Berner Fachhochschule
Architektur, Holz und Bau

Hochschule Rosenheim
University of Applied Sciences

Methoden der Zustandserfassung von Holzkonstruktionen

Deutsche Sachverständigentage für Holzbau und Ausbau

19.-20. April 2012, Rosenheim

Prof. Dr. H. Martin Illner

Hochschule Rosenheim, Fakultät für Holztechnik und Bau

ö.b.u.v. IHK-Sachverständiger für Holzschutz und Holzschäden

Dipl.-Ing. (FH) Florian Scharmacher

Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau, Biel/Schweiz

Wissenschaftlicher Assistent, F+E Holz- und Verbundbau

1. Einführung

Im Hinblick auf eine präzise Einschätzung der notwendigen Maßnahmen für eine vorausschauende Planung und damit auch für die notwendige Kostensicherheit und Bauzeitenkalkulation bei einer anstehenden Renovation, Instandsetzung oder geplanten Umnutzung eines Gebäudes/einer baulichen Anlage ist die Zustandserfassung eine unverzichtbare Grundlage und damit von größter Bedeutung.

Die Zustandserfassung ist vor allem auch bei der Überprüfung von bestehenden Bauwerken/ baulichen Anlagen eine wesentliche Grundlage für die weitere zielsichere und verantwortungsvolle Beurteilung der Tragsicherheit bzw. Leistungsfähigkeit und Resttragfähigkeit der Bausubstanz.

Diverse Einwirkungen, wie zum Beispiel auch klimatische und raumklimatische Bedingungen beanspruchen Bauteile und Tragwerke. All diese Randbedingungen und Einflüsse haben unterschiedliche Problemfelder zur Folge. Unter anderem ist das Zusammenspiel der statisch-konstruktiven Beanspruchung des Bauteils unter Berücksichtigung seiner Umgebungsbedingungen und Einwirkungen von wesentlicher Bedeutung.

Bei der Zustandserfassung erfordern diese unterschiedlichen Problemfelder die Anwendung spezifischer Methoden der Prüftechnik (Vogel, et al., 2009).

Eine Überprüfung eines Bauteils/Bauwerks (Zustandserfassung und -beurteilung) ist gemäß (Steiger, 2002) beispielsweise bei folgenden Ereignissen notwendig:

- wenn die Ergebnisse einer periodischen Zustandsuntersuchung dies erfordern
- bei Ablauf der in einer früheren Beurteilung zugestandenen Restnutzungsdauer
- bei Bekanntwerden von Bemessungs- oder Ausführungsmängeln
- anlässlich einer geplanten Nutzungsänderung des Bauwerks/baulicher Veränderungen
- bei Zweifeln an der Tragsicherheit, hervorgerufen durch sichtbare Schäden
- bei offensichtlich mangelhafter Gebrauchstauglichkeit
- wegen außerordentlicher Vorkommnisse während der Nutzung (z. B. Fahrzeuganprall, Lawinen, Brand, Erdbeben, Sturm, Hagel, etc.), die das Tragwerk oder Bauteile möglicherweise geschädigt haben könnten
- bei baustoff-, bauweisen- oder systembedingtem Verdacht auf mögliche Beeinträchtigung der Tragsicherheit oder Langzeitfunktion
- wegen eines zunächst unbegründeten Verdachts, den man ausräumen will
- Wechsel des Eigentümers oder der Zuständigkeit

In Anlehnung an Bächle (2007) hat die Untersuchung von Holzbauteilen im Zuge einer Bausanierung folgende Ziele:

- die Aufnahme des Grades und der Ausbreitung von Defekten und Schädigungen
- die Charakterisierung der Art und der Intensität der Schädigung
- die Ermittlung der Ursache der Schädigung
- die präzise Bestimmung der Festigkeitseigenschaften
- das Überwachen von abhilfeschaffenden Maßnahmen

2. Übersicht über die im Vortrag angesprochenen Methoden

Je nach Ursache und Fragestellung bieten sich unterschiedliche Methoden an. Als Sachverständiger kennt man sie in der Regel. Manchmal ist man aber (noch) nicht entsprechend mit ihnen vertraut oder kennt sie nur aus der Fachliteratur. Das vorliegende Handout ist eine Zusammenfassung; im Vortrag werden sie durch Erfahrungsberichte und Anwendungsbeispiele aus der Praxis ergänzt.

2.1 Holzfeuchte und Holzfeuchtemessung

2.2 Rissaufnahme / Risskartierung

2.3 Endoskopierung

2.4 Bohrwiderstandsmessung

2.5 Dendrochronologie

2.6 Bestimmung der Klebstofffugenqualität

2.7 Röntgenverfahren

2.1 Holzfeuchte und Holzfeuchtemessung

Die Holzfeuchte - also die im Holz enthaltene Wassermenge - ist einer der wesentlichen Parameter mit dem Sachverständige im Umfeld von Holz, Holzbauteilen und Holzwerkstoffen zu tun haben. Holz ist hygroskopisch (griechisch: Feuchte liebend) und passt sich immer den Umgebungsbedingungen an. Bestimmende Einflüsse sind zum Beispiel Luftfeuchtigkeit, Kontakt zu Erdreich/feuchten Bauteilen oder zu Wasser sowie direkte oder indirekte Bewitterung.

Das Feuchteniveau im Holz hat unter anderem Einfluss auf

- Quellen und Schwinden
- Verleimung
- Oberflächenbeschichtung
- Vergrauen der Oberfläche
- Erscheinen von Schimmelpilzen
- Lebensbedingungen für holzzerstörende Pilze und Insekten
- mechanische Festigkeitseigenschaften
- Wärmeleitfähigkeit
- Heizwert.

Insofern ist es in vielen Bereichen von wesentlicher Bedeutung, dass man die vorhandene Feuchtigkeit durch geeignete Methoden ermitteln kann. Hier wird auf die Methoden eingegangen, die vor allem im Umfeld der Sachverständigentätigkeit von Bedeutung sind.

- **Elektrische Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip**

Mit zunehmendem Wassergehalt im Holz steigt die elektrische Leitfähigkeit. Zur Messung werden zwei Elektroden ins Holz eingebracht und der zwischen ihnen fließende Strom ermittelt. Von etwa 3 bis ca. 20 % beträgt die Messgenauigkeit ±1…2 %. Ab etwa 25 % muss mit zunehmenden Ungenauigkeiten gerechnet werden, auch wenn die Digitalanzeige Stellen nach dem Komma angibt. Dies liefert nur eine trügerische Genauigkeit.

Bei Erwerb und Verwendung von Elektroden ist darauf zu achten, ob sie nur eine blanke Spitze oder insgesamt eine blanke Oberfläche haben.

Abbildung 1: Holzfeuchtemessgerät und Rammsonde/-elektroden

Spezielle Elektroden können auch für längere Zeit in Bauteile eingebaut werden, um beispielsweise den Feuchtegehalt während mehrerer Wochen oder Monate zu ermitteln.

- **Elektrische Holzfeuchtemessung nach dem Kapazitätsverfahren**

Dabei wird der kapazitive Widerstand ermittelt. Vorteilhaft ist, dass der Messbereich schon bei 0 % Holzfeuchte beginnt und, dass die Holzoberfläche nicht durch das Einschlagen von Elektroden beschädigt wird. Es wird jedoch immer nur ein Mittelwert gemessen; für aussagekräftige Messungen kann es erforderlich sein, dass beispielsweise drei verschiedene Geräte - für die Holzfeuchte im Bereich von 0-10 mm, 0-25 mm und 0-35 mm - eingesetzt werden. Nachteilig ist auch die erhebliche Abhängigkeit der Anzeige von der Rohdichte des Holzes.

Abbildung 2: Kapazitives Messgerät (Foto: Merlin)

- **Holzfeuchtemessung mit der Darrmethode**

Wenn es darum geht, dass man genaue Aussagen über die Holzfeuchtigkeit erhält, dann führt an der Darrmethode kein Weg vorbei. Mit ihr kann die Feuchtigkeit auf 0,1 % genau bestimmt werden. Außerdem ist sie auch bei Holzwerkstoffen anzuwenden, bei denen die anderen Verfahren wegen der vorhandenen Klebstoffe nicht praktikabel sind.

Die Methode ist nicht zerstörungsfrei und kann nur mit entsprechender Labortechnik durchgeführt werden. Es werden ein Darrofen oder Trockenschrank sowie eine hinreichend genaue Waage benötigt. Damit wird die Masse der aus dem Bauteil entnommenen Probe vor und nach der Trocknung ermittelt. Die entnommene Materialprobe wird mit den oben genannten Geräten nach EN 13183-1 bei 103 ±2°C bis zur Gewichtskonstanz - also bei absoluter Trockenheit (atro) - herunter getrocknet. Über die nachfolgende Formel wird dann die Holzfeuchtigkeit errechnet:

$$\text{Holzfeuchte in \%} = \frac{\text{Masse nasse Probe} - \text{Masse trockene Probe}}{\text{Masse trockene Probe} \times 100}$$

2.2 Risse

Risse sind besonders bei Vollholzquerschnitten meist auf Eigenspannungen durch Schwinden zurückzuführen. Sie sind nicht vermeidbar, da alle Tragkonstruktionen einem gewissen Klimawechsel ausgesetzt sind. Durch zu tiefe Risse kann die Schubfestigkeit der Holzquerschnitte reduziert sein. Aus diesem Grund müssen für eine genaue Analyse die Rissbreiten und -tiefen und deren Lage im Bauteil sorgfältig aufgenommen und kartiert werden. Einen Anhalt zur Kartierung bietet die DIN 4074-1 (siehe Abbildung 3).

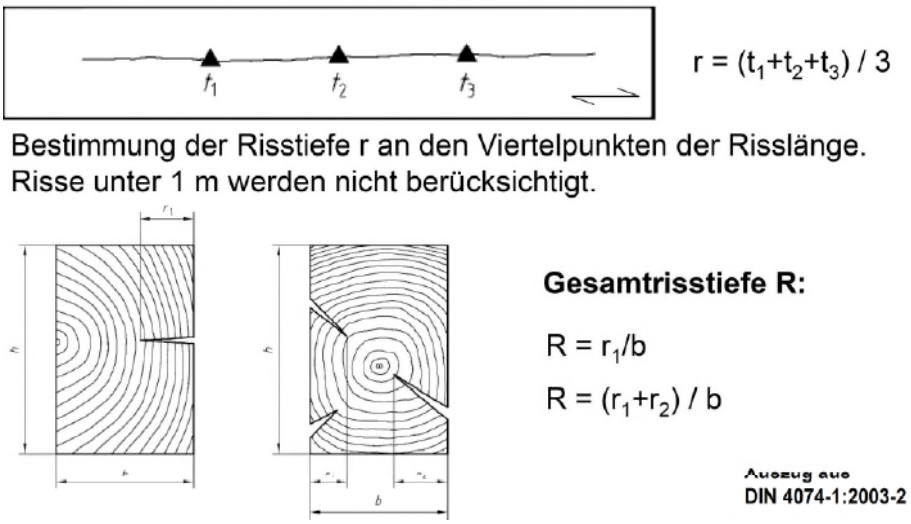

Abbildung 3: Definition Risslänge und Risstiefe

Bei verklebten Bauteilen (Brettschichtholzkonstruktionen) können Risse auch auf Probleme in der Klebstofffuge (Delaminierungen, Fehlverklebungen, etc.) hinweisen. Um dies festzustellen müssen auch hier die Rissbreiten und -tiefen aufgenommen und zusätzlich Kernproben in ausreichender Anzahl entnommen werden, damit die Klebstofffugengüte im Labor durch eine Scherprüfung gemäß EN 392 und EN 386 festgestellt und beurteilt werden kann. In besonderen Fällen kann auch eine Überbeanspruchung der Bauteile besonders bei auftretenden, konstruktionsbedingten Querzugspannungen die Ursache sein. Zum Erkennen und Beurteilen besonders dieser letztgenannten Ursache sind materialspezifische Kenntnisse notwendig. Selbstverständlich kann auch eine Überbeanspruchung der Bauteile durch fehlerhafte Annahmen, Nutzungsänderungen oder Fehlern in den statischen Berechnungen Ursache sein.

Es gibt in verschiedenen Publikationen unterschiedliche Definitionen von zulässigen Risstiefen (R). Nachfolgend sind die für den deutschen Sprachraum wichtigsten Regelungen aufgeführt.

- Vollholz (NH C 24):
  - DIN 4074-1: Risstiefe ≤ 1/2 der Querschnittsbreite
  - SIA 269/5: Risstiefe ≤ 2/5 der Querschnittsbreite
  - Frech/Möhler:
    - Biegebeanspruchung: Risstiefe ≤ 3/5 der Querschnittsbreite (3/10 von jeder Seite)
    - Schubbeanspruchung: Risstiefe ≤ ca. 2/5 der Querschnittsbreite (1/5 von jeder Seite)

- Brettschichtholz
  - Radovic/Wiegand
    - Biege-/Schubbeanspruchung: Risstiefe ≤ 1/3 der Querschnittsbreite (1/6 von jeder Seite)
    - Querzugbeanspruchung: Risstiefe ≤ 1/4 der Querschnittsbreite (1/8 von jeder Seite)
  - SIA 269/5
    - Schubbeanspruchung: Risstiefe ≤ 3/10 der Querschnittsbreite
    - Querzugbeanspruchung: Risstiefe ≤ 1/5 der Querschnittsbreite

2.3 Endoskopie

Diese Methodik wurde ursprünglich für medizinische Anwendungen entwickelt. Mittlerweile wird sie in sehr vielen technischen Bereichen als ideales Sichtkontrollgerät für Hohlräume angewendet. Ein Endoskop besteht im Wesentlichen aus einer Lichtquelle und einer in den Hohlraum einzuführenden starren oder biegsamen Röhre. Sie werden als Boreskop oder Fiberskop bezeichnet.

Beide Varianten haben Vor- und Nachteile. Daher ist es zweckmäßig, sich auf einer Fachmesse - z. B. der monumento in Salzburg (Fachmesse für Denkmalpflege und Bauwerkssanierung) - zu informieren und verschiedene Geräte selbst in die Hand zu nehmen und zu testen.

2.4 Bohrwiderstandsmessung (Resistographie)

Dieses Verfahren eignet sich gut zur Feststellung von Fäulnisschäden. Ursprünglich wurde es entwickelt, um lebende Bäume - z. B. Eschen oder Buchen mit Kernfäule - an Verkehrswegen oder in Parkanlagen auf Standfestigkeit zu prüfen. Es beruht auf Unterschiede in der Dichte des Holzes, was auf eine beginnende bzw. bereits vorhandene Zerstörung durch holzabbauende Pilze hinweist. Neben solchen Fäulnisschäden können größere Schwindrisse (Breite > ca. 3 mm) gut erkannt werden. Des Weiteren ist es möglich, die Abmessungen von verdeckten Bauteilen zu ermitteln (z. B. Zapfenverbindung). Gerne werden auch im Mauerwerk eingebaute Balkenköpfe mittels eines aufgesetzten 45°-Winkeladapters bohrtechnisch untersucht.

Ungeeignet ist das Verfahren zur Detektion von holzzerstörenden Insekten. Insbesondere müssen hier Nagekäfer (Anobien) genannt werden, deren Fraßgänge im Durchmesser (ca. 2-3 mm) dem zur Widerstandsmessung eingesetzten Bohrer entsprechen, und deshalb nicht erkannt werden können.

Die ausgegebenen Bohrprofilbilder sollten noch vor Ort kontrolliert werden, um bei evtl. unklaren Ergebnissen weitere Bohrungen zu erstellen. Die genaue Auswertung erfolgt im Büro mittels geeigneter Software. Dies hat zum Vorteil, dass die Diagramme beliebig vergrößert und somit genauer bewertet werden können. Zudem können die Ergebnisse zur allgemeinen Verständlichkeit besser aufbereitet werden.

Zur verlässlichen Verwendung dieses Verfahrens sollte der Anwender über vertiefte Kenntnisse über den Werkstoff Holz und dessen mögliche Schädigungen verfügen. Zudem sollte er bereits Erfah-

rungen mit Bohrwiderstandsmessungen aufweisen bzw. entsprechende Fortbildungen besucht haben. Oftmals sehr hilfreich, unklare Ergebnisse mit weiteren Fachleuten abzugleichen.

Während der Bohrungen vor Ort, sollten die Parameter (u. a. Bohrneigung, Jahrringlage, stark rissig, usw.) der untersuchten Hölzer dokumentiert werden. Dies kann sich bei der späteren Auswertung zweckdienlich erweisen.

2.5 Dendrochronologie

Mit der Methode der Dendrochronologie werden über die Analyse der Jahrringe sehr gute Ergebnisse bei der Altersbestimmung von Kunstwerken, Bauteilen und Gebäuden erzielt. Sie kann jedoch nur bei Bäumen und Hölzern der gemäßigten Zonen, die in jeder Vegetationsperiode Früh- und Spätholz und damit die charakteristischen Jahrringe ausbilden, angewendet werden. Die Jahrringe verschiedener Bäume einer Art weisen innerhalb eines Waldes aber auch in größeren Wuchsgebieten auffällige Übereinstimmungen auf. Es gibt charakteristische Jahrringfolgen, so genannte Jahrringmuster. Sie sind heute in digitalen Dateien, so wie in der Kriminaltechnik die Fingerabdrücke, niedergelegt und werden dann mit den Jahrringabfolgen entnommener Proben verglichen. Beispielsweise konnte man genau ermitteln, wann und wo die Bäume für die Bremer Kogge, die im Deutschen Schifffahrtsmuseum in Bremerhaven steht, gefällt wurden.

Abbildung 4: Entnahme eines radialen Bohrkerns für die Jahrringanalyse

2.6 Bestimmung der Klebstofffugenqualität

Bei verklebten Bauteilen (Brettschichtholzkonstruktionen) können Risse auch auf Probleme in der Klebstofffuge (Delaminierungen, Fehlverklebungen, etc.) Hinweise geben. Um dies festzustellen, müssen die Rissbreiten und -tiefen aufgenommen und zusätzlich Kernproben in ausreichender Anzahl entnommen werden, damit die Klebstofffugengüte im Labor durch eine Scherprüfung gemäß EN 392 und EN 386 festgestellt und beurteilt werden kann.

Dieses Verfahren eignet sich gut zur qualitativen Bestimmung der Klebstofffugenqualität. Ursprünglich wurde das Verfahren zur laufenden Qualitätsüberwachung in der Brettschichtholzproduktion entwickelt. Es eignet sich jedoch darüber hinaus auch zur Beurteilung der Klebstofffugenqualität von Brettschichthölzern im Bestand.

Im Rahmen der Scherprüfung wird die Klebstofffuge einer Scherbeanspruchung bis zum Bruch ausgesetzt. Die Versuchsdurchführung ist gemäß EN 392 vorgegeben. Die Belastung ist weggesteuert mit gleichbleibender Geschwindigkeit so aufzubringen, dass der Bruch nach ungefähr 20 sec erfolgt. Zu ermittelnde Kennwerte sind die Bruchlast Fmax in [N] und der Faserbruchanteil in [%] (siehe Abbildung 5). Die Auswertung erfolgt gemäß EN 386.

Abbildung 5: Prüfkörper nach Scherprüfung mit ca. 80 % Faserbruchanteil

2.7 Mobiles Röntgen

Die mobile Röntgenblitzröhre (siehe Abbildung 6) ermöglicht den Blick ins Bauteilinnere mit einer sehr guten Darstellung eines vergleichsweise großen Messbereichs. Das Röntgenverfahren arbeitet zerstörungs- und quasi kontaktfrei. Durch den mobilen Einsatz der Röntgen- sowie Auswertetechnologie mittels eines Scanners ist eine in-situ Anwendung, Auswertung und Bewertung an bestehenden Konstruktionen möglich.

Beim Röntgen wird der Testkörper mit Röntgenstrahlung durchleuchtet. Unterschiedliche Materialien bzw. Materialdichten absorbieren die Strahlung verschieden stark. Die mobile Röntgenblitzröhre projiziert wie das herkömmliche Röntgenverfahren (Radiologie) das Volumen eines Körpers auf eine Fläche. Dabei gehen dreidimensionale Informationen weitestgehend verloren.

Die Röntgenblitzröhre arbeitet mit weniger Energie und mit einer deutlich tieferen Strahlungsbelastung als die stationären Röntgengeräte. Sie ist deshalb für den Praxiseinsatz wesentlich besser

geeignet. Die Strahlungsquelle ist nur direkt während des Auslösens aktiv. Nach diesem Vorgang - der nur wenige Sekunden dauert - ist keine Strahlenbelastung mehr vorhanden. Das Prüfobjekt speichert hierbei keine Strahlung.

Abbildung 6: Mobile Röntgenblitzröhre im Labor

Die Umgebung der Röntgenblitzröhre ist im Praxiseinsatz abzusperren. Ein Abstand von 30 m vor, 11 m neben und 3 m hinter der Blitzröhre reichen als Sicherheitsabstand aus. Die Bearbeiter tragen zusätzlich während der Arbeiten ein persönliches Dosimeter, welches monatlich durch eine externe Stelle ausgewertet wird.

In Abbildung 7 ist eine Schlitzblechverbindung in unterschiedlichen Laststufen dargestellt. Neben der Holzstruktur und den Ästen ist insbesondere die Ausbildung der Fließgelenke bei den Stabdübeln gut zu erkennen.

Abbildung 7: Röntgenaufnahme einer Schlitzblechverbindung in unterschiedlichen Laststufen

In Abbildung 8 ist die Röntgenaufnahme eines Dübelbalkens dargestellt. Die Schubverbindung ist mittels Schwalbenschwanzdübel aus Eiche ausgebildet. Die Dichteunterschiede der Holzarten Eiche und Fichte sind sehr gut zu sehen. Ebenfalls sind die einzelnen Brettschichtholzlamellen gut sichtbar. Auch der feine Luftspalt um den Schwalbenschwanz ist deutlich zu erkennen.

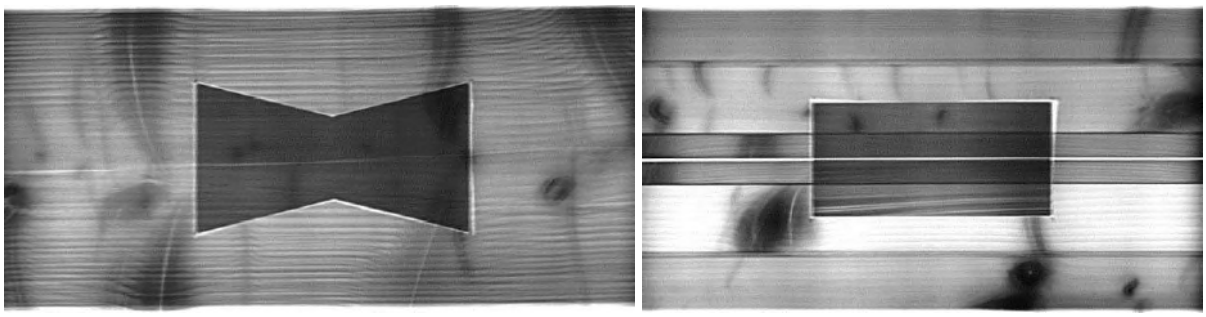

Abbildung 8: Röntgenaufnahme (Draufsicht/Seitenansicht) eines Dübelbalkens mit Hartholzdübel

Literaturverzeichnis

Bächle, F. et al., 2007. *Zerstörungsfreie Werkstoffprüfung im Bauwesen,* s. l.: ETH Zürich.

Müller, A., 2008. *Methoden der Zustandserfassung bei Bauwerken aus Holz.* Biel , Holzbautag.

Steiger, R., 2002. *Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung.* Raperswil, EMPA/HSR-Tagung.

Vogel, M. & Scharmacher, F., 2012. *Mobiles Röntgen zur Qualitätskontrolle im Holzbrückenbau.* Bad Wörishofen, 2. Internationales Holzbrückenforum.

Vogel, M. et al., 2009. *Überprüfungsmethoden geschädigter Holzkonstruktionen. Methoden und Nachweisverfahren zur manuellen Überprüfung geschädigter oder gefährdeter Gebäude und Tragkonstruktionen in Holzbauweise,* Biel: Berner Fachhochschule Architektur, Holz und Bau.