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
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Mike Sieder
Arcisstraße 21
80333 München

Projektbearbeitung:

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

unterstützt durch:

Scanntronik Mugrauer GmbH, Parkstraße 38, 85604 Zorneding.

Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V., Elfriede-Stremmel-Straße 69, 42369 Wuppertal.

bauart Konstruktions GmbH + Co. KG, Spessartstraße 13, 36341 Lauterbach.

Konstruktionsgruppe Bauen Kempten AG, Bahnhofplatz 1, 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: SF-10.08.18.7- 10.1/ II 2-F20-09-1-259)
Die Verantwortung für den Inhalt des Berichtes liegt bei den Autoren.

München. 26. Januar 2012

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 Querzugfestigkeit von Holz erfolgt jedoch ein Spannungsabbau in Form von zum Teil leistungsreduzierenden Rissen.

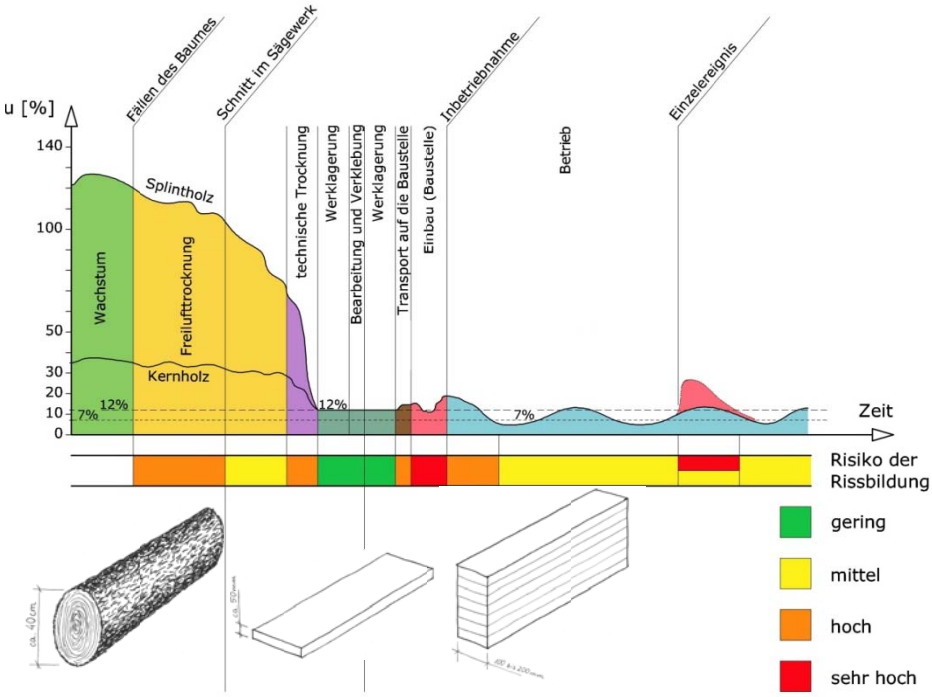

Abbildung 1: Skizze einer möglichen „Feuchtekette", d.h. Feuchtebeanspruchung und Gefahr der Rissbildung vom Baum bis zum Brettschichtholz im Tragwerk.

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 Forschungsvorhaben waren für die Langzeitmessungen insgesamt 21 Hallen mit sieben verschiedenen Nutzungen vorgesehen (siehe Tabelle 1). Bei der Auswahl der zugehörigen Hallen wurde zudem eine möglichst große Vielfalt an holzbautypischen Bauweisen und Tragsystemen zusammengestellt. In jeder Halle 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

Nutzung	Anzahl der Hallen
Schwimmhalle	3
Eishalle	4
Reithalle	3
Sporthalle	3
Produktions- und Verkaufshalle	2
Landwirtschaftliche Halle	3
Lagerhalle	3
Summe	21

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 Feuchtegradiente 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 einen zweiten Datenlogger in Kombination mit einer Sensoreinheit 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 (vgl. Abbildung 2).

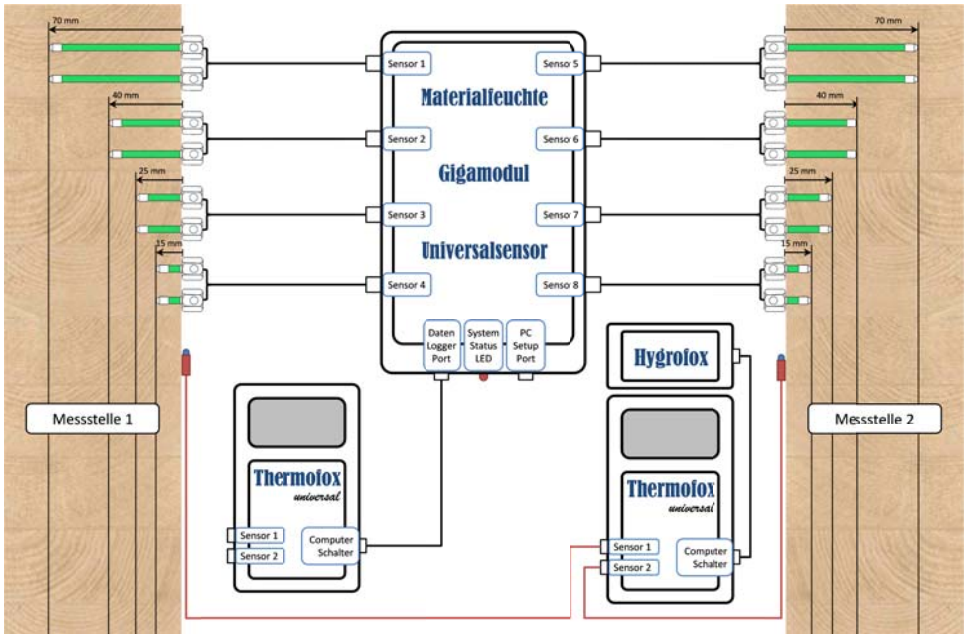

Abbildung 2: Systematische Darstellung der Messtechnik.

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 gemessen 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.

Nach der Installation der Messtechnik in den insgesamt 21 Objekten wurden die in den Datenloggern gespeicherten Messdaten über den Messzeitraum hinweg je Objekt dreimal vor Ort ausgelesen, wobei gleichzeitig eine Funktionskontrolle sowie durchgeführt und eine Referenzmessung mit einem anderen Messgerät vorgenommen wurde. Zur Auswertung der Daten wurde ein Programm auf Excel - Basis erarbeitet welches es ermöglichte, die großen Datenmengen 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 Holzfeuchtewerte 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. Zudem wurde die in den oberflächennahen Bereichen in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen herrschende Ausgleichsfeuchte nach dem theoretischen Sorptions- Modell von Hailwood & Horrobin bestimmt.

3 Zusammenfassung der Ergebnisse

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. Zudem konnten nützliche Feststellungen und Vorschläge hinsichtlich der zukünftigen Anwendung dieses Messsystems, z.B. für das Monitoring von Holzfeuchten und Klimarandbedingungen gewonnen werden. Im betrachteten Auswertezeitraum vom 1. Oktober 2010 bis 30. September 2011 wurden insgesamt über 2,2 Millionen Messwerte erfasst und mit Hilfe eines eigens entwickelten Programmes ausgewertet. So wurden die aus den Datenloggern ausgelesenen Daten 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. Für die Holzfeuchte wurden zudem grafische Auswertungen über den Querschnitt erstellt. Diese beinhalten die Angabe von Umhüllenden der minimalen und maximalen Holzfeuchtewerte vgl. Abbildung 5, wie auch der Umhüllenden der Holzfeuchtegradienten 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.

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. Ein Vergleich der Ergebnisse der einzelnen Nutzungen bestätigt die erwartete große Bandbreite der möglichen klimatischen Bedingungen in Bauwerken mit Holztragwerken. Über alle Nutzungen hinweg betrachtet, liegen die mittleren Holzfeuchten zwischen 4,4 % und 17,1 %. Die Holzfeuchtegradienten fallen in gedämmten und klimatisierten Bauwerken geringer aus als in Bauwerken mit stärkerem Einfluss des jahreszeitlich schwankenden Aussenklimas.

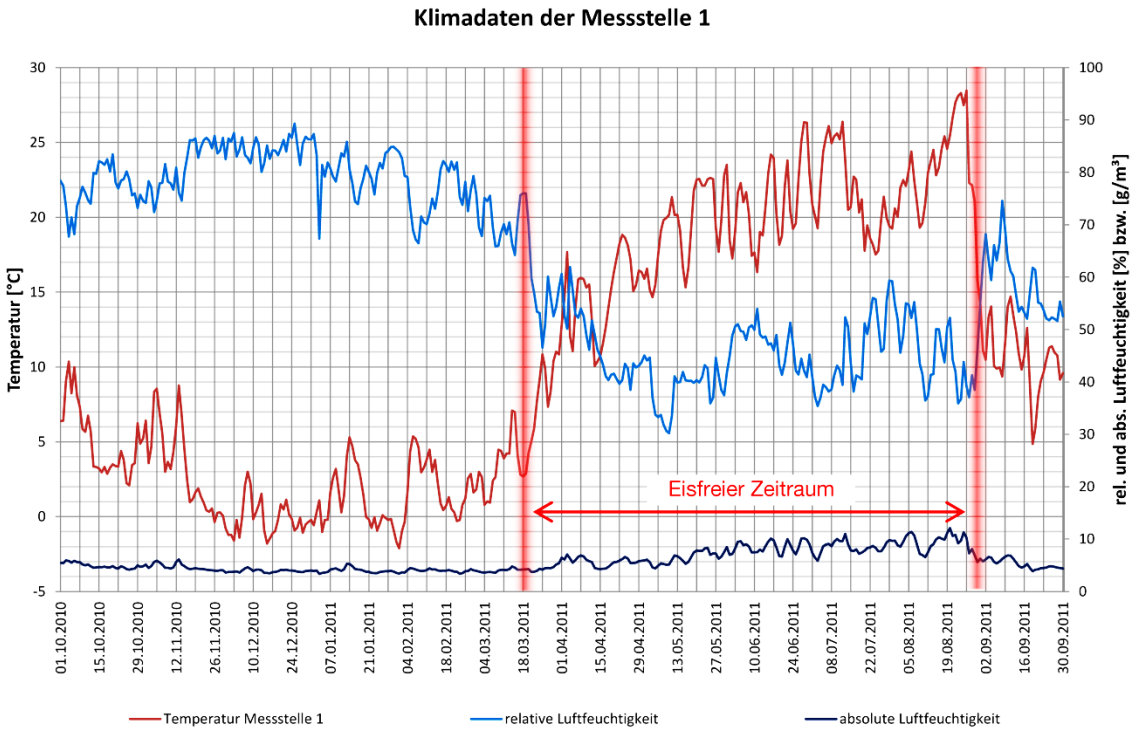

Abbildung 3: Verlauf der relativen und absoluten Luftfeuchtigkeit sowie der Referenztemperatur über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

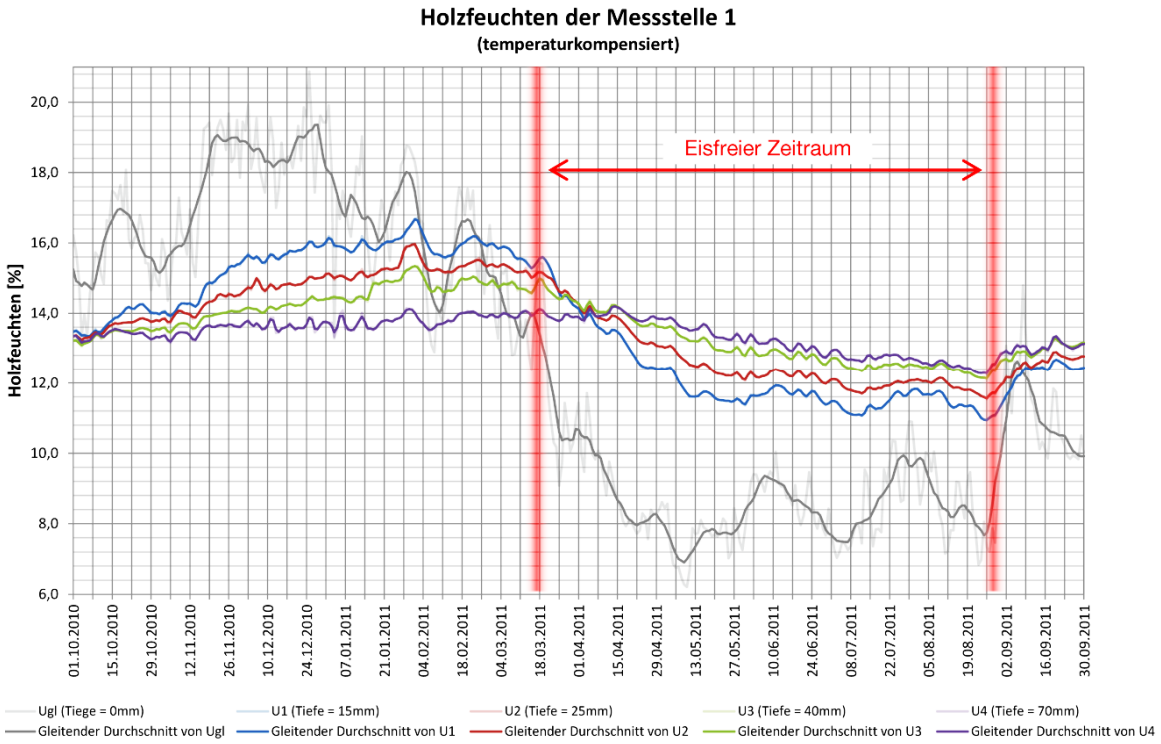

Abbildung 4: Verlauf der Holzfeuchte über den betrachteten Messzeitraum am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

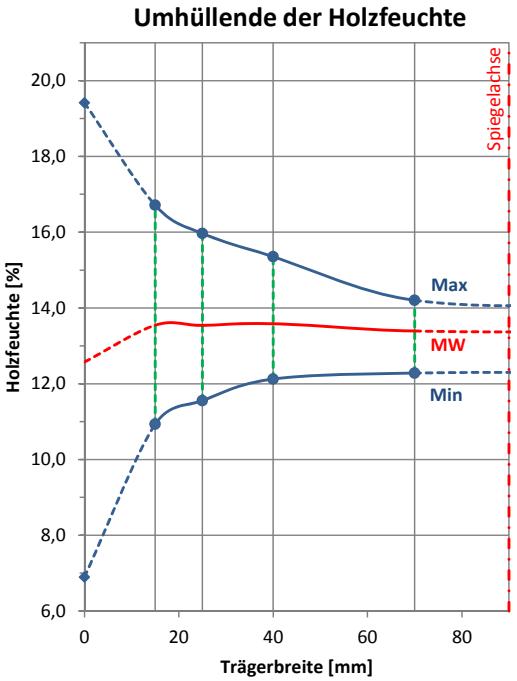

Abbildung 5: Umhüllende der Holzfeuchte über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

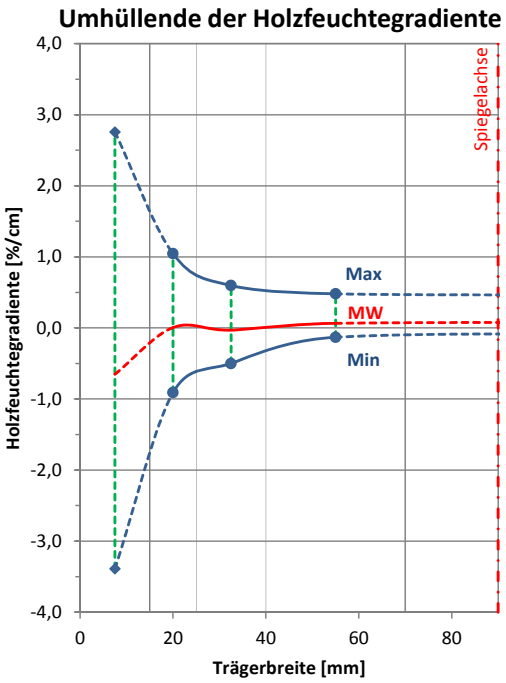

Abbildung 6: Umhüllende der Holzfeuchte-gradiente über den Querschnitt des Tragwerks am Beispiel der Eissporthalle in Buchloe.

Für Schwimmhallen wurden sehr konstante, hinsichtlich der Ausgleichsfeuchte der Holzbauteile unkritische Randbedingungen festgestellt. Ausnahme bilden Übergangsbereiche zum Aussenklima, in denen aufgrund des Absinkens der Temperatur sehr hohe Luftfeuchten auftreten können, die zudem stärkeren Schwankungen unterworfen sind.

Auch in Sporthallen wurde durchgängig ein konstantes Klima mit relativen Luftfeuchten zwischen 40% und 50% festgestellt, welches in Holzfeuchten zwischen 8% und 10% resultiert. In Bereichen direkter Sonneneinstrahlung können diese noch geringere Werte annehmen. Der hinsichtlich des Gefährdungspotentials für die Entstehung von Schwindrissen kritischste Zeitraum wird in den meisten Fällen der erste Winter nach Erstellung der Sporthalle 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, z.B. in Form von Verdunstungsbecken wäre eine weitere Möglichkeit, die Geschwindigkeit der Austrocknung der Holzquerschnitte zu dämpfen. Eine Alternative stellt eine Oberflächenbehandlung der Holzquerschnitte, z.B. in Form von Feuchteschutzmitteln dar, welche die Feuchteaufnahme und –abgabe für die ersten Jahre nach der Erstellung des Bauwerkes dämpft.

Produktions- und Verkaufshallen können, in Abhängigkeit der speziellen Nutzung, unterschiedliche klimatische Bedingungen aufweisen. Dementsprechend sind die Klimarandbedingungen objektspezifisch zu ermitteln. Meist werden diese jedoch einem konstanten und trockenen Klima zuzurechnen sein. Vor allem für Verkaufshallen treffen die für Sporthallen gemachten Anmerkungen auch zu.

Das Umgebungsklima in geschlossenen, nicht klimatisierten Eishallen ist durch eine deutliche Änderung zwischen den Wintermonaten und den Sommermonaten (eisfreie Zeit) geprägt. Die Holzfeuchte in Eissporthallen ist generell hoch und schwankt stark. Durch eine Klimatisierung der Eishallen kann dieser Effekt deutlich gedämpft werden.

Vergleichbare jahreszeitliche Schwankungen ergeben sich in Reithallen bei hohen relativen Luftfeuchten von durchschnittlich 80 %. In den Wintermonaten 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. Wie in anderen vom Aussenklima beeinflussten Nutzungen ergeben sich hohe Holzfeuchten mit starken Schwankungen, die aufgrund des jahreszeitlichen Charakters der Schwankungen in merklichen, nicht jedoch in außergewöhnlich hohen Holzfeuchtegradienten resultieren.

Ähnlich starke jahreszeitliche Schwankungen des Umgebungsklimas wurden für landwirtschaftliche Hallen mit Viehbetrieb ermittelt. Wie bei den Reithallen führt in den Wintermonaten das Zusammenspiel der kalten, von außen einstreichenden Luft und der erhöhten Luftfeuchte im Bauwerk zu hohen Holzfeuchten und teilweise zu Tauwasserausfall.

In Lagerhallen wurden die stärksten jahreszeitlichen Schwankungen der Umgebungsbedingungen in diesem Forschungsprojekt ermittelt. In den generell feuchteren Wintermonaten sollte darauf geachtet werden, dass durch gelagerte Güter keine zusätzliche Feuchte eingebracht wird. Holzbauteilen in Bereichen direkter Sonneneinstrahlung (z.B. in Lichtbändern) sollte hinsichtlich potentieller Rissentstehung aufgrund eines zu schnellen Austrocknens nach einer Feuchteperiode erhöhte Aufmerksamkeit geschenkt werden. Hier sind z.B. Schutzkonstruktionen in Form von Plattenwerkstoffen denkbar.

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 (temporär oder dauerhaft) 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 (temporäre Umnutzung einer Eishalle sowie Renovierung eines Hallenbades) wie auch das starke Auffeuchten von sehr trockenen Holzbauteilen (Umnutzung eines ehemals metallverarbeitenden Betriebes) festgestellt. Das sich dabei ergebende Gefährdungspotential für die Entstehung von Schäden durch Risse in Brettschichtholzbauteilen ist entsprechend hoch. 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 der Holzfeuchte in Betracht gezogen werden. Idealerweise sind solche Eingriffe von einem im Holzbau kundigen Fachplaner zu begleiten.

Mit der Generierung von - bis heute nicht vorhandenen - Datensätzen zu klimatischen Bedingungen in für den Holzbau typische Gebäudetypen und –nutzungen wurde eine erste Grundlage erzeugt um eine präzisere Bewertung der Auswirkung des Gebäudeklimas auf die Feuchteverteilung in tragenden Holzbauteilen und dem damit einhergehenden Schädigungspotential vornehmen zu können.