

FACT SHEET

PROJEKT MINDWOOD - GEDRUCKTE FEUCHTESENSORIK FÜR DEN HOLZBAU

1. EINLEITUNG

Wie auch bei anderen Baustoffen ist im Holzbau eine **hohe Feuchtigkeit** über **längere Zeiträume** zu vermeiden, da ansonsten teure Folgeschäden entstehen können. Eine hohe Holzfeuchtigkeit (d.h. über 20%) über längere Zeiträume führt zu einem Befall mit holzerstörenden Pilzen, der einen signifikanten Festigkeitsverlust der Holzbauteile zur Folge haben kann. Feuchteschäden bleiben aber oft sehr lange **unbemerkt**, insbesondere wenn sie z.B. durch Fußbodenaufbau oder Gipskartonwände verdeckt sind (Abbildung 1).

Eine **frühzeitige Detektion** erlaubt eine rasche Beseitigung der Ursache sowie eine rasche Trockenlegung, was die Sanierungskosten erheblich reduziert. Aktuelle Monitoringsysteme auf dem Markt erfassen entweder punktuell die aktuelle Holzfeuchtigkeit (z.B. Messung des elektrischen Widerstandes mittels Einschlagelektroden) oder messen die relative Luftfeuchtigkeit bzw. den Eintritt von Flüssigwasser mit rasterförmig ausgelegten Sensorstreifen aus Papier oder Metall, die damit eine große Fläche abdecken können.

Aktuell gibt es aber noch kein Messsystem auf dem Markt, das die Holzfeuchtigkeit über eine große Fläche erfasst und somit ein großflächiges Holzfeuchtemonitoring erlaubt.

Im dreijährigen Forschungsprojekt Mindwood wurde daher von der Holzforschung Austria (HFA) ein Feuchtemonitoringkonzept entwickelt, in dem mittels gedruckter leitfähiger Schichten die tatsächliche Holzfeuchtigkeit im Bauteil laufend gemessen werden kann (Abbildung 2). Dies erlaubt ein flächiges Monitoring der Holzfeuchtigkeit und hilft damit, Schäden bereits frühzeitig in der Entstehungsphase zu detektieren.

Vorteile von gedruckten Sensoren:

- Geringer Platzbedarf
- Flächige Integration in Holzbauteile
- Kostengünstige Herstellung
- Unproblematische Wiederverwendung der Holzbauteile (keine zusätzlichen Folien/Kunststoffe in den Bauteilen)

2. EMPFOHLENE ANWENDUNGSBEREICHE VON FEUCHTEMONITORINGSYSTEMEN

- Die kritischen Feuchtebereiche im Bereich des (Holz-)Baus sind in Abbildung 3 gezeigt.
- Die gutachterliche Praxis an der HFA zeigt, dass die häufigsten Schäden im Bereich der **Nasszelle** sowie des **Flachdaches** auftreten. Auch an **Fensteranschlüssen** werden immer wieder Leckagen gefunden.



Abb. 1: Feuchteschaden im Holzmassivbau

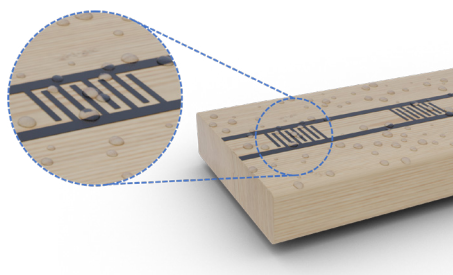


Abb. 2: Konzept der im Projekt Mindwood entwickelten gedruckten Holzfeuchtesensoren

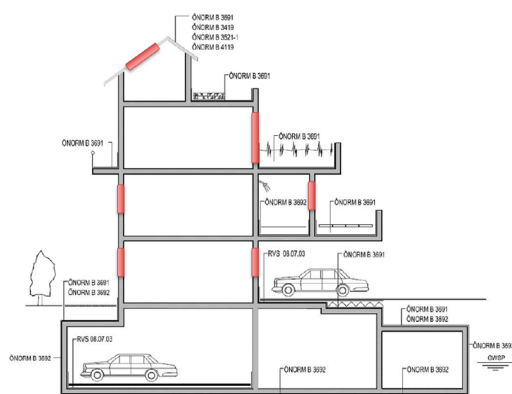


Abb. 3: Kritische Bereiche für einen Feuchteeintritt im (Holz-)Bau

3. BEREITS KOMMERZIELL ERHÄLTICHE MONITORINGSYSTEME

Grundvoraussetzung für die Eignung eines Messgeräts als Monitoringsystem ist die automatisierte Erfassung der Messdaten über längere Zeiträume.

- Aktuelle Feuchtemonitoringsysteme verwenden unterschiedliche Messprinzipien:
- Systeme nach der **elektrischen Widerstandsmethode** sind z.B. von den folgenden Firmen erhältlich: Firma tagtron, Fa. Wiiste, Fa. Tector, Fa. Senzomatic, etc.
- Für **kapazitive Messungen** gibt es hauptsächlich Handgeräte (z. B). Monitoringlösungen dafür sind eher selten. Ein Monitoringssystem ist z.B. von der Fa. Ahlborn erhältlich.
- Flächiges Feuchtemonitoring bzw. Leckagedetektionssysteme sind z.B. von den Firmen tagtron (PHS, WHS) sowie der Fa. Tector erhältlich. Diese Systeme messen die **relative Luftfeuchtigkeit** bzw. den **Eintritt von Flüssigwasser**. Die Holzfeuchtigkeit wird mit diesen Systemen nicht direkt gemessen.
- Systeme für das Monitoring der Temperatur und der **relativen Luftfeuchtigkeit** sind z.B. von der Firma Almendo erhältlich

4. WESENTLICHE PROJEKTERGEBNISSE DES PROJEKTS MINDWOOD

Analog zur Projektstruktur des Projekts Mindwood werden die wesentlichen Erkenntnisse des Forschungsprojekts im vorliegenden Dokument erläutert:

4.1: Entwicklung von Druckverfahren

4.2: Signalanalyse

4.3: Implementierung in Holzbauwerkstoffe

4.4: Implementierung in Holzbaukonstruktionen.

4.1: Entwicklung von Druckverfahren

Ziel war die Entwicklung und Anwendung verschiedener Druckverfahren auf Holz, um leitfähige Schichten auf Holzbauprodukten zur Umsetzung des gedruckten Holzfeuchtesensors (Abbildung 2) zu erzeugen. Je nach Druckverfahren werden unterschiedliche Tinten (z.B. unterschiedlicher Viskosität und Partikelgröße) benötigt.

4.1.1: Leitfähige Tinten

- Um leitfähig zu sein, müssen die verwendeten Tinten **leitfähige Füllstoffe** (z.B. Graphit, Silber, Kupfer) enthalten. Nach der Aushärtung berühren sich die einzelnen Füllstoffpartikel und formen somit eine leitfähige Schicht (Abbildung 4).
- **Graphit** hat eine wesentlich geringere Leitfähigkeit als Silber. Da Graphit aber aus reinem Kohlenstoff besteht und daher bei der **Entsorgung** im Vergleich zu Silber oder Kupfer **keine Probleme verursacht**, wurde Tinten mit diesem Füllstoff im Projekt priorisiert.
- Tinten können **lösemittel-** oder **wasserbasiert** sein. Wässrige Tinten sind wesentlich unproblematischer bei der Verarbeitung (keine Lösemitteldämpfe) haben aber oft eine geringe Wasserbeständigkeit (Problematisch für die Anwendung als Feuchtesensor). Lösemittelbasierte Tinten sind hingegen wesentlich beständiger gegenüber Feuchtigkeit.

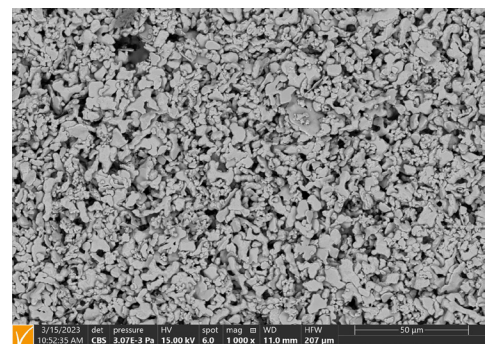


Abb. 4: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer leitfähigen Tinte auf Holz nach dem Sintering.

- Viele Tinten benötigen zur Erreichung der Leitfähigkeit eine **Wärmebehandlung** („Sintering“: ca. 120°C – 150°C für wenige Minuten), was insbesondere auf Holzoberflächen ein Problem darstellen kann (Rissbildung).
- Im Rahmen des Projekts Mindwood hat der Projektpartner **Adler Lacke** eine leitfähige Tinte hergestellt, die wasserbasiert ist, kein Sintering benötigt, aber dennoch eine außerordentlich hohe Leitfähigkeit und Wasserbeständigkeit aufweist.

4.1.2: Druckverfahren

Im Rahmen des Projektes wurden eine Reihe von Druckverfahren untersucht. Die ursprünglich angedachte Methode des Inkjet-Drucks wurde aufgrund zahlreicher Einschränkungen für die Anwendung auf Holz durch andere Druckverfahren ergänzt.

Folgende Druckverfahren wurden im Rahmen des Projektes untersucht:

- a) Inkjet-Druck
- b) Siebdruck
- c) Transfer-Druck
- d) Schablonen-Druck
- e) 3D-Druck
- f) Laser-induzierte Graphitisierung (LIG)

a) Inkjet Druck

Grundprinzip:

kleine Tröpfchen werden an einer Düse durch Anlegen einer Spannung an ein Piezoelement erzeugt (Abbildung 5). Dafür wird eine Tinte mit entsprechend geringer Viskosität benötigt, um die Tröpfchen in der notwendigen Größe erzeugen zu können.

Vorteile:

- Digitales Druckverfahren, d.h. das Motiv kann beinahe in Echtzeit angepasst werden. Damit könnten beispielsweise mit einem vorgelagerten Kamerasystem problematische Stellen (z.B. Äste) erkannt und der Druck entsprechend korrigiert werden.

Nachteile:

- Die geringe Viskosität der Tinte bewirkt ein Eindringen in das Holz („Wegschlagen“). Dies beeinflusst die Formtreue des Druckbildes negativ und es wird für die Erzeugung der notwendigen Leitfähigkeit wesentlich mehr Tinte benötigt.

Lösung: Verwendung von Grundierungen, die das Wegschlagen der Tinte verhindern. Im Rahmen des Projekts wurde dafür eine passende Grundierung entwickelt. Wichtig bei der Grundierung ist insbesondere, dass Drucktinte nicht in die Beschichtung migriert (siehe Beispiel in Abbildung 6, links).

- Das Verfahren ist sehr empfindlich gegenüber Staub und andere Verunreinigungen (Verstopfen der Düsen).

Fazit:

Trotz der vielen potentiellen Vorteile und des hervorragenden Druckergebnisses (Abbildung 6, rechts) ist dieses Verfahren aktuell aufgrund der notwendigen Vorbehandlung sowie der Empfindlichkeit des Verfahrens nur sehr eingeschränkt für die Anwendung für Feuchtesensoren im Holzbau zu empfehlen.

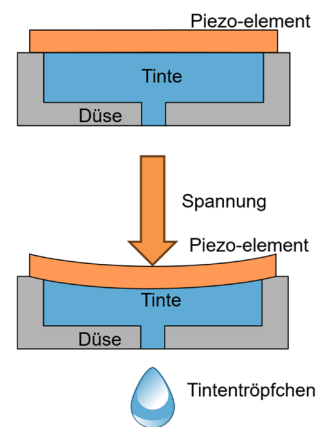


Abb. 5: Prinzip des Inkjet-Drucks

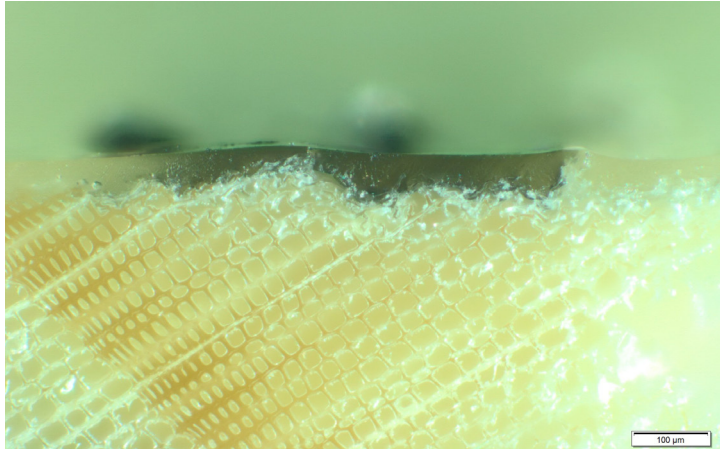


Abb. 6: Links: Grundierung auf Fichtenholz. Die Drucktinte diffundiert in die Beschichtung; Rechts: Mittels Inkjet gedruckter Feuchtesensor

b) Siebdruck

Grundprinzip:

Die leitfähige Tinte wird mittels Gummiwischer durch ein Sieb mit einer bestimmten Maschenweite gedrückt. Die Auflösung sowie Schichtdicke wird durch die Siebparameter bestimmt. Ein Beispiel ist in Abbildung 7 gezeigt.

Vorteile:

- Die Siebdrucktinte ist sehr hochviskos und es kann daher **ohne Grundierung** direkt auf das Holz gedruckt werden.
- Das Verfahren ist **sehr robust** und kann auch in staubiger Umgebung durchgeführt werden.

Nachteile:

- Für jedes Druckmuster muss ein eigenes Sieb hergestellt werden. Die Flexibilität ist somit geringer als beim Inkjet-Druck.
- Das **Handling** auf der Baustelle (für den Druck vor-Ort) ist kompliziert (reinigen der Siebe, usw.).

Fazit:

Das Siebdruckverfahren ergibt ein ähnlich gutes Druckbild (Abbildung 8) wie der Inkjet-Druck und ist sehr gut für den Druck von Feuchtesensoren auf Holzbauteile **im Werk** geeignet, da keine Grundierung notwendig ist. Für die **Anwendung auf der Baustelle** ist dieses Verfahren aufgrund des vergleichsweise hohen Komplexitätsgrades (z.B. Reinigung des Siebes) nur eingeschränkt anwendbar.



Abb. 7: Sensordruck mittels manuellem Siebdruck
(©: ACR/schewig-fotodesign)

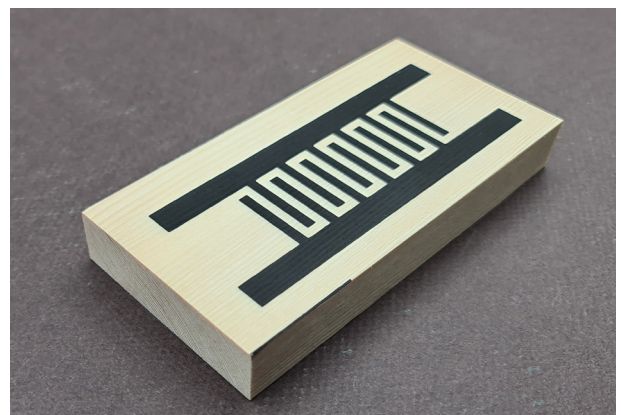


Abb. 8: Mittels Siebdruck aufgebracht Feuchtesensor auf Fichtenholz

c) Transfer-Druck

Grundprinzip:

Das Druckmotiv wird auf ein beschichtetes Transferpapier gedruckt und kann so über Jahre gelagert werden. Bei Bedarf wird das Druckmuster auf die gewünschte Holzoberfläche mittels Heißluftpistole oder Bügeleisen aufgetragen.

Vorteile:

- Sehr einfaches Verfahren
- Robust, kann auch auf einer sehr staubigen Baustelle verwendet werden.
- Schichtdicke ist reproduzierbar
- Es wird keine Grundierung benötigt.

Fazit:

Dieses Verfahren gibt ein vergleichbares Druckergebnis wie der Siebdruck und eignet sich insbesondere für die **Anwendung auf der Baustelle**, da die Sensoren durch Anwendung von Hitze an jede beliebige Stelle angebracht werden können. Für die Anwendung **im Werk** sind hingegen andere Verfahren (z.B. Siebdruck) leichter umzusetzen, da diese besser zu automatisieren sind.

d) Schablonen-Druck

Grundprinzip:

Eine Schablone aus Metall oder eine selbstklebende (PVC-) Folie wird auf die Holzoberfläche gelegt. Der Sensor wird anschließend mittels Streichen, Spritzen oder Rollen auf die Oberfläche aufgetragen. Für ein verbessertes Druckbild (d.h. kein Hineinlaufen der Tinte unter das Sieb) wird bei der Metallschablone ein temporärer Sprühkleber benötigt.

Vorteile:

- Einfache Applikation im Werk (z.B. durch Spritzauftrag) oder auf der Baustelle (Roll- oder Streichauftrag).
- Robust und unempfindlich gegen Staub
- Die von der Fa. Adler entwickelte Siebdrucktinte trocknet sehr rasch und ist bereits nach wenigen Minuten griffest.

Nachteile:

- Die Schichtdicke ist nicht definiert und kann variieren (Sensorkalibration zu Beginn ist notwendig).
- Die Aluminiumschablone ist sehr dauerhaft, für ein gutes Druckergebnis wird allerdings ein Sprühkleber benötigt.
- Die selbstklebende PVC-Folie kann einfach aufgetragen werden, ist aber nur einmal verwendbar

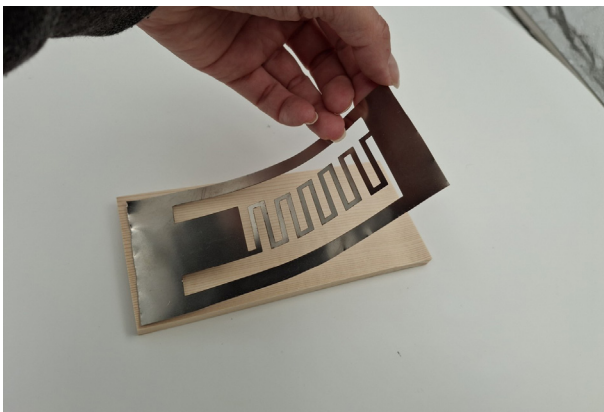


Abb. 9: Links: Metallschablone auf Holz

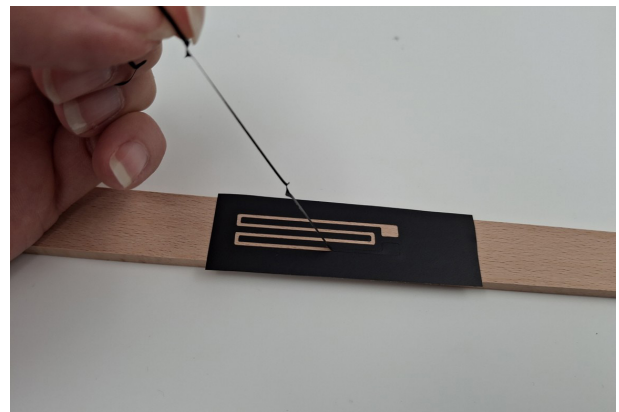


Abb. 10: Selbstklebende PVC-Folie auf Holz



Abb. 11: Links: Ablösen des 3D-Drucks vom Holz; Rechts: Sensorbruch an den Kontaktstellen

Fazit:

Dieses Verfahren ist sowohl für die Anwendung **im Werk** (z.B. im Spritzauftrag) als auch für die Anwendung auf **der Baustelle** sehr gut geeignet.

e) 3D-Druck

Grundprinzip:

Mittels 3D-Drucker wird ein leitfähiges Filament (z.B. auf PLA-Basis) direkt auf die Holzoberfläche gedruckt. Erste Praxisversuche in der Klimakammer haben aber gezeigt, dass das unterschiedliche Quell- und Schwindmaß von Holz und leitfähigem Filament entweder zu Ablösung der Fühler (Abbildung 10, links) oder zum Fühlerbruch (Abbildung 10, rechts) führt. Insbesondere letzteres macht den Sensor unbrauchbar.

Lösung für dieses Problem:

- Fräsen eines Negativ-Musters in das Holz
- Einlegen von 3D-gedruckten überlappenden Sensorbausteinen (Abbildung 12).

Vorteile:

- Hohe Leitfähigkeit,
- einfache und reproduzierbare Applikation
- Sensoren können nach Gebrauch wieder entnommen und ggf. wiederverwendet werden.

Nachteil:

- Relativ hoher Aufwand für die Fräsung

Fazit:

Dieses Verfahren ist insbesondere für die Herstellung **ab Werk** geeignet, da die Herstellung der Fräsung vor Ort vergleichsweise aufwändig ist.

f) Laser-induzierte Graphisierung

Grundprinzip:

Statt des Drucks von leitfähigen Graphitschichten soll die leitfähige Schicht durch selektives Verbrennen der Holzoberfläche mittels CO₂ Laser erzeugt werden.



Abb. 12: Einlegen von 3D-gedruckten überlappenden Sensorbausteinen in ein gefrästes Negativ-Muster

Erste Vorversuche zeigten jedoch eine geringe Reproduzierbarkeit, da die Verbrennung auf der Holzoberfläche stark von der chemischen Zusammensetzung der Holzoberfläche abhängt.

Daher wurde ein Verfahren aus der Literatur¹ angewandt, bei dem zuerst eine Lignin-basierte Tinte auf der Oberfläche aufgetragen wird und dann in einem zweiten Schritt mittels Laser verbrannt wird.

Vorteile:

- Die Tinte ist 100% bio-basiert und stammt aus Abfällen der Papierindustrie

Nachteile:

- Die entstandene Graphitschicht hat **keine Fixierung** zur Holzoberfläche und kann daher relativ leicht heruntergewischt werden. Eine zusätzliche Fixierung (z.B. Beschichtung) ist notwendig.

Fazit:

Dieses Verfahren ist aktuell sehr aufwändig und benötigt vor der großtechnischen Umsetzung noch weitere Entwicklungsschritte.



Abb. 13: Laser Graphitisierung auf Holz mit einer lignin-basierten Tinte

4.2: Signalanalyse

Zur Bestimmung der Messsignaländerung in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit wurden mehrere Versuche in einem **Klimaschrank** durchgeführt (Abbildung 14). Dafür wurde sukzessive die relative Luftfeuchtigkeit erhöht, bis sich die entsprechende Ausgleichsfeuchtigkeit des Holzes einstellte. Die Holzfeuchtigkeit wurde dabei gravimetrisch ermittelt und wurde von ca. 12% auf bis zu 24% erhöht.

In einem ersten Schritt wurde die **optimale Sensorgeometrie** ermittelt. Basierend auf dem bekannten Muster einer Interdigitalelektrode (=kammartig ineinandergreifende Strukturen zur Messung elektrischer Eigenschaften) wurde die Sensorgeometrie systematisch variiert, sodass letztlich die bestmögliche Genauigkeit bei gleichzeitig möglichst kompakter Größe erhalten wurde. Das Ergebnis ist in der Abbildung 15 dargestellt.

Während des Klimakammerversuchs wurde die elektrische Impedanz und der Phasenwinkel für unterschiedliche Messfrequenzen in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit bestimmt. Die Impedanz setzt sich aus dem drei Größen Widerstand **R**, Induktive **L** und Kapazitive **C** Reaktanz zusammen.

Exemplarische Ergebnisse sind in Abbildung 16 dargestellt. Mit zunehmender Messfrequenz nimmt die **kapazitive Reaktanz** stark ab. Es ist bekannt, dass die kapazitive Reaktanz stark von der **Feuchtigkeit** abhängt. Die beste Regression wurde daher mit geringeren Messfrequenzen um 5000 Hz erhalten.

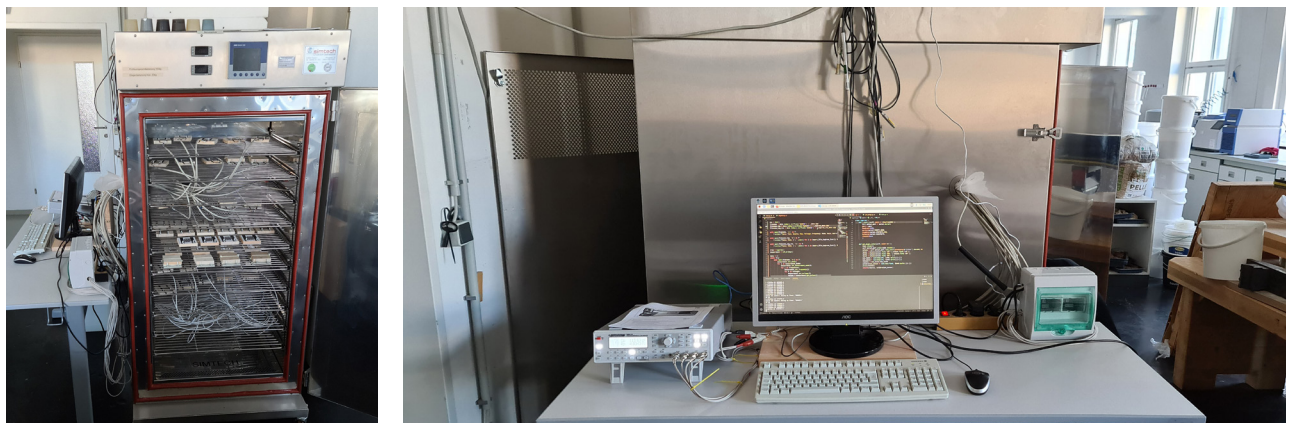


Abb. 14: Links: Versuche im Klimaschrank; Rechts: Messgeräte (z.B. ICR-Brücke zur Ermittlung des Messsignals in Abhängigkeit der Holzfeuchtigkeit).

¹ Edberg, J., Brooke, R., Hosseinaei, O. et al. Laser-induced graphitization of a forest-based ink for use in flexible and printed electronics. npj Flex Electron 4, 17 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41528-020-0080-2>

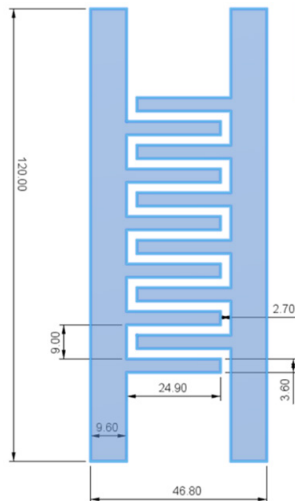


Abb. 15: Optimale Sensorgeometrie hinsichtlich Messsignal und Größe

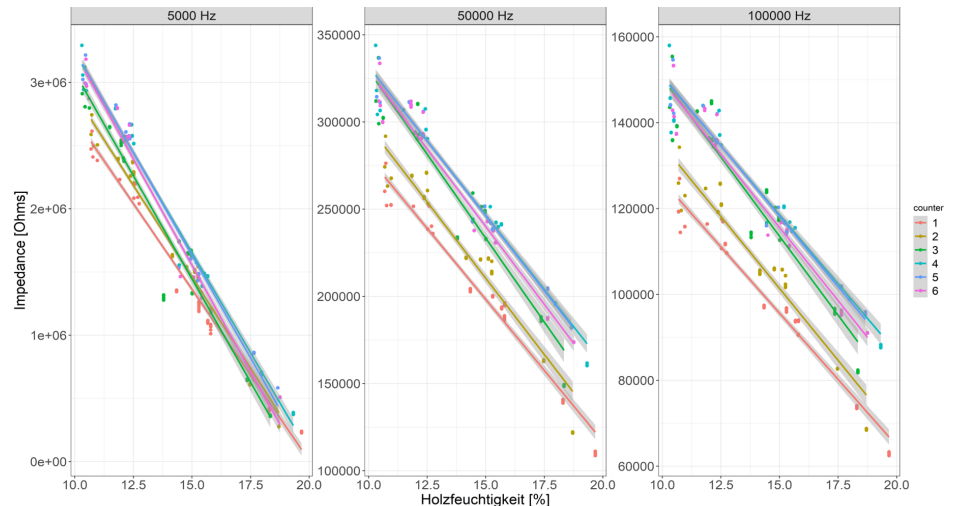


Abb. 16: Exemplarische Ergebnisse der Messung der Impedanz während des Klimakammerversuchs. Klar erkennbar ist die größere Steigung bei der geringsten Messfrequenz 5000 hz (Unterschiedliche Skalierung der y-Achse!).

4.3: Implementierung in Holzbauwerkstoffe

Grundidee:

Eine zentrale Idee des Projekts Mindwood war die Integration der Feuchtesensoren in die Klebefuge von Holzbauteilen wie Brettsperrholz (Abbildung 17) oder Brettschichtholz. Während die Holzfeuchtemessung an sich bereits bei der Entwicklung der Druckverfahren bestätigt wurde, war der Einfluss der Klebefestigkeit auf bedruckten Oberflächen noch unbekannt.

Aus diesem Grund wurden **Leimscherprüfungen** mit MUF und PU-Klebstoffen mit folgenden Vorbehandlungsvarianten durchgeführt:

- Klebefläche unbehandelt (Referenz)
- Klebefläche mit Grundierung
- Klebefläche mit Grundierung und 50% der Fläche mit Tinte bedruckt.
- Klebefläche mit Grundierung und 100% der Fläche mit Tinte bedruckt.

Folgende Ergebnisse wurden erhalten (Abbildung 18):

- Die Grundierung hat einen erheblichen -Einfluss auf die Leimscherfestigkeit (Reduktion um beinahe 50%)
- Der Einfluss der Tinte ist vergleichsweise gering.
- Diese Ergebnisse wurden sowohl bei MUF als auch bei PU-Klebstoffen erhalten

Fazit:

Nach derzeitigem Stand ist von der Verwendung einer Grundierung in belasteten Klebefugen abzuraten. Der Einfluss der Tinte auf die Klebefestigkeit ist noch nicht abschließend geklärt.



Abb. 17: Prinzipzeichnung der Integration von gedruckten Feuchtesensoren in die Klebefuge von Brettsperrholz

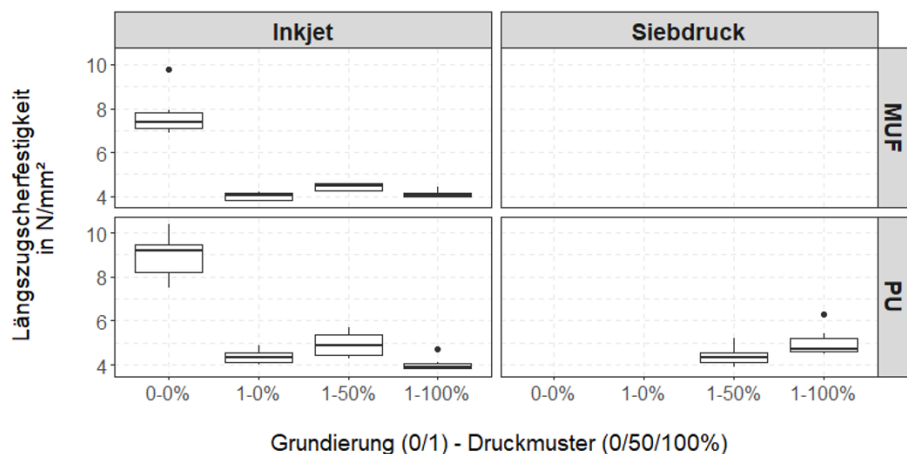


Abb. 18: Einfluss von Grundierung und Tinte auf die Leimscherfestigkeit

4.4: Implementierung in Holzbaukonstruktionen

Die gutachterliche Praxis an der Holzforschung Austria ergibt die mengemäßig häufigsten Schäden im Bereich der **Nasszelle** und des **Flachdaches**. Aus diesem Grund wurden zwei Demonstratoren hergestellt, die die potentielle Anwendung der entwickelten gedruckten Sensoren zeigt.

Demonstrator für Nasszelle/Fußbodenbereich

Für diesen Demonstrator (Abbildung 19) wurde der Sensor auf die Brettsperrholzoberfläche unterhalb des Fußbodenaufbaus gedruckt. Die Auswertelektronik befindet sich in der Brettsperrholzwand, die Kontaktierung und Verkabelung mit der Auswertelektronik befindet sich im Komprimierband am Wand-Decken-Anschluss. Die Sensordaten werden kabellos via Bluetooth an ein Empfangsgerät übertragen. Da die Bluetooth-Sendeleistung durch den Fußbodenaufbau reduziert ist, wurde die Auswertelektronik in der Brettsperrholzwand verbaut. Damit kann auch im Bedarfsfall die Elektronik einfach getauscht werden.

Demonstrator Flachdach

Im Bereich des Flachdaches ist die Kombination mit mehreren Sensorvarianten denkbar, die in einem Demonstrator umgesetzt wurden. In Abbildung 20 ist der schematische Aufbau des Demonstrators dargestellt. Verschiedene Sensoren sind an den folgenden Stellen angebracht:

- Über der zweiten Abdichtungsebene unter der Gefälledämmung ist ein **Feuchtigkeitssensor** des Projektpartners Fa. tagtron angebracht, der Wassereintritt detektiert.
- Unterhalb der Abdichtungsebene über der OSB-Platte befindet sich ein gedruckter Feuchtesensor, mit dem die **Holzfeuchtigkeit** der OSB-Platte bestimmt wird.
- Auf den Sparren in der Gefachdämmung ist ebenfalls ein gedruckter Feuchtesensor zur Bestimmung der Holzfeuchtigkeit angebracht.

Die verschiedenen Sensoren sind mittels Kabel zu einer Auswertelektronik verbunden. Die Kabelführungen erfolgen durch Butylmanschetten, um keine Feuchtekorridore durch die Verkabelung zu erzeugen. Die Auswertelektronik ist über eine Revisionsöffnung zugänglich.

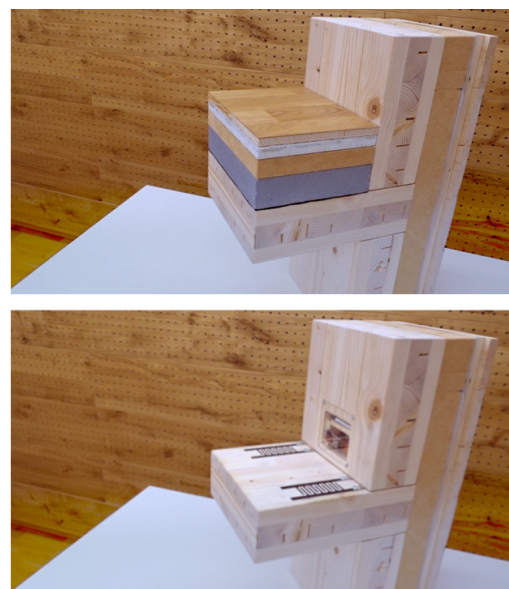


Abb. 19: Demonstrator mit gedruckten Feuchtesensoren auf einer Brettsperrholzdecke unter dem Fußbodenaufbau. Die Messelektronik befindet sich in der Brettsperrholzwand.

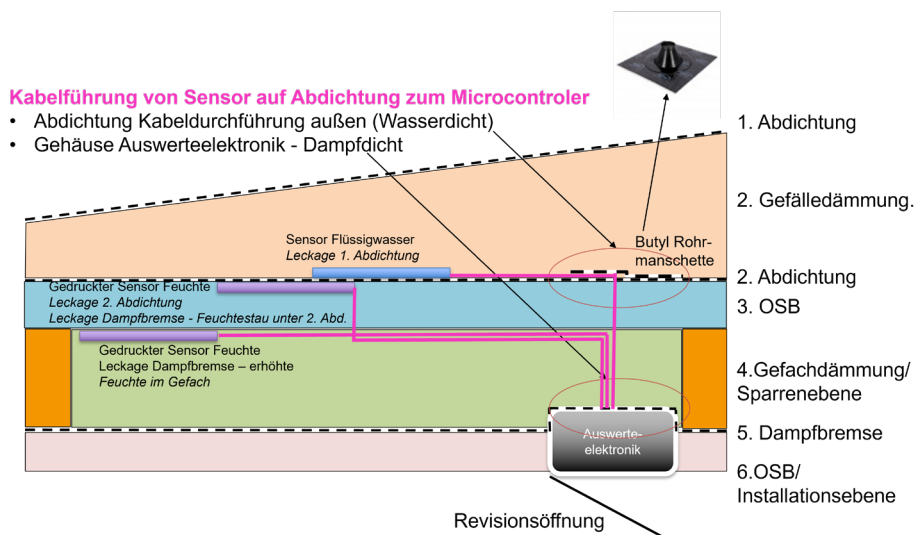


Abb 20: Schematischer Aufbau des Flachdachdemonstrators. In den unterschiedlichen Ebenen befinden sich verschiedene Sensorsysteme



Abb. 21: Umsetzung des Flachdachdemonstrators

In Abbildung 21 ist die Umsetzung des Demonstrators dargestellt. Unterhalb der 2. Abdichtungsebene ist das Feuchte-monitoringsystem des Projektpartners tagtron sichtbar. Die gedruckten Feuchtesensoren zu Bestimmung der Holzfeuchtigkeit wurden als 3D-gedruckte Sensoren ausgeführt, da der Druck auf OSB-Platten mittels Siebdruck schwierig ist. Mit diesem Demonstrator konnte erfolgreich ein Wassereintritt von außen durch das Flachdach demonstriert werden.

5: ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im dreijährigen Forschungsprojekt Mindwood wurden die Grundlagen für gedruckte Sensoren für den Holzbau entwickelt. Es wurden verschiedene Druckverfahren für die Anwendung auf der Baustelle sowie in der Produktion identifiziert. Ebenso konnten exemplarische Einbauszenarien entwickelt werden.

Die nächsten Schritte für die Zukunft sind die Erhöhung des Reifegrades der Entwicklung. Dies beinhaltet die Umsetzung der Sensoren in realen Konstruktionen und unter realen Bedingungen. Dies wird in aktuellen und zukünftigen Forschungsprojekten umgesetzt.

KONTAKT

Dr. Boris Forsthuber
 Bereichsleiter Oberfläche
 b.forsthuber@holzforschung.at
 Tel +43/1/798 26 23-20

Holzforschung Austria
 Franz-Grill-Straße 7
 A-1030 Wien
 www.holzforschung.at