

## **Kurzbericht für das Forschungsvorhaben:**

### **Gebäudeklima - Langzeitmessung zur Bestimmung der Auswirkungen auf Feuchtegradienten in Holzbauteilen**

#### **Forschungsstelle:**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stefan Winter  
Arcisstraße 21  
80333 München

#### **Projektbearbeitung:**

Andreas Gamper M.Sc.  
Dr.-Ing. Philipp Dietsch  
Dipl.-Ing. Michael Merk

#### **unterstützt durch:**

Scantronik Mugrauer GmbH, Parkstraße 38, 85604 Zorneding.  
Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Elfriede-Stremmel-Straße 69, 42369 Wuppertal.  
Wiehag GmbH, Linzer Straße 24, 4950 Altheim, Österreich.  
bauart Konstruktions GmbH + Co. KG, Spessartstraße 13, 36341 Lauterbach.  
Konstruktionsgruppe Bauen Kempten AG, Bahnhofplatz 1, 87435 Kempten.  
IngPunkt Ingenieurgesellschaft für das Bauwesen mbH, Heilig-Kreuz-Straße 24, 86152 Augsburg.  
BBI Bauer beratende Ingenieure GmbH, Liebigstrasse 3, 84030 Landshut.  
Dr. Linse Ingenieure GmbH, Karlstraße 46, 80333 München.  
Dr. Schütz Ingenieure, An der Stadtmauer 13, 87435 Kempten.  
Häussler Ingenieure GmbH, Mozartstraße 12, 87435 Kempten.

#### **gefördert von:**

Forschungsinitiative Zukunft Bau  
Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung  
Deichmanns Aue 31-37  
52179 Bonn

Das Forschungsvorhaben wurde aus Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert.

(Aktenzeichen: SWD-10.08.18.7- 12.22 / II 3-F20-11-1-026)

Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München. 31. August 2014

## 1 Ziele der Forschungsaufgabe

Der natürliche und erneuerbare Rohstoff Holz zeichnet sich durch seine ausgesprochen hygroskopischen Eigenschaften aus. Auch im bearbeiteten Zustand, z.B. bei der Verwendung als Baustoff in Bauwerken, resultieren Änderungen des Umgebungsklimas in Änderungen des Feuchtegehalts von Holz (siehe Abbildung 1). Dies wiederum führt zu Änderungen nahezu aller physikalischen und mechanischen Eigenschaften (z.B. Festigkeiten) des Holzes. Normativ wird dies berücksichtigt, indem Holzbauteile entsprechend dem Umgebungsklima während ihrer vorgesehenen Nutzungsdauer in eine von drei möglichen Nutzungsklassen eingeordnet werden.

Ein weiterer Effekt von Holzfeuchteänderungen sind die daraus resultierenden Quell- und Schwinderscheinungen im Holz. Diese sind senkrecht zur Faserrichtung wesentlich ausgeprägter als in Faserrichtung. Da die Aufnahme und Abgabe von Feuchte über die Oberflächen der Holzquerschnitte erfolgt, passen sich zunächst nur die äußeren Schichten an die klimatischen Bedingungen an. Das daraus resultierende Holzfeuchtegefälle 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 Querkzugfestigkeit von Holz erfolgt jedoch ein Spannungsabbau in Form von zum Teil festigkeitsreduzierenden Rissen.

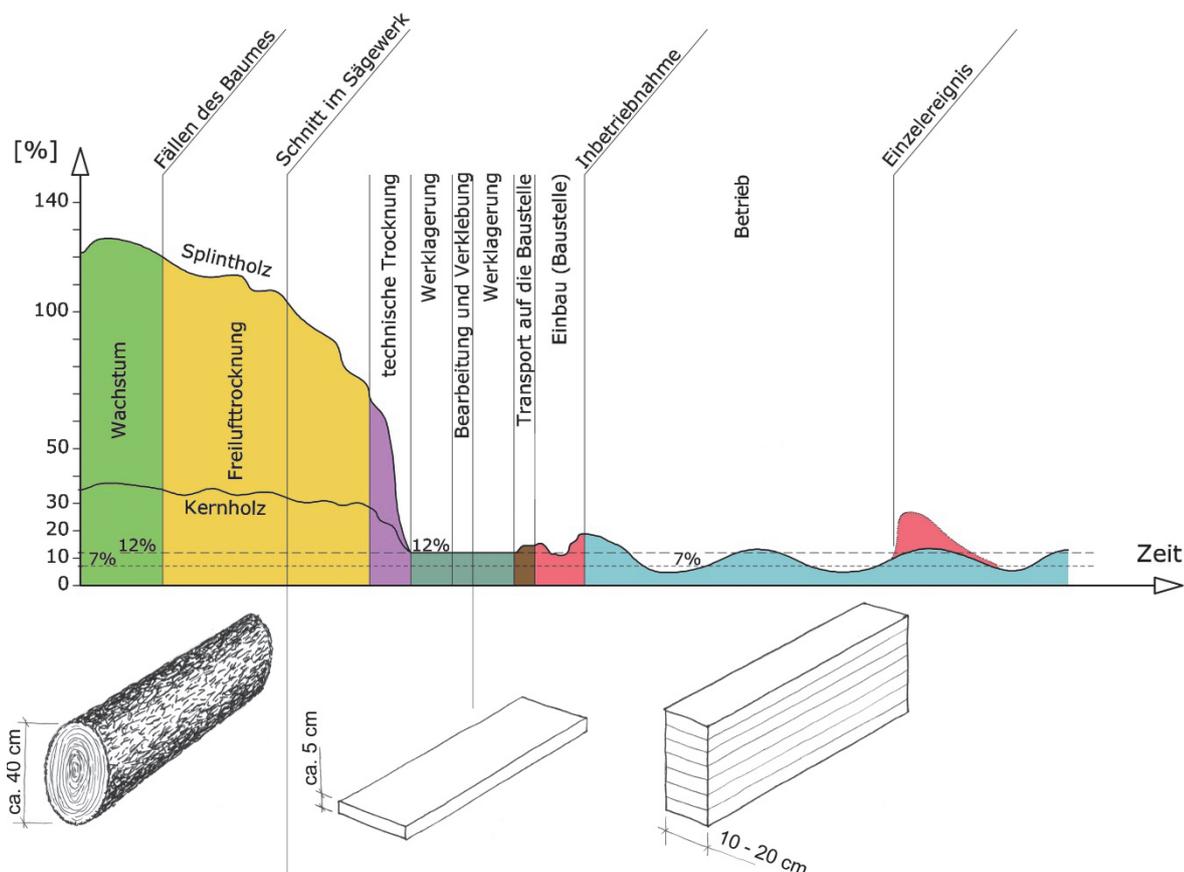


Abbildung 1: Skizze einer möglichen „Feuchtekette“, d.h. Feuchtebeanspruchung und Gefahr der Rissbildung vom Baum bis zum Brettschichtholz im Tragwerk.

Die Auswertung von Schäden an weitgespannten Konstruktionen des Ingenieurholzbaus zeigt als überwiegend festgestelltes Schadensbild ausgeprägte Rissbildungen in den Klebfugen und Lamellen von Brettschichtholzbauteilen. Ein wesentlicher Anteil an der Entstehung dieser Schäden wird den jahreszeitlich und nutzungsbedingten, starken klimatischen Schwankungen innerhalb von großvolumigen Gebäuden und den damit verbundenen Schwind- und Quellvorgängen in den Holzbauteilen zugesprochen. Dies führt zu der Notwendigkeit, die klimabedingten Beanspruchungen in Hallen mit Holztragwerken genauer zu erfassen und zu beschreiben.

Durch eine Langzeitmessung von Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte) und Holzfeuchte an weitgespannten Holztragwerken in Gebäuden typischer Art und Nutzung wurden in vorliegendem Forschungsvorhaben Datensätze generiert, die Aussagen über den zeitlichen Verlauf und die Größe der jahreszeitlichen Schwankungen liefern. Von besonderem Interesse ist dabei die Messung der Holzfeuchte in unterschiedlichen Bauteiltiefen um Rückschlüsse auf die Größe und Geschwindigkeit der Anpassung der Holzfeuchteverteilung an sich ändernde Umgebungsbedingungen zu erhalten. Die Holzfeuchteverteilung hat direkten Einfluss auf die Größe der internen Bauteilspannungen und damit möglicher Schädigungspotentiale. Ebenso ermöglichen die Ergebnisse eine Überprüfung und Erweiterung der bisherigen Klassifizierung von Gebäuden in Nutzungsklassen. Sie erlauben die präzisere Angabe von Bereichen sich einstellender Ausgleichsfeuchte für die konkreten Nutzungen, wodurch ein Einbau des Holzes mit einer vorher angepassten Holzfeuchte ermöglicht wird. Die Ergebnisse des Forschungsprojekts unterstützen zudem die Entwicklung entsprechender Monitoringsysteme, die z.B. in Form von Frühwarnsystemen auf Basis von Klimamessungen eingesetzt werden könnten.

## 2 Durchführung der Forschungsaufgabe

### 2.1 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 sieben verschiedenen Nutzungen durchgeführt (siehe Tabelle 1). Bei der Auswahl der zugehörigen Hallen wurde zudem eine möglichst große Vielfalt an holzbautypischen Bauweisen und Tragsystemen zusammengestellt. 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.

*Tabelle 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

## 2.2 Verwendetes Messverfahren

Als Messverfahren wurde das Widerstandsmessverfahren gewählt, da diese Methode den in Fachkreisen allgemein anerkannten Stand der Technik darstellt. Zudem ist mit dieser bewährten und bis dato meist verwendeten Methode eine zerstörungsfreie Messung der Feuchtegradienten über den Holzquerschnitt möglich. Das gewählte Messverfahren beruht auf der Messung des elektrischen Widerstandes bzw. der Leitfähigkeit von Holz. Da Wasser eine viel höhere elektrische Leitfähigkeit besitzt als Holz, sinkt dessen elektrischer Widerstand mit zunehmender Holzfeuchte, was es erlaubt, über diesen auf die lokal vorhandene Holzfeuchte zu schließen. Für die Messung der Holzfeuchteverteilung über den Querschnitt wurden je Messstelle vier Paare teflonisolierter Elektroden unterschiedlicher Länge verwendet, die eine Feuchtemessung in genau definierten Schichten des Bauteils zulassen. Über speziell angefertigte, abgeschirmte Koaxialkabel wurden die Messelektroden an das Materialfeuchtemessgerät angeschlossen. Das mit dem Projektpartner entwickelte Messgerät ermöglicht eine Bestimmung von Materialfeuchten an bis zu acht Kanälen. Die stündlich erzeugten Messwerte der zwei Messstellen werden anschließend an einen Datenlogger weitergeleitet. Über Sensoreinheiten für relative Luftfeuchte und Lufttemperatur werden die Klimadaten aufgezeichnet. Durch zwei externe Sensoren werden 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 einen 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. An beiden Messstellen wurde die Materialtemperatur mit je zwei Temperatursensoren in 20 und 40 mm Tiefe erfasst. Eine schematische Übersicht der verwendeten Messtechnik ist in Abbildung 2 gegeben.

Vor der eigentlichen Installation der Messtechnik in den Bauwerken wurde das System an Probekörpern aus Brettschichtholz installiert und in den Klimakammern der Prüfstelle Holzbau der TU München sehr trockenen, sehr feuchten und stark schwankenden Klimabedingungen ausgesetzt. Die von dem ausgewählten Messsystem kontinuierlich gemessenen Holzfeuchten wurden durch zyklische Vergleichsmessungen mit einem kalibrierten Referenz-Messgerät verglichen. Es konnte weder ein wesentlicher Unterschied in den Messergebnissen der beiden Systeme noch bei Verwendung unterschiedlicher Typen von Messelektroden festgestellt werden. Für eine weitere Verifizierung wurden zwei voneinander unabhängige Serien von Probekörpern unter jeweils vier verschiedenen, kontrollierten klimatischen Umgebungsbedingungen (sehr trocken bis sehr feucht) bis zur Gewichtskonstanz gelagert und die Holzfeuchte dieser Probekörper mit der für das Forschungsprojekt ausgewählten Messtechnik und zwei Referenz-Messgeräten bestimmt. Durch anschließende Trocknung im Darrofen wurde der tatsächliche Feuchtegehalt ermittelt. Es ergaben sich gute Übereinstimmungen für Holzfeuchten zwischen 12% und 18% und maximale Abweichungen von 1,3% für die trockenen Probekörper, wobei die für das Forschungsprojekt ausgewählte Messtechnik die Holzfeuchten tendenziell unterschätzte.

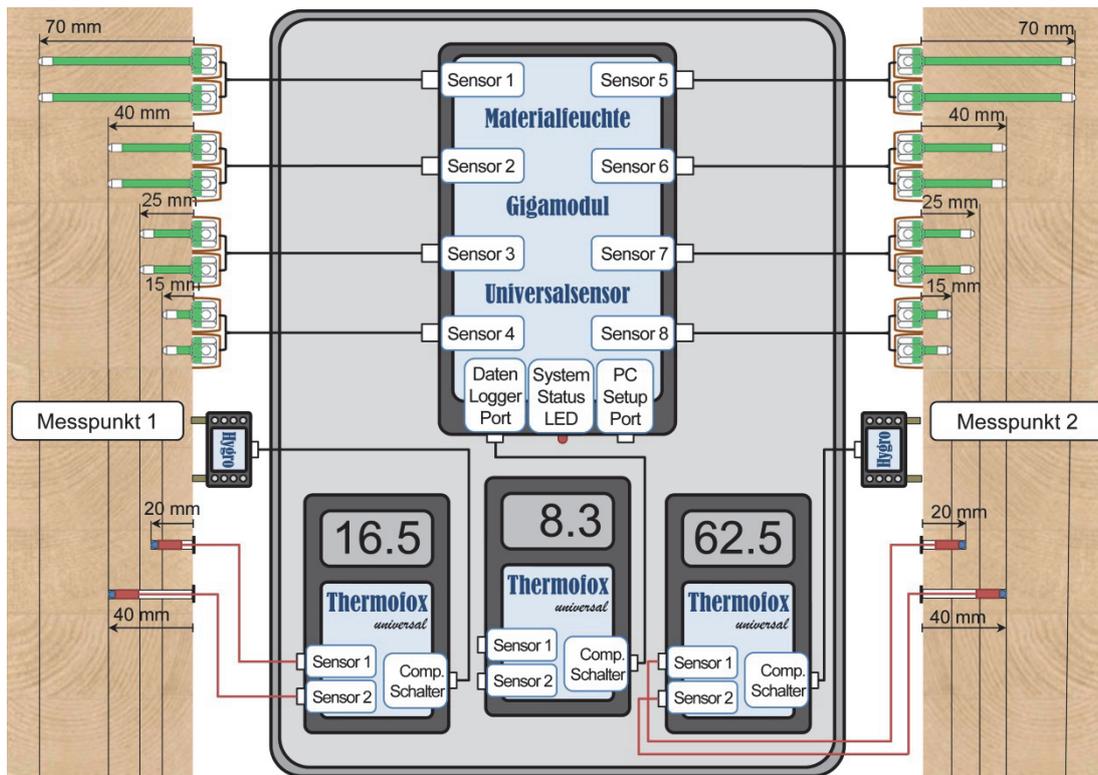


Abbildung 2: Systematische Darstellung der Messtechnik.

Die gespeicherten Messdaten wurden über die Messzeiträume hinweg mehrfach manuell ausgelesen. Gleichzeitig wurden eine Funktionskontrolle sowie eine Referenzmessung mit einem anderen Messgerät durchgeführt. Zur Auswertung der Daten wurde ein Programm erarbeitet welches es ermöglicht, die Daten am Ende der geplanten Messdauer in angemessenem Zeitaufwand 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 in der Art vorgenommen, dass aus den gemessenen Oberflächentemperaturen über das explizite Euler-Verfahren die in den unterschiedlichen Tiefen vorherrschenden Materialtemperaturen berechnet und weiterverwendet wurden. Zu Vergleichszwecken wurde die in den oberflächennahen Bereichen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen herrschende Ausgleichsfeuchte nach dem theoretischen Sorptions- Modell von Hailwood & Horrobin bestimmt und als gleitender Durchschnitt über zehn Tage angegeben.

### 3 Zusammenfassung der Ergebnisse und Schlussfolgerungen

Das für das Forschungsprojekt entwickelte Messsystem erwies sich als grundsätzlich geeignet, Langzeitmessungen der Holzfeuchte und des Klimas in Hallen in Holzbauweisen zu realisieren. Die Verwendung von unterschiedlich langen Messelektroden ermöglichte klare Aussagen über den Verlauf der Holzfeuchte in den Querschnitten. 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) aufbereitet, siehe Abbildung 3. Die gleiche Darstellungsweise wurde für die Messwerte der Holzfeuchte in den vier Querschnittstiefen gewählt, siehe Abbildung 4.

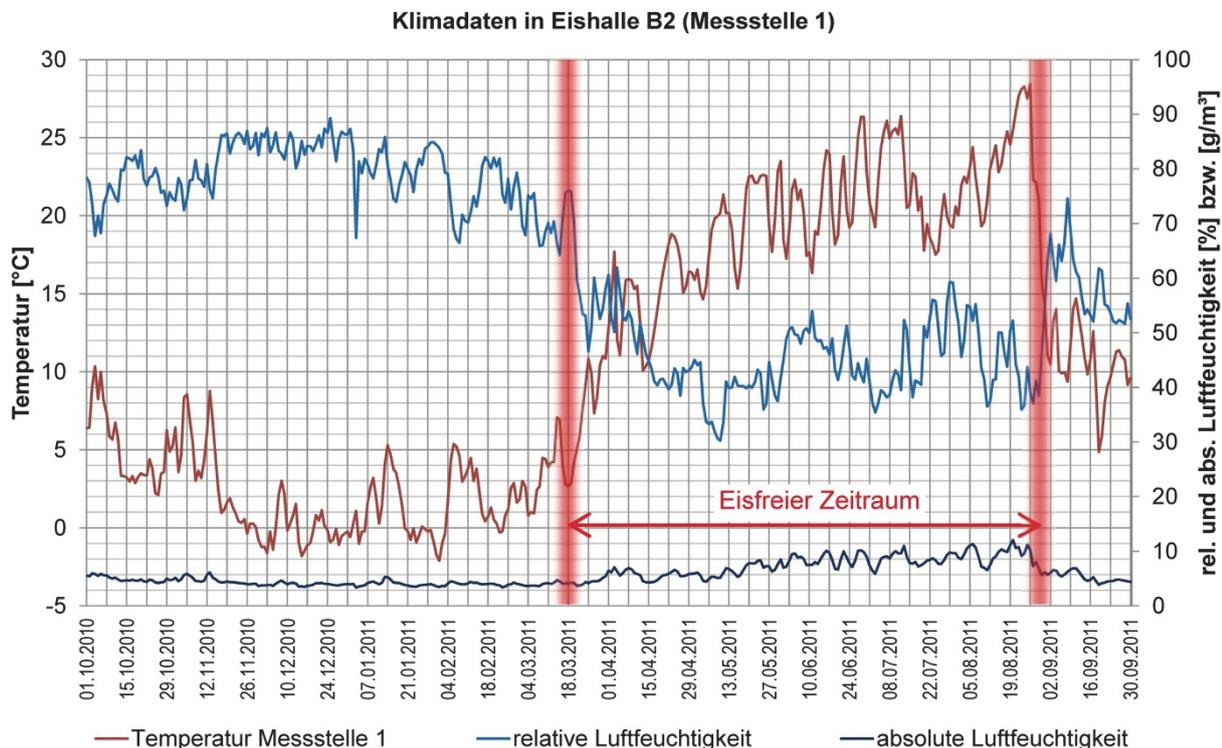


Abbildung 3: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Referenztemperatur über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel einer Eissporthalle.

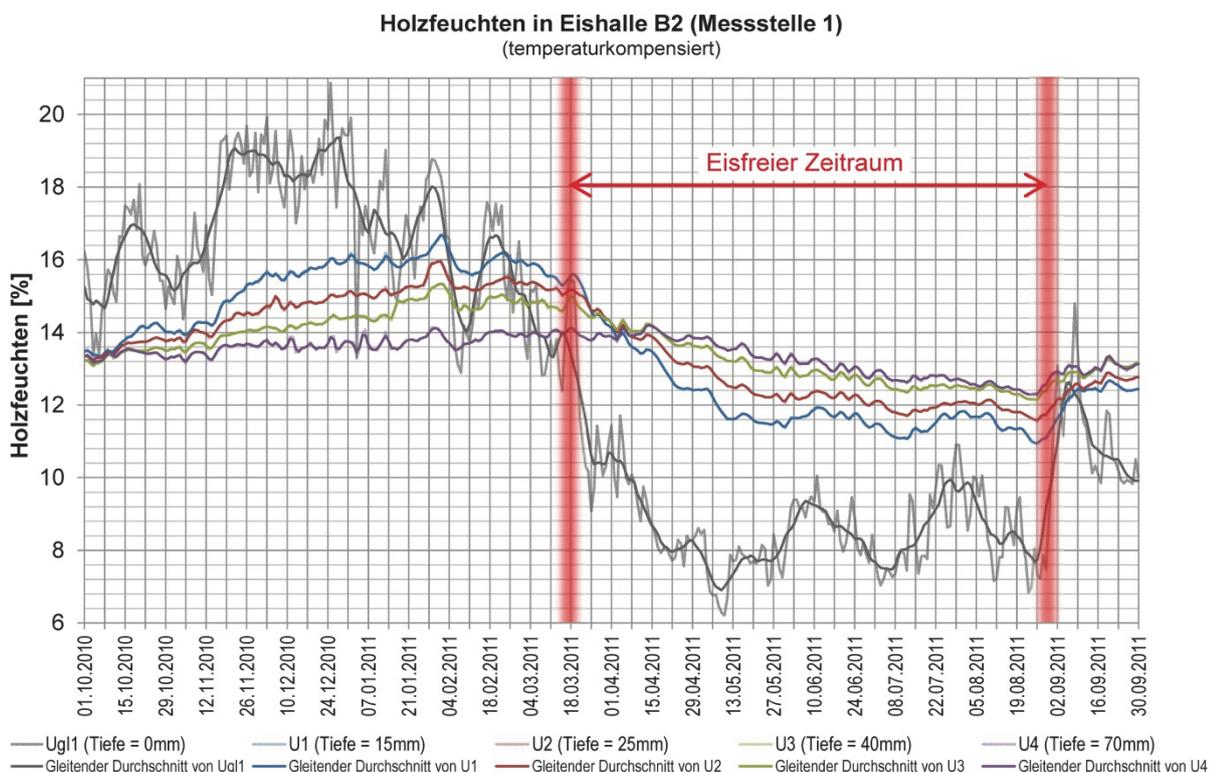


Abbildung 4: Verlauf der Holzfeuchte über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel einer Eissporthalle.

Für die Holzfeuchte wurden zudem grafische Auswertungen über den Querschnitt erstellt. Diese beinhalten die Angabe von Umhüllenden der minimalen und maximalen Holzfeuchtwerte vgl. Abbildung 5, wie auch der Umhüllenden der Holzfeuchtegradienten  $\text{grad}(u) = du / dx$  über den Querschnitt, siehe Abbildung 6. Die so dargestellten Ergebnisse bilden die Grundlage, um Rückschlüsse auf die Größe der feuchteinduzierten Spannung und damit potentieller Rissentstehung zu ziehen.

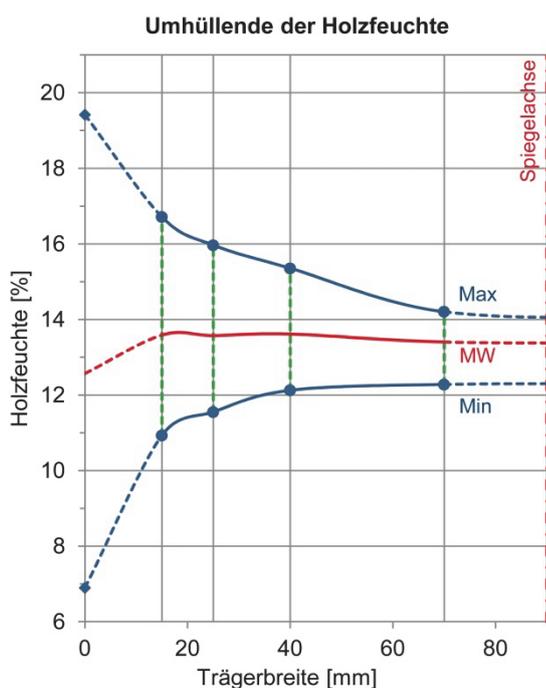


Abbildung 5: Umhüllende der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

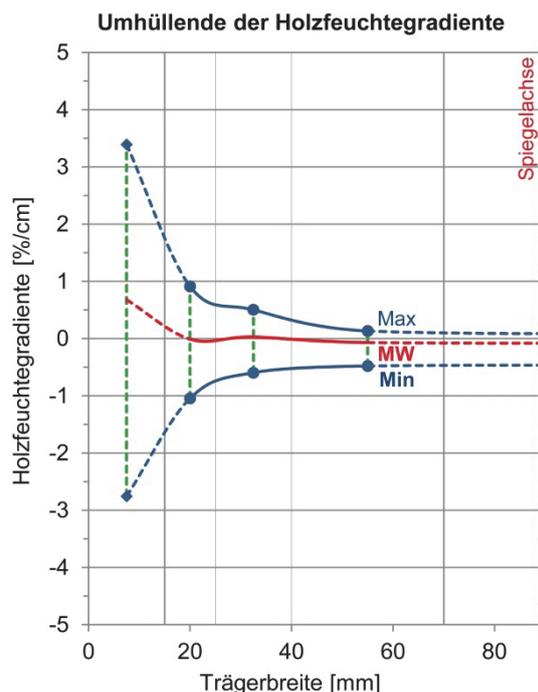


Abbildung 6: Umhüllende der Holzfeuchte-gradiente über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

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, Sperreffekte gegenüber dem freien Schwinden und Quellen der Bauteile (z.B.

Verbindungsmittel mit großem Abstand senkrecht zur Faser, in geringem Abstand angeordnete Querzugverstärkungen) 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.

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 Umgebungsclimas 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 Beanspruchungspotential 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 hin-zuweisen, dass die Ausgleichsfeuchte von Bauteilen aus Nadelholz in beheizten und gedämmten Gebäuden (Nutzungsklasse 1) in den meisten Fällen unter 10 % liegt.