Abtrocknungsprozess zu unterscheiden. Für Langzeitmessungen oder dem Monitoring von Tragwerken stehen spezielle Elektroden für den festen Einbau zur Verfügung. [6]

5.2. Rissaufnahme/- kartierung

Die Rissaufnahme erfolgt durch eine visuelle handnahe Untersuchung des Bauteils. Als Hilfsmittel zur Erfassung der Risslänge R_L , Rissbreite R_B und Risttiefe R_T dienen Maßstab, Messband und Rissmaßstab. Für die Detektion des Rissursprungs empfiehlt sich der Einsatz einer Lupe. Weiterführend kann die Anwendung des Zuwachsbohrers, der Ultraschallechotechnologie oder die mobile Röntgenblitzröhre in verdeckten Bauteilsituationen oder für Risse im Bauteilinneren Ergebnisse liefern.

Die Rissaufnahme kann in Anlehnung an die Norm [8] erfolgen. Die Norm sieht vor, dass die Risstiefen in den drei Viertelpunkten der Risslänge mit einer 0,1 mm dicken Fühlerlehre (Ventillehre, Blattlehre) zu messen sind. Als Risttiefe R_T eines Risses gilt der Mittelwert aus den drei Messungen an den Stellen t_1 , t_2 , t_3 . Die Risttiefe wird in der Norm [8] als projizierte Fläche über der Bauteilbreite definiert.

Ebenfalls zu beachten ist der Zeitpunkt der Rissaufnahme. Eine hohe relative Luftfeuchte während der visuellen Begutachtung kann dazu führen, dass außenliegende Risse aufgrund des gequollenen Holzes geschlossen und somit nicht sichtbar sind. In diesem Fall ist die Zustandserfassung zu einem anderen Zeitpunkt

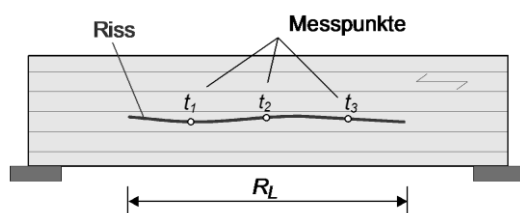


Abbildung 9: Schematische Darstellung der Bestimmung der Risttiefe gemäß [6, 8]

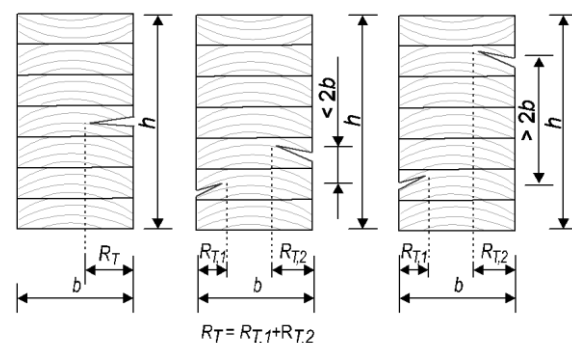


Abbildung 10: Projizierte Risstiefen gemäß DIN 1074-1:2003

Die Bewertung der Rissart der gemessenen Rissgrößen sowie deren Häufigkeit ist für jeden Einzelfall individuell durchzuführen. Im Speziellen sind hierbei der Tragwerkstyp, das statische System wie die statische Funktion des Bauteils für die Gesamtstabilität des Tragwerkes, z. B. Haupt- oder Nebenträger, einzubeziehen. Zudem sind die derzeitige wie zukünftige Nutzung und die resultierenden klimatischen Randbedingungen entscheidend für die Beurteilung.

Im Nachweis der Tragsicherheit sind vorhandene Risse als Verminderung der effektiven Querschnittsfläche für

- Zugbeanspruchung unter einem Winkel und rechtwinklig zur Faser
- Biegezugbeanspruchung unter einem Winkel und rechtwinklig zur Faser
- Torsionsbeanspruchung
- Schubbeanspruchung
- Ausklinkungen, Einschnitten und Durchbrüchen

generell zu berücksichtigen. Für Schwindrisse in primär schubbeanspruchten (auflager-näheren) Bereichen wie auch in querzugbeanspruchten Bauteilen infolge Längskraft (z. B. Firstbereiche von Satteldachträgern) gelten folgende Grenzwerte nach [3]:

- Schubbeanspruchung: Risstiefe $\leq 30\%$ der Querschnittsbreite
- Querzugbeanspruchung: Risstiefe $\leq 20\%$ der Querschnittsbreite [6]

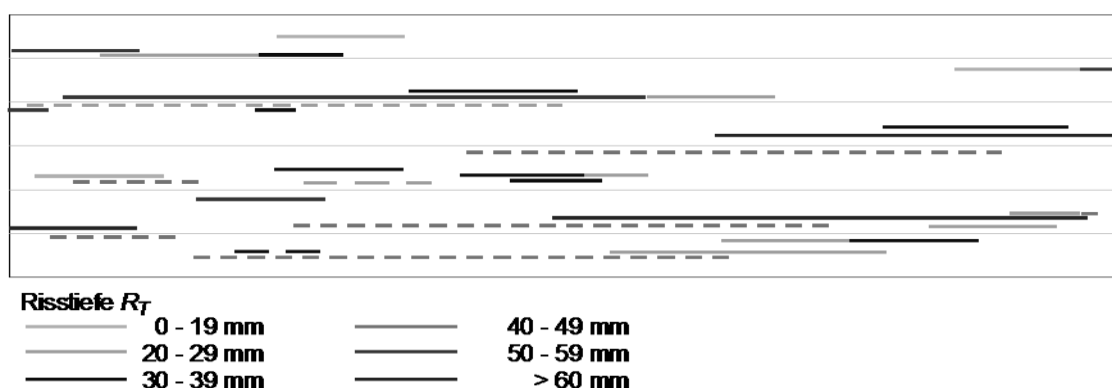


Abbildung 11: Kartierung von Rissen aufgrund einer genauen Zustandserfassung, Schwindrisse (kontinuierliche Linie = Sichtseite; gestrichelte Linie = Rückseite)[6]

5.3. Bohrkernentnahme

Die Bohrkernentnahme ist ein Verfahren zur lokalen Gewinnung von zylindrischen Materialproben. Mit ihnen lassen sich Untersuchungen zur Bewertung des vorhandenen Materials und Querschnittes einer bestehenden Holzkonstruktion durchführen. Die Materialproben können neben einer rein visuellen Betrachtung auch physikalisch und chemisch untersucht werden, um die Rohdichte, die Holzfeuchte, Festigkeiten, das Holzalter oder eingesetzte Holzschutzmittel zu bestimmen. [6]

Verfahren

Bo- - 10 mm und einer Gesamtlänge von 200 bis 300 mm (Abb. 12) oder einem Zapfenbohrer mit Durchmessern von 10 – 60 mm und Gesamtlänge von ca. 100 mm (Abb. 13) entnommen werden. Im Anschluss an die manuelle oder maschinelle Bohrkerngewinnung werden die Bohrkern mit einer Ausziehhilfe aus dem Bohrloch entnommen oder aus dem Hohlbohrer herausgeschoben. Hierbei ist es wichtig sorgfältig vorzugehen, damit der Bohrkern im Gesamten wie in der Reihenfolge erhalten bleibt. Die Bohrkern sind in einem geschlossenen Behältnis (Röhrchen oder Plastiktüte) separat voneinander und mit Kennzeichnung der Entnahmeposition sowie der Orientierung aufzubewahren.

Die Entnahme von Bohrkernen sollte zunächst schrittweise sowie hauptsächlich in den auffälligen Bereichen eines Trägers erfolgen. Die statischen Schnittkräfte des jeweiligen Trägers sind bei der Entnahme zu beachten.

Insbesondere die Biegezug-, Druck-, und Schubzonen sollten hierbei nicht geschwächt werden. Das bedeutet, dass im Bereich von $h/6$ von der Trägerunterkante aus, jedoch mindestens in den untersten drei Lamellen keine Bohrkern entnommen werden dürfen. Das entstandene Bohrloch ist mit einem Holzstöpsel gleicher Holzart und gegebenenfalls imprägniert zu verschließen. [6]

5.4. Bohrwiderstandsmessung

Die Bohrwiderstandsmessung eignet sich gut zur Feststellung von Fäulnisschäden, größeren Schwindrissen (Breite > 3 mm) und die Abschätzung der Abmessungen von verdeckten Bauteilen, wie z. B. Zapfenverbindung.

Generell ungeeignet ist dieses Verfahren zur Detektion von holzerstörenden Insekten. Insbesondere muss hier der Nagekäfer (Anobien) genannt werden, dessen Fraßlöcher mit einem Durchmesser von ca. 2 – 3 mm dem zur Widerstandsmessung verwendeten Bohrerdurchmesser entsprechen, und deshalb nicht erkannt werden können. [6]

Verfahren

Das Verfahren beruht auf der Messung des Bohrwiderstandes, welcher von den vorliegenden Dichten im Querschnitt abhängig ist. Eine dünne Bohrnadel mit einem Kopfdurchmesser von 3 mm wird mit konstanter Vorschubgeschwindigkeit in den Holzquerschnitt eingedreht. Ein Wechsel des Bohrwiderstandes bewirkt eine unterschiedliche Leistungsaufnahme, welche vom Gerät gemessen und in Form einer Widerstandskurve über der Bohrdistanz dargestellt wird.

Während der Bohrwiderstandsmessung vor Ort, sollten die Parameter, wie Bohrneigung, Jahrringlage, stark rissiger Querschnitt, der untersuchten Hölzer für die spätere Auswertung dokumentiert werden. [6]

Auswertung

Mit diesem Untersuchungsverfahren kann eine Aussage über den inneren Holzzustand und die relative Festigkeit gemacht werden. Die ausgegebenen Bohrprofile sollten noch vor Ort überschläglich kontrolliert werden, um bei evtl. unklaren Ergebnissen weitere Bohrungen durchzuführen. Eine genaue Auswertung erfolgt im Büro mittels geeigneter Software. Dieses hat zum Vorteil, dass die Diagramme beliebig vergrößert und somit genauer bewertet werden können. Zudem können die Ergebnisse zur allgemeinen Verständlichkeit besser aufbereitet werden. [6]

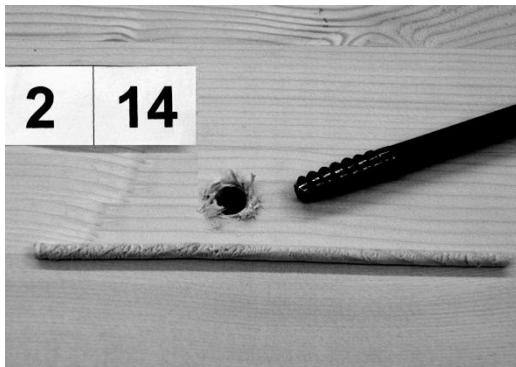


Abbildung 12: Spitze des Zuwachsbohrers, Bohrkern [6]

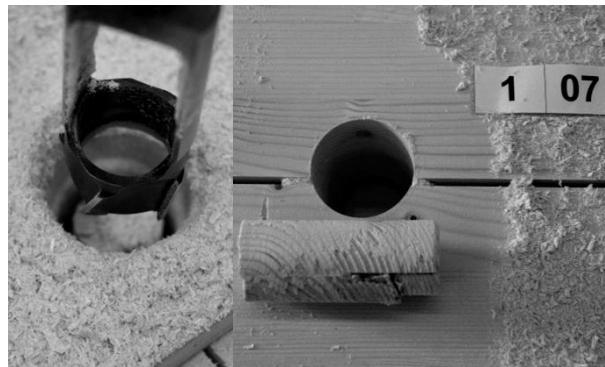


Abbildung 13: Zapfenbohrers, Bohrkern [6]

Ergebnisse/Bewertung

Die charakteristischen Dichteunterschiede zwischen Früh- und Spätholz können in der Bohrwiderstandskurve erkannt werden. Geschwächte Materialstrukturen können anhand eines deutlichen Abfalls in der Bohrwiderstandskurve von dem holztypischen Kurvenverlauf von gesundem Holz unterschieden werden. Für detaillierte Beurteilungen ist es wichtig, dass der Anwender über vertiefte Kenntnisse über den Werkstoff Holz und dessen mögliche Schädigungen verfügt und Erfahrungen im Umgang mit der Bohrwiderstandsmessung aufweist. Ferner ist es hilfreich nicht eindeutige Ergebnisse mit weiteren Fachspezialisten zu diskutieren.

Mit kalibrierten Geräten ist es möglich, neben dem Bohrwiderstand auch die direkte Holzdichte abzulesen. Inwiefern diese direkten Dichteangaben durch äußere Parameter (Reibung, Ablenkung im Bohrkanal, Holzfeuchte) beeinflusst werden, muss noch weitergehend untersucht werden. [6]

5.5. Ultraschallverfahren

Die bekannten Ultraschallverfahren, wie die Durchschallungs- und Resonanzverfahren eignen sich zur Bestimmung des Elastizitätsmodul, des Schubmoduls und der Dichte. Die Messungen können an bestehenden Bäumen wie auch an Rundhölzern, Schnitthölzern und Holzwerkstoffen in bestehenden Tragwerken oder im Labor angewandt werden. Die nur wenig Sekunden dauernde Messung kann an feuchten wie trockenen Holzquerschnitten erfolgen.

Das Ultraschallechoverfahren ist demgegenüber eine sehr wissenschaftliche Methode zur Lokalisierung von Schadstellen, wie z. B. Querschnittsschwächungen, Rissen oder Delaminierungen, an der Oberfläche des Bauteils wie auch im Inneren des Querschnittes, [9], [10], [11].

Verfahren

Der Ultraschall sind Schallwellen mit Frequenzen von mehr als 20 Kilohertz, die sich in Luft, Gasen, Flüssigkeiten oder Festkörpern verschieden ausbreiten. Ein Übergang von Schallwellen von der Luft in Festkörper erfolgt nur, wenn die Schallwellen in unmittelbarer Nähe bzw. über ein spezifisches Koppelmedium abgestrahlt werden. Die Weiterleitung der Ultraschallwellen im Körper erzeugt eine materialspezifische mechanische Schwingung von Atomen und Molekülen, anhand dessen Charakteristik physikalische Eigenschaften wie z. B. der Elastizitätsmodul abgeleitet werden können, [12]. Der Prüfkörper wird jeweils mit einer ausstrahlenden Ultraschallsonde über einen piezoelektrischen Effekt oder durch ein mechanisches Anschlagen angeregt. Die im Prüfkörper weitergeleiteten Schallwellen werden von einer Empfängersonde erfasst und bezüglich ihrer Laufzeit, Dämpfung und des Abklingverhaltens ausgewertet. Die Messsonden zur Erzeugung und Erfassung der Ultraschallwellen können direkt, halbdirekt oder indirekt angeordnet sein.

Im **Durchschallverfahren** wird die material- und bauteilgrößenspezifische Laufzeit des Ultraschalls gemessen. Unter Angabe der Dichte des Prüfmateri als und des Abstandes der Sensoren wird vom Gerät mitunter der Elastizitätsmodul direkt bestimmt und ausgegeben oder eine quantitative Zuordnung zur Festigkeitsklasse vorgenommen. Die Genauigkeit der Messung hängt von der Größe und dem Zustand des Prüfkörpers ab. Große Äste, Fehlstellen aufgrund des Befalls mit holzerstörenden Pilzen oder Risse beeinflussen die Messungen gering; stark geschädigte Holzkörper werden in Abhängigkeit der Messlänge nicht immer erkannt. Für die Erhöhung der Genauigkeit bilden viele Geräte den Mittelwert aus mehreren Messungen an gleicher Stelle. Beste Ergebnisse werden bei Längen zwischen 0,5 Meter – 5,0 Meter erreicht.

Wird neben der Schalllaufzeit auch die Intensität des Signals erfasst, spricht man vom **Ultraschallintensitätsverfahren**. Die Schallintensität wird in Abhängigkeit von der Bauteilgröße und der Dämpfungskonstante geschwächt und liefert hierdurch zusätzlich eine Aussage über den inneren Zustand eines Bauteils. [6]

5.6. Röntgen

Die Einsatzgebiete liegen hauptsächlich im Bereich von Anschlüssen oder Verbindungen bei denen der Zustand im Inneren beurteilt werden muss. Aufgrund der Dichteunterschiede kann der Zustand von mechanischen Verbindungsmitteln ebenso wie die Passgenauigkeit von formschlüssigen Anschlüssen überprüft werden. Weiterhin kann das Verfahren zur Qualitätsprüfung von geklebten Anschlüssen respektive sanierten Klebfugen bzw. auch der Lokalisierung von innenliegenden Bauteilschädigungen durch holzerstörende Pilze eingesetzt werden.

Verfahren

Das Prinzip der Röntgentechnologie entspricht dem aus der medizinischen Diagnostik allgemein bekanntem physikalischen Verfahren. Für die Zustandserfassung kommt eine mobile Röntgenblitzröhre in Kombination mit einer digital auswertbaren Fotoplatte zum Einsatz. Die energetisch erzeugten Röntgenstrahlen werden von den unterschiedlich vorliegenden Materialdichten des zu prüfenden Bauteils verschieden stark absorbiert und treffen somit mit unterschiedlicher Intensität auf die Fotoplatte. Je höher die Materialdichte, umso stärker werden die Röntgenstrahlen beim Durchdringen absorbiert und

abgeschwächt. Nach Auslesen/Einscannen der Fotoplatte werden die unterschiedlichen Intensitäten als zweidimensionales Graustufenbild dargestellt.

Das **Röntgenverfahren** arbeitet zerstörungs- und kontaktfrei. Es ist mobil einsetzbar und die Aufnahmen können bereits vor Ort ausgewertet werden, (Abbildung 14). Die Messauflösung ist hoch für den relativ grossen Messbereich von 30 cm x 40 cm als Einzelaufnahme. Ebenso sind die Messungen temperaturunabhängig und weisen eine gute Wiederholgenauigkeit auf. Generell sind die vorgegebenen Schutzvorschriften gegen Röntgenstrahlung wie die Sicherheitsabstände einzuhalten.

Die **Tomographie**, auch bekannt als Computertomographie (CT), kombiniert die Messergebnisse mehrerer aus unterschiedlicher Richtung vorgenommener Messungen zur Erzeugung von zu meist dreidimensionalen Ergebnissen. Dies bedeutet, dass z. B. mehrere zweidimensionale Röntgenaufnahmen zu einer dreidimensionalen Röntgenaufnahme zusammengesetzt werden, um das Objekt räumlich bewerten zu können. Es können so beispielsweise hochauflösende Abbildungen von ganzen Baumstämmen erstellt oder Fehlstellen, Risse und Äste genau lokalisiert werden.

Bewertung

Das Ergebnis dieser Methode ist eine Röntgenaufnahme des Prüfobjektes. Anhand der Interpretation der Graustufen kann der Zustand visuell bewertet werden. In Abbildung 15 – Abbildung 17 sind Röntgenaufnahmen eines verformten Stabdübelanschlusses, der Passgenauigkeit eines Schubverbinders in einer Holz-Holzverbindung und eine Querschnittsschwächung durch Pilzbefall dargestellt. Diese Situationen können anhand der visuellen Untersuchung oft gar nicht oder nicht mit dieser Genauigkeit erkannt werden.

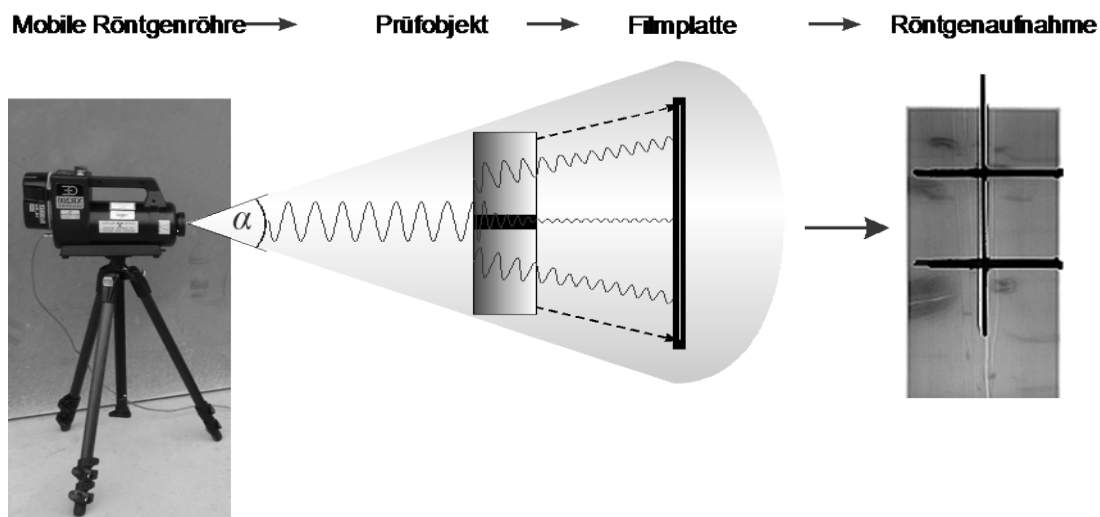


Abbildung 14: Prinzipieller Aufbau und Ablauf der mobilen Röntgenaufnahme

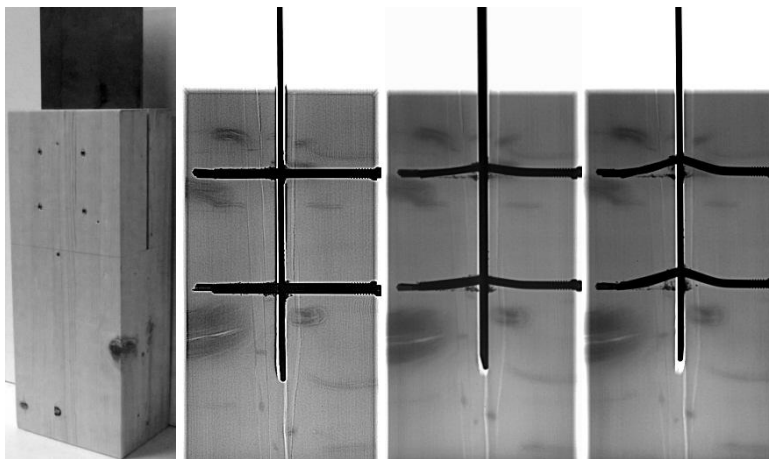


Abbildung 15: Röntgenaufnahme eines Stabdübelanschlusses zu unterschiedlichen Versagenszuständen

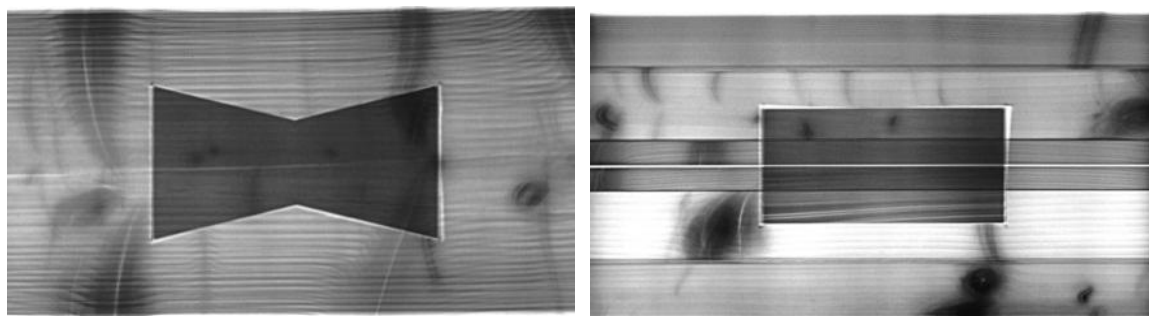


Abbildung 16: Röntgenaufnahme eines Schubverbinders

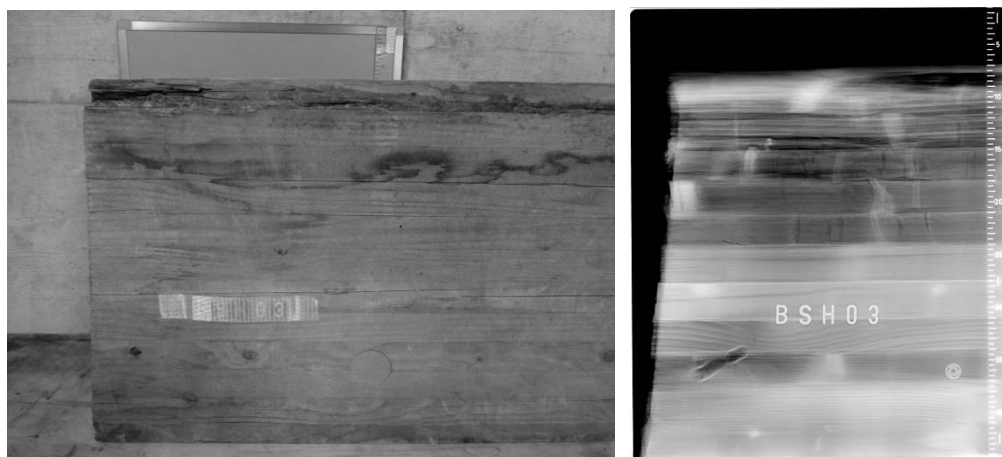


Abbildung 17: Röntgenaufnahme einer Querschnittsschwächung

6. Zusammenfassung

Holzkonstruktionen haben den Vorteil, dass Problemfelder relativ einfach durch Verfärbungen oder Rissbilder visuell erkennbar sind. In Kombination mit der Holzfeuchtemessung kann so bereits eine gute Spezifizierung der Problemfelder erfolgen. Von großer Bedeutung bei der Zustandserfassung und für das Nachvollziehen von festgestellten Mängeln ist die Kenntnis des Tragverhaltens der Gesamtstruktur, bevor die Aufnahme von Details, einzelnen Traggliedern oder Anschlüssen erfolgt. Für eine vertiefende Analyse und detaillierte Messergebnisse stehen weiterführende Methoden zur Zustandserfassung zur Verfügung. Die verschiedenen Verfahren haben jeweils spezifische Vor- und Nachteile. Oftmals erhöht die Kombination verschiedener Verfahren die Aussagefähigkeit.

Die Erfahrung zeigt, dass mit vergleichsweise geringem Kostenaufwand rechtzeitig erkannte Mängel und Schäden an der Tragkonstruktion Instand gesetzt werden können

7. Literatur

- [1] SIA 269:2011, Grundlagen der Erhaltung von Tragwerken, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [2] SIA 269/1:2011, Erhaltung von Tragwerken – Einwirkungen, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [3] SIA 269/5:2011, Erhalten von Tragwerken – Holzbau, Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [4] S. Aicher, B. Radovic, G. Folland, 2001: Befallswahrscheinlichkeit durch Hausbock bei Brettschichtholz, IRB- Verlag, Deutschland, ISBN 978-3-8167-5977-5

- [5] A. Müller, 2013: Monitoring the Condition of Buildings, Part II Timber construction, Biel/Bienne
- [6] A. Müller, S. Franke, B. Franke, F. Scharmacher, 2014: Workshop- Theorie und Praxis Zustandserfassung und Verstärkung von Brettschichtholz, BFH, EMPA, Lignum, BAFU
- [7] R. Keylwerth, D. Noack, 1964: Die Kammertrocknung von Schnittholz, Holz als Roh- und Werkstoff, 22 (1964), S. 29-36
- [8] DIN 4074-1:2008, Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit - Teil 3: Apparate zur Unterstützung der visuellen Sortierung von Schnittholz; Anforderungen und Prüfung, Deutsches Institut für Normung, Berlin
- [9] A. Hasenstab, 2006: Integritätsprüfung mit dem zerstörungsfreien Ultraschallechoverfahren. Dissertation, Technische Universität Berlin, Deutschland.
- [10] S. Maack, M. Krause, 2009: Ultraschallechoverfahren zur Integritätsprüfung von Holzbauteilen beim Bauen im Bestand . Forschungsbericht, Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, Deutschland.
- [11] S. Sanabria, 2012: Air-coupled ultra sound propagation and novel non-destructive bonding quality assessment of timber composites. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz.
- [12] R. Steiger, 1996: Mechanische Eigenschaften von Schweizer Fichten Bauholz bei Biege-, Zug-, Druck- und kombinierter M/N-Beanspruchung, Sortierung von Rund- und Schnittholz mittels Ultraschall. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule, Zürich, Schweiz.