

Daniel Heite, Alexander Englberger, Lukas Osterloff
Frank Miebach, Andreas Rödel

H₂O_WoodController:
Entwicklung eines
sicherheitsrelevanten
Überwachungssystems für
feuchtetechnische Problemstellungen
im Holzbau

F 3050

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2018

ISBN 978-3-7388-0122-4

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP- Bericht: STPB-003/2017/062

H₂O_WoodController: „Entwicklung eines sicherheitsrelevanten Überwachungssystems für feuchte-technische Problemstellungen im Holzbau“

Durchgeführt im Auftrag
BBSR
Frau Inken Pfrengle
Deichmanns Aue 31 – 37
53179 Bonn

Der Bericht umfasst
59 Seiten Text
22 Tabellen
33 Abbildungen

Daniel Heite IBP
Frank Miebach – IB Miebach
Lukas Osterloff – IB Miebach
Alexander Englberger – Hochschule Rosenheim
Andreas Rödel – PROGEO Monitoring GmbH

Rosenheim, 13. September 2017

Institutsleiter



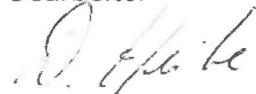
Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

Gruppenleiter



M.Eng. Andreas Kaufmann

Bearbeiter



Dipl.-Ing. (FH) Daniel Heite,
M.Sc.

Fraunhofer IBP

Fraunhofer-Zentrum Bautechnik
Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP
Standort Rosenheim
Hochschulstr. 1
83024 Rosenheim
Telefon: +49 8031 805-2724
Telefax: +49 8031 805-2697

Projektleitung: Dipl.-Ing. (FH) Daniel Heite, M.Sc.

Autoren: Dipl.-Ing. (FH) Daniel Heite, M.Sc.
Alexander Englberger, B.Eng.
Lukas Osterloff
Dipl.-Ing. (FH) Frank Miebach
Andreas Rödel

IB-Miebach

Haus Sülz 7
53797 Lohmar

Telefon: +49 2205 904480

Projektleitung: Herr Frank Miebach

PROGEO Monitoring GmbH

Hauptstraße 2
14979 Großbeeren

Telefon: +49 3370 122110

Projektleitung: Herr Andreas Rödel

Inhalt

1	Entwicklung H₂O_WoodController - Fraunhofer IBP	5
1.1	Einführung und Problemstellung	5
1.2	Ziel des Projektes	6
1.3	Stand der Technik und Forschung	7
1.4	Grundlagen „Sensorlamelle“	9
1.5	Elektrotechnische Grundlagen der Holzfeuchtemessung (Widerstandsmessung)	10
1.5.1	Messtechnische Grundlagen „Sensorlamelle“	10
1.5.2	Messtechnische Grundlagen Einzelmessstelle	12
1.6	Versuchsdurchführung der Vorversuche	13
1.7	Auswertung und Bewertung der Messergebnisse	15
1.7.1	Sensorfelder	16
1.7.2	Einzelmessstellen	19
1.8	Versuchsdurchführung der Hauptversuche	21
1.8.1	Ermittlung des spezifischen Widerstandes von Fichtenholz	21
1.8.2	Auswertung der Messergebnisse	22
1.8.3	Diskussion der Messergebnisse	28
1.8.4	Anwendungsgrenze der flächenbasierten Holzfeuchtemessung	30
1.9	Technische Realisierung im Produktionsbetrieb	31
1.9.1	Produktionskonzept	32
1.10	Vorversuche zu den Materialeigenschaften der Sensorlamellen	32
1.10.1	Überprüfung der Scherfestigkeit der Klebefuge nach DIN EN 14080	33
1.10.2	Biegeprüfung an Kleinprüfkörpern nach DIN EN 408	35
1.10.3	Delaminierungsprüfung nach DIN EN 14080	36
1.11	Installation eines Holzfeuchteüberwachungssystem an einer Holzbrücke	37
1.12	Zusammenfassung und Ausblick	39
2	Einsatzmöglichkeiten / Einbausituationen (IB-Miebach)	41
2.1	Brückenbauwerke	41
2.1.1	Hauptschadensursachen Brückenbauwerke	41
2.1.2	Monitoring Trogbrücke	42
2.1.3	Monitoring Blockträgerbrücke	45
2.1.4	Monitoring Holzbetonverbundbrücke	48
2.2	Hallenbauwerke	50
2.2.1	Hauptschadensursachen Hallentragwerke	51
2.2.2	Besonders gefährdete Nutzungstypen	52
2.2.3	Monitoring Hallenbauwerke	52
2.3	Infrastruktur Energieversorgung	53

2.3.1	Brückenbauwerke	53
2.3.2	Hallenbauwerke	54
3	Literaturverzeichnis	55

1 Entwicklung H₂O_WoodController - Fraunhofer IBP

1.1 Einführung und Problemstellung

Die Überwachung von sicherheitstechnischen Komponenten an Kraftfahrzeugen ist seit vielen Jahren Standard. Im Baubereich sind solche Systeme bisher kaum vorhanden. Das Projekt „H₂O_WoodController“ soll Lösungen finden, diese Lücke zu schließen, um so Holzbauten sicherer zu machen und Sanierungskosten zu minimieren.

Die Notwendigkeit der Bauwerksüberwachung erschließt sich aus vielen negativen Beispielen der Vergangenheit und Gegenwart. Nicht erkannte Schäden verursachen jedes Jahr, allein in Deutschland, Sanierungskosten in Milliardenhöhe (vgl. (Steisslinger & Kreutz, 2008) und (Bundesministerium für Raumordnung Bauwesen und Städtebau, 1995). Auch Einstürze von Gebäuden sind dadurch nicht auszuschließen. Die meisten Bauschäden sind auf eindringende Feuchte, bzw. Feuchte aufgrund besonderer bauphysikalischer Bedingungen (Extrembedingungen in z. B. Eissporthallen und Schwimmbädern), zurückzuführen.

Um einer ökologischen, energieeffizienten, kostengünstigen und nachhaltigen Bauweise in Deutschland zu mehr Aufschwung zu verhelfen, soll der Holzbau in diesem Projekt bevorzugt behandelt werden. Derzeit sind die zu erwartenden oder befürchteten Sanierungs- und Instandhaltungskosten oftmals ein Ausschlusskriterium für den Holzbau. Frühzeitiges Erkennen von Bauwerksschäden und sofortige Sanierungsmaßnahmen können den Kostenaufwand jedoch deutlich reduzieren. Die Vorteile des Holzbaus, wie z. B. kurze Bauzeiten, Ökologie und nationale bzw. regionale Wertschöpfung, können somit voll zum Tragen kommen.

Weiterhin sind Bauwerksprüfungen, nach DIN 1076, für Ingenieurbauwerke (z. B. Brücken und Tunnel) zwingend vorgeschrieben. Für übliche Hochbauten und Hallentragwerke sind regelmäßige Bauwerksprüfungen derzeit nicht verordnet. Gemäß der Bauordnung sind bauliche Anlagen jedoch so instand zu halten, dass die öffentliche Sicherheit, insbesondere Leben und Gesundheit, nicht gefährdet wird (vgl. BayBO Art.3). Ein Vorgehen nach DIN 1076 wird empfohlen.

Meist gestaltet sich diese Prüfung jedoch als nicht praktikabel und kosteneffizient durchführbar. Diverse Tragwerksvarianten, wie z. B. Kastenträger, können nur von außen begutachtet werden. Im Inneren des Tragwerks können sich unbemerkt Feuchte, Schimmel und holzerstörende Pilze ausbreiten. Weiterhin behindern abgehängte Decken (z. B. in Schwimmbädern), Überschüttungen (z. B. bei Grünbrücken) oder der Verbund mit anderen Materialien (z. B. bei der Holzbetonverbundbauweise) oftmals die Prüfung des Tragwerks. Besonders an diesen Bauwerken wäre jedoch eine intensive Begutachtung, bzw. Überwachung, auf Grund des vorhandenen Klimas und der umgebenden Bedingungen, dringend anzuraten.

1.2 Ziel des Projektes

Derzeit erhältliche Systeme zur Holzfeuchteüberwachung (vgl. Kapitel 1.3) ermöglichen lediglich eine punktuelle Analyse des Zustandes. Auf Grund der vielen möglichen Schadensursachen, wie Alterung von Abdichtungen, Nutzungsänderungen und Überbelastung der Tragwerke, ist es nahezu unmöglich vorherzusagen, wo ein Schaden auftritt. Aus diesen Gründen ist eine möglichst lückenlose Überwachung des Bauwerkzustandes erforderlich.

Ein einzelnes System kann den erforderlichen Überwachungsaufwand, auf Grund der vielfältigen Einbau- und Anschlusssituationen, nicht gewährleisten. Somit sollen die derzeit verfügbaren Überwachungssysteme an den Holzbau, bzw. die Anforderungen in einem umfassenden Überwachungssystem, angepasst und mit der Neuentwicklung, einer „Sensorlamelle“, zu einem kombinierbar einsetzbaren System zusammengeführt werden.

In Bild 1 wird das Prinzip der lückenlosen Überwachung, am Beispiel eines Flachdaches in Holzbauweise, dargestellt.

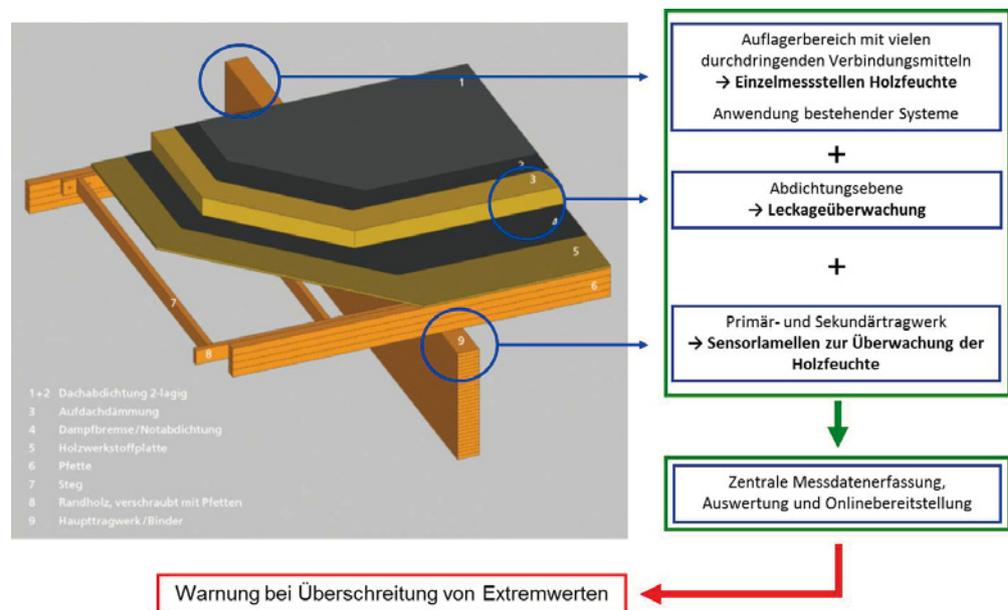


Bild 1:
Funktionsprinzip der geplanten Bauwerksüberwachung im Holzbau.

1.3 Stand der Technik und Forschung

Zur Ermittlung und Überwachung der Holzfeuchte an Bauwerken sind derzeit hauptsächlich zwei Systeme, basierend auf der Widerstandsmessung, erhältlich. Weitere Systeme, wie z.B. AHLBORN ALMEMO Geräte mit den entsprechenden Materialfeuchtesensoren, kommen fast ausschließlich für wissenschaftliche Forschung zum Einsatz, da die Anschaffungskosten sehr hoch sind. Folgend aufgeführte Systeme wurden schon an einigen Bauwerken, für Überwachungs- und Forschungstätigkeiten, durch unterschiedliche Forschungseinrichtungen installiert.

Materialfeuchte Gigamodul der Firma Scantronik: Bei diesem System handelt es sich um einen Datenlogger, welcher an bis zu acht Einzelmessstellen Materialfeuchten messen und bis zu 64.000 Werte speichern kann. Die Anbindung der Sensoren erfolgt mittels Messleitung in bis zu 10 m Entfernung, die Stromversorgung des Moduls mit handelsüblichen Batterien. Je nach gewähltem Datenerfassungsintervall müssen die Daten regelmäßig per PC-Interface-Kabel auf einen Computer übertragen werden. Seit einigen Jahren sind diverse Erweiterungsmodule zur Realisierung weiterer zusätzlicher Messstellen und zur Datenfernübertragung erhältlich.



Bild 2:
Materialfeuchte Gigamodul
Scantronik (www.scantronik.de).



Bild 3:
Materialfeuchtesensoren
(www.scantronik.de).

HygroTrac der Firma Protimeter GE: Hier werden die Sensoren durch Batterien mit Strom versorgt. Sie übertragen die Daten mit Funk (bis zu 46 m) zu einem Gateway. Das Datenerfassungs-Gateway bietet die Möglichkeit, bis zu 600 Sensoren zu betreiben. Die ermittelten Daten werden anschließend auf einem Webserver bereitgestellt.



Bild 4:
Hygrotrac Gateway (www.messbar.de).



Bild 5:
Drahtloser Feuchtesensor Hygrotrac (www.messbar.de).

Beide Systeme sind jedoch gewissen Anwendungsrestriktionen unterworfen:

1. Keine großflächige Überwachung der Holzfeuchte möglich. Daraus folgt eine viel geringere Wahrscheinlichkeit zum Auffinden von Bauwerksschäden im Vergleich zu einer flächendeckenden Überwachung.
2. Teilweise regelmäßige Batteriewechsel an den Sensoren notwendig – dies kann sich, je nach Einbausituation, sehr schwierig gestalten.
3. Es ist ein erheblicher finanzieller Aufwand zur Realisierung der Bauwerksüberwachung notwendig. Um eine annähernd flächendeckende Überwachung zu gewährleisten, müsste eine sehr große Anzahl Sensoren verbaut werden. Bei dem System HygroTrac belaufen sich die Kosten z. B. auf ca. 200 € / Sensor.

In einem Pilotprojekt des Ingenieurbüro Miebach, sowie bei einigen Studien der Fachhochschule Bern, wurden an einer Brücke einige Einzelmessstellen zur Ermittlung der Holzfeuchte installiert. Diese sind zu einer zentralen Erfassungsstelle verkabelt und können an dieser Stelle mit einem handelsüblichen Holzfeuchtemessgerät, das auf einem Elektrodenabstand von 30 mm basiert, ausgewertet werden. Der Nachteil an diesem System ist, dass Messdaten nur am Bauwerk, vor Ort, aufgenommen werden können. Das heißt ein Bauwerksverantwortlicher muss das Bauwerk regelmäßig aufsuchen und die Messwerte dort aufnehmen. Es ist ebenso nur die Überprüfung einzelner, lokal begrenzter Stellen möglich.

1.4 Grundlagen „Sensorlamelle“

Im modernen konstruktiven Holzbau wird zumeist auf schichtverleimte Hölzer, wie Brettschichtholz oder auch Brettsperrholz, zurückgegriffen. Diese bieten den Vorteil, dass sie in nahezu jeder Dimension produziert werden können und somit nicht den Stammquerschnitten und den daraus resultierenden Beschränkungen des „normalen“ Schnittholzes unterliegen. Sie zeichnen sich dadurch aus, dass mindestens drei Schichten Holz miteinander verklebt werden. Auf diesem Konstruktionsprinzip basiert der Ansatz, eine dieser Schichten als Sensor zur Ermittlung der Holzfeuchte zu nutzen. Das Verfahren soll, wie auch bei herkömmlichen Messsystemen, auf Messung des elektrischen Widerstands basieren. Dazu ist es notwendig, die Leimfugen elektrisch leitfähig auszuführen. Die Ausgestaltung einer elektrisch leitfähigen Leimfuge kann grundsätzlich auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- Beimengung elektrisch leitender Partikel zur Leimflotte.
- Einlage von elektrisch leitfähigen Materialien.

Es ist zu befürchten, dass sich eine Leimflotte mit elektrisch leitfähigen Partikeln während der Verarbeitung entmischt und die Verteilung der Partikel über die Leimfuge somit nicht gleichmäßig erfolgt. Die Leitfähigkeit der Leimfuge würde somit starken Schwankungen unterliegen.

Für dieses Forschungsvorhaben wurde deshalb die Einlage von elektrisch leitfähigen Materialien gewählt, da dieses Verfahren am zielführendsten erscheint und eine bessere Reproduzierbarkeit gewährleistet werden kann. In Bild 6 ist der Versuchsaufbau der Sensoren dargestellt.

Als elektrisch leitende Schicht wurde ein rostfreies Edstahlgitter ausgewählt, um Ungenauigkeiten der Messungen durch Korrosion auszuschließen. Die Maschenweite beträgt 1,5 mm, die Gesamtstärke des Gitters ca. 0,45 mm. Um die einzelnen Schichten miteinander zu verbinden, wurde ein Phenol-Resorcin-Harzleim der Firma Dynea ausgewählt (Prefere 4094). *„Der Leim ergibt bei vorschriftsmäßiger Anwendung Verleimungen, die absolut wasser- und wetterfest sind. Prefere 4094 hat besonders gute fugenfüllende Eigenschaften – Leimfugendicken bis zu 2,0 mm sind möglich“* (Dynea, 2003).

Als Holzart für die Zwischenlage kommt Fichtenholz (FI) zum Einsatz, da es bisher das am meisten verwendete Bauholz ist.

Die Abmessungen der Sensorfelder der Vorversuche wurden mit (100 × 490) mm gewählt. Aus vier unterschiedlichen Fichtenholzstücken wurden jeweils ein Sensor und eine Massivholzreferenzprobe mit gleichen Abmessungen gefertigt.



Bild 6:
Versuchsaufbau der Holzfeuchtesensoren.

1.5 Elektrotechnische Grundlagen der Holzfeuchtemessung (Widerstandsmessung)

1.5.1 Messtechnische Grundlagen „Sensorlamelle“

Herkömmliche Holzfeuchtemessgeräte basieren zumeist auf dem Widerstandsmessprinzip¹. Die dafür notwendigen Widerstandskennlinien werden in der Regel experimentell, auf Basis des Einstechelektrodenabstandes, ermittelt. Im Fall der Firma Gann bedeutet dies einen Abstand der Einstechelektroden von 30 mm. Es werden Holzproben bei unterschiedlichem Klima gelagert und anschließend die Widerstände ermittelt. Nachfolgend werden die ermittelten Werte statistisch ausgewertet und in eine Widerstandskennlinie überführt (Forsen & Veikko, 2000). Diese Widerstandskurven werden üblicherweise von den jeweiligen Messgeräteherstellern nicht veröffentlicht, da die Ermittlung einen großen Aufwand bedeutet. Einige vergleichende Widerstandskennlinien sind jedoch im Forschungsbericht (Forsen & Veikko, 2000) und diversen weiteren Publikationen veröffentlicht worden. Eine Adaptierung auf das neue Messverfahren „Sensorlamelle“ erscheint aber nicht möglich, da die zu Grunde liegenden Leitungsquerschnitte nicht bekannt sind. Es wird vermutet, dass sich das gemessene Holzareal („der Leitungsquerschnitt“), bei steigender Holzfeuchte vergrößert. Somit ist ein Rückschluss der Messwerte auf den spezifischen Widerstand nicht möglich. Es wird ein ähnlicher Zusammenhang vermutet wie Keylwerth und Noack 1956 für die Holzfeuchtemessung von Furnieren mittels Kontaktplatten publiziert haben. *„Es findet aber bei Holz, das die Elektrodenflächen überragt, Stromleitung auch außerhalb des Elektrodenflächenbereiches durch Randstreuung – analog der Randwirkung kreisförmiger Plattenkondensatoren – statt [...]“* (Keylwerth & Noack, 1956).

¹ Trockenes Holz → hoher elektrischer Widerstand / nasses Holz → geringer elektrischer Widerstand.

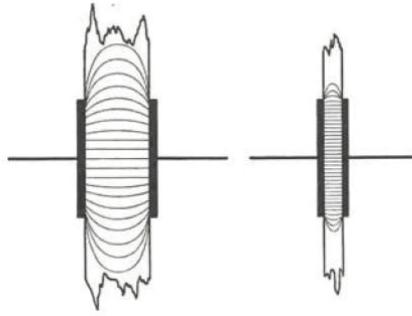


Bild 7:
Schema des Stromlinienverlaufs bei gegenüberliegenden Plattenelektroden (Keylwerth & Noack, 1956).

Für die „Sensorlamelle“ soll die Mittellage des Sensorfeldes (Massivholz FI) als elektrischer Leiter betrachtet werden, der je nach Feuchtegehalt unterschiedliche elektrische Leitfähigkeiten aufweist.

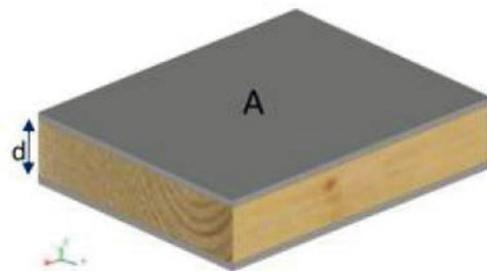


Bild 8:
Schematische Darstellung der "Sensorlamelle" als elektrischer Leiter.

Anhand Gleichung 1 (Kuchling, 2001, S. 411) kann der Leitungswiderstand R in Ω ,

$$R = \frac{\rho \cdot d}{A} \quad (1)$$

eines beliebigen Materials mit beliebigen Dimensionen, berechnet werden. Hierbei bedeuten ρ = spezifischer Widerstand in $\Omega\text{mm}^2/\text{m}$, d = Dicke in m und A = Fläche in mm^2 .

Der spezifische Widerstand, bei den jeweiligen Temperatur- und Feuchtebedingungen, kann durch umstellen der Gleichung (1) nach ρ über den gemessenen Widerstand R berechnet werden. Die Rückführung der gemessenen Widerstandswerte auf den spezifischen Widerstand birgt den Vorteil, dass die Dimension A der Sensorfelder, besonders im Hinblick auf eine praktische Anwendung als flächendeckendes Holzfeuchteüberwachungssystem, beliebig variiert werden kann.

1.5.2 Messtechnische Grundlagen Einzelmessstelle

Bei der Widerstandsmessung an Einzelmessstellen (vgl. Kapitel 1.6) sind sehr hohe Widerstände zu erwarten. Nach (Forsen & Veikko, 2000) liegt für die Holzfeuchte von 12 % der Widerstand bei ca. 1,1 G Ω . Niedrigere Holzfeuchten weisen einen noch wesentlich höheren Widerstand auf, stellen aber für dieses Vorhaben keine Relevanz dar.

Um diese hohen Widerstände messen zu können, sind normalerweise sehr aufwändige und teure Messgeräte notwendig. Leider steht in den verfügbaren Laboren für diese Anwendung kein Messgerät zur Verfügung. Der Messbereich des verwendeten Agilent 34970A endet bei 100 M Ω . Um dennoch die Messdaten an der Einzelmessstelle erfassen zu können, wurde die Parallelschaltung von Widerständen genutzt, welche aussagt, dass „bei der Parallelschaltung der Gesamtwiderstand kleiner als der kleinste Einzelwiderstand“ ist (Kuchling, 2001, S. 416). Gleichung (2) erläutert die Zusammensetzung des Gesamtwiderstandes $R_{ges.}$.

$$R_{ges.} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}, \quad (2)$$

anhand von zwei parallelgeschalteten Einzelwiderständen R_1 und R_2 . Der Parallelwiderstand wurde für die Vorversuche mit 100 M Ω gewählt. Daraus folgt, dass für die Holzfeuchte von 10 % (ca. 1,1 G Ω) der gemessene Widerstand ca. 91 M Ω beträgt. Dieser Erwartungswert liegt im möglichen Messbereich des Agilent 34970A. Die gemessenen Werte können nach der Versuchsdurchführung, durch umstellen von Gleichung (2), auf die tatsächlichen Widerstandswerte umgerechnet werden. Mit diesem Verfahren wird mit Sicherheit keine vergleichbare Genauigkeit zu einer direkten Messung erreicht. Zudem müssen, zusätzlich zu den Abweichungen des Messgerätes, die Toleranzen des Parallelwiderstandes berücksichtigt werden. Die Genauigkeit erscheint für die Vorversuche jedoch ausreichend, da sich der gemessene Widerstand im Feuchteprofil von ca. 14 % HF – 20 % HF sehr stark ändert (Forsen & Veikko, 2000). Messwertabweichungen von bis zu 5 % zeigen hier keine bemerkbaren Auswirkungen. Für die Holzfeuchtigkeit von 12 % ergibt sich aus Berechnung von (Forsen & Veikko, 2000) ein zu messender Widerstand von ca. 1135 M Ω . Nimmt man einen positiv abweichenden Messfehler von 5 % an, ergibt sich ein ermittelter Widerstand von 1078 M Ω . Formt man die zu Grunde liegende Gleichung der Publikation von Forsen & Veikko um und setzt den ermittelten Messwert ein,

wird eine Holzfeuchtigkeit von 12,07 % ausgegeben. Selbst ein um 10 % positiv abweichender Messwert bewirkt lediglich, dass die Holzfeuchte mit 12,15 % ermittelt wird. Diese Toleranzen der Holzfeuchte, in Größenordnungen weniger zehntel, können für die folgenden Untersuchungen akzeptiert werden.

1.6 Versuchsdurchführung der Vorversuche

Die vorbereiteten Sensorfelder und die Referenzproben aus Massivholz wurden in Klimaboxen bis zur jeweiligen Holzgleichsfeuchte gelagert. In diesen stellt sich über eine gesättigte Salzlösung eine gleichmäßige relative Luftfeuchte (rH) ein.

- Natriumnitrit NaNO_2 → ca. 65 % rH bei 20°C
- Magnesiumchlorid – Hexahydrat → $\text{MgCl}_2 \cdot 6 \text{H}_2\text{O}$ → ca. 95 % rH bei 20°C

Die Temperatur betrug über den Versuchszeitraum ca. 15°C.



Bild 9:
Lagerung der Holzproben in der Klimabox bei ca. 65 % rH.

Um den Zeitpunkt des Erreichens der Ausgleichsfeuchte bestimmen zu können, wurden die Proben regelmäßig gewogen. Sobald die Masse der Holzproben konstant bleibt, ist die Ausgleichsfeuchte erreicht.

Die Temperatur und die relative Luftfeuchte wurden mittels eines Datenloggers (onset HOBO temp/rH logger) im Inneren der Klimaboxen, in einem Intervall von 30 min, über den gesamten Versuchszeitraum protokolliert.

Der elektrische Widerstand wurde mit dem Agilent 34970A Messdatenerfassungs- und Schaltsystem ermittelt. Dazu wurden die Edelstahlgitter der Sensorfelder mittels Edelstahlschrauben an den jeweils diagonal gegenüber liegenden Enden kontaktiert und anschließend zum Messgerät verkabelt (Vgl. Bild 10). Auch hier betrug das Messintervall 30 min. Die Messdatenerfassung erfolgte automatisch über einen, an das Messgerät angeschlossenen, Messrechner.

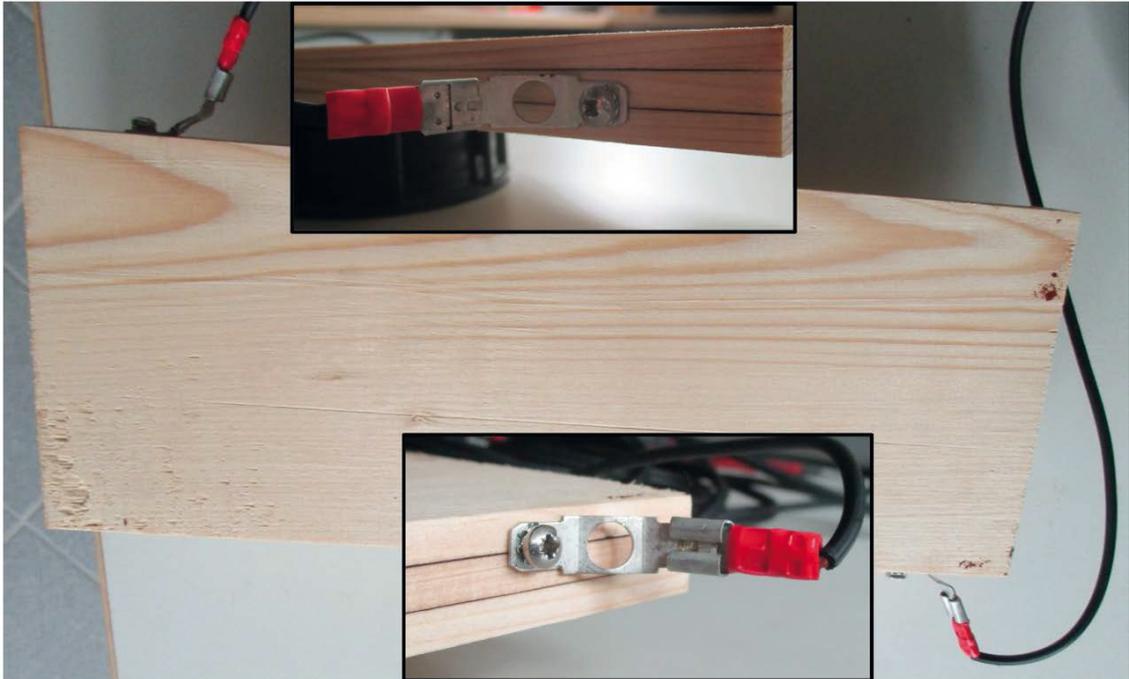


Bild 10:
Kontaktierung der Edelstahlgitter an den Sensorfeldern.

Der Versuchszeitraum betrug in den Klimaboxen insgesamt 84 Tage. Die Sensorfelder und die Referenzproben mit der Nummerierung 1 und 4 verblieben über den gesamten Versuchszeitraum in der Klimabox rH 65 %, um die Stabilität des Widerstandes auch während eines längeren Zeitraumes zu überprüfen. Die Sensorfelder und die Referenzproben mit der Nummerierung 2 und 3 wurden nach Erreichen der Ausgleichsfeuchte, in der Klimabox rH 65% (nach 36 Tagen), in die Klimabox rH 95% eingebracht. In diesem Zug wurde an der Referenzprobe 2 eine Einzelmessstelle angebracht (Vgl. Bild 11). Diese funktioniert analog zum bekannten Widerstandsmessverfahren herkömmlicher Holzfeuchtemessgeräte.



Bild 11:
Einzelmesstelle an der Referenzprobe 2.

1.7 Auswertung und Bewertung der Messergebnisse

Die Holzfeuchte der Referenzproben wurde an die Klimatisierung anschließend mittels Darrverfahren² ermittelt. Die an der Referenzprobe 2 angebrachte Einzelmesstelle wurde bei der Gewichtsermittlung herausgerechnet. Zum Ende der jeweiligen Klimatisierungsdauern wiesen die Referenzproben folgende Holzfeuchten auf:

Tabelle 1:
Holzfeuchtegleichgewicht Klimabox rH 65 %.

Bezeichnung	Referenz 1	Referenz 2	Referenz 3	Referenz 4
Holzfeuchte	14,0 %	13,0 %	13,5 %	13,7 %

Tabelle 2:
Holzfeuchtegleichgewicht Klimabox rH 95 %.

Bezeichnung	Referenz 1	Referenz 2	Referenz 3	Referenz 4
Holzfeuchte	-	20,2 %	20,8 %	-

Die max. Schwankung der Holzfeuchte von 1 % ist für diese Klimatisierungsmethode als normal zu bewerten.

² Bei der Darrmethode wird das Nass-Gewicht der Probe ins Verhältnis mit der Trockenmasse gesetzt (Hiese & Backe, 2004, S. 356)

1.7.1 Sensorfelder

Die gemessenen Widerstände der Sensorfelder wiesen, zum Anfang der Klimatisierung, untereinander stark schwankende Werte auf. Dies kann auf die unterschiedliche Holzfeuchte der Proben, zu Beginn der Messreihe, zurückgeführt werden. Geringe Änderungen der Holzfeuchte, in Verbindung mit den unterschiedlichen Holzproben, bewirken im niedrigen Holzfeuchtebereich recht starke Messwertveränderungen. Folgende Anfangsholzfeuchten der Messreihe wurden ermittelt:

- Sensorfeld 1 (Widerstandskennlinie R1 ; Massenkennlinie M1) = 11,9 %
- Sensorfeld 2 (Widerstandskennlinie R2 ; Massenkennlinie M2) = 10,6 %
- Sensorfeld 3 (Widerstandskennlinie R3 ; Massenkennlinie M3) = 11,2 %
- Sensorfeld 4 (Widerstandskennlinie R4 ; Massenkennlinie M4) = 10,7 %

In Bild 12 ist der zeitliche Verlauf der Klimatisierung in der Klimabox dargestellt. Hierbei stellen die unteren Kurven den Verlauf des Widerstandes der Sensorfelder 1 bis 4 dar. Die halbstündlich ermittelten Messwerte wurden für die Übersichtlichkeit der Abbildung auf tägliche Werte reduziert. Die Verwendung aller Messergebnisse würde einen vergleichbaren Verlauf zeigen. Es wurde stets der um ca. 12 Uhr ermittelte Wert verwendet.

Die oberen Kurven stellen den Verlauf der Gewichtszunahme dar. Alle ermittelten Werte fanden in der Grafik Berücksichtigung.

Der Zusammenhang zwischen Masse (Holzfeuchte) und dem Widerstand verläuft erwartungsgemäß:

- Steigende Masse (Holzfeuchte) = sinkender Widerstand
- Konstante Masse (Holzfeuchte) = nahezu konstanter Widerstand

Die Sensorfelder 2 und 3 wurden am 11.03.2016 in die Klimabox rH 95 % umgelagert. In Bild 12 ist an dieser Stelle das starke Abfallen des elektrischen Widerstandes (Verlauf von R2 und R3) sowie das Ansteigen der Masse (Verlauf von M2 und M3) zu beobachten. Die Sensorfelder 1 und 4 verblieben in der Klimabox rh 65 %. Die Widerstandsverläufe (R1 und R4) sowie der Verlauf der Masse (M1 und M4) sind ab dem 11.03.2016 nahezu konstant.

In den Tabellen 3 bis 6 sind die Zwischenwerte der Holzfeuchte und des Widerstandes, zum 10.03.2016 und die Schlusswerte vom 27.04.2016, in Zahlenwerten zusammengestellt. Der Widerstand zur Anfangsholzfeuchte kann nicht ermittelt werden, da der Start der Klimatisierung und der Beginn der Messwertaufzeichnung ca. einen Tag auseinander liegen.

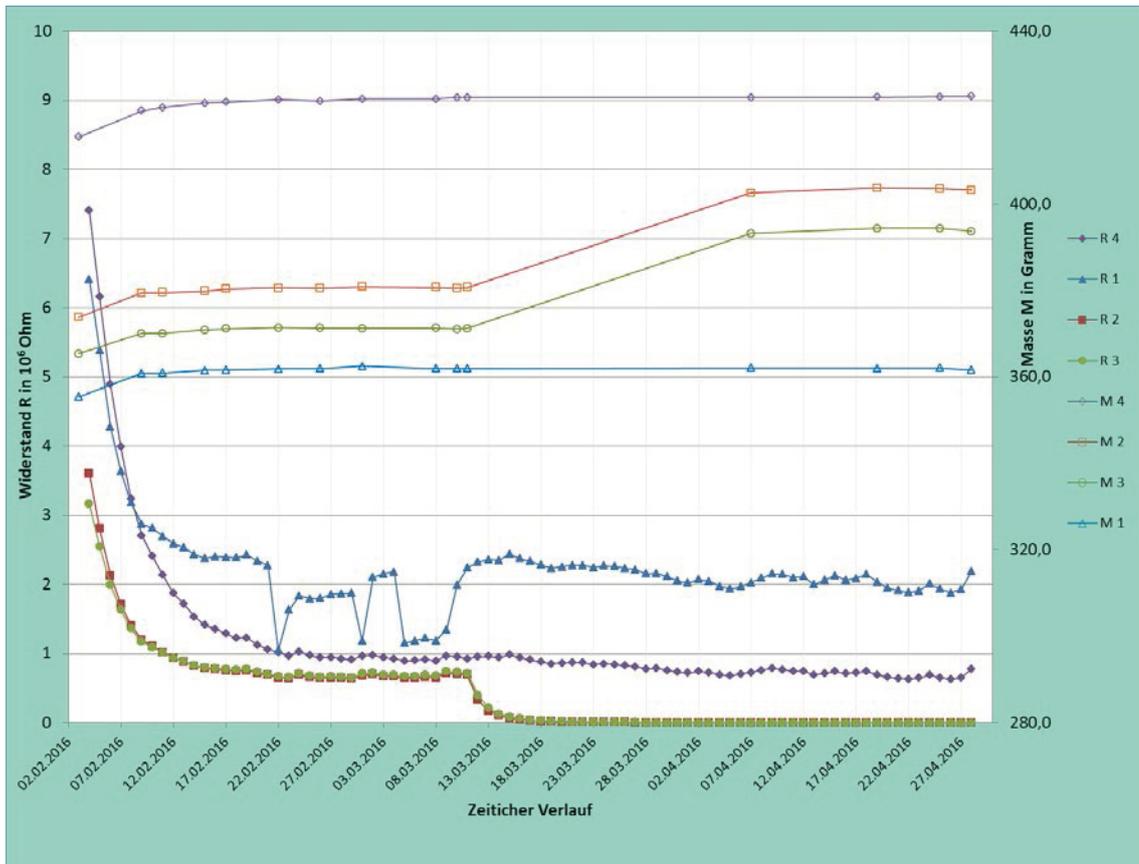


Bild 12:
Verlauf des Widerstandes (R) und der Masse (M) der Sensorfelder 1-4 über den Versuchszeitraum.

Der Widerstandsverlauf R1 von Sensorfeld 1 ist wesentlich unstabiler als der Verlauf der anderen Sensorfelder. Als mögliche Ursachen werden folgende Faktoren vermutet:

- Jahrringlage (das einzige Sensorfeld mit liegenden Jahrringen in der Mittel-lage)
- Schlechte Kontaktierung der Edelstahlgitter (wurde im Verlauf der Versuche zweimal erneuert → kann nahezu ausgeschlossen werden)
- Rohdichte (höchste Rohdichte der Sensorfelder)
- Möglicherweise wurde die Probe mehrfach mit leicht feuchten Händen be-rührt. Da die Kontaktgitter bis an die Außenflanken der Sensorflächen ra-gen, könnte eine leichte Auffeuchtung der Randbereiche zu diesen Schwan-kungen führen.

Am wahrscheinlichsten erscheint der Einfluss der Jahrringlage. Auch der allgemein höhere Verlauf des Widerstandes könnte in dieser Ursache begründet liegen. Die Auswirkung der Jahrringlage ist somit Bestandteil der weiterführenden Untersuchungen. In den folgenden Tabellen sind die Messergebnisse der Sensorfelder 1-4 zusammengefasst:

Tabelle 3:
Zusammenfassung Sensorfeld 1.

Datum	gemessener Widerstand [Ohm]	spezifischer Widerstand [GΩ]	Holzfeuchte Darrprobe
10.03.2016	1.987.981	19.482	14,0 %
27.04.2016	1.933.279	18.946	14,0 %

Tabelle 4:
Zusammenfassung Sensorfeld 2.

Datum	gemessener Widerstand [Ohm]	spezifischer Widerstand [GΩ]	Holzfeuchte Darrprobe
10.03.2016	704.689	6.906	12,9 %
27.04.2016	3.050	30	20,2 %

Tabelle 5:
Zusammenfassung Sensorfeld 3.

Datum	gemessener Widerstand [Ohm]	spezifischer Widerstand [GΩ]	Holzfeuchte Darrprobe
10.03.2016	732.033	7.174	13,5 %
27.04.2016	3.120	31	20,9 %

Tabelle 6:
Zusammenfassung Sensorfeld 4.

Datum	gemessener Widerstand [Ohm]	spezifischer Widerstand [GΩ]	Holzfeuchte Darrprobe
10.03.2016	953.231	9.342	13,6 %
27.04.2016	654.873	6.418	13,6 %

In Tabelle 7 sind die ermittelten Werte des spezifischen Widerstandes, getrennt nach den Feuchtebereichen, aufgestellt. Für eine statistische Auswertung der Ergebnisse ist der Probenumfang nicht ausreichend, es können jedoch Tendenzen erkannt werden. So liegen die Messwerte der Sensorfelder 2-4 im Feuchtebereich 12,9 % - 14 % relativ dicht beieinander. Die einzige starke Abweichung ist an Sensorfeld 1 zu beobachten. Mögliche Gründe für die Abweichungen wurden, im vorhergehenden Abschnitt, schon erwähnt. Sensorfeld 1 und 4 zeigen über den Versuchszeitraum, trotz gleichbleibender Feuchte, abnehmende Widerstandswerte. Laut Forsen und Veikko und weiteren Publikationen ist eine der Kerneinflussgrößen der Widerstandsmessung die Temperatur. In dieser Tatsache könnten die Abnahmen des Widerstandes über den Versuchszeitraum begründet liegen. Die Durchschnittstemperatur im Labor erhöhte sich während des Versuchszeitraums um ca. 1°C und unterlag täglichen Schwankungen. In den weiteren umfangreicheren Versuchen werden deshalb konstante Temperaturbereiche gewährleistet.

Tabelle 7:
Auflistung der Messergebnisse des spezifischen Widerstandes bezogen auf den Feuchtebereich.

Holzfeuchtebereich	12,9 % - 14,0 % (Sensorfeld)	20,2 % - 20,9 % (Sensorfeld)
Messwerte spezifischer Widerstand [GΩ]	19.482 (1)	30 (2)
	18.946 (1)	31 (3)
	6.906 (2)	
	7.174 (3)	
	9.342 (4)	
	6.418 (4)	

Eine vorläufige, vorsichtige Kategorisierung des spezifischen Widerstandes könnte also wie folgt aussehen:

Tabelle 8:
Kategorisierung des spezifischen Widerstandes.

Stehende Jahrringe	12,9 % - 14,0 %	6.400 – 9.500 GΩ
Liegende Jahrringe	12,9 % - 14,0 %	ca. 19.000 GΩ
Stehende Jahrringe	20,2 % - 20,9 %	30 – 31 GΩ

1.7.2 Einzelmessstellen

Die Auswertung der Messwerte, der an der Massivholzreferenzprobe 2 angebrachten Einzelmessstelle, basiert vorrangig auf der Publikation von Forsen und Veikko. Es wurden die dort ermittelten Widerstandskurven zu Grunde gelegt und mit den selbst ermittelten Werten verglichen.

In Bild 13 sind die Werte des gemessenen Widerstandes (R Einzelmessstelle), die daraus errechnete Holzfeuchte (HF 15 °C) und die Holzfeuchte nach der Darrprobe (HF Darrprobe) über der Zeit aufgetragen. Die aufgenommenen Messwerte beginnen erst am 11.03.2016, da die Einzelmessstelle im Zuge der Umlagerung in die Klimabox rH 95 % an der Massivholzreferenzprobe 2, installiert wurde.

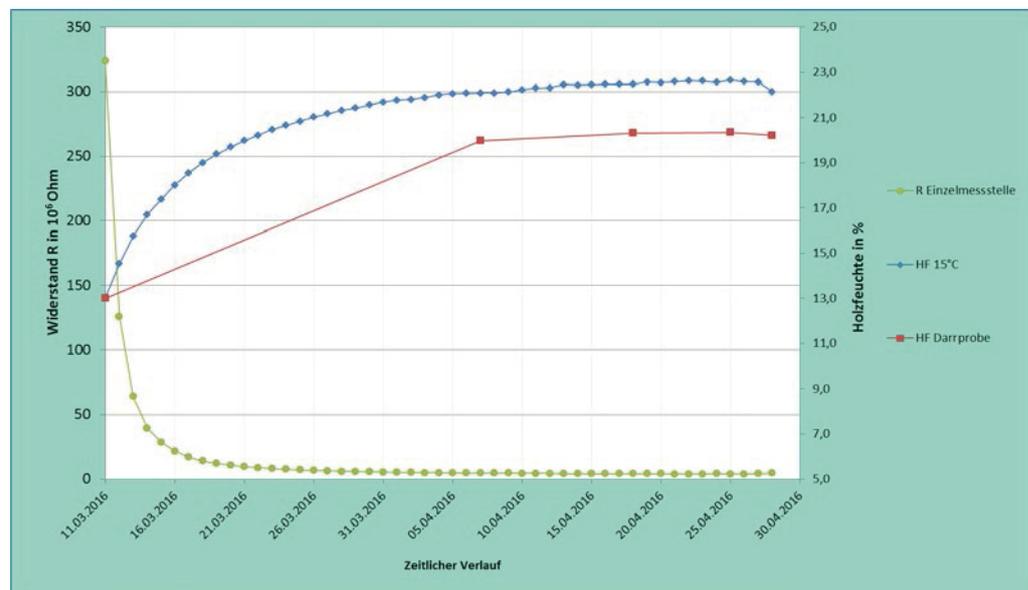


Bild 13:
Widerstand und Holzfeuchte der Einzelmessstellen.

Zur Berechnung der Holzfeuchte aus den gemessenen Widerständen diente folgende Beziehung (Forsen & Veikko, 2000)

$$R = 10^{10ax+b-1} \quad (3)$$

als Grundlage. Hierbei ist a eine Materialkonstante für Fichtenholz = -0,036, b eine Materialkonstante für Fichtenholz = 1,040, x die gemessene Holzfeuchte und R der Widerstand in $M\Omega$.

Durch das Umstellen der Gleichung (3) nach x , kann man aus dem gemessenen Widerstand R die Holzfeuchte ermitteln. Da die Messwerte bei ca. 15 °C ermittelt wurden, musste zusätzlich noch die Temperaturkorrektur einbezogen werden. Diese wurde von Forsen und Veikko folgendermaßen ermittelt:

$$u_{corr.} = \frac{0,00147T \ln(10) + \exp(u_{meas} \ln(10) + b \ln(10)) + 1 - 1,075 \ln(10)}{\ln(10)(0,000158T + 0,0262)}$$

Dabei bedeuten $u_{corr.}$ = Korrekturwert der Holzfeuchte, u_{meas} = Abgelesene Holzfeuchte in %, T = Holztemperatur in °C und a , b = holzartenspezifische Konstanten (vgl. (3)).

Die Auswertung zeigt, dass die ermittelten Messwerte der Einzelmessstellen, in Verbindung mit den Widerstandskurven der Publikation von Forsen und Veikko, zumindest in diesem Fall, durchaus mit herkömmlichen Holzfeuchtemessgeräten vergleichbar sind. Die Abweichungen der gemessenen Werte, zu denen der Darrprobe, betragen weniger als 2 % und das auch nur im höheren Feuchtigkeitsbereich. Dies kommt durchaus den Genauigkeiten der besten erhältlichen Holzfeuchtemessgeräten nahe. Forsen und Veikko geben unter Laborbedingungen, in ihrer umfassenden Studie, Genauigkeiten von $\pm 1,5 \%$ bis $\pm 2,5 \%$ an (Forsen & Veikko, 2000, S. 5). Durch Vergleichsmessungen an mehreren unterschiedlich klimatisierten Holzproben, Parallelwiderstandsmethode im Vergleich zu herkömmlichem Holzfeuchtemessgerät M4050 der Firma Gann, konnten immer vergleichbare Holzfeuchtemesswerte ermittelt werden. Somit wird das Verfahren in den Hauptversuchen nicht weiter berücksichtigt. Eine Anwendung der Technik erscheint mit ausreichender Genauigkeit möglich.

1.8 Versuchsdurchführung der Hauptversuche

1.8.1 Ermittlung des spezifischen Widerstandes von Fichtenholz

Die Anfertigung der Versuchssensorfelder erfolgte unter Berücksichtigung der in den Vorversuchen gewonnenen Erkenntnisse mit unterschiedlicher Darrroh-dichte ($\rho_{\text{darr.}}$) und unterschiedlicher Jahrringlage und umfasst folgenden Probenumfang:

- A1 – A4; $\rho_{\text{darr.}} \sim 540 \text{ kg/m}^3$; liegende Jahrringe
- B1 – B4; $\rho_{\text{darr.}} \sim 492 \text{ kg/m}^3$; stehende Jahrringe
- C1 – C4; $\rho_{\text{darr.}} \sim 442 \text{ kg/m}^3$; stehende Jahrringe
- D1 – D4; $\rho_{\text{darr.}} \sim 511 \text{ kg/m}^3$; liegende Jahrringe

Die Maße der Sensorfelder betragen (260 × 100) mm, bei einer Gesamtdicke von 15 mm und einer Lagendicke von 5 mm. Die Abmessungen der Drahtgitter sind mit (250 × 93) mm gewählt. Sie sind somit etwas kleiner als das Holz, um Fehler durch Feuchteintrag im Randbereich zu minimieren³.

Die Lagerung der Sensorfelder erfolgte bei unterschiedlichen Klimabedingungen in einem gesteuerten Klimaschrank (Vötsch VC4034). Zur Bestimmung der Holzfeuchte wurden die Proben in regelmäßigen Abständen gewogen, um anschließend mittels Darrprobe die exakte Holzfeuchte bestimmen zu können.

Folgende Luftfeuchten (rH) wurden für die Temperaturen 20 °C, 12,5 °C und 5 °C eingestellt:

rH 50 % ; rH 65 % ; rH 75 % ; rH 85 % ; rH 95 %.

³ Bei den durchgeführten Vorversuchen wurde festgestellt, dass ein über die Fuge herausstehendes Metallgitter sehr empfindlich auf geringe Feuchtigkeitsänderungen reagiert.

Die Kontaktierung der Sensorproben mit Kabeln und Steckverbindern wurde analog zu den Vorversuchen ausgeführt. Die Aufzeichnung des elektrischen Widerstandes der Sensorfelder erfolgte ebenfalls mit einem Agilent 34970A Messdatenerfassungssystem. Das Messintervall betrug 30 Minuten.

Im Anschluss an die Klimatisierungsschritte wurde an allen Sensorfeldern eine Darrprobe durchgeführt. Anhand des Darrgewichtes und der ermittelten Zwischenwerte der Masse konnten die Zwischenwerte der Holzfeuchte mittels der Gleichung (4)

$$u = \frac{m_w}{m_0} 100 \% \quad (4)$$

berechnet werden. Hierbei bedeuteten u = Holzfeuchte in %, m_w = Masse der feuchten Holzprobe in g und m_0 = Masse der darrgetrockneten Holzprobe in g. Die Berechnung der Holzfeuchte erfolgte mit der reinen Holzmasse der Sensorfelder (M_{Netto}) (vgl. Tabelle 1). Der Feststoffgehalt des Leimes und die Masse der Metallgitter und Anschlussklemmen der Sensorfelder wurden im Vorfeld bestimmt und von den, im Versuchsverlauf, ermittelten Massen subtrahiert.

1.8.2 Auswertung der Messergebnisse

Klimatisierungstemperatur 20 °C

Die Zusammenführung der Messdaten erfolgte anhand folgender Systematik:

- Auswahl des Widerstandsmesswertes (ermittelt im 30 min. Intervall) welcher kurz vor Beginn der gravimetrischen Messung ermittelt wurde. Eine Verfälschung der Messwerte durch Öffnen des Klimaschranks konnte somit vermieden werden
- Umrechnung des gemessenen Widerstandswertes, anhand der Dimensionen der Sensorfelder, in den resultierenden spezifischen Widerstand
- Berechnung der Holzfeuchte aus den Messwerten der gravimetrischen Messung und der Darrprobe

Das Ergebnis aus diesen Berechnungen ist ein spezifischer Widerstand, welcher einer Holzfeuchte zugeordnet werden kann. Die Zusammenstellung der Messergebnisse wird am Beispiel des Sensorfeldes A1 mit der Klimatisierungstemperatur 20 °C in Tabelle 9 verdeutlicht.

Tabelle 9:
Zusammenstellung der Messergebnisse am Beispiel des Sensorfeldes A1.

Sensorfeld A1						
Datum und Uhrzeit <i>gravimetrische Messung</i>		M_{netto} [g]	$R_{\text{gem.}}$ [Ω]	$R_{\text{spez.}}$ [G Ω]	Holzfeuchte <i>u in [%]</i>	Klimastufe <i>T in [°C] / rH in [%]</i>
15.06.2016	09:30	210,77	13.161.776	61.202	11,0%	20/50
16.06.2016	16:45	210,76	14.758.016	68.625	11,0%	20/50
20.06.2016	09:45	210,54	15.781.165	73.382	10,9%	20/50
21.06.2016	17:00	211,22	12.726.790	59.180	11,3%	20/65
22.06.2016	12:45	211,92	10.319.111	47.984	11,6%	20/65
22.06.2016	17:00	211,97	8.838.115	41.097	11,7%	20/65
23.06.2016	09:00	212,20	8.272.013	38.465	11,8%	20/65
23.06.2016	17:00	212,28	7.857.991	36.540	11,8%	20/65
28.06.2016	15:15	213,58	4.169.797	19.390	12,5%	20/65
29.06.2016	17:00	214,07	3.218.831	14.968	12,8%	20/75
30.06.2016	09:00	214,51	3.386.048	15.745	13,0%	20/75
30.06.2016	17:00	214,60	3.269.481	15.203	13,0%	20/75
01.07.2016	09:00	214,86	2.687.409	12.496	13,2%	20/75
04.07.2016	11:00	215,27	2.534.432	11.785	13,4%	20/75
04.07.2016	17:00	215,26	2.516.161	11.700	13,4%	20/75
05.07.2016	09:00	215,30	2.104.833	9.787	13,4%	20/75
05.07.2016	17:00	216,28	1.549.379	7.205	13,9%	20/85
06.07.2016	09:00	217,18	609.363	2.834	14,4%	20/85
06.07.2016	17:00	217,50	779.435	3.624	14,6%	20/85
07.07.2016	10:00	218,16	722.641	3.360	14,9%	20/85
07.07.2016	17:00	218,31	617.466	2.871	15,0%	20/85
08.07.2016	09:00	218,82	621.237	2.889	15,3%	20/85
12.07.2016	13:45	220,06	470.621	2.188	15,9%	20/85
20.07.2016	09:00	220,76	266.857	1.241	16,3%	20/95
20.07.2016	17:00	222,64	277.902	1.292	17,3%	20/95
21.07.2016	09:00	224,26	294.615	1.370	18,1%	20/95
21.07.2016	17:00	224,58	287.437	1.337	18,3%	20/95
22.07.2016	09:00	225,15	266.870	1.241	18,6%	20/95
25.07.2016	12:30	225,98	263.749	1.226	19,0%	20/95
26.07.2016	11:00	226,01	263.604	1.226	19,1%	20/95

Die Tabelle zeigt, dass eine große Anzahl von Zwischenwerten der Holzfeuchte mit der gewählten Methode ermittelt werden konnte. Die Intervalle im Bereich von 11 % - 19 % Holzfeuchte sind in der Regel kleiner als 1 %. Daraus folgt, dass eine Bestimmung von Näherungsgleichungen zur Ermittlung der Holzfeuchte aus dem spezifischen elektrischen Widerstand auf einem guten Genauigkeitsniveau stattfinden kann.

Zur weiteren Auswertung werden die Messergebnisse grafisch dargestellt, um Grundgemeinsamkeiten und extreme Messwertabweichungen besser erkennen zu können (Bild 10).

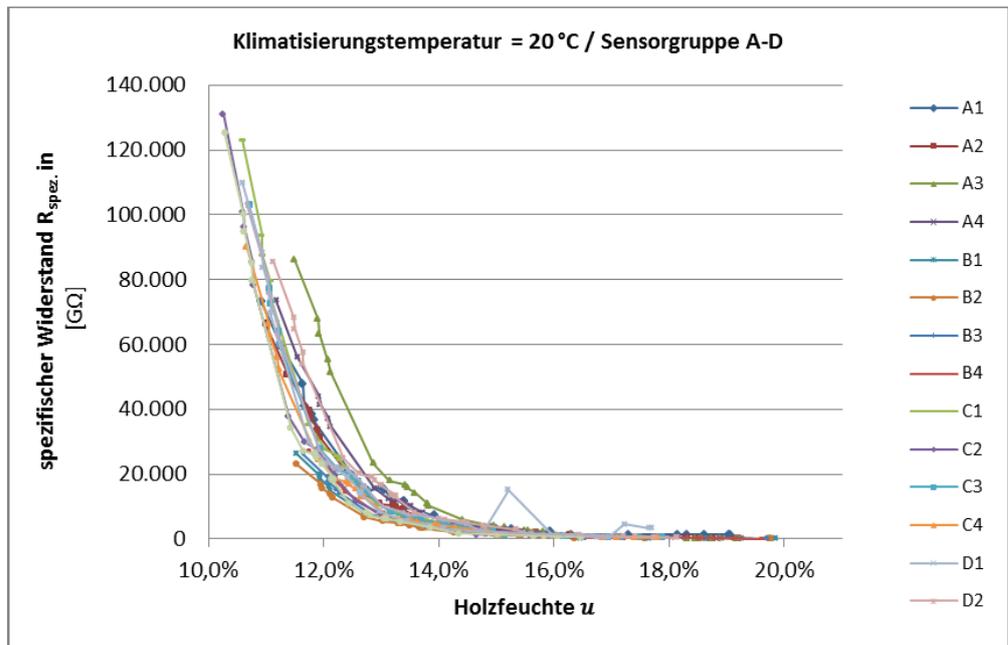


Bild 14:
Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A – D; Klimatisierungstemperatur = 20 °C.

Die grafische Darstellung aller Messwerte in Bild 14 zeigt, dass die Messwerte des spezifischen Widerstandes im Bereich der Holzfeuchte von 11 % - 14 % eine starke Streuung aufweisen. Von 14 % - 19 % nimmt die Streuung stetig ab. Weiterhin sind besonders am Sensorfeld D1 als Messfehler zu wertende Ergebnisse im Bereich der Holzfeuchte von 15 % zu erkennen. Diese werden bei weiteren Berechnungen nicht berücksichtigt.

In den einzelnen Sensorgruppen A – D unterliegen die Messwerte einer wesentlich geringeren Streuung. Bild 15 zeigt exemplarisch die Messwerte der Sensorgruppe A⁴ – alle anderen Gruppen weisen intern eine geringere Streuung der Messwerte auf. In Bild 15 ist zusätzlich der Verlauf des empirischen Mittelwertes der Messwerte der Gruppe A (MW A) dargestellt. Dieser wird verwendet um eine Näherungsgleichung bestimmen zu können (Pot. MW A – schwarze Kurve). Die genaueste Näherung stellt in allen Sensorgruppen eine Potentialgleichung dar. Für die Sensorgruppe A bei einer Klimatisierungstemperatur von 20 ist diese mit $R_{spez.} = 2E - 0,5 u^{-10}$ definiert. Durch Umstellen der Gleichung nach u lässt sich über den gemessenen spezifischen Widerstand die Holzfeuchte berechnen.

⁴ Für die exemplarische Darstellung wurde die Sensorgruppe A gewählt, da sie in allen Temperaturbereichen die ungenaueren Ergebnisse zeigt.

Die Näherungsgleichungen der weiteren Sensorfeldgruppen wurden analog ermittelt. Alle Näherungsgleichungen der einzelnen Gruppen weisen ein Bestimmtheitsmaß (R^2)⁵ von min. 0,98 zur jeweiligen Mittelwertskurve (MW) auf. Daraus folgt, dass die Näherungsgleichung den Zusammenhang zwischen spezifischem Widerstand und Holzfeuchte sehr genau beschreibt.

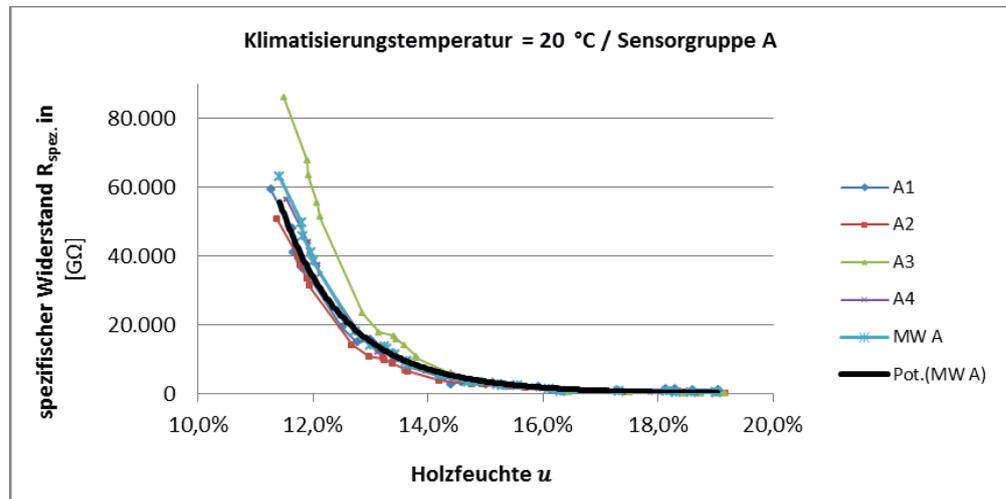


Bild 15:
Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 20 °C.

Um eine für alle Gruppen gültige Potentialgleichung (Pot. MW A-D) zu erhalten, folgte im Anschluss die Ermittlung einer Näherungsgleichung über die Mittelwertskurve aller Gruppenmesswerte (MW A-D). Um die Genauigkeit dieser allgemeinen Potentialgleichung bestimmen zu können, sind in Tabelle 2 für unterschiedliche spezifische Widerstände die resultierenden Holzfeuchten (u) aus den Näherungsgleichungen zusammengestellt. In Spalte „max. diff. Pot. MW A-D / Gruppen“ wird die maximale positive und negative Abweichung der allgemeinen Potentialgleichung zu den Gruppengleichungen bestimmt.

⁵ Das Bestimmtheitsmaß zeigt an, dass in diesem Fall mit der Näherungsgleichung (Pot. MW A) minimal 98 % der Werte der Mittelwertskurve beschrieben werden können.

(Beispiel: In Zeile 1 besteht die max. positive Abweichung 0,6 % von Pot. MW A-D zu Pot. MW B; die max. negative Abweichung -0,1 % zu Pot. MW A)

Tabelle 10:

Vergleich der gesamt Potentialgleichung (Pot. MW A-D) mit den Gruppenpotentialgleichungen / max. Abweichung von Pot. MW A-D zu den Gruppengleichungen.

Spez. Widerstand [GΩ]	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>u</i>	<i>u</i>	max. diff. Pot. MW A-D / Gruppen	
	Pot. MW A	Pot. MW B	Pot. MW C	Pot. MW D	Pot. MW A-D	+	-
50.000	11,5%	10,8%	11,4%	11,4%	11,5%	0,6%	-0,1%
20.000	12,7%	11,8%	12,4%	12,4%	12,5%	0,7%	-0,2%
5.000	14,5%	13,5%	14,0%	14,0%	14,2%	0,8%	-0,3%
1.000	17,1%	15,7%	16,1%	16,2%	16,5%	0,8%	-0,5%
100	21,5%	19,6%	19,8%	20,0%	20,5%	0,9%	-1,0%
50	23,0%	20,9%	21,0%	21,3%	21,9%	1,0%	-1,1%

Die maximale Abweichung der allgemeinen Potentialgleichung beträgt ca. $\pm 1,1$ % Holzfeuchte. Die Genauigkeit handelsüblicher Holzfeuchtemessgeräte auf Widerstandsbasis wird nach Forsen & Veikko mit $\pm 1,5$ bis $\pm 2,5$ % angegeben (Konfidenzintervall 95 %) (Forsen & Veikko, 2000, S. 5).

Bei der Ermittlung der Näherungsgleichungen erfolgte keine statistische Bereinigung der Messwerte, da der Probenumfang zu gering ist. Es wurden lediglich die offensichtlichen Messfehler des Sensorfeldes D1 aus der Berechnung entfernt. Die Ermittlung der Genauigkeit des Verfahrens befindet sich somit auf der sicheren Seite. Eine statistische Bereinigung der Messergebnisse würde für diesen Probenumfang die Genauigkeit der Näherungsgleichungen wesentlich erhöhen.

Klimatisierungstemperatur 12,5 °C und 5 °C

Die Auswertung der weiteren Temperaturbereiche 12,5 °C und 5 °C erfolgte analog zu dem beschriebenen Verfahren. Folgende Grafiken zeigen exemplarisch die Auswertung für die Sensorfelder der Gruppe A.

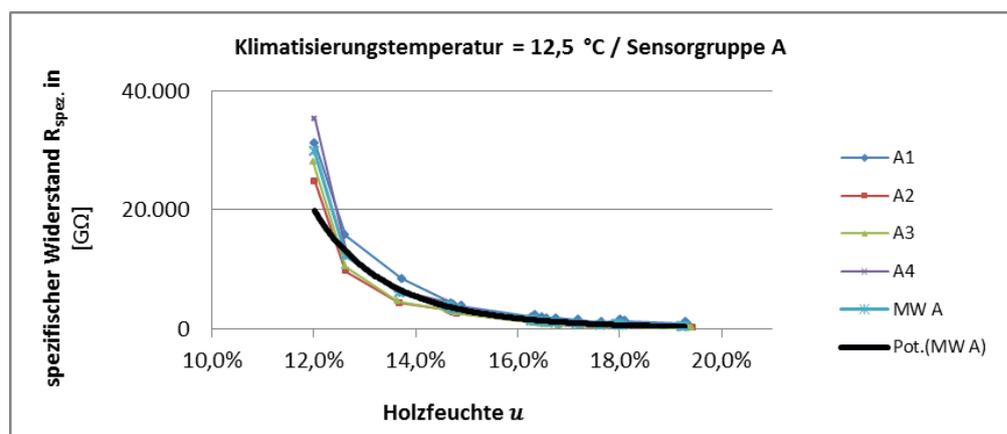


Bild 16:

Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 12,5 °C.

Die Näherungsgleichungen der weiteren Sensorfeldgruppen im Temperaturbereich 12,5 °C wurden analog ermittelt. Alle Näherungsgleichungen der einzelnen Gruppen weisen ebenfalls ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von mindestens 0,98 zu den jeweiligen Mittelwertskurven auf.

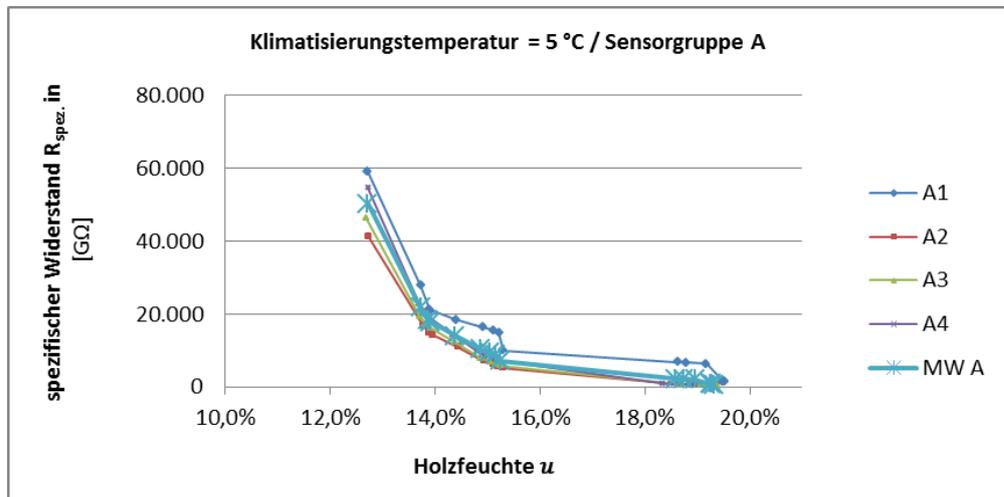


Bild 17:

Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 5 °C.

Das Bestimmtheitsmaß (R^2) der Näherungsgleichung der Sensorgruppe A zur Mittelwertskurve beträgt 0,95. Dieser vergleichsweise geringe Wert entsteht aus den größeren Messwertabweichungen des Sensorfeldes A1. Das Sensorfeld A1 wies in allen Temperaturbereichen höhere spezifische Widerstände im Holzfeuchtebereich über 16 %, im Vergleich zu den anderen Sensorfeldern der Gruppe auf. In diesem Temperaturbereich (5 °C) zeigte sich das Verhalten jedoch am deutlichsten.

Alle weiteren Näherungsgleichungen weisen hier ein Bestimmtheitsmaß (R^2) von mindestens 0,98 zu den jeweiligen Mittelwertskurven auf.

Auswirkungen der Klimatisierungstemperatur auf die Holzfeuchtemessung

Es ist bekannt, dass sich der elektrische Widerstand von Holz mit der Temperatur ändert. Dies wurde für den spezifischen elektrischen Widerstand von Holz auch schon in den Vorversuchen bestätigt. Um den Einfluss bestimmen zu können wurden die ermittelten Näherungsgleichungen der Sensorgruppe A ausgewertet und die resultierenden Holzfeuchten aus unterschiedlichen spezifischen Widerständen berechnet (Tabelle 11). Die Visualisierung erfolgt in Bild 18.

Tabelle 11:
Einfluss der Temperatur auf die Holzfeuchtemessung anhand der ermittelten Näherungsfunktionen der Sensorfelder A.

Spez. Widerstand [GΩ]	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 20°C	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 12,5°C	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 20°C
50.000	11,5%	10,7%	12,5%
20.000	12,7%	12,0%	13,8%
5.000	14,5%	14,1%	16,2%
1.000	17,1%	17,1%	19,4%
100	21,5%	22,5%	25,2%

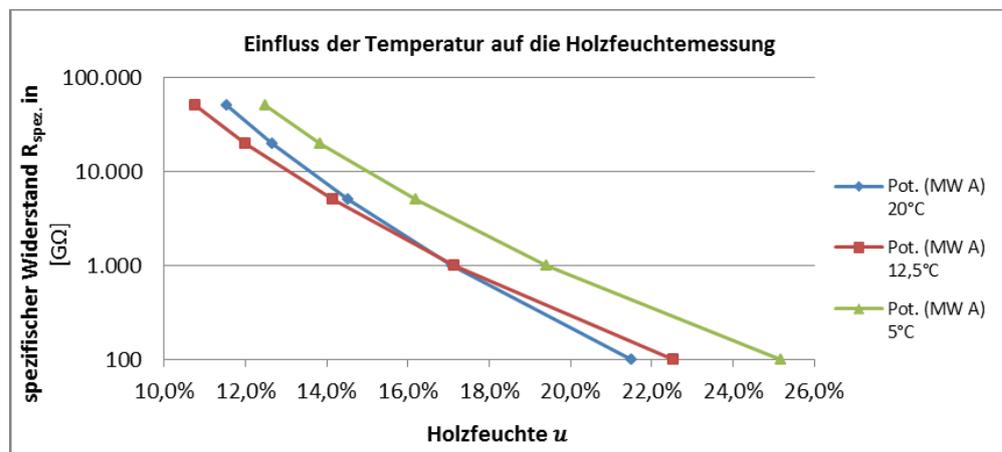


Bild 18:
Einfluss der Temperatur auf die Holzfeuchtemessung – Darstellung aus den Näherungsgleichungen der Sensorgruppe A.

1.8.3 Diskussion der Messergebnisse

Spezifischer Widerstand in Abhängigkeit von der Holzfeuchte

Die Ermittlung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte verlief entsprechend den Erwartungen. Nur sehr wenige Messwerte müssen als offensichtliche Fehlmessungen interpretiert werden. Eine Auswirkung der Jahrringlage auf die Holzfeuchtemessung, wie in den Vorversuchen vermutet, kann nicht nachgewiesen werden. Es zeigt sich jedoch, dass die Sensorfelder (B und C) mit stehenden Jahrringen in allen Temperaturbereichen noch stärkere Vergleichbarkeiten untereinander und weniger „Ausreißer“ innerhalb der Gruppe aufweisen. Die ermittelten Näherungsgleichungen scheinen derzeit eine ausreichende Genauigkeit widerzuspiegeln, um eine flächenbasierte Holzfeuchtemessung zu realisieren.

Auswirkungen der Klimatisierungstemperatur

Es ist bekannt, dass sich der elektrische Widerstand von Holz gegenläufig zur Temperatur verhält. Steigende Temperatur bedeutet einen geringeren elektrischen Widerstand bei konstanter Holzfeuchte – sinkende Temperatur einen steigenden elektrischen Widerstand bei konstanter Holzfeuchte. In den bauwerksrelevanten Bereichen der Holzfeuchte und der Temperatur ergibt sich für dieses Verhältnis ein nahezu linearer Zusammenhang (Keylwerth & Noack, 1956). Erwartungsgemäß müsste somit die Pot (MW A) 12,5 °C Kurve (rot) in Bild 18 annähernd mittig zwischen den Kurven aus 5 °C (grün) und 20 °C (blau) verlaufen. Warum dies nicht der Fall ist, kann nur vermutet werden. Im Verlauf der Ermittlung der 12,5 °C Werte ist der Klimaschrank, durch einen Defekt im Kühlsystem, des Öfteren ausgefallen. Die Klimatisierungen wurden somit immer wieder unterbrochen.

Es wird davon ausgegangen, dass die 12,5 °C Bestimmung gewissen Fehlern unterworfen ist. Bild 19 bestätigt diese Vermutung. Geht man davon aus, dass die 20° C–Kurve richtig ermittelt wurde und nimmt diese als Basis, resultiert aus dem spezifischen Widerstand von 1000 GΩ eine Holzfeuchte von 17 % (Tabelle 12).

Trägt man diese in Bild 19 auf (blaue Linien) und ermittelt anschließend die tatsächliche Holzfeuchte bei der Temperatur von 12,5 °C (rote Linie) und 5 °C (grüne Linie) erhält man folgende tatsächliche Holzfeuchte:

- 12,5 °C ~ 18 %
- 5 °C ~ 19,5 %

Tabelle 12:
Vergleich der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Temperaturen.

Spez. Widerstand [GΩ]	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 20°C	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 12,5°C	Berechnete Holzfeuchte aus Pot. (MW A) 5°C
50.000	11,5%	10,7%	12,5%
20.000	12,7%	12,0%	13,8%
5.000	14,5%	14,1%	16,2%
1.000	17,1%	17,1%	19,4%
100	21,5%	22,5%	25,2%

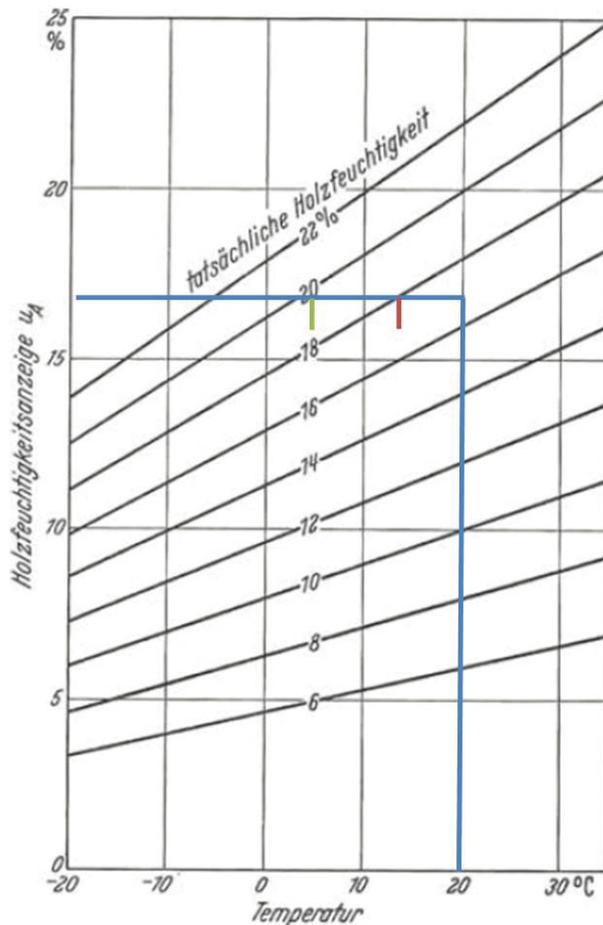


Bild 19:
Abhängigkeit der Holzfeuchte von der Holztemperatur (Keylwerth & Noack, 1956).

Die Ergebnisse aus der 5 °C und 20 °C–Kurve erreichen recht genau die Ermittlungen von Keylwerth und Noack. Die Ergebnisse der 12,5 °C–Kurve weichen jedoch stärker ab.

1.8.4 Anwendungsgrenze der flächenbasierten Holzfeuchtemessung

Um potentielle Schädigungen an Holztragwerken aus bauphysikalisch schlechten Bedingungen zu ermitteln, scheint das entwickelte Verfahren grundsätzlich geeignet. Die Ermittlung der Kennlinien bis zur Holzfeuchte von ca. 20 % spiegelt letztendlich die bauphysikalischen Extrembedingungen wider. Eine wesentlich höhere Holzfeuchte ist durch reine Temperatur- und Luftfeuchtebelastungen kaum zu erwarten.

Sollte jedoch dauerhaft Kondenswasser anfallen oder durch eine Leckage in einer Abdichtung dauerhaft Wasser eintreten, kann die Holzfeuchte um ein vielfaches steigen. Um diesen Anwendungsfall zu simulieren, wurden zwei Sensorfelder größerer Dimensionen über den Fasersättigungsbereich hinaus befeuchtet. Diese wurden 4 Tage einer Wasserlagerung unterzogen. Nach der

Wasserlagerung wiesen die Proben eine Holzfeuchte von ca. 100 % nach Darrprobe auf.

Erwartungsgemäß sollte der elektrische Widerstand derart feuchter Sensorfelder gegen null tendieren. Die Messungen ergaben jedoch immer Ergebnisse, welche auf eine Holzfeuchte von 16 % - 18 % schließen lassen.

Die Ursache für dieses Verhalten wird derzeit in der Bildung eines galvanischen Elementes, innerhalb des Sensorfeldes, mit Wasser als Elektrolyt und den Edelstahlgittern als Elektroden vermutet. Messungen der Stromstärke haben ergeben, dass die Sensorfelder bis zu 10 μA Strom produzieren. Dies erscheint auf den ersten Blick sehr gering, liegt aber im Bereich des Messstroms, welcher von den Messgeräten für die Widerstandsmessung im niedrigen Ohmbereich verwendet wird.

1.9 Technische Realisierung im Produktionsbetrieb

Zu Projektbeginn war eine Integration der Sensorfertigung in Brettschichtholzverarbeitende Betriebe angedacht – so dass die Edelstahlgitter während der Verleimung der Träger in die Leimfuge eingebracht werden. Im Laufe des Projektes haben sich jedoch einige Randparameter ergeben welche eine vorgelagerte Produktion der Sensorlamellen sinnvoll erscheinen lassen.

Hauptgrund für die Planung einer vorgelagerten Produktion der Sensorlamellen ist in der größeren Flexibilität bzgl. Dimensionen und Holzauswahl⁶ zu sehen. Dies insbesondere im Hinblick auf die unterschiedlichen Anwendungsgebiete der Sensorlamellen, als Nachrüstlösung für Bestandsbauten und als Rohlamelle zur Brettschichtholzfertigung. Weiterhin kann über eine vorgelagerte Produktion ein größerer potentieller Kundenkreis erreicht werden, als wenn die Technologie bei einzelnen Brettschichtholzherstellern implementiert wird.

Weiterhin stellt die Bauwerksüberwachung im Holzbau einen ungewissen Markt mit ungewissem Anwendungspotential, aufgrund eines mangelnden Bekanntheitsgrads, dar. Daher ist derzeit vermutlich weniger die Notwendigkeit der Überwachung, als die Bereitschaft der Bauwerkseigentümer der limitierende Faktor für eine große Verbreitung der Technologie. Aus diesem Grund wird zunächst eine handwerkliche Fertigung der Sensorlamellen betrachtet, um große Investitionen zu vermeiden und die Fix-Kosten möglichst gering zu gestalten. Da es sich um sehr einfache Produktionsschritte handelt, besteht jederzeit die Möglichkeit Teilbereiche der Produktion (analog zur Brettschichtholzproduktion) sukzessive zu automatisieren und somit nahezu beliebig zu skalieren.

⁶ Derzeit erscheint es sinnvoll die Mittellage der Sensorlamelle aus Holz mit stehenden Jahrringlagen zu produzieren. Diese haben in den Versuchen eine geringere Streuung der Messwerte gezeigt.

Die folgende Produktionsplanung stellt somit ein flexibles Konzept zur Herstellung von Nachrüstlösungen (sehr dünne Sensorfelder) und zur Fertigung von Sensorlamellen als Rohlamelle für die Brettschichtholzproduktion vor.

1.9.1 Produktionskonzept

Für die Mittellagen der Sensorlamelle sollen vorwiegend Hölzer mit stehenden Jahrringen verwendet werden, daher wird ein gesonderter Einschnitt im Sägewerk angedacht. Dafür werden ausgewählte Fichtenholzstämmе mit möglichst geringem Astanteil und mit großem Mittendurchmesser in einem speziellen Riffschnittverfahren aufgetrennt. Die Trocknung erfolgt auftragsbezogen in einer kleineren Trockenkammer mit ca. 2 m³ Fassungsvermögen. Die Decklamellen werden als getrocknetes Schnittholz zugekauft. Die Fertigung erfolgt handwerklich nach folgendem schematisch dargestellten Ablauf.

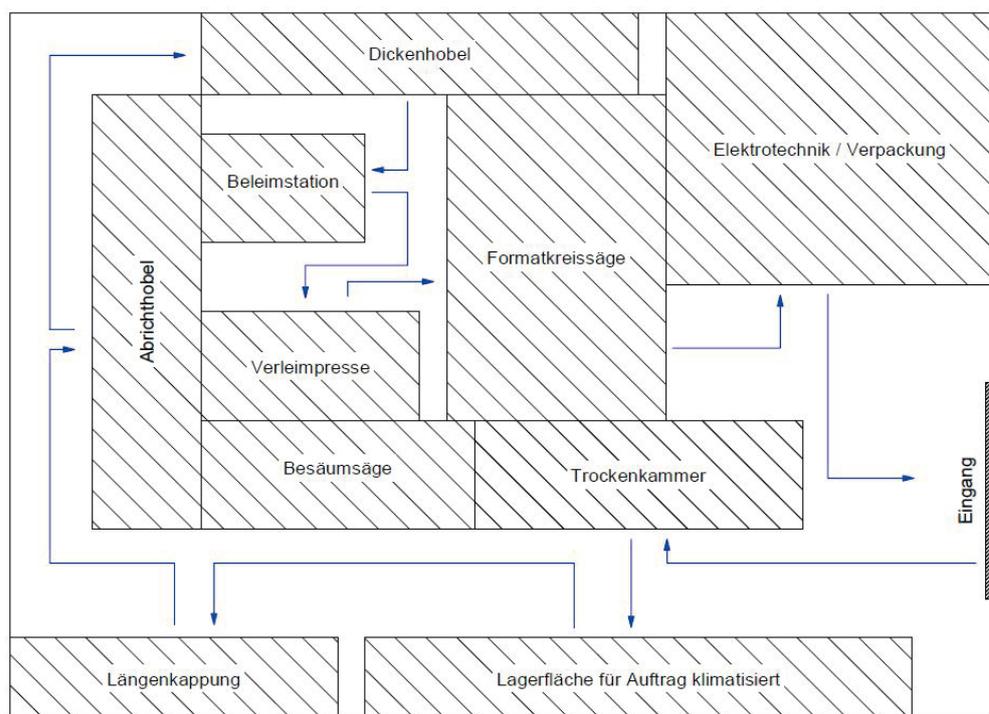


Bild 20:
Schematisch dargestellter Produktionsablauf der Sensorlamellen.

1.10 Vorversuche zu den Materialeigenschaften der Sensorlamellen

Für den Einsatz der Sensorlamellen als integriertes Messelement in tragenden Bauteilen sind Aussagen über die Materialeigenschaften im Hinblick auf eine Zulassungsprüfung zwingend erforderlich. Im Rahmen dieses Forschungsprojektes wurden Vorversuche zur Scherfestigkeit der Leimfuge nach DIN EN 14080:2013-9 4 Punkt-Biegeversuche nach DIN EN 408:2012-10 und Delaminierungsprüfungen nach DIN EN 14080:2013-9 durchgeführt. Die Vorversuche erfolgten mit einem geringen Probenumfang und sollen lediglich eine

Orientierung bieten ob eine Zulassungsprüfung, welche mit erheblichem Proben- und Kostenaufwand verbunden ist, erfolgsversprechend erscheint.

1.10.1 Überprüfung der Scherfestigkeit der Klebefuge nach DIN EN 14080

Die Verklebung der einzelnen Schichten der Sensorlamellen erfolgte analog zu den Versuchssensorfeldern aus den Ermittlungen der elektrischen Eigenschaften mit Dynea Prfere 4094 nach Herstellervorgaben.

Die DIN EN 14080 gibt folgende Mindestanforderungen zur Scherfestigkeit von Klebefugen vor:

Tabelle 13:

Mindestwerte des Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit Quelle: (DIN EN 14080, 2013).

Scherfestigkeit f_v , in N/mm ²	Mittelwert			Einzelwerte		
	6	8	$f_v \geq 11$	$4 \leq f_v < 6$	6	$f_v \geq 10$
Mindestwert des Faserbruchanteils, in % ^b	90	72	45	100	74	20

^a Zwischenwerte werden linear interpoliert.
^b Für Mittelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils $144 - (9 \cdot f_v)$ betragen. Für Einzelwerte muss der Mindestwert des prozentualen Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit $f_v \geq 6,0 \text{ N/mm}^2$, $153,3 - (13,3 \cdot f_v)$ betragen.

Um den Einfluss der Edelstahlgitter innerhalb der Leimfuge auf die Scherfestigkeit bestimmen zu können wurden vergleichende Prüfungen mit und ohne Edelstahlgitter durchgeführt. Die Prüfkörper wurden quaderförmig mit einer Kantenlänge von 50 mm, mittig verklebt, hergestellt, und auf 20°C und 65 %rF konditioniert. Die Prüfkörper wurden in Faserrichtung, bei gleichbleibender Verformungsgeschwindigkeit, bis zu Versagen belastet. Für beide Versuchsreihen, mit Edelstahlgitter in der Klebefuge (VV 1) und ohne Edelstahlgitter in der Klebefuge (VV 2), wurden 10 Scherproben durchgeführt. In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Scherprüfung aufgelistet.

Anschließend wurde eine optische Bewertung der Bruchbilder nach DIN EN 1480 – Anhang D durchgeführt und der Faserbruchanteil in Prozent bestimmt. Der geforderte Mindestfaserbruchanteil wurde für Einzelwerte nach der Formel aus Tabelle 13 berechnet. Die Ergebnisse sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 14:
Ergebnisse der Scherprüfung.

Probe Nr.	Gitter	a ₀	h ₀	b ₀	S ₀	F _{max}	Scherfestigkeit	Zeit _{prüfung}
		mm	mm	mm	mm ²	N	N/mm ²	s
1.1	+	50	50,2	50	2500	26918	10,8	38
1.2	+	50	50,2	50	2510	25760	10,3	38
1.3	+	50	50,4	50	2520	26371	10,5	42
1.4	+	50	50,2	50	2510	27971	11,1	40
1.5	+	50	50,2	50	2510	24581	9,8	39
1.6	+	50	50,2	50	2510	26942	10,7	40
1.7	+	50	50,2	50	2510	23291	9,3	35
1.8	+	50	50,2	50	2510	23052	9,2	38
1.9	+	50	50,2	50	2510	26545	10,6	42
1.10	+	50	50,2	50	2510	25007	10,0	47
2.1	-	50	50,3	50	2515	22368	8,9	40
2.2	-	50	50,2	50	2510	23211	9,2	39
2.3	-	50,3	50,3	50	2530	25173	9,9	45
2.4	-	50	50,3	50	2515	23274	9,3	42
2.5	-	50,2	50,3	50	2525	21046	8,3	39
2.6	-	50,1	50,3	50	2520	22790	9,0	43
2.7	-	50,2	50,3	50	2525	22034	8,7	52
2.8	-	50	50,3	50	2515	23789	9,5	39
2.9	-	50	50,3	50	2515	21856	8,7	38
2.10	-	50	50,3	50	2515	24811	9,9	40

Tabelle 15:
Auswertung der Bruchbilder der Scherprüfung.

Proben Nr.	Scherfestigkeit in N/mm ²	Ergebnis der Scherprüfung Faserbruchanteil	Anforderungen nach DIN EN 14080 min. Faserbruchanteil
1.1	10,8	76%	10%
1.2	10,3	30%	17%
1.3	10,5	60%	14%
1.4	11,1	80%	5%
1.5	9,8	70%	23%
1.6	10,7	70%	11%
1.7	9,3	46%	30%
1.8	9,2	60%	31%
1.9	10,6	70%	13%
1.10	10,0	25%	21%
2.1	8,9	100%	35%
2.2	9,2	30%	30%
2.3	9,9	90%	21%
2.4	9,3	85%	30%
2.5	8,3	65%	42%
2.6	9,0	95%	33%
2.7	8,7	45%	37%
2.8	9,5	95%	27%
2.9	8,7	40%	38%
2.10	9,9	75%	22%

Da für eine statistische Auswertung der Probenumfang zu gering ist aber alle Probekörper die Mindestanforderungen erfüllt haben werden die einzelnen Versuchsreihen anhand der erreichten Mittelwerte miteinander verglichen.

Tabelle 16:
Mittelwerte der Scherfestigkeit und des Faserbruchanteils.

	Mittelwert der Scherfestigkeit in N/mm^2	Mittelwert des Faserbruchanteils	Mittelwert des min. Faserbruchanteils nach DIN EN 14080
Serie VV 1	10,22	59%	52%
Serie VV 2	9,15	72%	62%

Die Auswertung zeigt, dass das Edelstahlgitter keine negativen Auswirkungen auf die Leimfuge ausübt. Es konnte eine leicht erhöhte Scherfestigkeit festgestellt werden welche aber auch in der Varianz des verwendeten Holzes begründet liegen könnte.

1.10.2 Biegeprüfung an Kleinprüfkörpern nach DIN EN 408

Die Vorversuche zur Biegefestigkeit an Kleinprüfkörpern wurde nach DIN EN 408:2012-10 durchgeführt. Die Höhe der Versuchskörper betrug 15 mm mit symmetrischen Schichtenaufbau. Die Länge der Proben betrug 320 mm. Somit ist die Anforderung der Norm für ($19h = 285 \text{ mm}$) erfüllt.

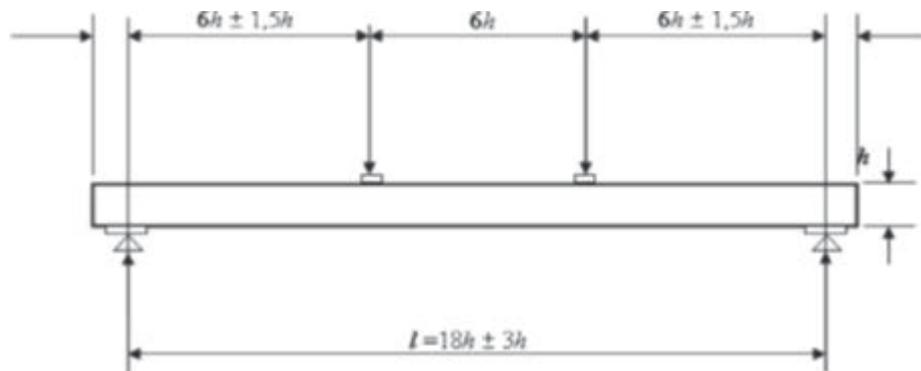


Bild 21:
Prüfanordnung für die Bestimmung der Biegefestigkeit, Quelle: (DIN EN 408, 2012).

Es wurden insgesamt 4 Versuchsreihen mit einem Probenumfang von jeweils 10 Stück geprüft. Die Versuchsreihen unterschieden sich wie folgt:

- VV 3: Lasteinleitung quer zur Leimfuge, mit Edelstahlgitter
- VV 4: Lasteinleitung quer zur Leimfuge, ohne Edelstahlgitter
- VV 5: Lasteinleitung parallel zur Leimfuge, mit Edelstahlgitter
- VV 6: Lasteinleitung parallel zur Leimfuge, ohne Edelstahlgitter

Die unterschiedlichen Belastungsrichtungen wurden gewählt, da konstruktiv eingesetztes Holz häufig Biegebelastung aus zwei Richtungen ausgesetzt ist.



Bild 22:
Lasteinleitung quer zur Leimfuge (links) und parallel zur Leimfuge (rechts).

Tabelle 17:
Auswertung der Biegeversuche.

	a_0	b_0	S_0	E_{mod}	F_{max}	σ_M
VV 3	mm	mm	mm ²	MPa	N	N/mm ²
Mittelwert	15,46	14,92	230,66	14687,13	1176,65	89,12
Standardabweichung	0,04	0,05	0,88	629,45	96,03	7,25
	a_0	b_0	S_0	E_{mod}	F_{max}	σ_M
VV 4	mm	mm	mm ²	MPa	N	N/mm ²
Mittelwert	15,37	15,07	231,66	12988,77	1094,80	82,96
Standardabweichung	0,06	0,08	1,56	537,18	128,48	9,33
	a_0	b_0	S_0	E_{mod}	F_{max}	σ_M
VV 5	mm	mm	mm ²	MPa	N	N/mm ²
Mittelwert	14,85	15,58	231,45	13789,32	1080,71	84,90
Standardabweichung	0,15	0,04	2,76	737,05	78,43	6,11
	a_0	b_0	S_0	E_{mod}	F_{max}	σ_M
VV 6	mm	mm	mm ²	MPa	N	N/mm ²
Mittelwert	14,89	15,36	228,71	12721,45	1024,58	81,17
Standardabweichung	0,09	0,04	1,59	729,87	83,37	6,02

Die Ergebnisse der Vorversuchsreihen zeigen, dass die Lasteinleitungsrichtung keinen Einfluss auf die Biegefestigkeit aufweist. Die Biegefestigkeit der Versuchsreihen VV 3 und VV 5 werden durch die Einbringung des Metallgitters in einem geringen Maß verbessert. Des Weiteren erfolgt beim Bruchversagen der Serien VV 3 und VV5 keine vollständige Zerstörung der Proben. Die Metallgittereinlage verhindert einen durchgehenden Bruch in zwei Teile. Sämtliche Proben der Vorversuchsreihen erfüllen die Biegefestigkeit für Schnittholz C50 nach DIN EN 338 und wären somit für die Produktion von Brettschichtholz bzw. Brettsperrholz geeignet.

1.10.3 Delaminierungsprüfung nach DIN EN 14080

Für die Delaminierungsprüfung wurde ein Druckgefäß verwendet, das einen Druck von mindestens 600 kPa und ein Vakuum von mindestens 85 kPa herstellen kann. Die Delaminierungsprüfung wurde nach Prüfverfahren B der DIN EN 14080:2013-09 Anhang C bzgl. Trocknungsparameter und Prüfzyklus durchgeführt.

Der Probenumfang betrug 14 Delaminierungsproben mit unterschiedlichen Jahrringlagen und unterschiedlicher Symmetrie der Aufbauten. Nach Beendigung des Prüfzyklus wurden die Delaminierungslängen der Leimfugen aufgenommen und führten zu folgendem Ergebnis: Tabelle 18: Auswertung der Delaminierungsprüfung.

Probennr.	Delaminierungsvorgaben		Begründung
	erfüllt	nicht erfüllt	
D 1.1	x		
D 1.2	x		
D 1.3		x	Markröhre vorhanden
D 1.4	x		
D 1.5	x		
D 1.6	x		
D 1.7	x		
D 1.8		x	
D 1.9	x		
D 1.10	x		
D 1.11	x		
D 1.12		x	Markröhre vorhanden
D 1.13	x		
D 1.14	x		

Die Proben 1.3, 1.8 und 1.12 erreichten die Delaminierungsvorgaben nach DIN EN 14080 nicht. Der Querschnitt der Proben 1.3 und 1.12 beinhaltete Markröhren welche für die Herstellung von BSH-Lamellen nicht zulässig sind – der Grund für die starke Delaminierung der Proben wird somit in der Markröhre und den damit verbundenen Holzeigenschaften gesehen. Die Probe 1.8 wies auf einen offensichtlichen Verklebungsfehler hin (zu wenig Kleber / zu geringer Pressdruck).

Die Ergebnisse der Delaminierungsprüfung lassen darauf schließen, dass eine Verklebung mit Edelstahlgittern innerhalb der Klebefuge, bei Normgerechter Holz Auswahl und Einhaltung der technischen Regeln für die Verklebung, möglich ist und keine negativen Auswirkungen auf die Klebefuge bzgl. Delaminierung entstehen.

1.11 Installation eines Holzfeuchteüberwachungssystem an einer Holzbrücke

Bei einer durch das Ingenieurbüro Miebach geplanten und von der Firma Schafitzel Holzindustrie GmbH + Co. KG. ausgeführten Holzbrücke, wurde zu Projektende ein Überwachungssystem als Nachrüstlösung installiert. Es wurden 12 Sensorfelder und 4 Einzelmessstellen in den Laborwerkstätten der Hochschule Rosenheim gefertigt und am Bauwerk angebracht.



Bild 23:
Ansicht der Holzbrücke mit Überwachungssystem in Neckartenzlingen.

Die Sensorfelder wurden seitlich am Hauptträger oberhalb der Mittenaufleger angebracht. Die Einzelmessstellen befinden sich auf der Unterseite des Blockträgers ebenfalls oberhalb der Mittenaufleger.

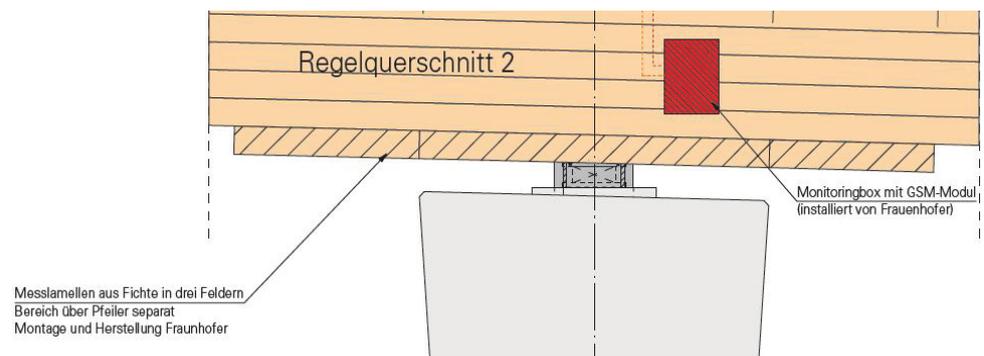


Bild 24:
Darstellung der Sensorlamellen in der Seitenansicht (Quelle: IB-Miebach).

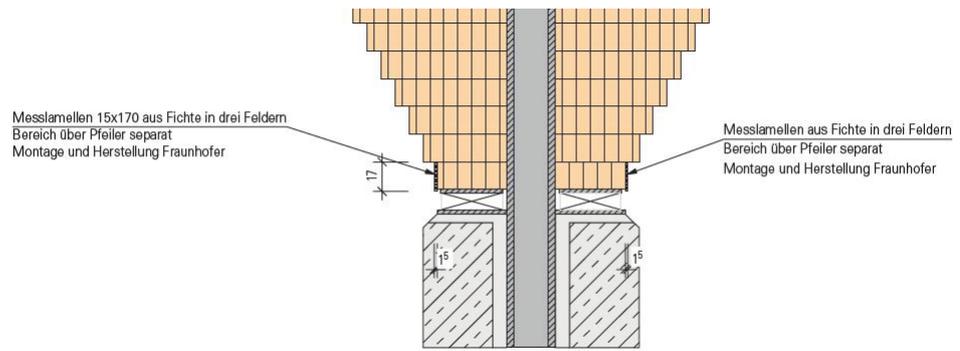


Bild 25:
Darstellung der Sensorlamellen im Schnitt (Quelle: IB-Miebach).

Alle Sensorfelder und Einzelmessstellen wurden elektrisch kontaktiert und die Kabel an einer zentralen Stelle zwischen den Hauptträgern zusammengeführt.



Bild 26:
Einzelmessstellen und hinterlüftete Sensorlamelle – Ansicht von unten.

1.12 Zusammenfassung und Ausblick

Die Ergebnisse aus den Ermittlungen des spezifischen Widerstandes zeigen, dass die Messung einer flächenbasierten Holzfeuchte, im Bereich von 10 % bis 20 %, mit einer Genauigkeit von $\pm 1,0$ % bis $\pm 1,5$ %, bei einer Holztemperatur von 20 °C, möglich ist. Die Genauigkeit von handelsüblichen Holzfeuchtemessgeräten kann, in diesem Holzfeuchtebereich mit dem neu entwickelten System, sogar übertroffen werden.

Die in den Vorversuchen vermutete Abhängigkeit der Jahrringlage auf den spezifischen Widerstand, konnte nicht bestätigt werden. Auch eine Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Rohdichte konnte nicht nachgewiesen werden. Möglicherweise wurde die Spreizung der Rohdichte der Probekörper zu gering gewählt, um eine Auswirkung bestimmen zu können.

Eine Temperaturkompensation für die Holzfeuchtemessung konnte aufgrund möglicherweise fehlerhafter Messergebnisse, bei der Ermittlung der Widerstandswerte bei 12,5 °C Klimatisierungstemperatur, nicht abschließend bearbeitet werden. Die Ermittlungen bei 20 °C und 5 °C lassen jedoch darauf schließen, dass eine Temperaturkompensation durch die seit vielen Jahren bekannten Korrekturkurven erfolgen kann.

Versuche mit stark erhöhter Holzfeuchte haben gezeigt, dass die Messung der flächenbasierten Holzfeuchte derzeit noch Anwendungsrestriktionen unterliegt und Messergebnisse für die Holzfeuchte > 20 % nicht ermittelt werden können.

Die Untersuchungen der Festigkeiten zeigen, dass eine Zulassungsprüfung der Sensorlamellen zum Einsatz in Brettschicht- bzw. Brettsperrholz erfolgsversprechend ist.

Die Installation von Prototypensensorfeldern an einem Brückenbauwerk hat gezeigt, dass selbst Nachrüstlösungen mit vergleichsweise geringem Aufwand realisiert werden können und optisch, bei guter Planung, kaum in Erscheinung treten.

Die Installation des erforderlichen Messgerätes konnte bis zur Berichtserstellung noch nicht erfolgen da, für die Fertigung, wichtige Elektronikbauteile nicht lieferbar sind. Die Installation wird somit voraussichtlich im Nov. – Dez. 2017 erfolgen. Die Überwachung des Bauwerks erfolgt anschließend über das Internetportal des Projektpartners PROGEO Monitoring GmbH.

2 Einsatzmöglichkeiten/ Einbausituationen (IB-Miebach)

Gemäß den technischen Möglichkeiten gilt es zu erarbeiten, in welchem Bereich welche Systeme zum Monitoring sinnvoll und wirtschaftliche eingesetzt werden können. Je nach System ist die technische Umsetzbarkeit im Detail zu entwickeln, damit ein zuverlässiges Monitoring umgesetzt werden kann.

2.1 Brückenbauwerke

Bei Brückenbauwerken aus Holz handelt es sich in der Regel um Bauwerke, die Teil des Verkehrswegenetzes sind. Bauherren sind in der Regel staatliche Einrichtungen wie Kreise, Kommunen oder der Bund. Die Brückenbauwerke sind in umfangreiche und genormte Verwaltungsstrukturen eingebunden, in denen unter anderem regelmäßige Prüfungen geregelt werden (DIN 1076). Demnach sind normative Grundsätze für eine Bauwerksüberprüfung bereits vorhanden.

Im Holzbrückenbau kommen wie im Brückenbau allgemein unterschiedlichste Bautypen und Tragwerke zum Einsatz. In der folgenden Untersuchung wird die Betrachtung auf drei gängige Brückentypen beschränkt. Es handelt sich dabei um die Bauformen Trogbrücke, Blockträgerbrücke und Holz-Beton-Verbundbrücke. Die Details, die hier untersucht werden, lassen sich auch auf weitere Brückentypen anwenden.

Für die Untersuchung der Einbausituation werden drei unterschiedliche Messsysteme in Betracht gezogen:

- Flächige Messung über elektrisch leitfähiges Vlies der Firma PROGEO
- Punktuelle Messung über festeingebaute Einzelmessstellen an signifikanten Punkten
- Einsatz von der so genannten „Sensorlamelle“, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde

Bei allen drei Bautypen ist differenziert zu untersuchen, wo, je nach Konstruktionsart, ein Monitoring sinnvoll ist und wie eine Umsetzung in der Produktion und Montage ausgeführt werden kann. Stellen mit großer Belastung sind bei allen Brücken zum Beispiel Tiefpunkte, Auflagerbereiche, seitlich bewitterte Stellen oder nicht zugängliche Bauteile.

2.1.1 Hauptschadensursachen Brückenbauwerke

Der Holzbrückenbau ist von einer Vielzahl an Schadensbildern geprägt, die in fast allen Fällen auf Feuchteschäden zurückzuführen sind (Zembrot, 2012). Dabei ist zu beachten, dass im Holzbrückenbau zwischen geschützten und ungeschützten Konstruktionen unterschieden wird. Bei ungeschützten Konstruktionen wird eine direkte Bewitterung der tragenden Holzbauteile zugelassen und es ergibt sich eine regelmäßige Durchfeuchtung dieser Bauteile. Die maximale Lebensdauer dieser Konstruktionen beträgt lediglich 30 Jahre (Ablöserichtlinien) und entspricht nicht dem neusten Stand der Technik, wodurch ein Monitoring-

system bei dieser Bauweise wenig Potential birgt. Geschützte Konstruktion haben eine Lebensdauer von mindestens 60 Jahren (Bundesministerium für Verkehr, 2010) und sind somit deutlich interessanter für den Einsatz eines Monitoringsystems. Geschützte Bauweisen sind im Holzbau inzwischen Standard.

Schäden bei Holzbrücken sind in fast allen Fällen auf eine dauerhafte Durchfeuchtung von tragenden Bauteilen zurückzuführen. Bei geschützten Holzbrücken ist dies in der Regel auf fehlerhafte Abdichtungen und beschädigte Maßnahmen zum Witterungsschutz zurückzuführen. Die Prüfung von geschützten Holzbrücken wird oft durch Abdichtungen und Verschalungen, die nicht in allen Fällen entfernt werden können erschwert. Eine dauerhafte Überwachung von tragenden Bauteilen aus Holz kann dazu dienen, Leckagen o.Ä. in einem frühen Stadium zu erkennen und geeignete Sanierungsmaßnahmen einzuleiten. Durch den frühen Zeitpunkt des Eingriffs können so Kosten erheblich reduziert und Unterhaltskosten dauerhaft verringert werden.

2.1.2 Monitoring Trogbrücke



Bild 27:
Beispielkonstruktion einer Trogbrücke.

Eine Trogbrücke ist durch die seitliche Anordnung der Hauptträger in Geländerebene charakterisiert, die im Querschnitt eine Trogform bilden. Der große Vorteil von Trogbrücken besteht darin, dass durch die Anordnung des Haupttragwerks seitlich innerhalb der Geländerebene eine sehr geringe Aufbauhöhe von nur ca. 40-45 cm zwischen der Unterkante der Brücke und der Oberkante des Belages resultiert.

Bei der Trogbrücke wird der konstruktive Holzschutz durch eine seitliche Verkleidung aus Vollholzprofilen oder Holzwerkstoffen sowie eine oberseitige Abdeckung der Träger aus Metall hergestellt. Diese Abdichtungen schützen die Hauptträger und sind entscheidend für die Lebensdauer des Bauwerks.

Folglich ist es notwendig die Funktion dieser Bauteile laufend zu überprüfen, sodass Langzeitschäden verhindert werden können.

Tabelle 19:
Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Trogbrücken.

MONITORING TROGBRÜCKE		
Bauteile	Prüftechnik	Umsetzung/Einschätzung
Hauptträger <i>Hohe Priorität</i>	Messvlies unter Abdeckung oberseitig	Verbindungsmittel dürfen das Messvlies nicht durchdringen; technischer Aufwand relativ gering
	Messvlies vollflächig auf beiden Seiten hinter der Schalung	Kontakt zu Stahlteilen nur schwer zu vermeiden
	Sensorlamelle unter der obersten Lamelle	Sorgfältige Planung erforderlich, damit es keine Durchdringungen durch Verbindungsmittel gibt. Aussagekraft in erster Linie über Funktion der oberseitigen Abdeckung
	Sensorlamelle über der untersten Lamelle	Gerade über Gewässern interessant zur Überwachung des Einflusses von Tauwasser; Überwachung des Auflagerbereichs kann mitgeliefert werden.
	Einzelmesspunkte im Auflagerbereich	Gezielte Kontrolle von Punkten mit hoher Gefährdung durch Verschmutzung oder Spritzwasser.
Längsträger <i>Mittlere Priorität</i>	Vollflächige Messung unter der Abdichtung	Die Befestigung des Belags erfolgt in der Regel durch die Abdichtung; Entwicklung eines neuen Anschlussdetails möglich
	Sensorlamelle unter der obersten Lamelle	Durchdringungen bei gängigen Ausführungen nicht zu vermeiden; Entwicklung eines neuen Anschlussdetails möglich
	Sensorlamelle über der untersten Lamelle	Durchdringungen durch Verbindungen; Entwicklung eines neuen Anschlussdetails möglich
Belag <i>Niedrige Priorität</i>	Punktuelle Messpunkte unterseitig bis zu einer definierten Tiefe eingetrieben (Bohlenbelag)	Informationen durch Messungen mit geringer Aussagekraft; Belag als sekundäres Bauteil der voll der Witterung ausgesetzt
Verkleidung <i>Niedrige Priorität</i>	Keine sinnvolle Messung möglich	Lediglich der Bereich hinter der Verkleidung ist aussagekräftig

Diese Auflistung und Bewertung erörtert die Möglichkeiten zum Monitoring, die sich bei einer Holzbrücke mit einem Trogquerschnitt bieten. Die Kontrolle der Flächen unter Abdichtungen und Verschalungen haben hierbei, ebenso wie die Einzelmesspunkte im Auflagerbereich, eine hohe Priorität. Die Kontrolle über die „Sensorlamelle“ gibt als einzige eine Aussage über die Holzfeuchte

der Hauptträger. Hier ist je nach Gegebenheiten zu beurteilen, welchen Systemen Vorzug gegeben wird. Die Nutzung von mehreren Systemen bedeutet dabei eine deutlich erhöhte Sicherheit und eine größere Fülle an aussagekräftigen Daten. Mit der „intelligenten Leimfuge“ lässt sich die Holzfeuchte über den gesamten Lebenszeitraum aufzeichnen jedoch beziehen sich diese Werte nicht auf den gesamten Querschnitt, sondern auf begrenzte Bereiche und Schäden, die seitlich an den Hauptträgern liegen, werden unter Umständen nicht rechtzeitig entdeckt. Bei der Trogbrücke bietet eine seitliche Kontrolle mit einem Messvlies eine größere Sicherheit.

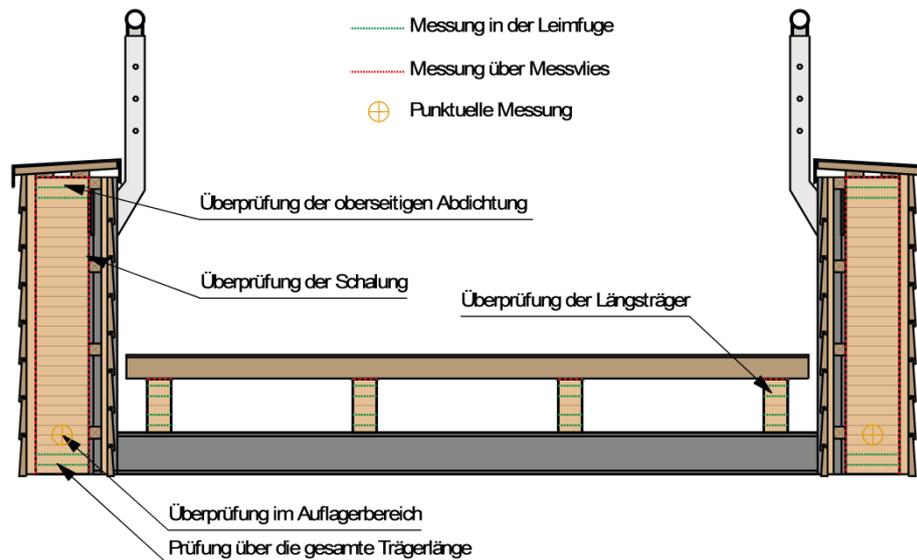


Bild 28:
Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Trogbrücke.

2.1.3 Monitoring Blockträgerbrücke



Bild 29:
Beispielkonstruktion einer Blockträgerbrücke.

Eine Blockträgerbrücke wird durch das Haupttragwerk charakterisiert, das aus einem oder mehreren verklebten Brettschichtholzträgern besteht. Mehrere einzelne Brettschichtholzträger, die fertigungsbedingt nur maximal 26 cm breit hergestellt werden können, werden hierbei neben- oder übereinander zu einem Block bis maximal ca. 3,00 m Breite verklebt.

Der konstruktive Holzschutz wird bei der Blockträgerbrücke in erster Linie durch den Belag sichergestellt. Bei einer Ausführung mit Gussasphalt, der auf einer hinterlüfteten Holzwerkstoffplatte aufgebracht wird, liegt die Abdichtungsebene auf Höhe der Fahrbahn. Der seitliche Witterungsschutz erfolgt über einen ausreichenden Überstand des Belags oder eine seitliche Verkleidung aus Vollholzprofilen oder Holzwerkstoffplatten.

Der Belag als Abdichtung stellt bei diesem Brückentyp die größte Schwachstelle dar. Sobald die Dichtigkeit beeinträchtigt wird, ist der Holzträger gefährdet. Schäden dieser Art werden in der Regel erst erkannt, wenn das Holztragwerk bereits beschädigt ist. Die Sanierung ist dann häufig mit deutlich größeren Kosten verbunden, als die Beseitigung der Undichtigkeit verursacht hätte.

Tabelle 20:
Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Blockträgerbrücken.

MONITORING BLOCKTRÄGERBRÜCKE		
Bauteile	Prüftechnik	Umsetzung/Einschätzung
Hauptträger <i>Hohe Priorität</i>	Messvlies oberseitig vollflächig verlegt	Verbindungsmittel dürfen das Messvlies nicht durchdringen; technischer Aufwand relativ gering
	Messvlies vollflächig auf beiden Seiten hinter der Schalung	Kontakt zu Stahlteilen nur schwer zu vermeiden
	Sensorlamelle unter den obersten Lamellen	Sorgfältige Planung erforderlich, damit es keine Durchdringungen durch Verbindungsmittel gibt. Aussagekraft in erster Linie über Funktion der oberseitigen Abdeckung
	Sensorlamelle über der untersten Lamelle	Gerade über Gewässern interessant zur Überwachung des Einflusses von Tauwasser; Überwachung des Auflagerbereichs kann mitgeliefert werden. Ggf. müssen nur die äußeren Träger überwacht werden
	Einzelmesspunkte im Auflagerbereich	Gezielte Kontrolle von Punkten mit hoher Gefährdung durch Verschmutzung oder Spritzwasser.
Sperrholzplatte <i>Mittlere Priorität</i>	Vollflächige Messung unter der Abdichtung	Die Abdichtung unter einen Gussasphaltbelag erfolgt in der Regel mit Bitumenbahnen, die verschweißt werden. Die Messvliese sind nicht hitzebeständig.
	Sensorlamelle unter der obersten Lamelle	Durchdringungen bei gängigen Ausführungen nicht zu vermeiden; Entwicklung eines neuen Anschlussdetails möglich
	Sensorlamelle über der untersten Lamelle	Durchdringungen durch Verbindungen; Entwicklung eines neuen Anschlussdetails möglich
Verkleidung <i>Niedrige Priorität</i>	Keine sinnvolle Messung möglich	Lediglich der Bereich hinter der Verkleidung ist aussagekräftig

Die Bauteil- und Prioritätenanalyse bei der Blockträgerbrücke zeigt, dass bei Blockträgerbrücken in erster Linie die horizontalen Flächen für ein Monitoring relevant sind. Diese können bereits unter der Belagebene geprüft werden sowie auf der Oberfläche des Blockträgers und über „Sensorlamellen“ im oberen Bereich des Querschnitts. Die seitliche Überprüfung hinter der Verschalung ist ebenfalls sinnvoll, doch ist hier die Umsetzung erheblich komplexer, da das Vlies nicht mit metallischen Verbindungsmitteln befestigt werden darf. Ggf. kann durch einen ausreichenden Überstand des Belags auf eine seitliche Verschalung verzichtet werden, womit Feuchtigkeitsschäden durch Verfärbungen sichtbar werden würden.

Die sehr schlechte Überprüfbarkeit der Oberseite des Blockträgers machen flächige Monitoringsysteme, mit der sich Feuchtigkeit genau lokalisieren lässt, besonders attraktiv. Bei der Planung von Brücken dieser Bauart sollte ein entsprechendes System möglichst früh berücksichtigt werden.

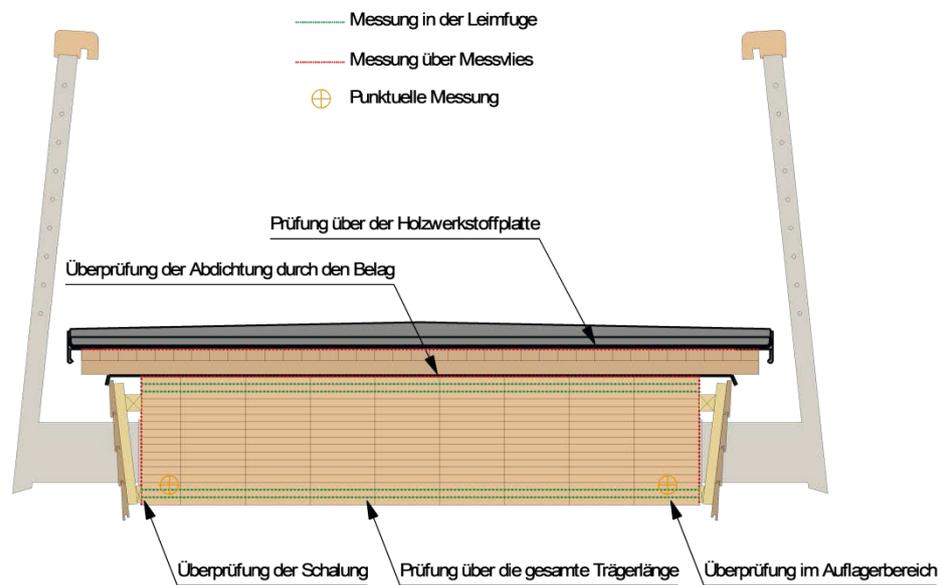


Bild 30:
Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Blockträgerbrücke.

2.1.4 Monitoring Holzbetonverbundbrücke



Bild 31:
Beispielkonstruktion einer Holzbetonverbundbrücke.

Eine Holzbetonverbundbrücke wird als Hybridkonstruktion bestehend aus Holzträgern und einer Betonplatte charakterisiert. Die Materialien sind jeweils nach Eigenschaften optimiert eingesetzt, die Holzträger überwiegend in der Zugzone angeordnet, und die Betonplatte im Druckbereich.

Die sinnvolle statische Kombination der Baustoffe Holz und Beton hat zudem konstruktive Vorteile. So wird durch die Betonplatte der Holzträger vor Witterung geschützt. Durch eine ausreichende seitliche Auskragung der Betonplatte wird sichergestellt, dass Schlagregen den oder die Träger nicht erreicht und keine zusätzliche Verkleidung notwendig ist.

Der Einsatz eines Monitoringsystems ist gerade bei dieser Bauweise interessant, da der Bereich unter der Betonplatte kaum zu prüfen ist. Sollte es zu Schäden in der Abdichtung und Rissen im Beton kommen, wodurch Feuchtigkeit bis auf das Holz gelangt, ist dies nur sehr schwierig im Rahmen einer Bauwerksprüfung zu erkennen.

Tabelle 21:
Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Holzbetonverbundbrücken.

MONITORING HOLZ-BETON-VERBUNDBRÜCKE		
BAUTEILE	PRÜFTECHNIK	UMSETZUNG/EINSCHÄTZUNG
Hauptträger <i>Hohe Priorität</i>	Messvlies oberseitig vollflächig verlegt	Die Herstellung des Schubverbundes erfolgt stets in der Kombination mit metallischen Verbindungsmitteln; Durchdringungen des Messvlieses können nicht vermieden werden. Entwicklung anderer Lösungsansätze nötig
	Messvlies vollflächig unter der Abdichtung auf dem Beton verlegt	Einfache Verlegung; Verbund zwischen Abdichtung und Betonoberfläche nicht möglich; Messvlies kann durch hohe Temperaturen zerstört werden.
	Sensorlamelle unter den obersten Lamellen	Sorgfältige Planung erforderlich, damit es keine Durchdringungen durch Verbindungsmittel gibt. Wichtige Erkenntnis über Dichtigkeit der Betonplatte möglich.
	Sensorlamelle über der untersten Lamelle	Gerade über Gewässern interessant zur Überwachung des Einflusses von Tauwasser; Überwachung des Auflagerbereichs kann mitgeliefert werden. Ggf. müssen nur die beiden äußeren Träger überwacht werden
	Einzelmesspunkte im Auflagerbereich	Gezielte Kontrolle von Punkten mit hoher Gefährdung durch Verschmutzung oder Spritzwasser.
	Einzelmesspunkte seitlich	Überprüfung des Überstands der Betonplatte über den Holzträger

Die Bauteil- und Prioritätenanalyse bei der Blockträgerbrücke zeigt, dass bei Blockträgerbrücken in erster Linie die horizontalen Flächen für ein Monitoring relevant sind. Diese können bereits unter der Belageebene geprüft werden sowie auf der Oberfläche des Blockträgers und über „Sensorlamellen“ im oberen Bereich des Querschnitts. Die seitliche Überprüfung hinter der Verschalung ist ebenfalls sinnvoll, doch ist hier die Umsetzung erheblich komplexer, da das Vlies nicht mit metallischen Verbindungsmitteln befestigt werden darf. Ggf. kann durch einen ausreichenden Überstand des Belags auf eine seitliche Verschalung verzichtet werden, womit Feuchtigkeitsschäden durch Verfärbungen sichtbar werden würden.

Die sehr schlechte Überprüfbarkeit der Oberseite des Blockträgers machen flächige Monitoringsysteme, mit der sich Feuchtigkeit genau lokalisieren lässt, besonders attraktiv. Bei der Planung von Brücken dieser Bauart sollte ein entsprechendes System möglichst früh berücksichtigt werden.

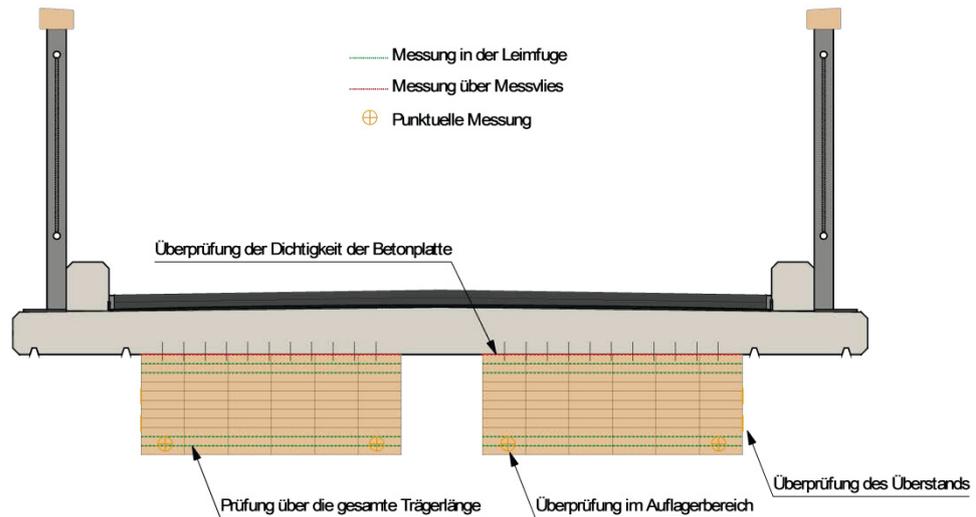


Bild 32:
Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Holzbetonverbundbrücke.

2.2 Hallenbauwerke

Hallenbauwerke aus Holz bestehen meist aus Brettschichtholz und dienen dabei als Lagerhallen, Industriehallen, Sporthallen, Versammlungsstätten etc. - mit verschiedensten Anforderungen. Es kommen sowohl beheizte, unbeheizte und offene Tragwerke vor. Ein Witterungsschutz ist dabei in der Regel durch eine Dachhaut gegeben.

Für die Überprüfung von Hallentragwerken gibt es keine normativ geregelten Zyklen, womit die Verantwortung lediglich beim Betreiber oder der Verwaltung liegt (Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten, 2006). Schäden können bei sichtbaren Bauteilen leicht erkannt werden, wodurch häufig eine frühzeitige Sanierung eingeleitet werden kann. Der Einsatz von Monitoringsystemen ist vor allem für Bereiche interessant, die nicht eingesehen werden können und somit ein größeres Potential für Schäden bergen.

Wie bei den Brückenbauwerken werden die folgenden drei Messsysteme für die Untersuchung der Einbausituation in Betracht gezogen:

- Flächige Messung über elektrisch leitfähiges Vlies der Firma PROGEO
- Punktuelle Messung über festeingebaute Einzelmessstellen an signifikanten Punkten
- Einsatz von der so genannten „Sensorlamelle“, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entwickelt wurde

Dabei sollen vor allem Stellen mit großer Belastung, Bereiche mit möglicher Tauwasserbelastung oder nicht zugängliche Stellen kontrolliert werden.

2.2.1 Hauptschadensursachen Hallentragwerke

Ähnlich wie im Brückenbau ist die größte Gefährdung für Holzbauteile eine dauerhafte Durchfeuchtung, die ideale Bedingungen für Pilze, Insekten oder andere holzerstörende Organismen schafft. Die Ursachen für Feuchtigkeitseintrag in tragende Holzbauteile sind in erster Linie ebenfalls auf fehlerhafte Abdichtungen zurückzuführen, jedoch besteht im Hallenbau zusätzlich die Gefahr durch bauphysikalische Mängel. Wärmebrücken oder schadhafte dampfsperrende Ebenen können zu Feuchtigkeitskonzentrationen in Holzbauteilen führen, die langfristig Schäden verursachen. Gerade diese Mängel können oft nicht rechtzeitig erkannt werden. Geeignete Monitoringsysteme können helfen diese Mängel frühzeitig zu entdecken und es können geeignete Sanierungsmaßnahmen eingeleitet werden.

Nach (Blaß, 2010) sind 70% der Initialschäden an Holzbauteilen Risse in Faserichtung. Davon sind 60 % in der Klebefuge oder im Holz nahe einer Klebefuge. Holzfeuchte-Änderungen im Holzquerschnitt führen zu Eigenspannungen und schließlich zu Rissen. Durch die Früherkennung von Feuchtequellen können Holzfeuchteanomalien und damit verbundene Schäden vermieden werden.

Dach

Eine mögliche Schadensursache ist am Dach zu finden. Neben Konstruktionsfehlern wie Undichtigkeit oder Fehler in der Entwässerung können Schäden oder planungsabweichende Ausführungen der Dachhaut zur Durchfeuchtung der Holzträger führen.

Fassade

Die Fassade einer Halle schützt die Holzstützen vor Bewitterung. Bei Schäden an der Fassade oder unsachgemäßer Ausführung besteht die Gefahr der Durchfeuchtung. Besonders der Anschluss im Stützenfußbereich kann Schadensursache sein.

Tauwasser

Vor allem bei Eissporthallen führt Wärmestrahlung zu Tauwasserbildung an der Holzoberfläche.

Holzfeuchteschwankungen

Durch verschiedene Nutzungen innerhalb eines Jahres oder offene Bauweisen sind große jahreszeitliche Schwankungen der Holzfeuchte zu beobachten. Außerdem kann Sonneneinstrahlung auf Holzbauteile durch Oberlichter oder andere Dachfenster zur oftmaligen Austrocknung der betroffenen Abschnitte führen. Durch starke direkte Sonneneinstrahlung wird außerdem der Klebstoff erhitzt, was im äußersten Fall zur Delaminierung der Klebefugen führen kann.

2.2.2 Besonders gefährdete Nutzungstypen

Sehr gefährdet sind Eissport- und Reithallen, da hier eine hohe jahreszeitliche Holzfeuchteschwankung beobachtet werden kann. Eishallen werden im Sommer anders genutzt als im Winter. Während sich die Holzbauteile im Winter durch Strahlungsaustausch mit der Eisoberfläche auskühlen und Tauwasser ausfällt, trocknen sie im Sommer wieder aus. Reithallen sind ganzjährig unbeheizt und meist offen, weshalb die Innentemperaturen den Außentemperaturen entsprechen. Oft werden die Bodenbeläge in Reithallen über Sprinkleranlagen im Dachbereich beregnet, was zu einer sehr hohen Luftfeuchte führt.

2.2.3 Monitoring Hallenbauwerke

Eine lückenlose Überprüfung von Problemstellen oder Schäden durch Gutachter ist fast nie möglich. Einige Konstruktionen, wie Kastenträger, können nur von außen begutachtet werden. Auch abgehängte Decken, Überschüttungen oder der Verbund mit anderen Materialien behindern die Prüfung des Tragwerks. Somit ist der Einbau von Monitoring-Systemen auch im Hallenbau interessant, um die Holzfeuchte sowohl an der Oberfläche, als auch in Leimfugen zu messen. Durch die ständige Überwachung werden Problemstellen frühzeitig erkannt, was die Beseitigung der Fehlerquelle ermöglicht, bevor große Schäden eintreten.

Tabelle 22:
Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Hallenbauwerken.

MONITORING HALLENBAU		
Bauteile	Prüftechnik	Umsetzung/Einschätzung
Biegeträger <i>Hohe Priorität</i>	Vollflächige Messung unter der Dachhaut	Verbindungsmittel dürfen das Messvlies nicht durchdringen; technischer Aufwand relativ gering
	Sensorlamelle unterhalb von Dachfenstern	Überprüfung der Holzfeuchteschwankungen durch Sonneneinstrahlung
	Sensorlamelle an Wärmebrücken im Übergangsbereich nach außen	Überprüfung der Holzfeuchteschwankungen durch Wärmebrücken; Sorgfältige Planung nötig, um Durchdringungen durch Verbindungen zu vermeiden
	Einzelmesspunkte	Erfassung von Tauwasser an der Trägeroberfläche; Vor allem bei Eishallen und Schwimmhallen sinnvoll
Holzstütze <i>Hohe Priorität</i>	Vollflächige Messung hinter der Fassade	Verbindungsmittel dürfen das Messvlies nicht durchdringen; Technischer Aufwand relativ gering
Pfetten <i>Niedrige Priorität</i>	Vollflächige Messung oberseitig	Erkennung von Undichtigkeiten im Dach; Messung oberhalb der Hauptträger ausreichend

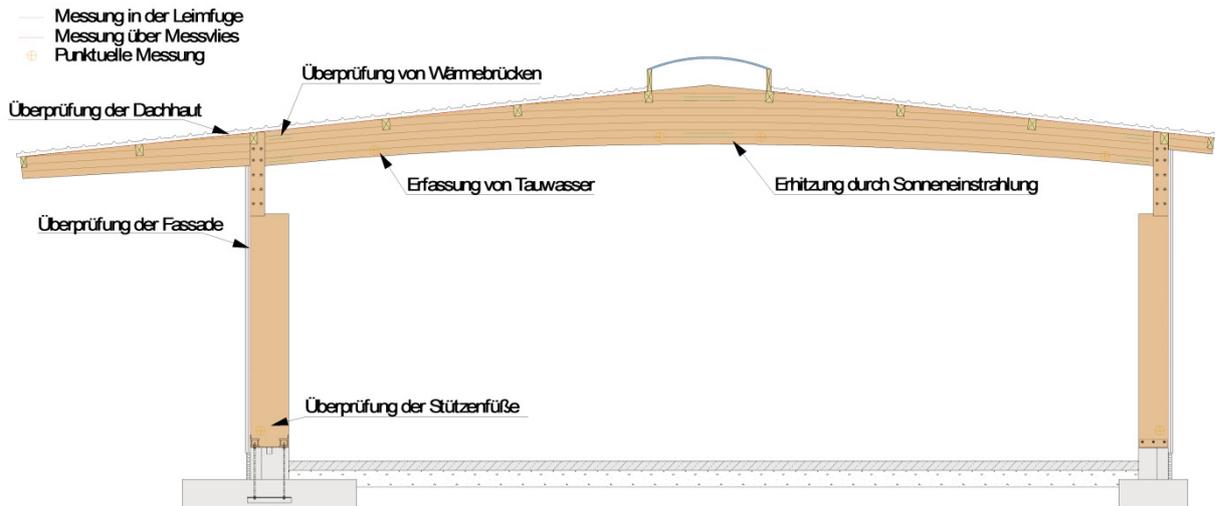


Bild 33:
Einbausituationen der Monitoringsysteme an einem Hallentragwerk.

2.3 Infrastruktur Energieversorgung

Für den Einsatz von Monitoring sind je nach System unterschiedliche Voraussetzungen notwendig. Neben einer ausreichenden Zugänglichkeit ist für ein dauerhaftes, für lange Standzeiten angelegtes Monitoring in erster Linie eine Stromversorgung notwendig.

2.3.1 Brückenbauwerke

Brücken sind sehr unterschiedlich an Infrastrukturen angebunden, wodurch sich ganz individuelle Situationen ergeben. Generell sind Brücken an das Verkehrsnetz angeschlossen und können per PKW erreicht werden. Bei wenigen Fällen im Bereich Rad- und Fußwegbrücken wird dies unter Umständen jedoch nicht gewährleistet. Die für ein Monitoringsystem relevante Versorgung mit Strom ist sehr unterschiedlich. Im urbanen Raum ist eine dauerhafte Stromversorgung oftmals möglich. Außerhalb von bewohnten Gebieten sind die Voraussetzungen entsprechend schlechter. Generell wird bei Brücken meist keine technische Versorgung vorgesehen, da sich im Bereich der Brücken keine Verbraucher befinden. In häufigen Fällen werden unterhalb von Brücken allerdings Medien geführt – unter anderem Stromversorgungen. Der Einsatz von ständig mit Strom versorgten Monitoringsystemen bei Brücken ist folglich mit höherem Aufwand verbunden. Durch ein solarbetriebenes Monitoring System kann auf eine ständige Stromversorgung verzichtet werden.

2.3.2 Hallenbauwerke

Bei Hallentragwerken ist davon auszugehen, dass eine Stromversorgung vorhanden ist und auch entsprechende Verbraucher in der Halle angeordnet sind (Beleuchtung, Klimatisierung, Stromversorgung, etc.). Je nach Größe und Betreiber gibt es ein Gebäudemanagement, das durch Monitoringsysteme ergänzt werden kann. Das Monitoring von klimatischen Verhältnissen innerhalb des Gebäudes ist gerade bei Schwimmhallen oder Eishallen bereits vorhanden. Eine Ausweitung dieser Infrastruktur bezogen auf Holzbauteile ist denkbar.

3 Literaturverzeichnis

Bundesministerium für Raumordnung Bauwesen und Städtebau. (1995). *Dritter Bericht über Schäden an Gebäuden*.

Blaß, H. J. (2010). *Schadensanalyse von Hallentragwerken aus Holz*. Karlsruhe: Berichte zum Ingenieurholzbau.

Bundesministerium für Verkehr, B. u. (2010). *Ablösungsbeträge - Berechnungsverordnung ABBV*.

DIN EN 14080. (09 2013). Deutsches Institut für Normung. *Holzbauwerke - Brettschichtholz und Balkenschichtholz - Anforderungen*.

DIN EN 408. (10 2012). Deutsches Institut für Normung.

Dynea. (12 2003). *Technisches Datenblatt Prefere 4094*. Abgerufen am 11. 05 2016 von http://holzleime.de/images/pdf/td_prefere_4094.pdf

Forsen, H., & Veikko, T. (2000). *Accuracy and functionality of hand held wood moisture content meters*. Finland: VTT PUBLICATIONS.

Hiese, W., & Backe, H. (2004). *Baustoffkunde für Ausbildung und Praxis*. München: Werner Verlag.

(2006). *Hinweise für die Überprüfung der Standsicherheit von baulichen Anlagen durch den Eigentümer / Verfügungsberechtigten*. Bauministerkonferenz.

Keylwerth, R., & Noack, D. (05 1956). Über den Einfluß höherer Temperaturen auf die elektrische Holzfeuchtigkeitsmessung nach dem Widerstandsprinzip. *Holz als Roh- und Werkstoff*, S. 162-172.

Kuchling, H. (2001). *Taschenbuch der Physik 17. Auflage*. München: Carl Hanser Verlag.

Steisslinger, B., & Kreutz, L. (2008). *Zweiter DEKRA-Bericht zu Baumängeln an Wohngebäuden*. Saarbrücken.

Zembrot, M. (2012). Holzbrücken in Baden-Württemberg - Eine Analyse. *Symposium Grünbrücken aus Holz*, (S. 27). Stuttgart.

Bildverzeichnis

Bild 1: Funktionsprinzip der geplanten Bauwerksüberwachung im Holzbau.	6
Bild 2: Materialfeuchte Gigamodul Scanatronik (www.scanatronik.de).	7
Bild 3: Materialfeuchtesensoren (www.scanatronik.de).	7
Bild 4: Hygrotrac Gateway (www.messbar.de).	8
Bild 5: Drahtloser Feuchtesensor Hygrotrac (www.messbar.de).	8
Bild 6: Versuchsaufbau der Holzfeuchtesensoren.	10
Bild 7: Schema des Stromlinienverlaufs bei gegenüberliegenden Plattenelektroden (Keylwerth & Noack, 1956).	11
Bild 8: Schematische Darstellung der "Sensorlamelle" als elektrischer Leiter.	11
Bild 9: Lagerung der Holzproben in der Klimabox bei ca. 65 % rH.	13
Bild 10: Kontaktierung der Edstahlgitter an den Sensorfeldern.	14
Bild 11: Einzelmessstelle an der Referenzprobe 2.	15
Bild 12: Verlauf des Widerstandes (R) und der Masse (M) der Sensorfelder 1-4 über den Versuchszeitraum.	17
Bild 13: Widerstand und Holzfeuchte der Einzelmessstellen.	20
Bild 14: Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A – D; Klimatisierungstemperatur = 20 °C.	24
Bild 15: Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 20 °C.	25
Bild 16: Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 12,5 °C.	26
Bild 17: Grafische Darstellung des spezifischen Widerstandes in Abhängigkeit von der Holzfeuchte der Sensorfelder A; Klimatisierungstemperatur = 5 °C.	27
Bild 18: Einfluss der Temperatur auf die Holzfeuchtemessung – Darstellung aus den Näherungsgleichungen der Sensorgruppe A.	28
Bild 19: Abhängigkeit der Holzfeuchte von der Holztemperatur (Keylwerth & Noack, 1956).	30

Bild 20: Schematisch dargestellter Produktionsablauf der Sensorlamellen.	32
Bild 21: Prüfanordnung für die Bestimmung der Biegefestigkeit, Quelle: (DIN EN 408, 2012).	35
Bild 22: Lasteinleitung quer zur Leimfuge (links) und parallel zur Leimfuge (rechts).	36
Bild 23: Ansicht der Holzbrücke mit Überwachungssystem in Neckartenzlingen.	38
Bild 24: Darstellung der Sensorlamellen in der Seitenansicht (Quelle: IB-Miebach).	38
Bild 25: Darstellung der Sensorlamellen im Schnitt (Quelle: IB-Miebach).	39
Bild 26: Einzelmessstellen und hinterlüftete Sensorlamelle – Ansicht von unten.	39
Bild 27: Beispielkonstruktion einer Trogbrücke.	42
Bild 28: Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Trogbrücke.	44
Bild 29: Beispielkonstruktion einer Blockträgerbrücke.	45
Bild 30: Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Blockträgerbrücke.	47
Bild 31: Beispielkonstruktion einer Holzbetonverbundbrücke.	48
Bild 32: Einbausituationen der Monitoringsysteme an einer Holzbetonverbundbrücke.	50
Bild 33: Einbausituationen der Monitoringsysteme an einem Hallentragwerk.	53

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Holzfeuchtegleichgewicht Klimabox rH 65 %.	15
Tabelle 2: Holzfeuchtegleichgewicht Klimabox rH 95 %.	15
Tabelle 3: Zusammenfassung Sensorfeld 1.	18
Tabelle 4: Zusammenfassung Sensorfeld 2.	18
Tabelle 5: Zusammenfassung Sensorfeld 3.	18
Tabelle 6: Zusammenfassung Sensorfeld 4.	18
Tabelle 7: Auflistung der Messergebnisse des spezifischen Widerstandes bezogen auf den Feuchtebereich.	19
Tabelle 8: Kategorisierung des spezifischen Widerstandes.	19
Tabelle 9: Zusammenstellung der Messergebnisse am Beispiel des Sensorfeldes A1.	23
Tabelle 10: Vergleich der gesamt Potentialgleichung (Pot. MW A-D) mit den Gruppenpotentialgleichungen / max. Abweichung von Pot. MW A-D zu den Gruppengleichungen.	26
Tabelle 11: Einfluss der Temperatur auf die Holzfeuchtemessung anhand der ermittelten Näherungsfunktionen der Sensorfelder A.	28
Tabelle 12: Vergleich der Holzfeuchte bei unterschiedlichen Temperaturen.	29
Tabelle 13: Mindestwerte des Faserbruchanteils, bezogen auf die Scherfestigkeit Quelle: (DIN EN 14080, 2013).	33
Tabelle 14: Ergebnisse der Scherprüfung.	34
Tabelle 15: Auswertung der Bruchbilder der Scherprüfung.	34
Tabelle 16: Mittelwerte der Scherfestigkeit und des Faserbruchanteils.	35
Tabelle 17: Auswertung der Biegeversuche.	36
Tabelle 18: Auswertung der Delaminierungsprüfung.	37
Tabelle 19: Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Trogbriicken.	43
Tabelle 20: Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Blocktragerbrucken.	46
Tabelle 21: Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Holzbetonverbundbrucken.	49

Tabelle 22: Zusammenstellung und Bewertung Monitoring an Hallenbauwerken.

52