

Ingenieurholzbau Karlsruher Tage

Forschung für die Praxis

5. und 6. Oktober 2006

2006

Tagungsband



Universität Karlsruhe (TH)
Forschungsuniversität · gegründet 1825

Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen

in Zusammenarbeit mit



Alle Rechte sind vorbehalten, auch die des auszugsweisen Nachdrucks oder der Vervielfältigung, Übersetzung, Mikroverfilmung, der Speicherung in elektronischen Systemen sowie der Verbreitung im Internet.

Für den Inhalt der Vorträge sind ausschließlich die Verfasser verantwortlich.

Veranstalter:

Universität Karlsruhe, Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
in Zusammenarbeit mit
Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG, Karlsruhe

Herausgeber:

Bruderverlag, Albert Bruder GmbH & Co. KG
Bismarckstraße 21
76133 Karlsruhe
Telefon: ++49(0)721/91388-0, Fax: ++49(0)721/91388-99
E-Mail: red.bauenmitholz@bruderverlag.de
Bestell-Nr. 5294
Layout und Produktion: Werner Lieber, Marina Vasilj
Druck: GREISERDRUCK GmbH & Co. KG, Rastatt

Tagungsprogramm

Donnerstag, 05. Oktober 2006

- 13:00 Eröffnung und Begrüßung
- 13:15 Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen: Eine Bestandsaufnahme
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter, München
- 14:10 Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen: Schlussfolgerungen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, München
- 15:05 Kaffeepause
- 15:45 Brettschichtholz aus Buche – ein leistungsfähiger Baustoff
Dr.-Ing. Matthias Frese, Karlsruhe
- 16:40 Druckrohrleitungen aus Holz – ein Bericht aus indonesischen Karsthöhlen
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß, Karlsruhe
- 17:35 Was darf verwandt werden Ü, CE? –
Umsetzung der Bauproduktenrichtlinie und Bedeutung der Bauregelliste
Dipl.-Ing. Hubertus Quitt, Berlin
- 20:00 Gemütliches Beisammensein im Hoepfner Burghof mit Buffett

Freitag, 06. Oktober 2006

- 9:00 Erdbebenbemessung im Holzbau nach DIN 4149:2005
Dipl.-Ing. Helmut Zeitter, Wiesbaden
- 9:45 Eignung einer Holzkonstruktion für eine Extremsituation – Die Wildbrücke
in Wilmshagen
Dr.-Ing. Karl Kleinhanß, Berlin
- 10:30 Kaffeepause
- 11:00 Untersuchung von Brettschichtholzkonstruktionen –
Ermittlung verdeckt liegender Schäden (Bohrwiderstandsmessung)
Dipl.-Phys. Frank Rinn, Heidelberg
- 11:45 Wärmetransport durch Strahlung bei Bauwerken –
kaum beachtetes Potenzial für Mängel, z. B. bei Eissporthallen
Prof. Dr. Phys. Franz Feldmeier, Rosenheim
- 12:45 Schlusswort

Vorwort

Forschung – Praxis – Sicherheit

Forschung im konstruktiven Bereich des Bauwesens ist naturwissenschaftlich. Den Weg in die Praxis finden Forschungsergebnisse durch die Beschreibungen der Randbedingungen, unter denen die gefundenen Naturgesetzmäßigkeiten noch ausreichend zutreffend angewandt werden können. Das nennt man dann Ingenieurwesen, im Wesentlichen eine die Zukunft vorhersagende Disziplin. „Stand sicherheitsnachweise“ sind eigentlich „Vorhersagen über die Standsicherheit“. In ihnen steht, wenn du mit dem Material dies und das tust, hält das unter diesen und jenen Beanspruchungen unter den beschriebenen Randbedingungen so und soviel und so und so lange aus. Bestandteile dieser Vorhersagen sind:

- Unwägbarkeiten bei Naturereignissen (Wind, Schnee, Hochwasser, Erdbeben usw.),
- technische Ungenauigkeiten (Streuungen der Materialkennwerte, Maßtoleranzen usw.),
- durch Menschen unabsichtlich verursachte Ungenauigkeiten,
- Sicherheitsabstand gegenüber Versagen und Untauglichkeit.

Die zwei erstgenannten Punkte lassen sich technisch-mathematisch fassen und beschreiben. Die menschlichen Abweichungen vom Soll lassen sich regeln und feststellen und daher in Form von Abnahmen, Überwachungen usw. definieren. Die letzte Vorhersage ist der Vergleich des technisch-statistisch, theoretisch vorgegebenen Soll-Zustandes mit dem gesellschaftlich gewünschten bzw. geforderten Sicherheits- und Behaglichkeitsniveau. Bei uns wird dieses von der Gesellschaft vorgeschrieben und darüber hinaus mit dem Bauherrn vereinbart.

Bauvorschriften sind somit auch gesellschaftlicher und nicht nur technischer Natur. Die Bauvorschriften – nicht überall auf der Welt gibt es solche – bedienen sich der technischen Ausdrucksweisen und

Dokumentationen, stellen jedoch nie Naturgesetze dar. Die Technik steht somit ständig im Spannungsfeld zwischen Naturgesetzmäßigkeiten, die die Forschung findet und beschreibt, und gesellschaftlichen Ansprüchen, die die Bauaufsicht und Bauherren erfüllt wissen wollen. So lange Technisches nicht versagt, stehen Techniker grundsätzlich im Verdacht, zu sicher und damit zu teuer geplant zu haben. Versagt es, so ist klar, dass irgendetwas falsch war, denn die geforderte oder vereinbarte Funktionalität ist nachweislich nicht mehr da. Der Sicherheitsabstand ist nur in Grenzsituationen sichtbar, ansonsten im Verborgenen.

Dadurch, dass Techniker mit Wissen aus der Forschung, das sie selbst nicht erfahren (erforscht) haben, in Kombination mit Werkstoffen, deren Eigenschaften lediglich behauptet werden, Konstruktionen bilden, sind sie auf Vertrauen angewiesen. Sie vertrauen darauf, dass die Forschungsergebnisse richtig sind und richtig an sie weitergegeben wurden. Sie vertrauen darauf, dass der eingesetzte Werkstoff tatsächlich das ist, was auf dem Lieferschein steht. Sie vertrauen darauf, dass von den Plänen nicht abgewichen wird. Und sie vertrauen darauf, dass sie selbst alle wesentlichen Aspekte berücksichtigt haben. Diese Fragen führen beständig zu der Konfliktfrage: „Kann ich darauf vertrauen?“. Im Versagensfalle wird geprüft, wer etwas Falschem vertraut hat (sofern er nicht vorsätzlich Falsches gewollt hat).

„Aus der Forschung für die Praxis“ will einen Beitrag dazu leisten, dass durch Darlegung von Hintergründen die Beurteilung der Glaubwürdigkeit von technisch Benutztem und Eingesetzten leichter fällt. „Damit Sie zuverlässiger vertrauen können“, wünschen sich für die „Karlsruher Tage“

Hans-Joachim Blaß
Klaus Fritzen

Inhaltsverzeichnis

1	Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen – Bestandsaufnahme; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter, München	
	1. Einleitung.....	7
	2. Der Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall	7
	3. Beobachtungen bei anderen Halleneinstürzen bzw. Hallenschäden	11
	4. Zusammenfassung.....	14
2	Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen: Schlussfolgerungen; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger, München	
	1. Einleitung.....	17
	2. Schnee Anfang 2006	17
	3. Schäden und Ursachen	18
	4. Bauwerksüberprüfung	21
	5. Bohrkern.....	21
	6. Leitfäden, Empfehlungen	21
	7. Zusammenfassung.....	22
3	Brettschichtholz aus Buche – ein leistungsfähiger Baustoff; Dr.-Ing. Matthias Frese, Karlsruhe	
	1. Einleitung.....	29
	2. Buchenholz – Allgemeines	29
	3. Festigkeitswerte von Buchenbrettschichtholz – wissenschaftlicher Hintergrund	30
	4. Herstellung und praktische Hinweise	37
	5. Zusammenfassung und Ausblick.....	38
	6. Literatur	39
4	Druckrohrleitungen aus Holz – ein Bericht aus indonesischen Karsthöhlen; Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß, Karlsruhe	
	Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz.....	41
	Wirkungsweise von Kleinwasserkraftwerken	42
	Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz	43
	Experimentelle Untersuchungen.....	44
	Umsetzungskonzept.....	45
	Literatur.....	45
5	Erdbebenbemessung im Holzbau nach DIN 4149:2005; Dipl.-Ing. Helmut Zeitter, Wiesbaden	
	1. Einleitung.....	47
	2. DIN 4149:2005	48
	3. Die Regeln für den Holzbau	53
	4. Ausblick.....	53
6	Eignung einer Holzkonstruktion für eine Extremsituation – Die Wildbrücke in Wilmshagen; Dr.-Ing. Karl Kleinhanß, Berlin	
	1. Die Aufgabe	57
	2. Die Idee	57
	3. Das Tragwerk	58
	4. Konstruktive Fragen der Holzbauweise	58
	5. Vorzugslösung	59
	6. Die Abdichtung	59

7.	Der Schutz vor Schädlingen, Brand und Fahrzeuganprall	60
8.	Die Bauausführung	60
9.	Die bisherigen Erfahrungen	60
10.	Die Perspektiven	61
7	Untersuchung von Brettschichtholz – Ermittlung auch verdeckter Schäden mit Bohrwiderstandsmessungen; Dipl.-Phys. Frank Rinn, Heidelberg	
	Zusammenfassung	63
	Ausgangslage	63
	Wesentliche Schritte der Untersuchung	63
	Unabdingbare Vorarbeiten	64
	Erstellung oder Korrektur eines Bestandsplans	64
	Koordinatensystem	64
	Bestandsplanerstellung	64
	Vom Detail zur Übersicht	64
	Untersuchung der Konstruktion	65
	Struktur und Abfolge der Holzprüfung	65
	Herkömmliche Holzprüfung („Gucken und Klopfen“)	66
	Holzfeuchtemessung	66
	Nadel-Bohrwiderstandsmessungen	67
	Schall-Laufzeitmessungen	74
	Vorsichtige Interpretation	75
	Einige Besonderheiten von Brettschichträgern	75
	Optimierte Darstellung: Farbe statt Text	75
	Legende	77
	Vom Schaden zum Zustand	77
	Ampelfarben?	77
	Konsequenzen	79
	Nicht nur hohe Einsparung	79
	Umwälzung für alle Beteiligten	80
	Praxiserfahrungen	80
	Ausblick	80
	Literatur	81
8	Was darf verwandt werden Ü, CE? – Umsetzung der Bauproduktenrichtlinie und Bedeutung der Bauregelliste; Dipl.-Ing. Hubertus Quitt	
	Einführung	85
	Bauordnung	85
	Technische Baubestimmungen	87
	Die Bauregelliste (BRL)	88
	Übereinstimmungsnachweis	90
	Einfluss europäischer Regelungen auf das Nationale Baurecht	91
9	Wärmetransport durch Strahlung bei Bauwerken – kaum beachtetes Potenzial für Mängel, z. B. bei Eissporthallen; Prof. Dr. Phys. Franz Feldmeier, Rosenheim	
	1. Einleitung	97
	2. Grundlagen	97
	3. Überdachung einer Eisfläche	99
	4. Fazit	101
	Info 1 Wärmestrahlung	102
	Info 2 Wärmetransport durch Strahlung	106
	Info 3 Tauwasser	109

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter



Technische Universität München
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion
Arcisstr. 21
80333 München
Tel.: 089 289-22416
Fax: 089 289-23014
E-Mail: winter@bv.tum.de

- 1982 – 1987 Studium des Bauingenieurwesens an der TU München und TU Darmstadt
 - 1987 – 1990 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Stahlbau und Werkstoffmechanik und am Institut für Massivbau der TU Darmstadt
 - 1990 – 1993 Leitung und Geschäftsführung des Instituts des Zimmerer- und Holzbau-gewerbes, Darmstadt
 - 1993 Gründung der bauart Konstruktions GmbH
 - 1993 – 2003 Fachberatung für Hessen der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V., Düsseldorf
jetzt INFORMATIONSDIENST HOLZ
 - 1998 Promotion an der TU Darmstadt
 - Seit 2000 Öffentlich bestellter und vereidigter Sachverständiger für Holzbau bei
der IHK Gießen-Friedberg
 - 2000 – 2003 Inhaber des Lehrstuhls für Stahlbau und Holzbau der Universität Leipzig
 - Seit 2001 Geschäftsführender Gesellschafter der MFPA Leipzig GmbH
 - Seit 2003 Ordinarius für Holzbau und Baukonstruktion an der Technischen
Universität München
 - Seit 2006 Prüfenieur für Baustatik, Fachrichtung Holzbau
- Mitglied in verschiedenen nationalen und europäischen Normungsgremien, u. a.
Vorsitzender des Spiegelausschuss Holzbau des DIN NABau

Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen

Bestandsaufnahme

1. Einleitung

Das Jahr 2006 begann mit einigen Ereignissen, die das Bauwesen nachhaltig erschütterten. Deutschland war zunächst durch den Einsturz der Eissporthalle Bad Reichenhall betroffen. Der Einsturz dieses weitgespannten Holztragwerkes lenkte gleichzeitig die besondere Aufmerksamkeit auf Holzkonstruktionen. Kurz nach dem Unglück von Bad Reichenhall bzw. nahezu zeitgleich fanden eine Reihe weiterer Einstürze von weitgespannten Tragwerken statt. In Deutschland kamen dabei – Gott sei Dank – keine weiteren Menschen ums Leben, im Nachbarland Polen forderte jedoch der Einsturz der Messehalle in Kattowitz, einer Stahlkonstruktion, weitere Todesopfer. Die tragischen Ereignisse schreckten sowohl die Öffentlichkeit als auch die Betreiber von Hallentragwerken auf und führte in der Folge zu einer Vielzahl von Überprüfungen weitgespannter Tragwerke. Nachfolgend werden Ursachen von Einstürzen bzw. Schäden an weitgespannten Holztragwerken genannt, die bei der Bearbeitung einer Vielzahl von Schadensfällen (auch vor Jahresbeginn) und der Bearbeitung des Gutachtens zur Eissporthalle Bad Reichenhall besonders auffällig waren.

Durch die tragischen Ereignisse zu Jahresbeginn wurde der Öffentlichkeit und den Betreibern bewusst, dass auch Gebäude im Grundsatz eine technische Anlage sind und wie alle technischen Anlagen ausreichender Wartung und Überprüfung und ggf. Instandsetzung bedürfen. In einem durch die TU München koordinierten Projekt wurden bisher beispielsweise 45 Tragwerke, teilweise in Mischbauweise, untersucht. Von diesen 45 Tragwerken erfordern zwei Tragwerke sofortige Maßnahmen (Sperrung und Ersatzvornahme), bei 19 Tragwerken wurde eine Sanierung noch vor dem Winter bzw. entsprechende Beschränkungen der Schneelasten empfohlen, bei 14 der Tragwerken sind kleinere Reparaturen notwendig und bei 10 Tragwerken zum Teil neueren Baudatums wurden keinerlei Mängel oder Schäden festgestellt.

Dieses Ergebnis zeigt, dass zwar die Bemerkung eines renommierten Kollegen, dass „die Bundesrepublik bezüglich ihres Gebäudebestandes auf dem Weg in die DDR vor der Wende ist“, sicher überzeichnet ist. Das Ergebnis zeigt aber auch, dass dringender Handlungsbedarf durchaus gegeben ist.

2. Der Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall

Nachfolgend wird der zwischen den Hauptgutachtern zum Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall (TU München und TÜV Süd) und der Staatsanwalt in Traunstein vereinbarte Presstext bezüglich der technischen Sachverhalte unverändert wiedergegeben. Der Verfasser bittet um Verständnis, dass mit Blick auf das laufende Verfahren keine abweichende Texte zu veröffentlichen sind. Die einzelnen Punkte der Presseerklärung werden daher nur durch einige erläuternde Bilder ergänzt.

„Feststellungen der Sachverständigen:

Die vorgelegten Gutachten der beiden Hauptgutachter der Technischen Universität München und des TÜV-Süd basieren auf umfangreichen Untersuchungen vor Ort unmittelbar nach dem Schadenseintritt sowie nachfolgenden Untersuchungen an sichergestellten Bauteilen. Die Sachverständigen haben u. a. Teile aus unbeschädigten Resten des Tragwerks entnommen und die charakteristischen Festigkeiten der verwendeten Einzelbauteile ermittelt.

Die beiden Hauptgutachter kommen dabei im Wesentlichen zu den gleichen Ergebnissen. Insbesondere wird übereinstimmend festgestellt, dass der Einsturz des Dachtragwerkes der Eissporthalle Bad Reichenhall nicht auf eine Einzelursache, sondern auf die Verkettung mehrerer Mängel und Schäden zurückzuführen ist.

Im Einzelnen sind die Sachverständigen zu folgenden Feststellungen gelangt:

1. Bauweise

Die in den Jahren 1971/1972 errichtete Eissporthalle Bad Reichenhall war ein Bauwerk mit ca. 75 m Länge und ca. 48 m Breite. Das Dach wurde durch 2,87 m hohe Hauptträger getragen, die in Holzbauweise als Kasten erstellt waren. Dabei handelte es sich um eine Sonderkonstruktion. Die Kastenträger waren mit Ober- und Untergurten aus Brettschichtholz sowie aus seitlichen Stegplatten in so genannter „Kämpfstegbauweise“ hergestellt, wobei die 48 m langen Gurte aus drei 16 m langen Teilen bestanden, die mit so genannten Universal-Keilzinkungen gestoßen waren. Für die

Kämpfstegbauweise lag eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung vor, die jedoch die Bauhöhe der daraus hergestellten Träger auf 1,20 m beschränkte.

2. Abweichung von der zugelassenen Bauweise

Bei der Eissporthalle in Bad Reichenhall hat man bei Planung und Ausführung gegen wesentliche Regelungen der allgemeinen Zulassung für die Kämpfstegbauweise verstoßen und den damals vorliegenden Erfahrungsbereich verlassen. Insbesondere wurde die maximale Trägerhöhe von 1,20 m laut Zulassung bei der Bauweise der Eissporthalle Bad Reichenhall mit einer Trägerhöhe von 2,87 m Höhe weit überschritten. Eine beantragte Erweiterung der Zulassung auf die geplante Bauweise mit Kastenträger ohne Höhenbegrenzung war im Jahr 1971 vom Institut für Bautechnik nicht erteilt worden.

Für die Ausführung der Sonderkonstruktion wäre deshalb eine so genannte „Zustimmung im Einzelfall“ der Obersten Baubehörde des Freistaates Bayern erforderlich gewesen. Entsprechend bisherigen Erkenntnissen wurde eine solche Zustimmung durch die Baubeteiligten nicht beantragt und lag nicht vor.



Bild 1: Eishalle Bad Reichenhall



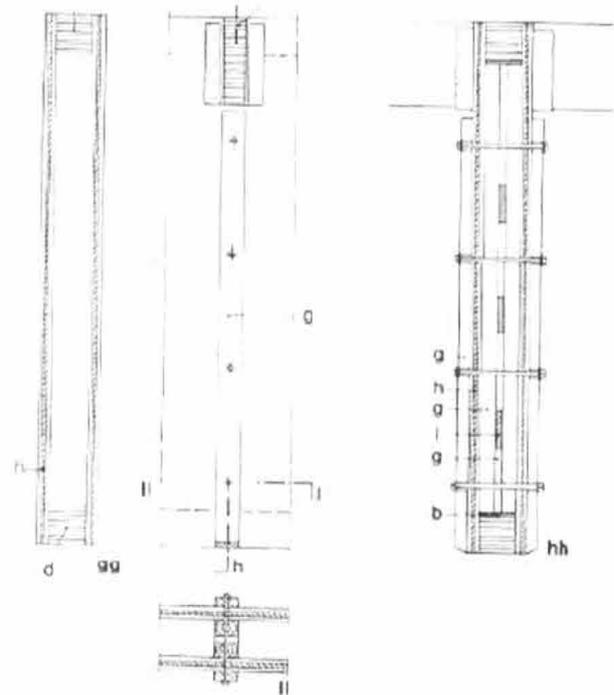
Bild 2: Teilansicht des eingestürzten Tragwerks

3. Keine Prüfung der statischen Berechnung

Eine von einem Prüfingenieur geprüfte statische Berechnung des Daches der Eissporthalle konnte bislang trotz intensiver Recherchen nicht gefunden werden. Ohne eine solche geprüfte Statik hätte das Bauwerk nicht errichtet werden dürfen.

4. Keine ungewöhnliche Schneelast

Die in der statischen Berechnung angesetzte maximale Schneelast von 150 kg/qm war zum Unfallzeitpunkt nicht überschritten. Eine rechnerische Überbeanspruchung aufgrund äußerer Lasten zum Zeitpunkt des Einsturzes lag damit unter Voraussetzung der üblichen Bauwerkssicherheiten nicht vor und das Gebäude hätte deshalb aufgrund der vorhandenen Schneelast nicht einstürzen dürfen.



c – Obergurt BS-Holz 200 x 200 mm², d – Untergurt BS-Holz 200 x 200 mm², h - Kämpfstegplatte 65 x 2870 mm², k – Pfette, g – Verstärkungen (Beulsteife)

Bild 3: Querschnitt der Träger der Eissporthalle (entnommen aus [1])

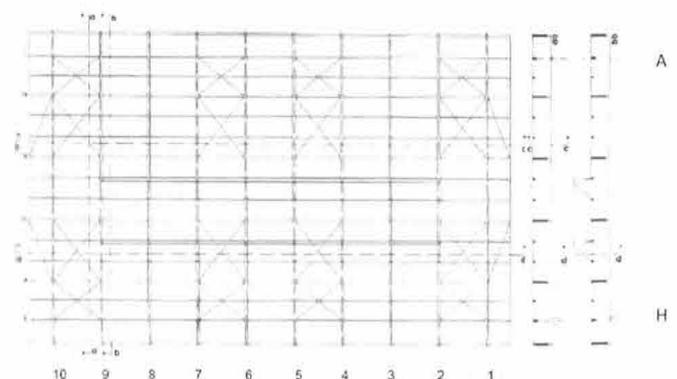


Bild 4: Grundriss der Halle und Seitenansicht der Träger (entnommen aus [1])



Bild 5: Kämpfstegträger mit $h = 2,87 \text{ m}$

5. Fehler in der statischen Berechnung

Die Überprüfung der nach bisherigen Erkenntnissen nicht geprüften statischen Berechnung ergab, dass zwei nennenswerte Fehler bzw. Versäumnisse vorhanden sind. Die Zugspannungen im Schwerpunkt der Gurte wurden nicht nachgewiesen. Hierdurch wurde das Tragverhalten der Gurte zu hoch bewertet. Auch die Schwächung der Konstruktion infolge der Stöße von Gurten und Stegen mit so genannten Universalkeilzinkungen wurde in der statischen Berechnung nicht berücksichtigt. Diese Fehler und Versäumnisse führten zu einer deutlichen Überbewertung des statischen Tragverhaltens der Deckenträger. Somit war die notwendige Bauwerksicherheit von mindestens 2,0 nicht vorhanden. Die Bauwerksicherheit beinhaltet eine mögliche Überschreitung der Last, die Bauwerkalterung und geringfügige Abweichungen bei Planung und Herstellung. Vergleichsrechnungen der Gutachter unter Verwendung der zum Zeitpunkt der Errichtung der Eissporthalle Bad Reichenhall geltenden technischen Regeln haben gezeigt, dass die rechnerische Sicherheit zum Zeitpunkt der Errichtung der Halle unter Berücksichtigung aller Randbedingungen und Nachweise lediglich in der Größenordnung von etwa 1,5 lag.

6. Verwendung von Harnstoffharzklebstoffen

Die Hauptträger des Dachtragwerks wurden überwiegend unter Verwendung eines Harnstoff-Formaldehyd-Klebstoffes hergestellt. Die Verwendung dieses Klebstoffes für tragende Bauteile war auch nach den damals bestehenden technischen Regelungen nur in einem trockenen Umgebungsklima zulässig.

Nach heutigem Wissensstand sind Harnstoffharzleime für die Verleimung tragender Bauteile in Eishallen nicht geeignet, da sie nicht dauerhaft feuchtebeständig sind. Unbeheizte und nicht klimatisierte Eishallen weisen für feuchteempfindliche Bauteile ein besonders kritisches Klima auf. Die relative Luftfeuchtigkeit in solchen Hallen ist in der Regel sehr hoch. Zudem führt die Wärmeabgabe infolge der Wärmestrahlung zwischen Hallendecke und Eisfläche zu einer Unterkühlung und damit zu einer vermehrten Tauwasserbildung an der dem Eis zugewandten Unterseite der Dachkonstruk-

tion. In Bad Reichenhall kam es zudem zu wiederholten Wassereintritten infolge von Undichtigkeiten an der Dachhaut bzw. im Bereich der Dachentwässerung. Keine nachteiligen Auswirkungen hatte nach übereinstimmender Ansicht der Gutachter hingegen das nachträgliche Schließen der zunächst zweiseitig offenen Halle.

Die heutigen Erkenntnisse über die kritischen Feuchtigkeitsverhältnisse in Eissporthallen waren im Jahr 1972 noch nicht vorhanden, sodass der Einsatz von Harnstoffharzleim zur Verleimung der tragenden Bauteile nicht generell gegen den damaligen Stand der Technik verstieß. Auch nach den zur Bauzeit geltenden technischen Regeln hätte für die Verbindungen zwischen Gurten und Stegen wegen der dicken Klebfugen jedoch anstatt des spröden Harnstoffharz-Klebstoffes ein wesentlich elastischerer Resorzinharzleim verwendet werden müssen.

Durch die über Jahre hinweg auftretende Feuchtebeanspruchung in der Eissporthalle Bad Reichenhall wurden die mit Harnstoffharzklebern ausgeführten Klebeverbindungen der Dachkonstruktion erheblich geschädigt. Dies betraf vor allem die Universalkeilzinkenstöße der Untergurte sowie zum Teil die Generalkeilzinkenstöße der Obergurte und die Verklebung zwischen Gurten und Stegen. An den Universalkeilzinkungen der Untergurte war der Kleber zum Teil so geschädigt, dass er bis in eine Tiefe von 5 cm bis 8 cm keine Klebewirkung mehr hatte.

Die feuchtigkeitsbedingte Schädigung der Klebeverbindungen der Dachkonstruktion stellt eine wesentliche Ursache für den Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall dar.

7. Mängel der Konstruktion der Hauptträger

Der Herstellungsvorgang der Kastenquerschnitte der Hauptträger durch Blockverleimung zwischen Stegen und Gurten entsprach nicht den damaligen allgemein anerkannten Regeln der Technik. Ebenso muss die Herstellung der vertikalen Universalkeilzinkenstöße der Stegplatten als schwierig und wenig robust angesehen werden. Die Qualität der Klebstoffjungen war

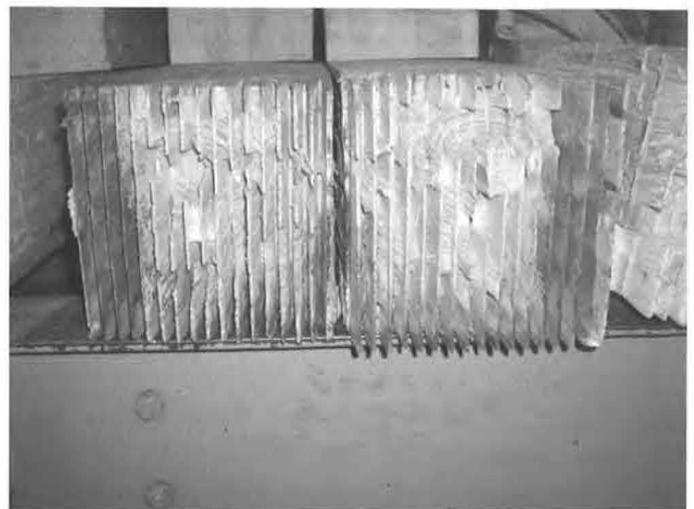


Bild 6: Durch Wassereintritt geschädigter Generalkeilzinkenstoß

unterschiedlich. Hinzu kamen Vorschädigungen der großformatigen Stege aufgrund der wechselnden Feuchtebelastungen.

Diese Konstruktionsmängel waren mit ursächlich für den Einsturz der Halle.



Bild 7: Generalkeilzinkenstoß einer Kämpfstegplatte

gurte und große Fugen an den Stegen vorhanden gewesen sein. Dies hätte für einen Fachmann Veranlassung zu einer vertieften Überprüfung des Zustandes der Tragkonstruktion und der diesbezüglichen bautechnischen Unterlagen geboten.



Bild 8: Geschädigte Fuge Steg-Gurt

8. Beton-Tragkonstruktion

Demgegenüber sind die vorhandenen Setzungen der Beton-Tragkonstruktion der Eissporthalle, die entlang der südlichen Stützenreihe von der Ost- zur Westseite ca. 10 cm betragen, nicht als schadensrelevant anzusehen. Die daraus resultierenden Verformungen der Dachkonstruktion selbst sind so gering, dass auf der Grundlage von Plausibilitätsvergleichen und -vergleichsrechnungen nicht auf eine zusätzliche Zwangsbeanspruchung der Dachkonstruktion geschlossen werden kann.

9. Instandhaltung

Im Hinblick auf die Instandhaltung des Gebäudes wird festgestellt, dass die Ursachen der immer wieder auftretenden Wassereinträge in das Gebäudeinnere der Eissporthalle (Undichtigkeiten an der Dachhaut) nicht dauerhaft beseitigt wurden und während der Dauer der Hallennutzung kein Renovierungsanstrich der hölzernen Dachkonstruktion erfolgte.

Ob derartige Maßnahmen die feuchtigkeitsbedingte Schädigung der Klebeverbindungen der Dachkonstruktion wesentlich verzögert hätten, kann derzeit nicht mit ausreichender Sicherheit beantwortet werden.

Eine fachgerechte Überprüfung zur Standsicherheit der Dachkonstruktion ist nicht dokumentiert. Dabei wäre zu berücksichtigen gewesen, dass es sich um eine Sonderkonstruktion handelt. Weiterhin müssen auch vor Jahren schon Anzeichen für eine Schädigung der Verklebungen zwischen Gurten und Stegen sowie an den Universalkeilzinkenverbindungen der Unter-

Zusammenfassung:

Zusammenfassend sind die Einsturzursachen wie folgt zu beschreiben:

Die infolge von Fehlern der statischen Berechnung und konstruktiver Mängel ohnehin zu geringe Bauwerkssicherheit von deutlich weniger als 2,0 wurde über die Standzeit des Gebäudes durch äußere Einflüsse, insbesondere die Verschlechterung der Klebeverbindungen an den Untergurten, stetig weiter reduziert, bis es am 02. 01. 2006 – ausgelöst durch die Schneelast – zum Einsturz der Halle kam.

Nach den Erkenntnissen der Sachverständigen versagte einer der drei ostseitigen Hauptträger zuerst. Durch die steifen Querträger wurden die Lasten von dem zuerst versagenden Träger auf benachbarte Träger umgelagert. Diese bereits vorgeschädigten Träger wurden damit ebenfalls überlastet, wodurch das gesamte Dach reißverschlusartig einstürzte.“

Im Fall der Eissporthalle Bad Reichenhall handelte es sich um ein so genanntes progressives Kollapsverhalten, d. h. das Versagen eines einzelnen Hauptträgers konnte durch die sehr steife Querträgerkonstruktion infolge der eintretenden Kettenreaktion zum Einsturz des gesamten Hallentragwerks führen.

Zum Einsturz der Eissporthalle in Bad Reichenhall ist besonders zu betonen, dass es sich um eine Sonderkonstruktion handelte, die mit herkömmlichen weitgespannten Brettschichtholztragwerken in keiner Weise zu vergleichen ist.

3. Beobachtungen bei anderen Halleinstürzen bzw. Hallenschäden

Bei den Untersuchungen unterschiedlichster, anderer Hallenkonstruktionen kristallisierte sich eine Anzahl weiterer wesentlicher Schadensursachen heraus:

Die Auswirkungen der jeweiligen Schäden sind dabei höchst unterschiedlich gewesen. Teilweise führten sie zu einem Einsturz oder Teileinsturz der Gebäude, teilweise zu erhöhten Verformungen, zum Teil wurden aber außer dem erscheinenden Rissbild keinerlei negative Veränderungen an der Gesamtkonstruktion verursacht. Letzterer Fall trat insbesondere immer dann ein, wenn die tatsächlich auftretenden Lasten deutlich unterhalb der maximalen Bemessungslasten blieben.

Nachfolgend werden Schäden an Holzkonstruktionen beschrieben. Es ist aber mit Nachdruck festzuhalten, dass bei bekannt gewordenen Einstürzen lediglich in der Hälfte der Fälle eine reine Holzkonstruktion betroffen war bzw. das Versagen in unmittelbarem Zusammenhang mit dem Werkstoff Holz stand. In allen anderen Fällen waren Hallen aus anderen Materialien (Stahl und Stahl-Beton) betroffen oder der Einsturz einer Holzkonstruktion konnte eindeutig auf reines Stahlversagen zurückgeführt werden.

Ebenso ist festzuhalten, dass in den allerwenigsten Fällen die Bemessungsschneelasten wesentlich überschritten wurden. Wie in Bad Reichenhall kommen Schneelasten allenfalls als Auslöser in Betracht.

Materialfehler

Bei einigen Hallentragwerken wurden eindeutige Materialfehler, insbesondere bei Brettschichtholz festgestellt. In einigen wenigen Fällen konnte festgestellt werden, dass die Verklebung von Beginn an unzureichend war. Hier handelt es sich um sehr seltene Ausnahmefälle! Häufiger war bei den Konstruktionen eine auffällige Ringschale der Lamellen anzutreffen, die in Verbindung mit Schub- oder Querkzugbeanspruchungen schadensauslösend sein können.



Bild 9: Beispiel für ringschälige Lamelle

Zusätzlich fanden sich in zwei Fällen heute unzulässige Keilzinken-Lamellenstöße mit so genannten „Minizinken“ der Länge $l \leq 7,5$ mm (Bild 10), die zum Gesamtversagen der Tragwerke wesentlich beitragen, da der Bruch jeweils von Minizinke zu Minizinke lief und dazwischen ein Schubversagen, in einem Fall begünstigt wiederum durch Ringschale, eintrat.

Diese Art der Lamellenzinkung wurde allerdings in den 70iger-Jahren nur in einem relativ kurzen Zeitraum angewendet, in den 80iger- und 90iger-Jahren nach den Informationen des Verfassers überhaupt nicht mehr.

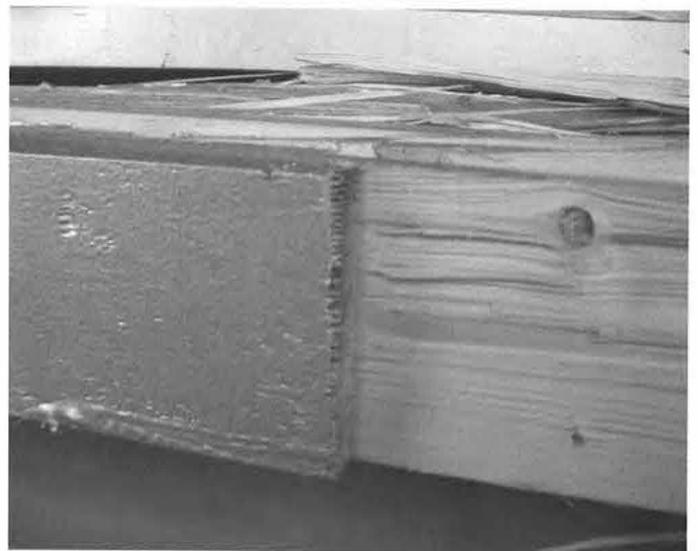


Bild 10: Minizinke der Länge $l \leq 7,5$ mm

Eine wesentliche Schadensursache im Bereich des Brettschichtholzes stellt auf jeden Fall die Verwendung ungeeigneten Klebstoffes dar. Die Untersuchungen nach dem Unglück von Bad Reichenhall aber auch andere wissenschaftlich basierte Untersuchungen [2] sowie die Regelungen der Holzbaubemessungsnormen (spätestens seit DIN 1052:1969) weisen darauf hin, dass Harnstoffharzklebstoffe bei Umgebungsrandbedingungen mit höheren Feuchteinwirkungen nicht zu verwenden sind. Diese Harnstoffharzklebstoffe sind auch im ausgehärteten Zustand durch Hydrolyse wieder zersetzbar. Je höher das Feuchteangebot, insbesondere tropfbares Wasser, ist und je höher die Temperaturen sind, um so rascher können die Klebstoffugen wesentlich an Festigkeit verlieren. Hinzu kommt, dass bei jahreszeitlich bedingt schwankenden Holzfeuchten die auftretenden Querkzugspannungen infolge der Trocknungsgefälle über die Querschnitte hinweg durch die spröden Harnstoffharzklebstoffugen nicht oder im Vergleich zu anderen Klebstoffen schlechter aufgenommen werden können.

Zusätzlich sind in einigen wenigen Fällen Verklebungsfehler aufgetreten, die nach Auffassung des Verfassers auf eine fehlende Feinabstimmung zwischen Klebstoff, Verklebungsvorgang und Holzart sowie ggf. Trocknungsfehler zurückzuführen ist. Bild 11 zeigt beispielsweise ein delaminierendes Stück Brettschichtholz aus Lärche.

Querzug

Dass Holz bezüglich Zug quer zur Faserrichtung nur in sehr geringem Umfang beanspruchbar ist, ist hinreichend bekannt. Fehlende Querzugverstärkungen, insbesondere bei gekrümmten Trägern, sind daher bei den untersuchten Tragwerken eine häufige Schadensursache. Bild 5 aus dem Beitrag von Kreuzinger zeigt ein typisches Beispiel.



Bild 11: Delaminierendes Stück Brettstichholz aus Lärche

Querzug entsteht aber auch, wenn durch weit auseinander liegende Verbindungsmittel bzw. Verbindungsmittelgruppen und ein Schwinden des Trägers Querzug indiziert wird. Bild 12 zeigt eine entsprechende Situation bei einem Gerbergelenk-Anschluss mit weit auseinander liegenden Verbindungsmittelgruppen.

Im Wesentlichen liegen also Klebefehler und Ringschäle als Holzfehler vor. Positiv auffallend war, dass keinerlei Befall mit holzerstörenden Insekten oder Befall durch holzerstörende Pilze festgestellt wurde. Allenfalls war geringfügiger, oberflächlicher Schimmelpilzbefall ohne Beeinträchtigung der Holzfestigkeit zu beobachten.

Ausführungsfehler und nachträgliche Umbaumaßnahmen

Bei allen durchgeführten Untersuchungen war die hohe Quote erstaunlich, bei der eine Abweichung der tatsächlichen Bauausführung von den geprüften statischen Unterlagen oder anderen geprüften Ausführungsunterlagen festzustellen waren. Besonders zu nennen sind feh-

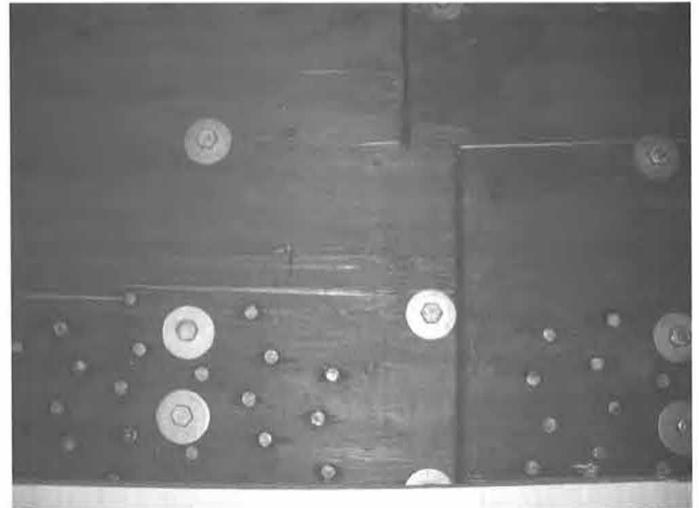


Bild 12: Gerbergelenk-Anschluss mit weit auseinander liegenden Verbindungsmittelgruppen

lende oder fehlerhafte Aussteifungen (z. B. bei Nagelplatten- oder Nagelbinderkonstruktionen), zusätzliche und unregelmäßige baukonstruktive Einbauten, angehängte Lasten (wie z. B. Turngeräte) oder nachträglich angebrachte, nicht zusätzlich nachgewiesene Durchbrüche, schlechtestenfalls mit der Kettensäge eingebracht.

Umnutzungen können in beiden Richtungen zu Klimaveränderungen führen. Eine langjährig offene Lagerhalle mit einer Brettstichholzkonstruktion, die nach Jahrzehnten zur Ausstellungshalle umgebaut wird und in den besonders kritischen Wintermonaten erstmalig geheizt wird, erfährt z. B. eine deutliche Reduzierung der Holzfeuchten, die dann in Verbindung mit Zwang aus Einbauten oder anderen Verbindungsmittelgruppen zu Schwindrissen und infolge der Schwindrisse zu weiterem Schub- oder Querzugversagen führen können. Im Gegensatz dazu, können spätere Feuchteerhöhung ebenso zu einer dauerhaften Schädigung der Holzkonstruktion führen, wenn – wie zuvor erwähnt – für feuchtere Bereiche unzulässige Klebstoffe wie Harnstoffharz verwendet wurden.

Eine ebenso häufiger auftretende Schadensursache ist das spätere Aufbringen von Gründächern oder andere Veränderungen der Dachlasten, die rechnerisch nicht vollständig oder gar nicht nachgewiesen werden. Bei Gründächern ist besonders zu beachten, dass diese im wasser gesättigten Zustand zu beurteilen sind und dass der Wasserabfluss bei diesen Dächern meist deutlich verringert ist.

Klima

Wie bereits vorstehend erwähnt, sind Klimaänderungen teilweise schädlich. Bei den Klimabeanspruchungen sind zu unterscheiden:

- Dauerhaft, sehr trockene Randbedingungen
Diese Situation lag beispielsweise in diesem Winter vor. In vielen Konstruktionen stellten sich Holzfeuchten deutlich unter 8 % ein, da

der lange und sehr kalte Winter in beheizten Räumen zu sehr niedrigen und dauerhaft vorhandenen relativen Luftfeuchten geführt hat. Durch die sehr starke Austrocknung der Holzquerschnitte wurden wiederum infolge Zwang und/oder des Trocknungsgefälles Quersrisse induziert.

- Große Schwankungen der Holzfeuchten
Konstruktionen, insbesondere mit großvolumigen Querschnitten sind offensichtlich besonders dann gefährdet, wenn durch die jeweiligen Nutzungen temporär erhöhte Feuchten und temporär sehr niedrige Feuchteniveaus erreicht werden. Das klassische Beispiel dafür sind die Eissporthallen, die mit häufig ungedämmten Dächern im Sommer sehr stark austrocknen. In den Übergangszeiten stellen sich hingegen infolge der einströmenden und sich in der Halle abkühlenden Warmluft Feuchteniveaus deutlich oberhalb einer relativen Luftfeuchte von 80 % ein. Die sich damit im halbjährlichen Rhythmus ändernden Holzfeuchten führen zu einer fortschreitenden Rissbildung, wie sie an verschiedenen Eissporthallen beobachtet wurde, die nun schon über einen längeren Zeitraum ingenieurtechnisch begleitet wurden.

Zur Klärung von Schadensursachen und zur Festlegung von Sanierungsmaßnahmen auch in anderen Hallen als Eishallen sind nach unserer Überzeugung längerfristige Klimamessungen erforderlich. Ebenso auffällig waren teilweise kleinere Schadensbereiche, die durch Luftheizungen oder intensive Sonneneinstrahlung über Oberlichter verursacht werden können. Hier entstehen temporär und partiell sehr trockene Querschnitte, die dann wiederum Rissbildungen verursachen.



Bild 13: Umfangreiche Rissbildung in einer Eissporthalle Bj. 1990

Bauunterhalt

Ein Gebäude ist ein komplexes technisches Gebilde, das ebenso wie alle „Maschinen“ einer intensiven Wartung und Instandhaltung bedarf. Diese Tatsache wird bis heute von vielen Betreibern und Gebäudeeigentümern signifikant unterschätzt. Es beginnt bei der regelmäßigen Überprüfung von Dacheinläufen (insbesondere bei Gründächern und Flachdächern), der Reinigung von Regenrinnen und der Überprüfung der Dachhaut, um sicherzustellen, dass durch Niederschläge keine regelmäßige Befeuchtung stattfindet. In einigen Fällen wurden hier teilweise jahrzehntelange Versäumnisse angetroffen.

Letztendlich gehört auch das rechtzeitige Freiräumen von übermäßig anfallendem Schnee zu den Unterhaltungsmaßnahmen. Bei sehr starkem Schneefall sollte frühzeitiger eine regelmäßige Kontrolle der tatsächlich vorhandenen Dachlasten einsetzen. Bezüglich des Unterhalts sind auch hier insbesondere Eishallen zu nennen. Durch die Wärmeabgabe der Konstruktion gegenüber der kalten Eisfläche unterkühlen große Teile der Dachkonstruktion (in Abhängigkeit vom Abstand zur Eisfläche) und es bildet sich an der Konstruktion Tauwasser. In einigen Fällen konnten an den Trägerkonstruktionen erhebliche Eisbildungen festgestellt werden (Bild 14).

Durch diese ständigen intensiven Feuchtwechsel ist eine nachhaltige Schädigung der Holzkonstruktion, insbesondere dann, wenn es sich um Holzwerkstoffplatten als Gurte von Kastenträgern handelt, unvermeidbar.

In anderen Hallen (Turnhallen, Schwimmbäder) konnte festgestellt werden, dass schlecht zugängliche Bereiche in Gebäuden bzw. Konstruktionen praktisch nicht inspiziert werden und dort die vorgenannten Mängel sich besonders stark auswirken können.



Bild 14: Eisbildung am Untergurt oberhalb der Eisfläche



Bild 15: Schadensfreie Pflanzenhalle

4. Zusammenfassung

Bedingt durch die Unglücke und Schadensfälle zu Beginn des Jahres 2006 wurden zwischenzeitlich bereits eine Vielzahl von Gebäuden mit weit gespannten Tragwerken (insbesondere Holztragwerken) untersucht. Es zeigte sich dabei, dass von Planung und Errichtung über die Werkstoffe bis hin zu Wartung und Instandhaltung der Gebäude teilweise ein erhebliches Defizit besteht. Die Fälle, bei denen Tragwerke angetroffen wurden, an denen keinerlei Beanstandungen vorlagen, waren leider in erheblicher Minderheit.

Durch die zwischenzeitlich erfolgten Erlasse zur zwangsweisen Untersuchung von Eissporthallen und den bei einigen Gebäudebetreibern angelaufenen, routinemäßigen Untersuchungen ist zu erwarten, dass sich in Zukunft der Datenbestand noch deutlich erhöht. Dieser sollte sorgfältig ausgewertet werden und die erforderlichen Maßnahmen ergriffen werden. Diese sind mit den beteiligten Verkehrskreisen selbstverständlich zu diskutieren.

Die Holzbaubranche ist dazu aufgerufen, an dieser Datensammlung möglichst intensiv mitzuwirken. Letztendlich ist dies auch eine Chance zur Verbreiterung der Wissensbasis, zur Vermeidung zukünftiger Fehler und Schäden und zur Erhöhung der Qualität der gebauten Umwelt.

Literatur

- [1] Schmidt, H.J. et al.: Überdachung der Eislaufhalle Bad Reichenhall. Ausstellung Holzbau Konstruktionen der Arbeitsgemeinschaft Holz e.V. Düsseldorf als Sonderdruck aus Zeitschrift detail 6/1974
- [2] Raknes, E.: Durability of structural wood adhesives after 30 years ageing. Holz als Roh- und Werkstoff 55 (1997) 83-90. Springer Verlag, 1997

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinrich Kreuzinger



Technische Universität München
Fachgebiet München
Institut für Baustoffe und Konstruktion
Arcisstr. 21
80333 München
Tel.: 089 289-28687
Fax: 089 289-28497
E-Mail: kreuzinger@bv.tum.de

- 1941 Geboren in Eger, Sudetenland
- 1960 – 1965 Studium des Bauingenieurwesens an der TH München
- 1965 – 1991 TH München bzw. TU München
Assistent am Lehrstuhl für Baustatik
Professor für Schwingungsmesstechnik und Baudynamik
- 1973 – 1974 Konstruktionsbüro Dykerhoff und Widmann
- Seit 1985 Prüflingenieur für Baustatik: Massivbau, Holzbau
- Seit 1991 Professor für Holzbau

Aktuelle Schäden an Holzkonstruktionen

Schlussfolgerungen

1. Einleitung

In den ersten Monaten des Jahres 2006 hat es in weiten Teilen Bayerns und den angrenzenden Ländern ergiebige Schneefälle gegeben.

Für leichte Dachkonstruktionen ergaben sich dadurch hohe Einwirkungen, die teilweise auch über den rechnerischen Annahmen lagen. Es folgten Schäden und auch Einstürze von Dächern, vorwiegend von Dächern aus Holzkonstruktionen. Dies auch deswegen, weil sehr viele Dachkonstruktionen Holzkonstruktionen sind. Die Dachkonstruktion ist eine der Konstruktionsarten, für die Holz sich aus wirtschaftlichen und architektonischen Gründen besonders anbietet.

Um den Ursachen der Schäden auf die Spur zu kommen und sie zu verstehen, werden die Schritte im Werdegang eines Ingenieurbauwerks angegeben:

Bauherr:	Wunsch nach einem Bauwerk für eine Aufgabe
Architekt und	
Tragwerksplaner:	Planerische Darstellung der Ideen Berechnung und Konstruktion
Behörde:	Genehmigung
Baufirma:	Ausführung

Der Tragwerksplaner bedient sich bei seiner Teilaufgabe seiner Erfahrung und der Spielregeln der Normen. In den Normen, z. B.: DIN 1055, Teil 100, ist das Bemessungskonzept festgelegt. *Bild 1* zeigt dies für den Holzbau.

Nach dem Teilsicherheitskonzept werden die Einwirkungswerte mit einem Teilsicherheitsbeiwert beaufschlagt und die Widerstandswerte durch einen Teilsicherheitsbeiwert geteilt. Zusätzlich berücksichtigt der Beiwert

k_{mod} die Lasteinwirkungsdauer und die Umgebung. Für die Einwirkung, die Last, sowie das Material sind also Sicherheiten berücksichtigt.

Fehler in der Berechnung, wie falsche Systemannahmen oder gar Rechenfehler, Fehler bei der Ausführung und Schädigung durch mangelnde oder fehlende Pflege und Wartung sind im Sicherheitskonzept nicht, bzw. nur sehr untergeordnet, eingebaut.

Dieser Sachverhalt zwingt zu einer Kontrolle aller einzelnen Schritte von der Planung bis zur Ausführung.

Diese durchgehende Kontrolle muss im unabhängigen Vieraugenprinzip erfolgen. Dies geschieht durch Prüfungenieure bei der Berechnung und Konstruktion und bei der Herstellung von Baustoffen und Bauwerksteilen durch Überwachung. Die Überwachung der plangerechten Ausführung obliegt der Bauleitung.

Die aufgetretenen Schneelasten alleine, selbst wenn sie die rechnerisch angenommenen bis zum Teilsicherheitsbeiwert Einwirkung überschreiten, können also nicht Ursache sondern allenfalls Auslöser der Schäden und Einstürze sein. Es müssen also noch andere Gründe vorhanden sein.

Über Schäden an Holzkonstruktionen liegt Literatur vor [1], [3] und [4].

2. Schnee Anfang 2006

Im Januar, Februar und März dieses Jahres 2006 hat es in Bereichen von Bayern ergiebige Schneefälle gegeben. Die ständig niedrigen Temperaturen haben ein zwischenzeitliches Abtauen verhindert, so dass sich erhebliche Schneemengen auf den Dächern ansammelten.

Wegen der stark unterschiedlichen Raumgewichte des Schnees kann von der Schneehöhe nicht direkt auf die Schneelast geschlossen werden.

In der jetzt gültigen Norm für Schneelasten, DIN 1055, Teil 5, wird von einer Bodenschneelast ausgegangen, die dann mit einem Beiwert auf verschiedene Dachformen umgerechnet werden kann. Angaben dazu finden sich auch in [8].

Tabelle 1 zeigt den rechnerischen Schneelastwert für ein Flachdach nach den verschiedenen Fassungen der DIN 1055 für drei verschiedene Orte: Bad Reichenhall, Deggendorf und Füssen.

In einigen Bereichen, besonders im bayerischen Wald, wurden die rechnerischen Schneelasten im genannten Zeitraum deutlich überschritten. Um noch größere Schäden zu vermeiden, wurden viele Dächer abgeräumt.

Die Messung der Schneelast ist aufwändig, Schnee einer definierten Dachfläche muss gewogen werden. Wünschenswert wären Anzeigegeräte, die die maßgebende Schneelast am Dach in der Verwaltungszent-

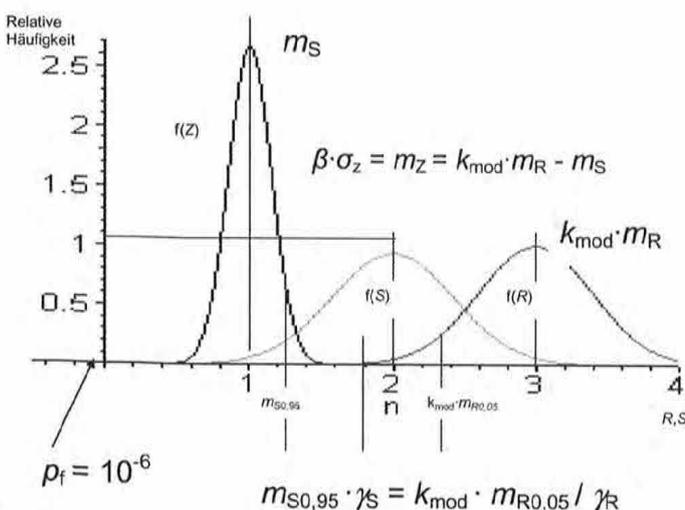


Bild 1: Bemessungskonzept mit Teilsicherheitsbeiwerten

Tabelle 1

Bad Reichenhall H = 470 m	Zone	s_0 am Boden in KN/m^2	s_k am Dach in KN/m^2
DIN 1055:1936			mindestens 0,75
DIN 1055:1975	III IV		1,175 1,935
DIN 1055-5:2005	III	2,18	1,75
Deggendorf H = 320 m			
DIN 1055:1936			mindestens 0,75
DIN 1055:1975	III		0,80
DIN 1055:2005	II	0,95	0,76
Füssen H = 800 m			
DIN 1055:1936			mindestens 0,75
DIN 1055:1975	III		2,55
DIN 1055:2005	III	4,76	3,81

rale anzeigten! Schneehöhen können beispielsweise mit GIS-Unterstützung gemessen werden.

Besonders hohe Schnee- und Eislasten gab es in der Vergangenheit schon öfter, aber vielleicht nicht in einem so großen Gebiet gleichzeitig!



Bild 2: Tutzinger Hütte

Tabelle F.9: Rechenwerte für die charakteristischen Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte für homogenes und kombiniertes Brettschichtholz der Festigkeitsklassen GL24 bis GL36

	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	Festigkeitsklasse ³	GL24h	GL24c	GL28h	GL28c	GL32h	GL32c	GL36h	GL36c
Festigkeitskennwerte in N/mm^2									
2	Biegung $f_{m,k}^{b,c}$	24	24	28	28	32	32	36	36
3	Zug parallel $f_{t,0,k}$	16,5	14	19,5	16,5	22,5	19,5	26	22,5
4	Zug rechtwinklig $f_{t,90,k}$	0,5							
5	Druck parallel $f_{c,0,k}$	24	21	26,5	24	29	26,5	31	29
6	Druck rechtwinklig $f_{c,90,k}$	2,7	2,4	3,0	2,7	3,0	3,0	3,6	3,3
7	Schub und Torsion $f_{v,k}^d$	3,5 (geändert DIN 1052/A1 auf 2,5)							

3. Schäden und Ursachen

3.1 Allgemeines

Wenn die Ursachen von Schäden erkannt werden, ist die Schlussfolgerung, solche Ursachen bei der Sanierung oder bei neuen Bauwerken zu vermeiden. Deswegen ist Ursachenerkennung gleich Schlussfolgerung. Nachfolgend werden Ursachengruppen angegeben.

3.2 Festigkeiten

Die hohen Schneelasten waren oft Auslösung für die Schäden, aber nicht immer Ursache. Ursachen waren meist Mängel, die durch die hohe aber nicht zu hohe Belastung aufgedeckt wurden. Die aufgetretenen Schneelasten können, soweit sie den rechnerisch angesetzten Wert nicht überschritten haben, auch als Probelastung angesehen werden.

Zur Ursachensuche wird zunächst die DIN 1052:2004 herangezogen. Die *Tabelle F.9* zeigt charakteristische Festigkeitswerte für Brettschichtholz.

Zeile 4 und Zeile 5 zeigen die für die meisten Schäden ursächlich maßgebenden Festigkeitswerte:

$f_{t,90,k}$ Zug rechtwinklig zur Faser

$f_{v,k}$ Schub

Zu beiden Beanspruchungen gehört ein sprödes Versagen.

Der ebenfalls niedrige Wert für Druck rechtwinklig zur Faser hat bei Überschreitung durch Beanspruchung eher große Verformungen als ein Versagen zur Folge.

Bei Konstruktionen bei denen die Rollschubfestigkeit maßgebend ist, sind Schäden nicht bekannt. Deshalb sind von der Festigkeit her die beiden Beanspruchungen Zug rechtwinklig zur Faser und Schub von Bedeutung.

Im Stahlbetonbau werden rechnerische Zugspannungen und damit auch Schubspannungen im Beton einer Bewehrung zugeordnet. Dies ist bei Holzkonstruktionen nur bedingt möglich!

Mit eingeklebten Stahlstäben, Schrauben und aufgeklebten Holzwerkstoffplatten kann eine Art Bewehrung eines Querschnittes ausgeführt werden.

Die planmäßigen Lastspannungen werden durch entsprechende Regeln begrenzt oder durch Verstärkungsmaßnahmen aufgenommen. Schwieriger sind die Bestimmung und die Aufnahme von Spannungen

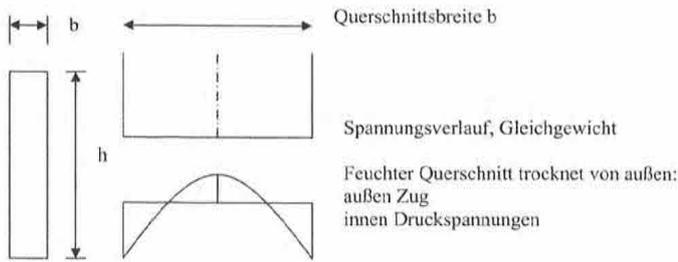


Bild 3: Spannungen rechtwinklig zur Faser infolge Zwang

aus Zwangbeanspruchung. Bild 3 zeigt Eigenspannungen, die durch Trocknen eines Trägers mit Rechteckquerschnitt entstehen können.

Ein Rechteckquerschnitt mit der Höhe $h = 1,5 \text{ m}$ hat eine Feuchte vorn 12 % und trocknet von außen her auf 8 % herunter. Es entsteht ein Verformungsunterschied in der Größenordnung von

$$\Delta b = 0,24 \cdot \frac{12 - 8}{100} \cdot 1500 = 14,4 \text{ mm.}$$

Dieser Verformungsunterschied muss durch Dehnungen oder Risse ausgeglichen werden.

Bei einer Rissbildung von außen her wird die zur Aufnahme der Schubspannung aus Querkraft notwendige Querschnittsbreite b vermindert.

Bei der Angabe der charakteristischen Festigkeit $f_{v,k}$ wird bereits berücksichtigt, dass der Querschnitt Risse aufweist. Derzeit wird davon ausgegangen, dass die Risse bis zu einem Drittel der Querschnittsbreite, also von jeder Seite her ein Sechstel der Querschnittsbreite haben dürfen. Entstehen, wie beim gekrümmten Träger, Zugspannungen $\sigma_{t,90}$ rechtwinklig zur Faser, so sind nur Risse mit Tiefen kleiner einem Achtel der Querschnittsbreite hinnehmbar.

Bild 4 zeigt diese Risse.

Schubspannungen entstehen durch Querkraftbeanspruchung, Zugspannungen $\sigma_{t,90}$ rechtwinklig zur Faser entstehen durch

- Umlenkräfte bei gekrümmten Trägern,
- angehängte Lasten,
- geometrische Unstetigkeiten bei Durchbrüchen und Auflagerausklüngen,
- Behinderung der Verformungen aus Schwinden bzw. Quellen,
- Verformungen aus Nebentraggliedern.

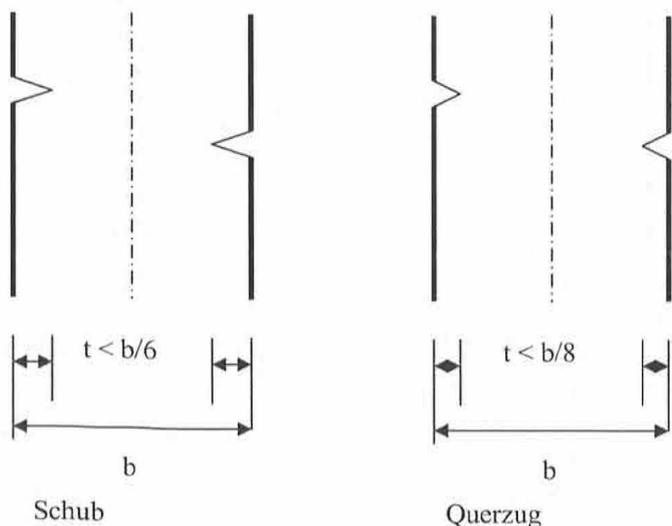


Bild 4: Hinnehmbare Risstiefen



Bild 5: Gekrümmter Träger mit Riss

In der DIN 1052:2004 sind bei Nachweisen für Zugspannungen rechtwinklig zur Faserrichtung auch mit Schubspannungen aus Querkraft die Grenzbedingungen strenger als in der DIN 1052:1988.

Bild 5 zeigt einen gekrümmten Träger mit Rissen infolge der Querkraftzugspannungen aus den Umlenkräften der Biegespannungen.

Schubspannung aus Querkraft und Biegespannung aus Querbiegung führte zum Versagen des Brettschichtholzträgers der Turnhalle in Dachau [5].

Bei neuen Konstruktionen ist zu überlegen, ob in Trägerbereichen mit planmäßigen Querkraftzugspannungen eine Verstärkung ausgeführt wird. Dies trifft bei gekrümmten Trägern, bei Ausklüngen und Durchbrüchen zu. Ist in Trägerbereichen, beispielsweise bei konstanter Querkraft, die Schubspannung voll ausgenutzt, ist ebenfalls eine Verstärkung überlegenswert. Wobei zu beachten ist, dass Schubbewehrung mittels eingeklebter oder eingeschraubter Stahlstangen erst zur Tragwirkung kommt, wenn Schubrisse eingetreten sind.

Im Zusammenhang mit Schub- und Querkraftzugspannungen wurde das Holzversagen „Ringschäle“ beobachtet!

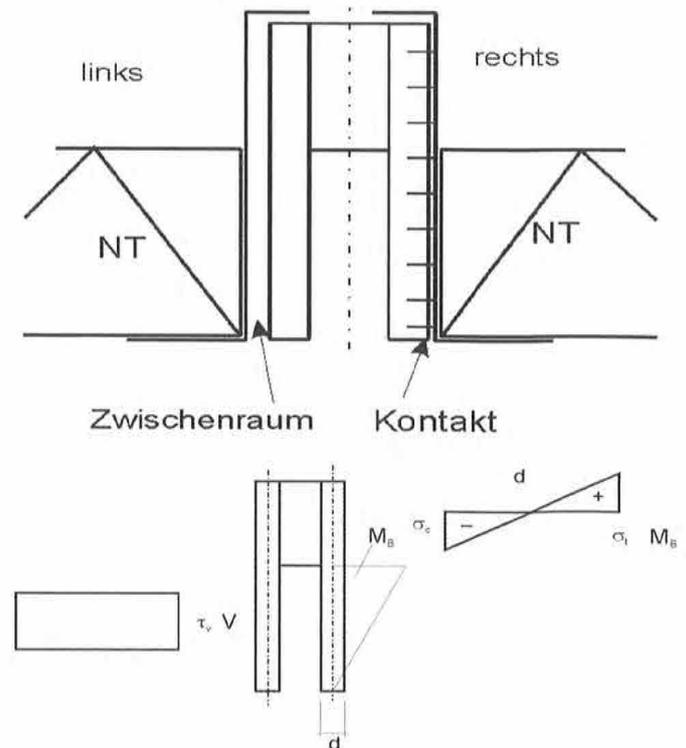


Bild 6: Querbiegung und Schub

3.3 Kleber, Verwendung, Nutzungsklassen

Als Kleber stehen für flächige Verklebungen von Holzteilen Verfügung:

- Kaseinleim,
- Harnstoffharzkleber,
- Melaminharzkleber,
- Resorcinharzkleber.

Die Verwendung wird in den Normen geregelt.

DIN 1052:1969

In Abschnitt 11.5 waren Leimverbindungen geregelt. Die Leime müssen die Prüfung nach DIN 68141 bestehen. Die Verwendung der verschiedenen Kleber zeigt folgende Tabelle.

	Bauteile überdacht, nicht der Nässe ausgesetzt	Bauteile kurzzeitig der Nässe oder Feuchtigkeit ausgesetzt	Bauteile der Nässe, feuchtwarm oder tropisch ausgesetzt
Kasein-Leime	+		
Kunstharz-Leime	+		
Harnstoff-Formaldehyd	+	+	
Resorcin-formaldehyd	+	+	+

DIN 1052:1988

Im Abschnitt 12.4 Leime steht:

Leime für tragende Bauteile müssen die Prüfung nach DIN 68 141 bestanden haben.

Für Bauteile, die im Gebrauchszustand unmittelbar der Witterung oder in Gebäuden Klimabedingungen ausgesetzt sind, bei denen eine Gleichgewichtsfeuchte von 20 % oder langfristig oder häufig wiederkehrend eine Temperatur im Bauteil von 50 °C überschritten werden kann, dürfen nur Kunstharzleime verwendet werden, die auf ihre Beständigkeit gegen alle Klimaeinflüsse geprüft sind (z. B. Resorcin- oder Melaminharzleim).

DIN 1052:2004

Im Abschnitt 14 wird angegeben:

Der Klebstoff darf als geeignet angesehen werden, wenn es sich bei dem Klebstoff um ein geregeltes Bauprodukt nach DIN EN 301:1992-08 und DIN 68141 handelt.

In den Erläuterungen zur DIN 1052:2004 ist in *Tabelle 14/1* der Anwendungsbereich für verschiedene Klebstoffe angegeben.

Harnstoffharzklebefugen müssen nicht immer sehr hell sein.

Bei richtiger Verwendung bestehen gegen Verklebungen mit Harnstoffharzleim keinerlei Bedenken. Es wird aber überlegt, Harnstoffharzleim in Zukunft für tragende Zwecke nicht mehr zu verwenden. Durch eine Nutzungsänderung einer Halle könnte beispielsweise der Anwendungsbereich nicht mehr eingehalten sein.

Die Zuordnung der Bauwerke erfolgt über die Nutzungsklassen, die in DIN 1052:2004, 7.1.1(1) festgelegt sind. In der Anmerkung steht:

Tabelle 14/1: Anwendungsbereich und Farbe von Klebstoffen

Klebstoff	Abkürzung nach DIN 4076-5	Typ nach DIN EN 301	Anwendung in NKL	Farbe der Klebefuge
Harnstoffharz	KUF	II	1	sehr hell
Melaminharz	KMF	I	1 bis 3	hell bis kakaobraun
Resorcinharz	KRF	I	1 bis 3	rötlichbraun
Einkomponenten-Polyurethan ³⁾	PUR ¹⁾	I	1 bis 3	hell
Epoxidhard ^{2) 3)}	KEP	I	1 bis 3	hell

¹⁾ In DIN 4076-5 nicht enthalten
²⁾ Für Sanierungen
³⁾ Anwendbarkeit bei Temperaturen über 50 °C nicht gewährleistet

„In Ausnahmefällen können auch überdachte Bauteile in die Nutzungsklasse 3 einzustufen sein“.

In [10, A4] ist ein Diagramm angegeben, das bei 20 Grad Temperatur den Zusammenhang zwischen relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte zeigt. In dieses Diagramm (*Bild 7*) ist eingetragen:

- die Definition der Nutzungsklassen nach DIN 1052:2004, Abschnitt 7.7.7(1),
- und die Holzfeuchten nach DIN 1052:1988, Abschnitt 4.2.1.

Werden die Bandbreiten von ± 3 % bzw. ± 6 % noch berücksichtigt, so überlappen sich die Bereiche.

In EN 386:2001 wird für Brettschichtholz in den Abschnitten 3.5 bis 3.7 eine mittlere Ausgleichsfeuchte für Nadelhölzer angegeben, die in den Nutzungsklassen nicht überschritten wird:

Nutzungsklasse	Ausgleichsfeuchte
1	12 %
2	20 %
3	> 20 %

In [9] zu Ziffer E7.1.1 sind Beispiele für Nutzungsklassen angegeben. Zur Nutzungsklasse 3 heißt es auch: „Typische Beispiele für Bau-

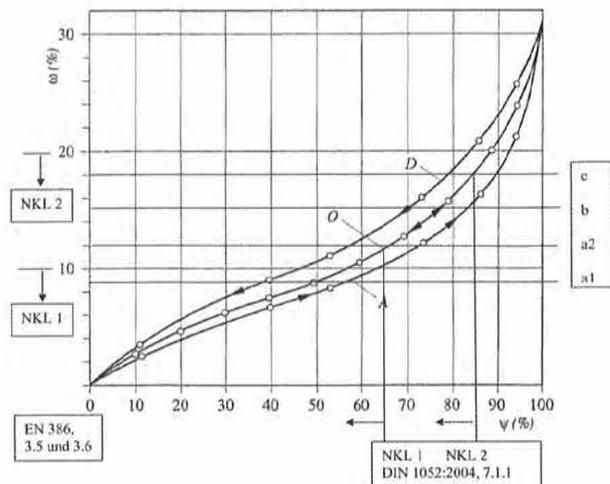


Bild 7: Feuchtebereiche



Bild 8: Eissporthalle, Brettschichtholz mit Harnstoffharzkleber

teile in der Nutzungsklasse 3 sind nicht überdachte Balkone und ungeschützte Bauteile in hölzernen Aussichtstürmen. Auch Dachkonstruktionen bei offenen Eissporthallen sollten wegen der Kondenswasserbildung an den kalten Bauteilen der Nutzungsklasse 3 zugewiesen werden.“

Bild 8 zeigt eine Konstruktion mit nicht dem Kleber entsprechender Anwendung.

3.4 Rissverpressung, Verstärkungen

Nach Beseitigung der Schadensursache sind Reparaturen oder Verstärkungsmaßnahmen möglich.

Tiefere Risse als in Bild 4 angegeben sollten verpresst werden. Dazu gibt es auch unterschiedliche Meinungen. In [11] wird davon abgeraten. Dies bezieht sich aber wohl auf klaffende Risse bei Vollholz. In [2] sind Angaben über das Vorgehen beim Rissverpressen und Angaben über Firmen zu finden.

Spannungen, besonders Schubspannungen und Zugspannungen, die der Konstruktion nicht mehr zugemutet werden sollen, können Verstärkungen wie aufgeklebte Holzwerkstoffplatten oder eingeklebte oder eingedrehte Stahlstangen zugeordnet werden. Wobei aufgeklebte Holzwerkstoffplatten die Konstruktion auch vor Klimaschwankungen schützen.

Die Holzfeuchte beim Verpressen sollte möglichst der mittleren zu erwartenden Ausgleichsfeuchte entsprechen. Durch konstruktive Maßnahmen oder durch baukonstruktive und haustechnische Maßnahmen sollte dafür gesorgt werden, Feuchteschwankungen so weit als möglich zu reduzieren.

4. Bauwerksüberprüfung

Leitfäden und Empfehlungen geben Möglichkeiten zur Überprüfung von Holzkonstruktionen an.

Die Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. hat einen „Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz“ herausgegeben. Darin sind folgende Kapitel genannt:

1. Unterlagen zum Tragwerk sichten
2. Nutzung des Gebäudes bestimmen
3. Bauliche Veränderungen festhalten
4. Geometrie des Bauwerks überprüfen
5. Handnahe Inaugenscheinnahme
6. Risse feststellen
7. Bauphysikalische Randbedingungen

Nach Feststellung der Sachverhalte ist eine Beurteilung mit gegebenenfalls einem Sanierungsvorschlag notwendig. Dies ist der schwierige Teil. Helfen kann wiederum nur Erfahrung.

Ergänzend können weitere Untersuchungen sein:

- Ultraschallprüfungen [6], [Sandoz],
- Bohrwiderstandsmessung.

Mit Ultraschallprüfungen können aus der Körperschallausbreitung im Material Schlussfolgerungen über den Zustand im Inneren eines Holzquerschnittes erhalten werden. Die Qualität einer Klebefuge kann aber derzeit damit noch nicht angegeben werden.

Auch die Bohrwiderstandsmessung liefert keine Aussage über die Qualität der Klebefuge. Eine etwas gröbere Methode Einblick in das Innere eines Querschnitts zu bekommen stellt die Bohrkernentnahme mit einem Zuwachsbohrer dar.

Mit einer Probelastung können die Verformung gemessen und die Übereinstimmung mit der Berechnung und das reversible elastische Verhalten überprüft werden. Ebenfalls Auskunft über die Systemeigenschaften kann eine Schwingungsmessung liefern.

5. Bohrkern

Mit einem Kernbohrer können Bohrkern aus Holz entnommen werden. Wird dabei eine Klebefuge mitgenommen, so kann über eine Scherprüfung die Qualität der Klebefuge bestimmt werden.

Angaben über die Scherprüfung der Leimfugen gibt EN 392, einen Anhalt für die Auswertung EN 386. Beide Normen beziehen sich auf die Qualitätsprüfung von Brettschichtholz bei der Herstellung.

Für die Beurteilung von Brettschichtholz in bestehenden Konstruktionen wird aber die Scherprüfung ebenfalls herangezogen. Besonders wichtig dabei sind die erreichten Scherfestigkeiten, die auch in Abhängigkeit des Faserbruchanteils nach Tabelle 2 der EN 386:2001 beurteilt werden. Bei geringem Faserbruchanteil versagt mehr die Klebefuge, deswegen wird ein höherer Festigkeitswert gefordert.

In Bild 9 wird eine Abschätzung des Verstärkungsbereiches für Schubverstärkung vorgeschlagen.

6. Leitfäden, Empfehlungen

Neben dem genannten Leitfaden der Studiengemeinschaft Holzbau wird überlegt, ob von Behördenseite eine Bauwerksüberwachung, ähnlich der bei Brücken vorgeschriebenen nach DIN 1076, zu empfehlen ist.

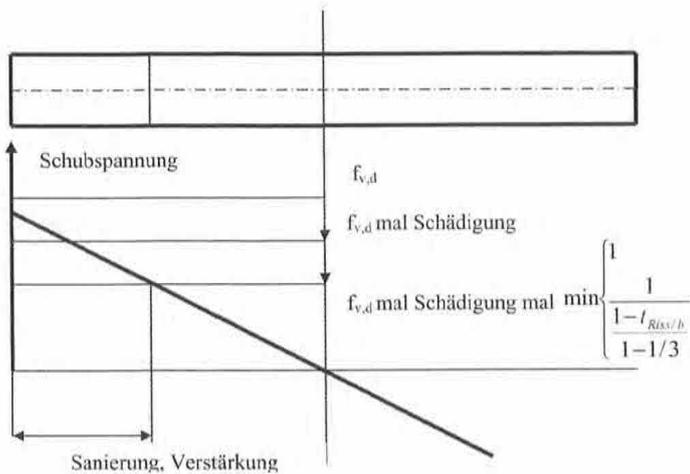


Bild 9: Verstärkungsbereich

Eine Überprüfung aller Eishallen ist vorgesehen. Vom Bayerischen Staatsministerium des Innern wird gefordert, dass „alle Eislaufhallen in Bayern mit einer Tragwerkskonstruktion insbesondere aus Holz und Stahl noch vor diesem Winter (2006/2007) zu überprüfen sind, weil die Standsicherheit gefährdet sein kann.“

7. Zusammenfassung

Die Schlussfolgerung aus den aufgetretenen Schäden an Holzkonstruktionen kann nur lauten:

Wir müssen solche Schäden in Zukunft vermeiden!

Dazu müssen bestehende Bauwerke untersucht und beurteilt und gegebenenfalls ertüchtigt werden und Neubauten sind so zu planen und auszuführen, dass keine Schäden auftreten.

Alle Beteiligten müssen verantwortlich arbeiten. Das beginnt bei der Ausbildung der am Bau Beteiligten und endet bei der Wartung der Gebäude.

Dazu einige Schlagworte:

Gute Ausbildung und Weiterbildung:

– Lehre, Studium, Tagungen,

Sorgfältige Planung und Ausführung:

- Zeit nehmen, Termindruck ist keine Entschuldigung,
- Gebührenordnung einfordern – halber Preis = halbe Arbeit,
- Kontrolle, Prüfingenieure.

Rückrufaktionen wie beispielsweise im Automobilbau sind im Bauwesen schwierig.

Für Ingenieurkonstruktionen muss selbstverständlich gelten:

Vieraugenprinzip Alle für die Tragsicherheit wichtigen Unterlagen müssen unabhängig geprüft werden.

Regelgerechte Ausführung Die Konstruktion muss den jeweils gültigen Normen, Zulassungen und Zustimmungen im Einzelfall entsprechen, die ausgeführte Konstruktion muss mit den Unterlagen übereinstimmen.

Spätere Einwirkungs- und Konstruktionsänderungen sind zu untersuchen.

Die Konstruktion sollte robust sein. Neben der Robustheit gegen Klimaeinflüsse kann auch das statische System selber robust ausgelegt werden. Hochgradig statisch unbestimmte Systeme können den Ausfall einer Komponente überstehen. Statisch bestimmte Systeme sollten so ausgebildet werden, dass bei Ausfall einer Komponente nicht das gesamte System, sondern nur ein Teil versagt.

Was die Materialeigenschaften und die zerstörungsfreie Bauwerksprüfung anbelangt besteht auf jeden Fall noch Forschungsbedarf. Ein einfaches Gerät, das Eigenschaften wie Festigkeiten, Steifigkeiten, Alterung anzeigt wäre wünschenswert.

Leider hat es schon immer Schäden und Einstürze von Holzkonstruktionen gegeben, aber nicht in dieser Häufung!

Zu den Schneelasten eine Bemerkung:

Die in den Normen angegebenen Schneelasten sind ausreichend, wenn der Nutzer eines Daches den rechnerischen Wert kennt und eine Möglichkeit hat, bei ergiebigem Schneefall die gerade vorhandene Schneelast zu messen. Schnee ist ein Lastfall, der nicht plötzlich kommt. In besonderen Fällen kann eine Räumung veranlasst werden.

Völlig anders ist die Situation beim Lastfall Wind: Wenn ein unerwartet starker Sturm angekündigt wird, kann sich der Bauherr nicht vor sein Gebäude stellen und es schützen!

Literatur

- [1] Mönck, W. 1987: Bauen und Sanieren mit Holz. Deutsche Verlagsanstalt Stuttgart
- [2] Radovic, B. 1992: Entwicklung und Stand eines Verfahrens zur Sanierung von Fugen im Brettschichtholz. Bauen mit Holz 9/92
- [3] Mönck, W. 1995: Schäden an Holzkonstruktionen: Verlag für Bauwesen Berlin
- [4] Colling, F. 2000: Lernen aus Schäden im Holzbau. DGfH Innovations- und Service GmbH München, Bruderverlag Karlsruhe, Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart
- [5] Kreuzinger, H., Preuss, K.: 2001 Doppelträger aus Holz. Bauen mit Holz 8/2001
- [6] Hasenstab, A. 2005: Zerstörungsfreie Holzprüfung. Mikado 11/2005
- [7] Fritzen, K. 2006: Zur Problematik der Eissporthallen. Bauen mit Holz 3/2006
- [8] Kaspar, P. 2006: Veränderliche Schneehöhen. Bauen mit Holz 4/2006
- [9] Blaß, H. J., Ehlbeck, J., Kreuzinger, H., Steck, G. 2004. Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08. Deutsche Gesellschaft für Holzforschung DGfH
- [10] Holzbauwerke STEP1, Bemessung und Baustoffe, A4, Informationsdienst Holz
- [11] Holzbauwerke STEP2, Bauteile Konstruktionen Details, D3, Informationsdienst Holz

Adressen

Firmen, die Lehrgänge der MPA Universität Stuttgart „Otto-Graf-Institut“ zur Sanierung von Querschnittsrisse in BS-Bauteilen mittels Verpressung absolviert haben:

www.brettschichtholz.de

Ultraschallprüfung Sandoz

www.cbs-cbt.com

Normen

DIN 1052:1988	Holzbauwerke, Berechnung und Ausführung
DIN 1052:2004	Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken
DIN 1055-5:2005	Einwirkung auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten
DIN 1055-5:1975	Einwirkung auf Tragwerke – Teil 5: Schnee- und Eislasten
EN 386:2002	Brettschichtholz, Leistungsanforderung und Mindestanforderungen an die Herstellung

Anlage

Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz, Juli 2006. Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.

Leitfaden zu einer ersten Begutachtung von Hallentragwerken aus Holz

Juli 2006

Dieser Leitfaden bietet eine Übersicht über alle Punkte, die für eine sachgemäße Beurteilung beachtet werden müssen.

Beim Durchlesen ist leicht festzustellen, dass ein mit dem Holzbau wenig Vertrauter mit der Begutachtung überfordert wäre. Und doch ist der Überblick über das, was geprüft, in Augenschein genommen und gemessen werden muss, auch für diejenigen Nicht-Fachleute nützlich, die für die Qualität eines Holztrag-

werks verantwortlich sind. Sie können den Leitfaden wie eine Checkliste nutzen, um sich darüber zu informieren, was zu tun ist und durch wen.

Damit sind insbesondere Verantwortliche in den kommunalen Bauämtern oder in Bauaufsichtsbehörden, aber auch Eigner bzw. Betreiber angesprochen.

Als Arbeitsinstrument gedacht ist der Leitfaden jedoch für Tragwerks-

planer, die nicht regelmäßig mit der Begutachtung von Holztragwerken zu tun haben.

Werden Schäden vermutet, was mit Hilfe des Leitfadens plausibel angenommen – günstigstenfalls auch ausgeschlossen werden kann, muss ein Fachmann zu Rate gezogen werden, der mit Schäden an Holztragwerken und ihrer Behebung vertraut ist.

1. Unterlagen zum Tragwerk sichten

Der Bau eines Tragwerks beginnt mit der regelkonformen Planung, darauf folgt eine den Konstruktionsunterlagen entsprechende Ausführung. Die Planungs- und Bauphase ist somit die erste mögliche Quelle für spätere Qualitätsmängel. Im Einzelnen sollte geprüft werden:

- Statische Berechnung auf Plausibilität
- Ausführungspläne
- Verlegepläne der Dacheindeckung
- Prüfberichte
- Übereinstimmungsnachweise
- Übereinstimmung der wesentlichen Bauteile mit Normen und Zulassungen
- Vorliegen einer Sonderkonstruktion, für die eine Zustimmung im Einzelfall erforderlich ist
- Überprüfung, ob Zustimmung erteilt wurde
- Übereinstimmung des Tragwerks mit den Konstruktionsunterlagen
- Montageinformationen, z. B. damalige Wetterbedingungen
- ggf. Daten für die Verklebung im Leimbuch der Holzbaufirma nachsehen

2. Nutzung des Gebäudes bestimmen

Die Konstruktion eines Gebäudes ist auch abhängig von der beabsichtigten Nutzung und den dabei herrschenden klimatischen Bedingungen. In beheizten Hallen wie Sport- oder Produktionshallen ist z.B. eine geringere Holzfeuchte zu erwarten als in unbeheizten Lagerhallen. Auch die geografische Lage spielt eine Rolle. Deshalb sollten die folgenden Punkte geklärt werden:

- Nutzung des Gebäudes
- Zuordnung zu einer Nutzungsklasse, dies im Hinblick auf die klimatischen Beanspruchungen im Gebäude
- Angenommene Einwirkungen wie Eigengewicht und Nutzlasten, dies im Hinblick auf die Nutzung des Gebäudes
- Umnutzung des Gebäudes während der Nutzungsdauer

3. Bauliche Veränderungen feststellen

Veränderungen gegenüber der ursprünglichen Konstruktion können mittel- und langfristig zu Schäden führen, wenn sie nicht ordnungsgemäß an das Tragwerk angepasst wurden. Darauf ist vor allem zu achten:

- Planung und aktuellen Stand vergleichen
- Änderungen wie z.B. Gründach, andere Heizung, Lüftung oder Wärmedämmung
- Nachträgliches Schließen vormals offener Gebäude
- Nachträgliche Durchbrüche
- Nachträglich angehängte Lasten

4. Geometrie des Bauwerks überprüfen

An der sorgfältigen Prüfung der Abmessungen lassen sich Schwächen oft schon lokalisieren. Sie ist deshalb bei der ersten Begutachtung unabdingbar.

- Überhöhungen und Verformungen durch Inaugenscheinnahme feststellen
- Ebenheit und Gradheit überprüfen
- Durchbiegungen und Verformungen mit Lasermessgerät feststellen
- Nivellement der Punkte vornehmen, in denen vertikale Maße genommen wurden
- Verwölbung eines Trägers mit einer Richtlatte über Höhe und Stich messen
- Schrägstellung mit Richtlatte und Wasserwaage prüfen

5. Handnahe Inaugenscheinnahme

Es gibt Schwachstellen oder auffallende Veränderungen, die aus unmittelbarer Nähe betrachtet werden müssen.

Ein Blick nach oben an die Konstruktion reicht zur Beurteilung nicht aus. Solche Punkte sind:

- Wasserflecken:
 - Deren Feuchtequelle ermitteln, Zustand von Holz und Verklebung prüfen
 - Feuchte in der Tiefe messen
- Entwässerung
 - vorhandene und funktionsfähige Begleitheizungen der Abflussrohre
 - beheizte Innenrinnen
 - beheizte außen liegende Fallrohre
 - Höhe der Gullys und Wasserablaufverhalten
 - Verstopfte Abflussrohre
 - Notabläufe
 - Laubfangkörbe
- Korrosion von Metallteilen
- Verfärbungen
- Pilze
- Klangänderungen beim Abklopfen des Holzes
- Oberflächenbehandlung bei Bauteilen im Freien:
 - Deren Wirksamkeit und Einfluss auf den Feuchtehaushalt abschätzen
 - Feuchtegradient feststellen

6. Risse feststellen

Risse sind natürlich in jedem Holz vorhanden, sie entstehen durch das Umgebungsklima. Risse dürfen allerdings ein bestimmtes Maß nicht übersteigen. Die Beurteilung, wann das der Fall ist, kann letztlich nur der Fachmann vornehmen.

- Rissaufnahme nach Tiefe, Breite, Länge, Anzahl, Verteilung:
 - Rissenden mit Bleistift markieren
 - Maximale Risstiefe mit einer 0,1 mm tiefen Fühlerlehre messen
 - Bei mehr als 90 mm Tiefe oder $b/6$ bzw. $b/8$ bei auf Querzug beanspruchten Bauteilen sollte ein Spezialist eingeschaltet werden.
- Angabe von Datum und Holzfeuchte bei der Messung
- Holzfeuchte mit isolierten Einschlagelektroden in ausreichender Länge messen:
 - Insbesondere an Fassadenübergängen innen und außen
 - An den Tief- und Hochpunkten der Konstruktion
 - Feuchteunterschiede im Bauteil

7. Bauphysikalische Randbedingungen

Es ist vor allem die Feuchtigkeit, die an Holztragwerken Schäden verursachen kann. Darum sind diese Punkte besonders zu beachten:

- Luftdichtigkeit der Gebäudehülle
- Fassadenanschlüsse
- Bauteilfeuchte
- Belüftete Dächer mit Konvektion von innen
- Anschlüsse der Dampfbremse
- Überprüfung des Klimas im Gebäude

Bearbeiter:

Univ.-Prof. Dr.-Ing Hans-Joachim Bläß
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Heinz Brüninghoff
Univ.-Prof. Dr. Heinrich Kreuzinger
Akad. Direktor (i. R.) Dipl.-Ing. Borimir Radović
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter

Herausgeber:

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V.
Elfriede-Stremmel-Straße 69
D-42369 Wuppertal
02 02 / 978 35 81
02 02 / 978 35 79 Fax
info@brettschichtholz.de
www.brettschichtholz.de

Dr.-Ing. Matthias Frese



Universität Karlsruhe (TH)
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und
Baukonstruktionen
Kaiserstr. 12
76131 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-7948
Fax: 0721 608-4081
E-Mail: Matthias.Frese@holz.uka.de

- 1969 Geboren in Konstanz
- 1991 – 1998 Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH)
- 1998 – 1999 Mitarbeiter im Büro für Baukonstruktionen Wenzel, Frese, Pörtner, Haller, Karlsruhe
- 1999 – 2001 Mitarbeiter im Büro Müller und Klein, Freiburg
- Seit 2001 Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen, Universität Karlsruhe (TH)
- 2006 Promotion

Brettschichtholz aus Buche

ein leistungsfähiger Baustoff

1. Einleitung

In diesem Tagungsbeitrag werden die Hintergründe zur Bestimmung der charakteristischen Biegefestigkeit von BSH aus Buche dargestellt, um dem interessierten Anwender – Hersteller oder Planer gleichermaßen – ein grundlegendes Verständnis für die Biegetragfähigkeit von BSH aus Buche zu vermitteln. Im Hinblick auf eine Anwendung von BSH aus Buche für tragende Zwecke im Bauwesen werden auch allgemeine Hinweise zur Buche, zu ihren Eigenschaften und zur gegenwärtigen Verwendung gegeben. Der Beitrag schließt mit Anmerkungen zur Herstellung und praktischen Hinweisen.

Die Beweggründe zur Bestimmung von mechanischen Eigenschaften von BSH aus Buche sind zunächst auf dem forstwirtschaftlichen Hintergrund Deutschlands zu sehen. Bis weit in das zwanzigste Jahrhundert wurden entwaldete Flächen bevorzugt mit Nadelbäumen aufgeforstet: Sie waren robuster und für die aufzuforstenden Standorte besser geeignet. Ihre dem Laubholz überlegene Wuchsleistung wurde dem Bedarf der Industrie gerecht. Mittlerweile hat eine Veränderung zugunsten der Laubbäume eingesetzt. Waldbau- und Förderrichtlinien verstärken und unterstützen den Anteil an Laubbäumen. Damit sollen Risiken wie Verschlechterung der Böden oder Anfälligkeit gegen Insekten vermieden sowie die ökologische Stabilität der Wälder verbessert werden.

Gegenwärtig besteht nach der zweiten Bundeswaldinventur 2002 der deutsche Wald zu 62 % aus Nadel- und zu 38 % aus Laubwald. Dabei verteilt sich der gesamte Holzvorrat von 3,4 Mrd. m³ zu 64 % auf Nadel- und zu 36 % auf Laubholz. Bezogen auf die Beobachtungsperiode zwischen der ersten Bundeswaldinventur im Jahre 1987 und der zweiten im Jahre 2002 finden sich in den alten Bundesländern bemerkenswert hohe Zuwächse an Buchen, die nur zu 58 % genutzt werden. Im Vergleich dazu wird der Zuwachs von Fichte zu 87 % verbraucht. Insofern verfügt Deutschland über enorme Holzvorräte, die ein ökonomisches Potenzial darstellen und eine Voraussetzung für die Charta für Holz sind. Ihr Ziel ist es, die Nutzung einheimischer Hölzer zu steigern. Das Schaffen von Voraussetzungen für eine baurechtliche Regelung von BSH aus Buche darf als Beitrag dazu verstanden werden.

2. Buchenholz – Allgemeines

2.1 Ökologie der Buche

Die gemeine Buche auch Rotbuche (bot. Name *Fagus sylvatica* L.) ist in West-, Mittel- und Südeuropa ein wichtiger waldbildender Laub-

baum auf mittelgründigen nicht staunassen basischen oder sauren Böden. In den Mittelgebirgen Deutschlands ist sie bis 750 m (Harz, Thüringer Wald) bzw. bis 1400 m (Schwarzwald) waldbildend [1]. Sie besitzt im Vergleich zur Fichte eine geringere Anfälligkeit gegenüber abiotischen (Schnee und Sturm) und biotischen (Insekten) Störfaktoren und verfügt damit über die bessere Fitness. Wären in der Vergangenheit nicht die Baumarten Douglasie, Fichte und Tanne aufgrund ihrer besseren Wuchsleistung durch forstwirtschaftliche Maßnahmen begünstigt worden, würde unter natürlichen Bedingungen die Buche in Mitteleuropa dominieren. Bezüglich der Wuchsleistung erzeugt die Fichte auf einem m² 1,3 kg und die Buche nur 0,4 kg Biomasse pro Jahr. Hinsichtlich der Bewirtschaftung der Wälder ist jedoch zu berücksichtigen, dass mit zunehmender Eintrittswahrscheinlichkeit von Störungen (Klimaänderung in Richtung warm/trocken, Zunahme von Stürmen) der Reinbestand aus Fichte seine Überlegenheit in der Ertragsleistung verlieren und der Mischbestand (Waldbestände mit Beimischungen aus Buche) die Vorteile einer Risikostreuung erbringen wird [2], [3].

Eine Vorstellung von der ökologischen Bedeutung einer einzigen 30 m hohen Buche vermitteln die folgenden Kennzahlen [4]: Sie produziert an einem sonnigen Tag 10 kg organische Stoffe, benötigt dazu etwa 9000 l Kohlendioxid, verdunstet etwa 200 l Wasser, bindet fast 4 kg Luftstaub und gibt dabei 9000 l Sauerstoff ab, das entspricht dem täglichen Bedarf für die Atmung von 10 Menschen.

2.2 Mechanische und physikalische Eigenschaften von Fichten- und Buchenholz

Buchenholz, das in der Vergangenheit bezüglich der stofflichen Nutzung wenig Beachtung fand, zählt mittlerweile zu den wichtigsten Industrielözlern, was mit seinen vorzüglichen Eigenschaften zusammenhängt [1], [5]: Das Holz der Buche ist fest, hart, zäh und widerstandsfähig gegen Reibung. Es ist gut mechanisch zu bearbeiten und lässt sich gedämpft gut biegen.

Die Kennwerte in **Tabelle 1** vermitteln die grundsätzlichen mechanischen und physikalischen Unterschiede zwischen Fichten- und Buchenholz. Die mechanischen Eigenschaften von Buche besitzen deutlich höhere Mittelwerte als diejenigen von Fichte [6]. Bezüglich des differentiellen Schwindmaßes [7] bestehen zwischen den beiden Holzarten keine ausgeprägten Unterschiede. In Abhängigkeit von der Normalrohichte ist die Wärmeleitfähigkeit quer zur Faser von Buchenholz deutlich höher als die von Fichtenholz [8].

Tabelle 1: Mittlere Kennwerte für mechanische Eigenschaften von kleinen, fehlerfreien Proben und physikalische Eigenschaften von Fichte und Buche [1], [6], [7], [8]

Mechanische Eigenschaften in N/mm ²					
	E-Modul E_m	Zug f_t	Biegung f_m	Druck f_c	Scheren f_v
Fichte	11000	95	80	45	6,7
Buche	14000	135	120	60	8,0
Physikalische Eigenschaften					
	Rohdichte ρ_N g/cm ³	differentielles Schwindmaß V % / % Holzfeuchte- änderung		Wärmeleitfähigkeit λ W/(m · K)	
		radial	tangen- tial		
Fichte	0,46	0,19	0,39	0,13	
Buche	0,71	0,20	0,41	0,18	

Allerdings ist das Schnittholz nicht witterungsfest und anfällig gegen Insekten und Pilze. Es neigt schnell zum Verstocken. Deswegen wird Buchenholz bezüglich der natürlichen Dauerhaftigkeit gegen holzerstörende Pilze in Klasse 5 eingestuft und gilt damit als nicht dauerhaft [9]. Diesem Nachteil kann teilweise durch die gute Tränkbarkeit begegnet werden. Davon ausgenommen ist das rotkernige Holz. So weisen Eisenbahnschwellen aus Buche eine Gebrauchsdauer von mindestens 40 Jahren auf.

2.3 Stoffliche Verwendung des Buchenholzes

Einige gegenwärtige Verwendungen von Buchenholz sind [1], [5]: Möbel- und Treppenbau, Parkett, Maschinen- und Werkzeugbau, gemesserte Furniere, Schäl furnier für Holzwerkstoffe, Holzkohle, Zellstoff für Papier, Span- und Faserplatten, gebogene Möbelbauteile (z. B. Thonet-Möbel), keilgezinkte Platten. Die beiden Verwendungsbeispiele für den Möbel- und Innenausbau (*Bild 1*) zeigen die prinzipielle Eignung von Buchenholz für BSH.



Bild 1: Beispiele für die Verwendung von Buchenholz: Gekrümmtes Bauteil aus Furnieren (links) und keilgezinkte Arbeitsplatte (rechts)

3. Festigkeitswerte von Buchenbrettschichtholz – wissenschaftlicher Hintergrund

3.1 Allgemeines

Es war das Ziel, eine Bemessungsgleichung für die charakteristische Biegefestigkeit von BSH aus Buche ($f_{m,g,k}$) in Abhängigkeit von der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter ($f_{t,l,k}$) und der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit ($f_{m,j,k}$) herzuleiten. Dabei sollten auch Bemessungsgrundlagen für wirtschaftliche Hybridträger nur mit Randlamellen aus Buche und Kernlamellen aus Fichte erarbeitet werden. Der umfassende Hintergrund dazu findet sich in [10], [11] und [12].

Eine Bemessung für BSH aus Nadelholz ist in [13] baurechtlich eingeführt, kann aber aufgrund der wesentlich höheren Zugfestigkeit von Buchenbrettern nicht ohne weiteres auf BSH aus Buche übertragen werden. Die Bemessungsgleichung für BSH aus Buche wurde im Sinne von [14], Abschnitt 4.2.3 bestimmt. Darin wird die Berechnung der charakteristischen Biegefestigkeit von Brettschichtholz und weiterer charakteristischer Festigkeitskennwerte – aufbauend auf Kennwerten der Brettlamellen und Keilzinkenverbindungen – als Verfahren generell anerkannt.

Zunächst wurde ein Rechenmodell entwickelt, mit dessen Hilfe die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern aus visuell oder maschinell sortierten Buchenbrettern berechnet werden kann. Die Zuverlässigkeit des Rechenmodells wurde anhand von Biegeprüfungen an Versuchsträgern in Bauteilgröße bestätigt. Mit dem Rechenmodell wurde dann als Ersatz für zahlreiche und kostenintensive Trägerversuche ein umfangreicher Datensatz erzeugt. In diesem wird die Biegefestigkeit der Träger in Abhängigkeit von der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter und der Keilzinkenverbindungen beschrieben. Mithilfe der Regressionsrechnung, eines statistischen Verfahrens, mit dem ein funktionaler Zusammenhang aufgefunden werden kann, wurde aus diesen Daten die Bemessungsgleichung ermittelt. Diese erlaubt es, mit jeder sinnvollen Kombination aus Zugfestigkeit der Bretter und Keilzinkenbiegefestigkeit die charakteristische Biegefestigkeit des Brettschichtholzes zu berechnen. Insofern kann ein Brettschichtholzhersteller unter Gewähr-



Bild 2: Unbesäumte Buchenbretter auf dem Kastenstapel als Ausgangsmaterial (links) und handwerkliches Besäumen auf fixe Breite (rechts)

leistung bestimmter charakteristischer Festigkeitswerte für Bretter und Keilzinkenverbindungen Buchenbrettschichtholz mit einer entsprechenden charakteristischen Biegefestigkeit herstellen und anbieten.

3.2 Buchenbretter – experimentelle Sortierung

Für die Forschungsarbeiten [10], [12] wurden zunächst in drei Sägewerken Buchenbretter entnommen. Herkunft: Spessart (Bayern), Nordhessen und Schönbuch (Baden Württemberg). Die unbesäumten Bretter (Bild 2 links) lagerten in den Sägewerken bereits 1 ½ bis 2 ½ Jahre an der freien Luft. Vor der Lieferung wurden sie technisch getrocknet und parallel besäumt. Selbst in kleinen, noch handwerklich geprägten Sägewerken konnte das Brettmaterial zuverlässig produziert werden (Bild 2 rechts). Die Regel ist jedoch in größeren Sägewerken eine weitgehend automatisierte Produktion.

Die technische Trocknung auf etwa 10 % Holzfeuchte nahm jeweils 10 bis 14 Tage in Anspruch. Insgesamt standen 2075 (26 m³) Buchenbretter für die Herstellung von BSH zur Verfügung. Für diese wurde eine experimentelle maschinelle Sortierung in fünf Klassen festgelegt (Tabelle 2). Der dynamische Elastizitätsmodul der Bretter (E_{dyn}), der aus Längsschwingungen ermittelt wird, war dafür der einzige Sortierparameter. In der Praxis ermitteln Maschinen wie z. B. der ViSCAN

Tabelle 2: Experimentelle Klassifizierung von Buchenbrettern

Klasse	Grenzen für den dynamischen Elastizitätsmodul N/mm ²
1	$E_{dyn} \leq 13000$
2	$13000 < E_{dyn} \leq 14000$
3	$14000 < E_{dyn} \leq 15000$
4	$15000 < E_{dyn} \leq 16000$
5	$16000 \leq E_{dyn}$

der Firma Microtec zuverlässig die Eigenfrequenz einer Längsschwingung mittels Lasertechnologie. In Bild 3 ist die absolute Ausbeute in den fünf Brettclassen dargestellt. Diese ist weitgehend unabhängig von der Herkunft bzw. dem Wuchsgebiet der Bretter. Die experimentelle Klassifizierung diente einerseits der Sortierung der Bretter vor der Herstellung von kombinierten und hybriden Versuchsträgern. Andererseits eignet sie sich für den Einsatz im Rechenmodell, weil sie sich numerisch beschreiben lässt. Insofern können die wirklichen Versuchsträger gleichwertig im Rechenmodell modelliert und berechnet werden. Damit ist dann ein aussagekräftiger Vergleich zwischen Theorie und Praxis möglich.

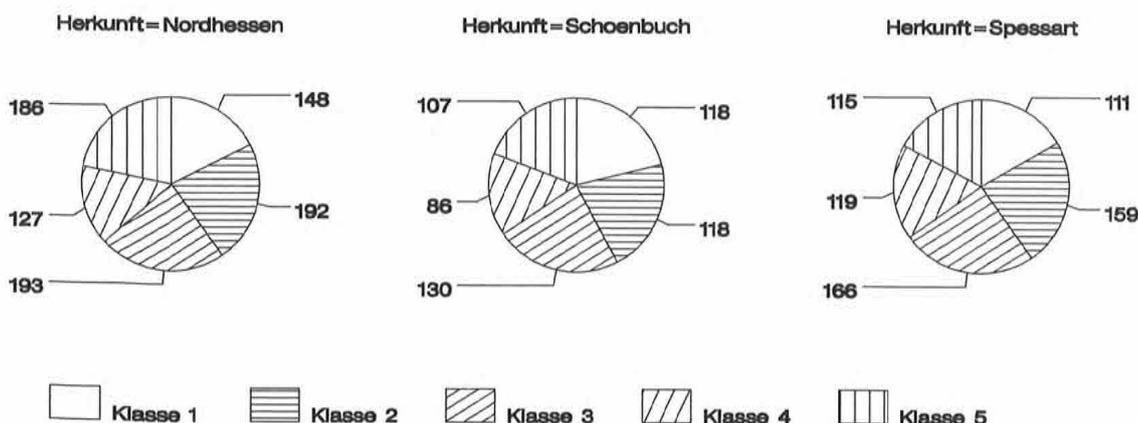


Bild 3: Absolute Ausbeute in den fünf Brettclassen

3.3 Rechenmodell

Mit den Erfahrungen früherer Forschungsarbeiten [15], [16] wurde in Zusammenarbeit mit der Holzforschung München ein neues Rechenmodell entwickelt, das die Durchführung von Biegeversuchen an BSH-Trägern aus Buche ersetzt. Die Zusammenhänge und Arbeitsweise sind in **Bild 4** dargestellt. Es ist in ein Simulationsprogramm für Brettschichtholzträger und in Rechenanweisungen für eine Finite-Elemente-Berechnung unterteilt. Im Simulationsprogramm werden die mechanischen Eigenschaften von keilgezinkten Buchenlamellen abschnittsweise in Schrittweiten von 150 mm Länge mithilfe der Regressionsrechnung ermittelt. Die natürlichen Streuungen der mechanischen Eigenschaften werden unter Beachtung der Ästigkeit, der Rohdichte und der Wuchsregelmäßigkeiten wirklichkeitsnah berücksichtigt. Mithilfe der Finite-Elemente-Methode wird die Tragfähigkeit der simulierten Träger berechnet. Dazu werden die künstlich erzeugten mechanischen Eigenschaften der Brettlamellen den Elementen des Finite-Elemente-Modells als Materialkennwerte systematisch zugeordnet, so dass ein berechenbares Modell eines Brettschichtholzträgers vorliegt. In der Druckzone der Träger wird ideale Elastoplastizität modelliert. In der Zugzone ist das Materialverhalten linear-elastisch bis zum Bruch. Ein Riss in der Randlamelle der Zugzone ist das Versagenskriterium.

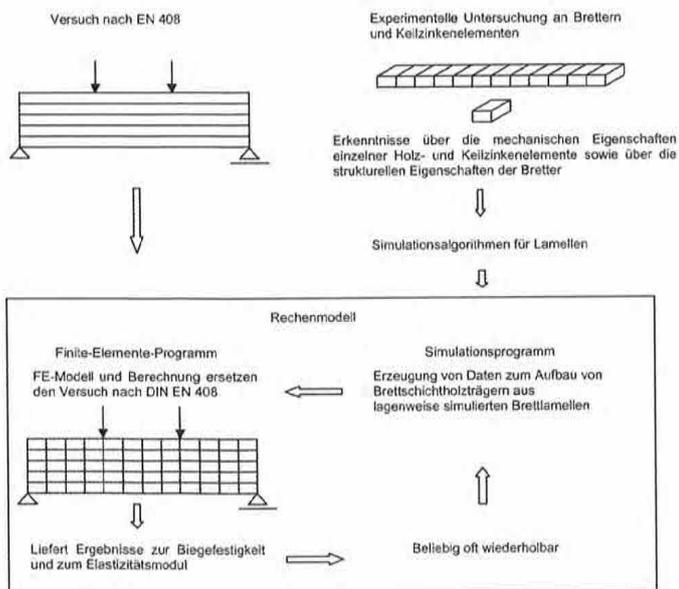


Bild 4: Zusammenhänge beim Rechenmodell

Tabelle 3: Trägerklasse in Abhängigkeit vom Aufbau

Trägerklasse	Brettklasse der Randlamellen	Brettklasse der Kernlamellen
sehr hoch = SH	5	3 bzw. S10 ¹
hoch = H	4	2 bzw. S10 ¹
niedrig = N	1	1

¹ Nadelholz-Kernlamellen der Sortierklasse S10 bei hybriden Trägern

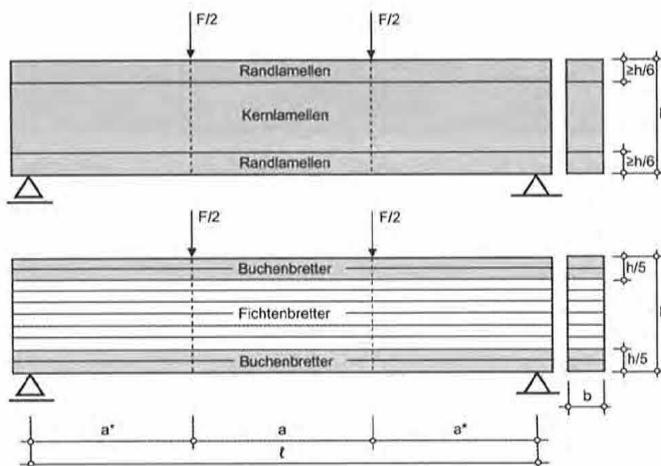


Bild 5: Aufbau und Belastung der kombinierten bzw. homogenen (oben) und hybriden (unten) Versuchsträger

mittlere Biege-Elastizitätsmoduln erwarten ließen. Die Variation der mittleren Biegefestigkeit und des mittleren Biege-Elastizitätsmoduls zwischen den Reihen wurde durch die experimentelle Klassifizierung des erforderlichen Brettmaterials (**Tabelle 2**), eine gezielte Anordnung der Bretter im Trägerquerschnitt (**Tabelle 3** und **Bild 5**) sowie unterschiedliche Trägerhöhen bzw. Stützweiten erreicht (**Tabelle 4**). Dabei wurden auch hybride Träger aufgebaut, deren Randlamellen aus Buchen- und deren Kernlamellen aus Fichtenbrettern der Sortierklasse S10 hergestellt wurden. Alle Träger wurden von der Firma Schaffitzel in Schwäbisch Hall produziert. Die Keilzinkenverbindungen wurden mit dem für Nadelholz gebräuchlichen Profil 15/3,8 gefertigt. Als Kleber für die

Tabelle 4: Querschnitts- und Systemmaße der Träger sowie Kurzbezeichnung der Reihen in Abhängigkeit von Trägerklasse und Höhe

Querschnitts- und Systemmaße in mm					
Höhe h	110	300	340	600	
Breite b	105	100	110	100-105	
Stützweite ℓ	1500	5400	5400	9000	
Lastangriff a/a^*	640/430	1800/1800	2100/1650	3600/2700	
Kurzbezeichnung der Reihen					
Trägerklasse	SH	-	SH-300 ¹	SH-340	SH-600
	H	H-110	H-300 ¹	H-340	H-600
	N	N-110	-	N-340	-

¹ Die Träger dieser Reihen besitzen einen hybriden Aufbau

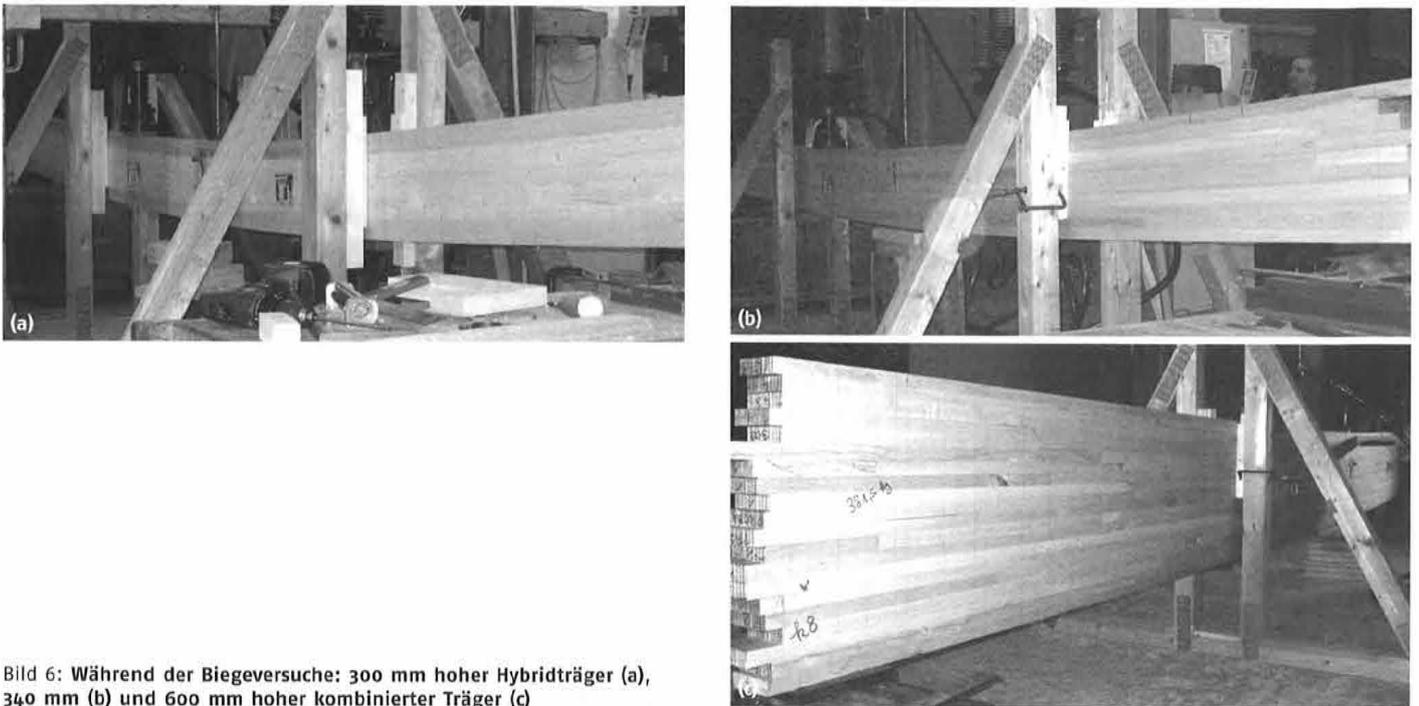
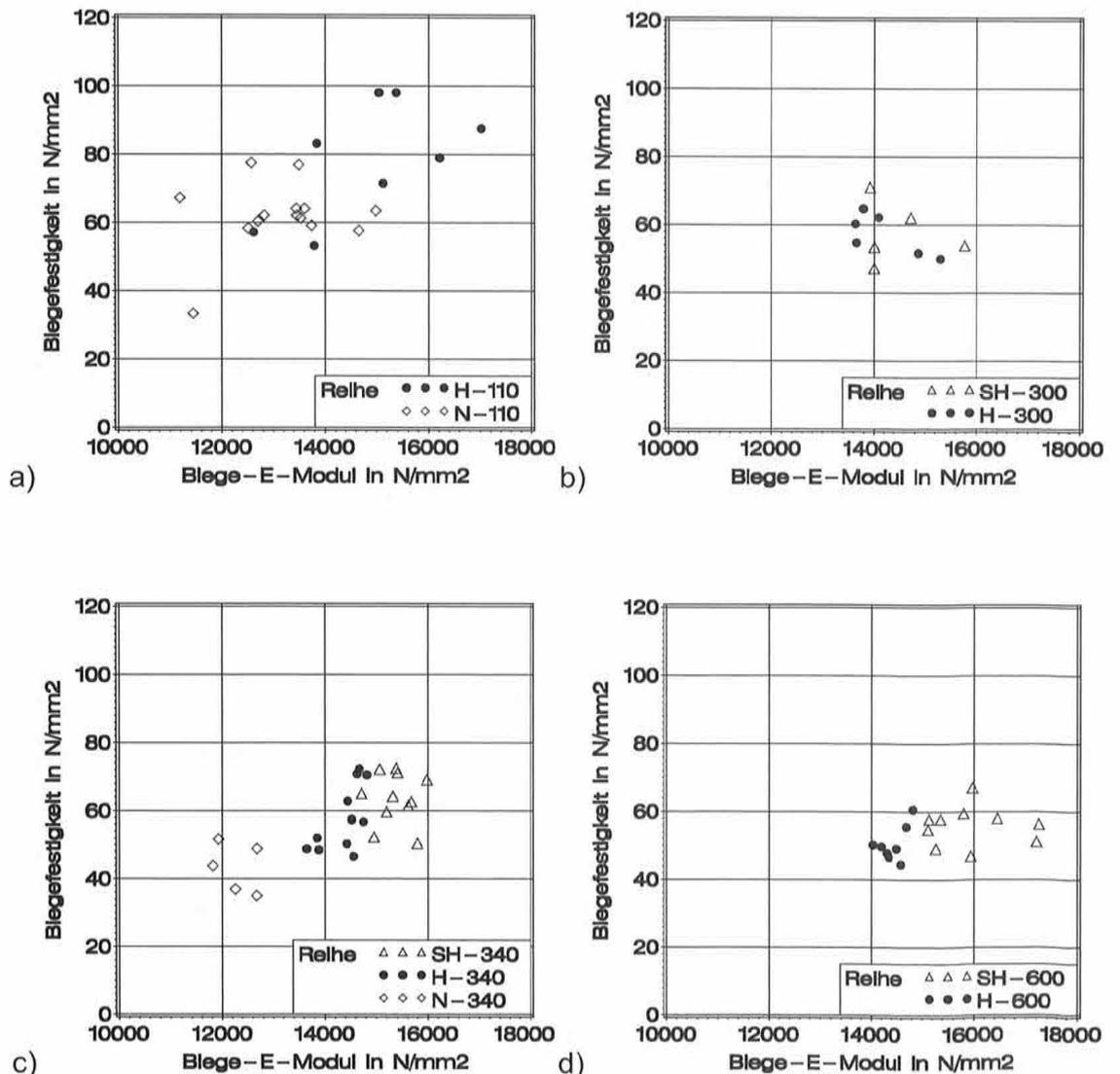


Bild 6: Während der Biegeversuche: 300 mm hoher Hybridträger (a), 340 mm (b) und 600 mm hoher kombinierter Träger (c)

Keilzinken- und Schichtverklebung wurden Kauramin®-Leim 681 flüssig und Kauramin®-Härter 686 flüssig verwendet. Dieses System ist für das Verkleben tragender Bauteile im Sinne von [17] geeignet, wobei darin die Verwendung von Laubholz für BSH zurzeit nicht geregelt ist.

Die Biegeversuche mit dem Versuchsaufbau in Bild 5 wurden gemäß [18] durchgeführt. Bild 6 zeigt einige Träger während der Versuche. Die Ergebnisse der Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul sind in Bild 7 dargestellt.

Bild 7: Biegefestigkeit in Abhängigkeit vom Biege-Elastizitätsmodul: 110 mm (a), 300 mm (b), 340 mm (c) und 600 mm (d) hohe Versuchsträger



In **Bild 8** ist für jede Trägerhöhe die Verteilung der Biegefestigkeit für Versuchsträger der vereinigten Trägerklassen „sehr hoch“ und „hoch“ einer Normalverteilung gegenübergestellt. Eine gemeinsame Darstellung der Versuchswerte ist aufgrund des geringen Unterschieds zwischen der mittleren Biegefestigkeit der beiden oberen Trägerklassen möglich. In **Bild 8a** sind Festigkeitswerte der Träger mit 110 mm Höhe, im **Teilbild b** der kombinierten und hybriden Träger mit 300 bzw. 340 mm Höhe und im **Teilbild c** der Träger mit 600 mm Höhe zusammengefasst. Aus den Bildern lassen sich nun zuverlässige charakteristische

Biegefestigkeiten ableiten: Bei den Trägern mit drei Lamellen kann die charakteristische Biegefestigkeit zu 50 N/mm² abgeschätzt werden. Bei den 300 bis 340 mm hohen Trägern, zunächst unabhängig von einem kombinierten oder hybriden Aufbau, ist eine charakteristische Biegefestigkeit von 47 N/mm² und bei doppelt so hohen Trägern von etwa 44 N/mm² nachweisbar.

3.5 Prüfung des Rechenmodells

Für die Prüfung der Zuverlässigkeit des Rechenmodells wurden die im Biegeversuch geprüften Träger bezüglich ihres Aufbaus und der Eigenschaften der verwendeten Bretter (Holart bei Hybridträgern, Ästigkeit, Rohdichte und Elastizitätsmodul) so exakt wie möglich modelliert und dann berechnet. Dabei wurde nicht die Struktur eines einzelnen, individuellen im Versuch geprüften Trägers im Rechenmodell abgebildet, sondern es wurden je Reihe 500 Träger simuliert, die dem Aufbauprinzip einer Trägerreihe entsprachen. Dabei wurden nur Träger mit einer Höhe über 300 mm simuliert und berechnet, weil das Rechenmodell für die Berechnung dreilagiger Querschnitte ungeeignet ist. **Bild 9** zeigt eine Gegenüberstellung der Festigkeitswerte aus den Biegeversuchen und der zugehörigen Simulationsergebnisse:

Die Darstellung belegt, dass die Versuchsergebnisse weitgehend innerhalb der Spanne Mittelwert +/- Standardabweichung der Simulationsrechnungen liegen. Innerhalb einer Trägerklasse wird die kleinere mittlere Biegefestigkeit bei hybriden im Vergleich mit kombinierten Trägern durch das Rechenmodell verdeutlicht – Der niedrigere Elastizitätsmodul von Nadelholzlamellen der Sortierklasse S10 bewirkt im Verbundquerschnitt eine höhere Beanspruchung der Buchenrandlamellen und damit eine kleinere rechnerische Biegefestigkeit. Die Abnahme der Biegefestigkeit mit zunehmender Trägerhöhe wird in den Simulationsrechnungen richtig wiedergegeben. Hinsichtlich der Abnahme der Biegefestigkeit aufgrund der unterschiedlichen Klassen der Randlamellen in den einzelnen Reihen der Träger besteht zwischen den Versuchs-

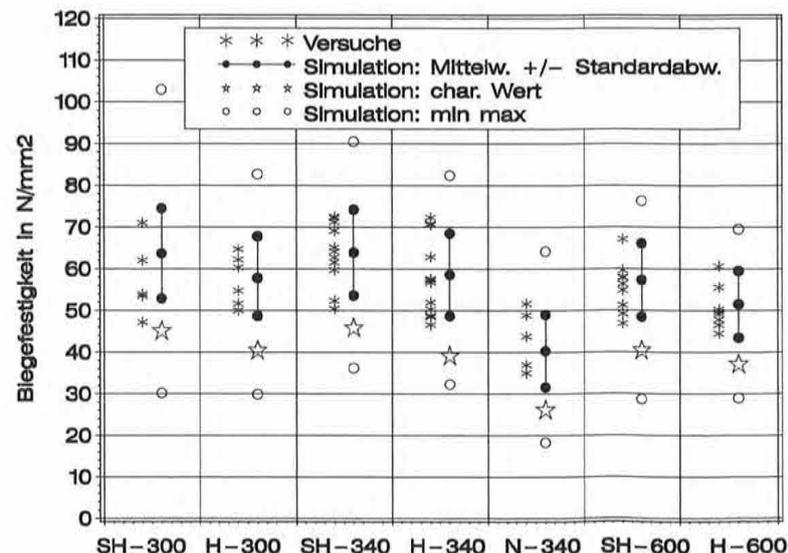
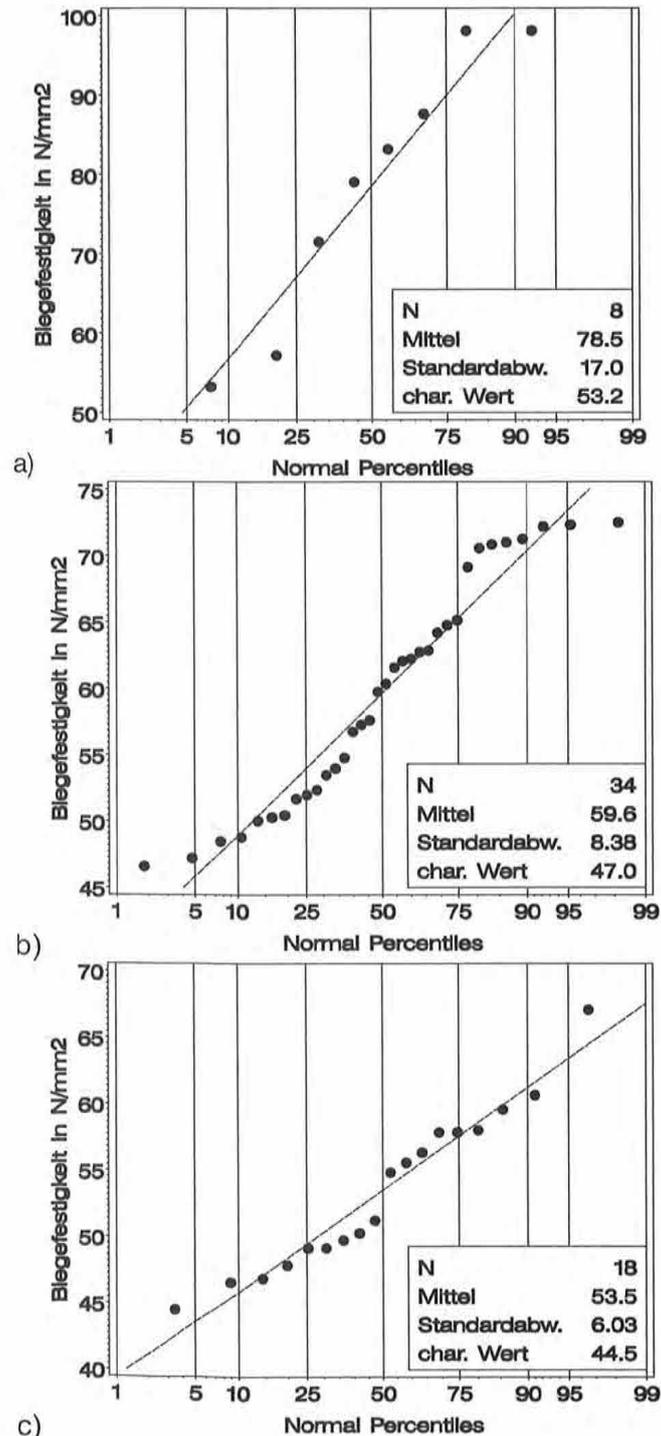


Bild 8: Verteilung der Biegefestigkeit von Trägern aus den Reihen: H-110 (a), SH-300, H-300, SH-340 und H-340 (b) sowie SH-600 und H-600 (c)

Bild 9: Biegefestigkeit der Versuchsträger gruppiert nach Reihe und zugehörige Simulationsergebnisse; Die Reihen SH-300 und H-300 entsprechen den hybriden und die übrigen den kombinierten Trägern.

und Simulationsrechnungen Übereinstimmung. Es darf angenommen werden, dass im Rechenmodell die Standardabweichung der Biegefestigkeit größer ausfällt als in Wirklichkeit. Die Simulationsergebnisse lägen demzufolge auf der sicheren Seite. Bezüglich des Biege-Elastizitätsmoduls besteht sehr gute Übereinstimmung zwischen Versuch und Simulation [11], [12].

Insofern ist das Rechenmodell zur Festigkeits- und Steifigkeitsvorhersage von BSH aus Buche auch für weitere von **Tabelle 2** abweichende Sortierungen anwendbar und darf als Ersatz für Biegeversuche eingesetzt werden.

3.6 Entwicklung der Bemessungsgleichung

Mit steigenden Anforderungen an die Sortierung der Bretter nimmt bekanntermaßen deren Zugfestigkeit und damit auch die Biegefestigkeit daraus aufgebauter Brettschichtholzträger zu. Diese Gesetzmäßigkeit wurde genutzt, um möglichst praxisnah eine Bemessungsgleichung für BSH aus Buche auf theoretischem Weg herzuleiten. Es wurden zunächst Sortiermodelle für Buchenbretter, teilweise in Anlehnung an [19], entwickelt, die einen unterschiedlichen Einfluss auf die Größe der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter besitzen (**Tabelle 5**). Die Ermittlung der charakteristischen Zugfestigkeit in der letzten Spalte wurde mit dem Rechenmodell durchgeführt. Dazu wurde je Modell von etwa 2400 simulierten Brettern die kleinste Zugfestigkeit innerhalb eines Brettes statistisch ausgewertet. Die Größenordnung der auf diese Weise abgeschätzten Zugfestigkeit entspricht etwa den Werten der charakteristischen Zugfestigkeit der Festigkeitsklassen D35 bis D70 gemäß [20]. Bei den Modellen sind zum einen nur Grenzwerte für Äste zu berücksichtigen, wodurch eine schnelle Einführung bei Brettschichtholzherstellern begünstigt wird. Zum anderen werden zwei kombinierte maschinelle und visuelle Verfahren vorgeschlagen, welche die Herstellung von Brettschichtholzträgern mit hoher Biegefestigkeit ermöglichen. Mit zahlreichen Simulationsrechnungen von Trägern aus Brettern dieser Sortierungen wurde ein Datensatz erzeugt, in dem die Werte der Biegefestigkeit des Brettschichtholzes von den Sortierungen und damit von der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter sowie von einer variablen charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit abhängen (**Bild 10**). Mit der charakteristischen Biegefestigkeit der Träger als abhängige Variable und der charakteristischen Zugfestigkeit der Bretter sowie der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit als unabhängige Variablen

Tabelle 5: Sortiermodelle für Buchenbretter, Kriterien und deren Grenzwerte sowie charakteristische Zugfestigkeit der Bretter

Modell	Ästigkeit	E-Modul N/mm ²	$f_{t,k}$ N/mm ²
LS10	DEB ≤ 0,33	-	≈ 21
LS13	DEB ≤ 0,20	-	≈ 24
„Astfrei“	DEB ≤ 0,04	-	≈ 30
MSa	DEB ≤ 0,20	15000 < E_{dyn}	≈ 42
MSb	DEB ≤ 0,04	15000 < E_{dyn}	≈ 48

DEB = Ästigkeit A für den Einzelast nach [19]

wurde der funktionale Zusammenhang für die Bemessungsgleichung (1) hergeleitet.

Mit dieser kann, wie beabsichtigt, die charakteristische BSH-Biegefestigkeit für beliebige sinnvolle Kombinationen aus Brett- und Keilzinkenqualität berechnet werden.

$$f_{m,g,k} = -2,87 + 0,844 \cdot f_{m,j,k} - 0,0103 \cdot f_{m,j,k}^2 - 0,192 \cdot f_{t,\ell,k} - 0,0119 \cdot f_{t,\ell,k}^2 + 0,0237 \cdot f_{m,j,k} \cdot f_{t,\ell,k} \quad (1)$$

3.7 Charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit

Für den interessierten Hersteller von BSH aus Buche werden Richtwerte für die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit von Bedeutung sein. Anhand dieser Richtwerte und mit Ergebnissen eigener Biegeprüfungen an Keilzinkenprüfkörpern aus Buche kann er die Eignung seiner Anlage für BSH aus Buche abschätzen. Erst eine von der Sortierung abhängige charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit ermöglicht zusammen mit den Kurven in **Bild 10** eine Festlegung oder Abschätzung der charakteristischen BSH-Biegefestigkeit. Unter der Voraussetzung, dass die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit von visuell festigkeitssortierten Brettern unabhängig von der Sortierung (LS10, LS13 oder „Astfrei“) gleich ist, und aufgrund der Tatsache, dass sich die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit ab einem dynamischen Elastizitätsmodul der Bretter von 15000 N/mm² nicht mehr steigern lässt, kann vereinfacht von nur zwei unterschiedlichen Verteilungen der Keilzinkenbiegefestigkeit ausgegangen werden [21]: Verteilung für visuell sortiertes und maschinell festigkeitssortiertes Material. An Keilzinkenproben aus solchen Brettern wurde die Biegefestigkeit in Flachkant-Biegeversuchen in Anlehnung an [18] bestimmt. Die Stützweite entsprach der 15 fachen Dicke. Alle Proben erfüllten die Anforderungen in [22]. Bezüglich des Klebstoffs und Profils der Proben siehe Abschnitt 3.4. In **Bild 11** sind die Verteilungen der Keilzinkenbiegefestigkeit dargestellt: im **Teilbild a** für Proben aus visuell und im **Teilbild b** aus maschinell festigkeitssortierten Brettern. Demnach ist bei einer visuellen

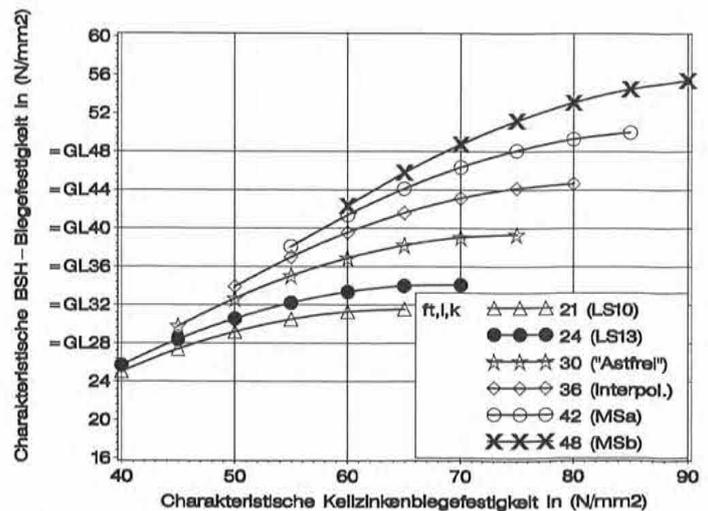


Bild 10: Charakteristische Biegefestigkeit simulierter Brettschichtholzträger in Abhängigkeit von der charakteristischen Keilzinkenbiegefestigkeit; Die BSH-Biegefestigkeit ist bezogen auf eine Trägerhöhe von 600 mm.

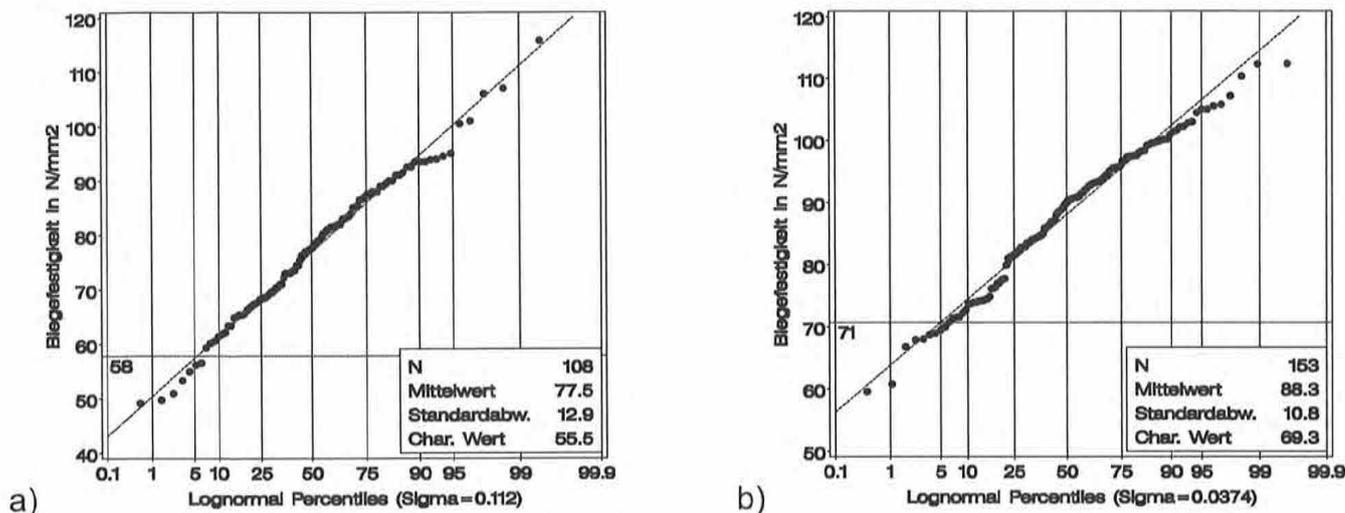


Bild 11: Verteilung der Keilzinkenbiegefestigkeit für visuell (a) und maschinell festigkeitssortierte Buchenbretter (b); Werte an den horizontalen Hilfslinien entsprechen dem 5%-Quantil aus den angepassten Lognormalverteilungen

Festigkeitssortierung ein charakteristischer Wert von 56 N/mm² und bei einer maschinellen von 69 N/mm² nachweisbar. Die Werte aus den angepassten Lognormalverteilungen (unterhalb der horizontalen Hilfslinien) liegen sogar etwas höher. Bemerkenswert sind diese Werte der Buche im Vergleich mit maschinell festigkeitssortiertem Nadelholz. In **Bild 12** sind die Verteilungen der Keilzinkenbiegefestigkeit von Nadelholzbrettern der Klassen MS13 und MS17 dargestellt. Die Daten stammen aus Güteüberwachungen von 9 Firmen aus den Jahren 1997 bis 2005. Demnach besitzen Keilzinkenverbindungen aus Buchenbrettern mit einem dynamischen Elastizitätsmodul > 15000 N/mm² eine um 56 % höhere charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit als solche aus Nadelholzbrettern der Klasse MS17!

3.8 Festigkeitswerte

Anhand der Bemessungsgleichung bzw. der Kurvenschar in **Bild 10** lassen sich zusammen mit den Richtwerten für die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit Empfehlungen für Festigkeitsklassen für kom-

biniertes BSH aus Buche ausarbeiten. Diese sind in **Tabelle 6** zusammengefasst. Sie sind ohne Einschränkung auch auf homogenes BSH aus Buche übertragbar.

Bezüglich der charakteristischen Biegefestigkeit von hybriden Trägern ist Folgendes zu berücksichtigen: Durch den Austausch der Kernlamellen aus Buche durch Fichtenlamellen (**Bild 5**), die einen niedrigeren Elastizitätsmodul als Buchenlamellen besitzen, sind die Randlamellen aus Buche bei gleicher Biegebeanspruchung höheren Spannungen ausgesetzt. Diese Spannungserhöhung beträgt etwa 3 %. Sie kann ausgeglichen werden, indem die Anforderungen an die charakteristische Keilzinkenbiegefestigkeit geringfügig angehoben werden. Die entsprechenden Empfehlungen für Festigkeitsklassen für Hybridträger finden sich in **Tabelle 7**. Die vergleichsweise geringe Biegefestigkeit des Kernbereichs aus Nadelholz der Sortierklasse S10 (das entspricht GL24) erfordert, dass die Buchenlamellen oben und unten jeweils 20 % der Trägerhöhe beanspruchen.

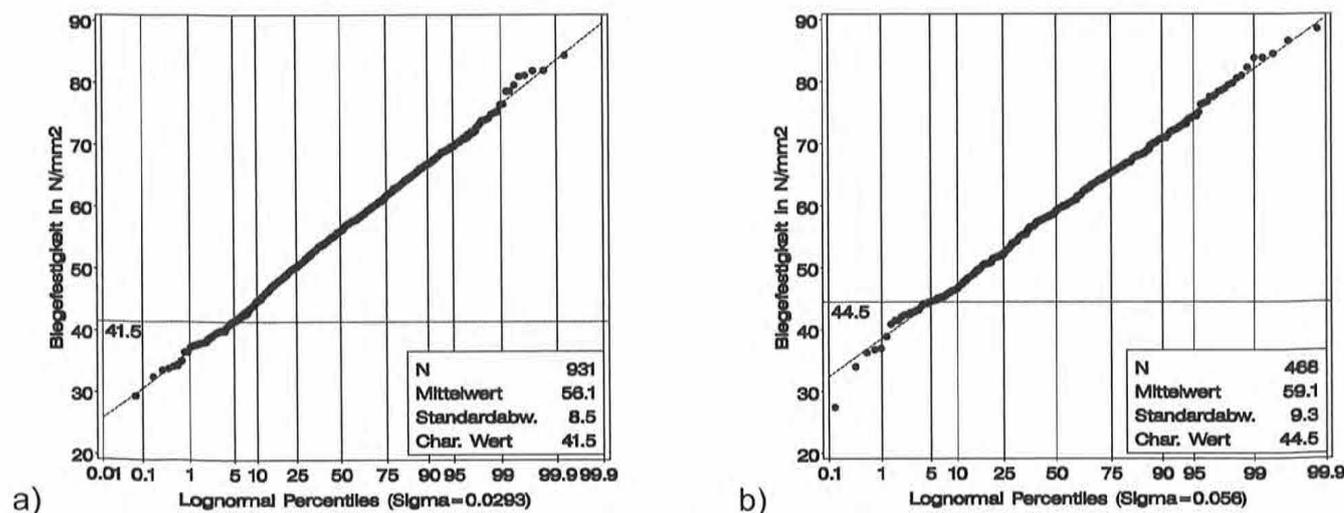


Bild 12: Verteilung der Keilzinkenbiegefestigkeit für maschinell festigkeitssortiertes Nadelholz: MS13 (a) und MS17 (b)

Tabelle 6: Festigkeitsklassen für kombinierte Träger: Rechenwerte für charakteristische Festigkeits-, Steifigkeits- und Rohdichtekennwerte; Anforderungen an die Lamellen und Keilzinkenverbindungen

	GL28h	GL32c	GL36c	GL40c	GL44c	GL48c
Festigkeitskennwerte in N/mm²						
$f_{m,k}$	28	32	36	40	44	48
$f_{t,0,k}$	21	22	24	26	28	30
$f_{t,90,k}$	0,5					
$f_{c,0,k}$	26					
$f_{c,90,k}$	8,8					
$f_{v,k}$	3,8					
Steifigkeitskennwerte in N/mm²						
$E_{0,mean}$	13500	13500	13500	14300 ¹	15100	15100
$E_{90,mean}$	750					
$E_{0,05}$	12700	12700	12700	13700 ¹	14700	14700
G_{mean}	900					
Rohdichtekennwerte in kg/m³						
ρ_k	620					
Anforderungen an die Randlamellen ($\geq h/6$)						
Sortierung ³	LS10	LS13	„Astfrei“	.. ²	LS13	„Astfrei“
E_{dyn}	-	-	-	.. ²	> 15000	> 15000
$f_{t,0,k}$	21	24	30	36 ¹	42	48
$f_{m,j,k}$	≥ 47	≥ 55	≥ 58	$\geq 62^1$	≥ 65	≥ 69
Anforderungen an die Kernlamellen						
Sortierung ³	LS10	LS10	LS10	.. ²	LS10	LS10
E_{dyn}	-	-	-	.. ²	> 14000	> 14000
1,2 und 3 siehe Tabelle 7						

Für Träger mit einer von 600 mm abweichenden Höhe darf bzw. sollte die charakteristische Biegefestigkeit bei Flachkant-Biegebeanspruchung der Lamellen mit Gleichung (2) in Anlehnung an [17] multipliziert werden. In [11] wurde gezeigt, dass erst bei einer Trägerhöhe von 1200 mm und einer Stützweite von 18 h der Einfluss der Höhe auf die Biegefestigkeit abgeklungen ist. Die charakteristische Biegefestigkeit beträgt dann 90 % von den Bezugswerten in **Tabelle 6** und **Tabelle 7**.

$$k_h = \begin{cases} 1,10 & b < 300 \text{ mm} \\ \left(\frac{600}{b}\right)^{0,14} & 300 \leq b \leq 1200 \text{ mm} \\ 0,90 & b > 1200 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

Gestaffelte Werte für die Zug- und Druckfestigkeit parallel und rechtwinklig zur Faser sowie die Schubfestigkeit sollten zum Teil noch durch Versuche abgesichert werden. Hier besteht noch weiterer Forschungsbedarf. Es ist aber vertretbar, diese Werte den Festigkeitsklassen D35 und D40 zu entnehmen, denen in [17] die Sortierklassen LS10

Tabelle 7: Festigkeitsklassen für Hybridträger: Rechenwerte für charakteristische Festigkeits- und Steifigkeitskennwerte; Anforderungen an die Lamellen und Keilzinkenverbindungen

	GL28hyb	GL32hyb	GL36hyb	GL40hyb	GL44hyb	GL48hyb
Festigkeitskennwerte in N/mm²						
$f_{m,k}$	28	32	36	40	44	48
Steifigkeitskennwerte in N/mm²						
$E_{0,mean}$	13200	13200	13200	14000 ¹	14700	14700
$E_{0,05}$	12400	12400	12400	13400 ¹	14200	14200
Anforderungen an die Randlamellen aus Buche ($\geq h/5$)						
Sortierung ³	LS10	LS13	„Astfrei“	.. ²	LS13	„Astfrei“
E_{dyn}	-	-	-	.. ²	> 15000	> 15000
$f_{t,0,k}$	21	24	30	36 ¹	42	48
$f_{m,j,k}$	≥ 50	≥ 59	≥ 61	$\geq 65^1$	≥ 68	≥ 72
Anforderungen an die Kernlamellen aus Nadelholz						
Sortierung ³	S10	S10	S10	S10	S10	S10
¹ Werte interpoliert ² Eine Sortierung für Äste und Grenzwerte für den dynamischen Elastizitätsmodul werden hier nicht angegeben, weil die Anforderungen an die charakteristische Festigkeit der Bretter und Keilzinkenverbindungen nur anhand von Gleichung (1) und nicht mit Hilfe eines Sortiermodells festgelegt wurden. ³ nach [19] bzw. [23]						

und LS13 zugeordnet werden. Insofern stehen diesbezüglich dem Planer gegenwärtig nur konservative Anhaltswerte für die Bemessung von BSH aus Buche zur Verfügung. Diese sind in **Tabelle 6** aufgenommen. Bei der Bemessung von Hybridträgern sind diese Werte sinngemäß anzusetzen, wobei in Bereichen des Nadelholzes die Festigkeitswerte für GL24h anzuwenden sind.

4. Herstellung und praktische Hinweise

Bezüglich der Herstellung gibt es zwischen BSH aus Buche und Nadelholz keine grundsätzlichen Unterschiede. Dennoch sei auf einige Forschungsergebnisse und Erfahrungen bei der Herstellung von BSH aus Buche hingewiesen:

Die im Mittel verarbeitete Brettlänge bei Buche ist wesentlich kürzer als bei Nadelholz. Sie liegt abhängig von der Schaftlänge des Rohholzes zwischen 2,3 m und 3 m. Damit geht eine größere Häufigkeit von Keilzinkenverbindungen im BSH einher.

Gute Ergebnisse beim Fräsen der Keilzinken lassen sich mit Minizinkenfräsern erzielen, die mit HS-Super – ein Stahl mit sehr feiner und gleichmäßiger Körnung an der Schneidkante – bestückt sind. Darüber hinaus sind HW-bestückte Zinkenfräser mit langer Standzeit für Hartholz im Handel erhältlich.

Zuverlässige Verklebungen hinsichtlich der Keilzinkenbiegefestigkeit und der Scherfestigkeit der Klebefuge lassen sich mit Melamin-Harnstoff-Formaldehyd-Harz Klebstoffen erzielen [24], [25]. Das ist unabhängig davon, ob weißes oder rotkerniges bzw. weißes mit rotkernigem Buchenholz verklebt wird.

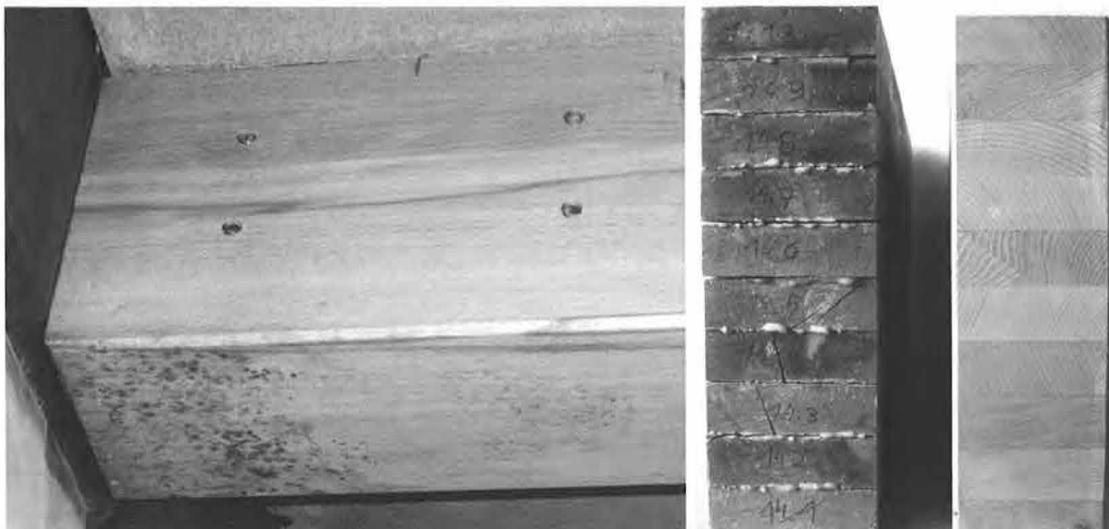


Bild 13: Verstockte Unterseite im Anschlussbereich, Aufnahme Ralf Burkhardt (links) und delaminierte sowie intakte Stirnfläche (rechts)

Von Interesse werden die Kosten für Brettschichtholz aus Buche sein. Hier kann lediglich eine grobe Schätzung abgegeben werden, die nur auf den entstandenen Kosten für die Buchenbretter der Versuchsträger beruht, wobei angenommen wird, dass der Preisunterschied zwischen BSH aus Buche und BSH aus Fichte zunächst nur durch die Kosten für das Brettmaterial bedingt ist. Für die folgende Kalkulation wurde der günstigste Anbieter ausgewählt, bei dem zum Teil rotkernige Buchenbretter für die Herstellung der Versuchsträger eingekauft wurden – der nicht zwangsläufig auftretende Rotkern bei Buche führt zu Preiseinbußen beim Rundholz. Demnach liegt für GL36 der Preis für Buchenbretter (ohne Fracht) mit einer fixen Breite von 120 mm und 10 % Holzfeuchte, die ohne weitere Verluste (z. B. Abfall durch Kapfen am Brettende vor dem Fräsen der Zinken, Ausschuss nach dem Sortieren) zur Herstellung von BSH verwendet werden können, bei über 500 €/m³. Berücksichtigt man, dass durch das Hobeln der Lamellen vor der Schichtverklebung, das Hobeln der Träger auf endgültige Querschnittsmaße und das Ablängen etwa 30 % des Brettvolumens zerspannt werden, betragen die Kosten des Holzes für 1 m³ BSH aus Buche über 710 €. Für eine exakte Vergleichsrechnung müssen noch zahlreiche weitere Aspekte berücksichtigt werden: Klebstoffverbrauch, Beanspruchung der Schneidwerkzeuge, Mehrkosten für die Sortierung von Laubholz, Preisschwankungen, Güteklasse des Ausgangsmaterials gemäß Verordnung über gesetzliche Handelsklassen für Rohholz etc.

Bemerkenswert ist, dass gemäß *Bild 3* unabhängig von der Herkunft etwa ein Drittel der Bretter in die Klassen 4 und 5 sortiert werden kann, wodurch bei einer maschinellen Festigkeitssortierung ein großer Teil des Brettmaterials für die Herstellung kombinierter Träger mit hochwertigen Randlamellen in einem Bereich von jeweils 1/6 der Trägerhöhe verwendet werden kann.

Die im Abschnitt 2.2 aufgeführten Nachteile bezüglich der Dauerhaftigkeit von Buchenholz stellen erhöhte Anforderungen an die Bauteile während der Herstellung, der Lagerung, des Einbaus und der Nutzung. Wasserzutritt und schlechte Belüftung führen rasch zu unansehnlichen Verfärbungen und auf lange Sicht zu Fäulnis (*Bild 13 links*). Auch die Verwendung von Buche im Außenbereich sollte generell ver-

mieden werden. Unvermeidliche Feuchteschwankungen führen nach kurzer Zeit zum Aufreißen der Klebefugen und des Holzes (*Bild 13 rechts*). Auch zu intensive und direkte Sonneneinstrahlung kann zu Rissen im Holz und der Klebefuge führen. Deshalb sollte BSH aus Buche nur da verwendet werden, wo z. B. Möbel, Parkett oder Treppen aus Buche aufgrund von Erfahrungen bedenkenlos eingesetzt werden können.

5. Zusammenfassung und Ausblick

In diesem Tagungsbeitrag werden dem interessierten Hersteller von BSH aus Buche und Planern alle erforderlichen Hintergründe zur charakteristischen Biegefestigkeit von kombiniertem und hybridem (mit Kernlamellen aus Fichte) Buchen-Brettschichtholz vermittelt. Anhand von Versuchen und wissenschaftlichen Methoden wurde gezeigt, dass Buchenbrettschichtholz mit einer charakteristischen Biegefestigkeit von bis zu 48 N/mm² produziert werden kann. Weitere Festigkeitswerte für Nachweise der Standsicherheit können gegenwärtig den Festigkeitsklassen für visuell sortiertes Buchenholz entnommen werden. Damit ist Buchenbrettschichtholz für tragende Zwecke im Bauwesen berechenbar. Der Einsatzbereich von Buchenbrettschichtholz muss allerdings auf die Nutzungsklasse 1 beschränkt bleiben, weil das Buchenholz nicht dauerhaft ist. Es ist ein positives Signal, dass für Hybridträger bereits eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung von der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. beantragt worden ist. Als erstes Zeichen für die Akzeptanz und als Pionierarbeit kann die Verwendung von BSH aus Buche bei einem privaten Bauvorhaben in Reutlingen bezeichnet werden. Hier wurden nach der gleichen Vorgehensweise wie im Forschungsvorhaben Querschnitte aus parallel besäumten Brettern von der Firma Schaffitzel hergestellt. Das Brettmaterial lieferte die Firma Keck in Ehningen. Die Träger wurden als Balkenlage in einem Wohngebäude eingebaut. Sie wurden aus astfreien und zum Teil rotkernigen Brettern verklebt. Zusammen mit einer Bepankung aus Baufurniersperrholz aus Buche entsteht eine optisch ansprechende und natürliche Bauweise (*Bild 14*). Es wäre wünschenswert, wenn weitere Bauvorhaben nachfolgten und BSH aus Buche einen festen Platz unter den Holzprodukten ein-



Bild 14: Einsatz von BSH aus Buche im Hausbau: Balkenlage mit Beplankung aus Baufurniersperrholz aus Buche, Aufnahmen Ralf Burkhardt

nahme. Daraus könnten dann weitere Impulse für eine praxisorientierte Forschung entstehen – z. B. auf dem Gebiet der Verbindungsmitteltechnik.

6. Literatur

- [1] Wagenführ R. Holzatlas. 4. Aufl. Fachbuchverlag: Leipzig 1996
- [2] Pretzsch H (2005). Buchenwachstum im Rein- und Mischbestand. Vortrag anlässlich des 2. Bayerischen Waldbesitzertags in Freising-Weißenstephan am 6.10.2005
- [3] Pretzsch H (2005). Wachstum von Rein- und Mischbeständen bei veränderten Umweltbedingungen. AFZ – Der Wald 60 (9):465-468
- [4] Kremer B P. Die Bäume Mitteleuropas. 2. Aufl. Kosmos: Stuttgart 1998
- [5] Holz-Lexikon. 3. Aufl. DRW-Verlag: Stuttgart 1988
- [6] DIN 68364:2003. Kennwerte von Holzarten
- [7] DIN 68100:1984. Toleranzsystem für Holzbe- und -verarbeitung
- [8] EN 12524:2000. Wärme- und feuchteschutztechnische Eigenschaften – Tabellierte Bemessungswerte
- [9] EN 350-2:1994. Dauerhaftigkeit von Holz und Holzprodukten – Natürliche Dauerhaftigkeit von Vollholz
- [10] Blaß HJ, Denzler JK, Frese M, Glos P, Linsenmann P (2005). Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche. Band 1. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Universitätsverlag Karlsruhe 2005
- [11] Frese M (2006). Die Biegefestigkeit von Brettschichtholz aus Buche – Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Laminierungseffekt. Karlsruhe, Universität (TH). Dissertation
- [12] Blaß HJ, Frese M (2006). Biegefestigkeit von Brettschichtholz-Hybridträgern mit Randlamellen aus Buchenholz und Kernlamellen aus Nadelholz. Band 6. Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. Erscheint in Kürze im Universitätsverlag Karlsruhe 2006
- [13] EN 1194:1999. Brettschichtholz, Festigkeitsklassen und Bestimmung charakteristischer Werte
- [14] EN 14080:2005. Holzbauwerke – Brettschichtholz – Anforderungen
- [15] Ehlbeck J, Colling F, Görlacher R (1985). Einfluss keilgezinkter Lamellen auf die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern. Holz als Roh- und Werkstoff 43: 333-337, 369-373, 439-442
- [16] Ehlbeck J, Colling F (1987). Die Biegefestigkeit von Brettschichtholzträgern in Abhängigkeit von den Eigenschaften der Brettlamellen. Bauen mit Holz 89: 646-655
- [17] DIN 1052:2004-08. Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau
- [18] EN 408:1995. Bauholz für tragende Zwecke und Brettschichtholz – Bestimmung einiger physikalischer und mechanischer Eigenschaften
- [19] DIN 4074-5:2003-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 5: Laubschnittholz
- [20] EN 338:2003. Bauholz für tragende Zwecke – Festigkeitsklassen
- [21] Blaß HJ, Frese M (2006/2007). Die Biegefestigkeit von Keilzinkenverbindungen aus Brettern der Buche (*fagus sylvatica* L.). Manuskript zur Veröffentlichung bei Holz als Roh- und Werkstoff eingereicht.
- [22] EN 385:2001. Keilzinkenverbindungen im Bauholz – Leistungsanforderungen und Mindestanforderungen an die Herstellung
- [23] DIN 4074-1:2003-06. Sortierung von Holz nach der Tragfähigkeit, Teil 1: Nadelchnittholz
- [24] Pöhler E, Klingner R, Künninger T (2004). Abschlussbericht: Rotkerniges Buchenholz – Vorkommen, Eigenschaften und Verwendungsmöglichkeiten. EMPA Dübendorf, Schweiz
- [25] Frühwald A, Ressel JB, Bernasconi A (2003). Hochwertiges Brettschichtholz aus Buchenholz. Abschlussbericht. Institut für Holzphysik und mechanische Technologie des Holzes. Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg

7. Abbildungsnachweis

Ralf Burkhardt Dipl.-Ing. (FH), Freier Architekt, Burgstraße 70, 72764 Reutlingen

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Hans Joachim Blaß



Universität Karlsruhe (TH)
Lehrstuhl für Ingenieurholzbau
und Baukonstruktionen
76128 Karlsruhe
Tel.: 0721 608-2710 (Sekretariat)
Fax: 0721 698-116

- 1980 Diplomprüfung
- 1980 – 1983 Dipl.-Ing. im technischen Büro der Firma Ed. Züblin AG,
Stuttgart
- 1983 – 1987 Wissenschaftlicher Angestellter an der Versuchsanstalt für Stahl,
Holz und Steine der Universität Karlsruhe (TH), Abteilung
Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen
- 1987 Promotion zum Dr.-Ing.
- 1987 – 1991 Akademischer Rat an der Versuchsanstalt für Stahl, Holz und
Steine der Universität Karlsruhe (TH), Abteilung Ingenieurholz-
bau und Baukonstruktionen
- 1989 –1990 Forschungsaufenthalt bei Forintek Canada Corp., Vancouver B.C.,
Kanada
- 1991 – 1995 Wissenschaftlicher Leiter der Gruppe Ingenieurholzbau des
Zentrums für Holzforschung, TNO Bauforschung, Delft,
Niederlande
- 1991 – 1995 Inhaber des Lehrstuhls für Holzkonstruktionen der technischen
Universität Delft, Niederlande
- Seit 1995 Ordinarius für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen,
Universität Karlsruhe
- Seit 1995 Prüfingenieur für Baustatik, Fachgebiet Holzbau

Druckrohrleitungen aus Holz

H. J. Blaß, P. Fellmoser

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wird der Einsatz einer Druckrohrleitung aus Holz als Wasserzuleitung für eine Wasserkraftanlage in indonesischen Karsthöhlen geplant. Neben der Konstruktion selbst wird auch der Einfluss der Holzfeuchte auf physikalische und elasto-mechanische Eigenschaften verschiedener Holzarten untersucht.

Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz

Druckrohrleitungen aus Holz (*Bild 1*) werden seit dem 19. Jahrhundert überwiegend in Nordamerika als Zuleitung für Wasserkraftanlagen eingesetzt. Nach einem deutlichen Rückgang Mitte des 20. Jahrhunderts erhielt der Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz durch die zunehmende Bedeutung regenerativer Ressourcen in den letzten Jahren neue Impulse.



Bild 1: Druckrohrleitung aus Holz (a) im Graben und (b) auf Sätteln verlegt (von Zwick Holzbau GmbH [1], Canbar Inc. [2])

Der Lehrstuhl für Ingenieurholzbau und Baukonstruktionen der Universität Karlsruhe (TH) führt gegenwärtig im Rahmen des Verbundprojektes „Erschließung und Bewirtschaftung unterirdischer Karstfließgewässer in Mitteljava, Indonesien“ in einem Forschungsvorhaben Untersuchungen zum Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz als Zuleitung für eine Wasserkraftanlage in indonesischen Karsthöhlen durch.

Das Untersuchungsgebiet, die Gunung Sewu, eine 1400 km² große Karstlandschaft an der Südküste Javas, setzt sich aus einem dichten und

harten Kalkstein zusammen. Der Karstaquifer ist von Hunderten miteinander vernetzten Höhlen durchzogen.

Daraus resultiert der komplette Abfluss jeglichen Oberflächenwassers durch ein weit verzweigtes System im Untergrund (*Bild 2*). Das Wasser dieser unterirdischen Flüsse tritt fast vollständig erst wieder in Quellen an der Küste zutage [4]. Durch die schnelle Versickerung des Niederschlags in den Karstaquifer und das Fehlen geeigneter Wasserspeicher leiden die Bewohner der Gunung Sewu in der Trockenzeit unter dem dadurch entstehenden Wassermangel. Die derzeitige Nutzung der Wasservorräte in den Karsthöhlen mittels über Dieselmotoren versorgter Pumpsysteme kann den momentanen Wasserbedarf nicht decken. Ebenso ist das bisherige Konzept der Wasserförderung aus wirtschaftlicher und ökologischer Sicht langfristig nicht zu verantworten.



Bild 2: Karsthöhle auf Java (Indonesien)

Im Rahmen des Projektes waren drei Lösungskonzepte vorgesehen mit dem Ziel, die Trink- und Brauchwasserversorgung während der Trockenzeit für ca. 75.000 Menschen unter Nutzung regenerativer Energiequellen und den Bedingungen vor Ort angepasster Technologien sicherzustellen. Ein Konzept für den Ausbau einer Höhle zur Labor- und Demonstrationshöhle war der Einsatz einer Druckrohrleitung aus Holz als Bestandteil einer Kleinwasserkraftanlage zur Nutzung der unterirdischen Wasserressourcen.

Da Druckrohrleitungen aus Stahl oder Beton wegen des großen Gewichtes der Rohrschüsse in Zusammenhang mit der Enge und Unwegsamkeit in der Höhle und den sich daraus ergebenden Schwierigkeiten beim Bau ausscheiden, bietet sich Holz als geeigneter Baustoff für die Druckrohrleitung an.

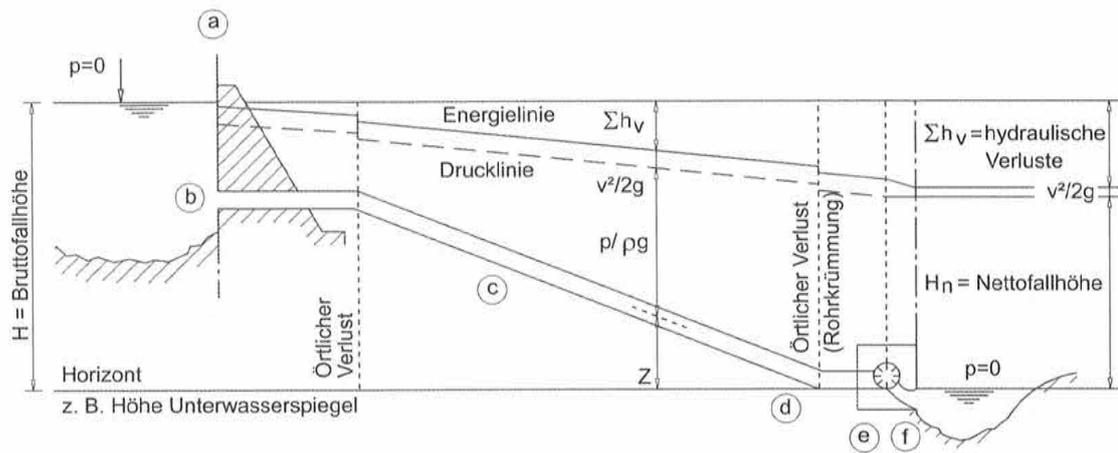


Bild 3: Prinzipskizze eines Kleinwasserkraftwerkes

Wirkungsweise von Kleinwasserkraftwerken

Die elektrische Leistung, die mit Hilfe einer Druckrohrleitung aus Holz und einer Kleinwasserkraftanlage erzeugt wird, kann mittels der Fallhöhe unter Berücksichtigung der Energieverluste berechnet werden. In **Bild 3** ist schematisch die Wirkungsweise eines Kleinwasserkraftwerkes dargestellt. **Bild 4** zeigt Details (a – f) einer Kleinwasserkraftanlage in Island, die mit Hilfe einer 300 m langen Druckrohrleitung aus Holz (Durchmesser 1,10 m) über eine Fallhöhe von 22 m eine Leistung von ca. 250 kW erzeugt. Die Details a – f sind zusätzlich in **Bild 3** gekennzeichnet.

Die Turbinenleistung lässt sich wie folgt berechnen:

$$P_T = \eta_T \times \eta_G \times \eta_{Tr} \times \eta_K \times \rho \times g \times Q \times H_n$$

mit

P_T = Turbinenleistung (ab Transformator) [kW]

η_T = Wirkungsgrad Turbine ($\eta_T \approx 0,70 - 0,90$)

η_G = Wirkungsgrad Generator ($\eta_G \approx 0,85 - 0,95$)

η_{Tr} = Wirkungsgrad Transformator ($\eta_{Tr} \approx 0,99$)

η_K = Wirkungsgrad Kupplung ($\eta_K \approx 0,97 - 0,99$)

ρ = Dichte [t/m^3]

g = Erdbeschleunigung: 9,81 [m/s^2]

Q = Turbinendurchfluss [m^3/s]

H_n = Nettofallhöhe [m] ($= H - \Sigma h_v - v^2/2g$)

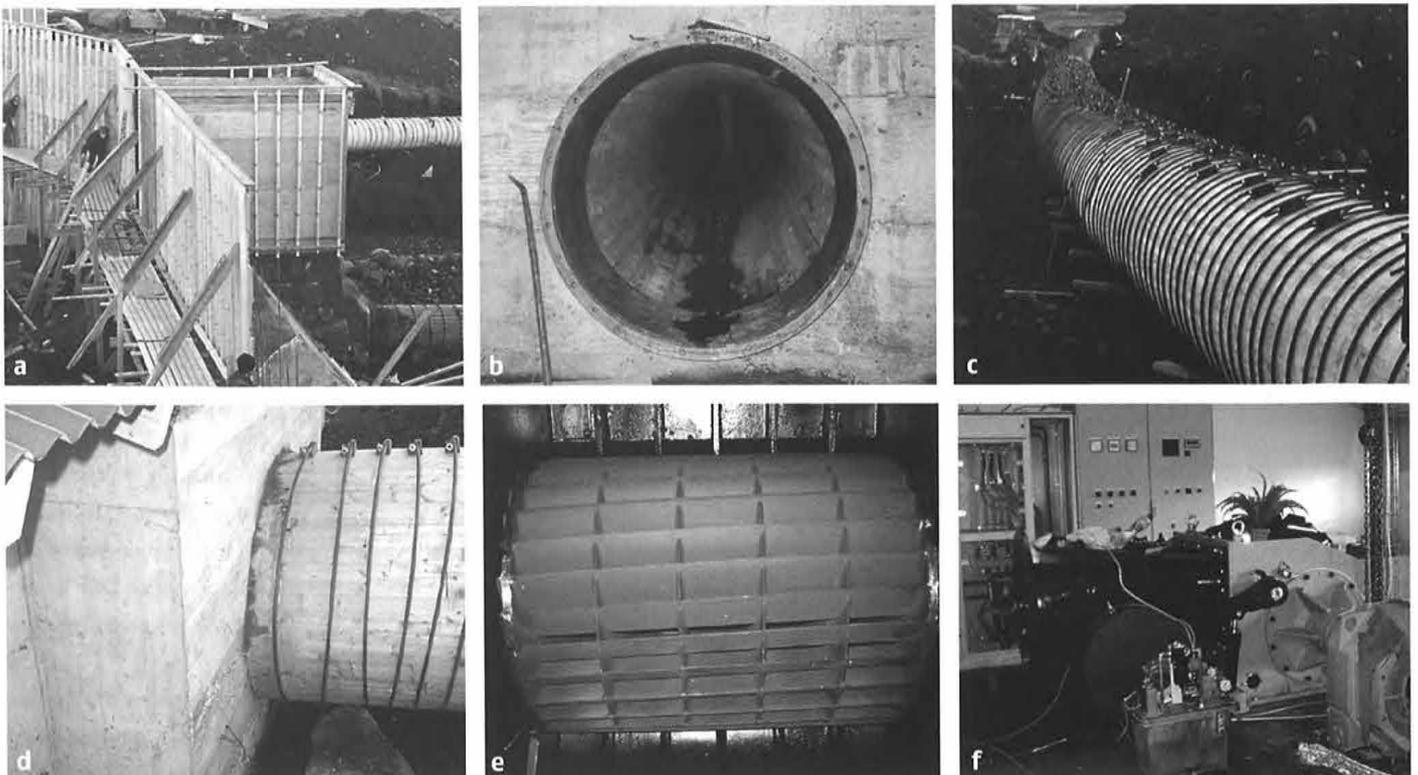


Bild 4: Details (a – f) eines Kleinwasserkraftwerkes in Island

Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz

Druckrohrleitungen aus Holz werden in der Regel mit einem Durchmesser von 0,50 bis 4,0 m hergestellt und für eine Bruttofallhöhe von bis zu 50 m (5,0 bar) ausgelegt. Die Herstellung der Druckrohrleitungen kann in offener Bauweise entweder durch eine Verlegung im Graben auf kiesigem Untergrund mit anschließender Verfüllung oder, wie in den Karsthöhlen in Indonesien geplant, auf Sätteln als Auflager erfolgen (Bild 5).

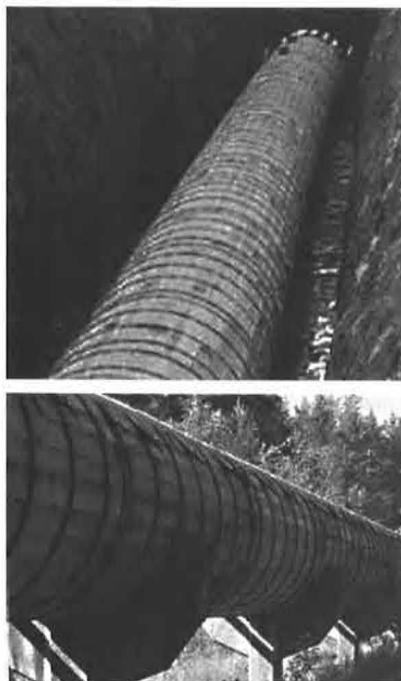


Bild 5: Druckrohrleitung aus Holz (von Boxholm Produktion AB [3])

Druckrohrleitungen aus Holz bestehen aus einzelnen Bohlen oder Kanthölzern, die gegeneinander versetzt und mit Stahlringen zusammengehalten werden. Durch den Versatz der Längsstöße der Dauben entsteht ein leichtes Rohr ohne durchgehende Stöße (Bild 6). Die Rohrlänge kann mehrere Kilometer betragen, ohne dass Dehnvorrichtungen eingebaut werden müssen. Die Dauben weisen an den Längsseiten wie auch an den Stirnseiten Nut- und Federverbindungen auf (Stirnseite: Fremdfeder aus Sperrholz, Metall oder Kunststoff).

Die einzelnen Holzdauben haben einen trapezförmigen Querschnitt (Dicke $d = 40$ bis 80 mm) und eine Länge von ca. $4,0$ m (Bild 7). Der trapezförmige Querschnitt und die Nut- und Federverbindung werden mit einer Fräsmaschine hergestellt. Eine Druckrohrleitung aus Holz kann als Träger mit kreisförmigem Querschnitt aus vielen Einzelquerschnittsteilen betrachtet werden. Die einzelnen Querschnittsteile wirken über Haftung in der Nut- und Federverbindung zwischen den einzelnen Holzdauben als Gesamtquerschnitt.

Die Dichtheit der Rohrleitung wird durch das Quellen des Holzes gewährleistet, und die stetige Wassersättigung des Holzes verhindert zuverlässig einen Pilzbefall. Die Holzdauben werden mit einer Holzfeuchte von ca. 16 bis 18 % eingebaut. Die richtige Wahl der Holzfeuchte beim Einbau der Holzdauben ist bei der Herstellung von Druckrohrleitungen aus Holz deshalb von besonderer Bedeutung, da in diesem Fall der

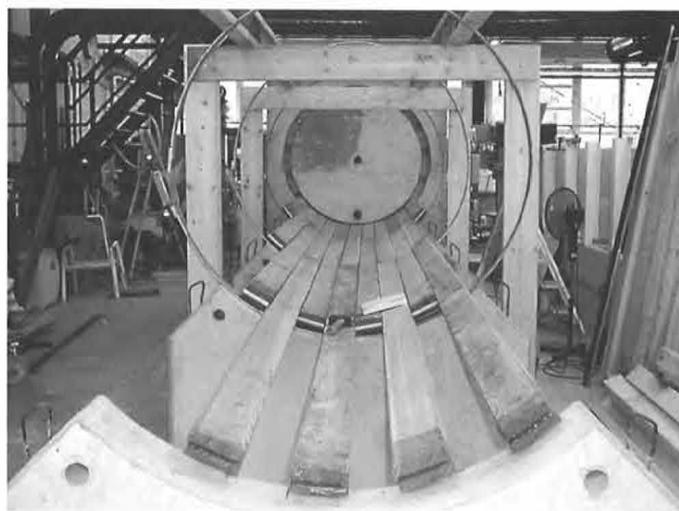


Bild 6: Aufbau einer Druckrohrleitung aus Holz (Versuchsstand)

entstehende Quellsdruck bei Wasserfüllung des Rohres als praktische Gebrauchseigenschaft benötigt wird.

Aufgrund des entstehenden Quellsdruckes nach dem Füllen des Rohres mit Wasser werden die Spannrings aus Stahl auf Zug beansprucht. Die Größe des Quellsdruckes ist neben dem Wasserinnendruck somit entscheidend für die Bemessung der Spannrings. Die Spannrings bestehen in der Regel aus feuerverzinkten Flachstahlbändern (Bild 8).

Die Anordnung der Spannschlösser der einzelnen Spannrings sollte spiralförmig in Längsrichtung der Rohrleitung erfolgen, damit eine gleichmäßige Verteilung der Vorspannkraft gewährleistet ist.

Die Lebensdauer von Druckrohrleitungen aus Holz beträgt zwischen 60 und 100 Jahren. Äußere Witterungseinflüsse (z. B. Sonneneinstrahlung) und eine Entleerung des Rohres über einen längeren Zeitraum beeinträchtigen die Lebensdauer. Mit zunehmender Betriebsdauer minimieren sich die Reibungsverluste bei Druckrohrleitungen aus Holz im Gegensatz zu Stahl- oder Betonrohren.

Durch den Einsatz von Druckrohrleitungen aus Holz kann die Trassenführung dem Gelände optimal angepasst werden. Rohrkrümmungen bis zum 30fachen des Rohrdurchmessers können problemlos hergestellt werden; kleinere Krümmungen verlangen den Einsatz von Sonder-

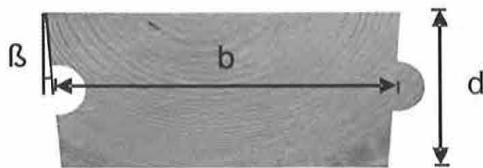


Bild 7: Holzdaube mit Nut- und Federverbindung

bauteilen (Krümmer). Durch das geringe Gewicht der einzelnen Holzdauben und Spannringe kann eine Verlegung auch in unwegsamem Gelände erfolgen. Zusätzlich entstehen durch kompakte Holzpakete nur geringe Transportkosten. Somit sind Druckrohrleitungen aus Holz eine kostengünstige Alternative im Vergleich zu Stahl- oder Betonrohren.

Experimentelle Untersuchungen

Um Druckrohrleitungen aus Holz in unterirdischen Karstfließgewässern in Mitteljava bauen zu können, wurden zwei Themenbereiche untersucht: der erste betrifft den Baustoff Holz, da in Südostasien und speziell in Indonesien völlig andere Holzarten verfügbar sind als in Europa, zum zweiten sind Probleme im Zusammenhang mit der Rohrkonstruktion in der Höhle zu lösen.

Vorgabe im Rahmen des Projektes war die Verwendung von lokal verfügbaren indonesischen Holzarten, welche nachhaltig bewirtschaftet werden. In Zusammenarbeit mit der Gadjah Mada University in Yogyakarta wurden geeignete Holzarten ausgewählt, die in Indonesien nachhaltig verfügbar sind und sich als Baustoff für Holzdaubenrohre eignen. In Deutschland werden für Holzdaubenrohre bevorzugt die Nadelholzarten Kiefer, Lärche und Douglasie eingesetzt. Die in Indonesien verfügbaren Hölzer sind im Gegensatz zu den in Deutschland für Holzdaubenrohre verwendeten Holzarten sämtlich Laubhölzer.

Anhand eingehender Untersuchungen wurde der Einfluss der Holzfeuchte auf physikalische und elasto-mechanische Eigenschaften der ausgewählten Holzarten ermittelt:

- Bestimmung von elasto-mechanischen Eigenschaften im Hinblick auf Festigkeit und Steifigkeit des Rohrquerschnittes;
- Untersuchung des Schwind- und Quellverhaltens im Hinblick auf die



Bild 8: Anordnung der Spannringe

Beanspruchung der Spannringe aus Stahl nach dem Füllen der Druckrohrleitung;

- Ermittlung der Haftungs- und Reibungskoeffizienten zur Bestimmung der Schubtragfähigkeit in der Nut- und Federverbindung in Längsrichtung der Holzdauben.

Im Allgemeinen nehmen die elasto-mechanischen Eigenschaften von Holz mit zunehmendem Feuchtegehalt im hygrokopischen Bereich ab. Dieser Prozess wird bei Erreichen des Fasersättigungsbereiches jedoch beendet; eine weitere Feuchteaufnahme bewirkt im kapillaren Bereich (oberhalb der Fasersättigung) keine Änderung der elasto-mechanischen Eigenschaften mehr. Die Festigkeitseigenschaften werden dabei von der Holzfeuchte stärker beeinflusst als der Elastizitätsmodul.

Zur Bestimmung des Trag- und Verformungsverhaltens von Druckrohrleitungen aus Holz, die auf Sättel aufgelagert sind, wurden experimentelle Untersuchungen durchgeführt. Hierzu wurde ein 10 m langer Abschnitt einer Druckrohrleitung aus Holz mit einem Innendurchmesser von 1,40 m in einem Versuchsstand aufgebaut (Bild 9). Wird dieses System aus Dauben und Stahlringen in regelmäßigen Abständen auf Sattelkonstruktionen aufgelagert, so stellt sich unter den Beanspruchungen Eigengewicht und Wasserlast mit Innendruck ein komplexer Spannungs- und Verformungszustand ein. Das Trag- und Verformungsverhalten wird dabei maßgeblich von der Ovalisierung des Kreisquerschnittes bestimmt: kreisförmige Querschnitte neigen dazu, sich unter Biegebeanspruchung oval zu verformen, um sich der Belastung zu entziehen. Die Querschnittsverformungen wurden mittels Wegaufnehmern gemessen, die Beanspruchung der Spannringe mit Hilfe von Dehnmessstreifen bestimmt. Zusammenfassend werden Bemessungsvorschläge für Druckrohrleitungen aus Holz ausgearbeitet.



Bild 9: Versuchsstand zur Untersuchung des Biegetragverhaltens von Druckrohrleitungen aus Holz

Umsetzungskonzept

Das Konzept zur Umsetzung der Wasser- und Energiebewirtschaftung von Karsthöhlen in Indonesien wurde in Zusammenarbeit mit dem Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik der Universität Karlsruhe (TH) erstellt. Mit dem Einsatz von Druckrohrleitungssystemen aus Holz ist eine Wasser- und Energiebewirtschaftung von Karstfließgewässern in Höhlen realisierbar, in denen der partielle Einstau der Höhle aufgrund von Wasserverlusten oder geostatischen Problemen nicht möglich ist. Da in Indonesien und speziell auf Java eine Vielzahl von Höhlen existieren, kann das Konzept problemlos auf weitere Höhlen zur nachhaltigen Wassergewinnung angewendet werden. Mit den Ergebnissen aus dem Forschungsvorhaben soll eine weltweite Lösung für kleine und mittlere Wasserkraftwerke mit lokal aufzubauenden Kenntnissen und Fertigkeiten sowie lokal verfügbaren Hölzern zur Verfügung stehen.

Zusätzlich soll durch das Projekt infolge der Vermittlung von Wert und Nutzen einer nachhaltigen Waldbewirtschaftung ein wertvoller Beitrag zum „sustainable development“ in Indonesien geleistet werden.

Literatur

- [1] Zwick Holzbau GmbH. Homepage: www.zwick-holzbau.de. Donaueschingen-Wolterdingen.
- [2] Canbar Inc. Homepage: www.canbar.com. Ontario, Kanada.
- [3] Boxholm Produktion AB. Homepage: www.boxprod.com. Boxholm, Schweden.
- [4] Nestmann, F., Oberle, P. (2002). Machbarkeitsuntersuchung: Erkundung und Grenzen der Wasser- und Energiebewirtschaftung großer unterirdischer Wasservorräte in Wonosari, Yogyakarta, Java, Indonesien. Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Bereich Wasserwirtschaft und Kulturtechnik. Universität Karlsruhe (TH).

Dipl.-Ing. Helmut Zeitter



Ingenieurbüro Wagner Zeitter
Adolfsallee 57
65185 Wiesbaden
Tel.: 0611 9010610
Fax: 0611 9010613
E-Mail: zeitter@wagner-zeitter.de

- 1963 Geboren in Wiesbaden
- 1982 – 1988 Studium des Bauingenieurwesens an der TH Darmstadt
- 1989 – 1990 Ingenieur im Wehrbereichskommando IV Mainz, Abt. Infrastruktur - Militärische Belange zivilen Bauens
- 1990 Gründung Ingenieurbüro Zeitter
- 1990 – 1995 Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei Professor Dr. K. Becker, TH Darmstadt, FB Bauingenieurwesen/Konstruktiver Holzbau
- 1992 – 1995 Mitarbeit im
 - Europäischen Normungsgremium Eurocode 8 – Holzbauwerke
 - Nationalen Spiegelausschuss zum Eurocode 8 – Erdbeben – Sonderfragen
- 1990 – 1998 Ingenieur-Tätigkeit im eigenen Büro, Wiesbaden-Naurod
 - Tragwerksplanung, Bauphysik, Gutachten, Beratung, Entwicklung
- 1995 – 2001 Tätigkeit im Ingenieurbüro für Tragwerksplanung von Prof. Matthias Pfeifer (Universität Karlsruhe) mit folgenden Tätigkeitsbereichen:
 - Tragwerksplanung und Bauphysik in allen Leistungsphasen
 - Prüftätigkeit, Bauüberwachung
- 1998 Gründung Ingenieurbüro Wagner Zeitter
- 2000 – heute Lehrauftrag für Holzbau, Technische Universität Darmstadt
- 2003 – heute Mitarbeit im
 - Eintragungsausschuss Wärmeschutz der Architektenkammer Hessen
 - Normungsausschuss zur DIN 4149 – Erdbeben
- 2004 – heute Seminarkoordination der Ingenieurakademie Hessen für Holzbau, Wärmeschutz, Schallschutz

Erdbebenbemessung im Holzbau ...

... nach DIN 4149:2005

1. Einleitung

Derzeit vernehmen wir in regelmäßigen Abständen über die Medien die katastrophalen Folgen von Erdbeben. Einige der Starkbebengebiete der Welt sind uns damit präsent geworden. Der Versuch, die Erdbebengebiete aufzuzählen wird von der Frage erschwert, nach welchem Kriterium zu sortieren ist. Machen wir dies von der Intensität (schadensorientierte Skalierung) oder der Magnitude (energieorientierte Skalierung) des Bebens abhängig? Ist es die Häufigkeit der bisherigen Beben oder die Zahl der dabei ums Leben gekommenen Menschen? Sind es die politisch-gesellschaftlichen Schwierigkeiten für den Wiederaufbau oder die unmittelbaren wirtschaftlichen Folgen aus der Zerstörung volkswirtschaftlicher Substanz?

Bei dem Beben in Pakistan 2005 mit mehr als 80.000 Toten führte die schlechte Erreichbarkeit des betroffenen Gebietes kurz vor dem Wintereinbruch zu enormen Problemen. Die Tsunami-Katastrophe in Indonesien ist als Seebeben letztlich ebenfalls denselben Ursachen zuzuordnen. Bei dem Beben im Iran (Bam Dezember 2003) sind mehr als 40.000 Tote zu beklagen und die unzähligen Obdachlosen warten zum großen Teil noch heute auf die Wiederherstellung menschlicher Lebensbedingungen. Hier konnte die „hölzerne“ Gemeinde aus Deutschland politische Widerstände überwinden und Hilfe leisten. Aber es bleibt auch dort viel zu tun.

Bilder 1-3: Erdbebenfolgen in Pakistan



(Foto: geo-tv)



(Foto: Reuters/Desmand Boylan)



(Foto: dpa)

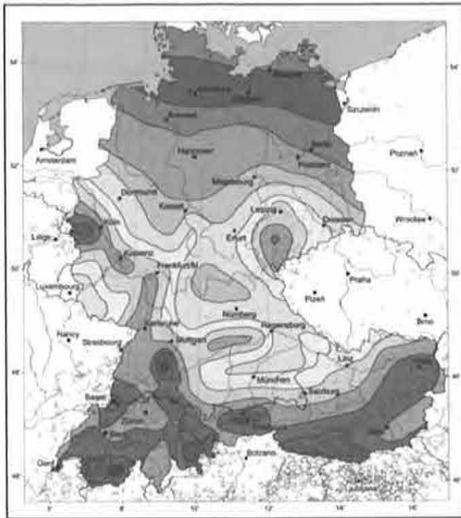


Bild 4: Erdbebengefährdung in Deutschland, Österreich und der Schweiz

Das deutlich geringere Risiko in Deutschland von einem schweren Erdbeben betroffen zu sein täuscht über die Tatsache hinweg, dass Erdbeben auch hierzulande enorme Schäden z. B. an hochtechnisierten Gebäuden und Anlagen verursachen können. Die Betrachtung eines im Vergleich mit den großen Beben der Welt für die deutschen Erdbebengebiete schwachen, aber typischen Bebens ist daher selbstverständlicher Bestandteil einer Bauplanung.

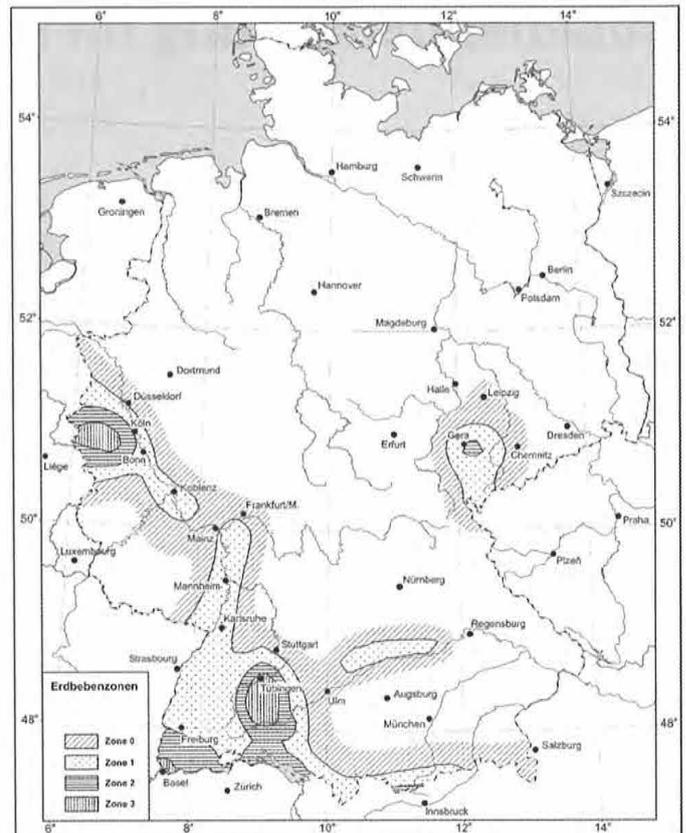


Bild 5: Erdbebenzonen nach DIN 4149:2005

2. DIN 4149:2005

Dazu ist im April 2005 die neue Erdbebennorm DIN 4149 im Weißdruck erschienen. Die Entwicklung der Normung im Erdbebeningenieurwesen ist jedoch jung (siehe Tab. 1)

Neben der Anpassung an den Stand der Wissenschaft und Technik wurden Entwicklungen eingearbeitet, die sich auch in anderen Normen wiederfinden. So wird beispielsweise das durchschnittlich geringere Gebäudegewicht berücksichtigt. Der Umfang der Norm ist zwar erheblich gestiegen (von 14 Seiten der Fassung 1981 auf 84 Seiten der Fassung 2005), beantwortet jedoch auch weitgehend die bisher offenen Fragen.

Wichtigster Unterschied sind die auf probabilistischer Basis erstellten, neuen Erdbebenzonenkarten. Wie bisher sind Nordrhein-Westfalen und Baden-Württemberg am stärksten betroffen. Die Zuordnung einzelner Gemeinden zu den Zonen führt lokal sowohl zu Verschärfungen als auch zu Erleichterungen. Neu ist die Berücksichtigung des unmittelbar am Bauprojekt vorliegenden Baugrundes zur Ermittlung der bemessungsrelevanten Beanspruchungen, so dass es neben der auf 3 Zonen reduzierten Erdbebenzonenkarte eine Untergrundkarte gibt.

Die in der DIN enthaltenen Übersichtskarten sind für eine gemeindefarbene Zuordnung nicht geeignet. Die letztendliche Entscheidung über die öffentlich-rechtliche Zuordnung der Erdbebenzonen und geo-

Tabelle 1: Entwicklung der Normung im deutschen Erdbebeningenieurwesen

Jahr	Technische Regel	Seiten	Zonen
1957	DIN 4049:1957-07 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Richtlinien für Bemessung und Ausführung“	6	2
1971	Vorläufige Richtlinien für das Bauen in Erdbebengebieten des Landes Baden-Württemberg	6	4
1981	DIN 4149-1:1981-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“	10 + 4	4
1992	Änderung A1 - Karte der Erdbebenzonen	1	4
2005	DIN 4149-1:2005-04 „Bauten in deutschen Erdbebengebieten - Lastannahmen, Bemessung und Ausführung üblicher Hochbauten“	84	3
200x	EN 1998-1:2004: „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 1: Grundlagen, Erdbebeneinwirkungen und Regeln für Hochbauten“	211	3
200x	EN 1998-3:2005: „Eurocode 8: Auslegung von Bauwerken gegen Erdbeben - Teil 3: Beurteilung und Ertüchtigung von Gebäuden“	85	-

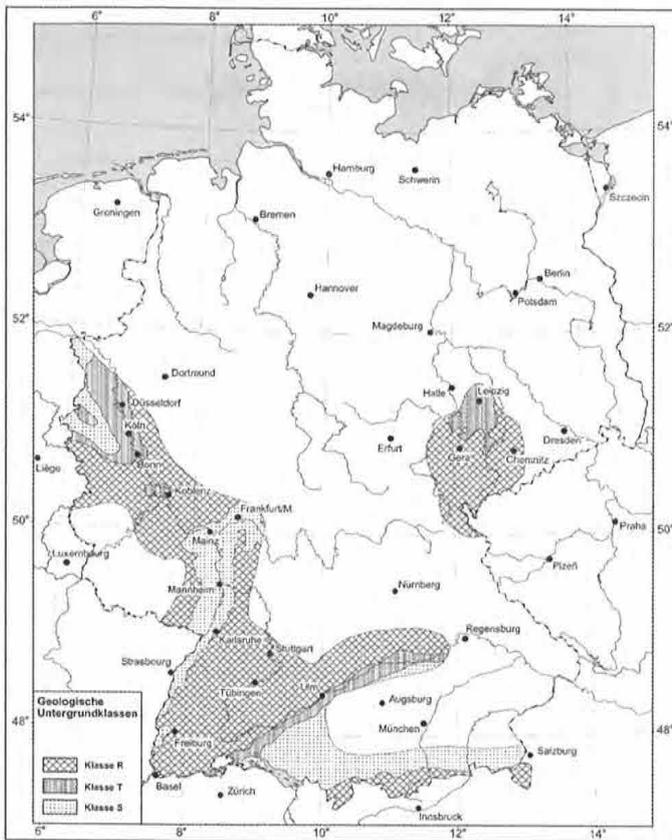


Bild 6: Geologische Untergrundklassen nach DIN 4149:2005

Tabelle 2: Bedeutungskategorien und Bedeutungsbeiwerte für Hochbauten

Bedeutungskategorie	Bauwerke	Bedeutungsbeiwert γ_I
I	Bauwerke von geringer Bedeutung für die öffentliche Sicherheit, z. B. landwirtschaftliche Bauten usw.	0,8
II	Gewöhnliche Bauten, die nicht zu den anderen Kategorien gehören, z. B. Wohngebäude	1,0
III	Bauwerke, deren Widerstandsfähigkeit gegen Erdbeben im Hinblick auf die mit einem Einsturz verbundenen Folgen wichtig ist, z. B. große Wohnanlagen, Verwaltungsgebäude, Schulen, Versammlungshallen, kulturelle Einrichtungen, Kaufhäuser usw.	1,2
IV	Bauwerke, deren Unversehrtheit im Erdbebenfall von Bedeutung für den Schutz der Allgemeinheit ist, z. B. Krankenhäuser, wichtige Einrichtungen des Katastrophenschutzes und der Sicherheitskräfte, Feuerwehrhäuser usw.	1,4

logischen Untergrundklassen zu Verwaltungsgrenzen liegt in der Zuständigkeit der Obersten Bauaufsicht der Länder.

Das Sicherheitskonzept der Erdbebennorm reiht sich dabei in die neue Generation der Berechnungs- und Bemessungsnormen auf der Basis der Teilsicherheitsbeiwert-Methode ein. Damit wurde der entscheidende Schritt auf dem Weg zu den europäischen Normen beschritten. In Verbindung mit der neuen DIN 1052:2004 im Holzbau kann so zunächst unmittelbar gearbeitet werden. Die prinzipiell positiven Eigenschaften von Holzkonstruktionen unter Erdbebeneinfluss werden allerdings aus dem für den Holzbau relevanten Kapitel 10 „Besondere Regeln für Holzbauten“ nicht direkt ersichtlich.

Bei kleineren Beben sollen Schäden vollständig ausbleiben, bei mittleren Beben sollten sie einfach zu beheben sein. Hier können Holzbauten auftrumpfen, da sie i.d.R. leichter zu reparieren sind. Bei starken Beben müssen die aus dem Untergrund kommenden, vornehmlich horizontalen Verformungen vom Bauwerk aufgenommen werden, ohne die Standsicherheit zu gefährden.

Wie in der alten Norm wird auch in der neuen DIN 4149:2005 eine Differenzierung nach der „Wichtigkeit“ der Gebäudenutzung unterschieden. Die ursprünglichen Gebäudeklassen wurden durch Bedeutungskategorien ersetzt.

Die Beanspruchung ergibt sich aus der Bodenbeschleunigung, die zu den zu errechnenden Inertiallasten führt. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mit den Windlasten zu vergleichenden Lasten aus der Erdbeben-Einwirkung häufiger maßgebend werden, da diese Kräfte gegenüber der alten Normengeneration größer geworden sind.

Das Verhalten unter dynamischer Anregung lässt sich mechanisch abbilden (Bild 7). Für verschiedene Systeme (Masse, Kragarmlänge) ergibt sich nach Beaufschlagung mit unterschiedlichen Erdbebenzeitverläufen jeweils ein anderes Verhalten („Antwort“).

Tabelle 3: Zuordnung der Intensitätsintervalle und Bodenbeschleunigungen zu den Erdbebenzonen

Erdbebenzone	Intensitätsintervalle	Bemessungswert der Bodenbeschleunigung α_g m/s ²
0	$6 \leq I < 6,5$	-
1	$6,5 \leq I < 7$	0,4
2	$7 \leq I < 7,5$	0,6
3	$7,5 \leq I$	0,8

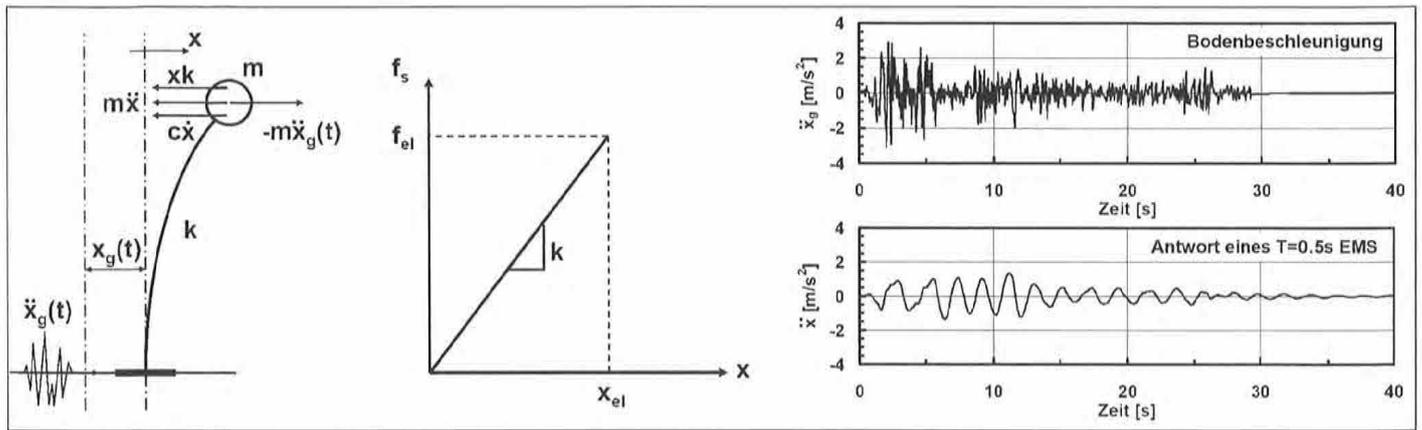


Bild 7: Elastischer Einmassenschwinger (Quelle: A. Dazio)

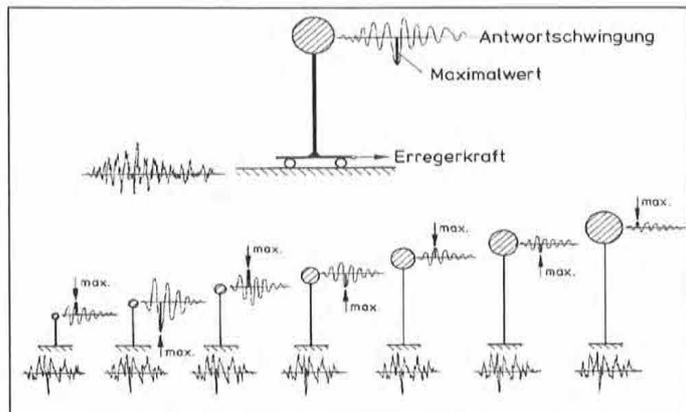


Bild 8: Erregung verschiedener Einmassenschwinger

Tabelle 4: Werte der Parameter zur Beschreibung des elastischen horizontalen Antwortspektrums

Untergrundverhältnisse	S	$\frac{T_B}{S}$	$\frac{T_C}{S}$	$\frac{T_D}{S}$
A-R	1,00	0,05	0,20	2,0
B-R	1,25	0,05	0,25	2,0
C-R	1,50	0,05	0,30	2,0
B-T	1,00	0,1	0,30	2,0
C-T	1,25	0,1	0,40	2,0
C-S	0,75	0,1	0,50	2,0

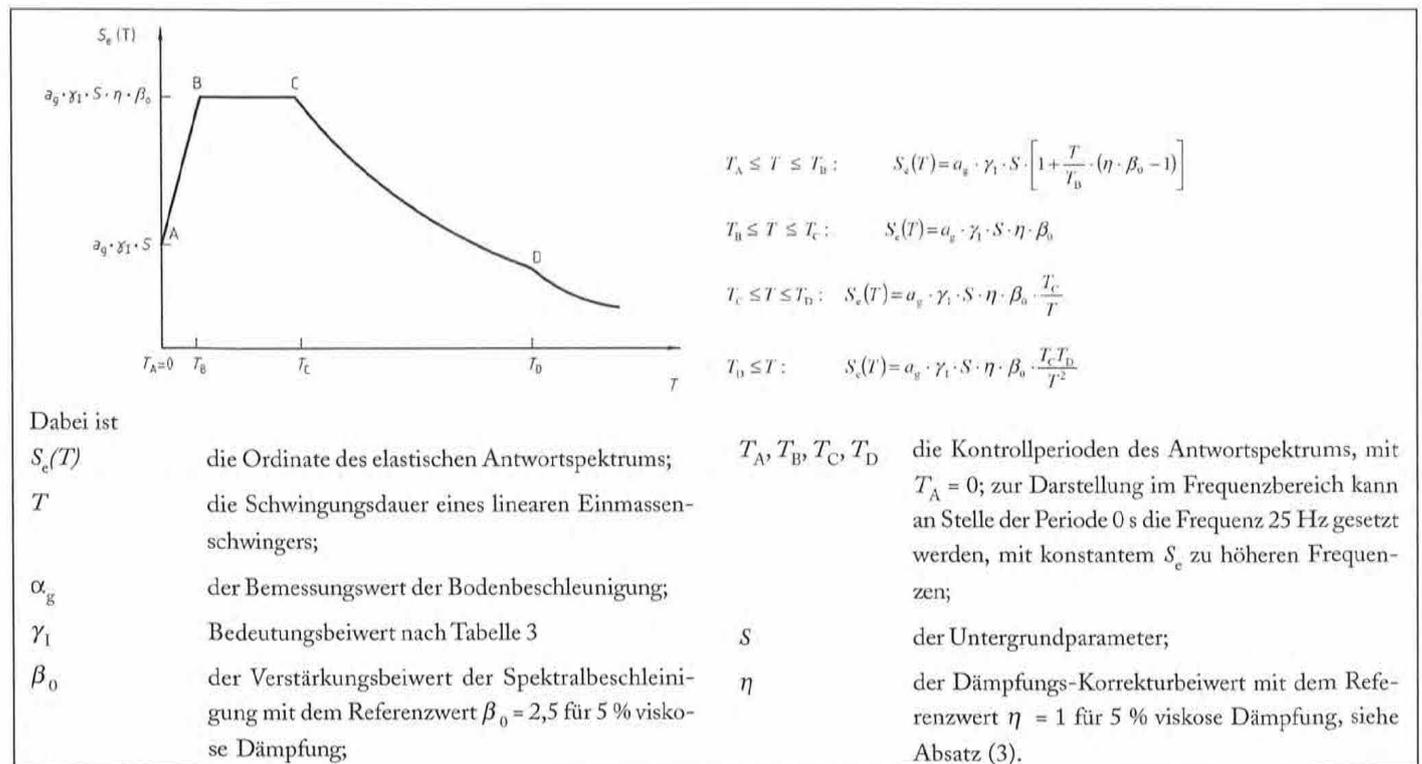
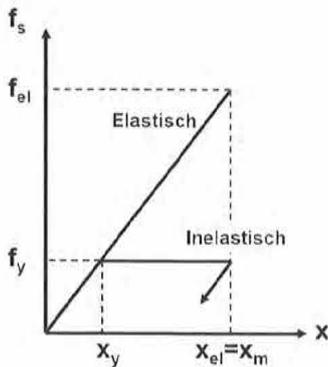


Bild 9: Allgemeines, elastisches Antwortspektrum nach DIN 4149:2005

Prinzip der gleichen Verschiebung ($T > T_c$)



Prinzip der gleichen Energie ($T_B < T < \sim T_c$)

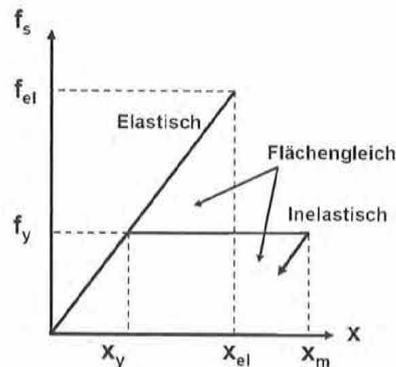


Bild 10: Ansätze zur Berücksichtigung des plastischen Verhaltens (Quelle: A. Dazio)

Das elastische Antwortspektrum ist die Zusammenfassung dieser Reaktionen und wird in der Norm (Bild 9) beschrieben.

Die bodenmechanischen Randbedingungen gehen mit den unterschiedlichen Baugrundklassen und geologischen Untergrundklassen ein: Untergrundklassen:

- R felsartiger Gesteinsuntergrund
- T Übergangsbereiche zwischen R und S sowie flachgründige Sedimentbecken
- S tiefe Beckenstrukturen mit mächtiger Sedimentfüllung

Baugrundklassen:

- A Unverwitterte (bergfrische) Festgesteine mit hoher Festigkeit
- B Mäßige Festgesteine, grob- und gemischtkörnige Lockergesteine mit hoher Reibung
- C Stark verwitterte Festgesteine, fein- und gemischtkörnige auch bindige Lockergesteine

Um eine Struktur nicht völlig unwirtschaftlich auf ein elastisches Verhalten auslegen zu müssen, darf das dissipative, auf plastischen Verformungen beruhende Verhalten berücksichtigt werden.

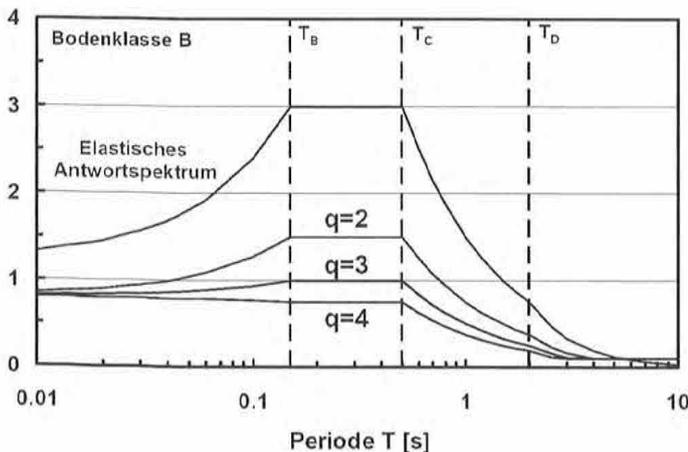


Bild 11: Reduktion der Antwortspektren durch den Verhaltensfaktor q (Quelle: A. Dazio)

Tabelle 5: Verhaltensbeiwerte der Bauweisen

Bauart	Duktilität	Verhaltensbeiwert
Stahlbeton	Duktilitätsklasse 1	q = 1,5
	Duktilitätsklasse 2	q = 1,7 bis 3,0
Stahl	Duktilitätsklasse 1	q = 1,5
	Duktilitätsklasse 2	1,5 < q ≤ 4,0
	Duktilitätsklasse 3	4,0 < q ≤ 8,0
Holz	Duktilitätsklasse 1	q = 1,5
	Duktilitätsklasse 2	q = 2,5
	Duktilitätsklasse 3	q = 4,0
Mauerwerk	unbewehrtes Mauerwerk	q = 1,5
	eingefasstes Mauerwerk	q = 2,0
	bewehrtes Mauerwerk	q = 2,5

Dazu wird der so genannte Verhaltensfaktor eingeführt, mit dessen Hilfe eine elastische Berechnung des Tragwerks möglich bleibt. Ansonsten müsste in aufwändigen Berechnungsschleifen das nicht-lineare Verhalten bei der Schnittgrößenermittlung kalkuliert werden.

Es liegt in der Verantwortung und Erfahrung des Tragwerksplaners die Einordnung einer Struktur in die höheren Duktilitätsklassen zu rechtfertigen. Damit werden die für die Energiedissipation erforderlichen Mechanismen zu einem wesentlichen Bestandteil der Zähigkeit einer Konstruktion. Die Dissipation kann mit der Knautschzone bei Fahrzeugen verglichen werden. Es gilt, die eingetragene Energie nicht nur über die Bewegung sondern auch über plastische Vorgänge zu vernichten („dissipieren“).

Geschieht dies, dürfen mit dem so genannten Verhaltensbeiwert q die für die Berechnungen anzusetzenden Ersatzlasten reduziert werden. Die ausführlichen normativen Vorgaben im Mauerwerks-, Stahlbeton- und Stahlbau wurden spezifisch auf die Werkstoffe abgestimmt. In der Kürze der Vorgaben für den Holzbau liegt eine wichtige Chance. Es ist Aufgabe eines entsprechenden Kommentars bzw. einer Anwendungs-Information die entsprechenden Robustheitskriterien für Holzbauten näher zu definieren, damit die – auch bei den Bauherren – offensichtlichen Qualitäten des Holzbaus genutzt werden können.

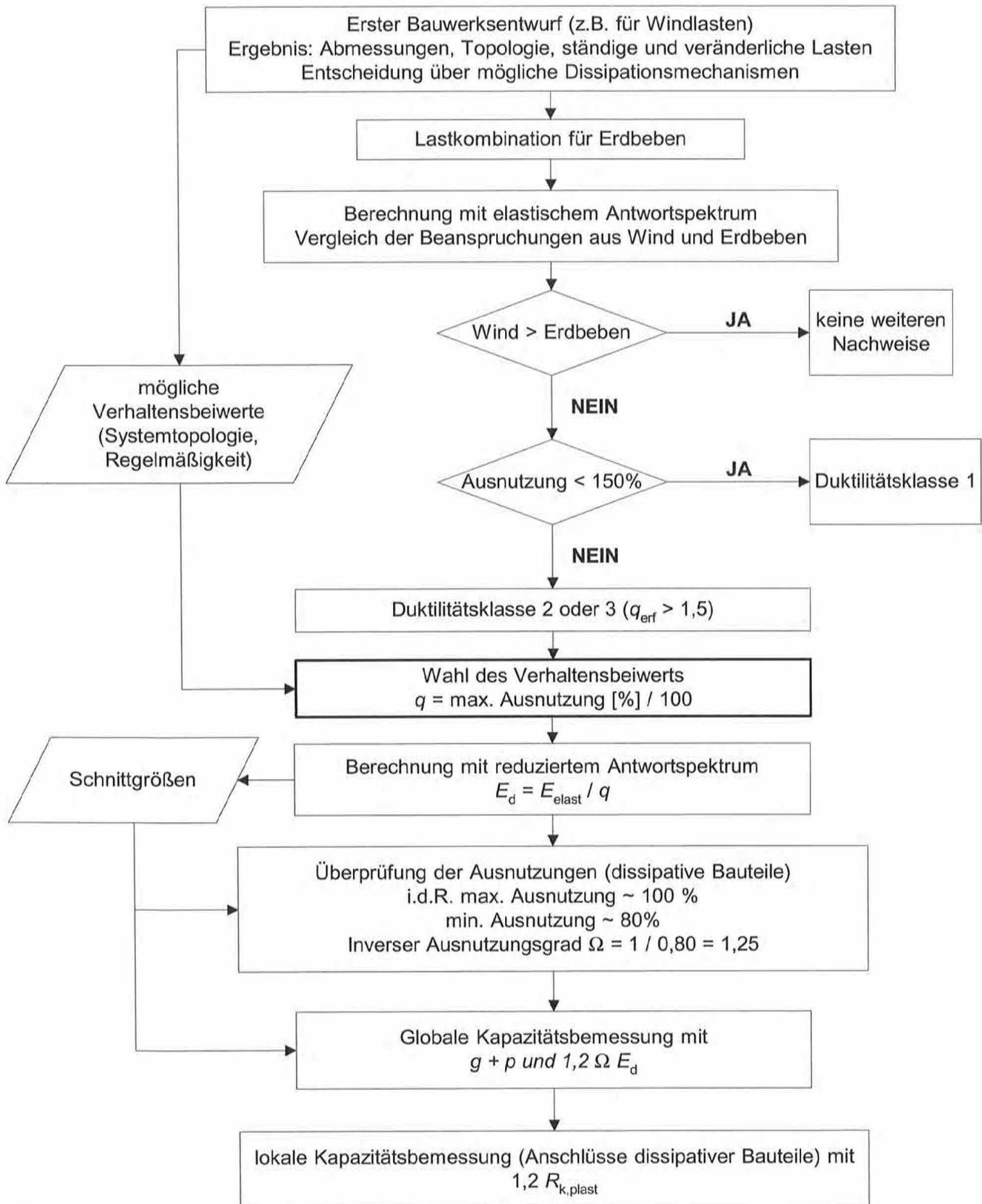


Bild 12: Ablaufschema für die Bemessung unter Erdbebenbeanspruchung

Die neue Norm gibt für die Baustoffe weitaus präzisere Angaben zu den Regeln in den verschiedenen Bauweisen als bisher an. Bei Einhaltung der rechnerischen und baukonstruktiven Vorgaben können dann folgende Verhaltensbeiwerte genutzt werden:

3. Die Regeln für den Holzbau

Auch wenn die der Norm zugrundeliegende Massenkonzentration in den Decken fraglich ist, kann mit den Verfahren aus der Norm gut gerechnet werden. Im Allgemeinen wird ein Holzhaus auch als elastisch gerechnetes System den Nachweis auch in den höheren Erdbebenzonen ohne zusätzliche Maßnahmen erfüllen können.

Die drei Duktilitätsklassen werden in der Norm beispielhaft mit typischen Baukonstruktionen belegt. Eindeutige Kriterien zur Zuordnung fehlen jedoch.

In Duktilitätsklasse 1 werden zunächst alle Holzbauten eingestuft, für die keine weiteren Auflagen zu erfüllen sind. Der angegebene Wert von 1,5 für q entspricht zwar nicht einem elastischen Verhalten (theoretisch wäre dieser 1,0), jedoch sind alle Spektren darauf ausgelegt, dass eine gewisse Dissipation immer stattfindet. Diese wird jedoch nicht separat berechnet, so dass auch keine Duktilitätsanforderungen an das Tragwerk gestellt werden. Zu dieser Klasse werden auch 3-Gelenkbögen, 3-Gelenkrahmen mit Keilzinkenvollstößen und Stützen-Binder-Tragwerke mit starr eingespannten Stützenfüßen als Beispiel aufgeführt. Wird das Tragwerk im Großteil der wichtigsten Bauteile mit Nagel- oder Schraubpressleimung hergestellt, ist das spröde Verhalten dieser Verbindung ebenfalls maßgebend für die Gesamtstruktur.

Die Duktilitätsklasse 2 hat wenige, aber leistungsfähige dissipative Bereiche. Als Beispiel werden Stützen-Binder-Tragwerke mit halbstarren eingespannten Stützenfüßen sowie 2- und 3-Gelenkrahmen mit Dübelverbindungen in den Rahmenecken aufgeführt. Übliche Holztafelbauten mit geklebten Beplankungen für Wand- und Deckenscheiben sind aufgrund der großen Redundanzen hier einsortiert. Diese Duktilitätsklasse ist aber mit Sicherheit diejenige, bei der eine Berücksichtigung bei der Bemessung bereits große Wirkung entfaltet, aber die Kriterien zur zuverlässigen Einstufung am dünnsten sind.

Duktilitätsklasse 3 schließlich spiegelt mit vielen dissipativen Bereichen das sehr gute Verhalten der Holzkonstruktionen in der Praxis wieder. Rahmentragwerke mit Dübelverbindungen zwischen allen Bauteilen und die im Holzrahmenbau übliche Vernagelung oder Verklammerung stellen ein sehr gutmütiges Verhalten sicher. Bei Einstufung in diese Kategorie sollte aber unbedingt eine sehr sorgfältige Betrachtung des Entwurfs erfolgen. Nur weil Holzrahmenbauwände und Holzbalkendecken ein hervorragendes Verhalten aufweisen, können damit Unzulänglichkeiten im Entwurf (Regelmäßigkeit in Aufriss und Grundriss) kaum kompensiert werden.

Die vereinfachte Reduktion der Verhaltensfaktoren um 20 % bei unregelmäßigen Bauwerken ist hier nur bedingt tauglich um die notwendige Robustheit im realen Verhalten sicherzustellen.

Da die Beplankung der Holzkonstruktion die gängigste und wichtigste Aussteifung darstellt, regelt die Norm (auf ungenügender Datenbasis) die Anforderungen an die wichtigsten Plattenwerkstoffe:

- Mindestdicke 12 mm für Spanplatten, OSB-Platten (mindestens Plattentyp OSB/3), kunstharzgebundene Holzspanplatten und zementgebundene Holzspanplatten
- Mindestdicke 9 mm für Baufurniersperrholzplatten (mindestens 5-lagig)
- Holzfaserplatten und Plattenwerkstoffe auf Gipsbasis dürfen nur einen Anteil $\leq 10\%$ an der Ableitung der Scheibenkräfte haben und nur in Kombination mit uneingeschränkt anwendbaren Beplankungsmaterialien eingesetzt werden.

Die Eignung von Mehrschichtplatten und deren Verbindungsmitteln erfolgt auf separater Nachweisbasis. Hier ist der Ingenieur aufgefordert im Rahmen der eigenen Kenntnisse und Verantwortung einen soliden Nachweis vorzulegen.

Weitere, durchaus normativ konzipierte Angaben werden in Zukunft Gegenstand der normenbegleitenden Veröffentlichungen sein.

4. Ausblick

Mit der bundesweiten bauaufsichtlichen Einführung auf der Basis der Technischen Baubestimmungen ist (ohne Übergangsphase) voraussichtlich im Januar 2007 zu rechnen. In Baden-Württemberg ist dies bereits Ende 2005 geschehen. Neben den bautechnisch betreffenden Regelungen können dabei auch Verfahrensfragen in Erdbebengebieten abweichend geregelt sein. Die Freistellung von der bautechnischen Prüfung wird in den höheren Erdbebenzonen Baden-Württembergs nach §18(1) LBOVVO eingeschränkt. Wegen der erhöhten Erdbebengefahr muss die bautechnische Prüfung auch bei solchen baulichen Anlagen durchgeführt werden, die ansonsten davon ausgenommen sind.

Für die in Deutschland zu erwartenden Erdbebenintensitäten sind die Schädigungen im allgemeinen gering, wegen der Vielzahl der betroffenen Objekte sind die zu erwartenden Gesamtschäden aber erheblich. Eine Wiederholung des Bebens von 1978 bei Albstadt würde heute bereits Kosten von ca. 0,5 Mrd. € verursachen. Bei einem Beben z. B. der Magnitude 6,4 mit Epizentrum nahe Köln könnten die versicherten Schäden nach Angaben der Münchener Rückversicherung die Größenordnung von 20 bis 30 Mrd. € erreichen

Vor ziemlich genau 650 Jahren (am Abend des 18. Oktober 1356) bebte in Basel die Erde. Würde dieses Erdbeben heute stattfinden, könnte Basel von der Landkarte verschwinden. Die Region Basel mit ihren Chemiekonzernen zählt weltweit zu den Gebieten mit dem größten Erdbeben-Risiko (versicherte Schäden nach Angaben der Swiss Re: 50 Mrd. sFr). Was in Basel als mittelalterliche Reminiszenz die Geschichtsbücher füllt, ist das stärkste Erdbeben nördlich der Alpen seit Menschengedenken und auch heute latente Gefahr: Laut Dieter Mayer-Rosa, Chef des Schweizerischen Erdbebendienstes an der ETH Zürich, entspricht das Beben einer Stärke, die „maximal im Verlauf von etwa 800 Jahren auftritt“. Statistisch sind es demnach noch 161 Jahre bis zum nächsten Beben. Zwar stuft der Seismologe die Wahrscheinlichkeit eines starken Erdbebens in der Region Basel global „eher im mittleren Bereich“ ein. Ganz anders aber beurteilt er das Risikopotenzial: „Da zählt Basel weltweit zu den zehn Städten mit dem höchsten Risiko. Man wird hier Basel und San Francisco in einem Atemzug nennen können.“

Als Ingenieure können mit Hilfe der neuen DIN 4149 die erforderlichen Nachweise geführt werden. Die in der Norm genannten Regeln sind prinzipiell Gegenstand einer soliden Ausbildung. Dabei sind insbesondere entwerfende Architekten aufgefordert, die Grundlagen zu beachten. Ein entsprechend den Bauherren „verkaufter“ Entwurf kann vom tragwerksplanenden Ingenieur nur noch begrenzt verbessert werden.

Die dafür erforderlichen Nachweise sind keine Grundleistungen nach HOAI. Auch in den Starkbebengebieten Deutschlands kann nicht davon ausgegangen werden, dass die Leistungen im Grundhonorar enthalten sind. Dass in diesen Regionen die entsprechende Beratung und Planung selbstverständlich sein sollte ist von den Ingenieuren auch nach außen zu tragen. Der AHO (Ausschuss für die Honorarordnung) hat bereits 1996 im Heft 3 (Besondere Leistungen der Tragwerksplanung) folgende Bewertung vorgeschlagen:

Tabelle 6: Honorierung der Tragwerksplanungsleistungen zum Erdbebennachweis

Bauwerksklasse nach DIN 4149-alt	Leistungsphase 2 - 4	Leistungsphase 5	Gesamt
1	3 - 5 %	2 - 4 %	5 - 9 %
2 oder 3 - vereinfachter Nachweis	6 - 9 %	2 - 4 %	8 - 13 %
2 oder 3 - genauer Nachweis	10 - 15 %	2 - 4 %	12 - 19 %

Dabei ist zu beachten, dass die „Bauwerksklassen“ der alten Norm nicht unmittelbar mit den „Bedeutungskategorien“ in Tabelle 3 der DIN 4149:2005 vergleichbar sind. Die in der **Tabelle 6** genannten %-Sätze vom Grundhonorar sind individuell zu vereinbaren. Die Anwendung der neuen Norm rechtfertigt die oberen Werte der angegebenen Span-

nen, da auch nach der Gewöhnungszeit Verantwortung und Aufwand höher einzustufen ist als nach der alten Erdbebennorm. Entsprechende Passagen sollten in jedem Ingenieurvertrag enthalten sein.

Für den Holzbau hat die neue Norm zwar nur wenig Antworten auf die Berechnungsfragen parat, bietet dadurch allerdings die Möglichkeit, mit ingenieurtechnisch sinnvollen und nachvollziehbaren Nachweisen das hervorragende Potenzial der Holzkonstruktionen zu beleben. Die dabei gewonnenen Erfahrungen sollten mittelfristig auch in den Normen und den begleitenden Grundlagen zu den anerkannten Regeln der Technik Niederschlag finden. Die kommende europäische Normung wird dabei auf aktuellem Stand weder vereinfachend noch erschwerend wirken. Da die neue DIN 4149 jedoch so eng an dem entsprechenden europäischen Regelwerk (DIN EN 1998 – Eurocode 8) orientiert ist, steckt für die zahlreichen europäischen Erdbebengebiete (Griechenland, Italien, Türkei etc.) eine gute Export-Option in der zügigen Umsetzung der hinter der Norm stehenden Aspekte.

Vom geringen Umfang der normativen Angaben zum Holzbau in DIN 4149:2005 darf nicht auf eine mindere Relevanz der planerischen Notwendigkeiten geschlossen werden. Eher sollte daraus ein Arbeitsauftrag für die kommenden Normen aus Europa (DIN EN 1998) abgeleitet werden. Der wachsende Anteil an Holzgebäuden rechtfertigt allemal die Erarbeitung entsprechender Kriterien. Da es sich bei der Erdbebenbeanspruchung um eine statistisch konstante Gefährdung handelt, erwächst aus den konstruktiven Eigenschaften des Holzbaus auch ein kalkulierbarer Vorteil, wenn die Robustheit des Tragwerks von Anfang an geplant und in der Ausführung kontrolliert wird.

Die vorgesehenen Entwicklungsfelder des Holzbaus bei mehrgeschossigen Bauwerken und im industriellen Hallenbau sowie bei wichtigen öffentlichen Bauten erfordern ausnahmslos, dass auf die Erdbebensicherheit ein besonderes Augenmerk gerichtet wird, damit hier kein Wettbewerbsnachteil aus mangelnder Beweiskraft entsteht.

Dr.-Ing. Karl Kleinhanß



DEGES
Deutsche Einheit Fernstraßenplanungs-
und -bau GmbH
Zimmerstr. 54
10117 Berlin
Tel.: 030 20243-0
Fax: 030 20243-291
E-Mail: Heeger@deg.es.de

- | | |
|-----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|
| bis 1969 | Studium an der TH Stuttgart |
| bis 1980 | Tragwerksplanung im Ingenieurbüro Leonhardt und André |
| bis 1997 | Leitende Tätigkeit in Bauunternehmen bzw. im Consulting |
| Seit 1998 | Abteilungsleiter Brückenbau bei der DEGES
Baubevollmächtigter für 6 Talbrücken an der A 20 |

Eignung einer Holzkonstruktion für eine Extremsituation

Die Wildbrücke in Wilmshagen

1. Die Aufgabe

Als Wildbrücken bzw. Grünbrücken werden erdüberschüttete und bepflanzte Überführungsbauwerke bezeichnet, welche als Wildwechsel insbesondere für das Reh-, Rot- und Schwarzwild, aber auch für Kleintiere wie die Haselmaus dienen. Sie sorgen vor allem bei der Neuanlage von Autobahnen, wie der 350 km langen Ostseeautobahn A 20 von Lübeck nach Stettin dafür, dass die betroffenen Naturräume mit ihren vielfältigen großräumigen Wechselbeziehungen für die Fauna vernetzt bleiben.

Im Zuge der A 20 wurden insgesamt acht Wildbrücken angelegt, deren Standorte den meistfrequentierten Wanderungskorridoren entsprechen. Mit jeweils ca. 50 m Breite gewährleiten sie den vom Autobahnverkehr weitgehend ungestörten Wildwechsel, ausgestattet mit mindestens 2 m hohen Irritationsschutzwänden und harmonisch in die angrenzende Landschaft führenden Verwallungen und Bepflanzungen.

Sämtliche Wildbrücken wurden, wie auch alle übrigen, bisher in Deutschland gebauten Grünbrücken in Spannbetonbauweise konzipiert, vorwiegend als Zweifeldrahmen mit Aufweitungen oder Ausrundungen zu den Widerlagern. Dabei orientierten sich die Entwürfe an einheitlichen Gestaltungsrichtlinien, welche für jeweils 120 km lange Abschnitte gestalterische Vorgaben definierten. Allerdings muss bei kritischer Betrachtung festgestellt werden, dass die so entstandenen „Straßenüberführungen mit Erdüberschüttung“ sowohl in funktionaler als auch in technisch-wirtschaftlicher und nicht zuletzt in gestalterischer Hinsicht nicht voll befriedigen können:

- Funktional: Limitierung der Erdüberschüttung und damit der tiefwurzelnden Bepflanzungen, in deren Folge diese Grünbrücken nicht von allen Tierarten angenommen werden (*Bild 1*).
- Technisch-wirtschaftlich: Relativ hohe Kosten je m² Brückenflächen wegen hoher Dauerlast aus Erdüberschüttung und Betongewicht.
- Gestalterisch: Barrierewirkung aus der Addition von Konstruktionshöhe, Erdüberschüttung und ca. 2 m hoher Irritationswand.

Vor diesem Hintergrund kristallisierte sich die Aufgabe heraus, bei den beiden weiteren Wildbrücken im Zuge des Rügenzubringers B 96 neu von Grimmen über Stralsund bis Bergen auf Rügen neue Lösungen zu entwickeln, welche ohne diese Nachteile auskommen.



Bild 1

Dabei war den verantwortlichen Ingenieuren bewusst, dass sich wirklich befriedigende Lösungen dadurch auszeichnen, dass Funktion, Form und Material zusammenpassen und dass dieses Ziel für eine Wildbrücke nicht wirklich durch eine „erdüberschüttete Straßenbrücke“ in Betonbauweise erreicht werden kann.

2. Die Idee

Vor diesem Hintergrund kam der entscheidende Anstoß genau zum richtigen Zeitpunkt auf dem Forum „Moderner Holzbau – Chancen für Mecklenburg-Vorpommern“ am 24. 11. 2000 in Wismar (*Bild 2*). Dort wurde bei einer Podiumsdiskussion die Frage erörtert, weshalb Holzbaueisen bisher im Autobahnbau nicht zum Einsatz kamen. Im An-



Bild 2

schluss sagten der Vertreter der Straßenbauverwaltung in Mecklenburg-Vorpommern sowie der für die DEGES sprechende Autor dieses Beitrages spontan zu, eine detaillierte Projektstudie für ein konkretes Autobahnbauwerk auszulösen, um über einen umfassenden Variantenvergleich die Vor- und Nachteile von Holz- und Betonbauweisen am konkreten Projekt herauszuarbeiten.

Gesagt, getan: Bereits nach der ersten von insgesamt vier Projektbesprechungen unter Leitung der DEGES mit Beteiligung des Landesamtes für Straßenbau und Verkehr Rostock, Prof. Dorka von der Universität Rostock, des Büros Schwesig und Lindschulte sowie des Architekten Keipke Rostock, war die Projektidee geboren: Keine Straßenbrücke bzw. kein Wirtschaftsweg mit Betonfahrbahn und Primärtragwerk in Holzbauweise konnte der ideale Anwendungsfall für den Holzbau sein, sondern eben die Wildbrücke als „erdüberschütteter Tunnel“.

- Im Vordergrund standen dabei folgende Kriterien:
- die vorwiegende Dauerbelastung der Erdüberschüttung
 - die naturnahe Bogenform als Stützlinie
 - die so gegebene hohe Überschüttung im Widerlagerbereich
 - damit die Bepflanzbarkeit mit Tiefwurzeln
 - der erkennbare Einsatz des funktionsgerechten Baustoffes Holz
 - im Schutz des Tunnels gegen wechselnde Durchfeuchtung.

Damit war allen Beteiligten bewusst, dass nach Klärung wichtiger Detailfragen die angestrebte Einheit von Funktion, Form und Material gerade für eine Wildbrücke in Holzbauweise im Bereich des Möglichen lag.

3. Das Tragwerk

Nachdem sich die Gewölbestructur von vornherein als funktional, gestalterisch und technisch-wirtschaftlich überzeugende Vorzugsform anbietet, wurde das Primärtragwerk in drei Schritten entwickelt und optimiert.

Zunächst wurde eine Rippenschale ähnlich dem Expo-Dach in Hannover in der Form eines Paraboloids untersucht (Bild 3), die für leichte Flächentragwerke bevorzugt gebaut wird. Wegen der hohen Dauerlasten aus der Erdüberschüttung ergab sich jedoch im Falle der Grünbrü-

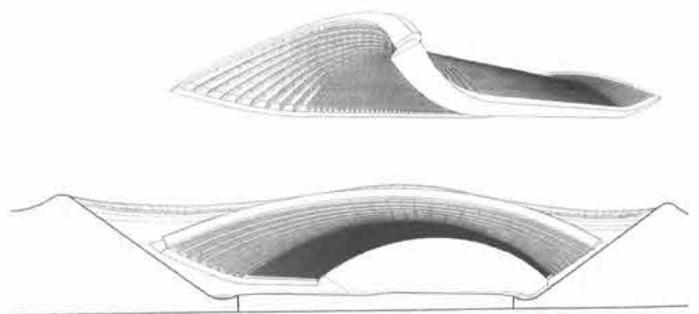


Bild 4

cke die Tonnenschale mit radialen Bindern und sekundären Querträgern als wirtschaftlichstes Tragwerk, weil die vorherrschenden Einwirkungen auf kürzestem Weg zu den Widerlagern abgeleitet werden. Lediglich in den Randbereichen der Tonnenschale wurden zunächst noch Aufwölbungen durch schräg gestellte Binder vorgesehen, u.a. aus Gründen des Blend- und Lärmschutzes (Bild 4).

Unterstützt durch eine Diplomarbeit an der Universität Rostock wurde das Tragwerk weiter optimiert, indem auf die Randaufwölbung verzichtet wurde. Diese hätte den konstruktiven Aufwand wegen der höchst komplizierten Form unverhältnismäßig erhöht, vor allem bei den flächigen Elementen der Bepflankung und sämtlichen Randträgern. Das Tragwerk wird durch gleichförmige Dreigelenkbögen gebildet, die im Portalbereich schräg gestellt werden (Bild 5).

Diese Abschrägung führt zudem zu einer für den Autofahrer vorteilhaften „Ausleuchtung“ des immerhin 50 m langen „Tunnels“.

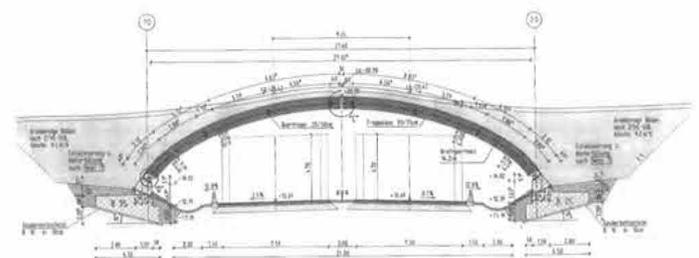


Bild 5

Gerade diese – zunächst schweren Herzens vorgenommene – Änderung erwies sich im Verlauf der späteren konstruktiven Detailplanungen als absolut richtige Entscheidung, vereinfachte sie doch die konstruktiven Details und reduzierte die Baukosten erheblich – letztlich ohne Einschränkung der funktionalen bzw. wie auch der gestalterischen Qualitäten des mit der Irritationsschutzwand in Form gebrachten Bauwerkes (Bild 6).

4. Konstruktive Fragen der Holzbauweise

Die besonderen holzbau-spezifischen und bauphysikalischen Kriterien wurden unter Einbeziehung weiterer Fachexperten sowie namhafter Firmen des Holzbaus untersucht und gewertet, teilweise mit überraschenden Ergebnissen.

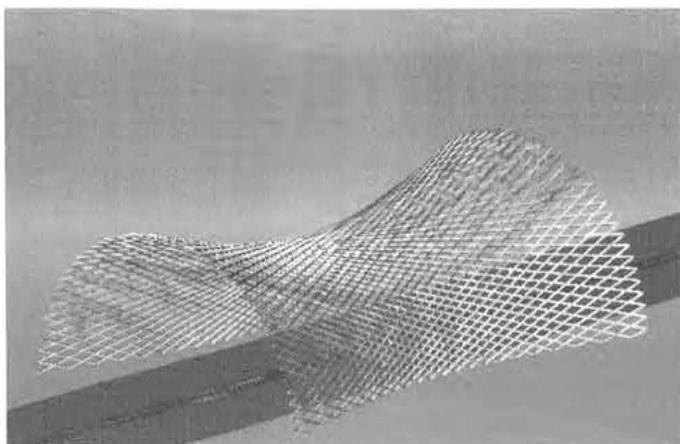


Bild 3



Bild 6

- Wegen der optimalen Abdichtung von oben und der günstigen Längsdurchlüftung reicht für das Haupttragwerk ein konstruktiver Holzschutz mit einer Feuchteschutzlasur aus, ausgenommen die Stirnholzbereiche und die Randträger.
- Sogar beim schlimmsten dankbaren Ereignis eines Fahrzeugbrandes unterhalb des Bauwerks ist die Holzkonstruktion günstiger zu beurteilen als z. B. eine Betonschale.

Während Beton bei ca. 650 °C seine Druckfestigkeit zu zwei Dritteln verliert und Abplatzungen eintreten, verkohlt das Holz nur an der Oberfläche. Nach einer Stunde Branddauer ist ein Holzträger rundum nur 4 cm abgebrannt, der restliche Querschnitt also immer noch tragfähig.

- Örtliche Schadstellen können ohne Beeinträchtigung des Tragwerkes bei Bedarf erneuert werden. Dies gilt sogar für den Austausch einzelner Binder.

Nach Aussagen der Fachleute und den Erfahrungen bei teilweise über 100 jährigen Holzkonstruktionen sind auch die Aufwendungen zur baulichen Erhaltung und Erneuerung nicht höher einzuschätzen als für vergleichbare Stahl- oder Betonkonstruktionen.

5. Vorzugslösung

Mit jeder weiteren Stufe der Projektstudie konnten die Vorzüge der Holzbauweise gegenüber dem „konventionellen“ Bauwerksentwurf als gevoutetem Einfeldrahmen (Bild 7) weiter erhärtet werden. Nachdem auch die zunächst erhobenen Bedenken wegen des Brandschutzes sowie

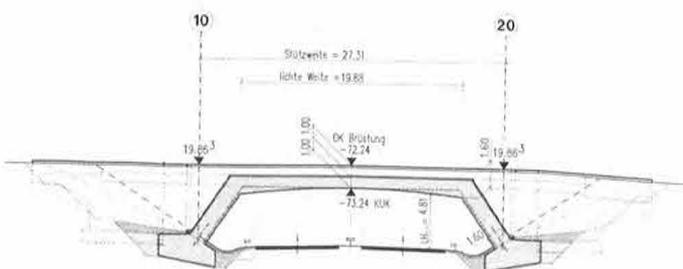


Bild 7

der Dauerhaftigkeit unter witterungsbedingten, chemischen und organischen Einwirkungen ausgeräumt waren, stand einer Zustimmung des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung nicht mehr im Wege: Der RAB BRÜ, aufgestellt von der DEGES und eingereicht über das Landesamt für Verkehr und Straßenbau Mecklenburg-Vorpommern, wurde ohne Vorbehalte zur Ausschreibung und Ausführung genehmigt.

Sogar gegenüber den in Betonbauweise als Tonnenschale ausgeführten Wildüberführungen an der Thüringer Wald-Autobahn sowie erst kürzlich der A 11, kann die Holzbauweise als zumindest gleichwertig angesehen werden, denn:

- die Binderhöhe von 85 cm ist vergleichbar mit der Bauhöhe einer Betonschale, wobei die Betonschale zur Vermeidung einer so genannten Negativschalung im Widerlagerbereich flacher ausgebildet werden muss als nach der Stützlinie erwünscht.
- Dementsprechend ist die Dauerlast wegen des niedrigeren Eigengewichtes deutlich niedriger, was sich vorteilhaft auf die Massen des Tragwerkes sowie der Gründung auswirkt.
- Nach dem letztlich maßgebenden Kriterium sind die Baukosten geringer, die Kosten der baulichen Erhaltung ebenfalls.

6. Die Abdichtung

Bei dem für Holzbauwerke geradezu „lebenswichtigen“ Schutz vor wechselnder Durchfeuchtung sind die Verhältnisse im Innenraum des Tunnels durchaus günstig, weil eine natürliche Belüftung für ein rasches Abtrocknen von evtl. Spritzwasser sorgt, wobei eine Tausalzbeaufschlagung sogar konservierende Wirkung hat.

Besonders sorgfältig ist die Abdichtung von oben zu gestalten, da jegliche Durchfeuchtung mit Gewissheit auszuschließen ist:

Der Aufbau von oben nach unten lautet:

- Mutterboden 30 cm
- Grobkörniger Boden nach ZTVE-StB Abs. 9.2.4. (1)
- Mineralsubstrat strukturstabil und frostbeständig 15 cm
- Nagetiergitter aus Edelstahlgitter – Maschenweite 1,0 cm
- Filtervlies aus verrottungsfestem Polyethylen (DIN 54307)
- Schutz- und Drainagebahn aus Recycling-Kautschuk
- Vlies-Gewebe als Trennlage
- Wurzelschutzfolie mit Schutzlage aus verrottungsfestem Material
- Polymerbitumen-Schweißbahn nach DIN 52133 (PYE PV 200 S 5)
 2. Lage vollflächig verschweißt
 1. Lage genagelt und in den Überlappungen verschweißt
- Vlies-Gewebe zur Trennung der Bitumenschichten
- Polymerbitumen-Schweißbahn nach DIN 52133 (PYE PV 200 S 5) vollflächig verklebt
- Inertol-Haftanstrich auf Lignotrend

Dieser Aufbau erfüllt alle Kriterien des dauerhaften Feuchteschutzes; zudem erfolgt durch das Dachgefälle die zügige Ableitung zum Widerlager.

7. Der Schutz vor Schädlingen, Brand und Fahrzeuganprall

Die gesamte Tragkonstruktion erhielt neben dem konstruktiven Holzschutz gemäß DIN 68800 einen vorbeugenden chemischen Holzschutz entsprechend der Beanspruchungen. Das Bauwerk ist in die Gefährdungskategorie 3 eingestuft, d. h. das Holz ist Witterung und Kondensation ausgesetzt, hat aber keinen Erdkontakt.

Das eingesetzte Holzschutzmittel ist insektenvorbeugend, pilzwidrig und witterungsbeständig. Zusätzlich wurde eine Feuchtschutzlasur aufgebracht, die eine diffusionsoffene Beschichtung darstellt, welche das Eindringen sowie auch das Entweichen von Feuchtigkeit verzögert, um u. a. eine Rissbildung durch zu schnelles Austrocknen zu verhindern.

Im Hinblick auf den Brandschutz ist die Tragkonstruktion so dimensioniert, dass sie einer Feuerwiderstandskategorie F 30 entspricht. Gemäß DIN 4102 Teil 4 kann man von einer Abbrandgeschwindigkeit von 0,7 mm/min ausgehen. Dies entspricht einer Abbranddicke von ca. 2,0 cm innerhalb von 30 Minuten an den Luftseiten.

Die stählernen Verbindungsmittel sind weitgehend innenliegend. Bei der Festlegung der Randabstände ist der Brandfall berücksichtigt.

Entlang der unterführenden Fahrspuren konnte auf die zunächst vorgesehene verstärkte Schutzeinrichtung verzichtet werden, weil beim LKW-Anprall wegen der aussteifenden und lastverteilenden Wirkung der Querträger sowie der Beplankung aus Lignotrend maximal ein Binderpaar geschädigt werden sollte, das dann im Bedarfsfall ausgewechselt werden kann.

8. Die Bauausführung

Auf der Grundlage des genehmigten Bauentwurfes wurde die Baumaßnahme als vorgezogenes Bauwerk ausgeschrieben, wobei wegen der vorgenannten Vorzüge ausschließlich die Holzbauweise angefragt wurde.

Aus einer großen Zahl von Wettbewerbern erhielt die Firma Amann aus Weilheim-Bannholz den Zuschlag; als Lieferant für die Holzleimbinder wurde die Firma Feyler aus Coburg bestimmt.

Zur holzbautechnischen Beratung und Begleitung wurde dem Prüfingenieur Prof. Krüger als Sachverständiger Prof. Blass von der Universität Karlsruhe beigelegt.

Besonderes Augenmerk wurde in der Ausführungsplanung der konstruktiven Durchbildung des Holztragwerkes gewidmet, insbesondere

- den beiden Randträgern mit Abdichtung, Kappen und Geländeeranschluss,
- den Verbindungen zwischen den polygonal abgefrästen Hauptbindern und den sog. Lignotrendelementen.

Der Überbau besteht aus einer Brettschichtholzkonstruktion in Form von parallel gestellten Dreigelenkbögen. Zur Stabilisierung bzw. Kipp-sicherung werden je zwei Binder durch Querträger zu Zwillingsträgern verspannt, was mit durchgehenden Gewindestangen realisiert wird.

Die Hauptträger bestehen aus Brettschichtholz BS 14 mit den Maßen 20/85 cm. Der Belag aus Brettsperholz ist mit Schlüsselschrauben



Bild 8

an die Bogenträger angeschlossen. Die Aussteifung und Stabilisierung des Gesamtsystems in Querrichtung erfolgt über die Beplankung.

Nach Herstellung der Gründung und der Betonunterbauten wurde die gesamte vorgefertigte Holzkonstruktion vom ersten Tragbogen in nur zwei Wochen vor Ort montiert, so dass die Unterfahrbarkeit des Bauwerks für den Baustellenverkehr nur kurzfristig unterbrochen war (Bild 8).

9. Die bisherigen Erfahrungen

Nach 2 Jahren erfährt das Pilotprojekt ein durchweg positives Urteil sowohl von der Fachwelt als auch von den Nutzern des Zubringers, insbesondere zur gestalterischen Wirkung (Bild 6).

Dies wird nicht zuletzt durch die Verleihung des „Renault Design Traffic Award“ für innovative und mutige Verkehrsarchitektur dokumentiert.

Um als Einstieg für diese neue innovative Bauweise eine hohe Qualität und Dauerhaftigkeit, auch für weitere Projekte zu gewährleisten, wird zusätzlich zu den üblichen Messungen nach ZTV-K und den Prüfungen gem. DIN 1076 das Feuchtigkeitsverhalten beobachtet.

Aufgenommen wurden in Zusammenarbeit mit dem Prof. Mainka von der Universität Rostock

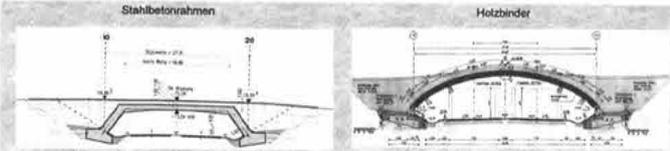
- zwei Messreihen (Brückenmitte und im Bereich des Nordportals)
- je drei Messstellen (Scheitel-, Drittpunkt- und Kämpferbereich)
- mit je fünf Messpunkten (Bogenbinder und Beplankung – oben, unten – sowie in deren Fugen)

Diese Messpunkte wurden über einen Zeitraum von zwei Jahren vierteljährlich gemessen, um auch jahreszeitlich bedingte Randbedingungen mit zu erfassen.

Nach Auswertung der Messungen bis in das laufende Jahr 2006 hinein ist zu erkennen, dass sich eine mittlere Feuchte um die 15 % eingestellt.

Dabei zeigen auch die feuchteempfindlichen Punkte (Ober- oder Unterseite der Beplankung, Bogenbinder, Fuge zwischen den Beplankungselementen) keine nennenswerte Abweichung.

Feuchtigkeiten < 20 % sind für den Baustoff Holz völlig unschädlich. Eine Kondensatbildung an der Konstruktionsunterseite ist nach jetzigen Kenntnissen nicht zu erwarten.



Vergleich der RE Entwürfe - BW 2872/ 3 Wildbrücke

Stahlbetonrahmen <i>Konventionell</i>		Holzboinder <i>Innovativ</i>
Stahlbeton 2600 m ³	Tragende Bauteile	Holzleimbinder 350 m ³
100 %	Baukosten	85 %
F 30	Brandschutz	F 30 (reparabel)
Ca. 50 Jahre	Dauerhaftigkeit	ca. 50 Jahre
Überbau > 6 Monate	Herstellung/ Bauzeit	Montage Tragwerk 2 KW
Nur Flachwurzler (Lichtung)	Bepflanzung für Wildwechsel	Tiefwurzler (Buschwerk)
Straßenbrücke mit Überschüttung	Gestaltung	Einheit Form, Funktion, Material

Bild 9



Bild 10

10. Die Perspektiven

Über einen mehrstufigen Entwicklungsprozess konnten die einer innovativen Erstanwendungen eigenen Probleme erkannt und gelöst werden, nicht zuletzt durch die frühzeitige Einschaltung erfahrener Firmen, Berater und Sachverständiger. So entstand bereits im ersten Anlauf ein ausgereifter Bauwerksentwurf, der in der Gesamtheit aller gestalterischen, technisch-konstruktiven und ökonomischen Kriterien beispielgebend ist. Insbesondere im direkten Vergleich mit der konventionellen Stahlbetonvariante schneidet er in allen Kriterien zumindest gleichwertig ab (*Bild 9*).

Sowohl den Ingenieur als auch den Umweltexperten und Landschaftsplaner sowie fachfremde Betrachter überzeugt die gelungene Symbiose aus Funktion, Form und Material mit dem naturgewachsenen Holzwerkstoff in der Bogenform als Unterbau für tiefwurzelnnde Pflanzen in der naturgerecht profilierten Erdüberschüttung.

Alle konstruktiven Fragen wurden im Zuge der Fertigung und Montage sowie durch anschließende, gesonderte Prüfungen am fertigen Bauwerk gelöst und abgesichert. Durch einen Belastungstest mit SLW

30 wurden die statischen Berechnungen bestätigt. Das Langzeit-Kriechverhalten wird über ein umfangreiches Messprogramm über mehrere Jahre erfasst, ebenso die Restfeuchte in insgesamt 30 Messstellen.

Abschließend können aus heutiger Sicht die Perspektiven der Holzbauweise für solche Wildüberführungen durchaus positiv bewertet werden, nachdem die konstruktiven Fragen als gelöst gelten, die funktionalen Vorteile auf der Hand liegen und neben den wirtschaftlichen vor allem die gestalterischen Vorteile überwiegen.

Deshalb hat auch das BMVBS, ohne die sonst übliche Erprobungszeit für innovative Bauweisen in Anspruch zu nehmen, seine Zustimmung zur Planung der zweiten, noch weiter gespannten Wildbrücke auf Rügen erteilt (*Bild 10*).

Über die Wild- bzw. Grünbrücken hinaus bietet sich diese Montagebauweise idealerweise an für die Nachrüstung von Lärmschutztunneln an bestehenden bzw. weiter auszubauenden Straßen z. B. im innerstädtischen Bereich. Nach mehreren Anfragen diverser Straßenbauverwaltungen sind auf diesem Gebiet durchaus weitere Innovationen und Anwendungen für Holzkonstruktionen im Verkehrswegebau zu erwarten.

Dipl.-Phys. Frank Rinn



RINNTECH
Bierhelder Weg 20
69126 Heidelberg
Tel.: 06221 3138-87
Fax: 06221 3143-88
E-Mail: frank.rinn@rinntech.com

- 1963 Geboren in Lich
- 1982 – 1988 Diplom-Studium der Physik in Gießen und Heidelberg
- 1988 Gründung eines eigenen Ingenieurbüros zur Erforschung, Entwicklung und Anwendung von Messtechnik zur Prüfung von Bäumen und Hölzern
- 1989 Sonderpreis der Stiftung für Innovation in Wissenschaft und Forschung (Düsseldorf) für die Erforschung, Entwicklung und erfolgreiche Anwendung von Prototypen zur Bohrwiderstandsmessung an Bäumen und Hölzern
- 1992 Innovationspreis des Garten- und Landschaftsverbandes für Markteinführung der RESISTOGRAPH®-Bohrwiderstandsmessgeräte
- 1997 Auszeichnung im Rahmen des Baden-Württembergischen Landes-Innovationspreises (Dr.-Rudolf-Eberle-Preis)
- 1998 Innovationspreis der Wirtschaftsjunioren Deutschland für Entwicklung und Markteinführung von Bohrwiderstandsmessungen zur Untersuchung von Bäumen und Hölzern, gestiftet durch Prof. Arthur Fischer, überreicht durch Außenminister Dr. Klaus Kinkel in der Paulskirche zu Frankfurt
- 2004 Auszeichnung im Rahmen des Baden-Württembergischen Landes-Innovationspreises (Dr.-Rudolf-Eberle-Preis) durch Wirtschaftsminister Pfister für das Projekt „3D-Impulstomograph für Bäume, Hölzer, Beton und andere Materialien“
- Seit 1998 Einige Hundert Gutachten über Bäume, Bauwerke und Holzkonstruktionen zur Zustandserfassung und -dokumentation, Jahrringanalyse und Datierung sowie einige Dutzend Veröffentlichungen in Fachzeitschriften und Vorträge auf Tagungen

Untersuchung von Brettschichtholz

Ermittlung auch verdeckter Schäden mit Bohrwiderstandsmessungen. Ein Erfahrungsbericht aus Anwendungen seit 1986.

Zusammenfassung

Hölzerne Bauteile können bei ungünstigen Bedingungen von holzzerstörenden Organismen angegriffen werden. Aufgrund konstruktiver Verwendungsformen und spezifischer Eigenschaften von holzabbauenden Pilzen sind viele Schäden zunächst verdeckt, visuell und mittels herkömmlicher Methoden (Gucken + Klopfen) nicht ermittelbar. Bohrwiderstandsmessungen haben sich hier als sinnvolle technische Ergänzung erwiesen. Der Bohrlochdurchmesser von ca. 3 mm bedeutet einerseits den Vorteil einer nahezu zerstörungsfreien Prüfung, andererseits den Nachteil der nur punktuellen Aussagefähigkeit. Wenn diese Einschränkungen berücksichtigt werden, erlaubt diese Technik eine schnelle und zuverlässige Ermittlung des inneren Zustands auch von verdeckt liegenden Holzbauteilen.

Ausgangslage

Für die Dauerhaftigkeit von Brettschichtholz gelten zunächst die gleichen Bedingungen wie bei Vollholz. Dauerhaft zu hohe Feuchtigkeit kann die Ansiedlung und Ausbreitung holzzerstörender Insekten und Pilze fördern. Im Gegensatz zu Vollholz kommen bei Brettschichtträgern jedoch aus der Verleimung und den meist unterschiedlichen mechanischen Eigenschaften der verleimten Bretter noch weitere Gefahrenquellen hinzu, sodass es u. a. zu Delaminationen kommen kann. Schließlich ist die damit zusammenhängende Qualität der Produktion ein weiterer Faktor, der die Dauerhaftigkeit beeinflusst.

Während bei Vollholz die zumindest potenzielle jahrhundertelange Dauerhaftigkeit schon alleine durch die Existenz entsprechend alter Konstruktionen bewiesen ist, reichen die Erfahrungen bei Brettschichtholz erst einige Jahrzehnte zurück. Insofern sind Inspektoren hier auch auf theoretische Überlegungen und Ergebnisse aus Versuchen mit simulierter künstlicher Alterung angewiesen.

Aus all diesen Gegebenheiten folgen für die Praxis der Untersuchung von Brettschichtträgern verschiedene Konsequenzen, die sowohl bei der praktischen Vorgehensweise wie auch bei der Auswahl der technischen Methoden zu berücksichtigen sind.

Wesentliche Schritte der Untersuchung

Für die meisten unserer bisherigen Untersuchungen hat sich folgendes Ablaufschema als sinnvoll erwiesen (unabhängig von den spezifischen Anforderungen einzelner Projekte):

- I. Klare Zieldefinition für die Instandsetzung und Besprechung mit den später Beteiligten (Behörden, Ingenieure, Handwerker).
- II. Klärung von Genauigkeit und Umfang der Planerstellung und der Untersuchung.
- III. Aufmaß bzw. Bestandsplan
 - A. Festlegung eines Koordinatensystems für das Bauwerk.
 - B. Zeichnung neuer oder Korrektur bestehender Bestandspläne.
- IV. Untersuchung der Holzkonstruktion.
 - A. Visuelle Erfassung und Bewertung.
 - B. Einsatz handwerklicher Methoden.
 - C. Anwendung technischer Geräte, sofern und soweit erforderlich.
 - D. Bestimmung tierischer und pflanzlicher Schädlinge so wie der (meist bauphysikalischen) Schadensursachen.
 - E. Dokumentation der Untersuchungsergebnisse im Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung.
- V. Statische Bewertung der Ergebnisse.
- VI. Ggf. Überarbeitung der Zieldefinition des Gesamtprojektes.
- VII. Planung und Ausschreibung der Maßnahmen.
- VIII. Ausführung der Sanierungsarbeiten.
- IX. Kontrolle der Ausführung und Abrechnung anhand der Zustandspläne.

So einleuchtend und selbstverständlich diese Schrittabfolge klingen mag, so selten wird sie in der Praxis umgesetzt. Je früher Fehler oder Unterlassungen erfolgen, um so größer sind meist die Konsequenzen in Form von Zusatzkosten und Verzögerungen oder gar durch übersehene bzw. übergangene Schäden mit gelegentlich schwerwiegenden Folgeschäden.

Oft liegt die ungenügende Vorbereitung der Instandsetzung von Gebäuden anscheinend gerade in Deutschland daran, dass Behörden keinen ausreichenden Etat für notwendige Vorarbeiten bereitstellen, wohl aber für die Ausführung der Arbeiten. So wird oft mit den Instandsetzungsarbeiten begonnen, obwohl weder ein guter Bestandsplan noch eine verlässliche Zustandskartierung vorliegen.

Eine Sanierung ohne vorherige Zustandserfassung wird jedoch meist wesentlich teurer, als vorher abschbar, oder es wird unnötig viel Substanz ausgetauscht, die im Bauwerk hätte verbleiben können – weil der

konkrete Umfang der auszuführenden Arbeiten vorher nicht bekannt war (weil der Zustand des hölzernen Tragwerks nicht ermittelt und übersichtlich dargestellt wurde). Die während der Ausführung auftauchenden „Überraschungen“ führen dann zwangsläufig zu zusätzlichen, oftmals kaum kontrollierbaren Arbeiten, Kosten und Zeitverzug.

Unabdingbare Vorarbeiten

Auch wenn es profan klingen mag, zeigt die Praxis, dass grundlegende und eigentlich selbstverständlich erscheinende Voraussetzungen in vielen Instandsetzungsprojekten nicht erfüllt sind. Daher nachfolgend eine Beschreibung aus der Praxis für die Praxis.

Zunächst sind die Ziele der Gesamtmaßnahme zu klären (z. B. punktuelle kurzfristige Reparatur, mittelfristige Instandsetzung) – denn erst in Abhängigkeit von diesen Zielen können Umfang und Präzision der Bestandserfassung (Vermessung, Planerstellung, Untersuchung) festgelegt werden. In manchen Fällen ist nach der Bestandserfassung und Zustandsdokumentation eine Revision der Ziele erforderlich, weil der Zustand der Substanz alternative Wege erzwingt. Auch hierfür sollte von Beginn an Zeit eingeplant werden.

Soll das Bauwerk in Zukunft anders genutzt werden, bedeutet dies unter Umständen auch eine statische Belastungsänderung. In diesem Falle kann es erforderlich sein, nicht nur die ursprünglichen Tragquerschnitte wiederherzustellen, sondern auch eine Messung von Materialeigenschaften der Holzkonstruktion durchzuführen, um eine Grundlage für statische Berechnungen vorzulegen. Derartige Messungen sind auch erforderlich bei offenkundigen Symptomen, die an der Tragfähigkeit des Systems zweifeln lassen.

In den meisten Fällen unserer bisherigen Untersuchungsaufträge (einer Hundert seit 1988) wurden die Gutachter, die das hölzerne Tragwerk prüfen sollten, nicht in die vorherigen Planungsschritte einbezogen – mit stets vielfältigen negativen Folgen.

Erstellung oder Korrektur eines Bestandsplans

Ein Bestandsplan ist für die weiteren Arbeiten von entscheidender Bedeutung. Die Ergebnisse der Zustandsuntersuchung können nur dann im Bestandsplan dokumentiert und später weiter verarbeitet werden, wenn der Plan korrekt und vollständig ist. Auch dies ist in der Praxis oft nicht gegeben, auch wenn es sich bei Konstruktionen mit Brettschichtträgern oft um keine besonders alten Gebäude handelt.

Koordinatensystem

Vor der Erstellung oder Korrektur eines bestehenden Bestandsplans ist zunächst ein Koordinatensystem anzufertigen. Dabei geht es nicht um ein metrisches System, sondern um eine Kennzeichnung der statisch-konstruktiv relevanten Konstruktionsachsen. Entscheidend ist, dass jedes tragwerksrelevante Holz (und ggf. jeder einzelne Knotenpunkt) mit einer eindeutigen Koordinate bzw. Koordinatenkombination gekennzeichnet werden kann – nur so können später Verwechslungen verhindert und auch die Instandsetzungsarbeiten punktgenau ausgeführt werden.

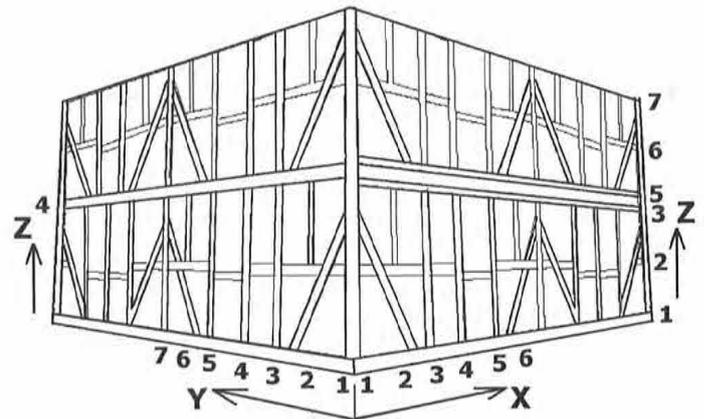


Bild 1: Beispiel eines Koordinatensystems für die Achsen des Tragwerks.

Bestandsplanerstellung

Als Dokumentationsgrundlage für die Zustandserfassung reichen meist Systemskizzen mit Hauptverformungen aus. Verformungsgerechte Aufmaße waren bislang sehr selten notwendig. Bezüglich der hölzernen Konstruktion sind die Anforderungen an einen Bestandsplan recht einfach formuliert:

1. **Alle statisch-konstruktiv relevanten Hölzer der Konstruktion müssen in mindestens einem Plan zeichnerisch dargestellt sein.**
2. **In den Plänen sollten möglichst keine Hölzer übereinander gezeichnet sein.**
3. **Die relative Position der Hölzer zueinander muss korrekt sein.**
4. **Starke, statisch-konstruktiv relevante Verformungen sind einzuzichnen.**

In der Praxis war bislang leider meist festzustellen, dass vorliegende Bestandspläne diesen Bedingungen nicht genügen. Dachtragwerksgrundrisse auf ca. 1 m Höhe sind in der Regel unbrauchbar. Um den Zustand untersuchter Hölzer farblich und positionsgemäß eindeutig kennzeichnen zu können, dürfen keine Hölzer übereinander gezeichnet werden. Zur Not helfen einzelne kleine Detailskizzen, um größere Pläne entsprechend zu ergänzen.

Mitunter ist es besser (und kostengünstiger), eine neue System-Skizze der Konstruktion nach den obigen Bedingungen anzufertigen, anstatt bestehende Pläne zu korrigieren.

Vom Detail zur Übersicht

Bislang wurden Baukonstruktionen oft in Einzelplänen für die jeweiligen Konstruktionselemente bzw. Achsen dargestellt. Dies führt auch bei kleineren Konstruktionen schnell zu Plansätzen mit einem Dutzend oder deutlich mehr Einzelplänen. Mit der Anzahl der Pläne sinkt jedoch die Übersichtlichkeit. In Einzelplänen geht leicht der Überblick verloren, Zusammenhänge bleiben schnell unerkannt.

Die Nutzung heutiger technischer Möglichkeiten erlaubt es jedoch, die Anzahl der Pläne mitunter drastisch zu reduzieren, ohne an Präzision und Übersichtlichkeit zu verlieren – im Gegenteil. Überblick und Transparenz werden deutlich verbessert.

Eine übersichtliche Dachabwicklung kann zum Beispiel Dutzende einzelner Sparrenachsenpläne ersetzen. Das Prinzip der Übersichtspläne lässt sich für die meisten Konstruktionen umsetzen. Ein komplettes Gebäude passt dann oft vollständig und dennoch übersichtlich auf wenige kleine Pläne.

Welche Einzelpläne mit welchen anderen kombiniert dargestellt werden können, ohne an Detailtreue und Übersichtlichkeit zu verlieren, ist am jeweiligen Bauwerk konkret festzulegen – im Rahmen der unabdingbaren Vorbereitungen und Besprechungen der Beteiligten. Es wäre sinnlos, einen hochkomprimierten übersichtlichen Plan zu erstellen, wenn z. B. der Statiker damit nicht arbeiten kann. Die Bedürfnisse aller Beteiligten, die zum Gelingen der Instandsetzung beitragen müssen, sind bei der Konzeption des Plansatzes zu berücksichtigen.

Die Erfahrungen der vergangenen Jahre belegen, dass mit einem guten kombinierten Zeichnungssatz nicht nur weitere Planungsarbeiten weniger Aufwand bedürfen, sondern auch Ausführungsarbeiten. Der größte positive Effekt wird dann offenkundig, wenn die Kombinationspläne mit einer farbigen Zustandskartierung versehen sind.

Je nach Bauwerk kann es sich ergeben, dass einzelnen Hölzer in mehr als einem Plan zeichnerisch dargestellt sind. Um Fehler zu vermeiden hat es sich für diese Fälle als sinnvoll erwiesen, in der Zustandskartierung die farbige Bewertung des Holzes möglichst nur in einem Plan einzutragen – nämlich dort, wo die statisch-konstruktive Bedeutung des betreffenden Holzes am deutlichsten wird.

Untersuchung der Konstruktion

Wie die Untersuchung einer hölzernen Konstruktion konkret auszugestalten ist, hängt insbesondere vom Ziel des Instandsetzungsprojektes ab. Diese grundsätzliche Aussage klingt so selbstverständlich, als dass man sie nicht erwähnen müsse. Doch in der Praxis ist festzustellen, dass sich bei den meisten Sanierungsprojekten erst im Laufe der Arbeiten herausstellt, wohin es sich entwickelt, weil sich die Verantwortlichen dessen vorher nicht bewusst waren. Oft werden daher Maßnahmen geplant und durchgeführt, die sich im Nachhinein als unnötig erweisen, andere werden unterlassen und müssen hinterher, ggf. erst nach Jahren, mit entsprechend höherem Aufwand nachgeholt werden. Daher sind grundlegende Überlegungen und klare Definitionen der Ziele eines Sanierungsprojektes unabdingbar – stets in Zusammenarbeit mit den beteiligten Fachingenieuren.

Aus einigen Hundert Sanierungsprojekten, die ich in seit 1988 begleitet habe, könnte ich nur wenige Beispiele nennen, in denen eine solche frühe Einbindung in die Planung vorgenommen wurde. Unsere Aufträge kamen in den meisten Fällen, weil es Probleme kurz vor oder in der Ausführung gab.

Wenn ein Gebäude mit hölzernem Tragwerk einige Jahrzehnte alt ist und keine gravierenden Verformungen aufweist, sollte dies deutlicher Beweis einer ausreichenden Standfestigkeit (gegenüber der gegebenen Belastung) sein. Dabei ist die Unterscheidung zum Begriff der Standsicherheit von entscheidender Bedeutung, die üblicherweise mehr bedeutet – nämlich eine nachweislich und je nach Fall deutlich über den

Alltagsbelastungen liegende Standfestigkeit. Insbesondere historische Gebäude können also durch Ihre Existenz eine seit langem ausreichende Standfestigkeit belegen, müssen jedoch nicht unbedingt nach den heutigen ingenieurtechnischen Bedingungen ausreichend standsicher sein. Dies zu beurteilen ist jedoch mitunter sehr schwierig und komplex, u. a. aufgrund der schwierigen Berechnung der statischen Eigenschaften von z. B. historischen Holzverbindungen.

Leider ist immer wieder festzustellen, dass die mit Sanierungen von Holzkonstruktionen betrauten Statiker nicht die erforderlichen Kenntnisse über derartige Konstruktionen aufweisen, weshalb oftmals unnötige zusätzliche Einbauten oder Auswechslungen erfolgen.

Soll sich die Nutzung des betreffenden Gebäudes nach der Sanierung nicht ändern und somit keine statisch größere Belastung auftreten als bislang, so wird in der Regel keine Notwendigkeit zu einer vollständigen statischen Neuberechnung gesehen – sofern die Konstruktion keine gravierenden Verformungen aufweist, die auf statische Überlastungen hindeuten. Somit ist es lediglich erforderlich, die Konstruktion genau zu prüfen und geschädigte Hölzer und Holzverbindungen wieder instandzusetzen und nicht sachgerechte frühere Reparaturen oder Umbauten rückgängig zu machen.

Eine statische Beurteilung braucht eine solide Basis: eine ausreichend genaue Kenntnis des Zustands der Konstruktionshölzer und der Verbindungen. Eine solche Prüfung sollte möglichst zerstörungsfrei und eingriffssarm erfolgen, damit einerseits die Konstruktion nicht beeinträchtigt wird und andererseits möglichst wenig Substanz verloren geht.

Die früher übliche Bohrkernentnahme hinterlässt gravierende Bohrlöcher und hätte ohnehin wenig Aussagekraft. Eine Endoskopie erlaubt zwar eine punktuelle Inspektion unsichtbarer Bereiche und bleibt dafür weiterhin sinnvoll, ermöglicht jedoch keine qualitative Beurteilung des Holzes. Nicht zuletzt wegen des hohen Aufwands für beide Methoden bleiben diese in der Anwendung auf Ausnahmefälle beschränkt.

1986 bis 1988 wurde an den Universitäten Heidelberg und Hohenheim die Grundlagen für ein Verfahren entwickelt, mit dem seither der innere Zustand von Hölzern nahezu zerstörungsfrei ermittelt werden kann: die Nadel-Bohrwiderstandsmessung (Rinn 1988). Sie bildet mittlerweile eine anerkannte und zentrale Komponente unserer Holzuntersuchung. Weltweit sind mehrere Tausend Bohrwiderstandsmessgeräte im Einsatz, gleichwohl mit sehr unterschiedlichen Eigenschaften, Genauigkeiten und Aussagefähigkeiten.

Struktur und Abfolge der Holzprüfung

„Gucken, klopfen, bohren“ wurde das nachfolgend beschriebene Konzept zur Untersuchung bereits von Fachjournalisten genannt – damit haben sie im Prinzip Recht. Am Beginn der praktischen Untersuchung steht eine eingehende visuelle Prüfung der Konstruktion, unterstützt durch den Einsatz handwerklicher Hilfsmittel (Hammer, Stechwerkzeuge). Sofern erforderlich, folgt dann je nach örtlichen Gegebenheiten und Anforderungen aus den Instandsetzungszielen der Einsatz technischer Hilfsmittel – insbesondere an den Stellen, die auf visuellem Wege nicht oder nicht ausreichend genau erfasst werden können.

Es hat sich als entscheidend für die Effizienz der Gesamtuntersuchung erwiesen, dass die Ergebnisse der verschiedenen Untersuchungsschritte jeweils direkt in den farbigen Bestandsplänen dokumentiert werden. Hierbei zeigte sich, dass zwei Personen nicht nur vor Ort meist deutlich mehr als das Doppelte leisten als Einzelne und daher effizienter und letztlich insgesamt kostengünstiger arbeiten.

Meist ergeben sich während der Untersuchung vorher nicht erwartete Ergebnisse, die zu einer Änderungen des Schwerpunktes, der Intensität und der Ausprägung der einzelnen Untersuchungsschritte führen. Auch um derartige Entwicklungen nachvollziehbar zu machen, ist eine präzise Dokumentation der einzelnen Untersuchungsschritte und ihrer Ergebnisse sinnvoll.

Herkömmliche Holzprüfung („Gucken und Klopfen“)

Gute und erfahrene Baufachleute erkennen meist an einer Konstruktion, wo die wesentlichen Probleme zu vermuten sind. Insbesondere folgende Aspekte sind hierbei zu bedenken:

1. **Äußerlich erkennbare Schäden.**
2. **Fehlende Bauteile.**
3. **Verformungen.**
4. **Unsachgemäße Eingriffe und Reparaturen.**
5. **Bauphysikalisch ungünstige Verhältnisse.**

Wie unsere Untersuchungen seit 1988 ergeben haben, reicht der erfahrene Blick jedoch nicht aus: die überwiegenden Schäden, die wir festgestellt haben, lagen im Inneren der Balken oder an verdeckten Hölzern vor. Sie wurden bei der vorherigen, herkömmlichen Begutachtung in der Regel nicht festgestellt – nicht wegen mangelhafter Ausführung oder Unfähigkeit der betreffenden Inspektoren, sondern weil innere Schäden von außen meist nicht zu erkennen sind. Es gab Bauwerke, in denen wir als dritte oder vierte Bestandgutachter tätig wurden – und dennoch die überwiegende Mehrheit der Schäden vorher nicht entdeckt worden waren.

Wenn nach einer herkömmlichen Bestandserfassung repariert wird, tauchen oftmals einige der verdeckten Schäden im Laufe der Ausführungsarbeiten auf. Dies führt zu zusätzlichen Arbeiten, bei denen meist schrittweise vorgegangen werden muss, weil nicht klar ist, wie weit sich die Schäden erstrecken. Diese schrittweisen Arbeiten werden begleitet von Ortsterminen mit Behörden und Fachingenieuren mit entsprechenden Zeitverzögerungen und Zusatzkosten.

Während einer herkömmlichen Instandsetzung werden jedoch meist nicht alle verdeckten Schäden entdeckt. Durch die Handwerksarbeiten kommt jedoch beispielsweise über Putze und Anstriche unweigerlich Feuchtigkeit in das Bauwerk, sodass diverse holzschädigende Prozesse zwangsläufig begünstigt, beschleunigt oder wieder „zum Leben erweckt“ werden. Dies hat dann oft zur Folge, dass wenige Jahre nach einer Sanierung erneut Schäden auftauchen, sichtbar z. B. an Rissen im Putz oder Stuck. Wenn bauphysikalisch ungünstige Bedingungen die Ursachen für die Schäden sind und diese nicht abgestellt werden, ist oft mit einem erneuten Ausbruch von Schäden zu rechnen.

Etlliche unserer Bestandsuntersuchungen der vergangenen Jahre erfolgten an Gebäuden, die wenige Jahre zuvor bereits (oft aufwändig) instandgesetzt wurden. Weil dabei jedoch nicht alle Schäden entdeckt wurden, kam es nach Jahren zu erneuten, oftmals massiven Schäden, da sich vormals verdeckte und übersehene (oder ignorierte) Schäden nach der Instandsetzung ausgebreitet haben.

An diesem Punkt wird die Notwendigkeit einer umfassenden und detaillierten Untersuchung vor der Planung und Ausführung einer Instandsetzung besonders deutlich, um möglichst alle wesentlichen Schäden zu finden. Dies ist keine theoretisch gut klingende Formel, sondern eine sich auch aus der Praxis heraus logisch und zwingend ergebene Konsequenz.

Holzfeuchtemessung

Der beste Holzschutz im Bauwerk liegt in einer konstruktiven Gewährleistung von Trockenheit (Holzfeuchte dauerhaft und deutlich unter 20 %). Auch unter Wasser kommen die üblichen holzabbauenden Prozesse durch tierische oder pflanzliche Schädlinge (bis auf wenige Sonderfälle bakteriellen Abbaus) nicht in Gang oder zum Erliegen. Dies kann man u. a. an Holzproben erkennen, die z. B. mehrere Tausend Jahre in Trockengebieten oder im Grundwasser nahezu unversehrt überstanden haben. Beide Extreme sind in einem Bauwerk kaum zu verwirklichen.

Durch konstruktive Maßnahmen kann jedoch in der Regel eine gefährlich lange (über mehrere Wochen) und starke Durchfeuchtung des Holzes vermieden werden. Konstruktiver Holzschutz ist ohnehin dem chemischen vorzuziehen und reicht in vielen Bereichen auch aus. Gleichwohl gibt es immer noch Anwendungsbereiche, in denen chemischer Holzschutz unumgänglich ist, z. B. bei Hölzern im direkten Erdkontakt in Spielgeräten oder bei Verwendung von Hölzern in Feuchträumen.



Bild 2: Holzfeuchtemessung über den elektrischen Widerstand.

Lufttrockenes Holz hat, je nach Luftfeuchtigkeit, ca. 12 % bis 15 % relative Holzfeuchte. Ab ca. 30 % spricht man von „Fasersättigung“. Bei relativen Holzfeuchten ab ca. 20 % steigt die Wahrscheinlichkeit des Befalls mit Holzschädlingen deutlich an – dies gilt es, zu vermeiden.

Relative Holzfeuchten unter Fasersättigung können u. a. mittels Messung der elektrischen Leitfähigkeit ermittelt werden, wozu meist zwei Elektrodenstifte (Stahlnägel) in das Holz gerammt werden. Alternativ können auch berührungslose, elektromagnetische bzw. kapazitive Messungen erfolgen – jedoch mit einer geringeren Eindringtiefe der Erfassung.

Die Holzfeuchtemessungen sind bevorzugt dort anzuwenden, wo die Wahrscheinlichkeit für potenziell „gefährliche“ Holzfeuchtwerte erhöht ist: an Kontaktstellen des Holzes zu Beton, Mauerwerk oder Stahl (z. B. so genannte „Auflagerpunkte“).

Die meist stichprobenartig ausgeführten Holzfeuchtemessungen belegen meist schnell, wo es zumindest potenziell erhöhte Gefahren für das Eintreten oder Voranschreiten von Holzabbauenden Prozessen gibt: dort, wo die Meßwerte über dem Bereich für lufttrockenes Holz liegen. Zum Nachweis des Vorliegens, der Intensität und Ausdehnung von bestehenden, insbesondere inneren und verdeckten Schäden, haben sich Holzfeuchtemessungen in unserer Anwendungspraxis nicht bewährt, weil sie keine entsprechend räumlichen Nachweise des Holzzustands ermöglichen. Hierfür scheinen Bohrwiderstandsmessungen besser geeignet.

Nadel-Bohrwiderstandsmessungen

RESISTO-GRAPH®-Bohrwiderstandsmeßgeräte treiben eine 1,5 mm dünne und bis zu zwei Meter lange Bohrnadel bei schneller Umdrehung in das Holz. Die Vorschubgeschwindigkeit beträgt je nach Geräteversion bis zu 60 cm/min, die maximale Bohrtiefe zwischen 30 und ca. 160 cm. Die Spitze der Bohrnadel ist doppelt so breit wie der Schaft, damit der Bohrwiderstand hauptsächlich dort anfällt.

Der mechanische Eindringwiderstand wird über die elektrische Leistung des Bohrmotors gemessen, gespeichert und ausgedruckt. In den intakten Holzbereichen schwankt die Kurve mit den natürlichen, harten und weichen Jahrringschichten (Früh- und Spätholz). Ist das Holz durch Pilze oder Insekten geschädigt, sinkt der Bohrwiderstand charakteristisch ab – der noch tragfähige Restquerschnitt verringert sich.

1. Exkurs: zur Geschichte der Nadel-Bohrwiderstandsmessungen.

Im Stadtarchiv von Bad Säckingen (Süd Schwarzwald) befindet sich ein Bericht vom Anfang des 20. Jahrhunderts, wonach ein Zimmermann anhand des (manuell gefühlten) Bohrwiderstands an Hölzern der Rheinbrücke ihren inneren Zustand beurteilen konnte. Bis aus dieser einleuchtenden Idee eine wissenschaftlich abgesicherte und praxistaugliche Methode wurde, dauert es jedoch noch einige Zeit. Paulitsch und Mehlhorn berichteten 1973 über Bohrwiderstandsmessungen an Spanplatten über Aufzeichnung des Drehmoments der Probe. Die Firma PHB Weserhütte versuchte unabhängig davon in den Siebziger Jahren,

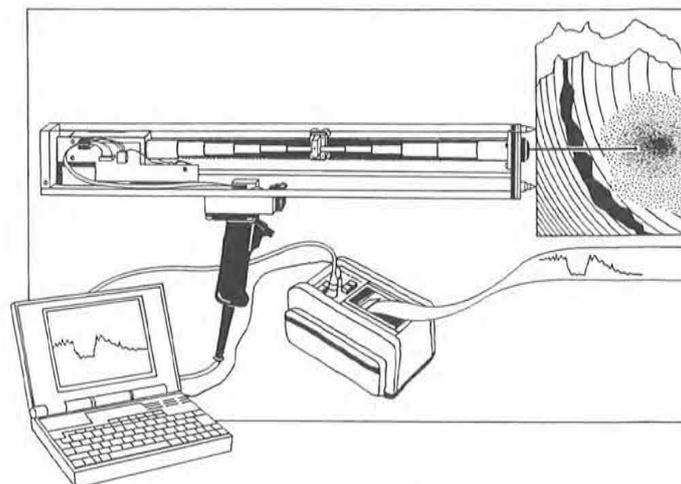


Bild 3: Schemazeichnung eines elektronisch messenden Bohrwiderstandsgerätes mit externem Akkupack.

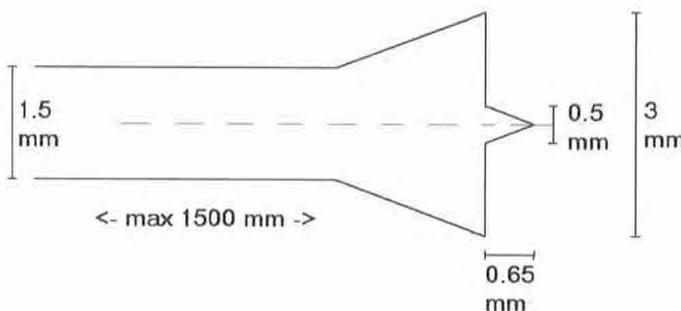


Bild 4: Skizze der Bohrnadel.

eine Idee aus der BAM (Bundesanstalt für Materialprüfung, Prof. Gersonde, Berlin) umzusetzen: mittels dünner Nadeln Löcher in Holzmassen zu stechen, damit die Imprägnierflüssigkeit besser eindringen kann. Diese Methode ist heute nahezu weltweit als Insizing bekannt und findet zum Beispiel bei Fichte Anwendung, weil sich deren Zellen nach dem Tod des Baumes schnell verschließen und Imprägnierflüssigkeiten nur sehr schlecht eindringen lassen.

Der bei der PHB für das Insizingprojekt zuständige Ingenieur Kipp hatte bei entsprechenden Versuchen die Idee, aus dem Eindringwiderstand der meist noch unter einem Millimeter dünnen Nadeln etwas über den inneren Zustand des Holzes auszusagen. Doch auch hieraus wurde zunächst kein Produkt für die Praxis und die Entwicklung schlief ein.

Nachdem zwei seiner Vorgesetzten in Ruhestand gingen (W.F.G. Kamm, S. Voß), meldeten diese folgende Idee 1985 zum Patent an: Messung des Bohrwiderstands dünner Nadeln über die Erfassung des Stromverbrauchs des bohrenden Elektromotors. Vorher hatten sie Versuche mit mechanischer Aufzeichnung durchgeführt: vor dem Elektromotor, der die Bohrnadel drehte, wurde ein Getriebe drehbar aufgehängt (z. B. ein Planeten- oder Differentialgetriebe). Am Getriebe wiederum wurde das Bohrfutter angebracht, in dem die Bohrnadel fixiert wurde. Schob oder fuhr man den Bohrmotor mit der Nadel nach vorne in das Holz, so stieg der Eindringwiderstand in Abhängigkeit von Dichte und Zustand des Holzes. An das drehbar gelagerte Getriebe war einerseits eine Feder gehäusefest angebracht, andererseits ein Schreib-

oder Kratzstift, der sich mit dem Getriebe verdrehte bzw. verschob und so auf seinem Weg nach vorne und zurück eine Bohrwiderstandskurve auf das in die Bohrmaschine eingelegte Papier brachte.

Die mechanische Aufzeichnung erwies sich jedoch als nicht zuverlässig und vor allem nicht genau genug: schwankte der Bohrwiderstand aufgrund der Jahrringe zufällig im Rhythmus der Eigenschwingung der Feder, kam es zu Übersteuerungen aufgrund unvermeidlicher Resonanzeffekte. War der Bohrwiderstand in weichen Hölzern, z. B. Pappel oder Linde oder im Zentrum von Nadelhölzern, nicht hoch genug, so zeigte die Kurve nahezu keinen Ausschlag, weil die Kraft nicht ausreichte, um die Federvorspannung zu überschreiten. Ein weiterer Nachteil der mechanischen Aufzeichnung lag im nicht linearen Ergebnis: ein doppelt so hoher Kurvenwert bedeutete nicht, dass der Bohrwiderstand doppelt so hoch war.

Diese Umstände sind bei federgetriebenen Aufzeichnungsmechanismen nahezu unvermeidlich und führen zu systematischen Fehlern, sodass die beiden vorgenannten Ingenieure auf elektrische bzw. elektronische Aufzeichnung umstellten. Ihr Versuch, die eigene Patentanmeldung aus 1985 zu veräußern, führte letztlich zu meiner Physik-Diplomarbeit an der Universität Heidelberg, die im Institut für Botanik der Universität Hohenheim ausgeführt wurde. Die Fragestellung lautete: kann man mittels Bohrwiderstandsmessungen typische Eigenschaften der Dichte von Jahrringen vermessen. Das Ergebnis der Grundlagensstudie war positiv, zeigte jedoch zugleich auf, welche wissenschaftlichen, entwicklungstechnischen und anwendungsbezogenen Schritte noch notwendig waren, um aus der Idee ein praxistaugliches Produkt machen zu können (Rinn 1988; Rinn 1990). Nachdem erste Prototypen an verschiedenen Universitäten unabhängig voneinander geprüft und ihre Tauglichkeit erwiesen wurde, kam die erste Geräteserie 1992 auf den Markt. Mittlerweile sind mehrere Tausend dieser und ähnlicher Geräte verschiedener Hersteller weltweit im Einsatz, nicht nur an Wald- und Straßenbäumen, sondern auch an Hafenanlagen, archäologischen Proben, Holzmasten, Spielgeräten, sowie verbauten Hölzern.

2. Exkurs: Anwendung der Bohrwiderstandsmessungen

Dass die Ausführung von Bohrwiderstandsmessungen zunächst recht leicht wirkt, darf nicht darüber hinwegtäuschen, dass dabei einerseits nur dann brauchbare und korrekt interpretierbare Messkurven entstehen, wenn an den richtigen Stellen und in die richtige Richtung gebohrt wurde. Andererseits ist die Standzeit der Bohrnadeln abhängig von der Art der Anwendung.

Jeder Kontakt der Nadelspitze mit Stahl, Stein oder Beton kann entweder direkt und sogleich ihr Ende bedeuten, oder aber die Kurven derart verändern, dass keine oder falsche Schlüsse gezogen werden. Da die Bohrnadeln aus einem sehr zähen, aber flexiblen Stahl gefertigt sind, weichen sie im Holz starken Dichtesprüngen, auf die sie schräg auftreffen, aus. Dies kann zu erheblichen Abweichungen von der ursprünglichen, meist geradlinig beabsichtigten Bohrrichtung führen – was oftmals einerseits die mechanische Zerstörung der Nadel und andererseits der Information im Messprofil bedeutet.

Insofern muss sich der Anwender vor jeder Messung genau überlegen, an welcher Stelle und in welchem Winkel das Bohrgerät angesetzt wird – nicht nur an Konstruktionsvollholz, sondern insbesondere auch an Brettschichtträgern, weil dort die inneren Inhomogenitäten von außen kaum einschätzbar sind.

Da seit 1999 Bohrgeräte mit automatischer Vorschubsteuerung verfügbar sind, entfällt seither zumindest die oftmals zusätzlich schwierige Wahl der optimalen Vorschubgeschwindigkeit. Wird in weichen Hölzern zu schnell gebohrt, droht stets ein Nadelabbruch an der Grenze zum oftmals doppelt festen Astholz. Wird zu langsam gebohrt, weisen die Messprofile keine ausreichend starken und eindeutig interpretierbaren Schwankungen auf. Hierzwischen gab es oftmals keinen befriedigenden Kompromiss, zumal ohnehin Kurven aus Messungen mit unterschiedlichen Vorschubgeschwindigkeiten in ihren Ausschlägen nicht direkt miteinander verglichen werden können. Wer also verschiedene Messungen an unterschiedlichen Hölzern miteinander vergleichen möchte, musste bei allen Messungen die gleiche Vorschubstufe wählen. Damit die Bohrnadeln nicht abbrechen, war also stets die im festesten Holz gerade noch mögliche Vorschubgeschwindigkeit zu wählen – was im Voraus meist unmöglich war bzw. ist, weil die inneren Eigenschaften von Bäumen, Vollhölzern und Brettschichtträgern von außen kaum zu beurteilen sind.

3. Exkurs: Auswertung der Bohrwiderstandsmessprofile

Der Bohrwiderstand wird vor allem durch die Holzdicke bestimmt (Rinn 1988; Ehlbeck und Görlacher 1990; Rinn et al 1996), sowohl im Detail als auch im mittleren Profil. Da der Bohrwiderstand hauptsächlich an der Nadelspitze anfällt und diese recht klein ist, spiegelt er vor allem die lokale Holzdicke am jeweiligen Ort der Nadelspitze wieder. Demgemäß ist der Messwert auch den Schwankungen in der Holzstruktur unterworfen. Diese wiederum ergibt sich je nach Holzart aus deren typischen Eigenschaften (Eichen sind im Kern meist deutlich dichter als außen, Nadelhölzer umgekehrt), in Abhängigkeit vom Standort des Baumes, von Wetter, Klima und vielen anderen Einflüssen. Während schnell gewachsene Nadelhölzer meist eine geringere Dichte aufweisen, ist es bei Eichen entgegen landläufiger Ansicht umgekehrt.

Zu den naturgegebenen Variabilitäten in den Materialeigenschaften zwischen den Holzarten, kommen also noch diejenigen zwischen Bäumen gleicher Art jedoch unterschiedlicher Standorte hinzu sowie die Schwankungen innerhalb der Bäume selber.

Konsequenz dieser Vielfältigkeit ist, dass es vielleicht nie gelingen wird, eine vollständig computerisiert-automatisierte Auswertung von Bohrwiderstandsmessungen zu ermöglichen – zumal die Bohrkurven noch von Art und Anwendung der Bohrwiderstandsmessgeräte sowie vom jeweiligen Zustand der Bohrnadel abhängen.

Letztlich ist also der Sachverstand der Anwender gefordert, nicht nur sachgemäß zu bohren, sondern auch die Bohrkurven korrekt auszuwerten.

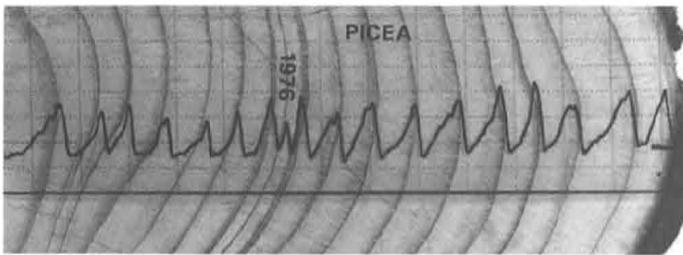


Bild 5: Bohrwiderstandsprofil einer intakten Fichte.

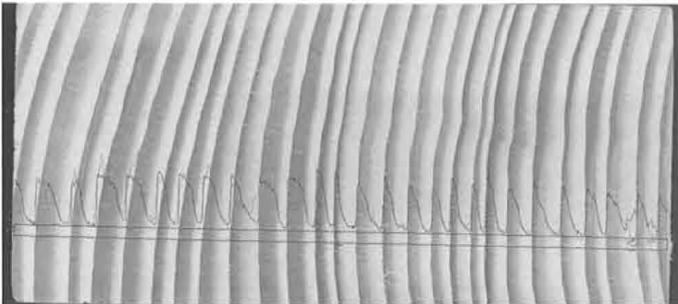


Bild 6: Der Bohrwiderstand ist bei Nadelhölzern dem Grauwert des Holzes ähnlich.

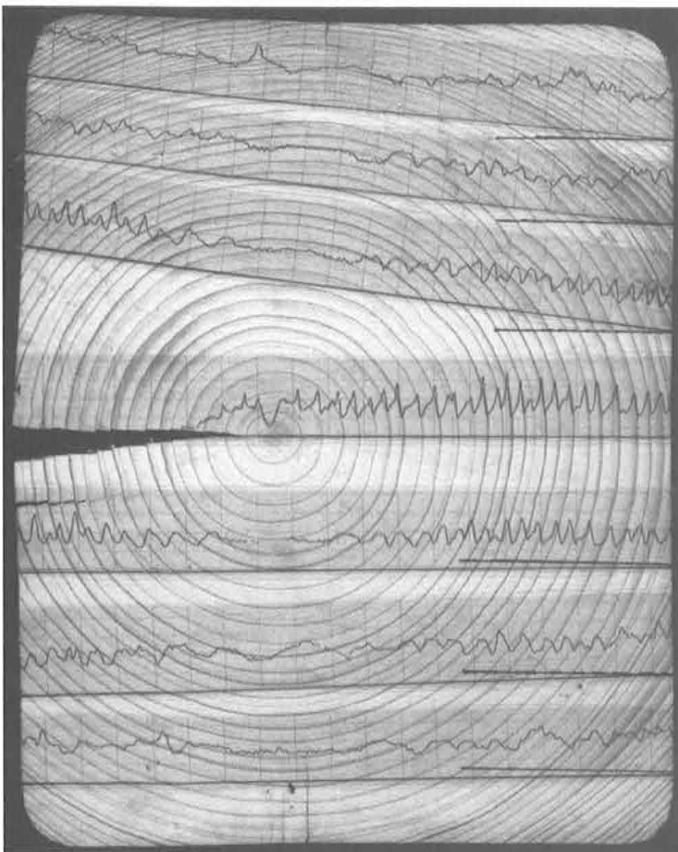


Bild 7: Bohrwiderstandsprofile einer intakten Fichtenbalkenscheibe bei radialer und tangentialer Bohrrichtung zu den Jahrringen.

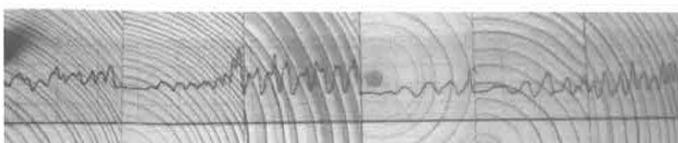


Bild 8: Bohrwiderstandsprofil aus einem intakten Brettschichtholz.

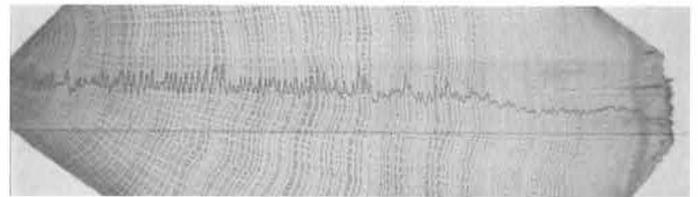


Bild 9: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Eichebalkens.

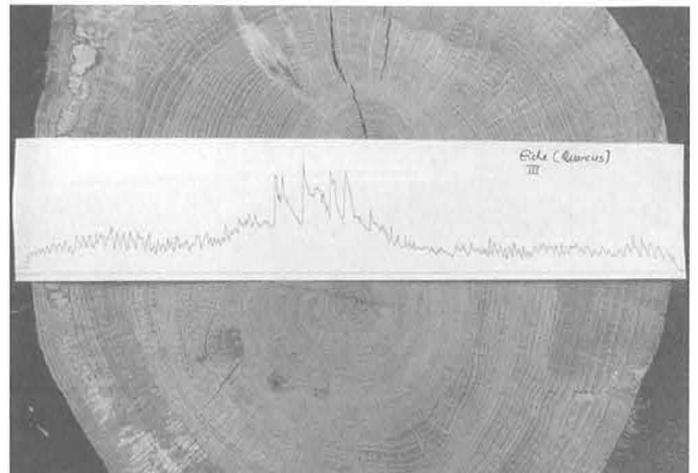


Bild 10: Bohrwiderstandsprofil einer intakten Eichenstammscheibe.

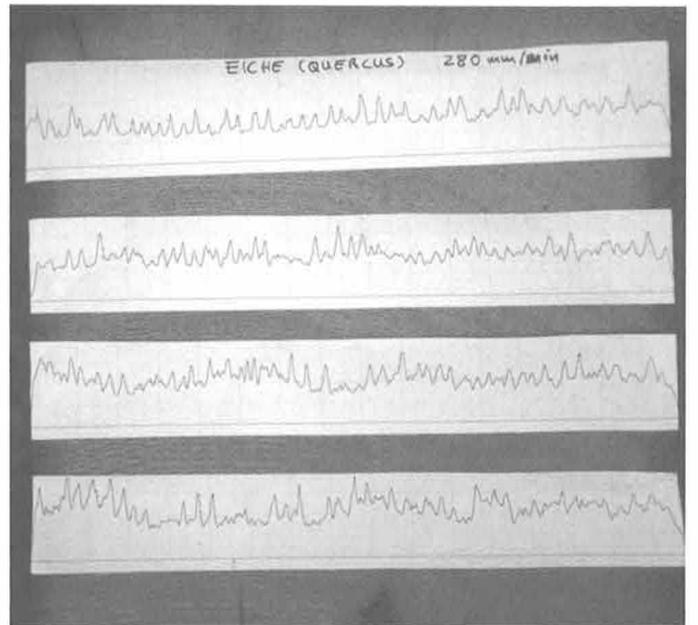


Bild 11: Bohrwiderstandsprofile einer intakten Eichenbalkenscheibe bei tangentialer Bohrrichtung zu den Jahrringen.

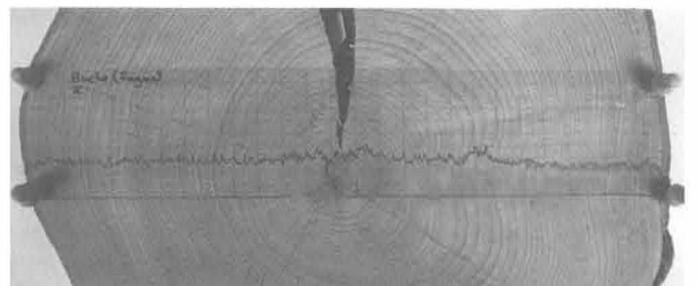


Bild 12: Bohrwiderstandsprofil einer intakten Buchenstammscheibe.

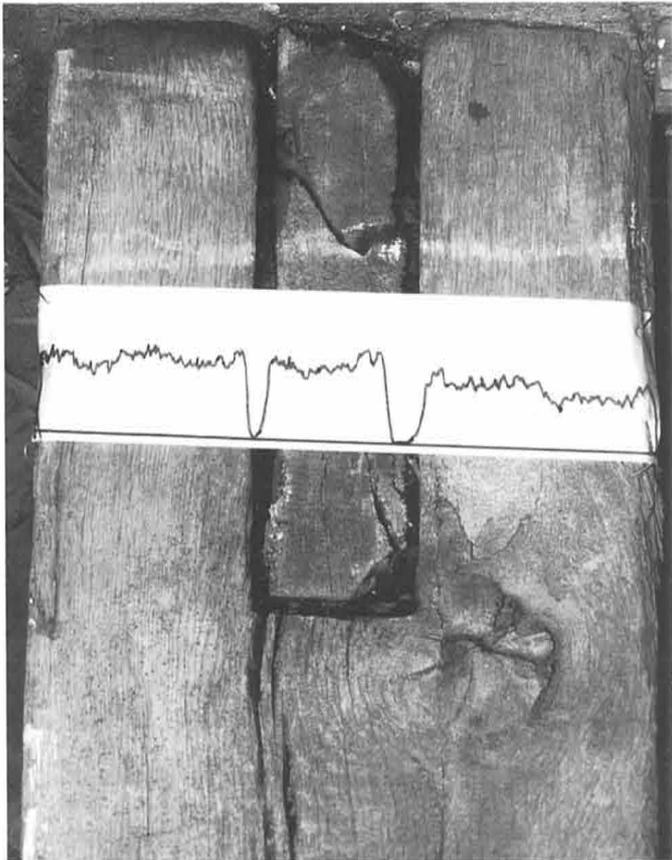


Bild 13: Bohrwiderstandsprofil aus einer intakten Zapfenverbindung (Eiche).

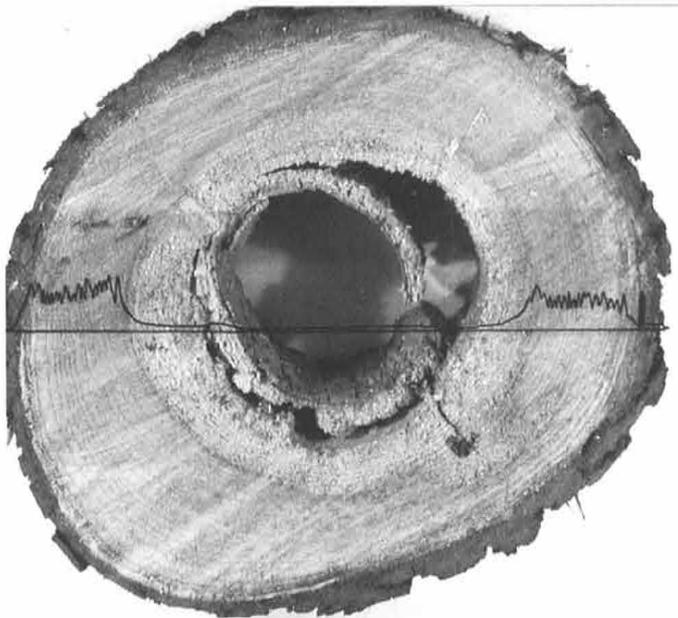


Bild 14: Bohrwiderstandsprofil aus einer kernfaulen Sophora.

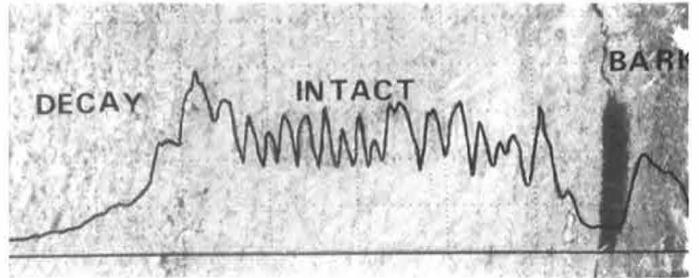


Bild 15: Bohrwiderstandsprofil (Sophora) mit Übergang intakt-geschädigt.

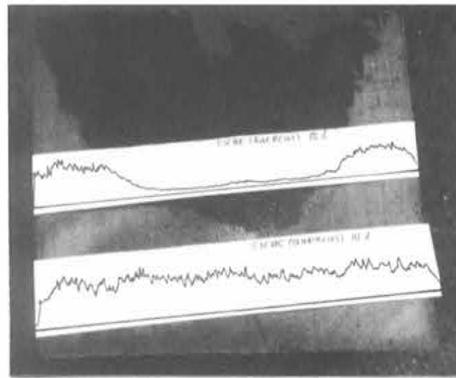


Bild 16: Bohrwiderstandsprofil eines eingefaulten Eichen-Sparrens.

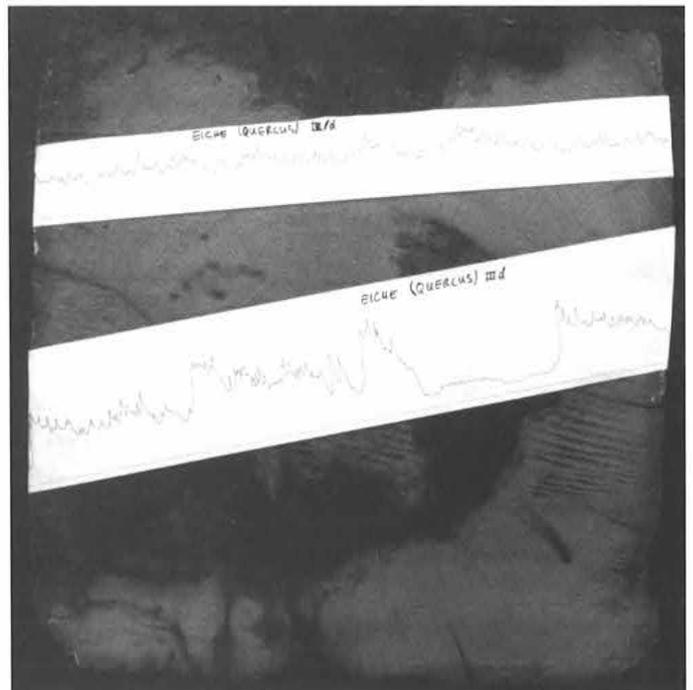


Bild 17: Bohrwiderstandsprofil eines kernfaulen Eichen-Deckenbalkens.

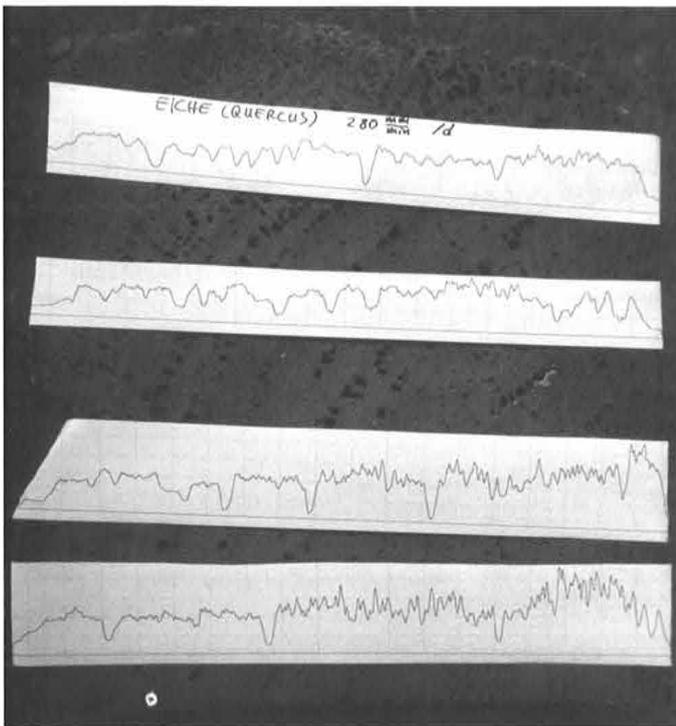


Bild 18: Bohrwiderstandsprofil eines Eichen-Deckenbalkens mit starken Fraßschäden

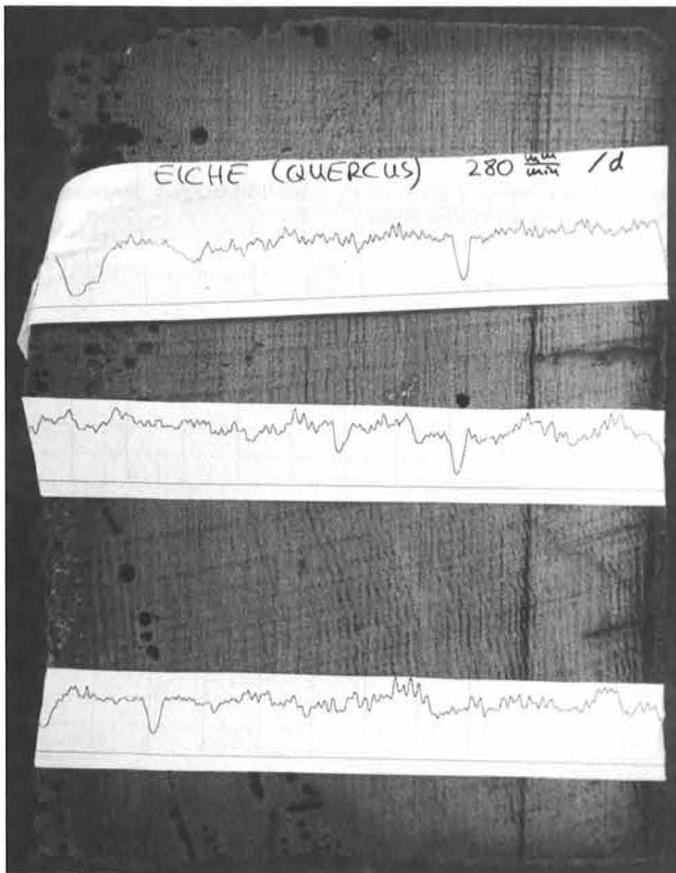


Bild 19: Bohrwiderstandsprofil eines Eichen-Deckenbalkens mit leichten Fraßschäden.

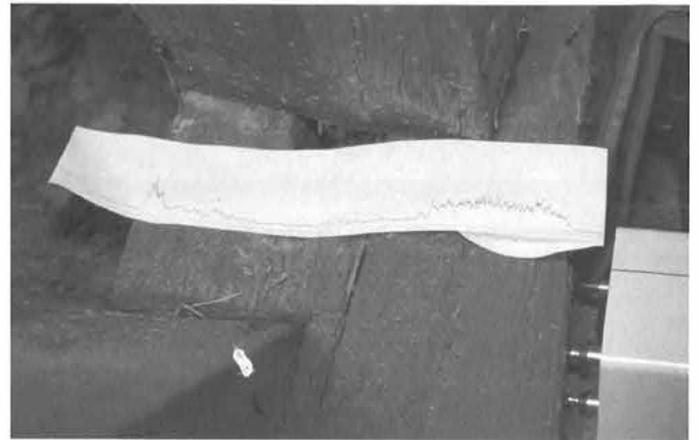


Bild 20: Bohrwiderstandsprofil eines am Zapfloch kernfaulen Eichen-Deckenbalkens.



Bild 21: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Fichtenbalkens.

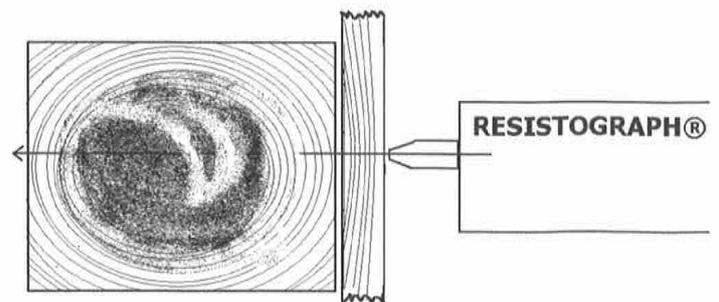
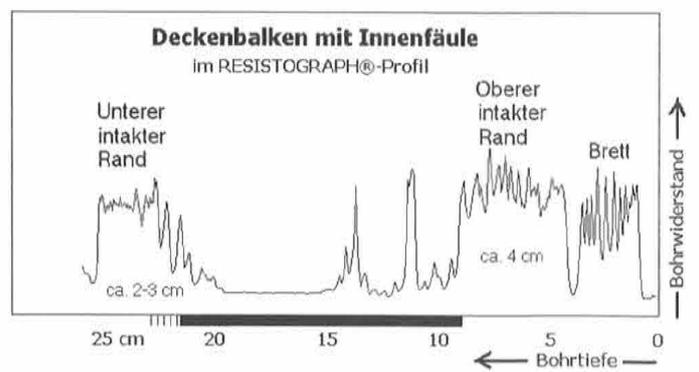


Bild 22: Bohrwiderstandsprofil eines nicht sichtbaren, kernfaulen Eichen-Deckenbalkens unter Bodenbelag.

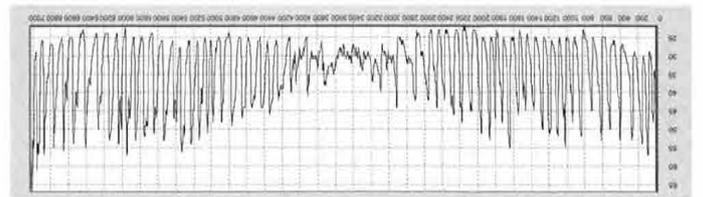


Bild 23: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Fichtenbalkens mit typischem Alters- und Dichte-Trend.

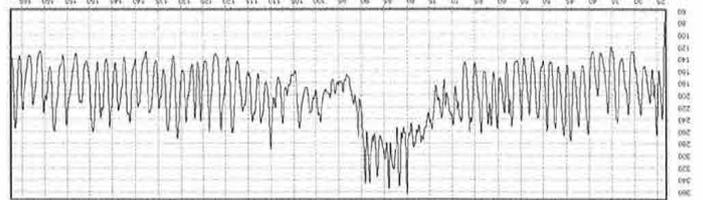


Bild 24: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Fichtenbalkens mit Ast im Kernbereich.

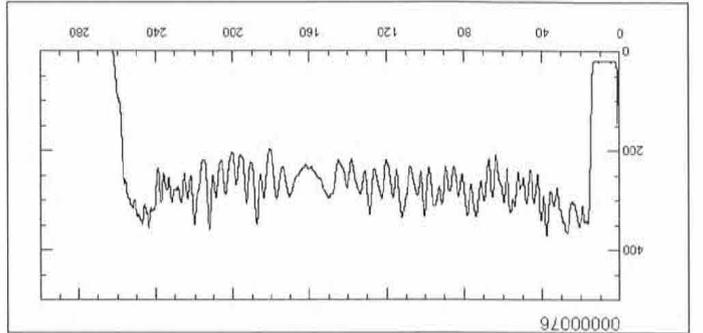


Bild 25: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Fichtenbalkens mit nicht-mittigem Kernbereich.

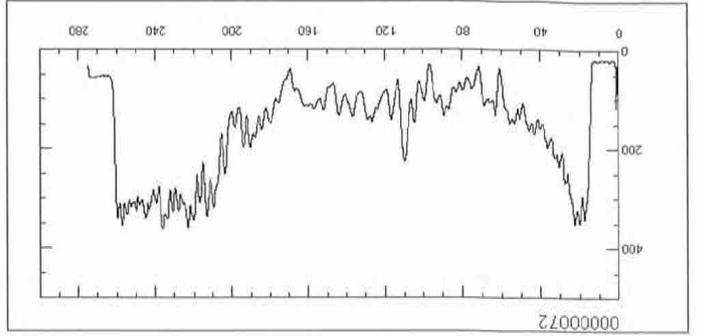


Bild 26: Bohrwiderstandsprofil eines kernfaulen Fichtenbalkens.

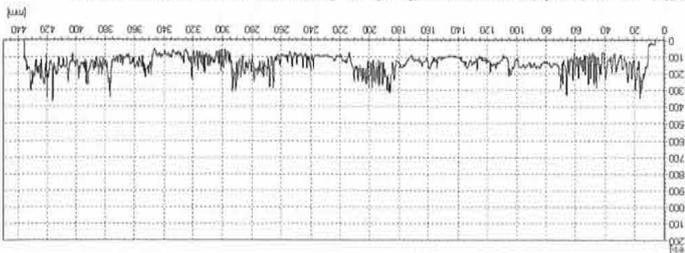


Bild 27: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Brettschichtträgers (Nadelholz).

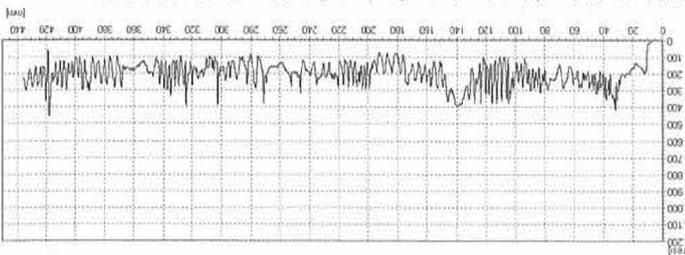


Bild 28: Bohrwiderstandsprofil eines intakten Brettschichtträgers (Nadelholz) mit ähnlicher Jahringorientierung.

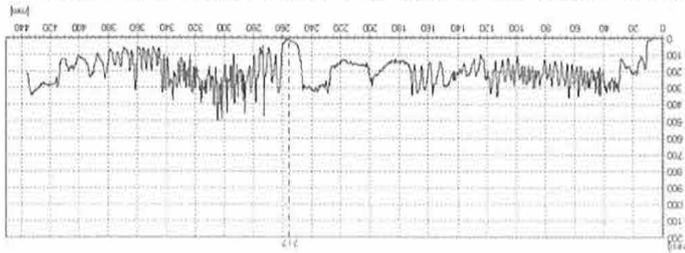


Bild 29: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit senkrecht durchbohrter Fuge.

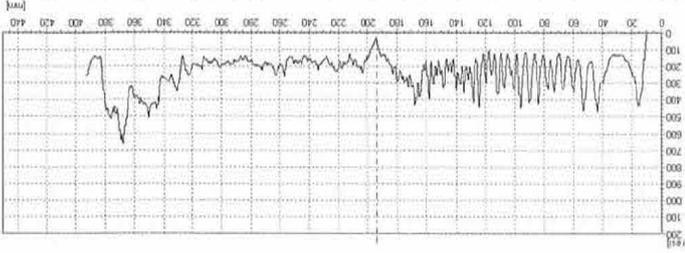


Bild 30: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit schräg durchbohrter oder ausgefallener Fuge.

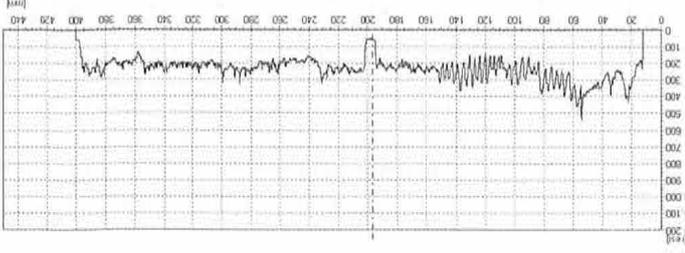


Bild 31: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit Fuge.

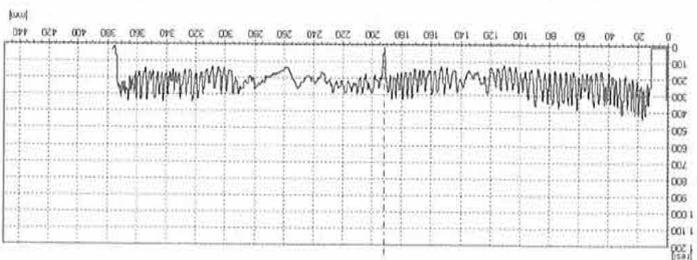


Bild 32: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit dünner Fuge.

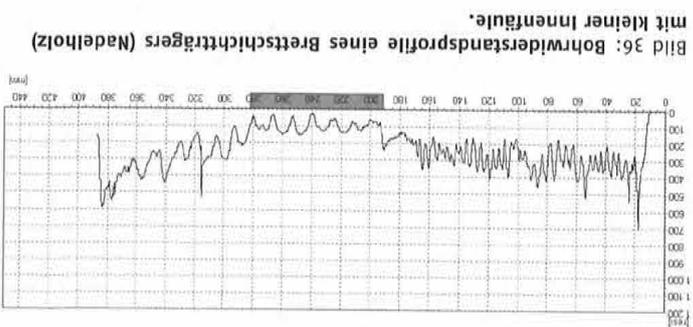


Bild 36: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit kleiner Innentäule.

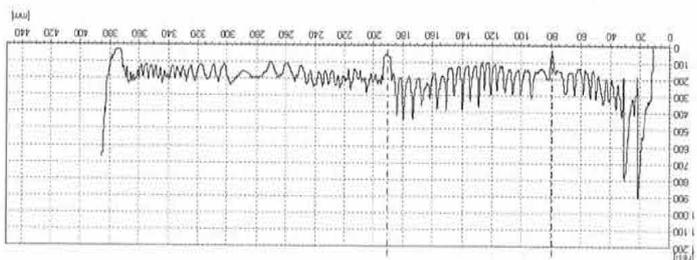


Bild 33: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit zwei Fugen.

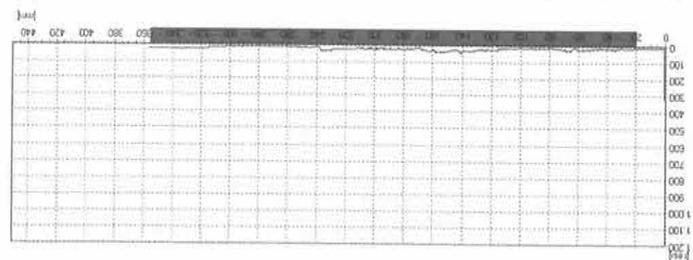


Bild 37: Bohrwiderstandsprofil eines vollständig verfaulten Brettschichtträgers.

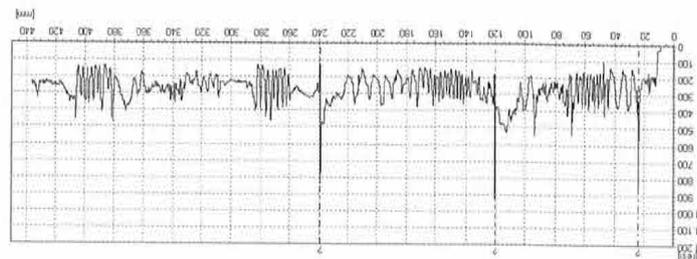


Bild 34: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit harten Leimfugen (ggf. durch Reparatur-Injektion).

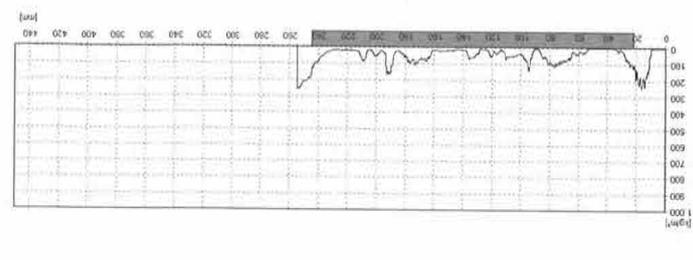


Bild 38: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit starker Innentäule.

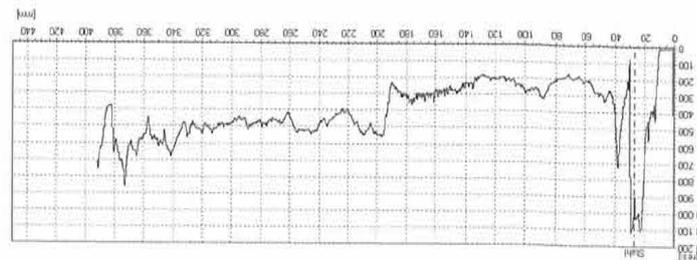


Bild 35: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit Nadelshaden und Kurvendeformation.

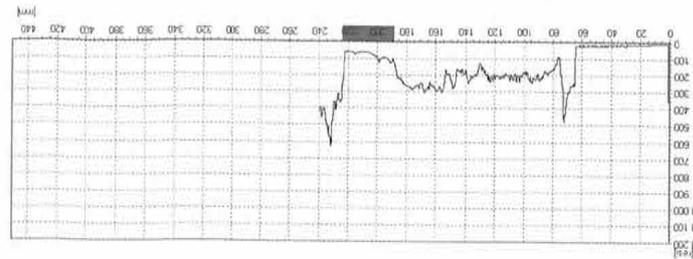


Bild 39: Bohrwiderstandsprofil eines Brettschichtträgers (Nadelholz) mit kleiner Innentäule.

Eine zu den Jahringen tangentielle Bohrung in Eiche kann genau so aussehen, wie eine radiale Bohrung in Fichte. Zu einem Bohrprofil gehört also immer die Angabe, welches Holz an welcher Stelle und in welche Richtung angebohrt wurde. An einer Kurve alleine ist eine nachgeordnete Interpretation grundsätzlich unmöglich – denn jede Kurve kann auf unterschiedlichen Wegen entstehen.

4. Exkurs: Bohrwiderstandsmessungen an verdeckten Hölzern

Oftmals sind zu untersuchende Hölzer nicht nur nicht zugänglich, sondern auch nicht sichtbar. Während die Bohrnadel noch meist problemlos durch Parkett und Dielen, gelegentlich auch durch Stuck hindurchläuft, müssen in Stahl, Stahlbeton und anderen Materialien ausreichend große Löcher (typischerweise 4 bis 5mm Durchmesser) vorgebohrt werden. Dann wird mit der Nadel durch das „Vorloch“ in das dahinterliegende Holz gebohrt.

Wenn Ansatzpunkt und Bohrrichtung zur Holzoberfläche und zu den Jahringen nicht bekannt sind, gestaltet sich sowohl das Bohren selber, wie auch die Auswertung der Messprofile schwieriger. Daher sind an verdeckten Hölzern in der Regel mehr Messungen als sonst auszuführen, um eine ausreichend verlässliche Interpretation zu gewährleisten.

An einem Brettschichtträgerfuß im Stahlschuh oder an einem Deckenbalkenkopf unter Parkett können dann schon 10 Bohrungen zusammenkommen. Eine vergleichende Zusammenstellung der Informationen aus den unterschiedlichen Profilen erlaubt meist eine zuverlässige Interpretation und Beurteilung.

Schall-Laufzeitmessungen

Seit ca. 1960 werden Laufzeitmessungen von Schallimpulsen zur Untersuchung von Holz eingesetzt. Intaktes Holz leitet den Schall schneller, als geschädigtes, festes Holz schneller als weiches. Liegt ein Hindernis (Fäule, Riss, Höhlung, Ast) zwischen Sender und Empfänger des Impulses, muss die Welle langsam hindurch oder einen Umweg machen. Bei stehenden Bäumen können daher aus tomographischen Schall-Laufzeitmessungen z. B. Aussagen über den inneren Zustand und die Stabilität abgeleitet werden (Rinn 2003, 2004).

Verbautes Holz weist oft mehrere Risse im Querschnitt auf, die eine Schalltomographie zur Zustandsfeststellung bislang fast unmöglich machen – zumal das Holz dafür nahezu rundum erreichbar sein müsste, was bei Tragwerkskonstruktionen oft nicht möglich ist. Daher hat sich die Anwendung der Laufzeitmessung zur Schadensfeststellung an üblichen Tragwerken mit Konstruktionsvollholz bislang als kaum praktikabel erwiesen.

Eine Anwendung dieser Technik hat sich jedoch bereits in der Praxis bewährt, zwei weitere befinden sich gerade in Erprobung und zeigen bislang vielversprechende Ergebnisse.

Die Schallgeschwindigkeit (v) in Holz in Längsrichtung kann in erster Näherung aus E-Modul (E) und Rohdichte (D) errechnet werden: $v^2 = E/D$. Mittels Erschütterungsaufnehmern wird nun die Lauf-



Bild 40: Ausführung einer Bohrwiderstandsmessung an einem Deckenbalkenkopf.



Bild 41: Die Dokumentation der Ergebnisse und Bewertungen erfolgt idealerweise sogleich vor Ort.

zeit von einfachen Stoßimpulsen (= Körperschallwellen) zwischen Schlag- und Empfangs-Sensor gemessen, die an den betreffenden Hölzern angebracht werden.

Über eine Kalibration der Bohrwiderstandsmessungen kann die Dichte der Hölzer bestimmt werden (Rinn 1988; Rinn et. al. 1996; G. Chantre P. Rozenberg 1997; Fikret Isik and Bailian Li 2003). Aus den beiden gemessenen Größen (Dichte und Schallgeschwindigkeit) lassen sich somit E-Modul-Werte errechnen:

$$E = D \cdot v^2$$

Zu beachten ist hierbei, dass für statistische Sicherheit gesorgt sein muss. Pro Balken sollten ausreichende viele Messungen erfolgen, sodass die Fehlerstreuung minimiert werden kann. Da eine Bohrwiderstandsmessung meist weniger als eine Minute dauert, ist dies in der Praxis meist kein Problem.

Die E-Modul-Werte an sich sind zwar ein wichtiger Hinweis auf die Belastbarkeit der betreffenden Hölzer, jedoch noch keine eindeutige Aussage über die Biegebruchfestigkeit. Eine (relative) Klassifizierung

der E-Moduli verschiedener Hölzer einer Konstruktion liefern zwar oft wichtige Grundlagen zur statischen Beurteilung. Hierzu müssen jedoch noch andere Eigenschaften berücksichtigt werden, u. a. die Ästigkeit und eventuelle Faserabweichungen. Diese Inhomogenitäten reduzieren die Biegebruchfestigkeit mitunter deutlich, auch bei hohem E-Modul.

Vorsichtige Interpretation

Schall-Laufzeitwerte in Holz sind oft nicht direkt in Geschwindigkeiten umzurechnen, weil der konkrete Pfad der Impulse nicht bekannt ist. Insofern handelt es sich um fiktive Geschwindigkeitswerte, wenn naheliegenderweise der direkte Abstand zwischen den Sensoren verwendet wird. Bei Eiche-Vollhölzern läuft die als erstes am Empfangsensor ankommende Welle tendenziell eher durch den Kern, bei Nadelhölzern durch Randschichten und bei Brettschichtträgern durch die „schnellsten“ Lamellen.

Einige Besonderheiten von Brettschichtträgern

Bei Brettschichtträgern bilden Delaminationen der Lamellen ein potentiell Problem. Sie aufzufinden, ist eine technische Herausforderung.

Die Feststellbarkeit einer konkreten Delamination mittels Bohrwiderstandsmessungen ist im wesentlichen abhängig von einerseits ihrer Lage, Größe und Ausrichtung sowie andererseits von der Häufigkeit und Präzision der ausgeführten Bohrungen. Ein großer Vorteil der Nadel-Bohrwiderstandsmessungen im Vergleich zur Bohrkernentnahme, der vielfach kleinere Bohrlochdurchmesser, ist zugleich ein Nachteil: die aus den Messprofilen zu ziehenden Schlüsse gelten zunächst nur für den Bereich der einzelnen Messung. Inwieweit hieraus auf Nachbarabschnitte des Holzes gefolgert werden kann, ist in jedem Einzelfall fachkundig zu prüfen und zu beurteilen. Da eine einzelne Messung meist weniger als eine Minute Zeit in Anspruch nimmt, ist zu empfehlen, möglichst viele Messungen auszuführen, um eine räumlich statistisch ausreichende Aussagekraft zu erreichen.

Grundsätzlich ist zu beachten, dass eine nicht eindeutig interpretierbare Bohrwiderstandsmessung mit zumindest potentiellen Hinweisen auf inneren Schäden zumindest solange durch Messungen in der Nachbarschaft ergänzt werden sollten, bis der Befund eindeutig geklärt ist.

Schall-Laufzeitmessungen wurden jahrzehntelang mittels eines Hammers und eines Sensor ausgeführt, u. a. zur Sortierung von Holzmasten. Mittlerweile gibt es Geräte auf dem Markt, die zur Vor-Sortierung von stehenden Bäumen im Forst angewendet werden. Aus Zweipunktmessungen sind jedoch in der Regel keine präzisen Aussagen über den inneren Zustand abzuleiten (Sandoz 2006). Seit 1999 gibt es jedoch sogenannte Schalltomographen, bei denen eine technisch nahezu unbegrenzte Anzahl an Sensoren in einer elektronischen Kette aneinandergereiht werden (Rinn 1999). Sie können dann frei am Baum, am Holzbalken oder Brettschichtträger montiert werden. Die räumliche Auflösung hängt vor allem von der Anzahl und geometrischen Anordnung der Sensoren ab. Hiermit ist es bereits gelungen, nicht nur Fehlstellen in Bäumen und Hölzern zu finden, sondern auch Inhomogenitäten, Risse

und andere Defekte in Beton- und Stahlbetonstützen. Ebenso scheinen Delaminationen feststellbar.

Entscheidend bei der Interpretation der Schalltomogramme ist, dass dort nicht der Holzzustand, sondern der mechanische Zusammenhalt veranschaulicht wird. Ist ein innerer Bereich beispielsweise durch Risse vom äußeren Rand des untersuchten Holzes abgeschirmt, so erscheint er rot, unabhängig von seinem wirklichen inneren Zustand (Rinn 2004). Dieser zunächst unangenehm erscheinende Umstand ist für die Beurteilung der Tragfähigkeit jedoch eher ein Vorteil, denn Querschnittbereiche, die mit den äußeren, bei Biegung beispielsweise am stärksten belasteten Bereichen mechanisch nicht verbunden sind, tragen dort auch nicht zur Tragfähigkeit bei. Auch wenn es sich dabei noch nicht um eine quantitative Methode handelt, so sind doch qualitative Rückschlüsse auf den untersuchten Querschnitt möglich.

Über neuere Anwendungen von Ultraschallsensoren wurde berichtet, dass die Messung des Energieverlustes der in das Holz eingetragenen Schallwellen Rückschlüsse auf den Querschnittzustand, das Ausmaß von Schäden und die Tragfähigkeit zulassen könnten (Sandoz 2006).

Optimierte Darstellung: Farbe statt Text

Entscheidend ist nicht allein die wissenschaftlich exakte Vermessung des Holzzustandes, der Dichte oder anderen Materialeigenschaften mit technischen Methoden. Ziel einer Bestandserfassung muss es sein, letztlich eine einfache, verständliche, präzise und verlässliche Arbeitsgrundlage für die nachfolgenden Arbeiten im Rahmen der Instandsetzung zu erstellen.

Hierzu wurde in langjähriger Kooperation mit Handwerkern, Ingenieuren, Architekten und Denkmalpflegern ein Konzept erarbeitet, welches sich in den vergangenen Jahren vielfach bewährt hat: alle relevanten Ergebnisse werden in kleinen und übersichtlichen, dennoch ausreichend detaillierten Bestandsplänen zeichnerisch und symbolhaft dargestellt.

Die Informationen, die sonst oft in hundertseitigen Gutachten auf Dutzenden Plänen und in langen Schadenslisten enthalten waren, werden auf wenige, kleine, farbige Zeichnungen komprimiert. Es kommen sogar noch zusätzliche Informationen hinein (intakte Bereiche, verdeckte Schäden). Eine farbige Zustandskartierung zeigt nicht nur dem Fachmann die wichtigsten Ergebnisse auf den ersten Blick: drei Grundfarben kennzeichnen den Holzzustand: gelb = intakt, orange = leicht geschädigt, violett = stark geschädigt. Zusätzliche Symbole beschreiben je nach Bedarf weitere wichtige Aspekte, die z. B. für die statische Bewertung berücksichtigt werden müssen (z. B. die Kraftschlüssigkeit von Holzverbindungen). Auf diesem Wege gelang es, auch große Konstruktionen in relativ kleinen und handlichen Plänen auf DIN A3 und DIN A4 darzustellen. Diese Pläne enthalten alle wesentlichen Informationen, die Ingenieure, Architekten, Denkmalpfleger und Handwerker für Planung, Ausschreibung und Ausführung der Holzsanierung benötigen.

Die Erfahrung aus der praktischen Anwendung zeigt: in den komprimierten Bestandsplänen geht nichts verloren. Vielmehr wird etwas

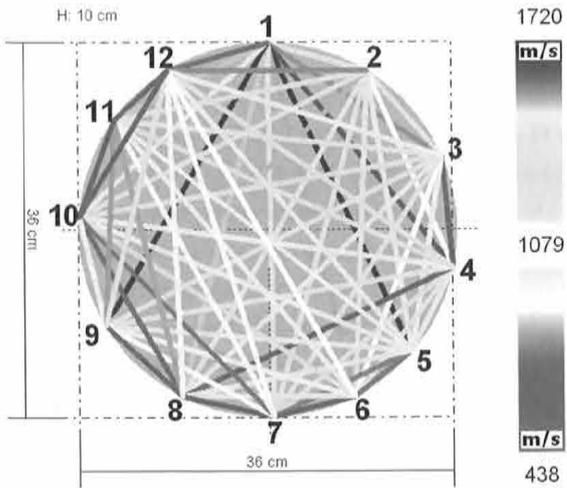


Bild 42: Linientomogramm zur Untersuchung des historischen Säulenfußes mit Schalltomographie.

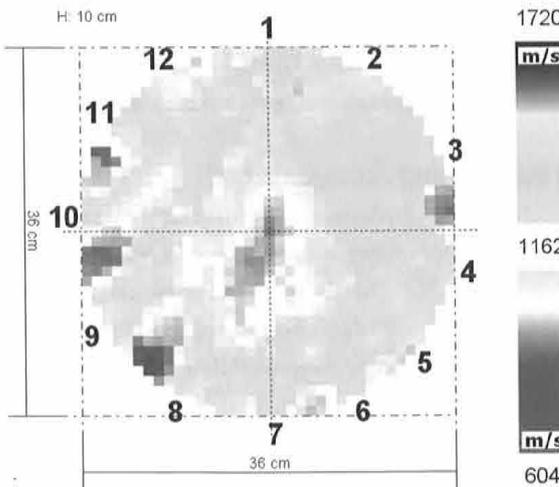


Bild 43: Flächentomogramm zur Untersuchung des historischen Säulenfußes mit Schalltomographie.

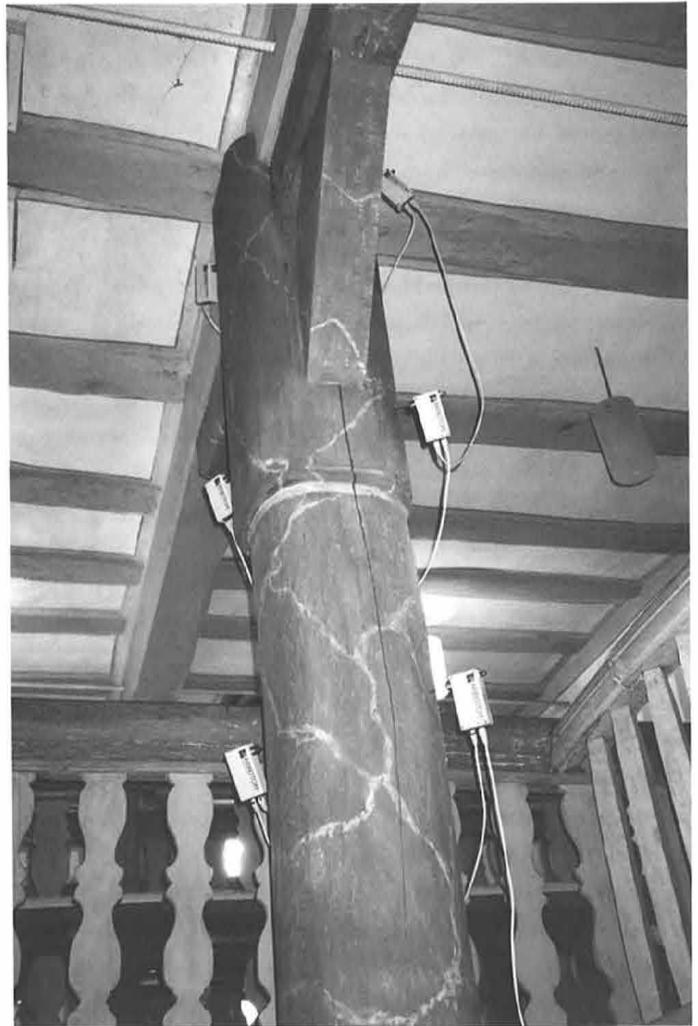


Bild 45: Sensoren an der Säule zur Messung der Schallgeschwindigkeit in Faser-Längsrichtung.

Ev. Kirche Launsbach, Mai 2004

Schall-Laufzeitmessung in Quer- und Längsrichtung an der Säule

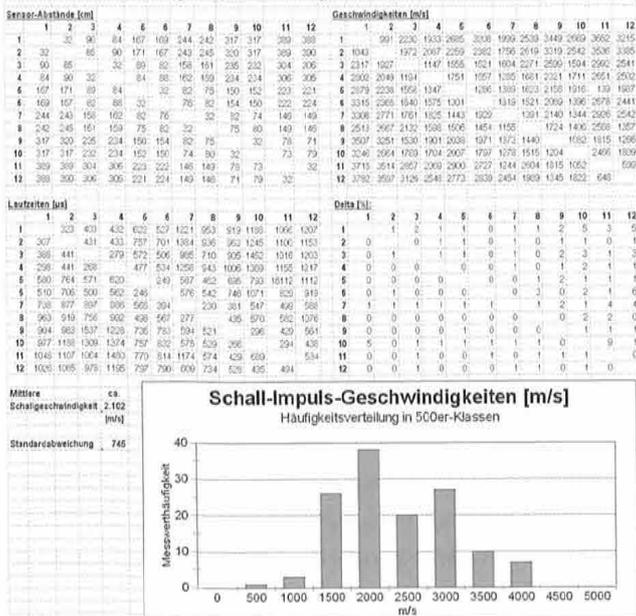


Bild 44: Wertetabelle zur Untersuchung des historischen Säulenfußes mit Schalltomographie.



Bild 46: Sensoren an einem Unterzug zur Messung der Schallgeschwindigkeit in Faser-Längsrichtung.

ganz Entscheidendes sogar noch dazu gewonnen: Überblick und Gesamtverständnis für Zusammenhänge. Oftmals werden ursächliche Schadens-Zusammenhänge erst in der übersichtlichen Darstellung gesamter Konstruktionsabschnitte sichtbar.

Legende

Das Ziel der Entwicklung eines Konzepts zur Zustandskartierung war: die Pläne sollten so klein wie möglich sein, so einfach wie möglich und dennoch ausreichend detailliert, vollständig und übersichtlich. Dies klingt wie die Quadratur des Kreises, gelang aber doch: im Prinzip gibt es vier unterschiedliche Zustände des Holzes, die farblich unterschiedlich dargestellt werden:

Ohne Farbe = nicht untersucht / keine Aussage über den Zustand des betreffenden Holzes. Warum Hölzer im konkreten Fall nicht untersucht wurden, kann viele Gründe haben. Mangels Einsicht auf der Auftraggeberseite kommt es durchaus immer wieder zur Beauftragung von Teilbereichen oder von Stichproben. Es gibt auch immer wieder nicht zugängliche Bereiche von Konstruktionen. Sofern der dortige Verlauf der Konstruktion nicht bekannt ist, sollten die vermuteten Achsen allerdings ohnehin nur gestrichelt eingetragen werden.

Gelb = untersucht und keine nennenswerten Schäden gefunden. In manchen Fällen wurden gelbe Abschnitte in Absprache mit den Auftraggebern mit orangen oder roten Punkten versehen, um oberflächliche Schäden zu kennzeichnen, die z. B. später abzubeilen sind.

Orange = leichte Schäden (z. B. Querschnittminderung < 30 %), oft reparabel. Ob gewisse Hölzer oranger Einstufung repariert werden oder nicht, kann im Einzelfall von vielen Faktoren abhängen und sich daher deutlich unterscheiden. Hier ist auch der statische Gesamtzusammenhang zu beachten.

Violett (oder dunkles Rot) = starke Schädigung (z. B. Querschnittminderung über 30 % oder Innenfäule). Diese Hölzer oder Holzabschnitte werden bis auf Ausnahmefälle meist ausgewechselt.

Wo die Grenze zwischen Orange und Violett für das konkrete Projekt gezogen wird, hängt u. a. mit den Schadensursachen (Pilze/Insekten) und statischen Anforderungen zusammen. Dies wird vor der Untersuchung mit den beteiligten Ingenieuren abgestimmt. Farbige Symbole kennzeichnen weitere wichtige Aspekte, u. a. nicht form- und kraftschlüssige Holzverbindungen, Holzfeuchte oder Drehwuchs. Mit Wasser zusammenhängende Aspekte werden naheliegenderweise mit blauen Tropfen oder anderen Symbolen gekennzeichnet.

Erfahrungsgemäß werden die jahrzehntelang üblichen Textverweise in schwarz-weißen Schadenskartierungen (z. B. „siehe 17.3“ = Verweis auf eine Schadensliste, Abschnitt 17, Absatz 3) in der Praxis am Bau oft nicht verfolgt – nicht nur, weil es aufwändig ist, alle Einträge zu recherchieren, sondern auch, weil die Kennziffern im Plan schnell übersehen werden. Daher schien es uns zielführender, möglichst alle notwendige Information direkt in den Plan zu integrieren und die textlichen Anmerkungen auf ein Minimum zu reduzieren. Eine Kennzeichnung sowie Unterscheidung von Pilz- und Insektenschäden ist sinnvoll, darf aber den Plan nicht überfrachten. Entscheidend ist auch hier zunächst

der Zusammenhang und dann die zu ziehende Schlussfolgerung. Insofern kommt es auch auf die Angabe der Holzfeuchte an sowie auf die Frage, ob der Befall noch lebend ist oder nicht. Dass der Befall mit dem Hausschwamm auf jeden Fall einer besonderen Kennzeichnung bedarf, ergibt sich schon aus den verschiedenen gesetzlichen und normativen Regelungen.

Auch in der Legende eines solchen Bestandsplans wird versucht, alle wichtigen Informationen zeichnerisch, symbolhaft und leicht erkennbar darzustellen. Dass dies weitgehend möglich ist, sieht man u. a. daran, dass die entsprechenden Bauzustandsberichte bzw. Gutachten oft nur noch eine oder wenige Seiten Text enthalten. Meist reicht der Blick auf den (kleinen und handlichen) Bestandsplan aus, um die statische Bewertung und architektonische Planung zu erstellen sowie die Ausführungsarbeiten vorzubereiten, auszuführen und zu überprüfen.

Die farbige Zustandskartierung hängt dabei nicht von der Genauigkeit des Plans ab. Die Konstruktionspläne müssen nicht verformungsgerecht sein. Dies ist wahrscheinlich nur in besonderen Einzelfällen notwendig. Für die Zustandskartierung an sich reichen in der Regel schon einfache Handskizzen aus. Letztlich müssen die am Projekt beteiligten Fachleute gemeinsam beschließen, auf welcher Genauigkeitsstufe die Pläne zu erstellen sind. Entscheidend für die Dokumentierbarkeit der Untersuchungsergebnisse ist, dass alle zu prüfenden Hölzer im Plan eingezeichnet sind; erfolgt dies maßstäblich, fallen die weiterführenden Arbeiten leichter.

Vom Schaden zum Zustand

Früher wurden die Ergebnisse von Voruntersuchungen häufig mittels einer Kombination von Plänen und Texten dokumentiert: in großformatigen Plänen z. B. mittels Schraffuren und Textverweisen auf Schadenslisten. Über die Bereiche ohne Schraffuren war damit nichts ausgesagt. So fragten sich Ingenieure und Zimmerleute: ist das Holz dort intakt oder etwa gar nicht untersucht? Die Unsicherheit über solche, nicht bewerteten Konstruktionsbereiche führte bereits an vielen Bauwerken zu vorsorglichen statischen Reparatur- und Verstärkungsmaßnahmen, die eigentlich nicht erforderlich waren.

In der „Zustands“-Kartierung dagegen werden alle untersuchten Bereiche bewertet und farblich angelegt – auch die Abschnitte und Holzverbindungen, in denen keine Schäden aufgefunden wurden. Nicht untersuchte Bereiche dagegen bleiben „weiße“ Flecken: die Zustandskartierung belegt also auch, auf welche Bereiche „man sich verlassen kann“.

Es handelt sich also um eine Zustandskartierung, die streng von einer Schadenskartierung zu unterscheiden ist.

Ampelfarben?

Im Prinzip könnte man bei farbigen Zustandsplänen auch eine Ampel-Kodierung verwenden: grün für intakt, gelb für leicht geschädigt und rot für stark geschädigt. Aber, diese in vielen Bereichen sinnvolle Einteilung hat in unserem konkreten Fall Nachteile, von denen hier einige beispielhaft erwähnt werden sollen:

INGENIEURBÜRO DIPL.-PHYS. FRANK RINN, HEIDELBERG

**LEGENDE ZUM BESTANDSPLAN MIT FARBIGER ZUSTANDSKARTIERUNG
- INGENIEURTECHNISCHE BAUWERKSUNTERSUCHUNG -**

LAGE UND ORIENTIERUNG: RESISTOGRAPH®-, FEUCHTE UND IMPULS-MESSUNGEN, FOTOS

24 NUMMER DER RESISTOGRAPH®-MESSUNG (MIKRO-BOHRUNG)
12 FOTONUMMER
18% (MATERIAL-) FEUCHTE [%]
2900 MECH. IMPULS-LAUFEITMESSUNG [M/S]

ZUSTANDSDARSTELLUNG:

	NICHT UNTERSUCHTER BEREICH
	'FERN-DIAGNOSTISCH' OHNE BEFUND
	VERFORMUNG / QUETSCHUNG
	KERNFÄULE / RANDSCHADEN
	BRUCH, RISS
	FASERABWEICHUNG (KRUMMSCHAFTIGKEIT, DREHWUCHS)
	UNSACHGEMÄSSE REPARATUR
	OBERFLÄCHENSCHADEN (BIS 1 CM)
	QUERSCHNITT-VERLUST < ~ 30%
	QUERSCHNITT-VERLUST > ~ 30%
	HOHE ÄSTIGKEIT

KONSTRUKTIVE UND ZEICHNERISCHE ASPEKTE / SYMBOLE:

	VERMUTETER KONSTR.-VERLAUF		FEHLKANTIGKEIT [%]
	NICHT KRAFTSCHLÜSSIG		NICHT FORMSCHLÜSSIG / KLAFFUNG
	GESCHÄDIGTER HOLZNAGEL		EISERNE VERBINDUNGSMITTEL

E NH HOLZART: EICHE (E), NADELHOLZ (NH), BRETTSCHICHTHOLZ (BS)

NICHT FARBIG ANGELEGTE HÖLZER WAREN WÄHREND DER UNTERSUCHUNG NICHT VORHANDEN, NICHT ZUGÄNGLICH ODER SOLLTEN NICHT UNTERSUCHT WERDEN. IN FARBIG ANGELEGTEN, ALSO BEWERTETEN BEREICHEN OHNE ENTSPRECHENDE MESSUNGEN BASIERT DIE BEWERTUNG JE NACH ERREICHBARKEIT AUF HERKÖMMLICHEN UNTERSUCHUNGSMETHODEN (VISUELLE PRÜFUNG, KLOPFPROBE) - OHNE MESSTECHNISCH ABGESICHERTE AUSSAGE ÜBER DEN INNEREN ZUSTAND.

26.05.2003

Bild 47: Typische Legende zum Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung.

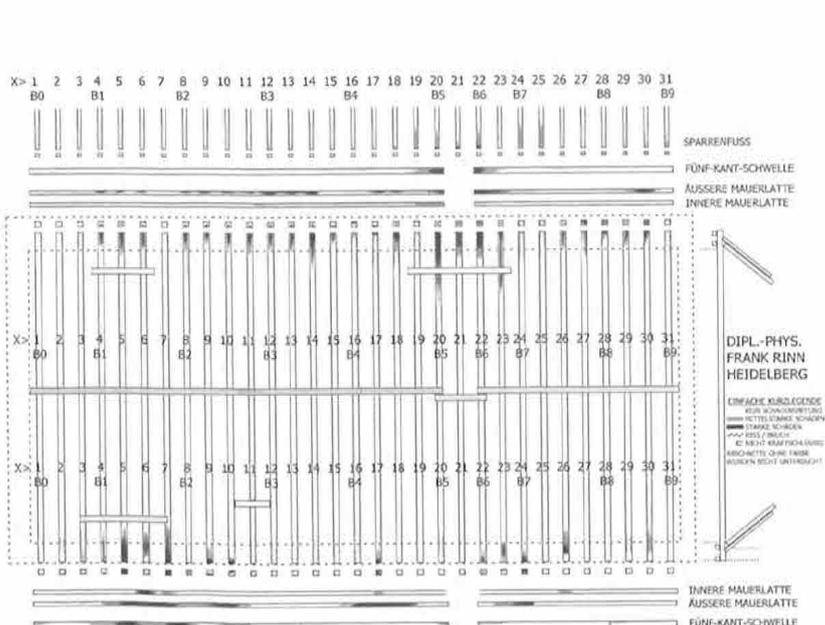


Bild 48: Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung eines Dachwerks (Deckenbalken, Schwellen, Sparrenfüße).

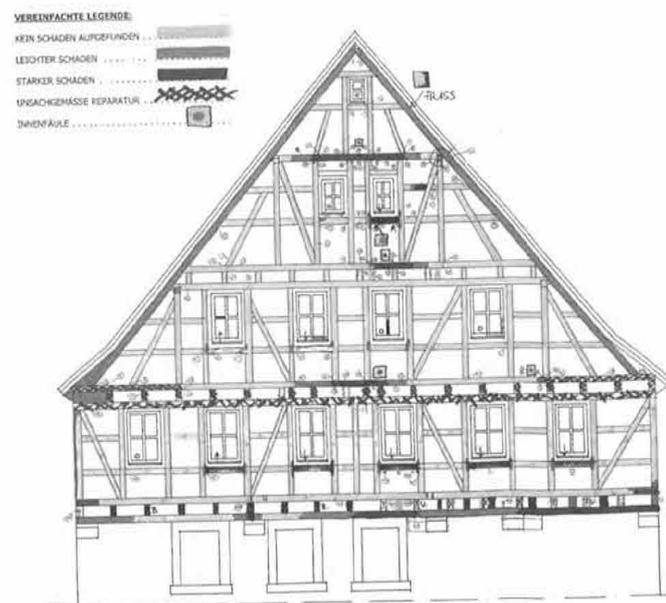


Bild 49: Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung einer Fachwerkfassade.

Die Variante Gelb-Orange-Violett weist eine klare Farbabfolge auf: je dunkler, desto schlechter der Zustand. Auch Laien erkennen in den entsprechenden Farbplänen sofort, wo die Problembereiche liegen. Sie sehen auch sofort, welche Bereiche untersucht wurden, und welche nicht. Diese Farbabstufung bleibt auch bei einer Schwarz-Weiß-Kopie erhalten: der Grauwert der gelben Bereiche unterscheidet die intakten Bereiche immer noch von den nicht untersuchten. Orange und Rot bzw. Violett unterscheiden sich davon und untereinander, sodass auch eine auf der Baustelle im Büro des Bauleiters schnell gemachte Kopie die wesentlichen Informationen des Bestandsplans wiedergibt.

Bei der Ampellösung fallen diese Vorteile weg: Grün wirkt dunkler als Gelb und erscheint auf Schwarz-Weiß-Kopien oft ebenso dunkel wie Rot. Intakte Bereiche wirken daher dort oft geschädigt, was zu Verwechslungen führt.

Es hat sich als sinnvoll erwiesen, dass insbesondere die statisch relevanten Symbole (z. B. nicht kraft- oder formschlüssiger Anschlusspunkt, Ästigkeit, Drehwuchs) in einer einheitlichen Farbe gekennzeichnet werden. Dann sind diese Aspekte vom Statiker leichter und schneller zu erkennen und in den Überblick zu bekommen. Die gleiche Überlegung führte dazu, alle mit Wasser und Holzfeuchte zusammenhängende Aspekte Blau zu markieren.

Außerdem sollte es möglich sein, zumindest in den intakten und leicht geschädigten Bereichen weitere Symbole über die betreffende Farbe einzuzichnen. Wenn die intakten oder leicht geschädigten Bereiche Grün markiert würden, müssten die dort einzuziehenden statisch relevanten Symbole mit einer deutlich dunkleren Farbe gezeichnet werden, um noch erkennbar zu sein. Da Blau, Grün und Rot ausfallen, bleibt hier bleibt nur noch Schwarz übrig. Dies ist jedoch u. a. deshalb ungünstig, weil Schwarz üblicherweise für Texte und Koordinaten verwendet wird und die statisch relevanten Symbole damit nicht mehr als eigenständige Gruppe auffallen. Außerdem geht diese Information auf Schwarz-Weiß-Kopien oft verloren, weil sich dort Schwarz nicht ausreichend von Grün unterscheidet, der notwendige Kontrast fehlt.

Auf der Gelb-Orange-Violett-Skala dagegen sind die grünen, statisch relevanten Markierungen gut erkennbar, auch noch auf einer Schwarz-Weiß-Kopie.



Bild 50: Fußpunkt mit Stahlschuhen und Markierungen der Bohrwiderstandsmesspunkte.

Konsequenzen

Der Übergang zu einem handlichen Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung auf Basis einer technischen Holzuntersuchung verändert die nachfolgenden Arbeitsschritte: die rechnenden Ingenieure und planenden Architekten haben bereits vor der Sanierung eine verlässliche Grundlage über den Zustand der Konstruktion. Und gerade die Zimmerer haben eine überschaubare Kalkulationsgrundlage.

Auch wenn sich kaum jemand traut, dies offiziell zuzugeben: in Angeboten von Fach-Ingenieuren und Handwerkern auf Ausschreibungen von Sanierungsarbeiten wurde bislang oft ein zunächst kaum auskömmlicher Festpreis angegeben – um den Preiskampf zu gewinnen. Die finanzielle Unterdeckung wurde dann mit den „üblichen“ Nachtragsarbeiten ausgeglichen – auf die man folglich zwangsweise angewiesen war.

Damit kann nun jedoch zum Vorteil aller Schluss gemacht werden. Als Grundlage und wesentlicher Teil der Ausschreibung haben die Bestandspläne mit farbiger Zustandskartierung dazu geführt, dass sich z. B. die Angebote der Zimmerer preislich deutlich weniger unterscheiden – wenn man den anbietenden Firmen vorher klar macht, dass sie nicht mit nennenswerten Nachtragsarbeiten rechnen können.

Die Praxis bestätigt dies denn auch: in den meisten Fällen gab es keine oder kaum nennenswerte Nachtragsarbeiten.

Nicht nur Hohe Einsparung

Aus über 100.000 Bohrwiderstandsmessungen seit 1986 ergeben sich verschiedene Erfahrungswerte: deutlich mehr als 50 % der im Bau-

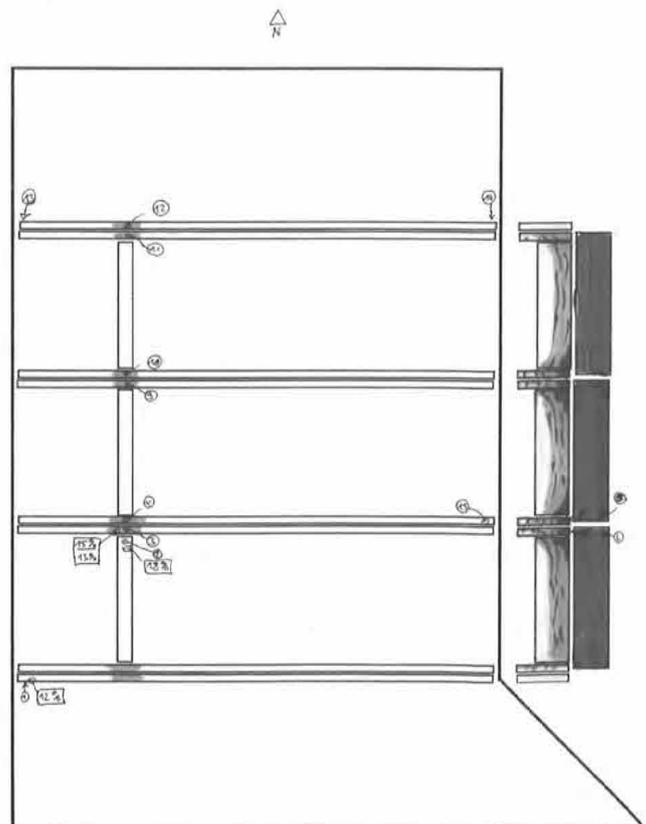


Bild 51: Bestandsplanausschnitt mit farbiger Zustandskartierung eines Dachreiters.

holz aufgefundenen Schäden waren verdeckt (z. B. Innenfäulen) und wurden vorher von herkömmlich untersuchenden Fachleuten nicht entdeckt. Im Vergleich zu herkömmlichen Sanierungen ähnlicher Projekte lagen die Gesamt-Kosten oft um 30 bis 50 %, manchmal 70 % niedriger. Diese Einsparung erklärt sich aus einfachen Umständen: Die beauftragte Zimmerei, z. B., weiß bereits vor dem Beginn der Arbeiten auf der Baustelle exakt, welche Hölzer mit welchen Abmessungen und Anschlüssen benötigt werden. Auch Sicherheits- und Abstützmaßnahmen können vorher genau geplant und vorbereitet werden. Bislang wurde dies oft erst auf der Baustelle schrittweise erarbeitet – mit entsprechend unkalkulierbarem Aufwand. Die nun mögliche Planungssicherheit wirkt sich auch positiv auf andere Gewerke aus, z. B. bei Putz- und Stukkateurarbeiten.

Die Höhe der Einsparungen überrascht zunächst, ist im Detail jedoch verständlich. Die größten Einsparungen wurden in Projekten erreicht, in denen nicht sichtbare Hölzer untersucht wurden: z. B. Deckenbalken unter historischem Bodenbelag oder Brettschichtträger in Stahlschuhen – also Konstruktionselemente, die weder sichtbar noch zugänglich waren und deren Freilegung enorme Kosten bedeutet hätte.

Im Durchschnitt lagen die Kosten für unsere Vor-Untersuchung und Bestandsplanerstellung bei 3 bis 8 % der späteren Sanierungskosten (für das hölzerne Gewerk). Der Einspareffekt durch die Voruntersuchung lag meist beim 5- bis 10-fachen der Untersuchungskosten (im Vergleich zum konventionellen Vorgehen). Als typisches Beispiel hier Zahlen zur Sanierung eines Kirchendachstuhls: Untersuchungskosten ca. 36.000 DM, Sanierungskosten ca. 600.000 DM (keine Nachträge!). Einsparung im Vergleich zum herkömmlichen Vorgehen bei ähnlichen Dachwerken ca. 200.000 DM.

Umwälzung für alle Beteiligten

Konsequenzen hat die hier beschriebene Vorgehensweise bei konsequenter Ausführung für alle Beteiligten: Das im Bereich der Sanierung übliche Honorargeflecht muss natürlich dem neuen Vorgehen angepasst werden.

Eine prozentuale Bindung der Honorare für Ingenieur und Architekten an die Bausumme ist in solchen Sanierungsprojekten nicht zielführend. Woher sollte in diesem Falle das Interesse kommen, sich z. B. um die Anwendung von derartigen Voruntersuchungen zu bemühen – wenn dadurch die Bausumme und somit auch das eigene Honorar so drastisch sinken?

Bei der Vergabe der entsprechenden Aufträge müssen also die heute nach HOAI möglichen finanziellen Anreize in Richtung Einsparung und Optimierung genutzt werden. Werden diese Möglichkeiten konsequent umgesetzt, können Instandsetzungen alter wie neuerer Gebäude, wie mehrfach belegt, zu deutlich geringeren Kosten erfolgen – mit einer Planungssicherheit, wie sie sonst nur bei Neubauten erreicht wird.

Praxiserfahrungen

Das hier beschriebene Kartierungssystem wird mit leichten Veränderungen seit 1991 von einer wachsenden Zahl an Fachleuten angewen-

det. Es hat sich dabei gezeigt: der Übergang von den bislang meist üblichen Schwarz-Weiss-Großformat-Zeichnungen mit textlichen Schadenslisten zu einem handlichen Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung auf Basis einer technischen Holzuntersuchung verändert fast alle nachfolgenden Arbeitsschritte. Die Informationen, die sonst in hundertseitigen Gutachten enthalten sind, werden auf wenige kleine Zeichnungen komprimiert. Dabei geht jedoch nicht nur nichts verloren – vielmehr wird etwas ganz Entscheidendes gewonnen: Überblick und Gesamtverständnis.

Zunächst haben die rechnenden Ingenieure erstmals bereits vor der Sanierung eine verlässliche Grundlage über den Zustand der Konstruktion. Damit können die wirklich erforderlichen Sanierungsmaßnahmen präziser als bisher ermittelt werden. Auch die architektonische und denkmalpflegerische Planung hat eine umfassende Grundlage. Angesichts der damit im Voraus viel genauer ermittelbaren Sanierungskosten kann auch über Sinn und Vertretbarkeit der Erhaltung betreffender Konstruktionsabschnitte oder gewisser historischer Materialien entschieden werden. Wie oft hörte man bislang nach Sanierungen: „Wenn wir die vorliegenden Schäden vorher gekannt hätten, wäre das Sanierungs- und Erhaltungskonzept gänzlich anders ausgefallen ...“ (und viel günstiger gewesen).

Außerdem ist in Angeboten von Handwerkern auf Ausschreibungen von Sanierungsarbeiten bislang oft ein zunächst kaum auskömmlicher Festpreis anzutreffen – in der stillen Hoffnung auf Nachträge im Zuge der üblicherweise anfallenden Zusatzarbeiten. Erfolgt eine vollständige Zustandsuntersuchung der Konstruktion und eine Dokumentation der Ergebnisse in Form eines Bestandsplans mit farbiger Zustandskartierung, können Nachträge und entsprechender Ärger vermieden werden. Dies setzt natürlich auskömmliche Preise voraus, welche nun jedoch mit einem vielfach geringeren Aufwand und präzise nie anhand der hier beschriebenen Pläne ermittelt werden können. Es ist denn auch festzustellen, dass sich die Angebote von Zimmereien auf Basis einer guten Zustandskartierung deutlich weniger unterscheiden. Bei vielen Sanierungsprojekten kam es zu gar keinen Nachtragsarbeiten.

Je nach Genauigkeit der Untersuchung bedeutet eine Zustandskartierung also vor allem Planungssicherheit, von der letztlich alle Beteiligten profitieren.

Ausblick

Wenn das hier beschriebene Konzept vor den Instandsetzungsmaßnahmen umgesetzt wird, bringt dies Planungssicherheit und deutliche Kosteneinsparung. Außerdem wird meist das Maximum an Substanz erhalten, was möglich ist. Letztlich handelt es sich also um eine Erhöhung auch der wirtschaftlichen Effizienz einer Instandsetzung – diese Effizienzsteigerung passt ideal zum weitverbreiteten Konzept des nachhaltigen Wirtschaftens, des sorgsamen Umgangs nicht nur mit Rohstoffen. Wenn die Beteiligten die Chancen dieses Konzepts nutzen, können mit gleichen finanziellen Mitteln deutlich mehr Gebäude langfristig erhalten werden – ein Ziel, für das es sich lohnt, sich einzusetzen.

Literatur

- Brandt, M., Rinn, F. 1989: Der Blick in's Innere von Bäumen. Eine Übersicht über Verfahren zur Stammfäule-diagnose. Holz Zentralblatt Nr. 80, 5.7.1989, S. 1268 und 1270.
- Chantre, G., Rozenberg, P. 1997: Can drill resistance profiles (Resistograph) lead to with in profile and within ring density parameters in Douglas fir wood? In: Proceedings of CTIA International Union of Forestry Research Organizations (IUFRO) International wood quality workshop: Timber Management Toward Wood Quality and End Product Value, Québec, Qué. 18. 22. Aug. 1997. Edited by R. Zhang, R. Gosselin, and G. Chauret, ForintekCanada Corp., Sainte Foy, Qué., pp. 41-47.
- Eckstein, D., Saß, U. 1994: Holzanatomische Untersuchungen zu Bohrwiderstandsmessungen an Laubhölzern. Holz als Roh- und Werkstoff, 1994.
- Ehlbeck, J., Görlacher, R. 1992: Zur Problematik bei der Beurteilung der Tragfähigkeit von altem Konstruktionsholz. Holzbaustatik Aktuell. Ausgabe Juli 1992/2.
- Ehlbeck, J., Görlacher, R. 1990: Bohrwiderstandsmessungen an eingebautem Konstruktionsholz. Sonderdruck im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 315 (Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke) der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Karlsruhe.
- Fischer, H. B., Rinn, F. 1995: Verbesserte Untersuchung des Zustands hölzerner Konstruktionen. Ein Erfahrungsbericht über handwerkliche, ingenieurtechnische und wissenschaftliche Holzprüfung in Vorbereitung einer Sanierung. BdB Nachrichten. Bund Deutscher Baumeister, Bezirksgruppen Nordhessen und Thüringen, 2/95, 37-43.
- Fischer, H.-B., Rinn, F. 1996: Bestandsplan mit farbiger Zustandskartierung der Holzkonstruktion. Bauen mit Holz 11 (1996): 852-858.
- Fikret, Isik, Bailian, Li 2003: Rapid assessment of wood density of live trees using the Resistograph for selection in tree improvement programs. Can. J. For. res. 33: 2426-2435.
- Görlacher, R., Hättich, R. 1990: Untersuchung von altem Konstruktionsholz. Die Bohrwiderstandsmethode. Bauen mit Holz, Juni 1990. Erneuerte Auflage: 1992, Holzbaustatik-Aktuell Juli 1992/2.
- Hättich, R. 1990: Bohrwiderstandsmessungen zur Ermittlung der Geometrie von Holzverbindungen. Sonderdruck im Rahmen des Sonderforschungsbereiches 315 (Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke) der Deutschen Forschungsgemeinschaft an der Universität Karlsruhe.
- Le Naour, F. 1988: Une méthode de reconnaissance mécanique du bois: Le PERCAGE. Thèse de l'Université de Bordeaux. 79 p.
- Le Naour, F., Morlier, P. 1991: Le forametre. Un outil de reconnaissance mécanique du bois. Ann. Sci. For. (1991) 48, 47-61.
- Madson, P. E. 1992: Structural behaviour of timber. Timber Engineering Ltd., Alpine Court, British Columbia, Canada.
- Paulitsch, M., Mehlhorn, L. 1973: Neues Verfahren zur Bestimmung des Rohdichteprofils von Holzspanplatten. Holz als Roh- und Werkstoff 31, Seite 393-397.
- Rinn, F. 1988: Needle drill resistance measurements. A new method for determining tree ring density parameters. Physics Diploma Thesis, Heidelberg University 85pp.
- Rinn, F. 1990: Vorrichtung zur Materialprüfung, insbesondere Holzprüfung, durch Bohr- bzw. Eindringwiderstandsmessung. Deutsches Patentamt, Aktenzeichen P 41 22 494.9.
- Rinn, F., Becker, B., Kromer, B. 1991: Density Profiles of Conifers and Deciduous Trees. Report of the Symposium on Tree Rings and Environment of Lund University, Ystad, South Sweden, September 1990.
- Rinn, F. 1992: Chancen und Grenzen bei der Untersuchung von Konstruktionshölzern mit der Bohrwiderstandsmethode. Bauen mit Holz 9 (1992): S. 745-748.
- Rinn, F. 1992: Density profiles of conifers and deciduous trees by field measurements of coring resistance. IUFRO Division 5 Conference, Nancy 1992.
- Rinn, F. 1993: Gucken, Klopfen, Bohren. Zerstörungsfreie Bohrwiderstandsmessung als Teil der ingenieurtechnischen Holzuntersuchung. Bausubstanz, 5 (1993): S. 49-52.
- Rinn, F. 1993: Catalogue of relative density profiles of trees, poles and timber derived from RESISTOGRAPH micro drillings. Proc. 9th int. meeting non destructive testing, Madison 1993.
- Rinn, F. 1994: One minute pole inspection with RESISTOGRAPH micro drillings. Proc. Int. Conf. on wood poles and piles. Ft. Collins, Colorado, USA, March 1994.
- Rinn, F. 1994: Resistographic inspection of building timber. Proc. Pacific Timber Engineering Conference. Gold Coast, Australia, July 1994.
- Rinn, F. 1994: Jahrringe im Bohrwiderstandsprofil. Bautenschutz und Bausanierung 11 (1994): 54 S. - 57.

Rinn, F. 1994: Baum- und Bauholz-Inspektionen mit RESISTOGRAPH. Anwendung, Auswertung, Meßprofile und ihre Interpretation. Proc. NDE-Symposium, Sopron, Ungarn, September 1994.

Rinn, F., Schweingruber F. H., Schär, E. 1996: RESISTOGRAPH and X Ray Density Charts of Wood. Comparative Evaluation of Drill resistance Profiles and X Ray Density Charts of Different Wood Species. HOLZFORSCHUNG Vol. 50 (1996) pp. 303-311.

Rinn, F. 2003: Technische Grundlagen der Impuls Tomographie, Baumzeitung 8, 29 – 31, Thalacker Verlag, Braunschweig.

Rinn, F. 2004: Holzanatomische Grundlagen der Schall Tomographie an Bäumen, Neue Landschaft 7, 44-47, Patzer Verlag, Berlin – Hannover.

Rinn, F. 2004: Statische Hinweise im Schall Tomogramm von Bäumen, Stadt und Grün 7, 41 – 45, Patzer Verlag, Berlin – Hannover.

Sandoz, J.-L. 2006: Applications of ultrasonic measurements on timber structures. IUFRO meeting on nondestructive testing of wood, Harbin 2006.

Wilcox, W.W. 1977: Review of literature on the effects of early stages of decay on wood strength. Wood and Fiber, V, 9(4), pp. 252-257.

Wood Handbook 1987: U.S. Department of Agriculture, Forest Service Agricultural Handbook No. 72, 1987 (erste Auflage 1935).

Dipl.-Ing. Hubertus Quitt

Deutsches Institut für Bautechnik – DIBt
Kolonnenstraße 30 L
10829 Berlin
Tel.: 030 78730-358
Fax: 030 78730-320
E-Mail: hqu@dibt.de

zuständig für Holzschutzmittel, Holzbau

Da der Vortrag von Herrn Quitt kurzfristig und zusätzlich aufgenommen wurde, stand bei Drucklegung eine Kurzvita nicht zur Verfügung.

Was darf verwandt werden Ü, CE?

Umsetzung der Bauproduktenrichtlinie und Bedeutung der Bauregelliste

Einführung

Baurecht ist auf Grund eines Gutachtens des Bundesverfassungsgerichtes aus dem Jahr 1954 Länderrecht, d. h., jeden Land bestimmt seine Anforderungen an das Bauen selbst.

Für den Erlass von Gesetzen, Vorschriften und Richtlinien, die das Bauen betreffen, ist die „oberste Bauaufsichtsbehörde“ jeden Bundeslandes, d. h., die Ministeriumsebene, verantwortlich. Den obersten Bauaufsichtsbehörden nachgeordnet sind die „unteren Bauaufsichtsbehörden“ in den Verwaltungen der Landkreise, der Städte und Gemeinden. Sie sind in der Regel die Ansprechpartner des Bauherren und gleichfalls Vollzugsorgan für alle mit dem Bau zusammenhängenden öffentlich-rechtlichen Bestimmungen (z. B. Gesetze und Vorschriften). Zu beachten ist, dass sich die Zuständigkeit der Bauaufsicht nur auf die Errichtung, die Änderung, die Instandhaltung, die Nutzung und den Abbruch baulicher Anlagen bezieht und somit nur auf die daraus resultierenden Gefahrentatbestände. Alle Vorgänge außerhalb der Baustelle, wie z. B. der Herstellungsprozess der Bauprodukte, der Transport zur Baustelle usw., fallen nicht in die Zuständigkeit der Bauaufsicht.

Bauordnung

Grundlage des Handelns der Bauaufsichtsbehörden sind die jeweiligen Landesbauordnungen (LBO), die den Charakter eines Landesgesetzes haben.

Die LBOs werden in den Gesetz- und Verordnungsblättern der Bundesländer veröffentlicht. (*Bezugsquellen siehe Anlage*)

Um das Bauen in Deutschland nicht unnötig zu erschweren, folgen jedoch alle diese LBOs in den wesentlichen Regelungen der so genannten Musterbauordnung (MBO), die 1960 erstmals erarbeitet und letztmalig in der Fassung vom November 2002 fortgeschrieben wurde.

Das entscheidende Erfordernis für die letzten Aktualisierungen der MBO ergab sich aus der rasch voranschreitenden Entwicklung des europäischen Binnenmarktes. Mit Erscheinen der „Richtlinie 89/106 EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte“ vom 21. Dezember 1988 (Bauproduktenrichtlinie, BauPR) und deren Umsetzung in der Bundesrepublik Deutschland in deutsches Recht durch das „Gesetz über das Inverkehrbringen von und den Freien Warenverkehr mit Bauprodukten“ vom 10. 08. 1992 (Bauproduktengesetz, BauPG) wurde das ungehinderte Inverkehrbringen von und der freie Handel mit Bauprodukten, deren Brauchbarkeit im Sinne des BauPG nachgewiesen ist und die aufgrund einer nachgewiesenen Konformität mit der CE-Kennzeichnung versehen sind, zwischen den Mitgliedstaaten der Europäischen Union oder des Europäischen Wirtschaftsraumes geregelt.

Die dringendste Aufgabe bestand nun darin, in den Landesbauordnungen für alle auf Grund der Gültigkeit des BauPR auf den nationalen Markt strömenden in- und ausländischen Bauprodukte die notwendigen Rahmenbedingungen für die Verwendbarkeit in baulichen Anlagen insbesondere unter Berücksichtigung der spezifischen nationaler Sicherheitsstandards zu bestimmen.

Alle Bauordnungen gelten insbesondere für bauliche Anlagen, also Gebäude usw., und für Bauprodukte. Dies ist wichtig, denn durch die besonderen Regelungen über Bauprodukte werden diese den Sicherheitsanforderungen der Bauordnungen unterworfen.

Mit den o. g. Novellierungen sind erstmals in den deutschen Bauordnungen europäisch einheitliche Anforderungen an Bauprodukte zu finden.

Die grundsätzlichen Anforderungen der Bauordnungen an die baulichen Anlagen und die Bauprodukte werden in der so genannten materiell-rechtlichen Generalklausel (§ 3 MBO) bestimmt, die in den Folgeparagrafen weiter untersetzt werden.

In diesem Paragraph heißt es:

- § 3 (1) Anlagen sind so anzuordnen, zu errichten, zu ändern und in stand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit und Ordnung, insbesondere das Leben, Gesundheit und die natürlichen Lebensgrundlagen, nicht gefährdet werden.
- § 3 (2) Bauprodukte und Bauarten dürfen nur verwendet werden, wenn bei ihrer Verwendung die baulichen Anlagen bei ordnungsgemäßer Instandhaltung während einer dem Zweck entsprechenden angemessenen Zeitdauer die Anforderungen dieses Gesetzes oder aufgrund dieses Gesetzes erfüllen und gebrauchstauglich sind.
- § 3 (3) Die von der obersten Bauaufsichtsbehörde durch öffentliche Bekanntmachung als Technische Baubestimmungen eingeführten technischen Regeln sind zu beachten. Von diesen Technischen Baubestimmungen kann abgewichen werden, wenn mit einer anderen Lösung in gleichem Maße die allgemeinen Anforderungen des Absatzes 1 erfüllt werden.
- § 3 (5) Bauprodukte und Bauarten, die in Vorschriften anderer Vertragsstaaten genannten technischen Anforderungen entsprechen, dürfen verwendet werden, wenn das geforderte Schutzniveau in Bezug auf Sicherheit, Gesundheit und Gebrauchstauglichkeit gleichermaßen dauerhaft erreicht wird.

Daraus ergeben sich bestimmte Grundsätze, die bauliche Anlagen, und somit auch die dafür verwendeten Bauprodukte, erfüllen müssen,

wie z. B.

- Gewährleistung der Standsicherheit auf Dauer,
- Schutz gegen schädliche Einflüsse (Feuchte-, Holzschutz usw.),
- Schutz der Gesundheit der Nutzer sowie der Umwelt einer baulichen Anlage,
- Gewährleistung von Brand-, Schall- und Wärmeschutzanforderungen usw.,
- Gewährleistung von Nutzungssicherheit und Energieeinsparung.

Anmerkung:

Den gleichen Ansatz bezogen auf Bauprodukte verfolgt auch die „Richtlinie des Rates vom 21. 12. 1988 zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedstaaten über Bauprodukte“ (89/106/EWG) – Bauproduktenrichtlinie –, umgesetzt durch das Bauproduktengesetz vom 10. 8. 1992.

In dieser Richtlinie sind sechs „Wesentliche Anforderungen“ verankert, die europäisch an ein Bauwerk als solches und die darin verwendeten Bauprodukte gestellt werden:

ER 1: Mechanische Festigkeit und Standsicherheit

ER 2: Brandschutz

ER 3: Hygiene, Gesundheit und Umweltschutz

ER 4: Nutzungssicherheit

ER 5: Schallschutz

ER 6: Energieeinsparung und Wärmeschutz

Diese wesentlichen Anforderungen sind gemäß dieser Richtlinie bei der Normungs- und Zulassungsarbeit, Bauprodukte betreffend, zu berücksichtigen.

Zu dieser Richtlinie ist anzumerken, dass sie ausschließlich mit dem Ziel des Abbauens technischer Handelsbemmnisse geschaffen wurde.

Regelungen zur Verwendung der Bauprodukte in Bauwerken sind von den Mitgliedstaaten unter Berücksichtigung ihres jeweils geltenden Sicherheitsstandards einschließlich des Niveaus im Gesundheits- und Umweltschutz zu treffen.

Dies erfolgt in Deutschland u. a. durch entsprechende Anlagen zur Liste der Technischen Baubestimmungen oder zur Bauregelliste.

Nach § 17 (1) MBO gilt der Nachweis über die Eignung eines Bauproduktes für die Erfüllung der grundsätzlichen Anforderungen nach § 3 MBO als erbracht, wenn das Bauprodukt

1. ... von den in der so genannten Bauregelliste A bekannt gemachten **technischen Regeln** (z. B. DIN- bzw. EN-Normen) **nicht oder nicht wesentlich abweicht, und das Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) trägt.**

= geregelte Bauprodukte

Geregelte Bauprodukte sind z. B.:

- Vollholz (Bauschnittholz) nach DIN 4074:2003-06
- Brettschichtholz nach DIN 1052,
- Holztafeln für Holzhäuser in Tafelbauart usw ...

Derzeit sind z. B. in der Bauregelliste A Teil 1, Abschnitt 3 „Bauprodukte für den Holzbau“, 21 Oberpositionen „geregelte Bauprodukte“ bekannt gemacht. Unter der Voraussetzung eines ordnungsgemäßen Übereinstimmungsnachweises und der Kennzeichnung mit dem

Ü-Zeichen können diese Bauprodukte uneingeschränkt und direkt im nationalen Bauwesen verwendet werden. Für diese Bauprodukte sind die geltenden Normen für Planung, Bemessung und Ausführung von Bauwerken (Technische Baubestimmungen) und die technischen Anforderungen an die Bauprodukte aufeinander abgestimmt.

2. ... auf Grund eines Verwendbarkeitsnachweises in Form
 - einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ),
 - einer **Zustimmung im Einzelfall (ZiE)** oder
 - eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses (abP)anwendbar ist **und das Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) trägt.**

Die genannten Arten des Verwendbarkeitsnachweises gelten für **nicht geregelte Bauprodukte**, die von den technischen Regeln in der Bauregelliste wesentlich abweichen oder für die es keine Technischen Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik gibt. Diese Bauprodukte können, wie auch die geregelten Bauprodukte, bei ordnungsgemäßem Übereinstimmungsnachweis und einer Kennzeichnung mit dem Ü-Zeichen, im Rahmen des für sie in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung genau definierten Anwendungsbereiches uneingeschränkt im nationalen Bauwesen verwendet werden.

Anmerkung:

Die allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (§ 18 MBO) ist die wichtigste Form des Verwendbarkeitsnachweises für nicht geregelte Bauprodukte. Sie gilt stets allgemein und gemäß „Abkommen über das Deutsche Institut für Bautechnik“ gleichermaßen für alle Bundesländer.

Die ebenfalls als Verwendbarkeitsnachweis mögliche „Zustimmung im Einzelfall“ gilt dagegen nur für den im Antrag genau beschriebenen Einzelfall; sie ist nicht verallgemeinerbar.

Für die Erteilung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung ist in Deutschland das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) zuständig.

Eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung ist eine so genannte „Allgemeinverfügung“, die besagt, dass jedes Bauprodukt, das unter Einhaltung der Bestimmungen dieser Zulassung hergestellt wird, im deutschen Bauwesen verwendet werden darf und dass jeder öffentlich-rechtlich das Bauprodukt herstellen kann, sofern er die Bestimmungen der Zulassung erfüllt. Schutzrechte an einem in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung geregeltem Bauprodukt sind deshalb grundsätzlich privatrechtlich zu sichern.

Derzeit gibt es im Fachbereich Holzbau ca. 300 gültige allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen.

3. ... nach den Vorschriften des Bauproduktengesetzes in Umsetzung der Richtlinie 89/106 EWG (Bauproduktenrichtlinie) europaweit in den Verkehr gebracht werden darf **und die CE-Kennzeichnung trägt und das CE-Zeichen die national erforderlichen Klassen und Leistungsstufen des Produkts ausweist.**

Anmerkung:

Der letzte Teil dieser Bestimmung ist wichtig, da sowohl bei der europäischen Normung durch CEN sowie bei den Regelungen für europäisch technische Zulassungen (ETA) durch EOTA die Angabe von Klassen und Leistungsstufen der Bauprodukte außer bei Brandschutzeigenschaften üblicherweise nicht aufgenommen wurden. Daraus ergibt sich nicht nur für Deutsch-

land mit dem bestehenden hohen Sicherheitsniveau sondern auch für die anderen europäischen Mitgliedsländer die Notwendigkeit, nahezu alle Normen und ETAs ergänzend zu regeln.

Darüber hinaus kennen die LBO noch so genannte **Sonstige Bauprodukte**. Es handelt sich dabei um Bauprodukte, die vorwiegend deutschen allgemein anerkannten Regeln der Technik, d. h. DIN-Normen oder auch Handwerksregeln, entsprechen, wobei diese Produktnormen nicht in der Bauregelliste enthalten sind, weil von Seiten der Bauaufsicht an diese Bauprodukte keine sicherheitsrelevanten Anforderungen gestellt werden.

Diese Bauprodukte bedürfen keines Verwendbarkeitsnachweises, auch nicht, wenn sie von der jeweils maßgeblichen allgemein anerkannten Regel der Technik abweichen. Sie dürfen deshalb auch kein Ü-Zeichen tragen.

Sonstige Bauprodukte sind z. B. Dachziegel, Wand- und Fußbodenfliesen, Parkett, Wandverkleidungen, Türblätter usw.

Technische Baubestimmungen

Technische Baubestimmungen sind Ausführungsnormen und ergänzende Richtlinien, die von der Bauaufsicht für nötig erachtet werden, die o. g. Grundanforderungen des § 3 MBO zu erfüllen. Sie sind bei jeder baulichen Maßnahme verbindlich anzuwenden.

Geltende Technische Baubestimmungen werden beim DIBt in einer Musterliste geführt.

Die oberste Bauaufsichtsbehörde jedes Bundeslandes kann für sich entscheiden, welche dieser empfohlenen technischen Regeln in der spezifischen „Landesliste“ der Technischen Baubestimmungen bekannt gemacht werden. Die Listen werden über die Veröffentlichung in den Amtsblättern der Länder bauaufsichtlich eingeführt.

(Die Musterliste der Technischen Baubestimmungen und das Verzeichnis der eingeführten Technischen Baubestimmungen kann über die Homepage des DIBt www.dibt.de eingesehen bzw. kostenpflichtig bezogen werden.)

Die Liste der Technischen Baubestimmungen ist fachlich in 7 Abschnitte und diese z. T. wieder in Unterabschnitte unterteilt. Sie umfasst technische Regeln

- 1 zu Lastannahmen
- 2 zur Bemessung und zur Ausführung für
 - 2.1 den Grundbau
 - 2.2 den Mauerwerksbau
 - 2.3 den Beton-, Stahlbeton- und Spannbetonbau
 - 2.4 den Metallbau
 - 2.5 den Holzbau
 - 2.6 Bauteile (u.a. Lager, Außenwandbekleidungen, linienförmig gelagerte Verglasungen)
 - 2.7 Sonderkonstruktionen (u.a. Schornsteine, Fliegende Bauten, Lehmabau)
- 3 zum Brandschutz
- 4 zum Wärme- und Schallschutz
- 5 zum Bautenschutz einschließlich Holzschutz

- 6 zum Gesundheitsschutz
- 7 als Planungsgrundlagen

Die aktuelle Liste der Technische Baubestimmungen enthält den Holzbau betreffend folgende Normen:

- DIN 1052-1 bis -3:1988-04 – Holzbauwerke – mit den jeweiligen Änderungsblättern A1:1996-10,
 - DIN 1052:2004-08 – Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken –,
- Beide Normen gelten voraussichtlich bis zum 31. 12. 2007 gleichwertig nebeneinander.
- DIN 1074:1991-05 – Holzbrücken –,
 - DIN V ENV 1995 Teil 1-1:1994-06 – Eurocode 5: Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – in Verbindung mit der Richtlinie zur Anwendung von DIN V ENV 1995 Teil 1-1 (Nationales Anwendungsdokument /NAD),
 - DIN 68800-2:1996-05 – Holzschutz; Baulicher Holzschutz im Hochbau –,
- und
- DIN 68800-3:1990-04 – Holzschutz; Vorbeugender chemischer Holzschutz –

Bei der Verwendung von Holzwerkstoffen nach DIN EN 13986 gemäß DIN 1052 ist darüber hinaus stets zusätzlich die Anwendungsnorm DIN V 20000-1 zu beachten, deren Ziel es ist, diese Holzwerkstoffe den bestehenden nationalen Sicherheitsniveaus anzupassen.

Von diesen Technischen Baubestimmungen darf nur, wie in § 3 (3) MBO formuliert ist, bei Vorhandensein einer gleichwertigen Lösung abgewichen werden. Eine behördliche Entscheidung über die Gleichwertigkeit einer Lösung ist hierbei nicht notwendig.

Durch dieses „Gestatten“ einer von den Technischen Baubestimmungen abweichenden anderen gleichwertigen Lösung wird ein großer Ermessensspielraum eröffnet, allerdings entsteht auch eine erhebliche Verantwortung für den Planer und Bauausführenden, denn diese müssen die Gleichwertigkeit des Bauens im Streitfall nachweisen.

Die nicht bauaufsichtlich eingeführten technischen Regeln bzw. Technischen Baubestimmungen, die jedoch allgemein anerkannte Regeln der Technik darstellen, sind dennoch für das Bauen nicht gänzlich ohne Bedeutung.

Die Bauaufsichtsbehörden können bei entsprechender Interpretation der Bauordnung diese nicht bauaufsichtlich eingeführten technischen Regeln ebenfalls zur Nachweisführung bei bestimmten Bauvorhaben heranziehen.

Dies wird jedoch üblicherweise mit dem Nachweispflichtigen vorher abgestimmt.

Achtung:

Bautechnische Bereiche, für die keine Technischen Baubestimmungen vorliegen, d. h., nicht bauaufsichtlich eingeführt sind, sind nach § 3 (1) MBO zu beurteilen.

Die Bauregelliste (BRL)

Die Bauregelliste (BRL) ist ein von den Bauaufsichtsbehörden der Länder entwickeltes und im § 17 MBO festgeschriebenes Instrument für die Bauaufsichtsbehörden, aber auch für alle am Bau Beteiligten, wie den Bauherrn, den Architekten (Entwurfsverfasser), die bauausführende Firma (Unternehmer) und den Bauleiter, mit dem bestimmt wird, welche Bauprodukte im Sinne der Landesbauordnungen als **geregelt** gelten und somit in allen bauaufsichtlich relevanten Anwendungsfällen **verwendbar** sind, welche Anforderungen an sie gestellt sind und wie bei wesentlichen Anforderungen dieser Bauprodukte von der jeweiligen technischen Regel (Produktnorm) zu verfahren ist.

Die Bauregelliste wird vom Deutschen Institut für Bautechnik geführt, laufend aktualisiert und in den „Mitteilungen des Deutschen Institutes für Bautechnik“ veröffentlicht.

(Bezugsmöglichkeit der Mitteilungen über den Verlag Ernst & Sohn, Berlin, Tel.: 030-47031284)

In der **BRL A**, hier insbesondere im **Teil 1**, sind vorwiegend nationale technische Regeln für Bauprodukte angegeben, die für die Erfüllung der sicherheitsrelevanten Anforderungen gemäß § 3 der Landesbauordnungen von wesentlicher Bedeutung sind, d. h., technische Regeln, die die jeweiligen Bauprodukte hinsichtlich der Erfüllung der für den Verwendungszweck maßgebenden Anforderungen definieren.

In der **BRL A Teil 1** ist also festgeschrieben, welche technischen Regeln (hier Produktnormen, Richtlinien usw.) für welche Bauprodukte gelten.

Darüber hinaus ist angegeben, welches Verfahren zum Übereinstimmungsnachweis für das jeweilige Bauprodukt durchzuführen ist, um das Bauprodukt mit dem Ü-Zeichen kennzeichnen zu können, d.h., was der Hersteller tun muss, um nachzuweisen, dass sein Produkt mit den Bestimmungen der technischen Regel übereinstimmt.

Falls das Bauprodukt wesentlich von Bestimmungen der in der Bauregelliste A Teil 1 angegebenen technischen Regel abweicht, ist angegeben, welche Art des Verwendbarkeitsnachweises für das jeweilige Bauprodukt bestimmt ist, damit es im Bereich des nationalen Bauwesens verwendet werden darf.

Dies kann
– eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung oder
– ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis sein.

Die Entscheidung, wann eine Abweichung von der technischen Regel wesentlich ist, trifft grundsätzlich der Hersteller eines Bauproduktes selbst.

In der Regel erfolgt diese Feststellung im Rahmen des Übereinstimmungsnachweises mit der technischen Regel.

Die **BRL A Teil 1** ist in Fachbereiche gegliedert und tabellarisch aufgebaut.

- Spalte 1: Lfd. Nummer = organisatorisches Merkmal,
z. B. lfd. Nummer 3 = Bauprodukte für den Holzbau
Spalte 2: Bezeichnung des Bauprodukts,
Spalte 3: Auflistung der technischen Regeln, die für das Bauprodukt maßgeblich sind,

Spalte 4: Angabe der Art des Übereinstimmungsnachweis-Verfahrens,

z. B. ÜH = Übereinstimmungserklärung des Herstellers,

ÜHP = Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach vorheriger Erstprüfung durch eine anerkannte Prüfstelle,

ÜZ = Fremdüberwachung und Zertifizierung.

Spalte 5: Art des Verwendbarkeitsnachweises bei einer wesentlichen Abweichung von den technischen Regeln der Spalte 3.

BRL A Teil 2 enthält zum einen nicht geregelte Bauprodukte, deren Verwendung nicht der Erfüllung erheblicher Anforderungen an die Sicherheit baulicher Anlagen dient und für die es keine technischen Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik gibt. Zum anderen sind solche Bauprodukte enthalten, für die es technische Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik nicht für alle Anforderungen gibt und die hinsichtlich dieser Anordnungen nach allgemein anerkannten Prüfverfahren, in erster Linie zur Beurteilung einer Feuerwiderstandsklasse, des Schallschutzes, aber auch der Absturzsicherung, beurteilt werden können.

Die Bauprodukte der **BRL A Teil 2** benötigen als Verwendbarkeitsnachweis nur ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis (abP), keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

Beispiele sind :

Vorgefertigte, nicht tragende innere Trennwände, einschließlich Einbauten (z. B. Sanitäreinrichtungen), die entweder der Absturzsicherung dienen oder für deren Verwendung Anforderungen an die Feuerwiderstandsdauer oder den Schallschutz gestellt werden, mit Ausnahme von solchen aus Glas.

Baustoffe, an die nur Anforderungen an das Brandverhalten gestellt werden und

- die nichtbrennbar (Klasse DIN 4102-A) sind, mit brennbaren Bestandteilen, oder
- die schwerentflammbar (Klasse DIN 4102-B1) sind.

Für die **BRL A Teil 3** gilt ebenfalls das für den Teil 2 Gesagte, hier allerdings für Bauarten.

In dieser Liste sind Bauarten enthalten, für die es Technische Baubestimmungen oder allgemein anerkannte Regeln der Technik nicht für alle Anforderungen gibt und die hinsichtlich dieser Anforderungen nach allgemein anerkannten Prüfverfahren beurteilt werden können.

Diese Bauarten gemäß Bauregelliste A Teil 3 benötigen stets nur ein allgemeines bauaufsichtliches Prüfzeugnis, keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung.

In die **BRL B** werden Bauprodukte aufgenommen, die auf der Grundlage harmonisierter europäischer technischer Spezifikationen, in der Regel harmonisierte EN-Normen oder Leitlinien für europäisch technische Zulassungen (ETAG), die CE-Kennzeichnung tragen und in den Verkehr gebracht und frei gehandelt werden dürfen.

Bauregelliste B Teil 1 enthält **harmonisierte technische Spezifikationen** im Geltungsbereich der Bauproduktenrichtlinie bzw. des Bauproduktengesetzes, wie z. B.

- Bauprodukte im Geltungsbereich harmonisierter europäische Normen (hEN),
Den Bereich Holzbau betreffend ist hier z. B. die Norm DIN EN 13986:2005-03
- Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen – eingestellt.
- Bauprodukte im Geltungsbereich von Leitlinien für europäische technische Zulassungen (ETAG)
Den Bereich Holzbau betreffend ist hier z. B. die ETAG 011 – Leichte Holzbauträger und -stützen – eingestellt.
- Bausätze im Geltungsbereich von Leitlinien für europäische technische Zulassungen,
Den Bereich Holzbau betreffend ist hier z.B. die ETAG 007 – Bausätze für den Holzrahmenbau – und die ETAG 012 – Bausätze für Blockhäuser – eingestellt.
- Bauprodukte, für die eine europäische technische Zulassung ohne Leitlinie erteilt worden ist,
- Bausätze, für die eine europäische technische Zulassung ohne Leitlinie erteilt worden ist.

In der Bauregelliste B Teil 1 wird darüber hinaus in Abhängigkeit vom Verwendungszweck bestimmt, welche Klassen und Leistungsstufen, die gegebenenfalls in den technischen Spezifikationen festgelegt sind, von Bauprodukten erfüllt sein müssen, um national verwendet werden zu dürfen. Welcher Klasse oder Leistungsstufe ein Bauprodukt entspricht, muss dann aus der CE-Kennzeichnung erkenntlich sein.

In den Fällen, in denen in den technischen Spezifikationen keine Klassen und Leistungsstufen angegeben sind, werden die zusätzlichen Anforderungen an das Bauprodukt, die bei einer Verwendung nach dem geltenden bautechnischen Regelwerk erforderlich sind, in den Anlagen zur Bauregelliste bestimmt.

Wichtig zu wissen ist, dass die Bauregelliste B Teil 1 keine vollständige bzw. 100%-Liste ist. Es werden nur harmonisierte Produktnormen eingestellt, an die in einer Anlage zur Bauregelliste für eine Verwendung gemäß den nationalen Technischen Baubestimmungen oder aus Gesundheitsschutzgründen zusätzliche Anforderungen an das Bauprodukt zu stellen sind.

Bauregelliste B Teil 2 enthält „teilgeregelte“ Bauprodukte. Teilgeregelt deswegen, da zwar nach einigen EG-Richtlinien beurteilbar, aber nicht abschließend für alle wesentlichen Anforderungen nach dem Bauproduktengesetz geregelt.

Im Klartext bedeutet dies, dass diese Bauprodukte neben ihrer CE-Kennzeichnung (Handelskennzeichnung) zusätzlich noch eines nationalen Verwendbarkeitsnachweises in Form

- einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder
- eines allgemeinen bauaufsichtlichen Prüfzeugnisses bzw.
- einer technischen Regel nach Bauregelliste A Teil 1, demnach vor allem eines Übereinstimmungsnachweises, also Kennzeichnung mit Ü-Zeichen bedürfen.

Hingewiesen sei darauf, dass zwar nicht der Holzbau, jedoch der Hausbau im allgemeinen stark betroffen sein kann, da es eine Reihe von EG-Richtlinien gibt, die die wesentlichen Anforderungen des Bauproduktengesetzes nicht oder nur teilweise berücksichtigen.

Die Liste C enthält eine Auflistung von Bauprodukten, für die es keine technischen Regeln und keine Technischen Baubestimmungen gibt und die nur eine untergeordnete Bedeutung für die Erfüllung baurechtlicher Anforderungen haben.

Diese Liste C gilt nur für solche Bauprodukte und Verwendungen, für die nach den geltenden bauaufsichtlichen Vorschriften nur die Normalentflammbarkeit (Baustoffklasse DIN 4102 - B2) vorausgesetzt wird und an die keine weitergehenden Brandschutzanforderungen und keine Anforderungen an den Schall- und Wärmeschutz gestellt werden.

Diese Bauprodukte erfordern keinen Verwendbarkeits- und keinen Übereinstimmungsnachweis. Sie dürfen aber auch keine Ü-Kennzeichnung tragen, weil es keine Übereinstimmung mit irgendwelchen technischen Regeln gibt.

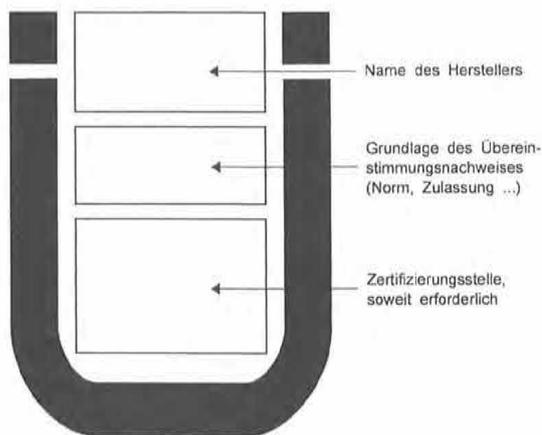
In der Liste C sind z. B. enthalten:

- Außenwandausfachungen, einschließlich ihrer Befestigungen, mit einem Unterstützungsabstand von $\leq 1,0$ m, wenn sie nicht für die Standsicherheit einer baulichen Anlage oder deren Teile dienen.
- Wand- und Dachbauteile, einschließlich ihrer Befestigungen, für eingeschossige bauliche Anlagen mit einem umbauten Raum ≤ 30 m³.
- Fassadenelemente, einschließlich ihrer Befestigungen, für Außenwandbekleidungen, die nach allgemein anerkannten Regeln der Technik befestigt werden,
mit kleinformatischen Fassadenelementen mit $\leq 0,4$ m² Fläche und ≤ 5 kg Eigenlast,
mit brettformatigen Fassadenelementen mit $\leq 0,3$ m Breite und Unterstützungsabständen durch die Unterkonstruktion von $\leq 0,8$ m,
- Türen, Tore und Fenster einschließlich Zubehör
- Doppelböden und Hohlraumestriche mit einem lichten Abstand zur tragenden Decke von $\leq 0,5$ m
- Außenwandbeschichtungen mit einer Dicke ≤ 2 cm

Übereinstimmungsnachweis

Grundsätzlich wird in den Bauordnungen (§ 22 ff MBO) sowohl für geregelte als auch nicht geregelte Bauprodukte (abZ, ZiE oder abP) bestimmt, dass ihre Verwendung im sicherheitsrelevanten Bereich nur zulässig ist, wenn diese Bauprodukte als Nachweis ihrer Übereinstimmung mit einer technischen Regel oder z. B. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung mit dem Übereinstimmungszeichen (Ü-Zeichen) gekennzeichnet sind.

Das Ü-Zeichen als sichtbares Zeichen eines erfolgreich durchgeführten Übereinstimmungsnachweises besteht aus dem Buchstaben „Ü“ (Bild) und muss folgende Angaben enthalten:



Wie und wo diese Ü-Kennzeichnung im Einzelnen zu erfolgen hat, wird in den Übereinstimmungszeichen-Verordnungen der Länder geregelt.

Grundsätzlich muss das Übereinstimmungszeichen, wenn nicht die Anbringung auf dem Produkt ausdrücklich vorgeschrieben ist, auf einem Beipackzettel, auf der Verpackung, auf dem Lieferschein oder auf einer Anlage zum Lieferschein angebracht sein; der Bezug zu dem kennzeichnungspflichtigen Produkt muss aber immer eindeutig gegeben sein.

Die Dokumentation der Übereinstimmung eines Bauproduktes mit der maßgeblichen technischen Regel oder z. B. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch ein Ü-Zeichen kann stets nur durch den Hersteller erfolgen, denn nur dieser kann auf der Grundlage einer kontinuierlichen werkseigenen Produktionskontrolle (Eigenüberwachung der Produkte) bestätigen, dass alle Anforderungen an das Bauprodukt erfüllt sind. Die allgemeine Definition, wer Hersteller ist, ist hierbei eindeutig.

Holz hat stets einige Besonderheiten, so auch hier:

„Hersteller“ von Vollholz ist immer derjenige, der dieses Bauprodukt für das Bauwesen verwendbar macht, also derjenige, der nach der Norm DIN 4074 sortiert, das Bauprodukt klassifiziert und entsprechend kennzeichnet. Das ist normalerweise der Säger, kann aber im Einzelfall auch der Holzhändler oder auch der Zimmerer auf der Baustelle sein.

In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass ein Bauprodukt, d. h. z. B. ein Ü-gekennzeichnetes Vollholz, beim Lagern z. B. im Sägewerk, beim Händler oder beim Verwender keine Qualitätsverschlechterung mehr erfahren darf (siehe auch DIN 68800-2). Im Extremfall könnte z. B. ein Bauholz durch Witterungseinflüsse beim Lagern und daraus

resultierender Rissbildung in eine schlechtere als die angegebene Sortierklasse einzuordnen sein und tatsächlich auch nur noch die Tragfähigkeitseigenschaften dieser Klasse besitzen.

Die bauaufsichtlichen Anforderungen an den Übereinstimmungsnachweis, d. h., ob die Bestätigung der Übereinstimmung

- in Eigenverantwortung des Herstellers (Herstellererklärung) ÜH
- in Eigenverantwortung des Herstellers nach einer Erstprüfung des Bauproduktes durch eine dafür bestimmte Prüfstelle ÜHP oder

– auf der Grundlage eines Übereinstimmungszertifikates einer dafür anerkannten Zertifizierungsstelle ÜZ erfolgt, richten sich nach dem Gefährdungspotential, das von dem Bauprodukt ausgehen kann, und werden in der Bauregelliste A Teil 1 bzw. in einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung oder Zustimmung im Einzelfall bestimmt. Diese Vorgaben sind baurechtlich maßgebend, auch wenn im Einzelfall in einer DIN-Norm etwas anderes zum Übereinstimmungsnachweis vorgesehen ist.

Für die Bestätigung der Übereinstimmung gelten folgende Nachweisverfahren:

1. ÜH = Übereinstimmungserklärung des Herstellers

Hier prüft der Hersteller auf der Grundlage einer regelmäßigen werkseigenen Produktionskontrolle eigenverantwortlich die Übereinstimmung seines Produktes mit einer technischen Regel oder z. B. einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung und bestätigt dies durch das Ü-Zeichen.

In diesem Fall greift in vollem Umfang die Produkthaftung des Herstellers.

Dieser Übereinstimmungsnachweis wird z. B. für Bauprodukte vorgegeben, die aufgrund ihrer Variantenvielfalt eine Fremdüberwachung unmöglich machen oder für die bauaufsichtlich eine solche nicht für erforderlich erachtet wird.

Das trifft z. B. auf visuell sortiertes Vollholz nach DIN 4074:2003-06 zu

2. ÜHP = Übereinstimmungserklärung des Herstellers nach vorheriger Prüfung des Bauproduktes durch eine anerkannte Prüfstelle

In diesem Fall muss eine anerkannte Prüfstelle im Herstellwerk eine Erstprüfung der Übereinstimmung des Produktes mit einer technischen Regel oder z. B. allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durchführen und dies bestätigen. Die weiteren Prüfungen im Rahmen der regelmäßigen werkseigenen Produktionskontrolle werden dann ausschließlich durch den Hersteller selber durchgeführt und darauf basierend die Ü-Kennzeichnung vorgenommen.

Dieser Übereinstimmungsnachweis wird z. B. für Nägel mit profilierter Schaftausbildung (Sondernägel) nach DIN 1052-2:1988-04 gefordert (siehe BRL A Teil 1, lfd. Nr. 3.4.2). Als Erstprüfung gelten in diesem Fall die Prüfungen einer anerkannten Prüfstelle für die Erstellung des Einstufungsscheines in eine Tragfähigkeitsklasse gemäß DIN 1052-2.

3. ÜZ = Übereinstimmungszertifikat

In diesem Fall ist eine Erstüberwachung des Bauproduktes im Her-

stellwerk einschließlich einer Produktprüfung durch eine anerkannte Prüfstelle vorgeschrieben. Gleichzeitig ist mit einer für das Bauprodukt bestätigten Überwachungsstelle ein Fremdüberwachungsvertrag für eine mindestens halbjährliche Fremdüberwachung des Herstellwerkes abzuschließen.

Die Übereinstimmung der Ergebnisse der Erstüberwachung mit den Anforderungen der technischen Regel oder Zulassung wird durch eine unabhängige, vom DIBt dafür anerkannte Stelle zertifiziert. Nur mit diesem Zertifikat darf der Hersteller die Ü-Kennzeichnung des Bauproduktes durchführen.

Diese Art des Übereinstimmungsnachweises ist im Holzbau die am meisten Geforderte, z. B. für maschinell sortiertes Vollholz, aber auch z. B. für Brettschichtholz der Festigkeitsklassen BS14, BS16, BS18, für geschlossene Wand-, Decken- und Dachtafeln, usw.

Insbesondere ist auch für verklebte Holzprodukte (nicht solche nach BRL A Teil 1, lfd. Nr. 3.3.1) einschließlich aller Hölzer mit Keilzinkenlängsverbindungen, bis auf das Sortiment BS 11 mit Längen ≤ 10 m lt. Bauregelliste A Teil 1 bauaufsichtlich als Übereinstimmungsnachweis ein Übereinstimmungszertifikat einer anerkannten Zertifizierungsstelle auf der Grundlage einer werkseigenen Produktionskontrolle und einer regelmäßigen Fremdüberwachung einschließlich einer Erstprüfung (Verfahren ÜZ) vorgeschrieben. Dies steht auch in Übereinstimmung mit der für Keilzinkenverbindungen, z. B. gemäß DIN 1052-1, Abschnitt 12, zu beachtenden Norm DIN 68140-1, die für Keilzinkenverbindungen bereits eine „Eigen- und Fremdüberwachung“, d. h., die Grundlage des ÜZ-Verfahrens, vorsieht. Diese strenge Anforderung an das Übereinstimmungsnachweisverfahren hat hier seinen Grund darin, dass die Keilzinkenverbindung die wichtigste Verbindung im Holzbau überhaupt ist und hier im Gegensatz zu anderen Holzverbindungen z. B. mit mechanischen Verbindungsmitteln Ausführungsfehler oder Schwächen nicht oder erst zu spät erkennbar sind.

Bei den verklebten Holzprodukten muss aufgrund der besonderen Anforderungen an den Herstellungsprozess (Holzfeuchte, Raumtemperatur, Pressdruck usw.) anders als bei dem normalen Vollholz stets das eigentliche Herstellwerk als Hersteller im Ü-Zeichen erscheinen.

Grundsätzlich gilt außerdem, dass alle verklebten Holzprodukte (hier also auch die nach BRL A Teil 1, lfd. Nr. 3.3.1, 3.1.2.1 und 3.1.2.2) aus Herstellwerken stammen müssen, die eine „Leimgenehmigung“ haben (Leimnachweis nach DIN 1052).

Die Leimgenehmigung bezieht sich nur auf das Herstellwerk des tragenden geklebten Holzbauteils, noch nicht auf das Bauprodukt an sich.

Einfluss europäischer Regelungen auf das Nationale Baurecht

Das Grundlagendokument für ein europäisch harmonisiertes Vorgehen im Bereich des Bauwesens ist die „Richtlinie 89/106 EWG des Rates zur Angleichung der Rechts- und Verwaltungsvorschriften der Mitgliedsstaaten über Bauprodukte“ (Bauproduktenrichtlinie BauPR) vom 21. Dezember 1988.

Die Umsetzung dieser BauPR in den Ländern der europäischen Union erfolgte in Deutschland durch das Bauproduktengesetz (Bau PG) vom 10. 08. 1992 und schuf die Basis für einen „freien“ Handel mit Bauprodukten zwischen den Mitgliedsländern.

Da die europäisch harmonisierte Eigenschaft eines Bauproduktes, „brauchbar“ zu sein, nicht die in den einzelnen Mitgliedsstaaten existierenden Sicherheitsstandards fassen kann, verbleibt die Regelung der **Verwendung** der nach europäischem Recht frei gehandelten Bauprodukte auch weiterhin in der **Zuständigkeit der Mitgliedsstaaten**.

In Deutschland ist für das Inverkehrbringen und den freien Warenverkehrs der Bauprodukte der Bund, für die Verwendung der Bauprodukte sind die Bundesländer über ihre Bauordnungen zuständig.

Das BauPG regelt also das Inverkehrbringen der Bauprodukte (den freien Handel), die Landesbauordnungen deren Verwendung.

Bauprodukte dürfen nach der BauPR zwischen den Mitgliedsländern frei gehandelt werden, wenn sie so genannten technischen Spezifikationen, d. h. europäischen harmonisierten Normen oder europäischen technischen Zulassungen entsprechen, die auf europäischer Ebene aufgrund von Aufträgen (Mandaten) der Europäischen Kommission an CEN zur Erarbeitung harmonisierter Normen bzw. aufgrund von Aufträgen an die Europäische Organisation für technische Zulassungen EOTA zur Erarbeitung von Leitlinien für europäische technische Zulassungen entstanden sind. Darüber hinaus müssen diese Bauprodukte die CE-Kennzeichnung tragen.

Eine weitere Möglichkeit des freien Handelns ergibt sich gemäß BauPR, wenn die Bauprodukte mit einer im europäischen Rahmen anerkannten nationalen Norm oder Zulassung übereinstimmen. Leider stellt diese Möglichkeit in der Praxis des europäischen Geschäftes eine Ausnahme dar.

Als technische Spezifikationen für Bauprodukte im Sinne der BauPR gelten:

- harmonisierte europäische Normen, für die die Europäische Kommission die Fundstellen im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht hat,
- Leitlinien für Europäische Technische Zulassungen (ETAG), die im Amtsblatt der Europäischen Union veröffentlicht sind, oder
- Einzelfallregelungen für die einvernehmliche Erarbeitung europäischer technischer Zulassungen ohne Leitlinien (CUAP-Verfahren).

Gemäß BauPR, umgesetzt im BauPG, sollte grundsätzlich von der Brauchbarkeit der o. g. Bauprodukte ausgegangen werden, d. h. von ihrer Beschaffenheit, die gewährleistet, dass die Bauwerke, für die sie verwendet werden, die wesentlichen Anforderungen ER1 bis ER6 (siehe Seite 2) erfüllen können, wenn sie mit dem CE-Zeichen gekennzeichnet sind.

Um eine CE-Kennzeichnung auf einem Bauprodukt anbringen zu können, werden sechs Verfahren zur Bescheinigung der Konformität unterschieden, die Systeme 1+, 1, 2+, 2, 3, 4.

Das jeweils vorgeschriebene System legt die europäische Kommission in Abstimmung mit dem Ständigen Ausschuss für Bauwesen – StAB – (beratend) produktbezogen fest. Die Entscheidung wird im Amtsblatt der EG bekannt gemacht.

Die Konformität der Produkte mit der jeweiligen technischen Spezifikation wird durch eine werkseigene Produktionskontrolle des Herstellers des Bauproduktes und ggf. weitere, externe Prüfungen und Überwachungen sichergestellt.

Nach der BauPR und dem BauPG besteht die CE-Kennzeichnung aus dem Buchstaben „CE“ und den folgenden Angaben zum CE-Kennzeichen (siehe Beispiel):

CE-Kennzeichnung mit Zertifizierung	
 0672	Symbol „CE“ mit zusätzlicher Information: 1. Nummer der Zertifizierungsstelle 2. Name oder Zeichen des Herstellers und Herstellwerks 3. die letzten beiden Ziffern des Jahres, in dem die CE-Kennzeichnung erfolgte 4. Nummer des EG-Konformitätszertifikats 5. Angaben zum Produkt: Nr. der technischen Spezifikation Angaben zu den Produktmerkmalen
Hersteller Adresse 98 0672-CPD-0001	
EN 1234	
80 mm Mineralwolle für Verwendung in Gebäuden Brandverhalten - Klasse B Wärmeleitföh. - 0,04 W/mK Biegezugfestigkeit - KLF	

Grundsätzlich soll die CE-Kennzeichnung konkurrierende nationale gesetzliche Zeichen, d. h., auch das Ü-Zeichen nach den Landesbauordnungen, ersetzen.

Die Bauministerkonferenz hat jedoch festgestellt, dass in bestimmten Fällen auch Bauprodukte mit CE-Kennzeichnung nach der Bauproduktenrichtlinie weiterhin ein Ü-Zeichen tragen können oder müssen. Eine solche zusätzliche Ü-Kennzeichnung kann insbesondere dann in Betracht kommen, wenn die CE-Kennzeichnung zu einem „wesentlichen“ („harmonisierten“) Produktmerkmal keine Leistungswerte angibt oder die Angabe „keine Leistung festgestellt“ macht, nach Bauordnungsrecht aber entsprechende Anforderungen zu erfüllen sind.

Harmonisierte europäische Normen

Derzeit sind ca. 280 harmonisierte Normen von ca. 500 geplanten harmonisierten Normen im Bereich des Bauwesens verfügbar.

Das europäisch vereinbarte System sieht vor, dass nach Verfügbarkeit einer harmonisierten Norm (Veröffentlichung im europäischen Amtsblatt) Bauprodukte mit einer CE-Kennzeichnung auf dem Markt angeboten werden können. Mit der Veröffentlichung im europäischen Amtsblatt wird i. d. R. die so genannte Koexistenzperiode angegeben, während der eine vorhandene nationale und die europäische Norm nebeneinander gültig ist und angewendet werden darf. Von diesem Zeitpunkt an ist jedes Mitgliedsland gehalten, dafür zu sorgen, dass das nach der harmonisierten EN-Norm hergestellte und gegebenenfalls bereits gehandelte Bauprodukt auch nach den nationalen Regelwerken ver-

wendbar ist. Nach Ende dieser Koexistenzperiode muss jede der europäischen Norm entgegengesetzte nationale Norm zurückgezogen werden

Im Holzbau sind z. B. folgende harmonisierte Normen im Amtsblatt der europäischen Kommission veröffentlicht worden:

- DIN EN 14080 – Brettschichtholz – Koexistenzperiode bis 1. 4. 2007
- DIN EN 14081 – Bauholz – Koexistenzperiode bis 1. 9. 2007
- DIN EN 13986:2005-0703 – Holzwerkstoffe zur Verwendung im Bauwesen; Eigenschaften, Bewertung der Konformität und Kennzeichnung.

Die Koexistenzperiode dieser letztgenannten Norm ist bereits abgelaufen, die Einführung in das nationale bauaufsichtliche Regelwerk durch das Einstellen in die Bauregelliste B Teil 1, lfd. Nr. 1.3.2.1, vollzogen. Holzwerkstoffe, die nach dieser Norm hergestellt werden, müssen die Konformität mit dieser Norm nachweisen.

Da diese harmonisierte Norm DIN EN 13986 und die darin erfassten Bauprodukte nicht in den geltenden Technischen Baubestimmungen, z. B. DIN 1052, enthalten ist, wurde eine Anwendungsnorm DIN V 20000-1 erarbeitet, die besagt, unter welchen Bedingungen diese Bauprodukte in baulichen Anlagen zu verwenden sind und welche Bemessungswerte für diese Bauprodukte anzusetzen sind. Diese Norm ist in der Liste der Technischen Baubestimmungen mit indirektem Bezug zur DIN 1052 eingestellt.

Europäisch Technische Zulassungen (ETA)

Eine ETA als Nachweis der Brauchbarkeit ist erforderlich, wenn das Bauprodukt nicht nur unwesentlich von harmonisierten oder von einer erteilten ETA abweicht oder es solche Normen nicht oder noch nicht gibt.

ETAs werden aufgrund von „Leitlinien für die europäische technische Zulassung“ (ETAG) erteilt, soweit für die Bauprodukte Leitlinien im Amtsblatt der europäischen Kommission bekannt gemacht sind. Sind Leitlinien nicht bekannt gemacht, darf eine ETA nur erteilt werden, wenn die Europäische Kommission die Erteilung einer solchen Zulassung ohne Leitlinie gestattet (vgl. Art. 9 (2) der Bauproduktenrichtlinie). Dieses Verfahren ist das so genannte CUAP-Verfahren.

Nationale Zulassungen sind für Bauprodukte in Bereichen, in denen Leitlinien nicht bekannt sind, weiterhin möglich. In Bereichen, für die eine ETAG bekannt gemacht ist, können nationale Zulassungen nur solange erteilt werden, solange nicht Übergangsvorschriften die Parallelität von europäischen und nationalen Zulassungen begrenzen.

Wie bereits dargestellt bestimmen die Landesbauordnungen, dass technische Spezifikationen für Bauprodukte, d. h. europäisch geregelte Bauprodukte, die für die Erfüllung der wesentlichen Anforderungen an eine bauliche Anlage relevant sind, unter Angabe der jeweiligen harmonisierten Norm oder Zulassungsleitlinie in die Bauregelliste B Teil 1 eingestellt werden (siehe Hinweise dort). Die für eine Verwendung im nationalen Bauwesen erforderlichen Hinweise sind dort zu finden.

**Bezugsquellen für
Gesetz- und Verordnungsblätter**
(Bauordnungen und weitere Verordnungen)

Land	Bekanntmachungsorgan	Abkürzung	Bezugsquelle
Baden-Württemberg	Gesetzblatt für Baden-Württemberg	GBl.	Versandstelle des Gesetzblatts, Staatsanzeiger für Baden-Württemberg GmbH Postfach 10 43 63 70038 Stuttgart Tel.: 0711/6 66 01-32 Fax: 0711/6 66 01-34
Bayern	Bayerisches Gesetz- und Verordnungsblatt	GVBl.	Max Schick GmbH Druckerei und Verlag Karl-Schmid-Str. 13 81829 München Tel.: 089/42 92 01/02 Fax: 089/42 84 88
Berlin	Gesetz- und Verordnungsblatt für Berlin	GVBl.	Kulturbuch-Verlag GmbH Sprosserweg 3 12351 Berlin Tel.: 030/6 61 84 84 Fax: 030/6 61 78 28
Brandenburg	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Brandenburg	GVBL.	Brandenburgische Universitätsdruckerei und Verlagsgesellschaft Potsdam mbH Karl-Liebknecht-Str. 24-25, Haus 2 14476 Golm (bei Potsdam) Tel.: 0331/56 89-0 Fax: 0331/56 89 16
Bremen	Gesetzblatt der Freien Hansestadt Bremen	Brem.Gbl.	Carl Ed. Schünemann KG II. Schlachtpforte 7 28195 Bremen Tel.: 0421/3 69 03-0 Fax: 0421/3 69 03 63
Hamburg	Hamburgisches Gesetz- und Verordnungsblatt	GVBL.	Lütcke & Wulff Rondenbarg 8 22525 Hamburg Tel.: 040/23 51 29-0 Fax: 040/23 51 29 77
Hessen	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Hessen Teil I	GVBl.	A. Bernecker Verlag Unter dem Schöneberg 1 34212 Melsungen Tel.: 0561/9 83 66 25 Fax: 0561/9 83 66 33
Mecklenburg-Vorpommern	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Mecklenburg-Vorpommern	GVOBl. M-V	cw Obotritendruck GmbH Münzstr. 3 19055 Schwerin Tel.: 0385/5 58 52 12 Fax: 0385/5 58 52 22
Niedersachsen	Niedersächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt	GVBl.	Schlütersche Verlagsanstalt und Druckerei GmbH & Co. Hans-Böckler-Allee 7 30173 Hannover Tel.: 0511/85 50-0 Fax: 0511/85 50 400

Land	Bekanntmachungsorgan	Abkürzung	Bezugsquelle
Nordrhein-Westfalen	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Nordrhein-Westfalen	GVBl.	A. Bagel Verlag Grafenberger Allee 100 40237 Düsseldorf Tel.: 0211/96 82 2 41 Fax: 0211/96 82 2 29
Rheinland-Pfalz	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Rheinland-Pfalz	GVBl.	Landeshauptarchiv Karmeliterstr. 1-3 56068 Koblenz Tel.: 0261/91 29-0 Fax: 0261/91 29 112
Saarland	Amtsblatt des Saarlandes	Amtsbl.	SDV Saarbrücker Druckerei und Verlag GmbH Halbergstr. 3 66121 Saarbrücken Tel.: 0681/6 65 01-0 Fax: 0681/6 65 01 10
Sachsen	Sächsisches Gesetz- und Verordnungsblatt	SächsGVBl.	Saxonia Verlag Lingner Allee 3 01069 Dresden Tel.: 0351/4 87 43 66 Fax: 0351/4 87 47 49
Sachsen-Anhalt	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Sachsen-Anhalt	GVBl. LSA	Freyburger Buchdruckerwerkstätte GmbH Am Gewerbepark 15 06632 Freyburg/Unstrut Tel.: 034464/30 40 Fax: 034464/2 80 67
Schleswig-Holstein	Gesetz- und Verordnungsblatt für Schleswig-Holstein	GVOBl.	Schmidt & Klaunig Ringstr. 19 24114 Kiel Tel.: 0431/6 60 64-0 Fax: 0431/6 60 64 224
Thüringen	Gesetz- und Verordnungsblatt für das Land Thüringen	GVBl.	Thüringer Landtag Verwaltung Arnstädter Str. 51 99096 Erfurt Tel.: 0361/3 77 20 70 Fax: 0361/3 77 20 16
Bund	Bundesgesetzblatt	BGBl.	Bundesanzeiger Verlagsges. mbH Postfach 13 20 53003 Bonn Tel.: 0228/3 82 08-0 Fax: 0228/3 82 08 36

Prof. Dr. Phys. Franz Feldmeier



Fachhochschule Rosenheim
Gruppe Bauphysik und Gebäudetechnik
Hochschulstraße 1
83024 Rosenheim
Tel.: 08031 805-0
Fax: 08031 805-105
E-Mail: feldmeier@fh-rosenheim.de

- 1972 Studium Mathematik und Physik an der Universität Erlangen/Nürnberg
- 1977 Staatsexamen
- 1977 – 1986 Tätigkeit in der Fensterbauindustrie und am Institut für Fenstertechnik
- 1982 Promotion in Experimentalphysik
- Seit 1986 Professor an der FH Rosenheim (Bauphysik)

Veröffentlichungen und Vorträge zu den Themenbereichen Wärmeschutz, Isothermen, Glasstatik, Structural Glazing etc.

Mitglied in nationalen und internationalen Gremien und Ausschüssen

Wärmetransport durch Strahlung bei Bauwerken –

kaum beachtetes Potenzial für Mängel, z. B. bei Eissporthallen

1. Einleitung

Der Einfluss von Feuchtigkeit (Wasser) gehört nach wie vor zu den häufigsten Ursachen für Bauschäden. Dabei reicht das Schadensbild vom oberflächlichen Schimmelbefall bis zur vollständigen Zerstörung der Bausubstanz. In Frage kommt aufsteigendes Wasser, eindringender Niederschlag, manchmal ein undichtes Wasserrohr und vor allem auch Tauwasser.

Alles sollte so einfach wie möglich gemacht sein, aber nicht einfacher.

(Albert Einstein)

Ein gutes Beispiel für eine Vereinfachung ist der Wärmeübergang, also der Wärmetransport von einer Bauteiloberfläche in die angrenzende Umgebung. Den meisten Fachleuten ist bekannt, dass beim Wärmeübergang Wärmestrahlung und Konvektion eine Rolle spielen und alles ziemlich kompliziert ist. Für Berechnungen, z. B. für die Berechnung des Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) oder der Oberflächentemperatur, werden daher die Wärmeübergangswiderstände entsprechend den einschlägigen Normen DIN 4108 [1], DIN EN 6946 [2] angesetzt.

Dieses Vorgehen liefert z. B. für eine Isolierglasscheibe mit $U = 3,0 \text{ W/m}^2\text{K}$ bei innen $20 \text{ }^\circ\text{C}$ und außen $0 \text{ }^\circ\text{C}$ für die äußere Oberflächentemperatur:

$$T_{\text{Se}} = 0 \text{ }^\circ\text{C} + 0,04 \frac{\text{m}^2\text{K}}{\text{W}} \cdot 3,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} (20 \text{ }^\circ\text{C} - 0 \text{ }^\circ\text{C}) = 2,4 \text{ }^\circ\text{C}$$

Die äußere Oberfläche der Scheibe ist wärmer als die Außenluft, d. h. die Außenluft wird bei Kontakt mit der Scheibenoberfläche erwärmt. Unter diesen Umständen kann die Scheibe außen niemals beschlagen.

Sie tut es aber doch, insbesondere wenn es sich um ein Dachfenster handelt. Offensichtlich haben wir uns die Sache zu einfach gemacht.

Man kann die Sache aber auch an der falschen Stelle kompliziert machen. Häufig wird argumentiert, dass Tauwasser nur bei bestimmten Wetterlagen auftritt oder bei besonders hoher Luftfeuchte oder bei schlechter Belüftung oder bei Wind oder bei Windstille oder nur bei Berücksichtigung instationärer Vorgänge und Auswertung des Mollier'schen h-x-Diagramms. Dies alles mag im Einzelfall einen Einfluss haben, aber was ist entscheidend?

Es ist hier ganz einfach: Tauwasser auf einer Oberfläche tritt immer dann auf, wenn die Temperatur der Oberfläche unter der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft liegt. 'Dann und nur dann' wie der Mathematiker sagen würde. Alles andere ist „Nebelwerfen“.

Im Beispiel der Isolierglasscheibe sind die beteiligten Wärmekapazitäten viel zu gering, um entscheidende instationäre Effekte zu bewirken

und die Enthalpie wird allenfalls bei der Frage des „wie viel“ aber nicht beim „ob überhaupt“ benötigt. Die Oberflächentemperatur der Scheibe muss unterhalb der Temperatur der umgebenden Luft liegen! Die Frage ist: wie geht das?

Um das zu beantworten, muss man den Wärmeübergang, also den Wärmetransport von einer Oberfläche in die Umgebung genauer verstehen. Wesentlich sind zwei unterschiedliche Prozesse:

- Wärmeübertragung aus der umgebenden Luft
- Strahlungsaustausch mit den umgebenden Oberflächen.

2. Grundlagen

2.1 Strahlungsaustausch

Die Grundlagen der Wärmestrahlung sind im Abschnitt **Info 1 Wärmestrahlung** ausführlicher dargestellt, ebenso der Wärmetransport im Abschnitt **Info 2 Wärmetransport durch Strahlung**. Deshalb hier nur das Wichtigste knapp zusammengefasst.

Luft ist für Wärmestrahlung transparent. Die Strahlung transportiert daher die Energie direkt zum gegenüberliegenden absorbierenden Material. Die Wärmestromdichte der Strahlung kann wie folgt geschrieben werden:

$$q_r = C_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Dabei ist

T_1 die Temperatur der wärmeren Fläche

T_2 die Temperatur der kalten Fläche

C_{12} die Strahlungsaustauschzahl der beiden Flächen.

σ die Stefan-Boltzmann-Konstante.

Die Strahlungsaustauschzahl hängt vom Emissionsgrad der Flächen und von der Geometrie ab und ist im Allgemeinen nur numerisch zu berechnen. Für den wichtigen Fall großer paralleler Flächen mit einheitlicher Temperatur gilt:

$$C_{12} = \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1}$$

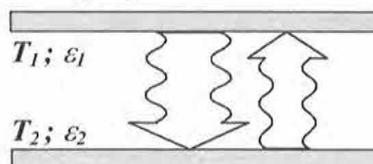


Bild 1:
Zum Strahlungsaustausch bei parallelen ebenen Flächen

Die üblichen Baumaterialien und Oberflächenbeschichtungen (Holz, Ziegel, Beton, Farben und Lasuren) besitzen bei Umgebungstemperatur einen Emissionsgrad zwischen 0,85 und 0,95 und emittieren und reflektieren annähernd diffus. Eine Tabelle mit Emissionsgraden und die Details zur Theorie der „diffusen grauen Strahler“, siehe **Info 1**.

Anders verhalten sich blanke Metalle bzw. Metalloberflächen. Die Emission ist gering bis verschwindend (Emissionsgrad bis 0,02), die Reflexion ebenso wie teilweise die Emission erfolgt stark gerichtet. Metalloberflächen sind daher wesentlich schwieriger zu behandeln. Für den Fall großer paralleler Flächen ist aufgrund der Symmetrie aber ebenfalls die oben angegebene Formel für die Strahlungsaustauschzahl gültig.

In den meisten bauphysikalisch relevanten Fällen sind die Temperaturen nicht allzu unterschiedlich und der Ausdruck für die Wärmestromdichte kann linearisiert werden:

$$q_r = C_{12} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3 \cdot \Delta T$$

Dabei ist T_m die mittlere Temperatur und ΔT_r die Temperaturdifferenz der wechselwirkenden Flächen. Der Faktor

$$b_r = C_{12} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

wird als Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung [2] bezeichnet. Setzt man für

$$T_m = 10 \text{ °C} = 283 \text{ K} \text{ und für } C_{12} = 0,8 \text{ wird } b_r = 4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

2.2 Konvektion

Bei Luft führen bereits geringe Temperaturgradienten zu einer thermisch induzierten Strömung. Größere Strömungsgeschwindigkeiten können z. B. durch Wind verursacht werden. Die Art der Strömung und die resultierende laminare Grenzschicht hängen kompliziert von der Geometrie der Oberflächen und den Anströmbedingungen ab und soll hier nicht im Detail behandelt werden. Vereinfachend wird in der Bauphysik für die konvektive Wärmestromdichte folgender Ansatz gewählt, siehe z. B. [2]:

$$q_c = h_c \cdot \Delta T_c$$

Dabei ist h_c der zumeist empirisch ermittelte konvektive Übergangskoeffizient und ΔT_c die Temperaturdifferenz zwischen der Oberfläche und der umgebenden Luft. *Tabelle 1* gibt typische Werte für den konvektiven Wärmeübergangskoeffizienten.



Bild 2: Zur Wärmeübertragung bei Konvektion

Tabelle 1: konvektiver Wärmeübergangskoeffizient [2]

	Wärmestromrichtung	h_c in $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
thermisch induziert	aufwärts	5,0
	horizontal	2,5
	abwärts	0,7
Wind mit Geschwindigkeit v in m/s	alle	$4 + 4 \cdot v$

2.3 Wärmeübergang

Die Summe der Wärmestromdichten durch Konvektion und durch Strahlung ergibt die gesamte Wärmestromdichte in die Umgebung:

$$q_{\text{ges}} = q_c + q_r = h_c \cdot \Delta T_c + b_r \cdot \Delta T_r$$

Ist es nicht erforderlich, zwischen der Temperatur der umgebenden Luft und der Temperatur der umgebenden Oberflächen zu unterscheiden, so können beide Anteile zu einem Übergangskoeffizienten zusammengefasst werden. Dies ist in normalen Innenräumen und außen bei bedecktem Himmel gut erfüllt. Der Kehrwert des Übergangskoeffizienten ist der Übergangswiderstand mit den bekannten Werten von $0,04 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ für außen und z. B. $0,13 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ für innen:

$$R_S = \frac{1}{b_c + b_r}$$

In manchen Fällen, und hierzu gehört die Überdachung einer Eishalle, ist es aber zwingend erforderlich, Konvektion und Strahlung getrennt zu behandeln. Hier steht die Decke einer Fläche gegenüber die zu einem Großteil der Zeit kälter als die Umgebungsluft ist. Dies führt natürlich zu Tauwasser bzw. da die Temperatur der Eisfläche unter 0 °C liegt zu Reif auf der Eisfläche. Aber auch die Decke kühlt durch den Strahlungsaustausch mit der Eisfläche ab und es kann zu Tauwasser kommen.

Ist der Himmel bzw. die Atmosphäre die umgebende Fläche (bzw. ein Teil von ihr), wird es noch komplizierter. Wolken verhalten sich annähernd wie ein schwarzer Strahler, aber bei klarem Himmel sind die infrarot aktiven Gase Wasserdampf (H_2O) und Kohlendioxyd (CO_2) entscheidend.

Wasserdampf absorbiert und emittiert zwischen 5 und $8 \mu\text{m}$ und oberhalb von $17 \mu\text{m}$, Kohlendioxyd zwischen 13 und $17 \mu\text{m}$. Die Einhüllende des Spektrums ist annähernd wie ein schwarzer Strahler, hat aber ein „Fenster“ zwischen 8 und $13 \mu\text{m}$, siehe *Bild 3*. Die Meteorologen haben für die Energiestromdichte (Bestrahlungsstärke der atmosphärischen Gegenstrahlung) verschiedene Näherungsformeln entwickelt bzw. geben die atmosphärische Gegenstrahlung für verschiedene Standorte als Stundenmittelwert konkret an [3].

Am einfachsten betrachtet man den Himmel als schwarzen Strahler (Emissionsgrad 1) mit einer „effektiven“ Temperatur. Die effektive Temperatur des bedeckten Himmels bei niederen Wolken entspricht etwa der Temperatur der umgebenden Luft. Bei klarem Himmel hängt die effektive Temperatur von der Orthöhe und Luftfeuchte ab und liegt zwischen -5 °C und -55 °C , im Hochgebirge auch darunter.

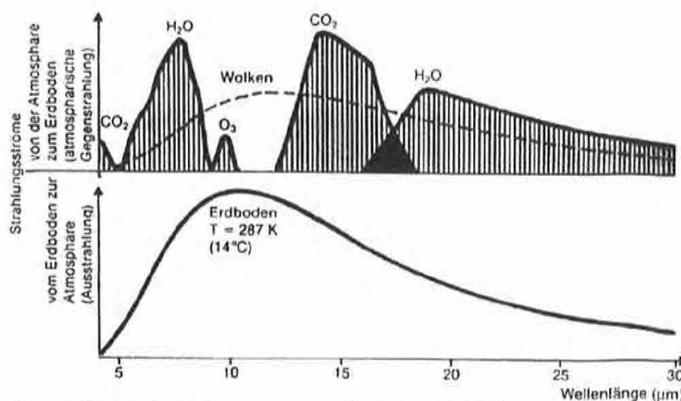


Bild 3: Spektralverteilung der von der Atmosphäre (atmosphärische Gegenstrahlung) und der von der Erdoberfläche ausgehenden Strahlung (Ausstrahlung) [4]

2.4 Tauwasser

Tauwasser tritt auf, wenn die Taupunkttemperatur unterschritten wird, in den meisten Fällen geschieht dies durch Kontakt mit einer kalten Fläche. Die Grundlagen hierfür sind ausführlich in **Info 3 Tauwasser** behandelt. Hier soll nur kurz der Einfluss auf den Wärmeübergang aufgezeigt werden.



Bild 4: Zur Wärmeübertragung bei Kondensation

Kommt es zur Bildung von Tauwasser (Kondensation), so wird die latente Wärme des Phasenübergangs gasförmig-flüssig frei (Verdampfungswärme).

$$q_{\text{Tau}} = m_{\text{Tau}} \cdot r$$

dabei ist m die Tauwassermenge pro Zeit und Fläche in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und

$r = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ die latente Wärme (besser Enthalpiedifferenz) des Phasenübergangs.

Bei vielen bauphysikalischen Berechnungen z. B. beim *Glaser*-Verfahren kann diese Wärmestromdichte vernachlässigt werden. Zur Abschätzung der maximalen Tauwassermenge an Oberflächen ist sie aber entscheidend.

3. Überdachung einer Eisfläche

3.1 Grundprinzip

Die Decke steht der kalten Eisfläche gegenüber, siehe die schematische Darstellung in *Bild 5*. Durch den Strahlungsaustausch (Strahlung im langwelligen Infraroten um $10 \mu\text{m}$) kühlt die Decke unter die Temperatur der Umgebungsluft ab. Wird dabei die Taupunkttemperatur unterschritten, kommt es zu Tauwasserbildung an der Unterseite der Decke. Durch die Kondensation wird die latente Wärme beim Phasenübergang gasförmig-flüssig frei, dies stellt einen weiteren Wärmestrom dar. Die Tauwassermenge hängt davon ab, wie weit die Taupunkttemperatur unterschritten wird und wie viel Wasserdampf herangeführt wird. Die maximale Tauwassermenge lässt sich aus Energiebetrachtungen abschätzen.

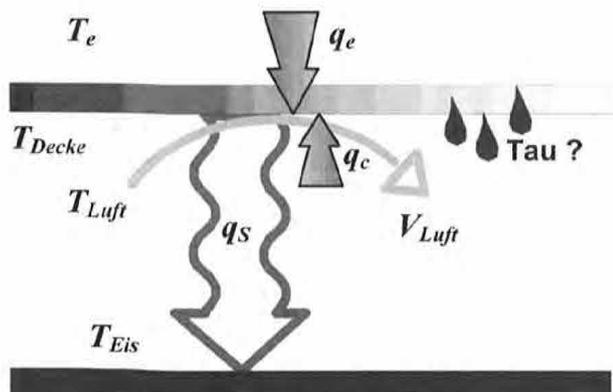


Bild 5: Schematische Darstellung der Wärmeströme und Temperaturen an einer Decke über einer Eisfläche.

3.2 Ein Lösungsansatz

Um einen ersten Überblick über die Lösung zu erhalten, sind die folgenden Informationen erforderlich bzw. werden als bekannt angenommen:

- Klimabedingungen:
Lufttemperatur T_{Luft}
Luftfeuchte, angegeben durch die Taupunkttemperatur T_{Tau}
Luftgeschwindigkeit in der Halle v_{Luft}
Die Eisfläche liegt in der Regel zwischen -3°C und -8°C , angenommen werden -5°C
- Dachaufbau
Wärmedurchlasswiderstand des Daches $R_{\text{Dach}} = 0,3 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$ (NH 40 mm).
Der äußere Übergangswiderstand $R_{\text{Se}} = 0,10 \text{ m}^2\text{K}/\text{W}$.
- Emissionsgrad
Emissionsgrad für Holz und Eis ca. 0,92

Ansatz der Wärmeströme

- Wärmestrom von oben durch das Dach:

$$q_e = U^* \cdot (T_e - T_{\text{Decke}}) \text{ mit } U^* = \frac{1}{R_{\text{Dach}} + R_{\text{Se}}}$$

- Konvektiver Wärmestrom der Luft unter dem Dach

$$q_c = h_c \cdot (T_{\text{Luft}} - T_{\text{Decke}})$$

wobei der konvektive Übergangskoeffizient von der Luftgeschwindigkeit abhängt

$$h_c = \left(4 + 4 \cdot \frac{v}{\text{m/s}} \right) \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

- Wärmestrom durch Kondensation:

$$q_{\text{Tau}} = m_{\text{Tau}} \cdot r$$

dabei ist m die Tauwassermenge pro Zeit und Fläche in $\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})$ und

$r = 2,5 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ die latente Wärme des Phasenübergangs gasförmig-flüssig.

- Strahlungsaustausch mit der Eisfläche:

$$q_r = h_r \cdot (T_{\text{Decke}} - T_{\text{Eis}});$$

dabei ist $h_r = \frac{1}{1/\epsilon_1 + 1/\epsilon_2 - 1} \cdot 4 \cdot \sigma \cdot T_m^3$ der Übergangskoeffizient für Strahlung.

Mit einer mittleren Temperatur um 2°C und einem Emissionsgrad für

Holz und Eis von 0,92 ergibt sich $h_r = 4 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$.

Bilanzgleichung

Im Gleichgewicht sind zu- und abfließende Wärmeströme gleich, also

$$q_e + q_c + q_{\text{Tau}} = q_r \quad (*)$$

Anmerkung: „Gleichgewicht“ berücksichtigt keine instationären Prozesse. In Wirklichkeit ändern sich die Umgebungsbedingungen aber ständig. Wegen der im Allgemeinen geringen Wärmekapazitäten sind die Zeitkonstanten aber klein und das stationäre Modell liefert ausreichend genaue Ergebnisse. Insbesondere werden die Grundprinzipien richtig wiedergegeben.

Durch Einsetzen und Auflösen von (*) nach der Oberflächen- temperatur des Daches erhält man:

$$T_{\text{Decke}} = \frac{m_{\text{Tau}} \cdot r + U^* \cdot T_e + h_c \cdot T_{\text{Luft}} + h_r \cdot T_{\text{Eis}}}{U^* + h_c + h_r}$$

Tauwassermenge

Die maximale Tauwassermenge lässt sich abschätzen, indem man in (*) die Deckentemperatur gleich der Taupunkttemperatur der Umge- bungsluft setzt und nach der Tauwassermenge auflöst, man erhält:

$$m_{\text{Tau}} = \frac{1}{r} \left((U^* + h_c + h_r) \cdot T_{\text{Tau}} - (U^* \cdot T_e + h_c \cdot T_{\text{Luft}} + h_r \cdot T_{\text{Eis}}) \right)$$

Berücksichtigt man die laminare Grenzschicht lässt sich die Tau- wassermenge etwas genauer abschätzen. Die Dicke der Grenzschicht liegt je nach Windgeschwindigkeit in der Größenordnung von einigen mm. In größerem Abstand ist aufgrund turbulenter Durchmischung der Wasserdampfpartialdruck konstant. Die Grenzschicht bildet somit einen maximalen Diffusionswiderstand von

$$Z = 1,5 \cdot 10^6 \frac{m \cdot h \cdot Pa}{kg} \cdot 0,01 \text{ m} = 15 \frac{m^2 \cdot h \cdot Pa}{g}$$

für dessen Überwindung eine Dampfdruckdifferenz von

$$\Delta p = Z \cdot \dot{m}_{\text{Tau}}$$

erforderlich ist. Diese Druckdifferenz liegt typischerweise in der Grö- ßenordnung von 100 Pa oder weniger. Die Oberflächentemperatur muss also um einige Zehntel Grad unter der Taupunkttemperatur lie- gen.

Berücksichtigt man die Grenzschichtdiffusion, führt die Nichtline- arität des Dampfdrucks leider zu einem nichtlinearen Gleichungssys- tem, welches man am besten iterativ löst.

Beispiel

Die Temperatur der Decke einer offenen Halle mit einem einfachen Dachaufbau (NH-Schalung und Blecheindeckung) über einer Eisflä- che soll berechnet werden. Die Eisfläche hat eine Temperatur von -5 °C, die Umgebungsluft ist bei +5 °C trocken, es ist windstill und der Himmel ist bedeckt. Die Hilfsgrößen werden zuerst berechnet:

- Dach:

$$U^* = \frac{1}{R_{\text{Dach}} + R_{\text{Se}}} = \frac{1}{0,3 + 0,1} \frac{W}{m^2 K} = 2,5 \frac{W}{m^2 K}$$

- konvektiver Wärmeübergang bei Windstille $v = 0$:

$$h_c = \left(4 + 4 \cdot \frac{v}{m/s} \right) \frac{W}{m^2 K} = (4 + 0) \frac{W}{m^2 K} = 4 \frac{W}{m^2 K}$$

- Wärmeübergang durch Strahlung: $h_r = 4 \frac{W}{m^2 K}$

- wegen trockener Luft keine Tauwasserbildung: $m_{\text{Tau}} = 0$

Einsetzen aller Werte liefert:

$$T_{\text{Dach}} = \frac{m_{\text{Tau}} \cdot r + U^* \cdot T_e + h_c \cdot T_{\text{Luft}} + h_r \cdot T_{\text{Eis}}}{U^* + h_c + h_r} = \frac{0 + 2,5 \cdot 5 \text{ °C} + 4 \cdot 5 \text{ °C} + 4 \cdot (-5 \text{ °C})}{2,5 + 4 + 4} = 1,2 \text{ °C}$$

Damit tritt bei einer Luftfeuchte von 80 % entsprechend einer Tau- punktttemperatur von 1,8 °C bereits Tauwasser auf.

Bei einem schwachen Wind von 1 m/s würde die Temperatur bei 2,2 °C liegen und gerade noch kein Tauwasser auftreten.

Für das Beispiel ergibt sich bei 5 °C und 80 % Luftfeuchte die maxi- male Tauwassermenge zu

$$m_{\text{Tau}} = \frac{1}{2,5 \cdot 10^6 \frac{J}{kg}} \left((2,5 + 4 + 4) \cdot 1,8 - (2,5 \cdot 5 + 4 \cdot 5 + 4 \cdot (-5)) \right) \frac{W}{m^2} = 2,56 \cdot 10^{-6} \frac{kg}{m^2 s} = 9,2 \frac{g}{m^2 h}$$

3.3 Verhalten bei realen Klimabedingungen

Wirklichkeitsnahe Klimadaten stehen für verschiedene Klimaregio- nen in Form der Test-Referenz-Jahre (TRY) zur Verfügung [3]. Diese Datensätze enthalten unter anderem die hier relevanten Klimadaten Lufttemperatur, Luftfeuchte und Windgeschwindigkeit als Stunden- werte und können direkt als Eingabedaten für die Berechnung der Ober- flächentemperatur und gegebenenfalls der maximalen Tauwassermenge dienen.

Der im vorherigen Kapitel entwickelte Lösungsansatz für eine Dach- fläche wurde zur Berechnung von BS-Holz-Binder, welche als Tragkon- struktion unterhalb der Decke liegen, wie folgt modifiziert:

- der Wärmestrom von außen durch das Dach wurde vernachlässigt.
- die Wärmespeicherefähigkeit wurde durch eine effektive Wärme- kapazität [5] berücksichtigt.

Für die Berechnung wurde das Jahr TRY09 gültig für das Alpenvor- land (Station München-Riem) zugrunde gelegt. Ausgewertet wurden 90 Tage beginnend mit dem 1. Oktober. Die folgenden Bilder zeigen jeweils die Temperatur und die relative Luftfeuchte in der Halle und an der unteren, der Eisfläche zugewandten Oberfläche eines BS-Binders. Außerdem ist die kumulierte Tauwassermasse mit angegeben.

Bild 6 zeigt die Verhältnisse bei einer allseitig offenen Halle ohne Eisfläche. Temperatur und Luftfeuchte am BS-Binder entsprechen den

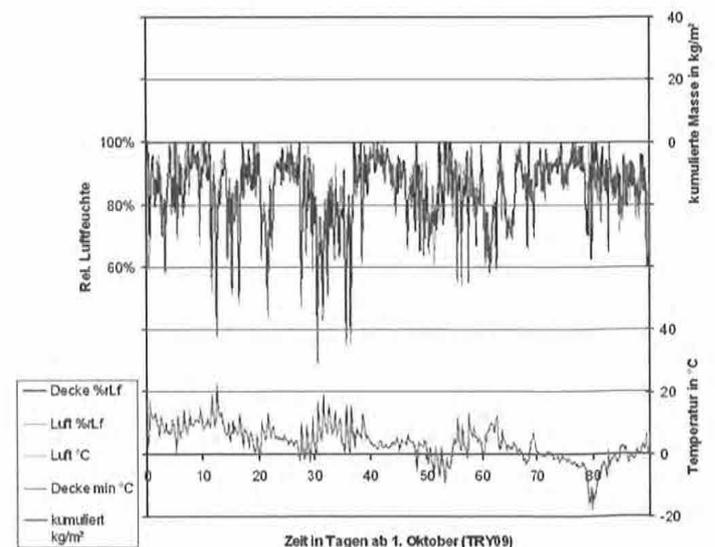


Bild 6: Temperatur und relative Luftfeuchte in der Halle und an der Oberfläche eines BS-Binders. Halle offen ohne Eisfläche.

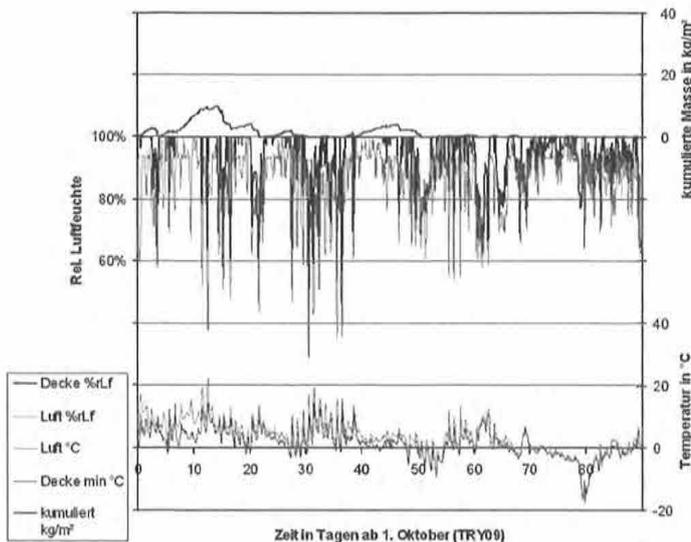


Bild 7: Temperatur und relative Luftfeuchte in der Halle und an der Oberfläche eines BS-Binders. Halle offen mit Eisfläche.

Werten in der Halle bzw. im Freien. Nur an wenigen Tagen kommt es kurzzeitig zu Tauwasser (Luftfeuchte 100 %).

Bild 7 entspricht den Verhältnissen aus Bild 6, aber nun mit einer 5 °C kalten Eisfläche. Die Temperatur der BS-Binder liegt in den Oktobertagen erheblich unter der Lufttemperatur, die relative Luftfeuchte ist hoch. Dementsprechend groß ist die Menge an Tauwasser welche kumuliert Mitte Oktober (um Tag 15.) ein Maximum von ca. 10 kg/m² erreicht. Im Dezember bei mittleren Außentemperaturen unter 0 °C kühlt die Eisfläche nur noch wenig und die Oberflächenfeuchte trocknet wieder ab.

Anmerkung:

Im Modell wurde die Sorption des Wassers nicht berücksichtigt. Die kumulierte Tauwassermasse „liegt“ auf der Oberfläche und trocknet von dort auch wieder ab.

Häufig werden Hallen entgegen der ursprünglichen Planung später ganz oder teilweise geschlossen. Damit werden die Windgeschwindigkeit und der konvektive Wärmestrom reduziert. Die Binder kühlen noch stärker ab, dementsprechend verlängert sich die Zeit der Tauwasserbildung, siehe Bild 8. Die kumulierte Tauwassermasse erreicht fast 30 kg/m² und trocknet bis Ende Dezember noch nicht ab.

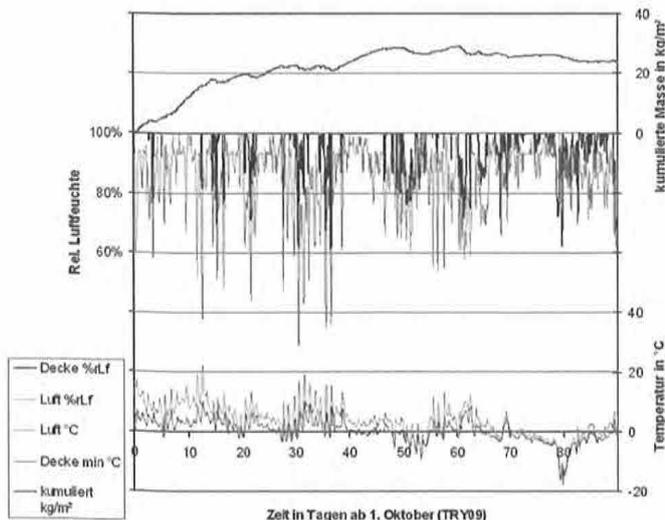


Bild 8: Temperatur und relative Luftfeuchte in der Halle und an der Oberfläche eines BS-Binders. Halle geschlossen (25% Windgeschwindigkeit) mit Eisfläche.

4. Fazit

Um die Tauwasserbildung an Oberflächen beurteilen zu können und gegebenenfalls Tauwassermengen abzuschätzen, genügt es in vielen Fällen nicht, einen tabellierten Wärmeübergangswiderstand zu verwenden. Unterscheidet sich die Lufttemperatur von der Temperatur der relevanten Strahlungsflächen, so müssen Wärmetransport durch Luftströmung und durch Strahlung getrennt behandelt werden.

Bei einem kalten „Gegenüber“, sei es der klare Himmel oder eine Eisfläche, ist die Oberflächentemperatur immer kälter als die umgebende Luft. Dies führt manchmal zu unerwarteten Ergebnissen:

- Dachflächenfenster mit gut wärmedämmenden Scheiben beschlagen häufig und werden vom Kunden beanstandet.
- Super-3fach-Wärmedämm-Glas in den Chefetagen von Bürotürmen ist in den Morgenstunden von außen beschlagen, der Blick nach draußen ist eingeschränkt. Ist das ein Baumangel?
- Dächer über Eisflächen sind die meiste Zeit nass und es tropft besonders in der Übergangszeit bei herbstlichen Temperatur und hohe Luftfeuchte. Häufig werden dann undichte Stellen in der Eindeckung gesucht und auch etwas repariert – meist ohne Erfolg.

Schuld an der „Unterkühlung“ und damit an der Tauwasserbildung mit eventuellen Folgeschäden ist der Wärmetransport durch Strahlung, vereinfacht gesagt die „Abstrahlung der Wärme“. Damit gibt es drei Möglichkeiten:

- Verminderung des Strahlungsaustausches
- Ersetzen des Wärmeverlustes
- Verhindern von Folgeschäden.

Maßgebend für den Strahlungsaustausch ist der Emissionsgrad der beteiligten Oberflächen. Die Oberflächen der meisten Baumaterialien strahlen gut ab, d.h. der Emissionsgrad liegt um 0,9. Gibt es auch Oberflächen mit einem niederen Emissionsgrad?

Hier zeigt ein Blick auf das Wärmeschutz-Isolierglas die Lösung: Beschichtungen für Wärmeschutz-Isolierglas haben heute einen Emissionsgrad von typisch 0,03. Leider sind diese Schichten empfindlich und nur im geschützten Zwischenraum von Isolierglas verwendbar. Aber es gibt auch Glas mit einer beständigen Schicht mit einem Emissionsgrad von 0,16.

Andererseits haben alle blanken glänzenden Metalle einen geringen Emissionsgrad, aber jede Art von Oberflächenbehandlung wie Lackieren von Stahl oder anodisch Oxidieren (Eloxieren) von Aluminium bringt den Emissionsgrad in die Nähe von 0,9. Es bleibt z. B. verzinkter Stahl oder pressblankes Aluminium mit einem Emissionsgrad vom 0,05 bis etwa 0,2 je nach Zustand.

Eine interessante Möglichkeit sind neuartige Lacke mit einem reduzierten Emissionsvermögen. Die Lackhersteller arbeiten seit einiger Zeit intensiv daran und erste Produkte kommen gerade auf den Markt.

Eine weitere Möglichkeit ist die Installation einer Zwischenschicht wie in [6] vorgeschlagen. Die Wirkung ist ähnlich einer Beschattung. Besonders wirksam wäre eine Zwischenschicht mit geringem Emissionsgrad, z. B. pressblankes Aluminium oder verzinktes Stahlblech.

Kann die Abstrahlung der Wärme nicht verhindert werden, so muss sie eben durch Heizen ersetzt werden. Beheizbare Glasscheiben gibt es seit langem und könnten für die Chefetage eine Lösung sein. Ein beheiztes Dach, obwohl technisch möglich und sicher tauwasserfrei, ist für ein Eisstadion weniger geeignet.

Info 1 Wärmestrahlung

Grundbegriffe

Die Atome jeder Körperoberfläche strahlen Energie in Form von elektromagnetischer Strahlung (elektromagnetischer Wellen) aus. Diese Art der Strahlung wird als Wärme- oder Temperatur-Strahlung bezeichnet und ist in den üblichen Lehrbüchern zur Physik bzw. Bauphysik unter der Überschrift „Schwarzer Körper“ teilweise stark verkürzt behandelt. Hier sollen daher die wesentlichen Grundlagen nochmals im Zusammenhang dargestellt werden. Die Bezeichnungen und Symbole der physikalischen Größen entsprechen DIN EN ISO 9288 [1].

Eine Kenngröße der elektromagnetischen Strahlung ist je nach Betrachtungsweise die Energie E der Photonen oder die Wellenlänge λ bzw. die Frequenz f der Welle.

Es gilt $\lambda \cdot f = c_0$ und $E = h \cdot f$; dabei ist $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{Ws}^2$ das Planck'sche Wirkungsquantum bzw. $c_0 = 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ die (Vakuum-) Lichtgeschwindigkeit.

Nach ISO 9288 wird der Wellenlängenbereich von $0,1 \mu\text{m}$ bis $100 \mu\text{m}$ als Wärmestrahlung bezeichnet und umfasst damit den Bereich der Solarstrahlung und insbesondere auch das Licht (sichtbare Strahlung, Wellenlänge $0,38$ bis $0,78 \mu\text{m}$). Umgangssprachlich wird dagegen unter Wärmestrahlung meist „unsichtbare Strahlung, die wärmt“ verstanden, eine Ursache für manche Missverständnisse.

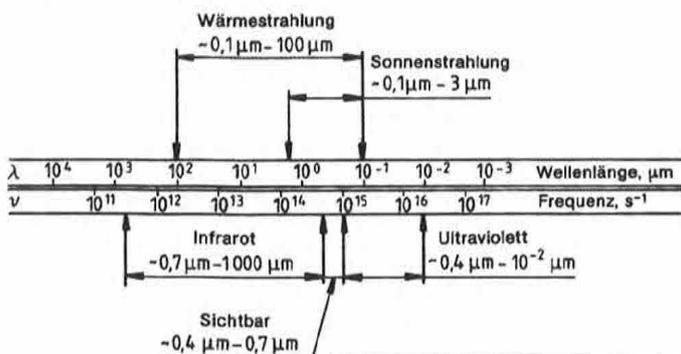
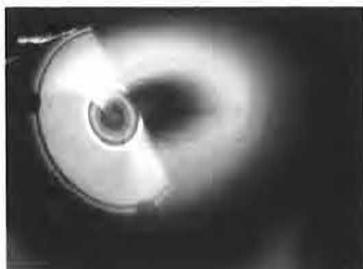


Bild 1:
a) Elektromagnetisches Spektrum [1]
b) Reflexion von Sonnenstrahlung an einer Compact-Disk



Die „Intensität“ der abgestrahlten Energie, d. h. die Anzahl der Photonen, bzw. die Amplitude der Welle, hängt von der Photonenenergie bzw. der Wellenlänge und der Ausstrahlungsrichtung ab. Bezeichnet man die Strahlungsleistung, siehe Bild 2, die von einem Flächenelement dA im Wellenlängenbereich zwischen λ und $\lambda + d\lambda$ in eine be-

stimmte Richtung (θ, φ) in den Raumwinkel $d\Omega = \sin\theta \cdot d\varphi \cdot d\theta$ abgestrahlt wird mit $d\Phi$, so definiert die folgende Gleichung die **spektrale Strahllichte**: $L_{\Omega\lambda}$

$$d\Phi(\theta, \varphi, \lambda) = L_{\Omega\lambda}(\theta, \varphi, \lambda) \cdot \cos\theta \cdot dA \cdot d\Omega \cdot d\lambda$$

Anmerkung:

Der Cosinus-Faktor berücksichtigt die Projektion der Fläche auf die Strahlrichtung.

Wie in der Bauphysik üblich werden die radiometrischen Größen abhängig von der Wellenlänge angegeben, siehe DIN EN ISO 9288. Man unterscheidet zwischen „spektralen“ Größen, welche die Wellenlängenabhängigkeiten beschreiben, und über alle Wellenlängen integrierten „Gesamtgrößen“. Außerdem unterscheidet man zwischen richtungsabhängigen „gerichteten“ Größen und über den Halbraum integrierten „hemisphärischen“ Größen. Die spektrale Strahllichte ist z. B. eine gerichtete spektrale Größe.

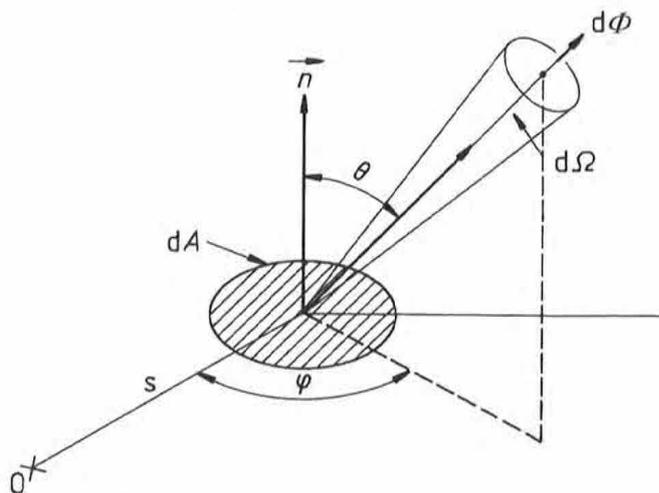


Bild 2: Zur Definition der Strahllichte [1]

Daraus abgeleitet ergeben sich noch die folgenden Begriffe:

- die (Gesamt-)Strahllichte $L_{\Omega}(\theta, \varphi)$ durch Integration über alle Wellenlängen:

$$d\Phi(\theta, \varphi) = L_{\Omega}(\theta, \varphi) \cdot \cos\theta \cdot dA \cdot d\Omega$$

- die spezifische spektrale Ausstrahlung $M_{\lambda}(\lambda)$ durch Integration über alle Richtungen des Halbraumes:

$$d\Phi(\lambda) = M_{\lambda}(\lambda) \cdot dA \cdot d\lambda$$

- die spezifische Ausstrahlung M durch Integration über alle Richtungen des Halbraumes und über alle Wellenlängen (hemisphärische Gesamtgröße):

$$d\Phi = M \cdot dA$$

Ist die spektrale Strahllichte unabhängig vom Winkel: $L_{\Omega\lambda}(\theta, \varphi, \lambda) = L_{\lambda}(\lambda)$, so nennt man die Strahlung **diffus** oder auch isotrop (Lambert Strahler). Durch Integration über den Halbraum folgt dann:

$$\iint L_{\Omega\lambda}(\theta, \varphi, \lambda) \cos\theta \, dA \, d\Omega \, d\lambda = L_{\lambda}(\lambda) \, dA \, d\lambda \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\pi/2} \cos\theta \sin\theta \, d\theta = \pi \cdot L_{\lambda}(\lambda) \, dA \, d\lambda$$

Bei diffuser Ausstrahlung gilt also: $M_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot L_{\lambda}(\lambda)$

Der schwarze Körper

Ein schwarzer Körper absorbiert die gesamte auf ihn einfallende Strahlung unabhängig von Wellenlänge und Einfallswinkel. Der zweite Hauptsatz der Thermodynamik fordert für den schwarzen Körper maximale und richtungsunabhängige (diffuse) Ausstrahlung (Kirchhoff 1859).

Die spezifische spektrale Ausstrahlung des schwarzen Körpers konnte aus sehr grundlegenden physikalischen Prinzipien abgeleitet werden (Planck 1900) und hängt nur von der Temperatur des Körpers ab (**Planck'sches Strahlungsgesetz**):

$$M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \frac{2\pi \cdot h \cdot c_0^2}{\lambda^5 \cdot \left(\exp\left(\frac{hc_0}{k\lambda T}\right) - 1 \right)}$$

Anmerkung:

Größen mit hochgestelltem Index ° bezeichnen den schwarzen Körper [1].

Bild 3 zeigt die spektrale Strahllichte des schwarzen Körpers für verschiedene Temperaturen in doppellogarithmischer Darstellung. Wegen der diffusen Ausstrahlung gilt für die spektrale Strahllichte:

$$L_{\Omega\lambda}^{\circ}(\theta, \varphi, \lambda) = L_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T) = \frac{1}{\pi} \cdot M_{\lambda}^{\circ}(\lambda, T)$$

Bei Umgebungstemperatur (ca. 300 K) erfolgt die Ausstrahlung vollständig im Infraroten zwischen etwa 3 µm und 50 µm. Bei 1000 K erfolgt bereits ein Teil der Ausstrahlung im Sichtbaren (Rotglut), bei

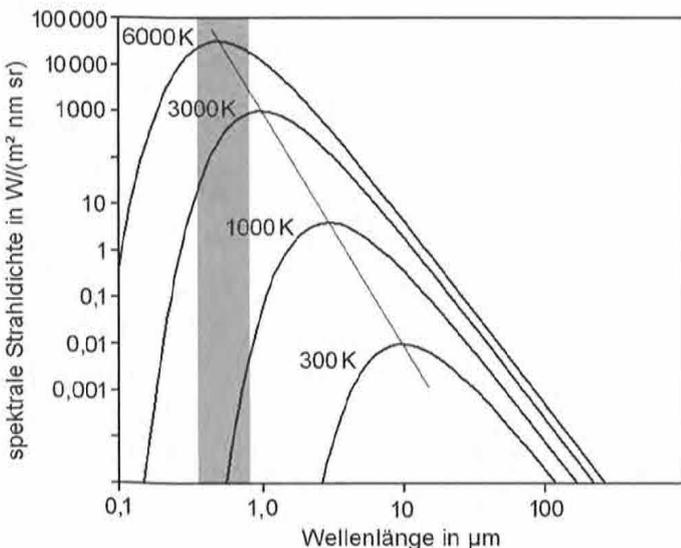


Bild 3: Spektrale Strahllichte des schwarzen Körpers für Temperatur 300 K bis 6000 K abhängig von der Wellenlänge. Der sichtbare Bereich des elektromagnetischen Spektrums ist grau hinterlegt.

6000 K (Temperatur der Sonnenoberfläche) liegt das Maximum der Ausstrahlung bei ca. 0,5 µm mitten im Sichtbaren.

Die Maxima der Verteilung liegen in der doppellogarithmischen Darstellung auf einer Geraden. Die Verschiebung der Maxima wird durch das **Wien'sche Verschiebungsgesetz** beschrieben:

$$\lambda_{\max} \cdot T = 2898 \, \mu\text{m} \cdot \text{K}$$

Integration über die Wellenlänge liefert für die spezifische Ausstrahlung des schwarzen Körpers das bekannte **Stefan-Boltzmann-Gesetz** (Stefan 1879; Boltzmann 1884):

$$M^{\circ}(T) = \sigma \cdot T^4$$

mit der Stefan-Boltzmann-Konstanten

$$\sigma = \frac{2 \pi^5 k^4}{15 h^3 c_0^2} = 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{K}^4}$$

Die beste experimentelle Realisierung des schwarzen Körpers besteht aus einer Öffnung zu einem Hohlraum mit absorbierenden Wänden, daher auch die Bezeichnung „Hohlraumstrahlung“. Ein anschauliches, wenn auch nicht exaktes Beispiel für einen schwarzen Körper ist ein Keramikofen mit offener Tür, je nach Temperatur strahlt der Hohlraum unterschiedlich intensiv in dunkelrot, hellrot, gelb oder fast weiß, siehe **Bild 4**. Bei einer gleichmäßigen Temperatur im Ofen strahlt alles gleich und die Tonschalen sind nicht mehr zu erkennen.



Bild 4: Tonschalen im Keramikofen, heiße Stellen in Gelbglut (ca. 1200 °C)

Reale Körper

Die Emission (Ausstrahlung) realer Körper hängt von der Körperoberfläche, der Wellenlänge und der Emissionsrichtung ab, ist aber immer geringer als die Emission des schwarzen Körpers unter gleichen Bedingungen. Man bezieht daher die Emission realer Körper auf die Emission des schwarzen Körpers. Als Verhältnissgrößen sind die folgenden Begriffe immer dimensionslos (Einheit 1):

- der gerichtete spektrale Emissionsgrad:

$$\varepsilon_{\Omega\lambda}(\theta, \lambda) = \frac{L_{\Omega\lambda}}{L_{\Omega\lambda}^{\circ}}$$

und als Spezialfall der normale spektrale Emissionsgrad

$$\epsilon_{n\lambda}(\lambda) = \epsilon_{\Omega\lambda}(0; \lambda)$$

- der hemisphärische spektrale Emissionsgrad:

$$\epsilon_{\lambda}(\lambda) = \frac{M_{\lambda}}{M_{\lambda}^{\circ}}$$

- der gerichtete (Gesamt-)Emissionsgrad:

$$\epsilon_{\Omega}(\theta) = \frac{L_{\Omega}}{L_{\Omega}^{\circ}} \text{ speziell der normale (Gesamt-)Emissionsgrad}$$

$$\epsilon_n = \epsilon_{\Omega}(0)$$

- der hemisphärische Gesamtemissionsgrad:

$$\epsilon = \frac{M}{M^{\circ}}$$

Ist der gerichtete Emissionsgrad unabhängig von der Richtung, nennt man den Strahler **diffus**, isotrop oder auch Kugelstrahler. Der gerichtete Emissionsgrad senkrecht zur Oberfläche wird auch als **normaler Emissionsgrad** bezeichnet.

Ist der spektrale Emissionsgrad unabhängig von der Wellenlänge, nennt man den Strahler **grau**. Ideal diffuse graue Strahler können durch Angabe eines einzigen Wertes, des hemisphärischen Gesamtemissionsgrades ϵ charakterisiert werden. Dagegen ist die vollständige Charakterisierung eines allgemeinen realen Körpers durch den gerichteten spektralen Emissionsgrad $\epsilon_{\Omega\lambda}$ sehr aufwändig.

Metalle und Nichtmetalle

Ein grundsätzlicher Unterschied besteht zwischen elektrisch leitfähigen Materialien (Metalle) und elektrischen Nichtleitern (Nichtmetalle), genauer zwischen elektrisch leitfähigen und elektrisch nicht leitfähigen Oberflächen. Elektrisch leitfähige Oberflächen besitzen generell ein geringes Emissionsvermögen mit einem ausgeprägten Maximum bei großen Emissionswinkeln. Nichtleitende Oberflächen besitzen hingegen ein hohes und meist vom Winkel nur wenig abhängiges Emissionsvermögen, siehe *Bild 5*. Das Emissionsvermögen kann daher gut durch den normalen Emissionsgrad beschrieben werden. Für Holz ist z. B. der normale Gesamtemissionsgrad mit 0,94 bis zu einem Emissionswinkel von 60° gültig und nimmt dann stetig ab, der hemisphäri-

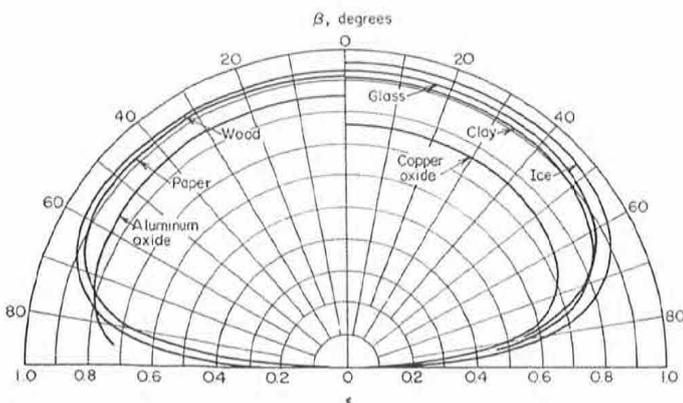


Bild 5: gerichteter Gesamtemissionsgrad einiger Nichtmetalle (Aluminiumoxyd, Papier, Holz, Glas, Kupferoxyd, Ton, Eis) abhängig vom Emissionswinkel [2].

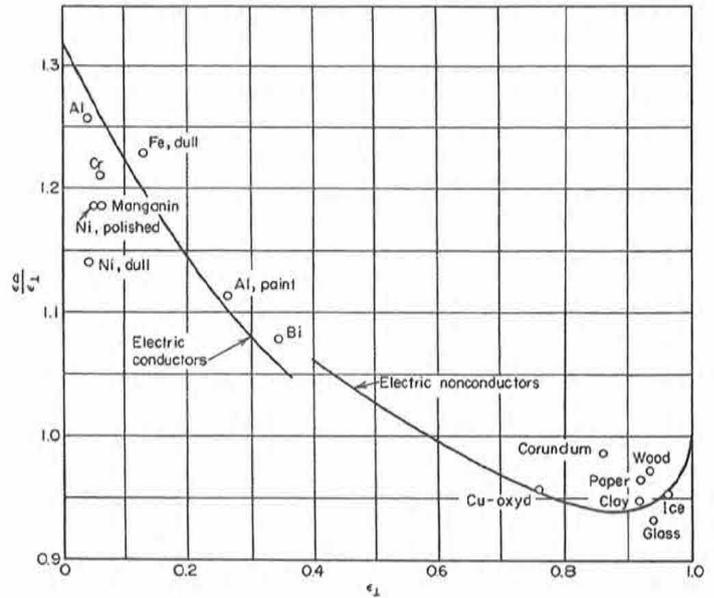


Bild 6: Zusammenhang von hemisphärischen und normalen Emissionsgrad [2].

sche Gesamtemissionsgrad ist mit 0,92 daher etwas geringer. *Bild 6* zeigt den Zusammenhang zwischen hemisphärischen und normalen Emissionsgrad für einige typische Metalle und Nichtmetalle. In der Praxis wird häufig nur der normale Emissionsgrad experimentell bestimmt und der hemisphärische Emissionsgrad mit Hilfe eines Korrekturfaktors berechnet [3].

Bild 7 zeigt den normalen spektralen Emissionsgrad für einige Nichtmetalle einschließlich Nadelholz. Die Spektren sind im nahen Infrarot (0,78 – 2,5 µm) stark strukturiert, liegen aber im mittleren Infrarot (2,5 µm bis 50 µm), d. h. im Bereich der 300-K-Strahlung, für fast alle nicht leitenden Materialien einheitlich um ca. 0,90.

Für viele praxisrelevante Berechnungen ist der Gesamtemissionsgrad ausreichend genau. Dieser wird entweder durch direkte Messung oder durch Gewichtung des spektralen Emissionsgrades mit der spektralen spezifischen Ausstrahlung des schwarzen Körpers $M_{\lambda}^{\circ}(T)$ z. B. bei 283 K [3] ermittelt:

$$\epsilon = \frac{M}{M^{\circ}} = \frac{\int M_{\lambda} d\lambda}{\int M_{\lambda}^{\circ} d\lambda} = \frac{\int \epsilon_{\lambda} \cdot M_{\lambda}^{\circ}(T) d\lambda}{M^{\circ}(T)} = \sum \epsilon_{\lambda} \cdot \Delta\lambda^*$$

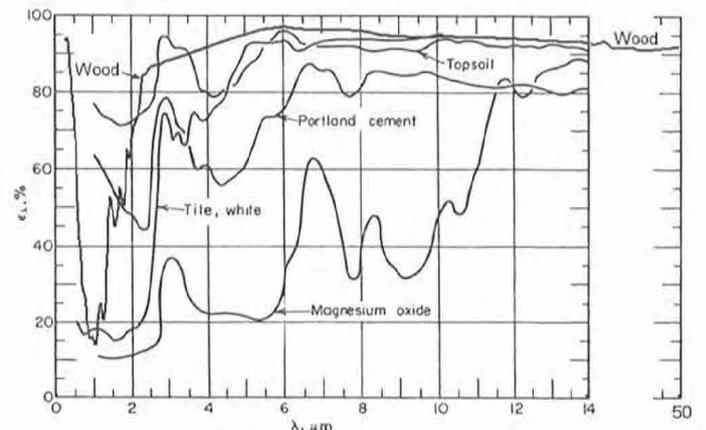


Bild 7: Normaler spektraler Emissionsgrad einiger Nichtmetalle (Magnesiumoxyd, Weiße Keramik, Zement, Ackerboden) abhängig von der Wellenlänge [2]. Ergänzung: Wood (Nadelholz, Fichte, eigene Messung).

Der normale Gesamtemissionsgrad, teilweise auch der hemisphärische Gesamtemissionsgrad sind in der Fachliteratur für eine Vielzahl von Materialien zu finden, eine Auswahl ist in *Tabelle 1* zusammengestellt. Zu beachten ist, dass der Emissionsgrad stark von der jeweiligen Oberflächenqualität abhängt. Unterschiedliche Quellen können daher

unterschiedliche Werte angeben. Die Tabellenwerte dienen zur Orientierung, reichen aber in der Regel für bauphysikalische Berechnungen völlig aus. Ist im Einzelfall eine größere Genauigkeit erforderlich, sollten die Werte an den konkreten Materialien bzw. Oberflächen experimentell bestimmt werden.

Tabelle 1: Emissionsgrade einiger Materialien bei Umgebungstemperatur (0 °C bis 200 °C)

* normal; ** hemisphärisch

Metalle	[2] *	[4] (**)	[5]	[6] (**)
Aluminium, blank gewalzt	0,039	0,039 (0,049)	0,07	
Kupfer, poliert	0,030	0,030	0,05	
Kupfer, schwarz oxidiert	0,78	0,78	0,78	
Gold, poliert	0,018	0,018	0,03	0,020 - 0,035
Silber, poliert	0,02	0,022	0,02	
Messing, poliert	0,05	0,035	0,05	
verzinkter Stahl, oxidiert		0,276		
Beschichtungen				
Aluminium Lack	0,2 - 0,4			
2 µm Öl auf Eisen poliert	0,22			
20 µm Öl auf Eisen poliert	0,81		0,82	
Lack, weiß	0,93	0,925	0,91	0,91
Lack, schwarz, matt	0,97	0,97		
Nichtmetalle				
Ziegel	0,93	(0,93)	0,93 - 0,95	
Glas	0,94	0,94	0,94	0,91
Raureif	0,98	0,985		0,985
Eis, glatt	0,966	0,966		0,965 (0,918)
Kalkstein	0,95			
Marmor, weiß	0,95		0,93	
Porzellan		(0,924)	0,92	
Teerpappe	0,93	0,91	0,91	
Samt, schwarz	0,97			
Wasser (> 0,1 mm)	0,96	0,95	0,96	0,965 (0,91)
Laubholz (Buche)	0,93	0,94 (0,91)	0,90	0,94 (0,91)
Papier, weiß, matt		(0,92)		0,92 (0,89)

Info 2 Wärmetransport durch Strahlung

Grundbegriffe

Schwarze Körper sind sehr einfach: sie absorbieren jegliche auf sie treffende Strahlung und strahlen selbst entsprechend dem Planck'schen Strahlungsgesetz diffus ab. Reale Körper bzw. Oberflächen verhalten sich wesentlich komplizierter. Sie können auftreffende Strahlung absorbieren oder abhängig von Wellenlänge, Einfallswinkel und Polarisation unterschiedlich stark als direkten Strahl oder diffus reflektieren. Allgemein gilt für den gerichteten spektralen Reflexionsgrad ohne Berücksichtigung der Polarisation:

$$\rho_{\Omega\lambda}(\theta, \varphi, \theta', \varphi', \lambda) = \frac{L_{\Omega\lambda r'}(\theta', \varphi', \lambda)}{L_{\Omega\lambda i}(\theta, \varphi, \lambda)}$$

Die gestrichelten Größen und der Index r stehen für die reflektierte, der Index i für die einfallende Strahlendichte. Entsprechend umfangreiche Datensätze wären für eine vollständige Beschreibung der Reflexionseigenschaften erforderlich, stehen aber nur selten zur Verfügung.

Außerdem sind einige Materialien für Teilbereiche der Strahlung transparent, so dass ein weiterer Satz von Kenngrößen (gerichtete, spektrale Durchlassgrade und hiervon abgeleitete Größen) hinzukommt, die entsprechenden Definitionen sind in [1] zu finden. Für eine allgemeine Darstellung der physikalischen Grundlagen wird ebenfalls auf die Literatur verwiesen, z. B. [9].

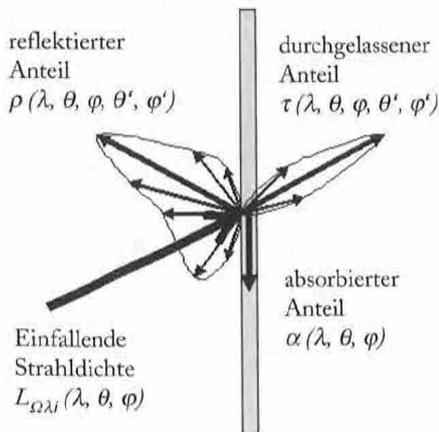


Bild 1: Zur Definition des reflektierten, absorbierten und durchgelassenen Anteils der einfallenden Strahlendichte

Neben den strahlungsphysikalischen Eigenschaften der Oberflächen ist beim Wärmetransport durch Strahlung noch die geometrische Anordnung zu beachten. Damit gehört die theoretische Behandlung zu den anspruchsvollen bauphysikalischen Problemen, welche heute im allgemeinen Fall mit Hilfe numerischer Verfahren gelöst werden.

Um auch ohne aufwändige und häufig „undurchsichtige“ Numerik zu Ergebnissen zu kommen, werden im Folgenden die für bauphysika-

lische Fragestellungen möglichen vereinfachenden Annahmen getroffen. Die Gültigkeit dieser Annahmen ist im Einzelfall zu prüfen. Annahmen, welche bei der Überdachung einer Eisfläche zutreffen, können bei einem Sonnenschutzsystem mit metallischen Lamellen völlig in die Irre führen.

Absorption, Transmission und Reflexion

Ein Material bzw. eine Oberfläche wird meist durch den spektralen Absorptions- und Reflexionsgrad und bei transparenten Materialien zusätzlich durch den spektralen Durchlassgrad (Transmissionsgrad) charakterisiert. Hierbei ist die einfallende Strahlung nach [1] isotrop (diffus) anzunehmen und folglich sind auch der reflektierte und der durchgelassene Anteil hemisphärisch, eine ganz wesentliche Vereinfachung. Man erhält die folgenden winkelunabhängigen Kenngrößen:

- den spektralen Absorptionsgrad α_λ
- den spektralen Reflexionsgrad ρ_λ
- den spektralen Durchlassgrad τ_λ

Bei Glas werden die Kennwerte dagegen bei näherungsweise senkrechtem Einfallswinkel bestimmt [7], bei reflektierter und durchgelassener Strahlung werden direkte und diffuse Anteile gemeinsam berücksichtigt. Bei großem Einfallswinkel oder diffuser Einstrahlung sind deshalb die Kennwerte zu korrigieren, tendenziell sind der Reflexionsgrad größer und der Durchlassgrad kleiner zu wählen.

Der Energieerhaltungssatz angewandt auf die spektralen Kennwerte fordert:

$$\alpha_\lambda + \rho_\lambda + \tau_\lambda = 1$$

Das Kirchhoff'sche Strahlungsgesetz basierend auf dem zweiten Hauptsatz der Thermodynamik liefert die Verbindung zum spektralen Emissionsgrad: $\alpha_\lambda = \epsilon_\lambda$

Damit gilt für opake Körper ($\tau_\lambda = 0$) die folgende wichtige Beziehung:

$$\epsilon_\lambda = \alpha_\lambda = 1 - \rho_\lambda$$

Diese Beziehung gilt im Allgemeinen nicht für die emittierte und absorbierte Gesamtstrahlung, es ist also falsch und Ursache mancher Missverständnisse $\alpha + \rho + \tau = 1$ oder $\alpha = \epsilon$ zu schreiben, ohne einen deutlichen Hinweis auf die spektrale Abhängigkeit zu geben.

Besonders deutlich ist dies am Beispiel von normalem Fensterglas.

Häufige Frage von Studenten: Warum ist der Emissionsgrad von Glas 0,84, wenn die Absorption doch nur 0,01 beträgt? Die Antwort geben die spektralen Kennwerte, welche in *Bild 2* graphisch dargestellt und für einige Wellenlängen in *Tabelle 1* wiedergegeben sind.

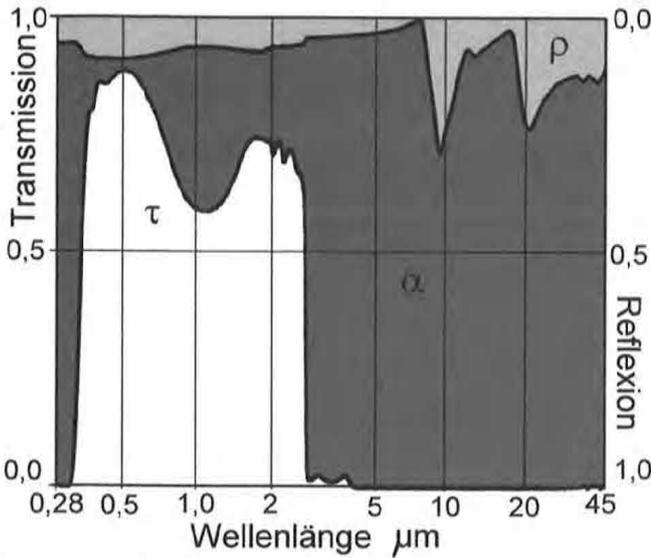


Bild 2: Spektrale Kennwerte für Fensterglas bei senkrechtem Strahlungseinfall [7]: Transmission (spektraler Durchlassgrad, linke Achse); Reflexion (spektraler Reflexionsgrad, rechte Achse). Als Differenz ergibt sich der spektrale Absorptionsgrad (dunkelgrau), dieser ist gleich dem normalen spektralen Emissionsgrad.

Tabelle 1: Spektrale Kennwerte für Fensterglas bei einigen Wellenlängen

Bereich	λ in μm	$\alpha_{n\lambda} = \epsilon_{n\lambda}$	$\rho_{n\lambda}$	$\tau_{n\lambda}$
sichtbar	0,5	0,01	0,08	0,91
NIR	1 bis 2	0,30	0,07	0,63
MIR	5	0,96	0,04	0,00
	10	0,75	0,25	0,00

Strahlungsübertragung

Für zwei beliebig im Raum orientierte Flächen, siehe Bild 3, soll die durch Strahlung übertragene Leistung berechnet werden. Die spektrale Strahldichte der Fläche 1 wird durch $L_{1\Omega\lambda}$ gegeben, dabei ist es unerheblich, ob die Strahldichte durch Emission oder Reflexion einfallender Strahlung zustande kommt. Die Strahlungsleistung eines Flächenelements der Fläche 1 in Richtung eines Flächenelements der Fläche 2 berechnet sich zu

$$d\Phi_{12} = L_{1\Omega\lambda} \cdot \cos \beta_1 \cdot dA_1 \cdot d\Omega_2 \text{ dabei ist } d\Omega_2 = \frac{\cos \beta_2 \cdot dA_2}{r^2}$$

Von dieser Strahlungsleistung wird ein Teil absorbiert, ein Teil reflektiert oder durchgelassen. Für den absorbierten Teil gilt z. B.:

$$d\Phi_{12,a} = \frac{L_{1\Omega\lambda} \cdot \cos \beta_1 \cdot dA_1 \cdot \alpha_{2\Omega\lambda} \cdot \cos \beta_2 \cdot dA_2}{r^2}$$

Für ausgedehnte Flächen erhält man schließlich die absorbierte Leistung durch Integration:

$$\Phi_{12,a} = \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{L_{1\Omega\lambda} \cdot \cos \beta_1 \cdot \alpha_{2\Omega\lambda} \cdot \cos \beta_2}{r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1$$

Derartige Ausdrücke können auch für diffuse Reflexion und Transmission aufgestellt werden, aber schon hier ist eine Auswertung nur mehr numerisch möglich. Noch komplexer wird die Situation bei spiegelnder Reflexion. Die als Raytracing bekannten Lösungsverfahren

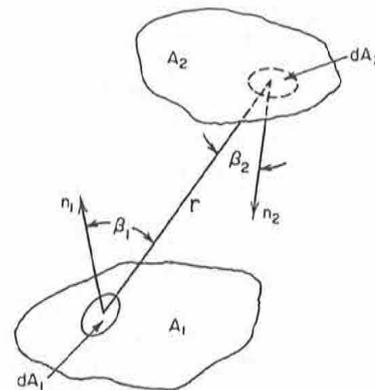


Bild 3: Die Geometrie der Wärmeübertragung durch Strahlung und zur Definition der Einstrahlzahl

wurden in den letzten Jahren (nicht zuletzt wegen der immer realistischeren Darstellung von Computerspielen) zu sehr effizienten Werkzeugen entwickelt.

Um zu bauphysikalisch handhabbaren Modellen der Strahlungsübertragung zu kommen, sind aber radikale Vereinfachungen erforderlich.

Diffuse graue Oberflächen

Etwas einfacher wird es wenn Abstrahlung, Absorption und Reflexion winkelnunabhängig (diffus) und unabhängig von der Wellenlänge (grau) erfolgen. Diese Annahme ist mit Ausnahme von blanken Metalloberflächen im bauphysikalisch interessanten Wellenlängenbereich (300 K Strahlung) gut erfüllt.

Mit dieser Annahme ist es möglich, die radiometrischen Größen vor das Integral zu ziehen. Das verbleibende Integral ist eine rein geometrische Größe und wird als Einstrahlzahl bezeichnet:

$$F_{12} = \frac{1}{\pi \cdot A_1} \int_{A_1} \int_{A_2} \frac{\cos \beta_1 \cdot \cos \beta_2}{r^2} \cdot dA_2 \cdot dA_1$$

Die Einstrahlzahl liegt zwischen 0 und 1 und gibt anschaulich an, welcher Anteil der von 1 ausgehenden Strahlung bei 2 ankommt. Die Einstrahlzahl von Fläche 2 auf Fläche 1 ist analog definiert, es gilt offensichtlich $A_1 \cdot F_{12} = A_2 \cdot F_{21}$ (Reziprozität).

Auch die Berechnung der Einstrahlzahl einer gegebenen geometrischen Anordnung erfordert im Allgemeinen numerische Methoden. Einfachere Anordnungen lassen sich durch teilweise trickreiche Verfahren geschlossen berechnen, führen aber fast immer zu langen und unübersichtlichen Formeln, siehe z. B. [2] und [4].

Bei diffusen grauen Strahlern mit einheitlicher Temperatur ist es ausreichend, die spezifische Ausstrahlung $M = \pi \cdot L = \epsilon \cdot \sigma \cdot T^4$ (hemisphärische Gesamtgröße) anzugeben. Mit Hilfe der Einstrahlzahl schreibt sich dann die Strahlungsleistung, welche von Fläche 1 ausgeht und Fläche 2 erreicht:

$$\Phi_{12} = A_1 \cdot F_{12} \cdot M_1 = A_1 \cdot F_{12} \cdot \epsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_1^4$$

Umgekehrt geht auch von Fläche 2 Strahlung aus und erreicht Fläche 1 (das letzte Gleichheitszeichen folgt aus der Reziprozität der Einstrahlzahlen)

$$\Phi_{21} = A_2 \cdot F_{21} \cdot M_2 = A_2 \cdot F_{21} \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4 = A_1 \cdot F_{12} \cdot \epsilon_2 \cdot \sigma \cdot T_2^4$$

Sind beide Oberflächen schwarz $\epsilon_1 = \epsilon_2 = 1$ gibt es keine Reflexionen und für den Wärmestrom zwischen Fläche 1 und Fläche 2 folgt sofort:

$$\Delta\Phi = \Phi_{12} - \Phi_{21} = A_1 \cdot F_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Bei grauen Oberflächen $\varepsilon_1 < 1; \varepsilon_2 < 1$ müssen Mehrfachreflexionen berücksichtigt werden und man erhält nach einiger Rechnung

$$\Delta\Phi = A_1 \cdot C_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

mit dem **Strahlungsaustauschkoeffizienten** (Strahlungsaustauschzahl)

$$C_{12} = \frac{F_{12} \cdot \varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2) \cdot F_{12}^2} \cdot A_1 / A_2$$

Der dimensionslose Strahlungsaustauschkoeffizient liegt zwischen 0 und 1 und ist für schwarze Körper gleich der Einstrahlzahl. Teilweise wird in der Literatur auch $C_{12} \cdot \sigma$ mit der Einheit $W/(m^2K^4)$ als Strahlungsaustauschkoeffizient bezeichnet. Auch für die Strahlungsaustauschkoeffizienten gilt die Beziehung $A_1 \cdot C_{12} = A_2 \cdot C_{21}$

Für besonders einfache Geometrie wie z. B. zwei parallele Ebenen mit im Vergleich zu den Flächenabmessungen geringem Abstand (siehe *Bild 3 b*) gilt $F_{12} = 1$ und $A_1 = A_2$. Damit folgt für den Strahlungsaustauschkoeffizienten.

$$C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{1 - (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2)} = \frac{1}{1 - 1/\varepsilon_1 - 1/\varepsilon_2}$$

Für die Halbkugel über einer Kreisscheibe ergibt sich $C_{12} = \frac{\varepsilon_1 \cdot \varepsilon_2}{1 - 0,5 \cdot (1 - \varepsilon_1) \cdot (1 - \varepsilon_2)}$.

Temperaturlinearisierung

Bei vielen bauphysikalischen Fragestellungen sind die beteiligten Temperaturen nicht zu stark verschieden (Kelvin-Skala!) so dass die Differenz der 4ten Potenzen der Temperaturen durch die Taylorentwicklung in 1. Ordnung ausreichend approximiert wird. Damit erhält man für den Wärmestrom

$$\Delta\Phi = A_1 \cdot C_{12} \cdot \sigma \cdot (T_1^4 - T_2^4) = A_1 \cdot C_{12} \cdot \sigma 4T_m^3 \cdot (T_1 - T_2)$$

Dabei ist $T_m = 0,5(T_1 + T_2)$ der Mittelwert der Temperaturen. Die Größe $h_r = C_{12} \cdot \sigma 4T_m^3$ hat die Einheit $W/(m^2K)$ und wird als **Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung** bezeichnet [8].

Für den Wärmeschutz im Winter wird meist $T_m = 10 \text{ °C} = 283 \text{ K}$ angesetzt. Für „dunkle“ Oberflächen $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0,9$ erhält man den Wärmeübergangskoeffizient durch Strahlung von $h_r = 4,2 \frac{W}{m^2K}$.

Die Linearisierung erlaubt außerdem, den gut entwickelten Formalismus zur Lösung linearer Gleichungssysteme anzuwenden.

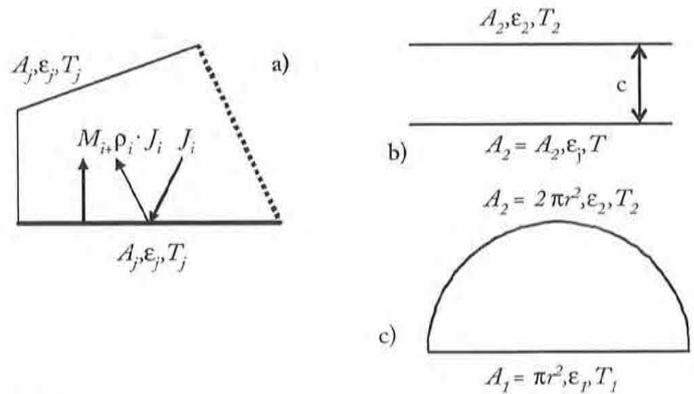


Bild 4:

- a) Begrenzung eines Raumes durch mehrere Flächen unterschiedlicher Eigenschaften und die Strahlungsströme an Fläche 1 (schematisch)
- b) zwei parallele Ebenen, Abstand klein gegen die Abmessungen der Flächen
- c) Halbkugel über Kreisfläche

Radiosity-Verfahren

Wird ein Raum von mehreren diffus-grauen opaken Flächen mit unterschiedlichem Emissionsgrad und unterschiedlicher, aber einheitlicher Temperatur begrenzt, werden die wechselseitigen Reflexionen schnell unübersichtlich. Hier wurde ein Lösungsverfahren entwickelt, welches heute in der Computergraphik unter der Bezeichnung Radiosity-Verfahren weit verbreitet ist.

Um das Grundprinzip zu erläutern, wird eine Hüllefläche aus flachen Flächenelementen ohne wechselseitige Verschattung angenommen, siehe z. B. die Hüllfläche in *Bild 3 a*). Für jedes dieser Flächenelemente ist $\varepsilon = \alpha = 1 - \rho$ und die Temperatur konstant. Eventuell ist die Hüllfläche in entsprechend viele Elemente zu zerlegen.

Die von einem Flächenelement ausgehende spezifische Strahlungsleistung besteht aus der Emission des grauen Strahlers und der reflektierten einfallenden Strahlung:

$$H_i = \varepsilon_i \cdot M_i^e + \rho_i \cdot J_i$$

Die einfallende spezifische Strahlungsleistung ergibt sich aus der Summe der von allen anderen Flächenelementen ankommenden Strahlung:

$$J_i = \frac{1}{A_i} \cdot \sum_{j \neq i} A_j F_{ji} H_j = \sum_{j \neq i} F_{ji} H_j$$

Die Lösung dieses Gleichungssystems liefert auch die von einem Flächenelement abgegebene (aufgenommene) Leistung:

$$\dot{Q}_i = A_i \cdot (H_i - J_i)$$

und damit die durch Strahlung zwischen den einzelnen Flächenelementen ausgetauschte Wärme.

Info 3 Tauwasser

Grundlagen

Wasser, chemisch H₂O, ist für das Leben die vielleicht wichtigste Substanz, für Bauwerke aber häufig das Ende. Bei den Temperaturen und Druckbedingungen auf der Erdoberfläche kommt Wasser in allen drei Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig vor. Da dies auch für den Menschen von großer Bedeutung ist, sind die Bezeichnungen dementsprechend vielseitig. Im Allgemeinen versteht man unter Wasser den flüssigen Zustand der chemischen Substanz Wasser (H₂O). Darüber hinaus gibt es aber je nach Zustand und Kontext präzisere Bezeichnungen: Eis, Schnee, Firn, Harsch, Reif, Hagel, Tau, Kondensat, Nebel, Regen, Dampf, Feuchte, Luftfeuchte. Der Ingenieur fügt noch Begriffe wie Sattedampf, Nassdampf, überhitzter Dampf, Wassergehalt, Dampfdruck, Sättigungsdampfdruck, Wasserdampfpartialdruck oder Übergangsenthalpie hinzu – die Auflistung erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit. Für die folgenden bauphysikalischen Überlegungen ist ein vertieftes Verständnis der thermodynamischen Grundlagen, insbesondere der energetischen Größen von Gas-Dampfgemischen, wie sie z. B. im Mollier-h-x-Diagramm dargestellt sind, nicht erforderlich.

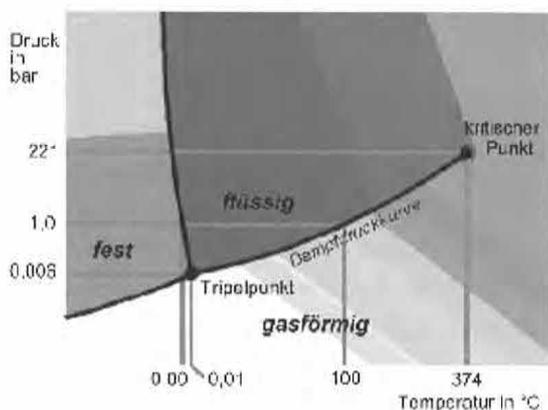


Bild 1: Zustandsdiagramm von Wasser

Der Aggregatzustand – fest, flüssig oder gasförmig – eine Substanz hängt nur vom Druck und der Temperatur ab und wird in einem Zustands- oder Phasendiagramm dargestellt, siehe das Zustandsdiagramm für Wasser in Bild 1. Das Gleichgewicht zwischen flüssigem und gasförmigem Zustand wird durch die Dampfdruckkurve bestimmt. Je nach Kontext wird diese auch als Sättigungsdampfdruck-, Siededruck- oder Taupunktcurve bezeichnet. Bei dieser Begriffsvielfalt ist eine gewisse Verwirrung leider unvermeidbar. Bild 2 zeigt die (Sättigungs-)Dampfdruckkurve im bauphysikalischen Temperaturbereich von -20 °C bis +30 °C. Die Werte sind in DIN 4108 tabelliert und dort werden auch Näherungsformeln zu Berechnung des Sättigungsdampfdruckes angegeben.

Tauwasser

Luft ist ein Gemisch aus den Gasen Stickstoff (N₂), Sauerstoff (O₂), einigen Spurengasen (Ar, CO₂, ...) und unterschiedlichen Mengen an gasförmigem Wasser (H₂O). Der Gesamtdruck dieses Gemisches (Luftdruck) ergibt sich durch Addition der (Partial-)Drücke seiner Komponenten zu ungefähr einem bar. Der Wasserdampf (partial)druck variiert stark je nach äußeren Bedingungen, wird aber durch den Sättigungsdampfdruck limitiert und hängt damit direkt von der Temperatur ab. Das Verhältnis von Wasserdampfdruck p zu Sättigungsdruck $p_s(T)$ ist die relative Luftfeuchte, meist in % angegeben:

$$\varphi = \frac{p}{p_s(T)} \cdot 100 \%$$

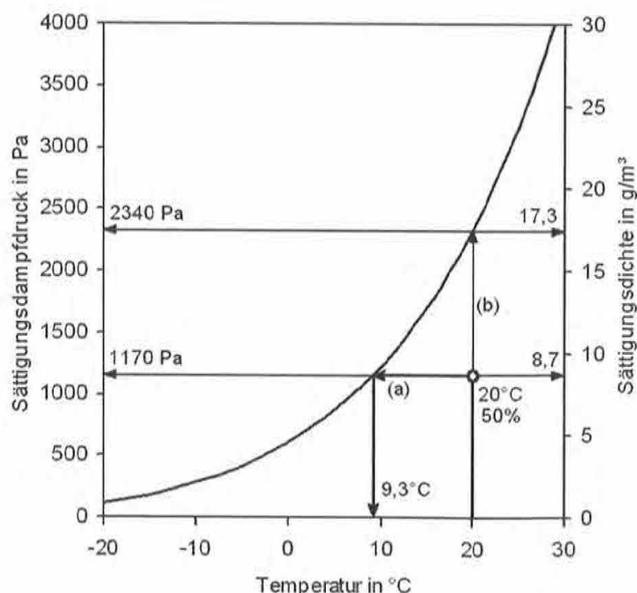


Bild 2: Wasserdampfsättigungsdruck und Wasserdampfsättigungsdichte. Eingezeichnet ist der Zustand (20 °C, 50 % r.F.). (a) Durch Abkühlung wird die Taupunkttemperatur 9,3 °C erreicht. (b) Sättigung

Der Zustand der feuchten Luft (genauer des Wasserdampfes in der Luft) wird in der Bauphysik meist durch die Temperatur und die relative Luftfeuchte charakterisiert und kann in einem Dampfdruckdiagramm eingezeichnet werden, siehe das Beispiel in Bild 2. Alternativ zur Angabe von Temperatur und relativer Feuchte (20 °C, 50 %) könnte der Wasserdampfpartialdruck (1170 Pa), die Wasserdampfdichte (8,7 g/m³) oder die Taupunkttemperatur (9,3 °C) angegeben werden. Der in anderen Bereichen üblich Feuchtegehalt (Masse des Wassers bezogen auf die Masse der trockenen Luft) ist nur bei kalorischen (energetischen) Betrachtung sinnvoll und führt zu der physikalisch falschen Vorstellung, dass Luft Wasserdampf so ähnlich wie z. B. Holz „aufnimmt“.

Tauwasser tritt bei Erreichen der Sättigung auf. In der Bauphysik ist dies ausschließlich durch Abkühlung des Wasserdampfes bzw. des Gasgemisches „Luft“ bis zu Taupunkttemperatur der Fall. In der Regel erfolgt diese Abkühlung durch Kontakt mit einer kalten Oberfläche. Tauwasserbildung im „Volumen“ spielt in der Meteorologie eine wichtige Rolle (Wolken, Nebel, etc.) in der Bauphysik aber weniger.

Noch einmal: Tauwasser an Oberflächen tritt auf, wenn die Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur des Wasserdampfes liegt.

Wasserdampfdruck und Wasserdampfdichte

Der Zusammenhang zwischen Druck und Dichte eines idealen Gases kann einfach aus der Zustandsgleichung $p \cdot V = m \cdot R_i \cdot T$ abgeleitet werden. Die Dichte ist also

$$\rho = \frac{p}{R_i \cdot T},$$

dabei ist R_i die spezifische Gaskonstante. Inwieweit ist dieser Ansatz auch für Wasserdampf erlaubt?

Bei einer Temperatur von +30 °C ist das spezifische Volumen des Wasserdampfes $v' = 32,93 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}$ und der Dampfdruck beträgt $p = 4241 \text{ Pa}$ [5]. Die Van der Waals'sche Zustandsgleichung beschreibt das Verhalten reale Gase durch den Ansatz:

$$(p + a \cdot v'^{-2}) \cdot (v' - b) = R_i \cdot T$$

mit

$$R_i = 461 \frac{\text{J}}{\text{kgK}} \text{ spezifischen Gaskonstanten für Wasserdampf}$$

$$a = 1722 \frac{\text{Nm}^4}{\text{kg}^2} \text{ und } b = 0,00168 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \text{ Van der Waals Koeffizienten.}$$

Der Binnendruck ergibt sich zu

$a \cdot v'^{-2} = 1722 \frac{\text{Nm}^4}{\text{kg}^2} \cdot \left(32,93 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right)^{-2} = 1,6 \text{ Pa}$ und ist gegen den Dampfdruck von 4200 Pa vernachlässigbar. Ebenso kann das Kovolumen gegen das spezifische Volumen vernachlässigt werden. Das bedeutet insgesamt, dass Wasserdampf im Temperaturbereich unter 30 °C bis zum Gleichgewichtszustand gasförmig-flüssig als ideales Gas behandelt werden kann und die Dichte des Wasserdampfes nach der für ideale Gase abgeleiteten Gleichung aus dem Wasserdampfpartialdruck berechnet werden kann.

Tauwassermenge

Liegt die Oberflächentemperatur unter der Taupunkttemperatur der umgebenden Luft kondensiert Wasserdampf an der Oberfläche und setzt die damit verbundene latente Wärme (exakter Enthalpie) frei. Bei einer Taupunkttemperatur zwischen 0 °C und 15 °C ist es ausreichend diesen Wärmestrom wie folgt anzusetzen:

$$\dot{Q} = r \cdot \dot{m} \text{ mit } r = 2,5 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

Dieser Wärmestrom ist bei der Wärmebilanz der Oberfläche zu berücksichtigen. Die Tauwassermenge hängt also wesentlich davon ab,

inwieweit dieser Wärmestrom abgeführt werden kann ohne die Oberfläche über die Taupunkttemperatur zu erwärmen.

Beispiel: Fällt eine Tauwassermenge von $\dot{m} = 10 \frac{\text{g}}{\text{b}\cdot\text{m}^2}$ an, so ist damit ein Wärmestrom von $\dot{Q} = 2500 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot 10 \cdot 10^{-3} \frac{\text{kg}}{\text{b}\cdot\text{m}^2} = 7,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ verbunden.

Neben den energetischen Bedingungen ist noch der Feuchtetransport an die Oberfläche zu beachten. Im Raum herrscht durch die turbulente Durchmischung des Luftvolumens eine gleichförmige absolute Luftfeuchte. An den begrenzenden Oberflächen bildet sich abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit eine laminare Grenzschicht. Die Dicke dieser Grenzschicht liegt bei thermisch induzierter Strömung je nach Wärmestromrichtung bei einigen mm bis zu einem cm und reduziert sich bei Wind auf weniger als einen mm. Die Diffusion des Wasserdampfes durch diese Grenzschicht erfordert ein Partialdruckgefälle Δp . Für die Diffusionsstromdichte gilt:

$$\dot{m} = \frac{\Delta p}{Z} \text{ mit } Z = 1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{m}\cdot\text{b}\cdot\text{Pa}}{\text{kg}} \cdot d$$

dabei ist Z der Diffusionswiderstand und d die Dicke der Grenzschicht.

Hinweis: Im Glaserverfahren wird dieser Widerstand vernachlässigt

Beispiel: Bei (20 °C, 50 %) beträgt der Dampfdruck 1170 Pa. Bei einer Oberflächentemperatur von 8,3 °C ist der Sättigungsdruck 1095 Pa und es tritt Tauwasser auf. Die Druckdifferenz von 75 Pa treibt bei einer angenommenen Grenzschichtdicke von 5 mm einen Diffusionsstrom von

$$\dot{m} = \frac{\Delta p}{Z} = \frac{75 \text{ Pa}}{1,5 \cdot 10^6 \frac{\text{m}\cdot\text{b}\cdot\text{Pa}}{\text{kg}} \cdot 5 \cdot 10^{-3} \text{ m}} = 10 \frac{\text{g}}{\text{b}\cdot\text{m}^2}.$$

Zum Schluss

Isolierglas ($U=2,7 \text{ W/m}^2\text{K}$) hat bei einer Außentemperatur von -15 °C und 20 °C Raumtemperatur ohne Tauwasser eine Oberflächentemperatur von 7,7 °C. Bei einer Raumfeuchte von 50 % beträgt die Taupunkttemperatur der Raumluft 9,3 °C und es tritt Tauwasser auf. Bei einem Tauwasseranfall von $10 \frac{\text{g}}{\text{b}\cdot\text{m}^2}$ beträgt der zusätzliche Wärmestrom $7,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ und die Oberflächentemperatur steigt auf 8,3 °C. Die Dampfdruckdifferenz zwischen Oberfläche und Raum von 75 Pa reicht gerade aus um bei einer Grenzschicht von 5 mm die Diffusionsstromdichte $10 \frac{\text{g}}{\text{b}\cdot\text{m}^2}$ zu treiben.

Bei einer Scheibenfläche von 1 m² ergibt sich eine „Trocknungsrate“ von $10 \frac{\text{g}}{\text{b}\cdot\text{m}^2}$, bezogen auf ein Rauminnen von 50 m³ also $0,2 \frac{\text{g}}{\text{m}^3\cdot\text{b}}$. Nach etwa drei Stunden ist bei einem dichten Raum daher die absolute Feuchte von anfangs $8,7 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ auf $8,3 \frac{\text{g}}{\text{m}^3}$ entsprechend einer Taupunkttemperatur von 7,7 °C bzw einer relativen Luftfeuchte von 46 % abgesunken. Es tritt kein weiteres Tauwasser auf, an der Scheibe sind 20 g Wasser entsprechend einer Schichtdicke von 0,02 mm angefallen. Größere Tauwassermengen setzen also eine Nachlieferung der Luftfeuchte voraus.

Literatur

- [1] DIN 4108 Wärmeschutz und Energieeinsparung in Gebäuden
- [2] DIN EN ISO 6946 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren
- [3] Testreferenzjahre (TRY) für Deutschland, Deutscher Wetterdienst, Offenbach, 2004
- [4] Möller, F.: Einführung in die Meteorologie, BI Hochschultaschenbücher 1973
- [5] DIN EN ISO 13786 Wärmetechnisches Verhalten von Bauteilen - Dynamisch-thermische Kenngrößen, Berechnungsverfahren
- [6] Fritzen, K.: Zur Problematik bei Eisporthallen, Bauen mit Holz 3/2006, 44-46

Literatur zu Info

- [1] DIN EN ISO 9288:1996 Wärmeschutz – Wärmeübertragung durch Strahlung – Physikalische Größen und Definitionen
- [2] Handbook of Heat Transfer Fundamentals, McGraw-Hill Book Company (1985)
- [3] DIN EN 12898:2001-04 Glas im Bauwesen – Bestimmung des Emissionsgrades
- [4] VDI Wärmeatlas, Springer. 9. Auflage (2002)
- [5] Dubbel, Taschenbuch für den Maschinenbau, Springer, 13. Auflage (1974)
- [6] <http://de.wikipedia.org/wiki/Emissionsgrad#Tabellen>, 2006-08-29
- [7] DIN EN 410 Bestimmung der lichttechnischen und strahlungsphysikalischen Kenngrößen von Verglasungen
- [8] DIN EN ISO 6946 Bauteile – Wärmedurchlasswiderstand und Wärmedurchgangskoeffizient, Berechnungsverfahren
- [9] M. Born; Optik, Springer, Berlin 1933



BRUDERVERLAG

Ein Unternehmen der
Gruppe Rudolf Müller

BRUDERVERLAG

Albert Bruder GmbH & Co. KG

Bismarckstr. 21
76133 Karlsruhe

Telefon (0721) 91388 0
Telefax (0721) 91388 99
E-Mail: info@bruderverlag.de

Ihr direkter Kontakt zu uns:

Fragen zum Buch- und Zeitschriftenprogramm:
Iris Limburger (0221) 5497-304

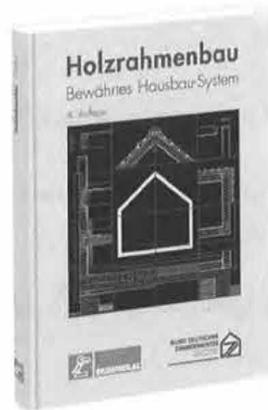
Karlsruher Tage 2007 –
Informationen und Anmeldung:
Marina Vasilj (0721) 91388 15

Sie möchten selbst Autor werden oder
planen eine Veröffentlichung:

Ihr Ansprechpartner im Buchbereich:
Gregor Reichle (0221) 5497 526

Ihre Ansprechpartnerin für unsere
Fachzeitschriften:
Susanne Jacob (0721) 91388 21

In Vorbereitung:



**HOLZRAHMENBAU
Bewährtes Hausbau-System**

4. Auflage 2006. 544 Seiten, DIN A4, gebunden. € 105,-

Die sehr umfassenden Neuregelungen zu den hölzernen Werkstoffen und den Dämmstoffen sind in der 4. Auflage bezüglich Wärme-, Schall- und Brandschutz eingearbeitet, ohne dass das bewährte Konzept des Konstruktionskatalogs verändert ist. Die Novellierung der technischen Daten wurde sowohl bezüglich der Baustoffe, Bauphysik als auch der Standsicherheit (DIN 1052:2004-08) vorgenommen.



Wärmebrücken im Holzrahmenbau

Hrsg. Bruderverlag, ca. 200 Seiten, DIN A 4, gebunden
€ 79,-

Die Energieeinsparverordnung gibt dem Planer die Möglichkeit, einen genauen Nachweis des Wärmeschutzes zu führen, der die Vorteile der Holzbauweise offenlegt. In diesen genauen Nachweis fließen die bauphysikalischen Kennwerte von Wärmebrücken ein, die hier beispielhaft angegeben werden. Grundlage der aufgeführten Kennwerte sind die üblichen Konstruktionen der Holzrahmenbauweise, entnommen aus dem Standardkatalog "Holzrahmenbau - Bewährtes Hausbausystem", herausgegeben vom Bund Deutscher Zimmermeister.

