

Gebäudeklima - Auswirkungen auf Konstruktion und Dauerhaftigkeit von Holzbauwerken

Andreas Gamper, Philipp Dietsch, Michael Merk, Stefan Winter

Zusammenfassung

Die Auswertung von Schäden an weitgespannten Holztragwerken zeigt als überwiegend festgestelltes Schadensbild ausgeprägte Rissbildungen in Klebfugen und Lamellen von Brettschichtholzbauteilen. Ein wesentlicher Anteil an der Entstehung dieser Schäden wird starken klimatischen Schwankungen innerhalb von Gebäuden und den damit verbundenen Schwind- und Quellvorgängen in den Holzbauteilen zugesprochen. Im Hinblick auf diesen Sachverhalt wurden mittels Langzeitmessserien klimatische Bedingungen in für den Holzbau typischen Gebäudetypen und -nutzungen sowie den daraus resultierenden Holzfeuchten in unterschiedlichen Bauteiltiefen ermittelt. Die gemessenen Holzfeuchten ermöglichen Rückschlüsse auf die Größe und Geschwindigkeit ihrer jahreszeitlichen Anpassung an sich ändernde Umgebungsbedingungen. Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Nutzungen bestätigt die erwartete große Bandbreite der möglichen klimatischen Bedingungen in Gebäuden mit Holztragwerken. Die Ergebnisse erlauben die Angabe von Bereichen sich einstellender Ausgleichsfeuchten in Abhängigkeit der konkreten Nutzung, wodurch ein Einbau des Holzes mit einer vorher angepassten Holzfeuchte ermöglicht wird. Sie unterstützen zudem die Entwicklung entsprechender Monitoringsysteme, die z.B. in Form von Frühwarnsystemen auf Basis von Klimamessungen eingesetzt werden könnten. Es werden konkrete Vorschläge für die praktische Anwendung der Forschungsergebnisse gegeben.

1 Einleitung und Hintergrund

Die Auswertung von Schäden an weitgespannten Holztragwerken ([1]-[3]) zeigt als überwiegend festgestelltes Schadensbild ausgeprägte Rissbildungen in den Klebfugen und Lamellen von Brettschichtholzbauteilen.

Die Abbildungen 1 und 2 zeigen die typischen Arten von Schäden und Schadensursachen aus einer Auswertung von Untersuchungen an 245 weitgespannten Holztragwerken [4]. Die Gesamtzahl der dargestellten Schäden und Schadensursachen übersteigt die Gesamtzahl der erfassten Bauwerke, da ein Bauwerk mehr als ein schadhaftes Bauteil enthalten kann.

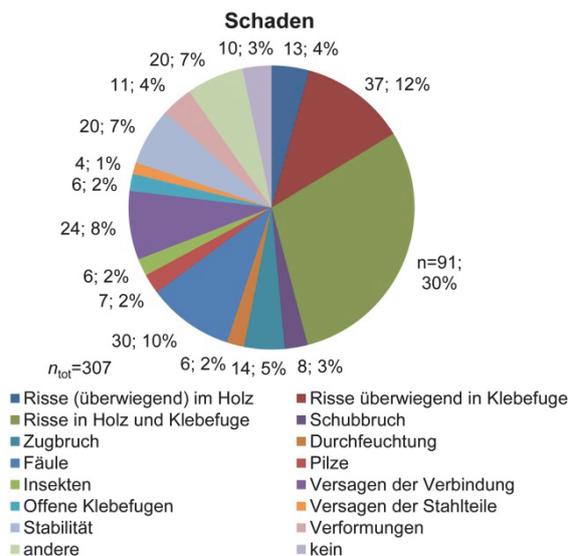


Abb. 1 Arten von Schäden [4].

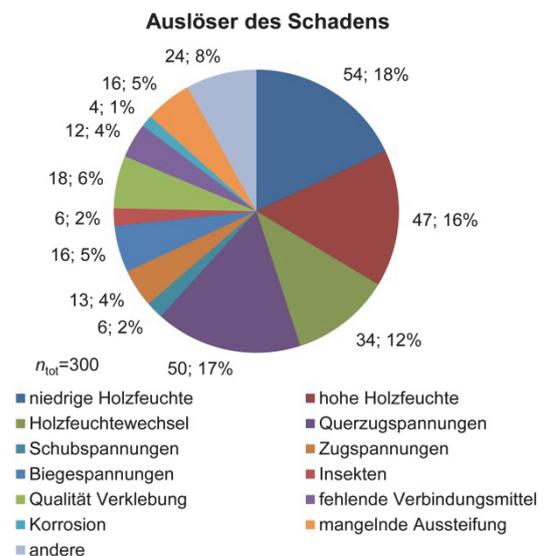


Abb. 2 Auslöser des Schadens [4].

Fast die Hälfte der Schäden kann auf eine sehr niedrige oder hohe Holzfeuchte bzw. auf starke Schwankungen derselben zurückgeführt werden. Die daraus resultierende Feuchtegradient (Holzfeuchtegefälle) und die zugehörigen Schwind- bzw. Quellerscheinungen führen zu inneren Spannungen im Querschnitt, welche bei Überschreitung der sehr geringen Querszugfestigkeit von Holz in Form von Rissen abgebaut werden.

Niedrige oder hohe Holzfeuchten bzw. starke Schwankungen derselben konnten in einigen Fällen auf lokale Gegebenheiten (z.B. Dachundichtigkeiten) zurückgeführt werden. In der großen Mehrheit der Fälle resultierten diese jedoch aus den klimatischen Bedingungen im Gebäude und deren saisonalen Schwankungen. Beide sind in großem Maße abhän-

gig von der Bauweise und Nutzung des Gebäudes. Abbildung 3 zeigt die im Rahmen von Untersuchungen an den erfassten Bauwerken gemessenen Holzfeuchten und Umgebungsbedingungen, in Abhängigkeit von der Nutzungsklasse (NKL).

Sollten im Rahmen der Untersuchungen an einem Bauteil mehrere Messungen vorgenommen worden sein, so stellt der angegebene Wert das Mittel dieser Messungen dar. Bei Holzfeuchtemessungen in mehreren Tiefen wurde das Mittel aus den oberflächennahen Messungen gebildet. Es ist anzumerken, dass die in Abbildung 3 gegebenen Messwerte Momentaufnahmen darstellen. Sie ermöglichen keine Aussage zur Holzfeuchte bei Inbetriebnahme des Gebäudes sowie zu jahreszeitlichen Schwankungen der Holzfeuchte.

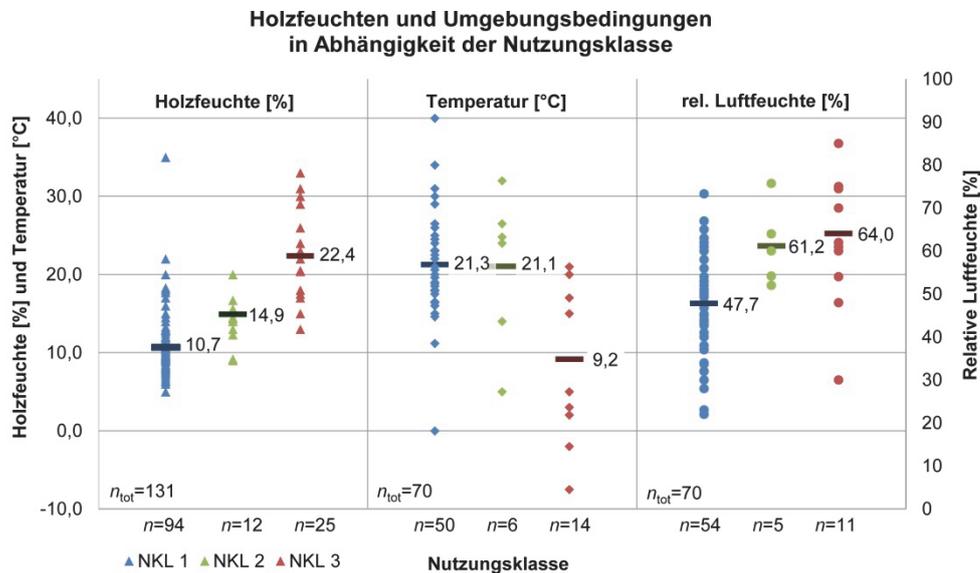


Abb.3 Holzfeuchten und Umgebungsbedingungen in Abhängigkeit der Nutzungsklasse (NKL) [4].

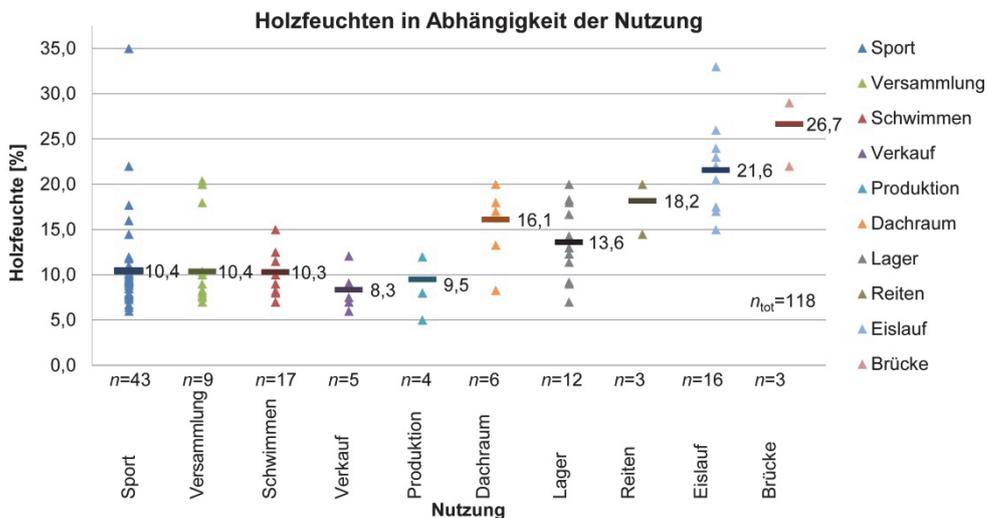


Abb.4 Holzfeuchten in Abhängigkeit der Nutzung (NKL) [4].

Die Auswertung der gemessenen Holzfeuchten zeigt in der Nutzungsklasse 1 (NKL 1) eine starke Streuung bei einem Mittel von 10,7 %. Auch die zugehörigen Messwerte der Temperatur (T) und relativen Luftfeuchte (RF) zeigen eine starke Streuung. Die Holzfeuchten der Bauteile in Nutzungsklasse 2 (NKL 2) zeigen (bei geringerer Datenmenge) eine kleinere Streuung um ein Mittel von 14,9 %. In Nutzungsklasse 3 (NKL 3) zeigt sich erwartungsgemäß das höchste Mittel von 22,4 % bei großer Streuung der Werte. Die Mittelwerte korrespondieren gut mit den in [1] gegebenen Werten.

Die große Bandbreite der Holzfeuchten, Temperaturen und relativen Luftfeuchten, welche an Holztragwerken in Nutzungsklasse 1 gemessen wurden, ist auf die Diversität der Nutzungen der in Nutzungsklasse 1 eingruppierten Gebäude zurückzuführen. Aus diesem Grund wurde in [4] eine weitere Differenzierung der Holzfeuchten in Abhängigkeit der Nutzung der Bauwerke vorgenommen, vgl. Abbildung 4. Hierbei wurden nur Nutzungen aufgenommen, für die an mindestens drei unterschiedlichen Bauwerken Messwerte der Holzfeuchte vorhanden waren.

Die Holzfeuchten von Bauteilen in geschlossenen, beheizten Gebäuden sind häufig sehr gering. Würde man die Bauteile herausnehmen, die aufgrund lokaler Undichtigkeiten bzw. fehlerhafter bauphysikalischer Dachaufbauten sehr hohe Holzfeuchten aufwiesen, lägen die Mittelwerte der Holzfeuchten in geschlossenen, beheizten Gebäuden allesamt unter 10 %. Insgesamt wiesen 47 % der untersuchten Bauteile Holzfeuchten von 10 % und geringer auf. Die für Reithallen ($u_{MW,Reiten} = 18,2\%$) und Eissporthallen ($u_{MW,Eislauf} = 21,6\%$) ermittelten Werte stützen deren Einstufung in Nutzungsklasse 2 respektive Nutzungsklasse 3 [5].

Aussagen über den Verlauf und das Ausmaß saisonaler Schwankungen können nur durch Langzeitmessungen von Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte) und Holzfeuchte erreicht werden. Im Fall von (weitgespannten) Holztragwerken ist die Messung der Holzfeuchte in unterschiedlichen Bauteiltiefen von besonderem Interesse, um Rückschlüsse auf die Größe und Geschwindigkeit der Anpassung der Holzfeuchteverteilung an sich ändernde Umgebungsbedingungen zu erhalten. Obwohl frühere Forschungsvorhaben die Langzeitmessung von Holzfeuchte und/oder Temperatur und relativer Luftfeuchte zum Thema hatten [6] – [13], war keines dieser Vorhaben unter der Zielsetzung durchgeführt worden, einen Vergleich zwischen Holztragwerken in Gebäuden unterschiedlicher Art und Nutzung zu ermöglichen.

Gleiches gilt für die in-situ Langzeitmessung der Holzfeuchte in unterschiedlichen Tiefen der eingebauten Bauteile (Phase „Betrieb“ in Abbildung 5, siehe Abs. 2.1). Beide Zielsetzungen wurden im Folgenden vorgestellten Forschungsvorhaben verfolgt.

2 Durchführung des Forschungsvorhabens

2.1 Einführung

Die Reaktion von Holz gegenüber Feuchtigkeit ist integraler Bestandteil jeder Auseinandersetzung mit diesem natürlichen Rohstoff. Dies gilt auch für die Planung, Realisierung und Instandhaltung von Holztragwerken. Holz durchläuft vom Einschlag bis zur vorgesehenen Verwendung, z.B. als tragendes Bauteil, mehrere Phasen der Bearbeitung und Gestalt, während es unterschiedlichen Umgebungsbedingungen unterworfen ist. Der Einfluss auf die Holzfeuchte kann anhand der in Abbildung 5 dargestellten „Feuchtekette“ (Feuchteentwicklung) beispielhaft illustriert werden.

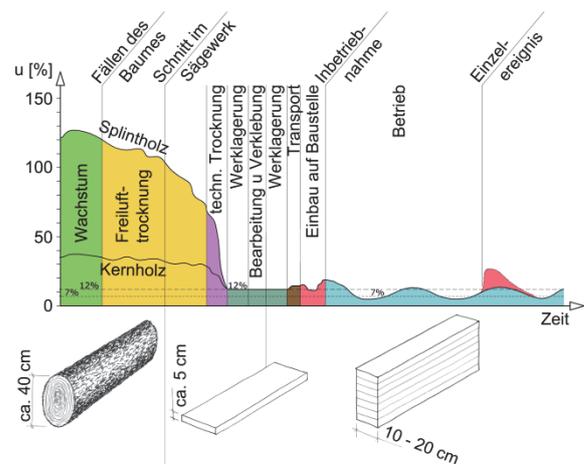


Abb.5 Skizze einer möglichen „Feuchtekette“, d.h. Feuchtebeanspruchung vom Baum bis zum Brett-schicht-holz im Tragwerk (Holzfeuchten indikativ).

Änderungen des Feuchtegehalts von Holz bedingen Änderungen nahezu aller physikalischer und mechanischer Eigenschaften (z.B. Festigkeiten) dieses Baustoffs. Normativ wird dies berücksichtigt, indem Holzbauteile entsprechend dem Umgebungs-klima während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer in eine von drei möglichen Nutzungsklassen eingeordnet werden [14]. Ein weiterer Effekt von Holzfeuchteänderungen sind die daraus resultierenden Quell- und Schwinderscheinungen im Holz. Da die Aufnahme

und Abgabe von Feuchte über die Oberflächen der Holzbauteile erfolgt, passen sich die äußeren Schichten schneller an die klimatischen Bedingungen an als innenliegende Bereiche. Das daraus resultierende Holzfeuchtegefälle (Feuchtegradient) und die zugehörigen Schwind- bzw. Quellerscheinungen führen zu inneren Spannungen im Querschnitt. Diese Spannungen werden zwar durch Relaxationsvorgänge abgemindert, bei der Überschreitung der sehr geringen Querszugfestigkeit von Holz erfolgt jedoch ein Spannungsabbau in Form von Rissen, welche zu einer Reduktion der Beanspruchbarkeit des Bauteils gegenüber z.B. Schub- oder Querszugbeanspruchungen führen.

2.2 Untersuchte Nutzungen und Gebäudeauswahl

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden in zwei Messperioden von je einem Jahr Langzeitmessungen von Holzfeuchte, Temperatur und relativer Luftfeuchte in insgesamt 21 Gebäuden mit weitgespannten Holztragwerken realisiert. Alle Gebäude befinden sich in der Umgebung von München (Entfernung < 120 km). Die Gebäude waren sieben unterschiedlichen Nutzungen zuzuordnen, siehe Tabelle 1. Alle Gebäude der Nutzungen „Schwimmhalle“, „Sporthalle“ sowie „Produktions- und Verkaufshalle“ sind beheizt und besitzen eine geschlossene Gebäudehülle, während alle Gebäude der Nutzungen „Reithalle“, „Landwirtschaftliche Halle“ und „Lagerhalle“ unbeheizt sind und teiloffene Gebäudehüllen aufweisen. Im Fall der Eissporthallen wurden nur geschlossene Objekte (klimatisiert sowie nicht klimatisiert) ausgewählt, da für teiloffene Eissporthallen schon Ergebnisse vorliegen [10], [12]. Die Fortführung der Langzeitmessung in Messperiode II wurde auf zehn Objekte aus fünf Nutzungen mit stark schwankenden Hallenklima beschränkt (siehe Tabelle 1).

Tab. 1 Gewählte Nutzungen und Anzahl der Objekte je Nutzung und Messperiode.

Kat.	Nutzung	Anzahl in Messperiode I	Anzahl in Messperiode II
A	Schwimmhalle	3	0
B	Eissporthalle	4	2
C	Reithalle	3	2
D	Sporthalle	3	0
E	Produktion und Verkauf	2	2
F	Landwirtschaftliche Halle	3	2
G	Lagerhalle	3	2
		21	10

Bei der Auswahl der Objekte wurde darauf geachtet, die holzbautypischen Bauweisen und Tragsysteme abzudecken. Die Auswahl wurde beschränkt auf Brettschichtholzbauteile aus Nadelholz mit einer Mindestbreite von 140 mm. In jedem Objekt wurden die Daten an zwei Messstellen erhoben, um auch über die Hallenfläche hinweg möglicherweise variierende Bedingungen (z.B. Sonneneinstrahlung oder Einfluss haustechnischer Anlagen) zu erfassen. Alle notwendigen Informationen (Gebäudehülle, Umgebungsbedingungen, Klimatisierung, Tragsystem, Bauteilabmessungen, Oberflächenbehandlung und Lage der Messstellen) wurden in Objektinformationsblättern aufbereitet, inklusive Grundriss und Schnitt des Objektes sowie Fotodokumentation [23].

2.3 Verwendetes Messverfahren

Als Messverfahren wurde das Widerstandsmessverfahren gewählt, da diese Methode in Fachkreisen den allgemein anerkannten Stand der Technik darstellt. Zudem ist mit dieser bewährten und bis dato meist verwendeten Methode eine zerstörungsfreie Messung der Holzfeuchtegradienten über den Holzquerschnitt möglich (siehe z.B. [15]). Für eine ausführliche Beschreibung des Widerstandsmessverfahrens sowie eine Übersicht und einen Vergleich mit alternativen Verfahren zur kontinuierlichen Holzfeuchtemessung wird der interessierte Leser auf [16] verwiesen.

Das gewählte Messverfahren beruht auf der Messung des elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Holz. In Zusammenarbeit mit einem Projektpartner wurde ein geeignetes Messsystem entwickelt und konfiguriert. Da das Messsystem auch sehr geringe Holzfeuchten erfassen musste, war die Messbarkeit sehr hoher elektrischer Widerstände erforderlich (z.B. 6 % Holzfeuchte in Fichte $\approx 10^{11} \Omega$). Vor der eigentlichen Installation der Messtechnik in den Gebäuden wurde das System testweise an Probekörpern aus Fichten-Brettschichtholz installiert und in Klimakammern der Prüfstelle Holzbau der TU München sehr trockenen, sehr feuchten und stark schwankenden Klimabedingungen ausgesetzt. Die kontinuierlich gemessenen Holzfeuchten wurden durch zyklische Vergleichsmessungen mit einem kalibrierten Referenz-Messgerät (GANN Hydromette RTU 600) verglichen. Es konnte weder ein wesentlicher Unterschied in den Messergebnissen der beiden Systeme noch bei Verwendung unterschiedlicher Typen von Messelektroden festgestellt werden. Dies belegt die Genauigkeit und Robustheit des gewählten Verfahrens der Widerstandsmessung.

Für eine weitere Verifizierung wurden zwei voneinander unabhängige Serien von jeweils 4 x 6 Probekörpern aus Fichte ($l \times b \times h = 85 \times 60 \times 30 \text{ mm}$) vier

verschiedenen, kontrollierten klimatischen Umgebungsbedingungen (20 °C / 45 % RF; 20 °C / 65 % RF; 20 °C / 85 % RF und 20 °C / 100 % RF) ausgesetzt. Nachdem die Probekörper Gewichtskonstanz erreicht hatten, wurde die Holzfeuchte der Probekörper mit der für das Forschungsprojekt ausgewählten Messtechnik (Scantronic Gigamodul) und zwei Referenz-Messgeräten (GANN Hydromette RTU 600 und Greisinger GMH 3850) bestimmt. Durch anschließende Trocknung im Darrofen wurde der tatsächliche Feuchtegehalt ermittelt. Innerhalb der Bandbreite der im Forschungsvorhaben gemessenen Holzfeuchten ($u_{\max} = 19\%$) ergaben sich gute Übereinstimmungen für Holzfeuchten zwischen 12 % und 18 % ($\Delta u < 0,5\%$). Für die getrockneten Probekörper ergaben sich max. Abweichungen von $\Delta u = 1,3\%$, wobei die für das Forschungsprojekt ausgewählte Messtechnik wie auch die Referenzmessgeräte die niedrigen Holzfeuchten tendenziell unterschätzten. Die Abweichungstoleranz von handelsüblichen Holzfeuchtemessgeräten liegt im Bereich von $\pm 1,0\%$.

2.4 Installation der Messtechnik, Auslesen und Auswerten der Messwerte

Für die Messung der Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt wurden je Messstelle vier Paare teflonisolierter Einschlagelektroden (GANN) unterschiedlicher Länge verwendet, die eine Feuchtemessung in genau definierten Schichten des Bauteils ermöglichen. Mittels einer Montagehilfe wurden die Messelektroden in einer Lamelle und paarweise senk-

recht zur Faser angeordnet. Über speziell angefertigte, abgeschirmte Koaxialkabel wurden die Messelektroden an das Materialfeuchtemessgerät angeschlossen. Dieses ermöglicht eine Bestimmung von Materialfeuchten an bis zu acht Kanälen, welche bei der stündlichen Messung separat angesteuert wurden, um eine gegenseitige Beeinflussung zu verhindern. Die so erzeugten Messwerte der zwei Messstellen wurden anschließend an einen Datenlogger weitergeleitet. Über Sensoreinheiten für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur wurden die Klimadaten aufgezeichnet. Durch zwei externe Sensoren wurden zudem die Oberflächentemperaturen an den beiden Messstellen erfasst um eine Referenztemperatur für die Temperaturkompensation der Holzfeuchtemesswerte zu erhalten.

Vor Beginn der zweiten Messperiode wurde die Messtechnik an bisher gewonnene Ergebnisse angepasst. So wurden die Elektrodenköpfe isoliert, um ein Kurzschluss der Messkanäle zu verhindern. Die gesamte Messtechnik wurde zum Schutz vor äußeren Einflüssen in einem Elektro-Installationsgehäuse untergebracht. Die Anzahl der Klimasensoren wurde auf zwei erhöht, um die Temperatur und die relative Luftfeuchte der umgebenden Luft an der Oberfläche der Träger im direkten Umfeld der Messstellen zu erfassen. Die Materialtemperatur wurde an beiden Messstellen mit je zwei Temperatursensoren in 20 und 40 mm Tiefe erfasst. Eine schematische Übersicht der verwendeten Messtechnik ist in Abbildung 6 gegeben.

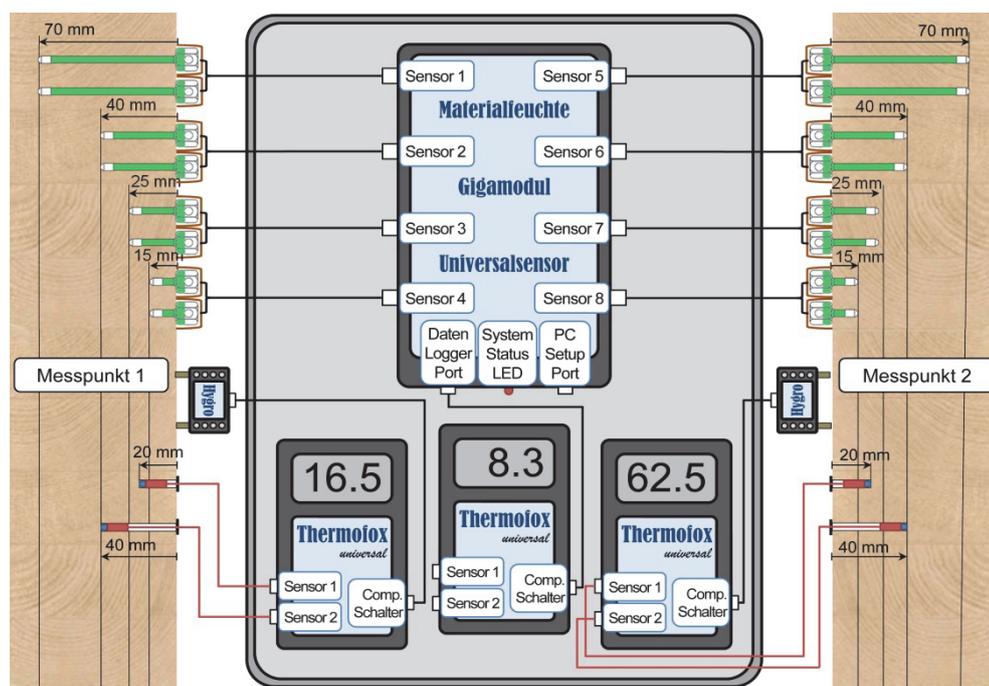


Abb.6 Systematische Darstellung der verwendeten Messtechnik (vor Messperiode II angepasst).

Die gespeicherten Messdaten wurden über die Messzeiträume hinweg mehrfach manuell ausgelesen. Gleichzeitig wurden eine Funktionskontrolle sowie eine Referenzmessung mit einem anderen Messgerät durchgeführt. Dabei fiel auf, dass das chlorhaltige Klima in den Schwimmbädern zum zeitweisen Ausfall der kapazitiven Feuchtesensoren führte. Dies konnte durch den Einsatz von digitalen, betauungsresistenten Sensoren behoben werden. In einer Eissporthalle (B2) führte die Stromleitung der Hallenbeleuchtung auf der gegenüberliegenden Trägerseite zu einer zeitweisen Veränderung der Messwerte über den Zeitraum des Betriebes der Beleuchtung. Tauwasserbildung führte in einzelnen Objekten (z.B. C3 und G1) zu einem Kurzschluss zwischen den nicht isolierten Steckverbindungen zweier Messelektroden und damit zu einer Verfälschung der Messwerte über die Dauer von maximal drei Tagen. In diesen Fällen wurden die zugehörigen Messdaten durch eine lineare Interpolation zwischen dem letzten und ersten Satz korrekter Messdaten ersetzt.

Zur Auswertung der Daten wurde ein Programm erarbeitet welches es ermöglicht, die Daten am Ende der geplanten Messdauer einzulesen, weiterzuverarbeiten und grafisch in verschiedenen Diagrammen zu veranschaulichen. Bei der Umrechnung der Widerstände aus den Rohdaten in Holzfeuchtwerte wurde gleichzeitig eine Kompensation des Temperatureinflusses vorgenommen. Hierzu wurde der Temperaturverlauf über den Querschnitt der jeweiligen Messstelle aus den gemessenen Oberflächentemperaturen über das explizite Euler-Verfahren [17] und unter Verwendung der in [18] angegebenen Werte zur Temperaturleitfähigkeit von Holz (siehe auch [19], [20]) errechnet. Eine Anpassung hinsichtlich der in den Laborversuchen festgestellten Abweichungen zwischen der mit der gewählten Messtechnik und der über die Darrmethode ermittelten Holzfeuchte wurde nicht vorgenommen, da die gemessenen Holzfeuchten durchweg in einem Bereich lagen, in dem nur geringe Unterschiede (max. $\Delta u = 1,3 \%$) zwischen den beiden Messmethoden festgestellt wurden.

Zu Vergleichszwecken wurden die Messwerte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte dazu verwendet, die in den oberflächennahen Bereichen herrschende Ausgleichsfeuchte in Form eines gleitenden Durchschnitts über zehn Tage zu berechnen. Hierzu wurde das theoretische Sorptions-Modell von Hailwood & Horrobin [21] unter Verwendung der in [22] gegebenen Koeffizienten angewendet (siehe auch [19]). Der Einfluss filmbildender Anstriche wurde hierbei nicht berücksichtigt, da der Typ der Oberflächenbehandlung nicht mehr eindeutig bestimmt werden konnte.

3 Ergebnisse

3.1 Aufbereitung und Darstellung

In den betrachteten Auswertezwischenräumen vom 1. Oktober 2010 bis 30. September 2011 für die Messperiode I und vom 1. April 2013 bis 31. März 2014 für die Messperiode II wurden insgesamt über 3,6 Millionen Messwerte erfasst. Die aus den Datenloggern ausgelesenen Daten wurden als Verläufe der relativen Luftfeuchte und der Temperatur an der Messstelle über die Zeit (Ganglinien) dargestellt, siehe Abbildung 7. Die gleiche Darstellungsweise wurde für die Messwerte der Holzfeuchte in den vier Querschnittstiefen gewählt, siehe Abbildung 8. In gleichem Diagramm ist zusätzlich die berechnete Ausgleichsfeuchte dargestellt. Aus den Verläufen der Holzfeuchte lässt sich mit zunehmender Messtiefe im Holzquerschnitt sowohl eine gedämpfte als auch eine zeitlich verzögerte Anpassung der Holzfeuchte an die Umgebungsbedingungen erkennen.

Für die Holzfeuchte wurden zudem grafische Auswertungen über den Querschnitt erstellt. Dies ermöglicht die Darstellung von Umhüllenden der minimalen und maximalen Holzfeuchtwerte, siehe Abbildung 9, wie auch der Umhüllenden der Holzfeuchtegradienten $\text{grad}(u) = du / dx$ über den Querschnitt, siehe Abbildung 10. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Amplitude der Holzfeuchte bzw. Holzfeuchtegradienten aufgrund der dämpfenden Wirkung der zwischen Messpunkt und Oberfläche liegenden Holzschicht.

3.2 Ergebnisse und Anmerkungen zu den untersuchten Nutzungsarten

Eine Zusammenfassung der Ergebnisse aller Objekte, sortiert nach Nutzungsart, ist in Tabelle 2 gegeben. Diese Darstellungsweise wurde gewählt, da eine graphische Auswertung zwar unmittelbar verständlich ist, jedoch keinen schnellen und prägnanten Überblick und Vergleich der Ergebnisse aller Objekte zulässt. Für die grafische Auswertung aller Ergebnisse wird auf den Schlussbericht zum Forschungsvorhaben [23] verwiesen. Die tabellarische Zusammenfassung enthält neben den ermittelten Mittelwerten von Luftfeuchte (RF), Temperatur (T) (jeweils beruhend auf Tagesmittelwerten) und Holzfeuchte (u), für alle drei Parameter auch die maximale Amplitude (A), d.h. die Differenz zwischen größtem und niedrigstem über den Messzeitraum ermittelten Messwert. Für die Holzfeuchte ist zudem die maximale Gradienten der Holzfeuchte $\text{grad}(u) = du/dx$ zwischen zwei benachbarten Messstellen sowie die maximale Holzfeuchtedifferenz zwischen äußerstem (15 mm) und innerstem (70 mm) Messpunkt angegeben. Eine graphische Erläuterung der in Tabelle 2 aufgeführten Daten enthält Abbildung 11.

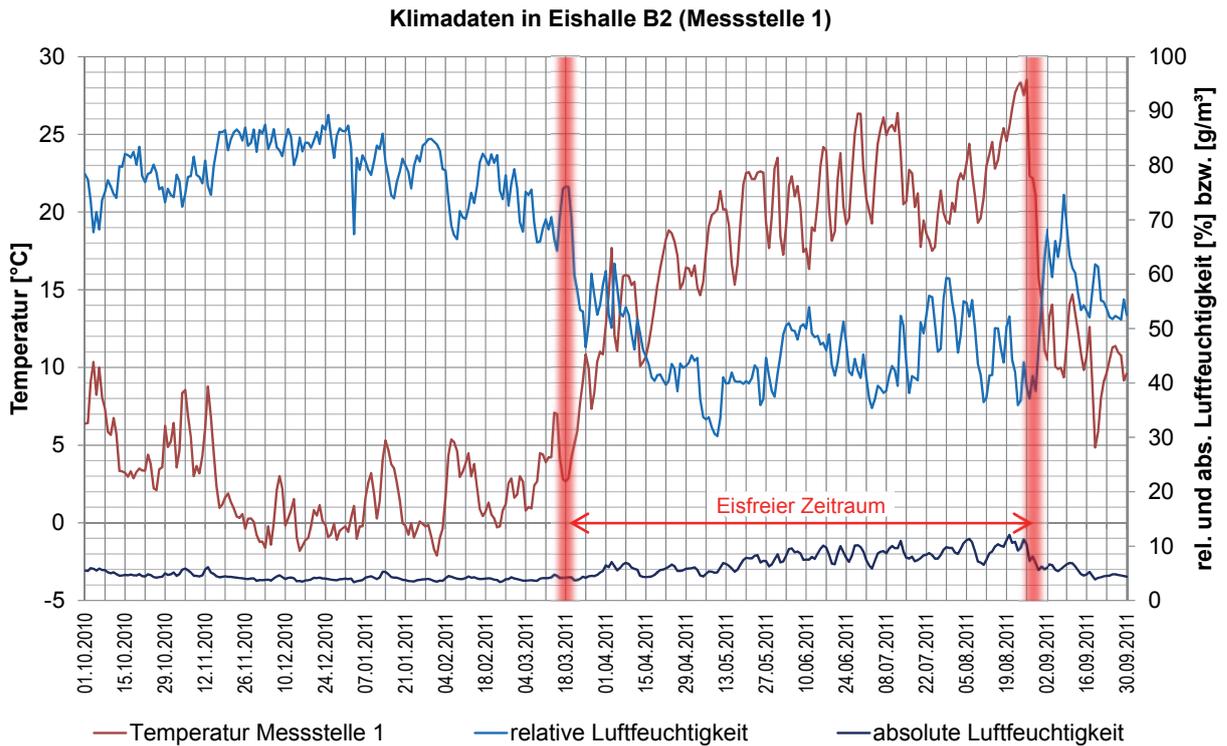


Abb.7 Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Referenztemperatur über den betrachteten Zeitraum der Messperiode I am Beispiel der Eissporthalle B2.

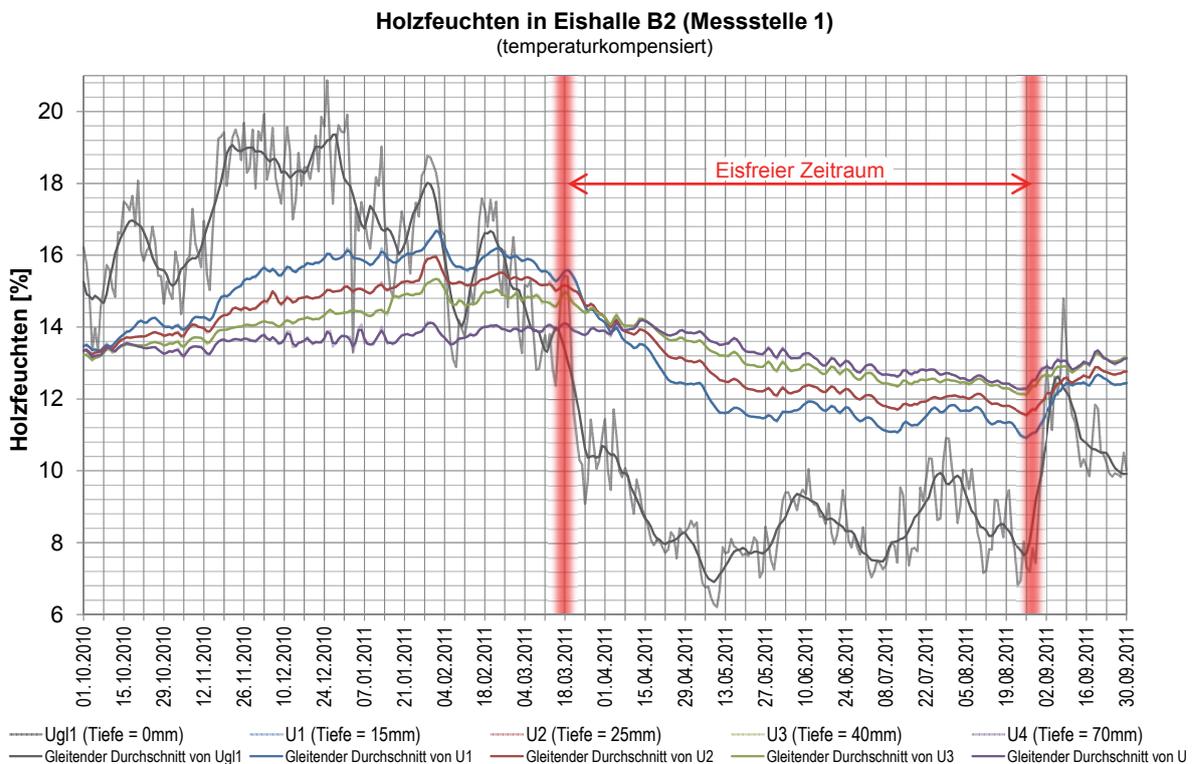


Abb.8 Verlauf der Holzfeuchte in unterschiedlichen Querschnittstiefen über den betrachteten Zeitraum der Messperiode I am Beispiel der Eissporthalle B2.

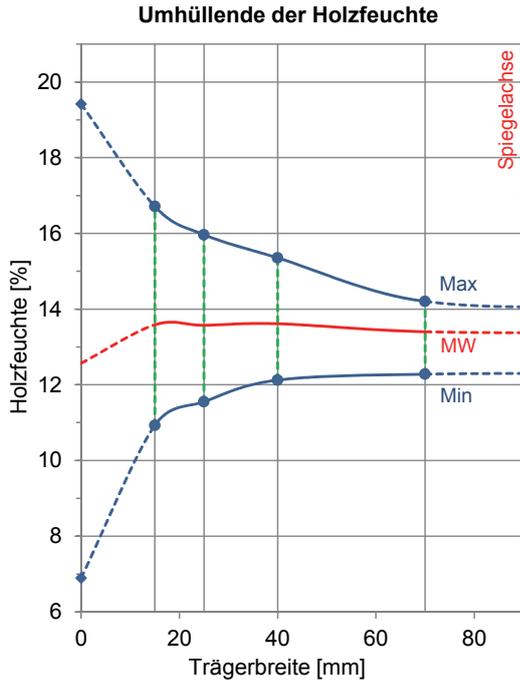


Abb.9 Umhüllende der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle B2.

MW = Mittelwert aller in den vier Tiefen gemessenen Holzfeuchten
 max. A = maximale Amplitude der äußersten Holzfeuchtemessung
 \pm max. Δ = maximale Holzfeuchtediff. zw. innerster und äußerster Messung
 \pm grad. = Holzfeuchtegradienten in [%/cm] zw. benachbarten Messpunkten

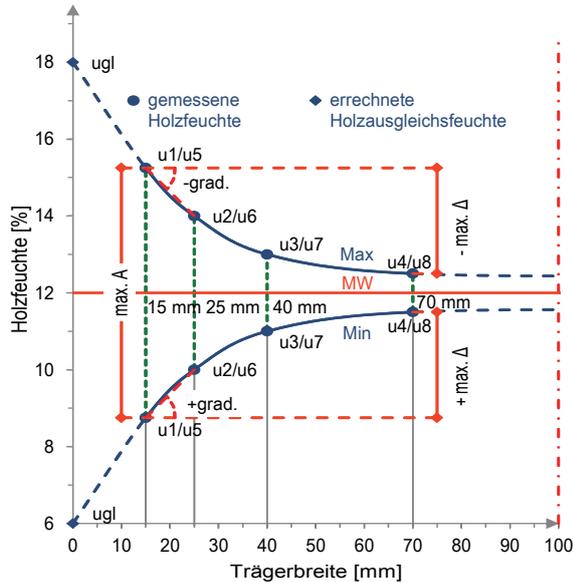


Abb.11 Schematische Darstellung des maximalen und minimalen umhüllenden Feuchteverlaufs im Holzquerschnitt mit Bezeichnung der ausgewerteten Größen.

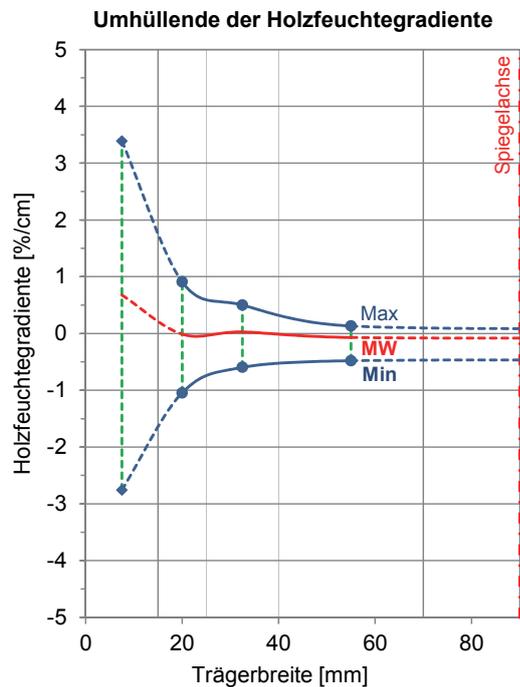


Abb.10 Umhüllende der Holzfeuchtegradienten über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle B2.

Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Nutzungen bestätigt die erwartete große Bandbreite der möglichen klimatischen Bedingungen in Gebäuden mit Holztragwerken. Über alle Nutzungen hinweg betrachtet, lagen die mittleren Holzfeuchten zwischen 4,4 % und 17,1 %, wobei der untere Grenzwert als Sonderfall betrachtet werden muss. Die Holzfeuchtegradienten fallen in gedämmten und klimatisierten Gebäuden geringer aus als in Gebäuden mit stärkerem Einfluss des jahreszeitlich schwankenden Aussenklimas. Falls nicht gesondert erwähnt, stellen die im Folgenden angegebenen Zahlenwerte zu Holzfeuchte (u), Temperatur (T) und relativer Luftfeuchte (RF) Mittelwerte dar.

In den untersuchten Schwimmhallen (Objekte „A“) wurden während des laufenden Betriebes sehr konstante, hinsichtlich der Ausgleichsfeuchte der Holzbauteile unkritische Randbedingungen ($T \approx 30 \text{ }^\circ\text{C}$, 50 % RF) festgestellt. Die Holzfeuchten lagen im Mittel bei 8,5 % und wiesen geringe Schwankungen (jährliche Amplitude $A = 1,5 \text{ %}$) und kleine Gradienten auf. Ausnahmen bilden Übergangsbereiche zum Aussenklima (z.B. zu Außenbecken), in denen aufgrund des Absinkens der Temperatur sehr hohe Luftfeuchten auftreten können, die zudem stärkeren Schwankungen unterworfen sind (Objekt A2). Aufgrund der geringen festgestellten klimatischen Bean-

sprachung der Holztragwerke in Schwimmhallen wurden die Objekte dieser Nutzungskategorie für die zweite Messperiode nicht weiter betrachtet.

Auch in Sporthallen (Objekte „D“) wurde durchgängig ein konstantes Klima beobachtet, welches mit relativen Luftfeuchten zwischen 40 % und 50 % eher trocken ist. Da alle Objekte beheizt waren, lagen die Temperaturen meist konstant um 20 °C. Daraus ergeben sich Holzfeuchten im Bereich von 8 % bis 10 % die sich über das Jahr hinweg nur wenig verändern (Amplitude $A \approx 2\%$). Objekt D1 stellt eine Ausnahme dar, da sich die Hauptträger unterhalb von Lichtkuppeln befinden. Dies resultierte in hohen Temperaturen und geringen relativen Luftfeuchten (28 % RF). Mit Holzfeuchten zwischen 4 % und 6 % waren die Querschnitte dieses Tragwerkes sehr trocken. Es ist anzumerken, dass die verwendete Messtechnik die Holzfeuchte trockener Bauteile tendenziell leicht unterschätzt ($\max. \Delta u \approx 1,3\%$), siehe Abschnitt 2.2. Für alle Objekte gilt, dass die während des Betriebes ermittelten Holzfeuchtegradienten sehr gering sind. Hinsichtlich einer Fortführung der Langzeitmessungen wurden Sporthallen daher nicht weiter betrachtet.

Das in den beiden untersuchten Objekten „E“ „Produktion und Verkauf“ in Messperiode I gemessene Klima ist aufgrund der sehr unterschiedlichen Nutzung nur partiell miteinander vergleichbar. Das Messobjekt E2 repräsentiert eine außergewöhnliche Nutzung. Aufgrund von Schmiedearbeiten (Sinterofen) herrschten unter dem Dach sehr hohe Temperaturen (teilweise über 30 °C) bei einer gleichzeitig sehr geringen Luftfeuchte, die über lange Zeit unter 20 % lag. Dies erklärt die in Messperiode I durchschnittlich gemessenen Holzfeuchten von unter 5 %. Gegen Ende der Messperiode I wurde, aufgrund einer geplanten Umnutzung, die Produktion in der Halle eingestellt. Die dadurch bewirkte plötzliche Änderung der klimatischen Umgebungsbedingungen kann zu schnellem Aufweichen und dementsprechend zu erheblicher Rissbildung im Querschnittsinnen der gekrümmten Träger führen. Dies zeigt sich ansatzweise in der erhöhten Holzfeuchtegradienten der Messstelle 2 des Objektes E2. Objekt E1 wird als Verkaufshalle genutzt. Im Zuge des Umbaus dieser Verkaufshalle (u.a. Einbau einer Fußbodenheizung), wurde auch die benachbarte Halle des Objektes E2 umgebaut und ebenfalls in eine Verkaufshalle umgenutzt. Trotz dieser Umnutzung in der zweiten Messperiode, korrelieren die Verläufe des Hallenklimas und der Holzfeuchte der beiden Messobjekte gut mit den Messwerten aus dem ersten Messzeitraum. Durch die eingebaute Fußbodenheizung und den kontinuierlichen Betrieb in beiden Hallen ist das in Messperiode II aufgezeichnete Hallenklima gut mit

einander vergleichbar ($T \approx 20^\circ\text{C}$, $RF \leq 40\%$), die Holzfeuchten passen sich zunehmend aneinander an ($u \approx 7\%$). Beide Hallen sind ungedämmt, aufgrund der Beheizung ergeben sich jedoch deutlich gedämpfte Schwankungen der Luftfeuchte- und Temperatur. Durch die sehr konstanten klimatischen Bedingungen ergeben sich bei dieser Nutzung die geringsten Amplituden ($A < 2\%$) und Gradienten aller in Messperiode II untersuchten Objekte.

Das Umgebungsklima in geschlossenen, nicht klimatisierten Eissporthallen (Objekte B1 und B2) ist durch eine deutliche Änderung zwischen den Wintermonaten ($T = 4^\circ\text{C}$, 75 % RF) und den Sommermonaten (eisfreie Zeit, $T = 15^\circ\text{C}$, 60 % RF) geprägt. Die Holzfeuchten waren erhöht ($u = 13 - 16\%$) und schwankten über den Jahresverlauf deutlich. In den Objekten B3 und B4 führt der Betrieb der dort vorhandenen Heizungs- und Lüftungsanlage zu einer deutlichen Dämpfung dieser Effekte. In den Objekten B1 und B4 war eine dämpfende Wirkung des filmbildenden Anstrichs auf die Größe der Holzfeuchtegradienten festzustellen. Während des Eisbetriebes lagen die Holzfeuchten in Bauteilen über der Eisfläche im Mittel um 1,5 % höher als in den Randbereichen der Halle. Es wird darauf hingewiesen, dass die Messung der Holzfeuchte an den Trägerseitenflächen und nicht an der parallel zur Eisfläche liegenden Trägerunterseite durchgeführt wurde. Oberflächen gegenüber von Eisflächen werden durch den Strahlungsaustausch deutlich stärker abgekühlt. Dies kann zu Tauwasserbildung bis hin zur Bildung einer Eisschicht führen. Im Fall von Holzbauteilen resultiert dies in deutlich erhöhten Holzfeuchten, siehe z.B. [10]. Im Messobjekt B3 wurde während der ersten Messperiode eine temporäre Umnutzung in Form eines Pressezentrum für eine Großveranstaltung vorgenommen, wodurch sich die eisfreie Zeit auf 7 Monate verlängerte. Während der zweiten Messperiode herrschte normaler Betrieb mit einer eisfreien Zeit von drei Monaten im Frühjahr. Somit sind die beiden Messzeiträume nur bedingt miteinander vergleichbar. Die Umnutzung führte zu einem Anstieg der durchschnittlichen Temperatur von 4 °C und einer Abnahme der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte um 8 %. Die dadurch bedingte Austrocknung führte zu deutlich größeren Holzfeuchtegradienten sowie jährlichen Schwankungen der Holzfeuchte von $A \approx 5\%$ im Vergleich zum Normalbetrieb ($A \approx 3,5\%$). Für alle Eishallen gilt, dass das Hallenklima stark durch das Abtauen und Wiederherstellen der Eisfläche beeinflusst wird. Durch die völlig unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen in den Zeiträumen mit und ohne Eisfläche ergeben sich mit zunehmender Dauer der eisfreien Zeit große jahreszeitliche Schwankungen im Verlauf der Holzfeuchte.

Tab. 2 Tabellarische Zusammenfassung der Messergebnisse. Zeitraum der Messung: 01.10.2010 - 30.09.2011 für Messperiode I und 01.04.2013 – 31.03.2014 für Messperiode II.

Objekt	Mess- stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	\pm max. Δ [%]	\pm max. Grad. [%/cm]	MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]		
Schwimmhallen											
A1	MST1	8,7	1,4	+1,0	-0,0	+0,1	-0,2	29,7	6,7	48,3*	6,8*
	MST2	9,3	1,2	+0,4	-0,2	+0,5	+0,0				
A2	MST1	16,1	1,8	+0,6	-0,5	+0,6	-0,4	28,7	6,0	88,6*	19,4*
	MST2	15,0	2,6	+1,6	-0,6	+1,3	-0,3				
A3	MST1	8,7	1,6	+4,8	+2,3	+1,4	+0,7	30,5	19,5	45,6*	29,0*
	MST2	7,7	1,8	+1,7	+0,2	+1,0	+0,3				
Eissporthallen Messperiode I											
B1	MST1**	15,5	3,3	+1,7	-1,0	+0,9	-0,5	9,4	26,2	69,0	44,0
	MST2	14,2	2,5	+0,4	-1,9	+0,7	-0,3				
B2	MST1	13,5	5,8	+1,9	-2,8	+0,9	-1,0	9,9	29,9	62,2	59,1
	MST2**	15,2	6,6	+1,9	-3,9	+1,2	-0,8				
B3	MST1**	10,8	5,1	+3,8	-1,6	+1,5	-1,0	19,9	14,1	40,2	57,0
	MST2	9,6	4,0	+2,1	-1,7	+1,3	-0,4				
B4	MST1	13,3	1,9	+0,9	-0,6	+0,7	+0,2	9,2	18,8	68,3	44,7
	MST2**	14,9	2,8	-0,3	-2,1	-0,0	-0,7				
Eissporthallen Messperiode II											
B3	MST1**	11,7	3,1	+1,9	-1,4	+0,6	-1,0	16,1	19,8	49,5	60,2
	MST2	10,1	2,5	+0,6	-1,7	+0,7	-0,5				
B4*	MST1	14,3	1,6	+1,4	+0,4	+0,7	+0,4	7,4	22,7	76,9	36,5
	MST2**	16,0	2,5	+0,4	-1,0	+0,1	-0,3				
Reithallen Messperiode I											
C1	MST1	17,1	3,3	+1,3	-1,0	+0,6	-0,5	13,3	22,5	79,7	52,6
	MST2	16,4	3,4	-0,0	-2,8	-0,2	-1,2				
C2	MST1	15,5	5,1	+0,1	-3,5	-0,1	-2,8	10,5	28,6	77,8	48,6
	MST2	15,8	3,8	+1,2	-1,4	+0,8	-0,7				
C3	MST1	14,4	4,9	+2,7	-1,5	+0,7	-1,1	9,8	30,5	77,9	52,3
	MST2	15,5	4,5	+1,8	-1,6	+0,8	-0,5				
Reithallen Messperiode II											
C1	MST1	17,1	3,8	+1,6	-0,8	+0,6	-0,5	14,1	22,6	78,5	46,6
	MST2	16,3*	4,0*	0,7*	-1,7*	0,3*	-1,0*				
C3	MST1	14,1	3,8	+2,2	+0,2	+0,6	-0,7	12,0	30,2	71,5	42,5
	MST2	15,2	4,4	+1,5	-1,0	+0,4	-0,6				
Sporthallen											
D1	MST1	4,4	2,1	+0,6	-0,3	+0,3	-0,2	27,4	26,7	27,7	29,6
	MST2	5,9	1,2	+1,1	+0,0	+0,7	+0,2				
D2	MST1	8,0	2,0	+0,7	-0,9	+0,2	-0,3	20,6	16,7	42,8	42,0
	MST2	8,1	2,1	+1,1	-0,6	+0,6	-0,2				
D3	MST1	10,2	2,2	+1,3	-0,5	+0,8	-0,1	20,8	7,9	51,2	34,0
	MST2	10,0	2,1	+1,7	-0,2	+0,7	-0,1				

* Da es bei diesen Objekten zu einem zeitweisen Ausfall der mit * gekennzeichneten Messdaten kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

** Die mit ** gekennzeichneten Messstellen liegen über der Eisfläche.

Tab. 2 Fortsetzung: Tabellarische Zusammenfassung der Messergebnisse. Zeitraum der Messung: 01.10.2010 - 30.09.2011 für Messperiode I und 01.04.2013 – 31.03.2014 für Messperiode II.

Objekt	Mess- stelle	Holzfeuchte						Temperatur		rel. Luftfeuchte	
		MW [%]	max. A [%]	\pm max. Δ [%]	\pm max. Grad. [%/cm]	MW [°C]	max. A [°C]	MW [%]	max. A [%]		
Produktions- und Verkaufshallen Messperiode I											
E1	MST1	7,7	1,8	+0,6	-1,2	+0,5	-0,1	18,4	17,5	40,9	38,6
	MST2	7,8	1,6	+0,3	-1,3	+0,5	-0,1				
E2	MST1	4,8	1,9	+0,5	-0,7	+0,7	-0,3	27,1	21,3	25,8	49,9
	MST2	4,7	2,2	+0,9	-1,1	+0,5	-0,9				
Produktions- und Verkaufshallen Messperiode II											
E1	MST1	7,2	1,8	+1,1	-0,5	+0,6	-0,0	21,9	13,7	37,1	35,8
	MST2	7,2	1,7	+1,0	-0,5	+0,7	+0,1	21,8	13,6	37,8	34,9
E2	MST1	5,5	1,6	+0,1	-1,3	+0,5	-0,2	23,0	15,9	34,7	41,4
	MST2	5,4	2,0	+0,7	-1,0	+0,2	-0,7	22,6	15,9	36,0	41,8
Landwirtschaftliche Hallen Messperiode I											
F1	MST1	16,4	3,7	-0,9	-3,7	-0,3	-1,2	11,6	21,6	74,7	45,6
	MST2	15,6	3,0	-0,9	-2,7	-0,5	-1,9				
F2	MST1	14,9	5,6	-0,1	-2,8	-0,7	-2,1	14,2	22,4	68,4	48,1
	MST2	15,1	3,7	+0,2	-2,1	-0,1	-1,4				
F3	MST1	14,4	4,7	-1,3	-5,5	-0,9	-2,8	12,6	28,2	69,2	54,1
	MST2	15,2	4,5	-1,2	-5,1	-0,7	-2,6				
Landwirtschaftliche Hallen Messperiode II											
F1	MST1	16,3	8,6	+5,2	-2,2	+1,1	-0,7	12,1	23,5	78,3	41,2
	MST2	16,8	10,1	+5,2	-1,8	+3,5	-0,4	13,3	21,5	77,2	36,5
F3	MST1	14,3	4,1	-1,2	-4,2	-0,9	-2,2	13,2	26,9	65,0	50,2
	MST2	15,0	4,3	-1,1	-4,0	-0,6	-1,8	13,2*	26,9*	65,5*	50,1*
Lagerhallen Messperiode I											
G1	MST1	10,5	8,7	+3,0	-5,2	+1,2	-3,2	10,1	32,6	74,3	62,5
	MST2	13,9	5,4	+1,4	-2,6	+0,7	-2,1				
G2	MST1	13,3	6,1	+1,2	-4,4	+1,2	-1,4	9,7	32,5	67,1	54,0
	MST2	12,7	3,6	+0,7	-2,5	+0,5	-1,0				
G3	MST1	11,5	3,6	+1,7	-1,4	+1,1	-0,3	13,4	25,6	61,3	44,0
	MST2	12,1	2,9	+0,7	-1,7	+0,7	-0,7				
Lagerhallen Messperiode II											
G1	MST1	9,7	4,6	+3,0	-1,5	+1,0	-0,8	12,8*	38,0*	58,4*	56,5*
	MST2	13,6	5,1	+1,9	-1,6	+0,8	-1,0	10,5	32,7	74,8	56,2
G2	MST1	13,4	5,8	+1,9	-3,0	+1,2	-1,7	9,8	34,3	66,6	55,9
	MST2	12,8	2,2	+1,4	-1,0	+0,6	-0,8	10,2	31,9	67,7	50,6

* Da es bei diesen Objekten zu einem zeitweisen Ausfall der mit * gekennzeichneten Messdaten kam, beruhen die Werte auf den Ergebnissen des regulär aufgezeichneten Messzeitraums.

Das Klima in Reithallen (Objekte „C“) war geprägt von jahreszeitlichen Schwankungen, resultierend in hohen Amplituden von Temperatur und relativer Luftfeuchte, letztere auf hohem Niveau (78 % RF). In den Wintermonaten führt das Zusammenspiel von kalter Luft in den ungedämmten und unbeheizten Gebäuden und der von den Sprinkleranlagen zur Staubbindung eingebrachten Feuchte häufig zu Tauwasserausfall. Wie in anderen vom Aussenklima beeinflussten Nutzungen ergaben sich höhere Holz-

feuchten ($u \approx 16$ %), die aufgrund des jahreszeitlichen Charakters der Schwankungen ($A \approx 4$ %) in merklichen, nicht jedoch in außergewöhnlich hohen Holzfeuchtegradienten resultierten. Durch den im Vergleich zur ersten Messperiode etwas milderen Winter ergibt sich im zweiten Messzeitraum über die Wintermonate eine etwas geringere relative Luftfeuchte. Das führt im Randbereich der Trägerquerschnitte zu etwas geringeren Holzfeuchten. Alle

anderen Ergebnisse aus den beiden Messzeiträumen sind sehr gut miteinander vergleichbar.

Ähnlich starke jahreszeitliche Schwankungen des Umgebungsklimas wurden für landwirtschaftliche Hallen mit Viehbetrieb ermittelt (Objekte „F“), wobei die durchschnittlichen relativen Luftfeuchten etwas geringer ausfielen (70 % RF). Durch ihre teiloffene, ungedämmte Bauweise (Seitenflächen teilweise ganzjährig offen, zusätzlich Dachentlüftung) sind diese vom Außenklima beeinflusst. In den Wintermonaten führt das Zusammenspiel der kalten, durch die vielen Öffnungen einströmenden Luft und der aufgrund des Feuchteintrags durch das Vieh erhöhten Luftfeuchte im Gebäude zu hohen Holzfeuchten und teilweise zu Tauwasseranfall. Daraus ergeben sich Holzfeuchten im Bereich von 15 %, die zudem stark schwanken ($A \approx 4$ %). Die Ergebnisse aus beiden Messperioden sind für die landwirtschaftlichen Hallen sehr gut vergleichbar. Die im Objekt F1 ermittelten Messwerte der Holzfeuchte in der zweiten Messperiode sind mit einer gestiegenen Anzahl an Messfehlern behaftet und weisen mehrere unrealistische Sprünge auf. Aus diesem Grund sind die Messergebnisse für dieses Objekt in Tabelle 2 hellgrau abgebildet. Landwirtschaftliche Gebäude werden nicht nur sehr häufig in Holz ausgeführt, in der Praxis finden sich auch eine Vielzahl möglicher Nutzungen und konstruktiver Ausbildungen. Dementsprechend wird diese Nutzungsart momentan von den Autoren anhand von zehn ausgewählten landwirtschaftlichen Gebäuden eingehender messtechnisch untersucht (in Zusammenarbeit mit der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, gefördert durch die Bayerische Forstverwaltung).

Da Lagerhallen (Objekte „G“) meist offen stehen, ist das Hallenklima stark vom Außenklima abhängig. Die Holzfeuchten stellten sich im Mittel zwischen 10 % und 14 % ein, schwankten wegen des Einflusses des Außenklimas jedoch stärker als bei allen anderen untersuchten Nutzungsarten ($A = 3 - 6$ %). Im Messobjekt G1 resultierte die winterliche Lagerung von Pflanzen in hohen Luftfeuchten und z.T. erheblicher Tauwasserbildung. Die Holzbauteile im Bereich von Lichtbändern (d.h. direkter Sonneneinstrahlung ausgesetzt) wiesen die größte Amplitude und Holzfeuchtegradienten aller untersuchter Objekte auf. In der zweiten Messperiode wurde das Hallenklima nicht mehr am Standort der Messtechnik, sondern direkt an beiden Messstellen erfasst. Dadurch ist bei diesem Messobjekt ein deutlicher Unterschied in den klimatischen Randbedingungen der beiden untersuchten Messstellen zu verzeichnen. Für die Messstelle 2 im Bereich des Lichtbandes ergab sich mit durchschnittlich 12,8 °C und 58 % RF ein im Vergleich zum ersten Messzeitraum wesentlich tro-

ckeneres Hallenklima. Im ersten Messzeitraum war das Hallenklima nahe dem Traufbereich bei Messstelle zwei erfasst worden (durchschnittlich 10 °C und 74 % RF). Bei Messobjekt G2 sind die Klimabedingungen aus beiden Messperioden sehr gut miteinander vergleichbar. Die jahreszeitlichen Durchschnittswerte der Lufttemperatur und der relativen Luftfeuchte sowie deren maximale Amplituden sind für beide Messzeiträume praktisch identisch. Messstelle 1 befindet sich im überdachten Außenbereich, Messstelle 2 im Innenbereich der Lagerhalle. Anhand der Klimamesswerte dieser beiden Messstellen konnte eine sehr starke Abhängigkeit des Hallenklimas vom Außenklima festgestellt werden. Das Außenklima wird durch die Gebäudehülle nur geringfügig gedämpft.

Neben den vorab beschriebenen, nutzungsbedingten Klimabedingungen und deren Beanspruchungspotential für die Holzbauteile, verdeutlichen die Ergebnisse des Forschungsprojektes einen weiteren wichtigen Aspekt. Temporäre Eingriffe, wie Renovierungsarbeiten oder Nutzungsänderungen (temporäre oder dauerhafte Nutzungsänderungen) können zu stark veränderten klimatischen Bedingungen führen, die sich in ausgeprägten Holzfeuchteänderungen niederschlagen. So wurden im Rahmen dieses Forschungsprojektes sowohl ein starkes Austrocknen von Holzbauteilen (Renovierung des Hallenbades A3 sowie temporäre Umnutzung der Eissporthalle B3) wie auch das starke Aufweichen von sehr trockenen Holzbauteilen (Umnutzung eines ehemals metallverarbeitenden Betriebes E2) festgestellt. Obwohl über den Zeitraum der Messung nicht der gesamte Effekt dieser Nutzungsänderung abgedeckt werden konnte, wurde ein merkliches Ansteigen der Holzfeuchtegradienten festgestellt.

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Das Thema der Materialfeuchte von tragenden Holzbauteilen wurde bisher tendenziell vor dem Hintergrund behandelt, hohe Holzfeuchten zu vermeiden um Fäulnis oder Pilzbildung zu verhindern. Die Auswertung von Schäden an weitgespannten Holzkonstruktionen zeigt als überwiegend festgestelltes Schadensbild ausgeprägte Rissbildung in Lamellen und Klebefugen der Brettschichtholzbauteile aufgrund niedriger oder stark schwankender Holzfeuchten [1] - [4]. Diese Schwindrisse reduzieren den verbleibenden Querschnitt zur Übertragung von Querkraft- oder Schubspannungen. Grund für derartige Holzfeuchten und Holzfeuchtegradienten sind schnelle und/oder starke Änderungen der Umge-

bungsbedingungen, welche sich zum einen aus konstruktiven Bedingungen, zum anderen aus der Gebäudenutzung ergeben können. Lokal können diese Änderungen verstärkt auftreten, wie z.B. im Bereich von Oberlichtern oder Lüftungsauslässen.

Ein Vergleich der Ergebnisse der im Forschungsprojekt untersuchten 21 Gebäude aus sieben unterschiedlichen Nutzungen bestätigt die erwartete große Bandbreite der möglichen klimatischen Bedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchte) in Gebäuden mit Holztragwerken. Über alle Nutzungen hinweg betrachtet, lagen die gemessenen mittleren Holzfeuchten zwischen 4,4 % und 17,1 %. Aus den Verläufen der Holzfeuchte lässt sich mit zunehmender Messtiefe im Holzquerschnitt sowohl eine gedämpfte als auch eine zeitliche Verzögerung der Anpassung der Holzfeuchte an die Umgebungsbedingungen erkennen. Die Holzfeuchtegradienten fallen in gedämmten und klimatisierten Gebäuden geringer aus als in Gebäuden mit stärkerem Einfluss des jahreszeitlich schwankenden Aussenklimas.

Die durchschnittlichen Holzfeuchten in gedämmten, beheizten Gebäuden (u.a. Schwimmhallen, Sporthallen, Verkaufs- und Produktionshallen) lagen im Bereich von 6 – 10 % bei jährlichen Amplituden von ca. 2%. Aufgrund dieser relativ konstanten aber trockenen Umgebungsbedingungen sollte schon bei Produktion, Transport, Einbau und Baustellenbetrieb darauf geachtet werden, dass die Holzfeuchte von (speziell großvolumigen) Holzbauteilen nur um wenige Prozent von der späteren Ausgleichsfeuchte abweicht ($u \leq 10$ %). Mögliche Maßnahmen sind u.a. ein abgestimmtes Baustellenregime (u.a. Verhindern einer Befeuchtung bei längerer Lagerung, Reduktion unnötiger Baufeuchte). Beim Entwurf derartiger Tragwerke sollte darauf geachtet werden, Sperrreffekte gegenüber dem freien Schwinden und Quellen der Bauteile (z.B. Verbindungsmittel mit großem Abstand senkrecht zur Faser, in geringem Abstand angeordnete Querszugverstärkungen) weitestgehend zu vermeiden. Der hinsichtlich des Gefährdungspotentials für die Entstehung von Schwindrissen kritischste Zeitraum wird bei derartigen Nutzungen in den meisten Fällen der erste Winter nach Erstellung des Gebäudes und Schließen der Gebäudehülle sein. In diesem Zeitraum sollte beim Einsatz der Heizanlagen darauf geachtet werden, die relative Luftfeuchte nicht zu schnell und zu stark abzusenken. Eine künstliche Luftbefeuchtung, denkbar auch z.B. in Form von Verdunstungsbecken, wäre eine weitere Möglichkeit, die Geschwindigkeit der Austrocknung der Holzquerschnitte zu dämpfen. Eine Alternative stellt die Oberflächenbehandlung der Holzquerschnitte z.B. in Form von Feuchteschutzmitteln dar, welche die Feuchteaufnahme und -abgabe für die ersten Jahre nach

der Erstellung des Gebäudes dämpft. Zum momentanen Zeitpunkt können noch keine konkreten Angaben hinsichtlich anwendbarer, diffusionshemmender Produkte zur Oberflächenbehandlung gegeben werden. Generell sollte schon bei Herstellung, Transport und Einbau darauf geachtet werden, dass die Holzfeuchte der Bauteile nur wenig von der späteren Ausgleichsfeuchte abweicht ($u \leq 12$ %).

Die zweite Gruppe der im Forschungsprojekt untersuchten Gebäude betraf Nutzungen mit stark schwankenden Umgebungsbedingungen (z.B. Eissporthallen), z.T. bedingt durch einen erhöhten Einfluss des Aussenklimas auf das Innenraumklima in unbeheizten und ungedämmten Gebäuden (z.B. in Reithallen, landwirtschaftlichen Hallen und Lagerhallen). Im Fall der letztgenannten Nutzungen ergaben sich durchschnittliche Holzfeuchten von 12 – 16 % bei jährlichen Amplituden von ca. 4%. Hier könnte das Aufbringen einer Dachdämmung helfen, die starken Schwankungen des Innenraumklimas und dementsprechend die Holzfeuchtegradienten zu dämpfen. Bei teiloffenen Bauwerken reduziert sich der Effekt einer solchen Maßnahme mit zunehmendem Anteil an dauerhaft geöffneten Bereichen in der Außenhülle. Holzbauteilen die aufgrund lokaler Gegebenheiten wie Oberlichtern oder Lüftungsauslässen verstärkten Änderungen des Umgebungs-klimas ausgesetzt sind sollte erhöhte Aufmerksamkeit hinsichtlich potentieller Rissentstehung aufgrund eines zu schnellen Austrocknens nach einer Feuchteperiode geschenkt werden. In diesen Bereichen bietet die Verwendung von außen auf die Holzbauteile aufgetragenen, austauschbaren Holzwerkstoffplatten eine Möglichkeit, die saisonalen Holzfeuchteänderungen zu dämpfen. Dieses Prinzip wird zurzeit von den Autoren im Rahmen eines weiteren, in Zusammenarbeit mit der Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. durchgeführten Projekts untersucht. In Reithallen führt das Zusammenspiel von kalter Luft und der von den Sprinkleranlagen eingebrachten Feuchte häufig zu Tauwasserausfall. Um diese Folgeerscheinung zu reduzieren sollten die Sprinkleranlagen in der kalten Jahreszeit nur eingesetzt werden, wenn dies für den Reitbetrieb unbedingt erforderlich ist. In Lagerhallen sollte während der generell feuchteren Wintermonate darauf geachtet werden, dass durch die gelagerten Güter keine hohe, zusätzliche Feuchte eingebracht wird. In Eissporthallen ergab sich die stärkste Änderung der klimatischen Bedingungen zum Zeitpunkt der Eisherstellung nach der Sommerpause. Durch eine kontrollierte Lüftung und Heizung der Eissporthallen kann die Auswirkung dieses Effekts deutlich gedämpft werden.

Neben den vorab beschriebenen, nutzungsbedingten Klimarandbedingungen und deren Beanspruchungs-

potential für die Holzbauteile, verdeutlichen die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens, dass temporäre Eingriffe, wie Renovierungsarbeiten oder Nutzungsänderungen zu stark veränderten klimatischen Bedingungen führen können. Diese können in ausgeprägten Holzfeuchteänderungen resultieren. Dementsprechend sollte bei derartigen Eingriffen auf eine schonende Änderung des Klimas geachtet werden und die Verwendung von Hilfsmaßnahmen (z.B. Verdunstungsbecken, Oberflächenbehandlung) für eine zeitlich kontrollierte Änderung des Raumklimas in Betracht gezogen werden. Idealerweise sind solche Eingriffe von einem im Holzbau kundigen Fachplaner zu begleiten.

Es sollte angestrebt werden, das Bewusstsein von Planern und Ausführenden zum Thema der Umgebungsbedingungen und resultierender Holzfeuchte während der Errichtung und Nutzung wie auch temporärer Eingriffe und Nutzungsänderungen ihres Gebäudes zu erhöhen. Erreicht werden könnte dies über die Angabe wesentlicher Informationen in Kommentaren zu Normen sowie Lehrbüchern. Dazu zählt Holzbauteile mit einer Holzfeuchte einzubauen, die der Gleichgewichtsfeuchte im fertig gestellten Bauwerk entspricht. Des Weiteren wird empfohlen, Beispiele der Klassifizierung von Gebäuden in Nutzungsklassen (z.B. Reithallen, Eissporthallen) anzugeben. Gleichzeitig ist jedoch darauf hinzuweisen, dass die erwarteten Ausgleichsfeuchten von Holzbauteilen für jedes Gebäude objektspezifisch aus den erwarteten Klimarandbedingungen zu ermitteln sind. Vor allem sollte das Bewusstsein der Planer und Ausführenden gegenüber trockenen Umgebungsbedingungen erhöht werden. Dementsprechend wird empfohlen, künftig in den Normen zur Bemessung und Konstruktion von Holzbauten darauf hinzuweisen, dass die Ausgleichsfeuchte von Bauteilen aus Nadelholz in beheizten und gedämmten Gebäuden (Nutzungsklasse 1) in den meisten Fällen unter 10 % liegt.

5 Ausblick

Ziel des Forschungsvorhabens war, mittels Langzeitmessserien klimatische Umgebungsbedingungen und sich daraus ergebende Holzfeuchtegradienten bezogen auf holzbautypische Gebäudetypen und -nutzungen im Normalbetrieb zu generieren. Um realistische Referenzwerte in Bezug auf das Schädigungspotential (Rissbildung) von Holzfeuchtegradienten festzulegen sind weitere Forschungsarbeiten in Form von Simulationen und Sensitivitätsstudien (u.a. zu Innenraumklimata sowie lokalen Klimarandbedingungen und daraus resultierenden Holzfeuch-

tegradienten), in Verbindung mit Laboruntersuchungen (u.a. unterschiedlichen Klimaregimen in der Klimakammer ausgesetzte Holzbauteile) notwendig. Im Hinblick auf Gebäude mit relativ konstanten aber trockenen Umgebungsbedingungen (u.a. Sporthallen, Verkaufs- und Produktionshallen) wird empfohlen, dass die Holzfeuchte der Bauteile bereits vor Inbetriebnahme nur wenig von der späteren Ausgleichsfeuchte abweicht. Ist dies nicht der Fall und/oder trocknen die Holzbauteile nach Inbetriebnahme zu schnell aus, so kann dies zu erheblicher Schwindrissbildung an den Holzquerschnitten führen. Dies wurde bei mehreren im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Messobjekten dieser Kategorie festgestellt. Dies kann zum einen daran liegen, dass die Bauteile mit einer Holzfeuchte produziert werden, die über der späteren Ausgleichsfeuchte liegt. Dies ist nicht immer zu vermeiden, da für das Verkleben von Holzbauteilen Holzfeuchten größer 8 - 9 % notwendig sind. Häufig jedoch nehmen die Bauteile noch während der Bauphase größere Mengen an Feuchte auf, z.B. nach dem Einbringen von Estrich oder aber aufgrund stehender Feuchte im bereits geschlossenen Gebäude. Über die Größe der Schwankungen der Holzfeuchte von der Herstellung der Holzbauteile bis zur Inbetriebnahme des Gebäudes gibt es bis heute nur wenige Untersuchungen. Momentan begleiten die Autoren derartige Messungen an zwei Einzelobjekten. Um belastbare Anhaltswerte zur Holzfeuchteverteilung und Holzfeuchtegradienten während der Bauphase im Hinblick auf potentielle Rissentstehung nach Inbetriebnahme des Gebäudes geben zu können, sind jedoch umfassendere Untersuchungen notwendig. In diesen könnte die Entwicklung der Holzfeuchte vom Werk über die Baustelle und Eröffnung bis in das erste Jahr der Nutzung gemessen und dokumentiert werden. Damit würde die Lücke in der „Feuchtekette“ eines Holzbauteils von der Produktion des Bauteils bis zum Betrieb des Gebäudes geschlossen und mit Erfahrungswerten belegt.

6 Literatur

- [1] BLAß, H.J., FRESE, M.: Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz. Band 16 der Reihe Karlsruher Berichte zum Ingenieurholzbau. KIT Scientific Publishing. Karlsruhe 2010.
- [2] FRÜHWALD, E., SERRANO, E., TORATTI, T., EMILSSON, A., THELANDERSSON, S.: Design of safe timber structures – How can we learn from structural failures in concrete, steel and timber? Report TVBK-3053. Div. of Struct. Eng. Lund University 2007.

- [3] DIETSCH, P., WINTER, S.: Typische Tragwerksmängel im Ingenieurholzbau und Empfehlungen für Planung, Ausführung und Instandhaltung. Tagungsband „8. Grazer Holzbau-Fachtagung“. TU Graz 2009.
- [4] DIETSCH, P.: Einsatz und Berechnung von Schubverstärkungen für Brettschichtholz-bauteile. Dissertation. Technische Universität München 2012.
- [5] BLAß, H.J., EHLBECK, J., KREUZINGER, H., STECK, G.: Erläuterungen zu DIN 1052:2004-08. Bruderverlag. Karlsruhe 2004.
- [6] MEIERHOFER, U., SELL, J.: Physikalische Vorgänge in wetterbeanspruchten Holzbauteilen – 2. und 3. Mitteilung. Holz als Roh- und Werkstoff 37 (1979), H. 6, S. 227-234 und H. 12, S. 447-454.
- [7] KRABBE, E., NEUHAUS, H.: Über Konstruktion, Klima und Holzfeuchtigkeit eines Hallenbades. Bauen mit Holz 91 (1989), H. 4, S. 214-217.
- [8] KOPONEN, S.: Puurakenteiden kosteudenhallinta rakentamisessa. TKK-TRT Report 1-0502. Helsinki 2002.
- [9] EVANS, F., KLEPPE, O., DYKEN, T.: Monitoring of Timber Bridges in Norway - Results, Report Norsk Treteknisk Institutt. Oslo 2007.
- [10] FELDMEIER, F.: Ergebnisse und Schlussfolgerungen aus den Felduntersuchungen einer Eissporthalle, Tagungsband „Ingenieurholzbau - Karlsruher Tage“, TH Karlsruhe 2007.
- [11] BRISCHKE, C., RAPP, A.O.: Untersuchung des langfristigen Holzfeuchteverlaufs an ausgewählten Bauteilen der Fußgängerbrücke in Essing. Arbeitsbericht der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft. Hamburg 2007.
- [12] MARQUARDT, H., MAINKA, G.-W.: Tauwasserausfall in Eissporthallen. Bauphysik 30 (2008), H. 2, S. 91-101.
- [13] NIEMZ, P., GEREKE, T.: Auswirkungen kurz- und langzeitiger Luftfeuchteschwankungen auf die Holzfeuchte und die Eigenschaften von Holz. Bauphysik 31 (2009), H. 6, S. 380-385.
- [14] DIN EN 1995-1-1:2010-12: Eurocode 5: Bemessung und Konstruktion von Holzbauten - Teil 1-1: Allgemeines – Allgemeine Regeln und Regeln für den Hochbau. Deutsches Institut für Normung. Berlin 2010.
- [15] RESSEL, J.B.: Fundamentals of wood moisture content measurement. Course notes COST E53 Training School “Methods for measuring of moisture content and assessment of timber quality”. BFH. Hamburg 2006.
- [16] DIETSCH, P., FRANKE, S., FRANKE, B., GAMPER, A., WINTER, S.: Methods to determine wood moisture content and their applicability in monitoring concepts. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2014), DOI 10.1007/s13349-014-0082-7
- [17] EULER, L.: Institutiones Calculi differentialis. Berlin 1755.
- [18] KOLLMANN, F., COTÉ, W.A.: Principles of Wood Science and Technology I: Solid Wood. Springer. Berlin 1968.
- [19] FORTUIN, G.: Anwendung mathematischer Modelle zur Beschreibung der technischen Konvektionstrocknung von Schnittholz. Dissertation. Universität Hamburg 2003.
- [20] KEYLWERTH, R., NOACK, D.: Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtemessung nach dem Widerstandsprinzip. Holz als Roh- und Werkstoff 14 (1956), H. 5, S. 162- 172.
- [21] HAILWOOD, A.J., HORROBIN, S.: Absorption of water by polymers: analysis in terms of a simple model. Transactions of the Faraday Society 42b (1946), S. 84-92.
- [22] SIMPSON, W.T.: Predicting equilibrium moisture content of wood by mathematical models. Wood and Fiber Science 5 (1973), H. 1, S. 41-48.
- [23] GAMPER, A., DIETSCH, P., MERK, M., WINTER, S.: Gebäudeklima – Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen. Schlussbericht für das Forschungsvorhaben. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. Technische Universität München 2014.

7 Danksagung

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert. Die Autoren danken zudem den folgenden Industriepartnern für ihre Unterstützung des Forschungsprojektes: Scantronik Mugrauer, Zorneding; Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Wuppertal; bauart Konstruktions GmbH + Co. KG, Lauterbach; Konstruktionsgruppe Bauen AG, Kempten; Wiehag GmbH, Altheim/AT; IngPunkt Ingenieurgesellschaft für das Bauwesen mbH, Augsburg; BBI Bauer beratende Ingenieure GmbH, Landshut; Dr. Linse Ingenieure GmbH, München; Dr. Schütz Ingenieure, Kempten; Häussler Ingenieure GmbH, Kempten.

Dank geht auch an die wissenschaftlichen Hilfskräfte M. Kraus, M. Waidelich, D. Bernhardt, C. Laimer, M. Oberhauser, S. Riedler und A. Indefrey für ihre Unterstützung im Rahmen der Auslesung und Aufbereitung der Daten.

8 Autoren

Andreas Gamper, MSc

Dr.-Ing. Philipp Dietsch

Dipl.-Ing. Michael Merk

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

Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion

Technische Universität München

Arcisstr. 21,

D-80333 München

Kontakt:

bauko@bv.tum.de