

Abschlussbericht

Projekt: Eau-Tex - Entwicklung eines textilbasierten Sensorsystems zur Überwachung historischer Bausubstanzen und Kulturgüter

Aktenzeichen (AZ): 38875/01

Verfasser: Prof. Dr. Holger Erth
Textilausrüstung Pfand GmbH
08485 Lengenfeld

Projektlaufzeit: 13.07.2023 - 13.07.2025

Ort: Lengenfeld

Jahr: 2025

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhaltsverzeichnis

	Zusammenfassung	3
1	Anlass und Zielsetzung des Forschungsvorhabens	4
2	Vorgehen, Arbeitspakete und Meilensteine	5
3	Projektergebnisse	25
4	Zielerreichung und Schlussfolgerungen für die Praxis	26
5	Verwertung, Transfer und Verstetigung	28
6	Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation	29
7	Projektorganisation und Zusammenarbeit	32
8	Fazit und Ausblick	32
	Literaturverzeichnis	34

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Prinzip der Integration des Sensors	5
Abb. 2	Fächersensor Kamm - kapazitiv	11
Abb. 3	Kapazitiver Sensor für Fuge	11
Abb. 4	Resistiver Sensor	11
Abb. 5	Sensor für Unter-Putz-Variante	12
Abb. 6	Sensor wird in Fuge platziert	12
Abb. 7	Sensor im eingelegten Zustand	13
Abb. 8	Sensoren im eingebauten Zustand, verputzte Wand	13
Abb. 9 und 10	Ausrüstungsversuche in der Firma Pfand	15
Abb. 11 und 12	Installation der Messbox durch FiberCheck	16
Abb. 13	Anbringen der Sensoren durch Herrn Gehre in seinem Firmengebäude	19
Abb. 14 und 15	Installation der Messbox durch die Firma Fiber-Check	19
Abb. 16	Auslesen der Werte in Lengenfeld	20
Abb. 17	Rückbau in Hinterer Walkmühle	20
Abb. 18	Salzbefund im Kellerraum der Firma Gehre	21
Abb. 19 und 20	Demonstrationsobjekt in Hartmannsdorf	23
Abb. 21	Sensor	24
Abb. 22	Einbau der Sensoren	24
Abb. 23	Zustand der Sensorik in Versuchsobjekt Chemnitz	27
Abb. 24	Präsentation des Projektes Eau-Tex auf dem Messestand der Fa. Pfand zur TECHTEXTIL-Messe in Frankfurt/Main (Flyer links vorn im Ständer)	29
Abb. 25	Flyer für das Projekt Eau-Tex für die Messe Denkmal	30
Abb. 26	Herr Dr. Möhring im Versuchsobjekt Hintere Walkmühle am 16.10.2024	31

Abkürzungsverzeichnis

USB	Universal Serial Bus
CAN	Controller Area Network
WLAN	Wireless Lan
pF	Pikofarad
STFI	Sächsisches Textilforschungsinstitut
Abb.	Abbildung

Zusammenfassung

Das Ziel des Projektes Eau-Tex war die Entwicklung und Validierung eines innovativen, textilbasierten Sensorsystems, das eine frühzeitige Detektion von Feuchtigkeitseinträgen in historischen Mauerwerken ermöglicht und dadurch einen substanzerhaltenden Beitrag zum Denkmalschutz leistet. Hierzu wurden kapazitive und resistive Messprinzipien auf flexiblen, textilen Trägermaterialien kombiniert und gezielt in die Putzschicht von Bestandsgebäuden integriert. Die kontinuierliche Erfassung und Überwachung (Monitoring) der Feuchte erfolgte dabei über spezielle Messboxen, die eine fortlaufende Auslesung und Speicherung der relevanten Daten erlaubten. Die Installation und Inbetriebnahme der Sensorsysteme erfolgte im ersten Halbjahr 2024 an ausgewählten Versuchsobjekten, darunter die „Hintere Walkmühle“ in Lengenfeld sowie ein denkmalgeschütztes Firmengebäude der Ivo Gehre Akustik & Trockenbau GmbH in Chemnitz. Die initialen Messungen zeigten, dass die erfassten Feuchtwerte im erwarteten Bereich lagen und in den Beobachtungszeiträumen der Quartale 04–10/2024 keine signifikanten Schwankungen oder Anstiege festzustellen waren. Als Demonstrationsobjekt fungierte ein denkmalgeschütztes Gebäude in Hartmannsdorf bei Chemnitz.

Das Projekt leistet einen wesentlichen Beitrag zur Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit im Bauwesen, da durch die frühzeitige Detektion potenzieller Feuchteschäden kostenintensive und ressourcenaufwendige Folgesanierungen vermieden werden können. Insbesondere im Bereich des Denkmalschutzes, wo invasive Eingriffe und Materialverluste zu vermeiden sind, bietet das entwickelte Sensorsystem einen erheblichen Mehrwert. Die kontinuierliche Überwachung ermöglicht es, Feuchteproblematiken bereits in einem sehr frühen Stadium zu erkennen und gezielt präventive Maßnahmen einzuleiten. Darüber hinaus trägt die Integration textilbasierter Sensorik dazu bei, bestehende Lücken konventioneller,

punktuellem oder invasivem Messverfahren zu schließen und das Monitoring langfristig und zerstörungsfrei zu gestalten.

Im weiteren Verlauf des Projektes war die Validierung der Sensorsysteme unter realen Einsatzbedingungen vorgesehen, um deren Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit zu evaluieren. Hierzu wurden die gesammelten Messdaten systematisch analysiert und mit etablierten Referenzverfahren verglichen. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in die Optimierung der Sensorik und der Auswertungsalgorithmen einfließen, um eine breite Anwendbarkeit im Bereich des Bauwerksmonitorings und Denkmalschutzes zu ermöglichen. Das Projekt Eau-Tex adressiert somit nicht nur aktuelle Herausforderungen im Feuchtemonitoring historischer Bauwerke, sondern liefert auch einen wissenschaftlich fundierten Beitrag zur nachhaltigen Erhaltung wertvoller Bausubstanz.

1 Anlass und Zielsetzung des Forschungsvorhabens

Kulturgüter sind wichtig, weil sie uns Einblicke in die Vergangenheit, die Kultur und die Identität einer Gesellschaft geben. Sie sind Zeugnisse der schöpferischen Leistungen und der kulturellen Entwicklung von Generationen, der Bewahrung des kulturellen Erbes einer Region und tragen zur Bildung und kulturellen Erziehung bei. Der Zustand eines Kulturerbes ist von entscheidender Bedeutung für seine Erhaltung und Nutzung. Ein Gebäude in schlechtem Zustand ist nicht nutzbar und kann eine Gefahr für die Öffentlichkeit darstellen.

Die meisten Schäden an Bauwerken entstehen durch die Einwirkung von Wasser, insbesondere in Außen- und Innenwänden, Dächern und deren Konstruktionen, Geschossdecken, Kellern und Erdgeschossen.

Diese feuchtebedingten Schäden gehören zu den zentralen Herausforderungen beim Erhalt historischer Bauwerke. Gerade in denkmalgeschützten Gebäuden führen unerkanntes Wasser und Feuchte zu Substanzverlusten, mikrobieller Belastung, insbesondere Schimmel- und Pilzbildung und Beeinträchtigungen der baulichen Stabilität, wie beispielsweise durch Fäulnis von Holz, Korrosion von Metallteilen oder Salzausblühungen sowie Farb- und Putzabplatzungen. Die frühzeitige Erkennung dieser Problematik ist entscheidend, um gezielte, präventive Maßnahmen einzuleiten und die Bauwerksqualität nachhaltig zu sichern.

Konventionelle Messverfahren - insbesondere punktuelle oder invasive Methoden - sind oft ungeeignet für historische Bausubstanz. Sie liefern entweder nur Momentaufnahmen oder erfordern Eingriffe, die zu irreversiblen Schäden führen können. Vor diesem Hintergrund entstand im Projekt Eau-Tex ein innovatives Sensorsystem auf textiler Basis. Es vereint kapazitive und resistive Messverfahren auf flexiblen Trägermaterialien und wird gezielt unterhalb der Putzschicht integriert.

Dadurch lässt sich die Feuchte kontinuierlich und flächendeckend erfassen, ohne die Bausubstanz zu beeinträchtigen.

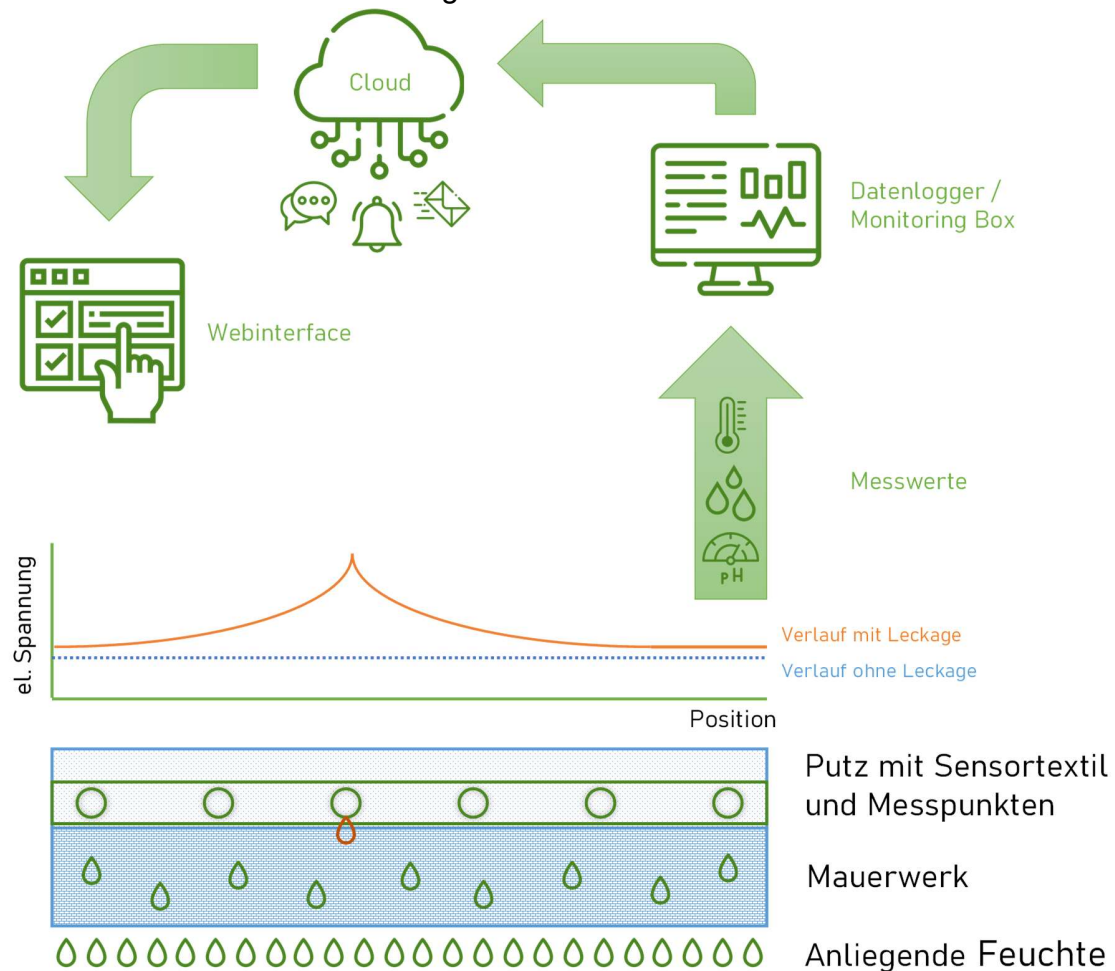


Abb. 1: Prinzip der Integration des Sensors

Das Forschungsvorhaben wurde wissenschaftlich durch einen Projektbeirat intensiv begleitet. Dabei fanden mit den Beiratsmitgliedern Frau Dr. Heike Illing-Günther (STFI e.V.), Herr Dr. Michael Auras (ehemals Institut für Steinkonservierung e.V.) und Herr Dr. Uwe Möhring (Innovent e.V.) mehrere Treffen online bzw. vor Ort statt.

2 Vorgehen, Arbeitspakete und Meilensteine

Das Vorhaben Eau-Tex wurde als mehrstufiges Entwicklungs- und Validierungsprojekt durchgeführt, dessen Ziel die unterputzige Erfassung von Feuchteinträgen in Mauerwerk mittels textilbasierter Sensorik war.

Es umfasste eine Laufzeit von 24 Monaten und gliederte sich in 8 Arbeitspakete. Begleitet wurden die Arbeiten von zwei Meilensteinen.

Die beiden Vorhabenpartner, Ivo Gehre Akustik & Trockenbau GmbH und Textilausrüstung Pfand GmbH, waren an jedem Arbeitspaket beteiligt.

Arbeitspaket 1: Recherche und Lastenheft

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

Als Ausgangsbasis stellte der Projektpartner Ivo Gehre Akustik und Trockenbau GmbH den Stand der Technik beim Detektieren von Feuchtigkeit in Mauerwerken vor. Bisher müssen Löcher in die Wand gebohrt und ein Stab eingeführt werden, um die Feuchtigkeit festzustellen und zu messen. Dieses Vorgehen ist jedoch eine Momentaufnahme und ergibt keine kontinuierlichen Messwerte. Bei alten Gebäuden dringt oftmals Feuchtigkeit von außen ein, die bisher nur beseitigt werden konnte, indem um das Gebäude herum ausgegraben wird.

In der Diskussion wurden zunächst 2 Anwendungsfälle herausgearbeitet:

- sanierte Gebäude
- unsanierte Gebäude

Diese Anwendungen weisen unterschiedliche Anforderungen, insbesondere im Hinblick auf die Anbringung der Sensoren, auf.

In sanierten Gebäuden hat der Bauherr bzw. Eigentümer des Kulturdenkmals ein großes Interesse daran, dass die Feuchtemessung mit möglichst geringem Eingriff in die Bausubstanz erfolgt. Dahingegen besteht bei noch unsanierten Bauwerken mehr Handlungsfreiheit, um auf verschiedene Art und Weise Feuchtigkeit in der Bausubstanz detektieren zu können.

Außerdem sind die kritischsten, von Feuchtigkeit gefährdeten Stellen eines Mauerwerkes identifiziert worden. Sie befinden sich in den Ecken, da es dort am kältesten ist. Überdies existieren jahreszeitliche Unterschiede bei der Feuchtebelastung. Die Höhe der Abweichungen zwischen Winter- und Sommermonaten galt es herauszufinden.

Für beide Anwendungsszenarien konnten erste Gestaltungsvarianten, insbesondere auch im Hinblick auf das Versuchsobjekt Hintere Walkmühle, entwickelt werden:

- Anbringung in Fuge (empfehlenswert für saniertes Mauerwerk)
- Anbringung unter Putz in der Fläche (unsaniertes Mauerwerk)

Es erfolgte des Weiteren eine erste konkrete Planung des Vorgehens und der Verantwortlichkeiten der Vorhabenpartner.

Arbeitspaket 2: Entwicklung Feuchtemesssystem

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

In diesem Arbeitspaket ist zunächst eine relevante Norm identifiziert worden. Die DIN 4108 „Wärmeschutz und Energie-Einsparung in Gebäuden“ legt unter anderem fest, ab wann eine Wand als feucht gilt. Die Grenze, ab wann Feuchteschäden mit nachfolgender Schimmelbildung auftreten, liegt bei ca. 80 % der Feuchte der Raumluft. Für Wohnräume besteht Schimmelgefahr ab einer Luftfeuchtigkeit von 70 Prozent. [1] Außerdem gibt es auf einzelne in der Wand vorhandene Baustoffe bezogene Feuchtigkeiten, deren massebezogener Wassergehalt in Prozent angegeben wird [2].

Weiterhin fand die Begehung des Versuchsobjektes „Hintere Walkmühle“ statt, um eine erste Ist-Stands-Analyse des Mauerwerks in verschiedenen Räumen vorzunehmen. Das Gebäude stammt aus dem Jahr 1831, gehörte zur Filzfabrik Christian Heinrich Thomas und beherbergte eine Filzwalkerei und Zwirnerei. Es beinhaltet heute die Pumpstation für Brunnenwasser und Lagerräume für die Firma Pfand. Die Wände im Versuchsobjekt bestehen aus verputzten Ziegeln. Dabei musste auch ein geeigneter Raum für die Durchführung erster Messungen ausgewählt werden. Es wurde sich für einen Raum im Obergeschoss der Hintere Walkmühle entschieden, der relativ trocken ist, um zunächst einen Referenzwert für einen trockenen Raum zu erhalten. Außerdem waren die Feuchtigkeitswerte des Mörtels, der für das Verputzen vorgesehen wurde, noch nicht bekannt.

Der Projektpartner Gehre schlug vor, zusätzliche vergleichende Messungen in seinem Firmengebäude, welches im 17. Jahrhundert gebaut wurde und heute unter Denkmalschutz steht, vorzunehmen. Dieses Gebäude hat insbesondere feuchte Kellerräume und besteht aus Bruchsteinen. Der Vergleich beider Gebäude mit ihren unterschiedlichen Baumaterialien sollte somit zeigen, ob und in welchem Maß ein Einfluss der Materialart auf die Feuchtigkeitsentwicklung besteht.

Unter Berücksichtigung der möglichen jahreszeitlichen Unterschiede ist der zu messende Zyklus für 12 Monate festgelegt worden.

Zunächst sollten verschiedene gestickte Sensoren, die das Stickereiunternehmen Modespitze Plauen GmbH zur Verfügung stellte, getestet werden. Geplant war die Realisierung erster Messpunkte im Versuchsobjekt im Dezember 2023. Der anvisierte Termin musste jedoch verschoben werden, da zu dieser Zeit im Vogtland

extrem strenger Dauerfrost herrschte und aufgrund der ungeheizten Räume in der Hintere Walkmühle ein Anbringen und insbesondere Verputzen der Sensoren nicht möglich gewesen wäre.

Der neue Termin der Installation erster textiler Sensoren erfolgte Anfang Januar 2024.

Zum einen war eine Messung an der Wand mit einem Handgerät durch die Firma Gehre vorgesehen, um den Übergang zwischen Wandinnerem und Wandäußere zu ermitteln. Zum anderen sollten mittels kapazitiver Messungen über die textilen Sensoren Messwerte erzeugt und ausgewertet werden. Arbeiten zur Entwicklung des Messsystems und intelligenter Datenauswertung fanden begleitend statt.

Entwicklung Messsystems zur Überwachung der Feuchtigkeit im Raum

Als Messsysteme sollten kapazitive Messungen und resistive Messungen fungieren:

1. **Kapazitive Feuchtemessung:** Dieses Verfahren basiert auf dem Prinzip eines Kondensators, bei dem die Kapazität durch die Feuchtigkeit im Material beeinflusst wird. Die Kapazität eines Kondensators ändert sich in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit, da Wasser eine hohe relative Permittivität hat.
2. **Widerstandsmessung / resistive Messung:** Hierbei wird der elektrische Widerstand des Materials gemessen. Feuchtes Material leitet Strom besser als trockenes, wodurch der Widerstand sinkt, wenn die Feuchtigkeit steigt.

Entwicklung einer Schnittstelle und Auswerteeinheit

Schnittstellenentwicklung: Die Implementierung einer Schnittstelle zur Datenübertragung ist ein wesentlicher Bestandteil des Sensorsystems. Schnittstellen ermöglichen den elektronischen Datenaustausch zwischen den Sensoren und der Auswerteeinheit. Zu den gängigen Schnittstellen gehören USB, RS-232, CAN und drahtlose Verbindungen wie Bluetooth und WLAN. Diese Schnittstellen wurden sorgfältig ausgewählt und implementiert, um eine zuverlässige und schnelle Datenübertragung zu gewährleisten.

Datenlogging: Ein Datenlogger ist eine prozessorgesteuerte Speichereinheit, die Daten in einem bestimmten Rhythmus über eine Schnittstelle aufnimmt und auf einem Speichermedium ablegt. Die Besonderheiten des Datenloggings umfassen die Konfiguration der Messintervalle, die Auswahl geeigneter Speichermedien und die Sicherstellung der Datenintegrität. Die Datenaufnahme erfolgt entweder in festen zeitlichen Abständen oder bei der Erzeugung neuer Daten. Dies ermöglichte eine kontinuierliche Überwachung und Aufzeichnung der Feuchtigkeitswerte.

Auswerteeinheit: Die Auswerteeinheit zur Analyse der gesammelten Daten spielt eine entscheidende Rolle bei der Interpretation der Messwerte. Diese Einheit verwendet statistische Methoden und Algorithmen, um die Rohdaten zu analysieren und aussagekräftige Informationen abzuleiten. Die Auswerteeinheit wurde so konzipiert, dass sie Muster, Trends und Korrelationen in den Daten erkennen kann. Dies ermöglicht eine präzise Überwachung der Feuchtigkeit und die Identifikation potenzieller Problemstellen.

Erstellung geeigneter Ausleseroutinen: Die Erstellung geeigneter Ausleseroutinen ist ein weiterer wichtiger Schritt. Diese Routinen sorgen dafür, dass die gesammelten Daten effizient und fehlerfrei ausgelesen und verarbeitet werden können. Dabei wurden robuste und fehlertolerante Algorithmen entwickelt, um die Datenintegrität zu gewährleisten und mögliche Fehlerquellen zu minimieren. Die Ausleseroutinen wurden umfassend getestet und optimiert, um eine zuverlässige Datenverarbeitung sicherzustellen.

Durch die Kombination dieser technischen Ansätze und die sorgfältige Kalibrierung der Sensoren konnte ein robustes und zuverlässiges Feuchtemesssystem entwickelt werden, das den Anforderungen des Projekts gerecht wurde und eine präzise Überwachung der Feuchtigkeit in den Demonstrationsobjekten ermöglichte.

Der Meilenstein 1: „Konzept des textilbasierten Sensorsystems / Fertigstellung 1. Versuchsmuster“ wurde planmäßig erreicht; die Ergebnisse sind im Projektgremium vorgestellt worden.

Arbeitspaket 3: Auswahl des Textils, der Elektrodenmaterialien und Fertigungsverfahren, Putzauswahl

und

Arbeitspaket 4: Herstellung des Versuchsmusters

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

Diese Arbeitspakete werden gemeinsam beschrieben, da sie aufeinander aufbauen und miteinander verbunden sind.

Als Trägermaterial für die textilen Sensoren wurde ein Gewebe aus 100 % Viskose ausgewählt. Der Vorteil gegenüber anderen textilen Flächengebilden, z.B. Gestri-

cken, liegt in der Robustheit, geringen Dehnbarkeit, der relativ dichten, geschlossenen Warenoberfläche und guten Bestickbarkeit.

Diskutiert wurde auch die Verwendung eines Wirrvlieses, da dies eine kostengünstige Variante gewesen wäre. Jedoch überwiegen hier die Nachteile, die in einer erschwerten Bestickbarkeit liegen. Dies würde sich dann in Stichfehlern und Herausziehen der Fäden zeigen.

Zunächst wurde unausgerüstetes textiles Trägermaterial für die Anbringung der Sensoren eingesetzt, um später auch einen Vergleich mit ausgerüstetem Material durchführen zu können.

Entwicklung der Sensoren

Die Entwicklung der Sensoren für das Feuchtemesssystem umfasste mehrere technische Schritte und Überlegungen, um ein zuverlässiges und präzises Messsystem zu gewährleisten. Zunächst wurden verschiedene Messprinzipien untersucht und getestet, um die geeignetste Methode zur Feuchtigkeitsüberwachung zu identifizieren. Zu den getesteten Messprinzipien gehörten die resistive Feuchtemessung und die kapazitive Feuchtemessung mittels Fächersensor.

Resistiver Feuchtesensor: Ein resistiver Feuchtesensor misst die Feuchtigkeit durch den Widerstandsunterschied eines Materials, das auf die umgebende Feuchtigkeit reagiert. Die meisten dieser Sensoren bestehen aus einem porösen Material, das auf Veränderungen der Umgebungsfeuchtigkeit anspricht. Wenn die Feuchtigkeit in der Umgebung steigt, nimmt auch die Menge an Wassermolekülen im porösen Material zu, was zu einer Verringerung des elektrischen Widerstands führt. Bei einem Rückgang der Feuchtigkeit steigt der Widerstand entsprechend wieder an. Diese Sensoren sind aufgrund ihrer einfachen Bauweise, langen Lebensdauer und schnellen Reaktion besonders beliebt. Als elektrischer Leiter fungiert ein isolierter Kupferlackdraht.

Kapazitiver Feuchtesensor (Fächersensor): Ein kapazitiver Feuchtesensor, wie der Fächersensor, basiert auf dem Funktionsprinzip eines Kondensators. Ein Kondensator baut bei angelegter Spannung ein elektrisches Feld zwischen zwei Kondensatorplatten auf. Die Kapazität des Kondensators ändert sich in Abhängigkeit von der Feuchtigkeit im Material, da Wasser eine hohe relative Permittivität hat. Der Fächersensor nutzt diese Eigenschaft, um Feuchtigkeitsänderungen zu detektieren. Die hohe Differenz der Permittivität zwischen Wasser und anderen Materialien ermöglicht es, den Wasseranteil im Messmedium präzise zu bestimmen. In unserem Anwendungsfall kommen unisolierte, unbeschichtete Kupferdrähte zum Einsatz.

Die Modespitze Plauen GmbH hatte verschiedene Dessins umgesetzt (s. Abb. 2-4).

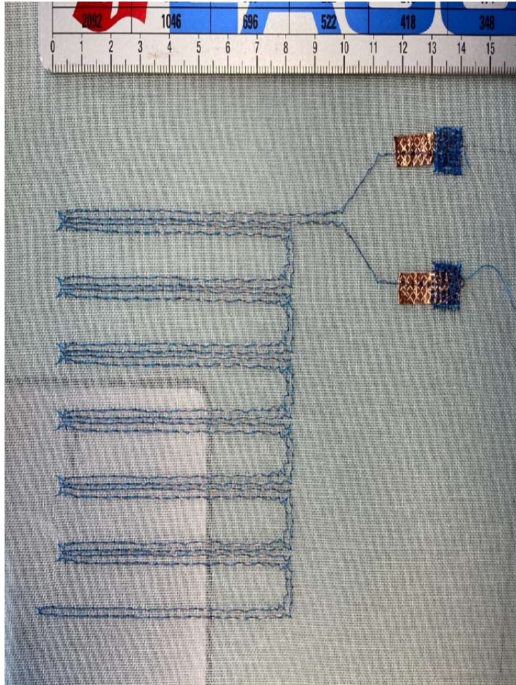


Abb. 2: Fächersensor Kamm - kapazitiv

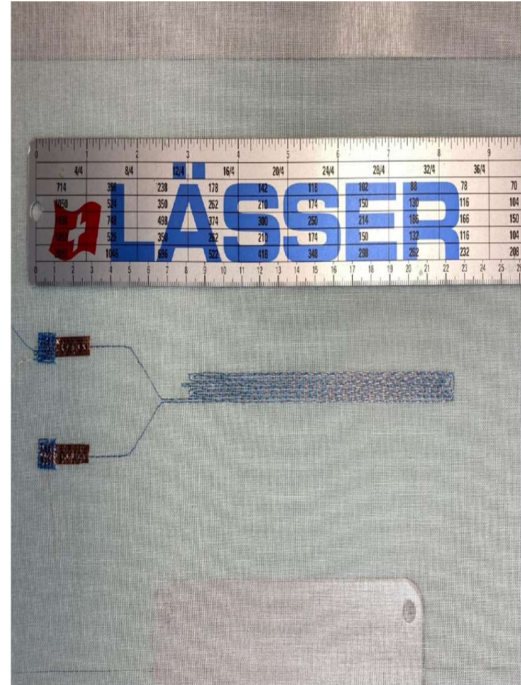


Abb. 3: Kapazitiver Sensor für Fuge

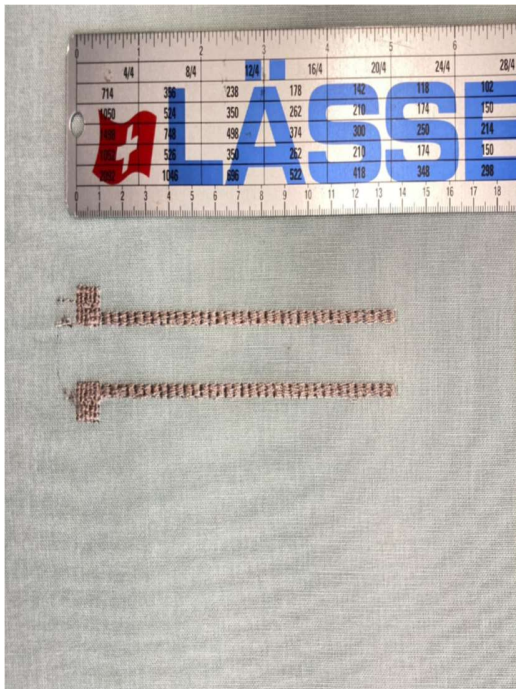


Abb. 4: Resistiver Sensor

Der Projektpartner Gehre bereitete eine Wand im Obergeschoss der Hinteren Walkmühle entsprechend vor, um anschließend die textilen Sensoren an drei Messpunkten einzubringen. Für das Anbringen der textilen Sensoren wurde eine Kalkglätte von Maxit gewählt (Maxit 178). Diese ist für den Innenraum geeignet und auf Kalkbasis mit einer alkalischen Wirkung. Dadurch hat dieser Putz gute feuchteresistente Eigenschaften. Er ist diffusionsoffen und gewährleistet eine gute Rücktrocknung der Wand und kann später weiterbehandelt und geglättet werden. Ein eventuell einfacher zu verarbeitender Gipsputz hätte in Berührung mit Feuchtigkeit die Neigung zu schimmeln und wäre für das geplante Einsatzgebiet somit ungeeignet. Sollten aufgrund von Feuchtigkeit Salzausblühungen zu erwarten sein, müsste auch die gewählte Kalkglätte speziell mit dessen Hersteller abgestimmt werden.

Sensor 1 und 3 wurden unter Putz (Abb. 5 und 8), Sensor 2 in einer Fuge eingefügt (s. Abb. 6 und 7).



Abb. 5: Sensor für Unter-Putz-Variante



Abb. 6: Sensor wird in Fuge platziert



Abb. 7: Sensor im eingelegten Zustand

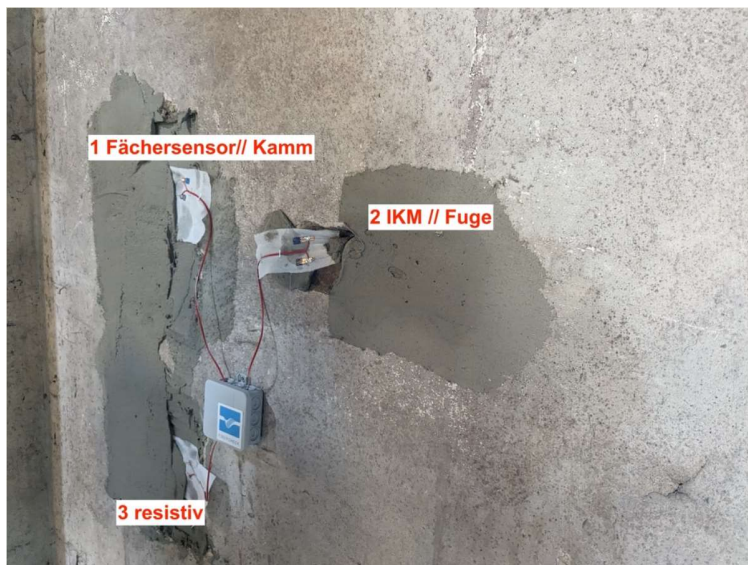


Abb. 8: Sensoren im eingebauten Zustand, verputzte Wand

Zunächst wurden die Sensoren jedoch oberflächlich auf die feuchten Stellen aufgebracht, um eine erste Datenerfassung zu ermöglichen. Dabei wurden die verschiedenen Messprinzipien getestet, um die besten Ergebnisse zu erzielen und die Messwerte auf Plausibilität zu überprüfen. Somit sollte sichergestellt werden, dass die Sensoren zuverlässig arbeiten.

Die Firma Pfand führte im Rahmen dieser Arbeitspakete erste Versuche zu Funktionalisierungen durch. Anforderungen an die textilen Materialschichten der Sensoren konnten bereits herausgearbeitet werden. Diese bestehen in der Langlebigkeit, Haltbarkeit und Beständigkeit der Textilien unter verschiedenen klimatischen Bedingungen.

Um diese Ansprüche realisieren zu können, waren verschiedene Versuche zu Funktionalisierungen im Projektkonsortium festgelegt worden. Zunächst wurden folgende Versuche zu Funktionalisierungen umgesetzt:

- fungizide Ausrüstung
- wasser- und ölabweisende Ausrüstung
- Versteifung des Gewebes (verschiedene Abstufungen)

Das Grundmaterial, bestehend aus 100 % Viskose, wurde als Rohware von der Fa. Modespitze bereitgestellt.

Im Folgenden soll zunächst der Ausrüstungsprozess im Allgemeinen erläutert werden.

Die nasschemische Ausrüstung in der Firma Pfand basiert auf einem kontinuierlichen Verfahren, der Vollbadimprägnierung. Die jeweils einzusetzenden Chemikalien sind im Trog des Foulards enthalten, durch den die Textilien kontinuierlich und vollständig durchgefahren werden (Abbildung 9). Ein auf Liniendruck einstellbares Walzenpaar reguliert anschließend durch Abquetschen die Menge der Chemikalienflottenaufnahme im Textil. In der Spann-, Trocken-, Fixiermaschine werden die aus dem Foulard kommenden Textilien in Warenlängs- und Querrichtung ausgespannt, fixiert und thermisch getrocknet (Abbildung 10). Gleichzeitig erfolgt die An- bzw. Einlagerung der Chemikalien auf den textilen Flächengebilden.

Durch Einstellungsversuche müssen die jeweils geeigneten Maschinenparameter, wie beispielsweise Temperatursteuerungen der separat voneinander zu regelnden 12 Heizhalbfelder der Spann-, Trocken- und Fixieranlage, Liniendruck am Foulard und Verweilzeiten ermittelt werden. Außerdem gilt es, die nötige Chemikalieneinsatzmenge zu bestimmen, um die Ausprägung der Funktionalisierungen realisieren zu können. Hierbei gilt, die Balance zu finden, so viel Chemikalien wie nötig einzusetzen, aber auch so wenig wie möglich.



Abb. 9 und 10: Ausrüstungsversuche in der Firma Pfand,
links: Wareneinlauf im Chemikalienfoulard rechts: vor den Heizfeldern

Die Ausrüstungsversuche verliefen erfolgreich. Das fungizid ausgerüstete Muster-gewebe wurde an das Prüflabor des Chemikalienherstellers gesandt. Dieser er-mittelte die fungizide Wirksamkeit nach DIN EN 14119 – Verf. B2 gegenüber den Testkeimen *Aspergillus niger* und *Chaetomium globosum*. Bei beiden Keimen konnte bezüglich des Pilzwachstums die Note 0 im sichtbaren Bereich erreicht werden. 0 bedeutet „unter dem Mikroskop (50fache Vergrößerung) kein Wachstum ersichtlich“. Es wurde somit eine gute antimikrobielle Wirksamkeit nachgewiesen, die auch durch die Beobachtung einer jeweils 11 mm großen Hemmzone bestätigt werden konnte.

Arbeitspaket 5: Erster Feldversuch im Versuchsobjekt

Am 12.04.2024 erfolgte die Begutachtung der Wand mit den integrierten Sensoren. Der aufgebrachte Putz war gut abgetrocknet. Durch die fachliche Unterstützung der Firma FiberCheck GmbH konnte nun eine Messbox installiert werden

Die Montage vor Ort erfolgte ohne Komplikationen. Beide Messeinheiten sowie ein Akku wurden in einem Schaltschrank installiert und verkabelt. (s. Abb. 11 und 12).



Abb. 11 und 12: Installation der Messbox durch FiberCheck

Initial und einbaubegleitend wurden die kapazitiven Messwerte bei verschiedenen Frequenzen aufgenommen, um hier eine (eventuelle) Frequenzabhängigkeit zu erkennen. Deutlich zu erkennen war die bessere Messwertauflösung bei geringeren Frequenzen, so dass eine Messung im unteren Frequenzbereich gewählt wurde. Ein entsprechendes Messverfahren ist die Auflademethode, welche hier auch zum Einsatz kommt.

Auflademethode

Die Sensoren werden durch die Messelektronik komplett aufgeladen und anschließend wieder entladen. Die benötigte Entlade-Zeit wird hierbei gemessen. Mit Hilfe eines Widerstandes und der gemessenen Entlade-Zeit kann anschließend der Kapazitätswert berechnet. Hierfür wurde, mithilfe der zuvor gemessenen Kapazitäten ein Erwartungswert für den Nasszustand festgelegt.

Erwarteter Messbereich:

Trocken = ca. 320 pF

Nass = ca. 4-5 nF = 4000 - 5000 pF

Sobald die gemessene Kapazität >5100 pF entspricht, wird der Vollausschlag an die eigentliche (TexMess-)Messbox zur Messwertspeicherung weitergegeben.

Zur Referenz wurden verschiedene Kondensatoren gemessen und die dazu ausgegebene Spannung aufgenommen. Die Kalibrierungsschritte (Kondensator-

reihe, Spannungs-/Digits-Kurven, Gegenmessung) bestätigten die Reproduzierbarkeit der Kanäle und die Störfestigkeit der Datenpfade.

In einer Projektberatung im letzten Berichtszeitraum wurde über den zu messenden Zyklus intensiv diskutiert. Unter Berücksichtigung des möglichen Einflusses der unterschiedlichen jahreszeitlichen Bedingungen ist eine Messung über 12 Monate festgelegt worden. Diese Langzeitmessungen könnten auch zur Validität der Messergebnisse beitragen.

Die fortlaufende Messung erfolgt über spezielle Messboxen, die die relevanten Daten kontinuierlich auslesen und speichern. Das Auslesen erfolgte zum ersten Mal am 03.07.2024. Die gesammelten Messdaten wurden umfassend analysiert, um die Leistung und Genauigkeit der Sensoren zu bewerten. Die Messwerte lagen im erwarteten Bereich, wobei die Kapazität der kapazitiven Sensoren mit etwa 190 pF bestimmt wurde. Diese Werte spiegeln die Messungen aus den Vorversuchen und beim Einbau wider, bei denen Kapazitätswerte im Bereich von 210-260 pF ermittelt wurden. Im ersten Messquartal (April bis Juni 2024) erfassten die kapazitiven Sensoren keine signifikanten Feuchteänderungen, was auf eine stabile Feuchtigkeitssituation hinweist. Jedoch ist die Kapazitätsänderung zwischen den Elektroden zu gering, um differenzierte Messwerte aufnehmen zu können.

Die Messwerte des resistiven Sensors wurden auf 100 normiert, da im Eau-Tex-Projekt andere Sensoren als die klassischen TexMessSensoren verwendet wurden. Werte, die sich dem Nullpunkt näherten, deuteten auf einen Feuchtigkeitseintrag hin, während Werte über 100 auf eine weitere Abtrocknung hinwiesen. Insgesamt bestand keine gravierende Feuchteänderung, was auf eine stabile Umgebung hinweist.

Die Ergebnisse bestätigen das Funktionieren der Messungen, wobei, wie dargestellt, Unterschiede zwischen den Sensorarten auftraten. Beim Vergleich des Einsatzes beider Sensorarten zeigt sich, dass das Wandklima einen größeren Einfluss auf den ohmschen Widerstand als auf die Kapazität hat. Deshalb wurde beschlossen, sich zunächst für weitere Installationen von textilen Sensoren auf resistive Messungen zu konzentrieren. Dafür spricht auch eine einfachere Verfügbarkeit von Elektronik und damit leichtere Umsetzbarkeit. Es besteht außerdem bei resistiven Sensoren keine Abhängigkeit von Messfrequenzen. Um kapazitive Sensoren zielgerichtet im Anwendungsfall einsetzen zu können, wären noch weitere Entwicklungsarbeiten auf Sensorseite notwendig.

Im weiteren Projektverlauf wird das Sensorsystem unter realen Bedingungen validiert, um Langzeitstabilität, Zuverlässigkeit und Praxistauglichkeit zu prüfen. Dafür

werden die gesammelten Messdaten systematisch ausgewertet und mit etablierten Referenzverfahren verglichen. Die Erkenntnisse fließen in die Optimierung der Sensorik und der Algorithmen ein, um die breite Anwendung im Bauwerksmonitoring und Denkmalschutz zu ermöglichen. Das Projekt Eau-TeX leistet somit einen wissenschaftlich fundierten Beitrag sowohl zur Lösung aktueller Herausforderungen im Feuchtemonitoring als auch zur nachhaltigen Erhaltung wertvoller Bausubstanz.

Aufgrund des Vorschlages des Projektpartners Herrn Gehre wurden textile Sensoren in seinem Firmengebäude, welches im 17. Jahrhundert gebaut wurde und heute unter Denkmalschutz steht, angebracht. Dieses Gebäude hat insbesondere feuchte Kellerräume und besteht aus Bruchsteinen. Der Vergleich dieses Mauerwerks mit der Hinteren Walkmühle wird zeigen, ob und in welchem Maß ein Einfluss der Baumaterialart auf die Feuchtigkeitsentwicklung besteht. In der Hinteren Walkmühle war ein Raum im Obergeschoss ausgewählt worden, der relativ trocken ist, um zunächst einen Referenzwert für einen trockenen Raum zu erhalten. In diesem zweiten Versuchsobjekt ist durch FiberCheck gleichzeitig eine Messbox installiert worden. Die textilen Sensoren, die auf den in der Firma Pfand funktionalisierten Grundmaterial, bestehend aus 100 % Viskose, aufgestickt worden waren, kamen zur Anwendung.

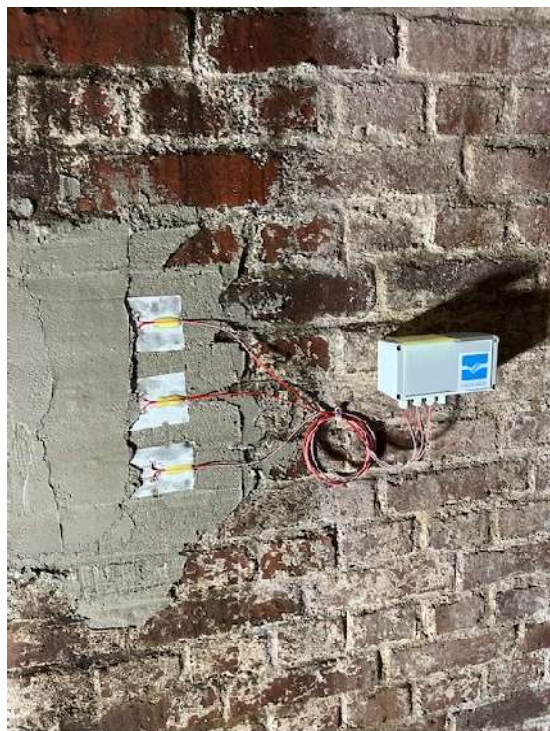
Hierbei können die funktionalisierten Textilien wie folgt unterschieden werden:

- der obere Sensor ist auf dem stärker versteiften Textil aufgestickt
- der mittlere Sensor ist auf dem leicht versteiften Textil aufgestickt
- der untere Sensor ist auf dem Textil mit der fungiziden (Antischimmel) Ausrüstung aufgestickt.

Nach Begutachtung der Beschaffenheit des Mauerwerkes wurde sich im Projektkonsortium entschieden, die Sensoren nur unter Putz anzubringen (siehe Abbildung 13). Ein Einbringen in eine Fuge wäre mit erheblichem Aufwand und einer Zerstörung des aufgrund seiner Härte und Robustheit anspruchsvollen Klinker-mauerwerks verbunden gewesen.



Abb. 13: Anbringen der Sensoren durch Herrn Gehre in seinem Firmengebäude



Abbildungen 14 und 15: Installation der Messbox durch die Fa. FiberCheck

Beim Auslesen der Messbox in der Hinteren Walkmühle durch die Firma Fiber-Check (s. Abbildung 16) wurde festgestellt, dass die Messwerte im erwarteten Be-

reich lagen. Die Kapazität wurde mit ca. 190 pF bestimmt. Dies entsprach den Messungen aus den Vorversuchen bzw. beim Einbau. Dort wurden für die kapazitiven Sensoren Werte im Bereich von 210-260 pF ermittelt. Im zweiten Messquartal bis Oktober 2024 wurde seitens der kapazitiven Sensoren keine Veränderung gegenüber dem ersten Messquartal festgestellt. Die weiterhin stabilen Messwerte lassen auf einen trockenen Zustand der Wand schließen. Der resistive Sensor zeigte den ähnlichen Verlauf. Die Messwerte vom resistiven Sensor wurden auf 100 normiert, da in Eau-Tex andere Sensoren als die klassischen TexMessSensoren verwendet wurden. Der Null nähernde Werte lassen eine Feuchtigkeitseintrag schließen, Werte über 100 eine weitere Abtrocknung. Es bestand demnach keine gravierende Feuchteänderung, da sich der Wert nur unmerklich und damit nicht signifikant veränderte. Die aufgetretenen kleinen Schwankungen werden beim resistiven Verfahren als normal beurteilt.

Da sich nach diesen beiden Messquartalen nur geringfügige Veränderungen des Feuchtezustandes im Mauerwerk zeigten, wurde im Projektkonsortium entschieden, das es zielführender ist, sich weiterhin auf die Messungen im Firmengebäude von Herrn Gehre zu konzentrieren und die Messbox in der Hinteren Walkmühle zunächst abzubauen (Abbildung 17).



Abbildung 16: Auslesen der Werte in Lengsfeld



Abbildung 17: Rückbau in Hinterer Walkmühle

Diese Box in Chemnitz ist im Oktober 2024 von FiberCheck erstmals ausgelesen worden. Die Messungen zeigen einen dauerfeuchten Zustand mit sehr hoher,

dauerhafter Leitfähigkeit der Sensoren. Die Wand trocknete nicht ab und es gab Anzeichen von Salzen, die vermutlich auch schon beim Einbau vorhanden waren (siehe Abbildung 18).



Abbildung 18: Salzbefund im Kellerraum der Firma Gehre

Eine einmalige zusätzliche Anfeuchtung trat im Messzeitraum auf. Der Vergleich mit der Niederschlagskurve für den Standort Chemnitz zeigte heftige Regenfälle, bei denen einen Tag später die Feuchtigkeit im Mauerwerk messbar wurde. Somit konnte das Funktionieren und Reagieren des Sensorsystems auf Feuchtigkeitsänderung nachgewiesen werden.

Nachdem der Meilenstein 1 im April 2024 realisiert wurde, die Erstellung eines Konzeptes des textilbasierten Sensorsystems sowie die Fertigstellung des ersten Versuchsmusters, ist auch der 2. Meilenstein planmäßig im Oktober 2024 absolviert worden. Dieser beinhaltete den Nachweis der Funktionsfähigkeit des textilbasierten Sensorsystems im Versuchsobjekt, den die Messungen mittels Messbox in den Objekten „Hintere Walkmühle“ und im denkmalgeschützten Firmengebäude der Firma Gehre belegen.

Arbeitspaket 6: Herstellung eines zweiten Versuchsmusters

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

Basierend auf den analysierten Daten des ersten Funktionsmusters wurden mehrere Anpassungen und Optimierungen des Sensorsystems vorgenommen, um die Genauigkeit und Zuverlässigkeit der Feuchtemessung zu verbessern.

1. **Kalibrierung der kapazitiven Sensoren:** Die Kapazitätswerte der kapazitiven Sensoren wurden überprüft und kalibriert, um sicherzustellen, dass sie präzise Feuchtigkeitsänderungen erfassen können. Die Kalibrierung erfolgte durch Vergleich mit Referenzmessungen und Anpassung der Sensoreinstellungen, um Abweichungen zu minimieren.
2. **Optimierung der resistiven Sensoren:** Die resistiven Sensoren wurden ebenfalls kalibriert und optimiert. Die Normierung der Messwerte auf 100 ermöglichte eine konsistente Vergleichbarkeit der Daten. Durch die Anpassung der Sensoreinstellungen konnte die Empfindlichkeit erhöht und die Genauigkeit der Feuchtemessung verbessert werden.
3. **Verbesserung der Datenübertragung und -verarbeitung:** Die Schnittstellen zur Datenübertragung wurden überprüft und optimiert, um eine zuverlässige und schnelle Übertragung der Messdaten zu gewährleisten. Die Auswerteeinheit wurde mit verbesserten Algorithmen ausgestattet, um die Rohdaten effizient zu analysieren und aussagekräftige Informationen abzuleiten. Dabei wurden robuste und fehlertolerante Ausleseroutinen entwickelt, um die Datenintegrität zu gewährleisten und mögliche Fehlerquellen zu minimieren.
4. **Anpassung der textilen Sensoren:** Die verschiedenen gestickten Geometrien der textilen Sensoren wurden analysiert, um die wirksame Fläche zu maximieren und die Sensitivität sowie Genauigkeit der Feuchtemessung zu verbessern. Sensoren mit größeren wirksamen Flächen zeigten stabilere und genauere Messwerte, während kleinere Flächen empfindlicher auf lokale Feuchtigkeitsschwankungen reagierten. Basierend auf diesen Erkenntnissen wurden die textilen Muster angepasst und optimiert.
5. **Langzeitüberwachung und Validierung:** Die optimierten Sensoren wurden in den Demonstrationsobjekten installiert und über einen längeren Zeitraum überwacht. Die kontinuierliche Datenerfassung ermöglichte eine umfassende Validierung der Anpassungen und Optimierungen. Die gesammelten Daten wurden regelmäßig analysiert, um die Leistung der Sensoren zu überprüfen und weitere Anpassungen vorzunehmen, falls erforderlich.

Arbeitspaket 7: Praxistest im Demonstrationsobjekt

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

Für den Praxistest Ende erstes Quartal / Anfang zweites Quartal 2025 im Demonstrationsobjekt wurde ein denkmalgeschütztes Gebäude in Hartmannsdorf bei Chemnitz ausgewählt, welches sich in der Kernsanierung befand. Dieses ehemalige Wohn-, Kontor- und Fabrikationsgebäude mit städtebaulich markantem Putzbau von ortsgeschichtlicher und baugeschichtlicher Bedeutung, wurde um 1850 errichtet. Die Entscheidung fiel auf dieses Objekt, da bereits während des Sanierungsprozesses eine Feuchtigkeitsüberwachung eine wichtige Rolle spielt, um Folgeschäden von Beginn der Instandsetzung an vermeiden zu können. Außerdem kann so zusätzlich ein weiterer Anwendungsfall neben den bisher bestehenden Gebäudestrukturen in den beiden Versuchsobjekten berücksichtigt werden (siehe Abbildungen 19 und 20).



Abb. 19-20: Demonstrationsobjekt in Hartmannsdorf



Abb.21: Sensor



Abb. 22: Einbau der Sensoren

In diesem Gebäude ist der Vorschlag von Herrn Dr. Auras, den er zum Beiratstreffen äußerte, aufgegriffen worden: die Platzierung eines Sensors tief in der Fuge und darüber einen Sensor in den Putz einzubringen. Die Vermutung, die bei diesem Vorgehen zugrunde lag, war, dass bei Feuchtigkeitseintritt folgendes geschieht: Wenn Kondensation auftritt, müsste der Putzsensoren anschlagen und bei aufsteigender kapillarer Feuchte dann der in der Tiefe liegende Sensor. Somit kann festgestellt werden, ob Feuchtigkeit aus dem Mauerwerk oder dem Raum kommt.

Arbeitspaket 8: Technologische Roadmap / Wirtschaftlichkeitsbetrachtung / Recycling

Folgende Arbeiten wurden durchgeführt:

Die Qualitätssicherung für die technologische Roadmap folgte einem dreistufigen Konzept:

- (1) Elektrische Referenzierung der Kapazitätskanäle mittels Kondensatorreihe und Multimeter-Gegenmessungen sowie Festlegung einer Vollausschlagschwelle ($> 5\,100\text{ pF}$) zur robusten Ereigniserkennung.
- (2) Prinzipielle Redundanz durch die Kombination aus kapazitiver und resistiver Messung; die Normierung der Resistivwerte (100 = Referenz) erleichterte den objektübergreifenden Vergleich.
- (3) Zeitreihen-Plausibilisierung über quartalsweise Berichte mit Diagrammen, er-

gänzt um Fotodokumentation der Messboxen/Anschlüsse vor Ausbau. Abweichungen wurden systematisch gegen Einbau- und Umgebungsdaten (Raumnutzung, Witterung) gespiegelt.

Das Datenmanagement umfasste eine strukturierte Ablage der Rohwerte und grafischen Auswertungen (Protokolle 09.07.2024, 30.04.2025 und 03.07.2025), so dass rückwirkend Trend- und Ereignisanalysen möglich wurden.

Die standardisierte Erhebung und Auswertung von Feuchtigkeitsdaten eröffnet vielfältige Möglichkeiten für eine wirtschaftliche Nutzung, insbesondere im Bereich der präventiven Bauwerkserhaltung und -sanierung. Die Schnittstellen- und Datenmanagementlösungen sind so gestaltet, dass eine Integration in bestehende digitale Verwaltungs- und Monitoringstrukturen problemlos erfolgen kann.

Im Sinne der Wirtschaftlichkeit ist ein frühzeitiges Detektieren und Erkennen von Feuchtigkeitseinträgen und deren Behebung zeit- und kostengünstiger als eine notwendige umfangreiche Sanierung, wenn die Schäden an der Bausubstanz ersichtlich werden.

3 Projektergebnisse

Im Rahmen des vorliegenden Projekts konnten in wissenschaftlich-technischer Hinsicht signifikante Fortschritte erzielt werden, die sowohl die Entwicklung als auch die Implementierung innovativer gestickter Sensoriksysteme umfassen. Die kapazitive Sensorik, ausgeführt in Fächer- beziehungsweise Kammstruktur, verzeichnete im trockenen Zustand reproduzierbare Kapazitätswerte im Bereich von etwa 190 bis 260 pF. Die Validität dieser Messbereiche wurde durch methodisch abgesicherte Aufladeverfahren bestätigt, sodass eine zuverlässige Referenzbasis für weitere Anwendungen geschaffen werden konnte. Ergänzend hierzu wurde die resistive Sensorik normiert, indem ein Referenzwert von 100 festgelegt wurde, der als Grundlage für die Bewertung der Messdaten dient. Die im Zeitraum von April bis Oktober 2024 erhobenen Werte belegen stabile Trockenlagen an den jeweiligen Messstellen, was die Funktionstüchtigkeit und Zuverlässigkeit des entwickelten Systems unter realen Bedingungen eindrücklich dokumentiert. Darüber hinaus erfolgte die Implementierung von standardisierten Schnittstellen, Datenlogging-Mechanismen und spezifischen Auswerteroutinen, wodurch ein quartalsweiser, strukturierter Datenexport ermöglicht wurde. Diese Maßnahmen tragen maßgeblich zur Qualitätssicherung und zur Nachvollziehbarkeit der erhobenen Messdaten bei und erleichtern auch zukünftig die Integration in bestehende Verwaltungsprozesse.

Aus umweltrelevanter Perspektive und im Hinblick auf die Nachhaltigkeit ist hervorzuheben, dass das entwickelte Frühwarnsystem dazu beiträgt, Substanzverluste an Bauwerken frühzeitig zu vermeiden, Sanierungsaufwände zu minimieren und den Schutz von Kulturgütern nachhaltig zu verbessern. Die textile Einbringung der Sensorik unter Putz ermöglicht eine reversible und materialsparende Anwendung, was insbesondere im Hinblick auf den schonenden Umgang mit historischer Bausubstanz von hoher Relevanz ist. Die Übertragbarkeit des Systems auf Neubauten mit begrenzter Klimatisierung wurde grundsätzlich bestätigt, sodass eine breite Anwendungsperspektive gegeben ist.

Die im Projektverlauf etablierten Validierungsschritte, wie der Abgleich mit alternativen Messmethoden und die differenzierte Einbringung der Sensoren (beispielsweise in Fugen oder im Putz), gewährleisteten eine hohe Übertragbarkeit und Skalierbarkeit der entwickelten Verfahren. Das im Projekt generierte Know-how versetzt die beteiligten Akteure in die Lage, sowohl im wissenschaftlichen als auch im wirtschaftlichen Kontext innovative Lösungen für die Feuchteüberwachung von Bauwerken anzubieten und damit einen nachhaltigen Beitrag zur Ressourcenschonung und Werterhaltung zu leisten. Insgesamt verdeutlichen die Projektergebnisse das Potenzial für eine umfassende wirtschaftliche Verwertung und die effektive Nutzung des erworbenen Fachwissens im Praxisalltag.

4 Zielerreichung und Schlussfolgerungen für die Praxis

Der praktische Funktionsnachweis des Sensorsystems gilt als erreicht, da die textilbasierte Sensorik unter Putz in drei Demonstrationsumgebungen (Hintere Walkmühle; denkmalgeschützte Firmengebäude in Chemnitz sowie in Hartmannsdorf) über mehrere Monate stabile, plausibilisierte Zeitreihen lieferte und keine unplausiblen Sprung- oder Aussetzer zeigte.

Als technische Indikatoren wurden u. a. kapazitive Messwerte im trockenen Referenzband ($\approx 190\text{--}260\text{ pF}$) sowie resistiv normierte Verläufe ($100 = \text{Referenz}$) ohne Auffeuchtungsereignisse definiert. Die Kalibrierung der kapazitiven Kanäle erfolgte mittels Auflademethode (RC-Entladung); die Vollausschlagschwelle $> 5\ 100\text{ pF}$ wurde auf Basis einer Kondensator-Referenzreihe und Gegenmessungen festgelegt.

Die Messwertprotokolle dokumentierten über alle Kanäle stabile Verläufe ohne signifikante Feuchteänderung. Die kapazitiven Kanäle verharrten um $\approx 190\text{ pF}$ im Trockenbereich; der resistive, auf 100 normierte Kanal zeigte keine Auffeuchtung. Ergänzende Fotodokumentation der geöffneten Messbox und Messstellen vor Ausbau bestätigen den ordnungsgemäßen Zustand der Installationen. Die Mess-

ketten aus Sensorik, Messbox, Schnittstellen, Logging und Auswertung erwiesen sich als robust; das Ziel wurde erreicht.

Der Funktionsweise des Messsystems konnte ebenso durch das Aufzeichnen von eintretender Feuchtigkeit sowohl im Gebäude in Chemnitz als auch im Demonstrationsobjekt erbracht werden. Die Korrelation der Wetterdaten mit den aufgezeichneten Werten zeigte, dass nur ein kurzer zeitlicher Abstand zwischen Regenereignissen und dem Anzeichen von Feuchtigkeit in den Gebäuden existierte. Ein Vorschlag des projektbegleitenden Beirates war, die Wände durch definierte Befeuchtungs-/Sprühversuche an Musterflächen zu benetzen, um einen Ausschlag der Sensoren zu implizieren. Nachdem die Messprotokolle jedoch Veränderungen bei örtlich auftreffenden Starkregen aufzeichneten, konnte auf das künstliche Herbeiführen von Wertschwankungen verzichtet werden.

In dem eher feuchten Versuchsobjekt in Chemnitz wurde im Messzeitverlauf die Bildung von Grünspan an den Kupfer- bzw. Lötzinnteilen der Sensorik beobachtet (Abbildung 23). Für zukünftige Einbauten wäre es günstiger, für die unisolierten Drähte der Sensoren Edelstahl zu verwenden oder ein Gehäuse über der Kontaktierung anzubringen. Der Nachweis der fungiziden Wirksamkeit der Textilien unter den vorhandenen Feuchtebedingungen konnte erbracht werden, da nur die Metallteile und nicht das textile Trägermaterial Grünspananlagerungen zeigte.

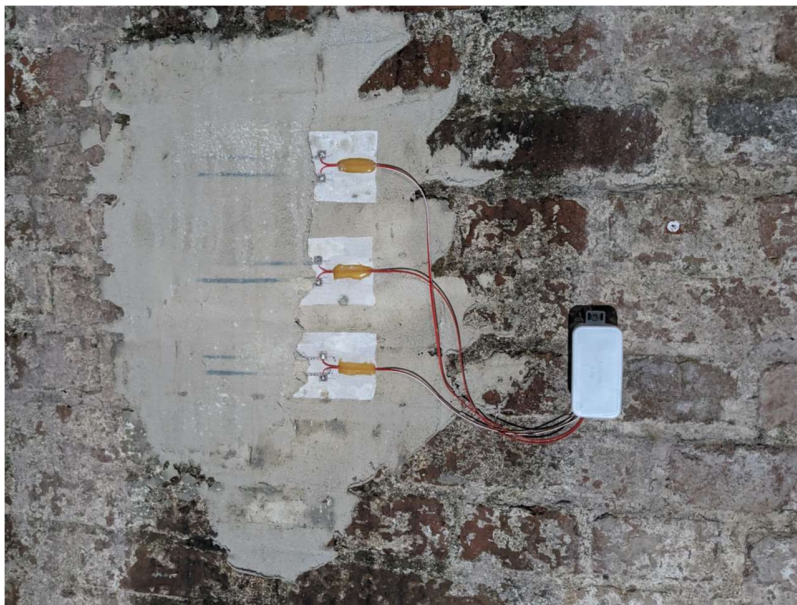


Abb. 23: Zustand der Sensorik in Versuchsobjekt Chemnitz

Für den Einbau des Fugensensor war die Versteifung des textilen Trägermaterials zielführend, jedoch könnte diese für ein noch besseres Handling bei der Einbringung des Sensors noch erhöht werden.

Bei den Regenereignissen in Hartmannsdorf reagierten sowohl die unter Putz liegenden Sensoren, als auch der Fugensensor. Die zwei flächig aufgebrachten Sensoren zeigten jedoch einen höheren Messwert als der tief liegende Sensor. Es wurde die Schlussfolgerung gezogen, dass hier gegebenenfalls die Anbindung an den Putz nicht optimal war. Bei dieser Art von Sensoren müssen zukünftig die ausreichende Einbringtiefe und die Gewährleistung einer funktionierenden Anbindung stärker beachtet werden.

Zudem ist in Projektberatungen, auch mit dem Beirat, auf Einflussfaktoren wie beispielsweise Alkalität von Mörteln, vorhandene salzhaltige Zonen in historischen Mauerwerken, hingewiesen worden, die zukünftig noch mehr Berücksichtigung bedürfen.

5 Verwertung, Transfer und Verstetigung

Die Anwendungsfelder der entwickelten textilen Feuchtesensorik erstrecken sich über ein breites Spektrum und bieten insbesondere für die Denkmalpflege, die Sanierung und Instandhaltung von Bestandsgebäuden sowie für Neubauten ohne Vollklimatisierung erhebliche Vorteile. Gerade im Bereich der Denkmalpflege eröffnen sich neue Möglichkeiten zur präzisen Diagnose und zur nachhaltigen Erhaltung wertvoller Bausubstanz, da die Sensorik eine spezifische Detektion von Feuchteursachen ermöglicht und somit gezielte präventive Maßnahmen unterstützt. Für Bestandsgebäude trägt das System dazu bei, Schäden frühzeitig zu erkennen und Instandhaltungsentscheidungen effizienter zu treffen, was langfristig die Substanz und den Wert der Immobilien sichert. Auch bei Neubauten ohne umfassende Klimatisierung bietet die Sensorik einen wichtigen Beitrag zur Qualitätssicherung und zur Vermeidung von Feuchteschäden.

Der Transfer der Technologie erfolgt über etablierte Partnernetzwerke wie Pfand und Texulting sowie durch die Einbindung in F&E-Projekte, wodurch eine breite Anwendung und kontinuierliche Weiterentwicklung gewährleistet sind. Perspektivisch ist es denkbar, die textile Feuchtesensorik als Produkt- bzw. Lizenzmodell anzubieten, sodass interessierte Anwender und Institutionen von den Innovationen profitieren und die Lösungen in ihre eigenen Prozesse integrieren können. Dies schafft eine nachhaltige Basis für die Verstetigung und den Ausbau der Technologie am Markt.

Insgesamt leistet die textile Feuchtesensorik einen bedeutenden Beitrag zur Modernisierung und Digitalisierung des Feuchtemanagements in der Bauwirtschaft und im Denkmalschutz. Sie unterstützt die sachgerechte Entscheidungsfindung und fördert die effiziente, ressourcenschonende und werterhaltende Instandhaltung von Gebäuden und erhöhen die Entscheidungssicherheit im Umgang mit Feuchteschäden.

6 Öffentlichkeitsarbeit und Kommunikation

Die Firma Pfand nahm an der „Perspektivkonferenz mit der Kulturerbe-Community Mitteldeutschlands“ am 26.10.2023 in Gera unter dem Motto „Innovativ. Vernetzt. Erhalten“ teil. Diese Veranstaltung diente der Wissensvermittlung zum Thema Kulturerbe und der Vernetzung der verschiedenen Akteure sowie auch der ersten Kommunikation zum Vorhaben unter Fachleuten.

Zur internationalen Messe TECHTEXTIL vom 23.04.-26.04.2024 in Frankfurt/Main war die Firma Pfand mit eigenem Messestand vertreten und stellte das Forschungsvorhaben mittels eines Flyers der Fachöffentlichkeit vor (Abbildung 24).



Abb. 24: Präsentation des Projektes Eau-Tex auf dem Messestand der Fa. Pfand zur TECHTEXTIL-Messe in Frankfurt/Main (Flyer links vorn im Ständer)

Außerdem nahm das Unternehmen mit einem Messestand an der Messe Denkmal, die vom 07.11.-09.11.2024 in Leipzig stattfand, teil. Hierfür wurde ein zweiter Flyer über das Forschungsvorhaben Eau-Tex entwickelt (s. Abbildung 25). Viele Besucher interessierten sich für das Projekt.

Überwachung historischer Bausubstanzen und Kulturgüter

TEXTILES MONITORING von Bauwerksfeuchte

System und Eigenschaften:

- textile Messung unter Putz
- bis 4 Bereiche gleichzeitig (max. 15 m Abstand)
- gegen Schimmel geschützt
- einfache Anbringung in u. auf Mauerwerk mit Putz (30 Min.)
- Abruf Daten zur Feuchte über Bluetooth
- optional: autark mit Akku
- als Miet- oder Kaufmodell

Kontakt:

Textilausrüstung
Pfand Lengenfeld

Partner:

Gehre Trockenbau
Chemnitz

FiberCheck Chemnitz

Modespitze Plauen

Texulting Chemnitz

gefördert durch

DBU
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
www.dbu.de

PFAND
TEXTILAUSRÜSTUNG

IVO
GEHRE

FIBER CHECK

textile sensors
by Modespitze Plauen

texulting

Projekt EauTex (38875/01)

Abbildung 25: Flyer für das Projekt Eau-Tex für die Messe Denkmal

Am 11.09.2024 wurde online ein Projekttreffen mit dem Beirat durchgeführt. Daran nahmen die Beiratsmitglieder Frau Dr. Heike Illing-Günther (STFI e.V.), Herr Dr. Michael Auras (ehemals Institut für Steinkonservierung e.V.) und Herr Dr. Uwe Möhring (Innovent e.V.) sowie Frau Dr. Franziska Lehmann (Texulting GmbH), Herr Gehre und Herr und Frau Erth teil. Zum Online-Projektabschlussstreffen waren ebenfalls Beiratsmitglieder anwesend.

Am 16.10.2024 fand eine Vor-Ort-Begehung im Versuchsobjekt Hintere Walkmühle durch das Beiratsmitglied Herrn Dr. Möhring mit anschließender Beratung statt (Abbildung 26).



Abbildung 26: Herr Dr. Möhring im Versuchsobjekt Hintere Walkmühle am 16.10.2024

Die Textilausrüstung Pfand betreute im Rahmen der „Umweltprofis von morgen“ eine 10. Klasse aus Elsterberg im Vogtland. Schüler dieser Klasse gestalteten eine Präsentation zu ihrer praktischen Projektarbeit im Unternehmen zum Thema Nachhaltigkeit am 05.06.2025 im Beisein des Sächsischen Umweltministers im Rathaus Leipzig. An dieser Veranstaltung nahm die Firma Pfand ebenso teil.

In den Jahren 2024 und 2025 fanden Vorlesungen und Übungen mit Studenten der Technischen Universität Chemnitz im Rahmen der Vorlesung „Technische Textilien“ vor Ort in der Textilausrüstung Pfand GmbH statt, die der Inhaber des Unternehmens als Dozent durchführte. Die Studenten konnten sich einerseits über das Forschungsvorhaben informieren und andererseits gleichzeitig textile Versuchsmuster und deren Bearbeitung in der Praxis erleben. Diese Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit, die die Vermittlung und Verbreitung der erreichten Forschungsergebnisse an die Generation der zukünftigen Hochschulabsolventen beinhaltet, sollen auch in der weiteren Dozententätigkeit von Herrn Professor Dr. Erth fortgesetzt werden.

7 Projektorganisation und Zusammenarbeit

Im Rahmen des Projekts agierte die Textilausrüstung Pfand GmbH als Bewilligungsempfänger und übernahm die zentrale Koordination der Projektdurchführung. Die Zusammenarbeit folgte einem konstruktiven, hybriden Ansatz, der sich an modernen Prinzipien des Projektmanagements orientierte. Dabei wurden die Kompetenzen der verschiedenen Partner gezielt gebündelt und Synergien geschaffen, um innovative Lösungen effizient zu entwickeln und umzusetzen.

Die Modespitze Plauen GmbH war maßgeblich an der Fertigung der Sensorkomponenten beteiligt und brachte ihr umfangreiches Know-how aus der textilen Produktion ein. Die FiberCheck GmbH übernahm die Installation und das Auslesen der Sensorik vor Ort und gewährleistete so eine reibungslose technische Umsetzung. Das Unternehmen Ivo Gehre Akustik & Trockenbau GmbH stellte das Demonstrationsobjekt bereit und fungierte als Bindeglied zwischen Forschung und Praxis.

Der projektbegleitende Beirat sorgte durch regelmäßigen Austausch für eine kontinuierliche fachliche Begleitung, wertvolle Impulse und eine effektive Qualitätssicherung. Die hybride Zusammenarbeit wurde durch regelmäßige Online-Meetings, transparente Kommunikation und die Nutzung digitaler Tools unterstützt, so dass alle Beteiligten trotz unterschiedlicher Standorte optimal eingebunden waren. Durch diesen integrativen und agilen Ansatz gelang es, die unterschiedlichen Stärken der Partner zu nutzen, Lösungswege flexibel anzupassen und das Projekt zielgerichtet voranzutreiben. Die offene, konstruktive Zusammenarbeit förderte Innovation, beschleunigte Entscheidungsprozesse und trug maßgeblich zum nachhaltigen Projekterfolg bei.

8 Fazit und Ausblick

Die aktuell eingesetzte Sensorik zeichnet sich durch eine bemerkenswert stabile Performance im laufenden Betrieb aus und erfüllt die projektspezifischen Anforderungen hinsichtlich Präzision und Zuverlässigkeit.

Im Rahmen einer Fortführung des Projektes könnte das Messsystem kontinuierlich erweitert werden. Dies umfasst die Integration zusätzlicher Sensoreinheiten, die Erfassung von Langzeitdaten sowie die Durchführung systematischer Vergleichsmessungen mit etablierten Referenzverfahren. Durch diese Maßnahmen wäre es möglich, die Robustheit und Aussagekraft der erhobenen Messdaten weiter zu erhöhen. Ein besonderer Fokus müsste auf die Entwicklung von analytischen Methoden zur Auswertung multidimensionaler Sensordaten gelegt werden, um die

Trennung verschiedener Feuchtequellen datengetrieben und reproduzierbar gewährleisten zu können.

Im Kontext eines dynamisch-innovativen Projektmanagements sollte eine kontinuierliche Begleitung dieser Schritte durch digitale Tools, transparente Kommunikation und interdisziplinäre Kooperation erfolgen, die auch eine agile Anpassung der Arbeitsprozesse und die systematische Einbindung aller beteiligten Partner umfasst.

Insgesamt trägt der integrative und wissenschaftlich fundierte Ansatz maßgeblich zur Entwicklung innovativer Lösungen bei, die nicht nur technologischen Fortschritt ermöglichen, sondern auch zur nachhaltigen Verbesserung bestehender Praxisprozesse beitragen können.

Die gewonnenen Erkenntnisse bilden die Grundlage für die geplante Skalierung der Messmethodik. Ziel ist es, die entwickelten Technologien in größere Anwendungsumgebungen zu transferieren und somit eine praxisnahe Validierung im industriellen Maßstab zu ermöglichen. Dazu werden im weiteren Verlauf geeignete Technologietransferstrategien ausgearbeitet, die sowohl den Wissenstransfer in relevante Branchen als auch die Überführung in marktfähige Produkte und Dienstleistungen unterstützen.

Danksagung

Wir danken dem Projektträger Deutsche Bundesstiftung Umwelt für die kooperative Zusammenarbeit und Betreuung der Arbeiten. Insbesondere möchten wir Frau Constanze Fuhrmann, Frau Heike Hemmer und Frau Sandra Stelow für ihre kontinuierliche, engagierte und lösungsorientierte Unterstützung danken.

Des Weiteren danken wir allen Partnern und Unterstützern des Vorhabens.

Direkte Projektpartner:

Ivo Gehre Akustik & Trockenbau GmbH, Chemnitz

Textilausrüstung Pfand GmbH, Lengenfeld

Unterstützende Partnerunternehmen im Vorhaben:

Modespitze Plauen GmbH, Plauen

FiberCheck GmbH, Chemnitz

Texulting GmbH, Chemnitz

Mitglieder des Projektbeirates:

Frau Dr. Heike Illing-Günther (Sächsisches Textilforschungsinstitut e.V.),

Herr Dr. Michael Auras (ehemals Institut für Steinkonservierung e.V.), Mainz

und Herr Dr. Uwe Möhring (Innovent e.V.), Jena

Literaturverzeichnis

[1] <https://www.luftfeuchtigkeit-raumklima.de/tabelle.php>, Abruf vom 18.01.2024

[2]
<https://www.getifix.de/bauwerksabdichtung/feuchtigkeitsschaeden/normalwertetabelle/#feuchtigkeit-baustoffe>, Abruf vom 18.01.2024