

Experimentelle Untersuchung ressourcenschonender in-situ Befeuchtungsmethoden für historische Holztafelgemälde

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des akademischen Grades Master of Science an der TUM School of Engineering and Design der Technischen Universität München.



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

Betreuerin / Betreuer Alex Fröhlich, M.Sc.

Eingereicht von Osman Kocan, B.Sc.
03695334

Eingereicht am 30. Mai 2024, in München

Kurzfassung „Experimentelle Untersuchung ressourcenschonender in-situ Befeuchtungsmethoden für historische Holztafelgemälde“

Für eine Vielzahl von Kunstwerken wurde Holz als Grundmaterial verwendet. So auch für Holztafelgemälde, deren Räumlichkeiten oftmals Orte wie Kirchen oder Museen sind. Diese sind unkontrollierten mikroklimatischer Änderungen und damit Schwankungen der relativen Luftfeuchte ausgesetzt. Beim Holz als hygroskopisches Material, das in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte Wasser aus der Umgebung aufnimmt oder abgibt, geht damit eine Volumenänderung einher, wodurch Schäden an den Kunstwerken entstanden. Das Ziel dieser Thesis war es, ressourcenschonende Alternativen der Feuchtigkeitskontrolle zu untersuchen. Verschiedene Befeuchtungsmethoden mittels gesättigter Salzlösungen, Textilien oder Lehm- und Baumwollstoffen sollten hinsichtlich ihrer Tauglichkeit, die historisch feuchte Rückwand nachzubilden, untersucht werden. Mit den Versuchsergebnissen sollten Erkenntnisse über die Effektivität und Verträglichkeit dieser einseitigen Befeuchtungsmethoden gewonnen werden und wie diese sich auf den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte auswirken. Hygroskopische Materialien wie Holz können aus der Umgebung dampfförmiges und flüssiges Wasser aufnehmen, speichern und wieder abgeben. Die Gleichgewichtsfeuchte ist dabei maßgeblich von der relativen Luftfeuchte der Umgebung abhängig. Für Kunstwerke, die in Räumlichkeiten ausgestellt wurden, deren relative Luftfeuchte ungeeignet waren, stellten Klimaschränke eine funktionierende Lösung bereit. Während aktive Systeme elektrische Geräte verwendeten, konzentrierten sich passive Systeme darauf, das Klima durch Puffermaterialien, die in der Lage sind, Dampfadsorptionskapazität hinzuzufügen, zu stabilisieren. Eine weitere Methode zur Kontrolle der Luftfeuchte in den Klimavitrinen war die Verwendung von gesättigten Salzlösungen. Diese haben die Eigenschaft über der Lösung eine bestimmte relative Luftfeuchte bei verschiedenen Temperaturen zu erzeugen. Es wurde eine Versuchsserie aufgebaut, die modellhaft das Umgebungsklima und das Holztafelgemälde nachbilden sollte. Es wurde der Einsatz einer gesättigten Natriumchlorid Salzlösung und der hygroskopischen Puffermaterialien Lehm und Baumwolle, die periodisch durch Wasserzufuhr regeneriert wurden, untersucht. Das Ziel war es, eine relative Luftfeuchte von 75 % über einen möglichst langen Zeitraum möglichst konstant zu halten. Die Verwendung der Natriumchloridlösung lieferte die besten Ergebnisse. Die relative Luftfeuchte wurde über die Versuchslaufzeit von 12 Wochen sehr konstant, mit geringen Abweichungen auf einem durchschnittlichen Wert von 76,1 % gehalten. Mit den beiden hygroskopischen Puffermaterialien konnten zwar klimatisch stabile Umgebungen geschaffen werden, diese entsprachen aber nicht den Zielbedingungen. Es war eine präzisere Wasserzufuhr notwendig, weshalb eine automatisierte Systemsteuerung vorgestellt wurde. Die Ergebnisse zeigten, dass trotz einseitiger Befeuchtung die Holzfeuchte maßgeblich von der inneren relativen Luftfeuchte gesteuert wurde. Die sich einstellende Holzfeuchte lag jedoch unterhalb der Werte, die in der Literatur vorzufinden waren. Um ein zuverlässigeres Klima mithilfe von hygroskopischen Puffermaterialien zu schaffen, könnten diese in weiterführenden Studien vor ihrem Einsatz auf eine bestimmte Materialfeuchte konditioniert und mithilfe einer verfeinerten automatisierten Systemsteuerung periodisch regeneriert werden.

Abstract „Experimental investigation of resource-saving in-situ humidification methods for historical wood panel paintings“

Wood was used as the basic material for many works of art. This is also the case for wooden panel paintings, which are often displayed in places such as churches or museums. These are exposed to uncontrolled microclimatic changes and thus fluctuations in relative humidity. Wood is a hygroscopic material that absorbs or releases water from the environment depending on the relative humidity, which results in a change in volume, causing damage to the works of art. The aim of this thesis was to investigate resource-saving alternatives for humidity control. Various humidification methods using saturated salt solutions, textiles or clay building materials were to be investigated about their suitability for recreating the historically damp rear wall. The test results were to be used to gain insights into the effectiveness and compatibility of these one-sided humidification methods and how they affect the progression of wood moisture over time.

Hygroscopic materials such as wood can absorb, store and release vapor and liquid water from the environment. The equilibrium moisture content is largely dependent on the relative humidity of the environment. For works of art exhibited in rooms where the relative humidity was unsuitable, climate cabinets provided a functional solution. While active systems used electrical devices, passive systems focused on stabilizing the climate using buffer materials capable of adding vapor adsorption capacity. Another method of controlling humidity in the climate cabinets was the use of saturated salt solutions. These have the property of generating a certain relative humidity above the solution at different temperatures.

A series of experiments was set up to model the ambient climate and the wood panel painting. The use of a saturated sodium chloride salt solution and the hygroscopic buffer materials clay and cotton, which were periodically regenerated by adding water, was investigated. The aim was to keep a relative humidity of 75 % constant over as long a period as possible. The use of the sodium chloride solution provided the best results. The relative humidity was kept very constant over the test period of 12 weeks, with slight deviations to an average value of 76.1 %. Although it was possible to create climatically stable environments with the two hygroscopic buffer materials, these did not meet the target conditions. A more precise water supply was required, which is why an automated system control was introduced. The results showed that despite one-sided humidification, the wood moisture content was largely controlled by the internal relative humidity. However, the resulting wood moisture was below the values found in the literature. To create a more reliable climate using hygroscopic buffer materials, these could be conditioned to a certain material moisture content before use in further studies and periodically regenerated using a refined automated system control.

Inhaltsverzeichnis

Kurzfassung „Experimentelle Untersuchung ressourcenschonender in-situ Befeuchtungsmethoden für historische Holztafelgemälde“	I
Abstract „Experimental investigation of resource-saving in-situ humidification methods for historical wood panel paintings“	II
Inhaltsverzeichnis	III
1 Einleitung	1
1.1 Hintergrund und Bedeutung des historischen Holztafelgemäldes	1
1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit	3
2 Stand der Technik zu Material und Befeuchtungsmethoden	4
2.1 Feuchtetechnische Grundlagen	4
2.1.1 Feuchteeintrag	4
2.1.2 Feuchtetransport.....	8
2.1.3 Materialfeuchte und Sorptionsisotherme	10
2.2 Hygroskopisches Verhalten von Holz	12
2.2.1 Schwind- und Quellverhalten unter Feuchteänderung.....	19
2.2.2 Schäden an Holztafelgemälden	22
2.2.3 Einfluss von Farbschicht und Beschichtung	25
2.3 Befeuchtungsmethoden im Vergleich	31
2.3.1 Funktionsweise und Auswirkungen von Klimaschränken	31
2.3.2 Gesättigte Salzlösungen	35
2.3.3 Lehm und Baumwolle als Beispiel hygroskopischer Puffermaterialien.....	41
3 Entwicklung einer Befeuchtungsmethode	48
3.1 Methodik	48
3.1.1 Versuchsserie	48
3.1.2 Ansatz zur Automatisierung	51
3.2 Prüfkörper und Versuchsaufbau	53
3.2.1 Versuchsserie	53
3.2.2 Automatisierte Systemsteuerung	57

3.3	Versuchsdurchführung.....	58
4	Ergebnisse und Auswertung.....	60
4.1	Gesammelte Versuchsdaten.....	60
4.2	Abhängigkeit der Holzfeuchte	64
4.3	Temperaturabhängigkeit der Deliquescenz	69
4.4	Diffusionsvorgang und Verlauf der Feuchteregeneration	71
4.5	Deskriptive Statistik.....	75
4.6	Zuverlässigkeit der automatisierten Systemsteuerung	77
5	Diskussion und Ausblick.....	78
	Abbildungsverzeichnis	81
	Tabellenverzeichnis.....	85
	Literaturverzeichnis.....	86
	Anhang	91

1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Bedeutung des historischen Holztafelgemäldes

Über Jahrhunderte wurde Holz als Grundmaterial für eine Vielzahl von Kunstwerken verwendet, von ägyptischen Sargporträts bis hin zu zeitlosen Gemälden großartiger Künstler. Bis ins 17. Jahrhundert war das Medium von beinahe allen transportierbaren Gemälden Holz. Zeitlose Meisterwerke von berühmten Künstlern von Giotto bis zu Dürer, welche den geistigen Wandel und die Imprägnierung von Werten prägten, eingeschlossen. Holztafelgemälde, die in Kirchen ausgestellt sind, haben nicht nur religiöse Funktionen, sondern auch kulturelle. Für eine Gesellschaft stellen diese Kulturgüter einen unschätzbaren Wert für die kulturelle Identität und das Erbe einer Nation dar, weshalb es die Aufgabe derzeitiger Wissenschaft, der zuständigen Institutionen und Restauratoren ist, sie zu erhalten und an künftige Generationen weiterzugeben (Kos & Duin, 2014).

Die Räumlichkeiten dieser Objekte sind oftmals Orte wie Kirchen oder Museen, in die eine breite Masse von Menschen Zugang haben (Kos & Duin, 2014). Hier unterstehen sie oftmals unkontrollierten mikroklimatischer Änderungen. In Museumsumgebungen werden diese durch den Einsatz von Be- und Entlüftungssystemen, das Öffnen und Schließen von Türen oder Fenstern, von Besucherströmen bis hin zu klimatischen Tageszyklen verursacht (Ł. Bratasz, 2005). Kirchen, die eine sonst kalte und feuchte Umgebung aufweisen, werden während Sonntagsmessen oder anderen religiösen Veranstaltungen kurzzeitig erwärmt oder trockengelegt (Colmars, 2013). Die Folge sind unkontrollierte Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Das Problem dieser Feuchtigkeitsschwankungen wäre nicht so gravierend, wenn es sich bei dem Untergrund der Gemälde nicht um Holz handeln würde. Denn bei Holz handelt es sich, wie bei Papier, um ein hygroskopisches Material, das in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte Wasser aus der Umgebung aufnimmt oder abgibt, bis es sich in einem Gleichgewichtszustand befindet. Mit diesem Vorgang geht eine Volumenänderung des Holzes einher, wodurch die meisten Schäden an Kunstwerken entstanden. Aus konservatorischer Sicht stellt sich deshalb die Frage nach dem idealen Klima für Kunstwerke, die Holzkomponenten enthalten (Kos & Duin, 2014). Tabellenwerte können hier für Klimaanforderungen verschiedener Kunstgattungen bei der Entscheidung zur Orientierung herangezogen werden, doch werden nicht als absolute Norm definiert (vgl. Tabelle 1-1).

Tabelle 1-1: Allgemein gültige Museumsrichtlinien vorgelegt von der Fachgruppe Restaurierung der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Schlösserverwaltungen (Fachgruppe Restaurierung, 2015)

Kunstgattung	Relative Luftfeuchte [%]	Temperatur [°C]
<i>Gemälde und Skulpturen</i>	55 ± 3	18 - 22
<i>Möbel und Holzobjekte</i>	55 ± 3	18 - 22
<i>Bücher</i>	50 ± 3	15 - 20
<i>Metall</i>	40 ± 3	18 - 22
<i>Keramik</i>	50 ± 3	18 - 22

Um sich gegen Schäden abzusichern, haben Restauratoren den sehr engen Feuchtebereich von 55 ± 5 % definiert. Aber auch hier basieren die Werte nicht auf die Ansprüche der Exponate, sondern vielmehr was von einer Klimaanlage erwartet werden kann. In der Literatur wird eindringlich auf das fragile Feuchtgleichgewicht hingewiesen, welches sich über Jahrhunderte zwischen dem Objekt und der klimatischen Umgebung eingestellt hat. Objekte können sich klimatischen Bedingungen anpassen, die nicht als ideal angesehen werden. Zwingt man solchen Objekten tabellierte Werte auf, ohne die vergangenen Gegebenheiten zu beachten, können Schäden auftreten. Insbesondere bei hygroskopischen Materialien wie Holz, die sich auf eine sehr hohe bzw. niedrige Feuchte eingependelt haben, ist die Wiedereingliederung in ein Normklima nicht ohne Schäden möglich. So kommt es nicht darauf an, Museumsbedingungen zu schaffen, sondern das über Jahrzehnte oder Jahrhunderte eingestellte Gleichgewicht nicht zu verändern. (Alexandra Troi, 2009; Fachgruppe Restaurierung, 2015). Bei einem Holztafelgemälde als komplexe Verbundstruktur interagieren nicht nur verschiedene Materialien mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften, sondern auch eine Reihe dreidimensionaler Faktoren haben Einfluss. Doch auch wenn die Reaktionen und Auswirkungen komplex sind, ist der ausschlaggebende Faktor die relative Luftfeuchte. Mit dem Hintergrund, dass es in der konservatorischen Literatur zahlreiche Belege für schwerwiegende Auswirkungen von Feuchtigkeitsextremen und Schwankungen auf historische Objekte gibt, ist es besonders wichtig diesen Parameter der relativen Luftfeuchte kontrollieren zu können (Barry Knight and David Thickett, 2007). Der Einbau von herkömmlichen Heizungs- oder Belüftungssystemen stellt einen mehr oder weniger starken Eingriff in denkmalgeschützte Umgebungen wie die der Kirche dar und ist oftmals mit den knappen finanziellen Mitteln in der Denkmalpflege nicht zu realisieren. Deshalb zielt diese Masterarbeit darauf ab, einen Beitrag für eine hinreichend genaue Methode der Feuchtigkeitsregulierung für Kunstwerke mit Hilfe ressourcenschonender Mittel zu liefern.

1.2 Ziel und Aufbau der Arbeit

Die vorliegende Masterarbeit entstand zusammen mit dem DBU-Forschungsprojekt „Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes“ (Stand: abgeschlossen). In dem Forschungsprojekt wurde das national wertvolle Holztafelgemälde „Gründonnerstagsretabel“ vom Raumklima abgekoppelt und von einer Einhausung umbaut. Um in der Einhausung ein für das Holztafelgemälde geeignetes Klima zu schaffen, wurden elektrische Luftbefeuchter und -Entfeuchter genutzt. Das Ziel dieser Thesis war es, ressourcenschonende Alternativen der Feuchtigkeitskontrolle zu untersuchen. Anstatt das Klima im gesamten Raum zu verändern, sollte nur die relative Luftfeuchte hinter dem Holztafelgemälde verändert werden. Dieses vom Raumklima abgekoppelte kleine Volumen hinter dem Gemälde sollte die historisch „feuchte Rückwand“ nachahmen. Verschiedene Befeuchtungsmethoden mittels gesättigter Salzlösungen, Textilien oder Lehmbaustoffen sollen hinsichtlich ihrer Tauglichkeit, diese historisch feuchte Rückwand nachzubilden, untersucht werden. Mit den Versuchsergebnissen sollten Erkenntnisse über die Effektivität und Verträglichkeit dieser einseitigen Befeuchtungsmethoden gewonnen werden und wie diese sich auf den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte auswirken. Hierzu wurde eine Versuchsserie gestartet, die modellhaft das Umgebungsklima und das Holztafelgemälde nachbilden sollen.

Zunächst werden im Zuge einer Literaturrecherche die Grundlagen aller relevanten Komponenten zusammengetragen, um in einem nächsten Schritt eine geeignete Versuchsreihe vorzustellen. In den ersten Kapiteln werden die hygroskopischen Eigenschaften des Holzes, das Zusammenspiel von relativer Luftfeuchte und Materialfeuchte, die an Holztafelgemälden entstandenen Schäden und der Einfluss einer diffusionshemmenden Farbschicht erläutert. Im Folgenden werden Lehm und Baumwolle als Beispiel hygroskopischer Materialien genauer betrachtet. Bevor in Kapitel 3 die Methodik der Versuchsreihe, die Versuchsergebnisse und die Versuchsauswertung aufgezeigt werden, wird die Möglichkeit der Feuchtigkeitsregulierung mittels gesättigter Salzlösungen vorgestellt. In der Versuchsserie wurden die hygroskopischen Puffermaterialien periodisch durch Wasserzufuhr regeneriert. Um eine effizientere Möglichkeit dieser Regeneration zu ermöglichen, wird im letzten Teil der Arbeit ein Ansatz zur automatisierten Systemsteuerung aufgezeigt. Im Anschluss werden alle Ergebnisse diskutiert und ein Ausblick zum Thema Klimatisierung mittels ressourcenschonender Mittel gegeben.

2 Stand der Technik zu Material und Befeuchtungsmethoden

2.1 Feuchtetechnische Grundlagen

2.1.1 Feuchteeintrag

Die äußere Feuchtelast wird unterschieden nach dem anstehenden Sujet. Die Atmosphäre (Luft), die Pedosphäre (Boden) und die Anthroposphäre (gebaute Umwelt). Weiterhin wird sie unterschieden in oberirdische und unterirdische Feuchtlast. Ersteres kann in Form von Witterung (Niederschlag, Schlagregen und Spritzwasser), Luftfeuchte oder Oberflächenwasser auftreten (Vogdt et al., 2022). Für die Zwecke dieser Masterarbeit spielt vor allem die Feuchtelast in der Atmosphäre und der Anthroposphäre eine wichtige Rolle. Die Atmosphäre als Lufthülle ist ein Gemisch verschiedener Gase. Tabelle 2-1 zeigt die in der Luft enthaltenen Bestandteile und deren Anteile auf den Gesamtdruck (Willems et al., 2018).

Tabelle 2-1: Kennwerte des Gasgemisches Luft im oberflächennahen Bereich der Atmosphäre (Willems et al., 2018)

Bestandteile	Zeichen	Anteil in Vol. - %
Stickstoff	N_2	78,08
Sauerstoff	O_2	20,93
Argon	Ar	0,9325
Kohlenstoffdioxid	CO_2	0,03
Wasserdampf	H_2O	Variabel von 0 bis 4 %

Unter der Bezeichnung „feuchte Luft“ wird das Gasgemisch aus trockener Luft und Wasserdampf verstanden. Der thermische Zustand des Gasgemisches der feuchten Luft wird mit der idealen Gasgleichung nach der Gleichung (2-1) beschrieben (Willems et al., 2018).

$$p \cdot V = m \cdot R \cdot T \quad (2-1)$$

P	[hPa]	Druck
V	[m ³]	Volumen
m	[kg]	Masse
T	[K]	Temperatur
R	[J/(kgK)]	Spezifische Gaskonstante

Nach dem Gesetz von Dalton ergibt sich der Gesamtdruck der Luft p als Summe der Partialdrücke der trockenen Luft p_L und des Wasserdampfes p_D und wird nach der Gleichung 2-2 berechnet (Willems et al., 2022).

$$p = p_{O_2} + p_{CO_2} + p_N + \dots + p_D = p_L + p_D \quad 2-2$$

Wasserdampfpartialdruck

Der Wasserdampfpartialdruck p_D in der Gleichung 2-3 ist ein Teil des Gesamtdruckes p und macht mit 0 bis 4 % im Vergleich zu den trockenen Bestandteilen des Wasserdampf-Gas-Gemisches nur einen geringen Anteil aus. Somit kann der Wasserdampfpartialdruck Werte zwischen 0 hPa und maximal 40 hPa annehmen (Willems et al., 2018).

$$p_D \cdot V = m_D \cdot R_D \cdot T \quad 2-3$$

Absolute Luftfeuchte

Luft kann somit im begrenzten Maße Wasser in Form von Wasserdampf aufnehmen. Die absolute Luftfeuchte c_D ist dabei das Verhältnis aus der Masse des Wasserdampfes zum Luftvolumen. Diese ist entsprechend der allgemeinen Gasgleichung für ideale Gase abhängig von der absoluten Temperatur der Luft, vom Druck und der spezifischen Gaskonstante des Wasserdampfes und wird auch als absolute Luftfeuchtigkeit bezeichnet. Sie wird nach der Gleichung 2-4 berechnet (Vogdt et al., 2022).

$$c_D = \frac{m_D}{V} = \frac{p_D}{R_D \cdot T} \quad [kg/m^3] \quad 2-4$$

m_D	[kg]	Feuchtigkeitsmenge
V	[m ³]	Volumen des Gasgemisches
p_D	[h Pa]	Wasserdampfpartialdruck
R_D	[J/(kg K)]	Spezifische Gaskonstante von Wasserdampf

Wasserdampfsättigungsdruck

Sättigung wird als der Zustand bezeichnet, über den hinaus der feuchten Luft kein Wasserdampf zugeführt werden kann. Der sogenannte Wasserdampfsättigungsdruck wird als der Wasserdampfpartialdruck im Sättigungszustand bezeichnet. Dies entspricht einem Wasserdampfpartialdruck bei 100 % Luftfeuchte dessen Überschreitung nicht möglich ist. Dieser nimmt als Funktion der Temperatur mit zunehmender Temperatur exponentiell zu. In einem

geschlossenen Raum wirkt der Wasserdampf-sättigungsdruck auf die umgebende Wandung, ohne das Wasser kondensiert. Sie kann über die Magnus-Formel 2-5 berechnet werden (Vogdt et al., 2022).

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{17,269 \cdot \theta}{237,3 + \theta}} \quad \text{Für } \theta \geq 0 \text{ } ^\circ\text{C} \quad 2-5$$

$$p_s = 610,5 \cdot e^{\frac{21,875 \cdot \theta}{265,5 + \theta}} \quad \text{Für } \theta < 0 \text{ } ^\circ\text{C}$$

p_s	[Pa]	Wasserdampf-sättigungsdruck
θ	[°C]	Lufttemperatur

Relative Luftfeuchte

Der Quotient aus dem Wasserdampfpartialdruck und dem Wasserdampf-sättigungsdruck beschreibt die relative Luftfeuchte in Prozent. Sie ist also ein dimensionsloser Wert und kennzeichnet das Verhältnis dieser. Dies entspricht dem Verhältnis tatsächlicher absoluter Feuchte zu absoluten Feuchtigkeit, die die Luft bei einer bestimmten Temperatur maximal aufnehmen kann und wird nach 2-6 berechnet. Die Abhängigkeit des Wasseraufnahmevermögens der Luft von der Temperatur wird durch das Carrier-Diagramm dargestellt (vgl. Abbildung 2-1) (Vogdt et al., 2022).

$$\phi = \frac{p_D}{p_s} \quad 2-6$$

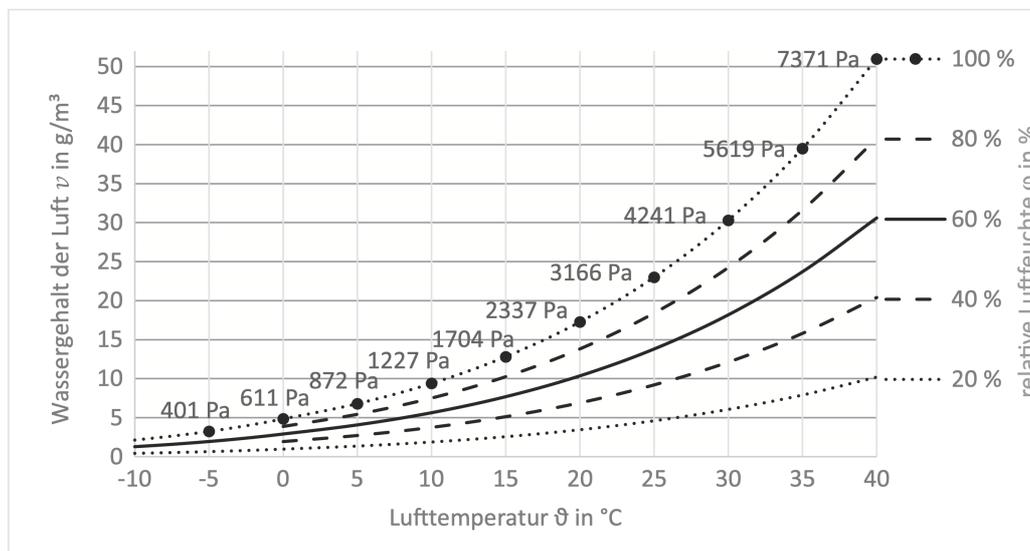


Abbildung 2-1: Carrier-Diagramm – Zusammenhang Lufttemperatur, absolute und relative Feuchte (Vogdt et al., 2022)

Taupunkttemperatur

Als Taupunkttemperatur wird diejenige Temperatur bezeichnet, bei der der Wasserdampf-sättigungsdruck der Luft erreicht ist. In diesem Zustand beträgt die relative Luftfeuchte 100 %. Unterschreitet die feuchte Luft die Taupunkttemperatur, kommt es zum Wechsel des Aggregatzustands von gasförmig zu flüssig und ein Teil des in der Luft enthaltenen Wasserdampfes tritt als überschüssige Feuchtigkeit in flüssiger Form als Tauwasser aus. Die Taupunkttemperatur kann aus der Abbildung 2-2 entnommen werden (Willems et al., 2018).

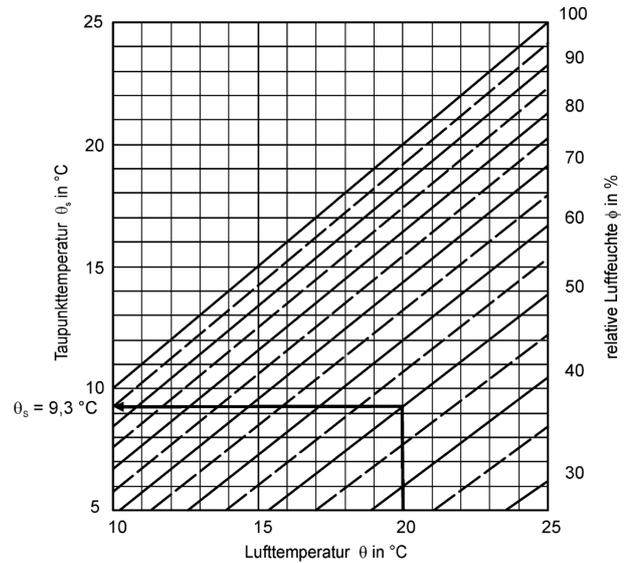


Abbildung 2-2: Taupunkttemperatur θ_s der Luft in Abhängigkeit der relativen Feuchte und Lufttemperatur (Willems, Schild, und Stricker 2018).

Normklima

Gemäß der DIN ISO 2533 wird der Normzustand der Atmosphäre durch den Normdruck $p_n = 1013,25$ hPa, die Normtemperatur 0 °C sowie die Normdichte $1,292$ kg/m³ definiert und bezieht sich auf die Meereshöhe $0,0$ m über NN (DIN ISO 2533, 1979). Bei Wohn- oder wohnähnlicher Nutzung gibt die DIN 4108-2 für die raumseitige Oberfläche eines Bauteils die Mindesttemperatur von $12,6$ °C an, um Schimmelpilzbildung zu vermeiden (DIN ISO 2533, 1979; Willems et al., 2022).

Diffusionsleitkoeffizient

Der Diffusionsleitkoeffizient von Wasserdampf nach 2-7 in ruhender Luft gibt die Menge an Wasserdampf an, die durch 1 m² Luftschicht von 1 m Dicke je Stunde diffundieren, wenn die Dampfdruckdifferenz zwischen den Schichten 1 Pa beträgt (Willems et al., 2018).

$$\delta_a = \frac{D_D}{R_D \cdot T} \quad [\text{kg}/(\text{m s Pa})] \quad 2-7$$

D_D	$[-]$	Diffusionskoeffizient von Wasserdampf in Luft
R_D	$[\text{J}/(\text{kg K})]$	Spezifische Gaskonstante von Wasserdampf
T	$[\text{K}]$	Temperatur

2.1.2 Feuchtetransport

Poröse Baustoffe können je nach Beschaffenheit aus der Umgebung dampfförmiges und flüssiges Wasser aufnehmen, speichern und in Abhängigkeit der Klimabedingungen wieder abgeben. Maßgebend hierbei ist die Porosität, die durch Kapillaren und Poren bestimmt wird. Diese stellen enge Hohlräume und Verzweigungen im Material dar, in denen sich Wassermoleküle anlagern können. In der Abbildung 2-3 sind die Transportmechanismen nach Rose abgebildet. Dabei kann der Feuchtetransport im dampfförmigen und flüssigen Zustand in Abhängigkeit der Porengröße gleichzeitig ablaufen (Vogdt et al., 2022; Wernecke, 2003; Willems et al., 2022).

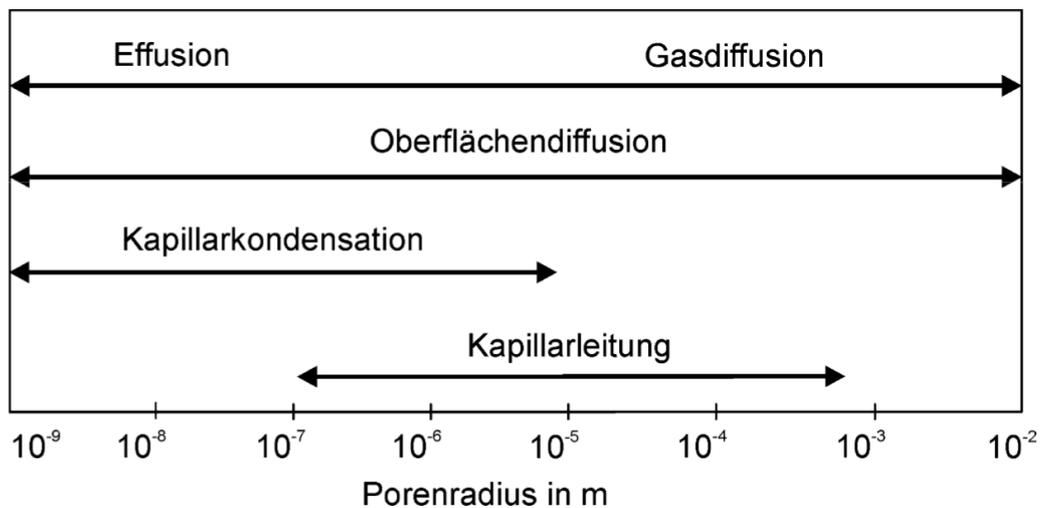


Abbildung 2-3: Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit des Porenradius (Willems et al., 2018)

Die Transportphänomene können dabei durch ein Modell aus idealer Kugelpore und Zylinderpore beschrieben werden. Mit zunehmender Bauteilfeuchte ergeben sich sechs unterschiedlichen Stufen, die in der Abbildung 2-4 schematisch dargestellt werden (Willems et al., 2022).

In **Stufe I** findet bei geringem Feuchtegehalt des Materials nur Wasserdampfdiffusion in den Porenräumen statt. Die Wassermoleküle werden an den trockenen Porenwänden adsorbiert und bleiben aufgrund der hohen Adsorptionskräfte gebunden. **Stufe II** setzt ein, wenn der Sorptionsprozess so lange fortgesetzt wird, bis sich an allen Porenwänden eine mono- oder multimolekulare Filmschicht gebildet hat. Dabei ist die Dicke der Filmschicht durch den Porenradius begrenzt und hängt von der relativen Luftfeuchte der Umgebung ab. Steigt der Feuchtegehalt weiter an, werden in **Stufe III** durch Kapillarkondensation zunächst die kleineren Poren vollständig mit Wasser gefüllt. In den Zylinderporen erfolgt der Wassertransport mit zunehmendem Feuchtegehalt durch Kapillarleitung. Nachdem in die größeren Kugelporen genug Wasserdampf eindiffundiert und der Sorbatfilm an den Porenwände angewachsen ist, erfolgt der Feuchtetransport in **Stufe IV** durch die effektivere Oberflächendiffusion. Je dicker die Filmschicht wird, desto beweglicher werden die Wassermoleküle. **Stufe V** ist gekennzeichnet durch eine ungesättigte Porenwasserströmung, bei der in der Kugelpore eine Luftblase eingeschlossen ist. Erst in **Stufe VI** ist diese vollständig

wassergesättigt und der Wassertransport kann vollständig nach dem Gesetz für laminare Strömungen in Kapillaren erfolgen (Darcy-Gesetz) (Vogdt et al., 2022; Willems et al., 2018).

In den Stufen I bis III findet der Feuchtetransport ausschließlich durch **Wasserdampfdiffusion** statt. Der sogenannte Sorptionsbereich befindet sich im Segment niedriger relativer Luftfeuchten. Das treibende Potential der Wasserdampfdiffusion ist das Wasserdampfpartialdruckgefälle. Dabei erfolgt der Transport vom höheren zum niedrigeren Potential. Bei der **Oberflächendiffusion** in Stufe IV ist die treibende Kraft die relative Luftfeuchte. Sie setzt erst ab einer relativen Luftfeuchte von 50 bis 60 % ein und überlagert sich bei teilgefüllten Kapillarporen mit der Wasserdampfdiffusion. Unter isothermen Randbedingungen verlaufen diese in die gleiche Richtung. Bei nicht isothermen Randbedingungen sind die Gradienten des Wasserdampfpartialdruckes und der relativen Feuchte entgegengesetzt, so dass Oberflächendiffusion und Wasserdampfdiffusion gegenläufig sind. Die Flüssigwassertransportmechanismen durch **Kapillarleitung** der Stufen V und VI finden erst ab einer relativen Feuchte von 90 - 95 % statt. Es ist nicht möglich, einem bestimmten Feuchtegehalt eine bestimmte Transportart zuzuordnen. Aus den Porengrößenverteilungen und Sorptionsisothermen der betrachteten Baustoffe können lediglich Rückschlüsse auf dominierende Transportmechanismen in bestimmten Feuchtebereichen gezogen werden (Willems et al., 2018).

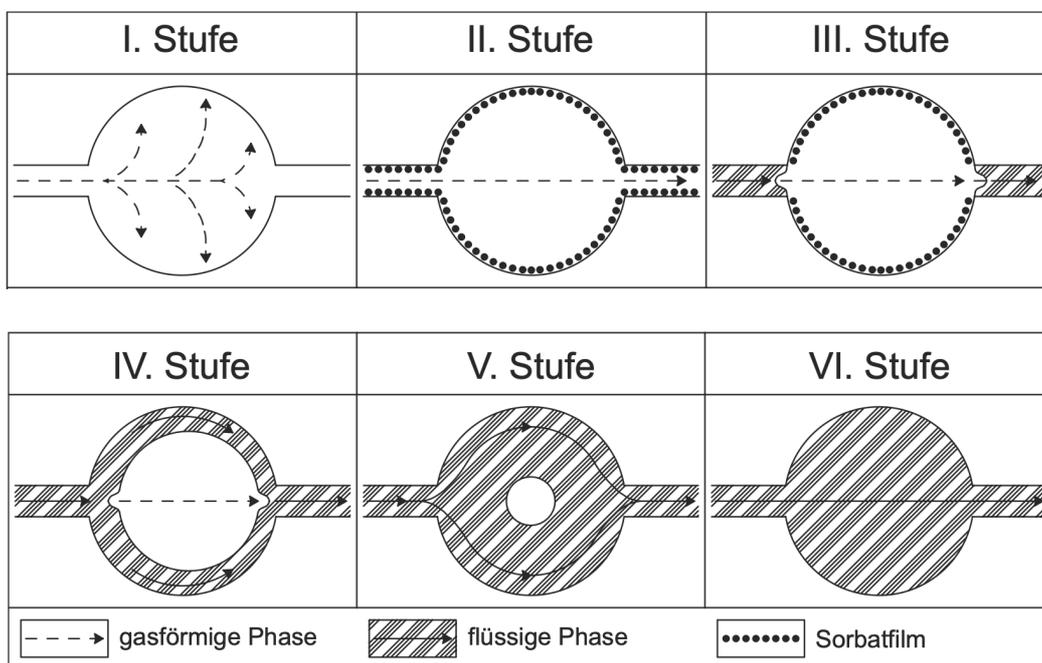


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung in einer Kapillarpore (Vogdt et al., 2022)

2.1.3 Materialfeuchte und Sorptionsisotherme

Die Gleichgewichtsfeuchte hygroskopischer Materialien kennzeichnet den Feuchtegehalt, der sich bei der Lagerung unter konstanter relativer Luftfeuchte im Material einstellt. Das Vorhandensein von Wasser im Material führt zu einem Wasserdampfdruck an der Oberfläche (vgl. Abbildung 2-5). Das Gleichgewicht ist erreicht, sobald die Wasserdampfdrücke in der Luft und im Festkörper ausgeglichen sind und es findet kein Feuchteaustausch mehr statt. Die Gleichgewichtsfeuchte bezieht sich auf einen statischen Zustand. Sind Luftströmungen vorhanden, findet ebenfalls ein definierter Wasserdampfaustausch statt, jedoch ist dieser dynamisch und von weiteren Parametern abhängig (Wernecke, 2003).

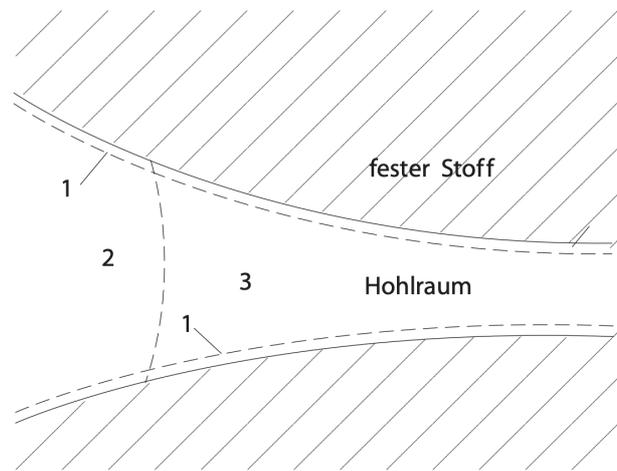


Abbildung 2-5: Kapillare in einem festen Stoff
1: Adsorbatwasser an der Randfläche,
2: Wasserdampf im Öffnungsbereich,
3: Flüssigwasser im Inneren (Wernecke 2003)

Der charakteristische Zusammenhang zwischen der relativen Luftfeuchte und dem Gleichgewichtsfeuchtegehalt eines Stoffes bei einer konstanten Temperatur kann durch die sogenannten Sorptionsisotherme beschrieben werden. Der Vorteil besteht darin, dass von einer relativen Luftfeuchte auf die Gleichgewichtsfeuchte des Materials geschlossen werden kann, ohne die jeweiligen Transportmechanismen zu berücksichtigen. Bei steigender relativer Luftfeuchtigkeit nimmt die Materialfeuchte durch Adsorption zu. Das Wasser wird dabei in den mono- bis multimolekularen Schichten der inneren Porenoberfläche angelagert. Mit zunehmender Luftfeuchte ab ca. 50 % werden die Poren weiter mit Wasser gefüllt. Sinkt die relative Luftfeuchtigkeit, verringert sich die Materialfeuchte durch Desorption. Häufig zeigt sich ein leichter Hysterese Effekt zwischen Adsorption und Desorption. Dies kann auf die Unterschiede im Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten im Bereich der Porenwände und andere Effekte der Porenraumgeometrie zurückgeführt werden. Sie ist für die meisten Materialien nur gering ausgeprägt, weshalb die Adsorptionsisotherme zur Charakterisierung ausreichend ist. Der Einfluss der Temperatur ist im üblichen Temperaturbereich gering und kann im Allgemeinen vernachlässigt werden. Der Abbildung 2-6 kann der typische S-förmige Verlauf der Sorptionsisotherme entnommen werden. Sie werden gravimetrisch bestimmt und können bis zu einer relativen Luftfeuchte von etwa 95 % ausreichend genau ermittelt werden. Oberhalb dieser relativen Luftfeuchte können diese aufgrund der großen Steigung nicht mehr ausreichend genau bestimmt werden (Willems et al., 2018, 2022).

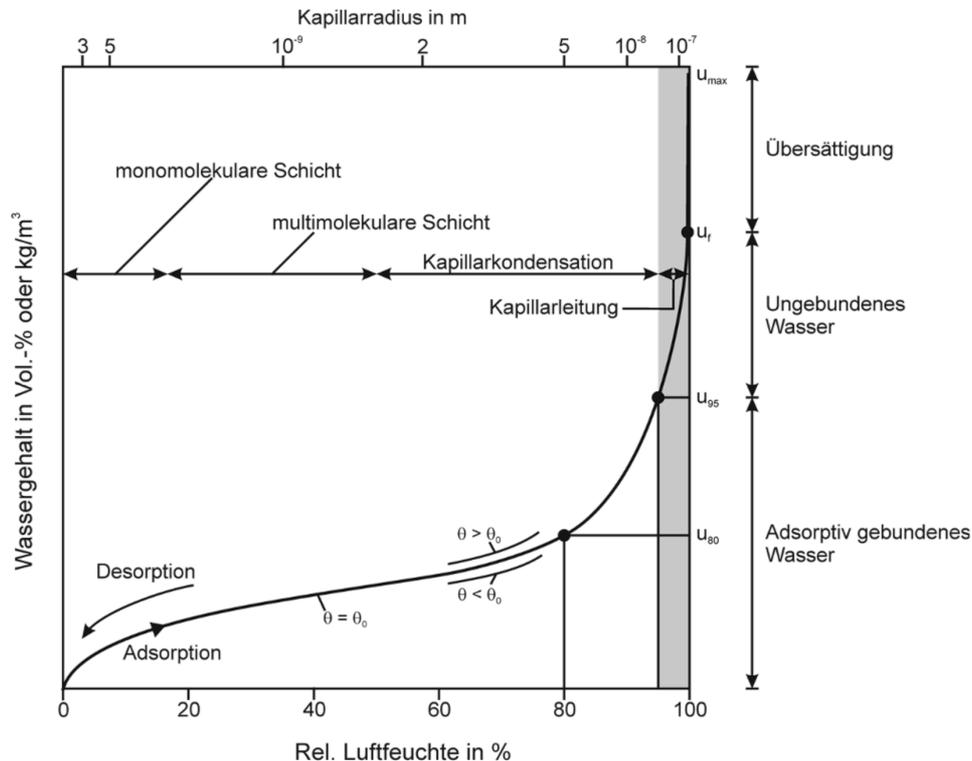


Abbildung 2-6: Schematische Darstellung einer Sorptionsisotherme (Willems et al., 2018)

Unter Zuhilfenahme der Sorptionsisotherme kann der masse- oder volumenbezogene Feuchtegehalt in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte angegeben werden. Der massebezogene Feuchtegehalt u gibt das Verhältnis der Masse des im Material enthaltenen Wassers zur dessen Trockenmasse an und wird nach der Gleichung 2-8 ermittelt (Willems et al., 2018).

$$u = \frac{m_W}{m_t} \cdot 100 = \frac{m_f - m_t}{m_t} \quad [\text{Gew.-%}] \quad 2-8$$

m_W	[kg]	Wasseranteil im Baustoff
m_f	[kg]	Masse des feuchten Baustoffes
m_t	[kg]	Masse des trockenen Baustoffes

Die Sorptionsisotherme sind abhängig von der Struktur, den Inhaltsstoffen und der Oberfläche. Sie stellen eine charakteristische Funktion des jeweiligen Materials dar und müssen empirisch ermittelt werden. Eine Vorausberechnung ist aufgrund der komplexen Eigenschaften wie Materialzusammensetzung oder Verarbeitung nicht möglich. Mit der Veränderung der Zusammensetzung oder der Konsistenz von Materialien, verändert sich auch deren Sorptionsverhalten. Aufgrund der Komplexität wird empfohlen jede Sorptionsisotherme experimentell zu bestimmen (Cui et al., 2020; Wernecke, 2003).

2.2 Hygroskopisches Verhalten von Holz

Holz ist ein inhomogener, anisotroper und poröser Werkstoff, dessen Eigenschaften richtungsabhängig sind und sehr stark von den Umweltbedingungen beeinflusst werden. Grund hierfür ist der natürliche Charakter des Holzes als biologisch erzeugter Rohstoff. Im Vergleich zu anderen Materialien wie Beton oder Stahl sind materialspezifische Besonderheiten zu berücksichtigen. Hierzu gehört das hygroskopische Verhalten und der damit verbundene erhebliche Feuchteinfluss auf nahezu alle Eigenschaften. Als ein Gewebe aus sehr unterschiedlichen Zellelementen erfüllen sie im lebenden Baum verschiedene Funktionen wie die Wasserleitung, die Festigung und Wasserspeicherung. Diese Strukturelemente des Gewebes sind auch für die Feuchtaufnahme und den Feuchtetransport verantwortlich. Das Holz kann modellhaft in das Mikro- und Makrosystem unterteilt werden (vgl. Abbildung 2-7). Während das Mikrosystem für die Wasseraufnahme aus der Luft, d.h. das hygroskopische Verhalten, verantwortlich ist, übernimmt das Makrosystem die Aufnahme von flüssigem Wasser oder anderen Flüssigkeiten wie Klebstoffen oder Beschichtungen. Das anisotrope Verhalten des Holzes ergibt sich durch den Faserverlauf und den zylindrischen Aufbau der Jahresringe auf der makroskopischen Ebene. Dadurch ergeben sich drei Hauptrichtungen (Niemz & Sonderegger, 2021):

- längs zur Faserrichtung (L)
- radial (R), d. h. parallel zu den Holzstrahlen bzw. von der Rinde zum Mark
- tangential (T), d. h. parallel zum Jahrringverlauf

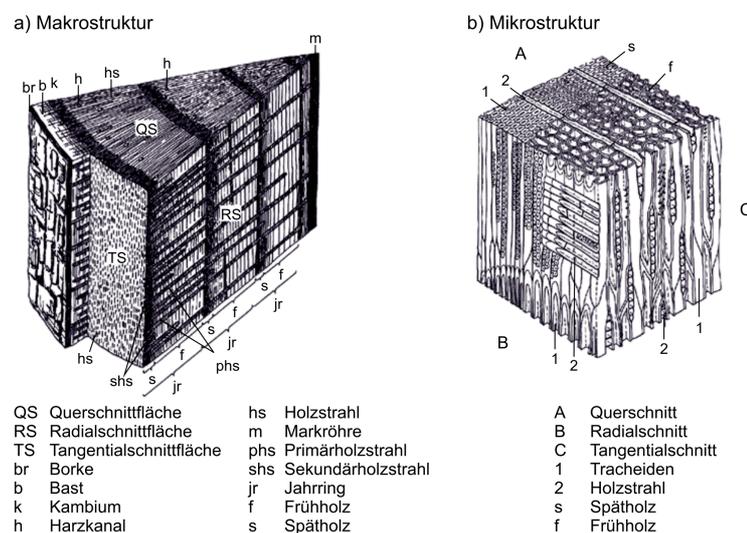


Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz: (a) Makrostruktur von Nadelholz (b) Mikrostruktur von Nadelholz (Niemz & Sonderegger, 2021)

Die Eigenschaften des Holzes können in physikalische, mechanische und chemische Eigenschaften eingeteilt werden und unterliegen vielfältigen Einflüssen. Zu den wichtigsten gehören der strukturelle Aufbau des Holzes (z. B. Rohdichte, Faser-Last-Winkel, Schnittrichtung) sowie die Vorgeschichte des Holzes (z. B. Alterung, Korrosion, Pilz- und Insektenbefall). Aus mechanischer Sicht handelt es sich beim Holz um ein poröses Verbundmaterial. Je nach Rohdichte beträgt der Porenanteil zwischen 6 und 93 %. Im Durchschnitt jedoch zwischen 50 und 60 %. Dadurch besitzt das Holz eine

große innere Oberfläche. Dieses Hohlräume-System absorbiert Wasser aus der Luft und kann darüber hinaus über kapillare Transportprozesse flüssiges Wasser aufnehmen (Niemz & Sonderegger, 2021).

Holzfeuchte

Als Holzfeuchte wird der Wasseranteil in der Holzsubstanz bezeichnet. Dabei werden zwischen drei Grenzzuständen unterschieden:

- Darrtrocken: Es ist kein Wasser im Holz vorhanden und die Holzfeuchte beträgt 0 %
- Fasersättigung: Das gesamte Mikrosystem des Holzes, das Hohlräume-System in den Zellwänden, ist mit Wasser gefüllt - je nach Holzart zwischen 22 und 35 %
- Wassersättigung: Das Mikro- und das Makrosystem des Holzes, Hohlräume und Zelllumina, sind maximal mit Wasser gefüllt - je nach Dichte des Holzes zwischen etwa 31 % (Pockholz) und etwa 770 % (Balsa).

Der Wasseranteil des Holzes wird dabei in gebundenes und freies Wasser unterteilt. Ersteres befindet sich unterhalb des Fasersättigungspunktes in der Zellwand, während freies Wasser oberhalb des Fasersättigungspunktes im Zellhohlraum vorliegt. Der Fasersättigungspunkt wird als der Feuchtegehalt bezeichnet, bei dessen Überschreitung sich die physikalischen und mechanischen Eigenschaften des Holzes in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt nicht ändern. Somit treten Schwind- und Quellverformungen nur unterhalb des Fasersättigungspunktes auf (vgl. Abbildung 2-8). Außerdem kennzeichnet er den höchstmöglichen Gehalt an gebundenem Wasser. Dieser wird erreicht, wenn das Holz mit wasserdampfgesättigter Luft umgeben ist, wenn also die relative Luftfeuchtigkeit 100 % beträgt. Der Fasersättigungsbereich sinkt mit Erhöhung der Temperatur und der Rohdichte (Niemz & Sonderegger, 2021; Samuel V. Glass, Samuel L. Zelinka, 2021).

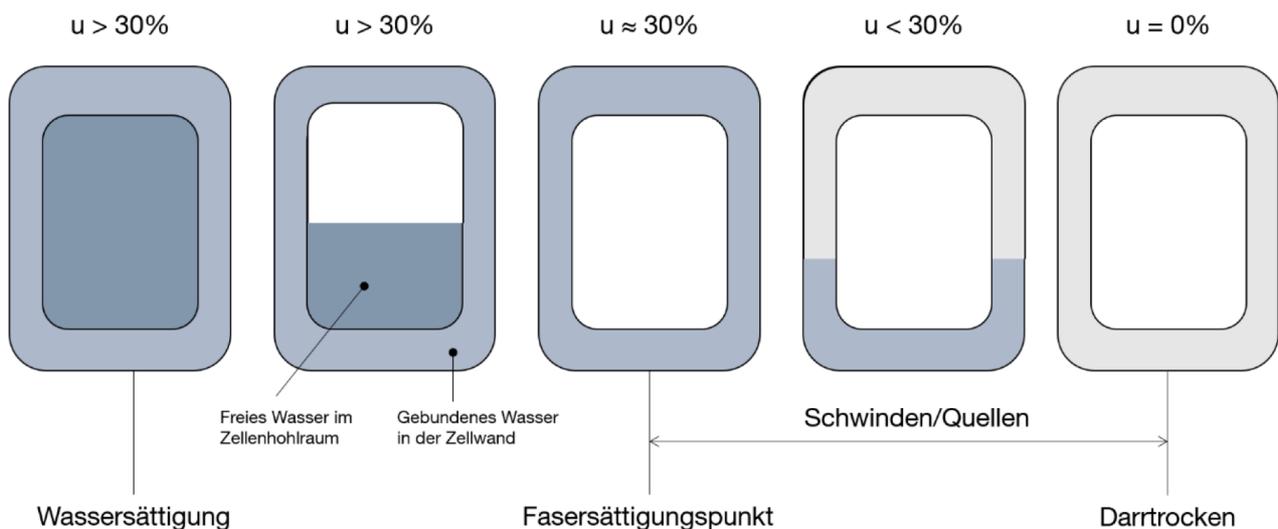


Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Holzzelle – Wasserabgabe und -aufnahme der Holzzelle unter- und oberhalb des Fasersättigungsbereiches (Marina Ineichen, 2020)

Holzfeuchtemessung

Der Feuchtegehalt kann sowohl direkt als auch indirekt ermittelt werden. Wobei die direkte Bestimmung des Feuchtegehaltes vorzuziehen ist. Prinzipiell sind dabei zwei Wege gangbar:

- Ermittlung des Wasseranteils durch Darren oder Feuchteextraktion
- Messung von, mit dem Feuchtegehalt korrelierenden, physikalischen Eigenschaften

Da bei der direkten Bestimmung des Feuchtegehalts meist die Darmmethode als Basismessung dient, wird im Folgenden nur auf diese eingegangen. Sie ist ein sehr exaktes Prüfverfahren, bei dem ein repräsentativer Prüfkörper aus dem zu untersuchenden Holz entnommen wird. Aufgrund ihrer Genauigkeit wird die Darmmethode insbesondere für wissenschaftliche Untersuchungen oder als Vergleichsmethode zur Kalibrierung von Messgeräten angewendet. Zunächst wird die Masse des feuchten Prüfkörpers bestimmt. Danach ist der Prüfkörper bei $103\text{ °C} \pm 2\text{ K}$ in einem gut belüfteten Trockenschrank bis zur Massenkonstanz zu darren. Die Massekonstanz ist dann erreicht, wenn die prozentuale Massendifferenz zwischen zwei Wägevorgängen geringer als 0,1 % ist. Der zeitliche Abstand dieser beträgt zwei Stunden. Somit kann nach Formel 2-9 mithilfe der ermittelten Darmmasse der Feuchtegehalt des Prüfkörpers ermittelt werden (DIN EN 13183-1, 2002; Niemz & Sonderegger, 2021).

$$w = \frac{m_w - m_0}{m_0} \cdot 100 \quad [M.-%] \quad 2-9$$

w	[M.-%]	Holzfeuchte in Massenprozent
m_w	[g]	Massen des im Holz enthaltenen Wassers
m_u	[g]	Masse des feuchten Holzes
m_{atr}	[g]	Masse des darrtrockenen Holzes

Das Verfahren des elektrischen Widerstandes beruht auf dem korrelierenden Zusammenhang zwischen der Holzfeuchte und dem elektrischen Widerstand des Holzes. Denn dieser steigt mit abnehmendem Feuchtegehalt (vgl. Abbildung 2-10). Er wird dabei beeinflusst von der Schnittrichtung, der Holzart, der Rohdichte und der Temperatur des Holzes. Dabei ist der Temperatureinfluss erheblich,

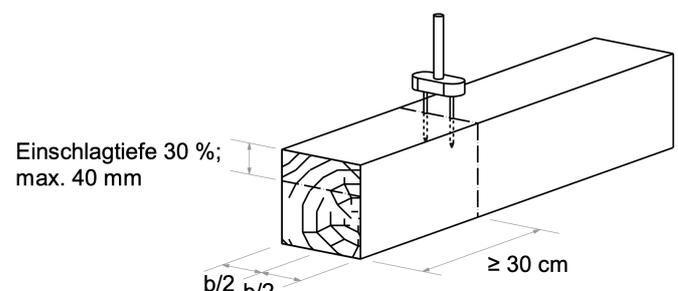


Abbildung 2-9: Elektronische Holzfeuchtemessung Optimale Position zur Bestimmung der Holzfeuchte mit isolierten Einschlagselektroden (Holzbau Deutschland-Institut e.V. 2023)

weshalb softwareseitig meist Kennlinien für verschiedene Holzarten und eine Temperaturkompensation integriert sind. Zur Bestimmung der Holzfeuchte werden in der Praxis Holzfeuchtemessgeräte nach der DIN EN 13183-2 genutzt. Dabei werden teilsolierte Einschlagelektroden in definiertem Abstand in das Holzstück eingeschlagen. Die Oberflächenfeuchte wird bei einer Einschlagtiefe von 5 mm gemessen. Wie in der Abbildung 2-9 dargestellt beträgt die optimale Messtiefe zur Bestimmung der mittleren Holzfeuchte 30 % der Holzdicke. Dabei müssen die Messstellen frei von sichtbaren Fehlern wie z.B. Risse, Rinde, Äste oder Harzgallen sein, damit die Messungen nicht beeinträchtigt werden. Auf der Oberfläche aufgetragene Mittel zur chemischen Behandlung sowie Holzschutz- oder Flammschutzmittel können die Genauigkeit der Messung beeinflussen und erfordern deshalb eine Korrektur. Es ist zu beachten, dass für die Holzfeuchtemessung in Holzwerkstoffplatten Messgeräte erforderlich sind, die für die unterschiedlichen Werkstoffe und ihre Bindemittel bzw. Klebstoffe kalibriert sind. Diese weisen im Vergleich zu Vollholz eine geringere Ausgleichsfeuchte auf. Aufgrund von Materialstreuungen kommt es je nach Feuchtegehalt zu Abweichungen bei den Messergebnissen zwischen ca. 0,5 % - bei ca. 7 % - und 2 bis 4 % - bei ca. 20 Masse-% (Holzbau Deutschland-Institut e.V., 2023). Es können auch Feuchtwerte weit oberhalb des Fasersättigungsbereichs, mit einem Messbereich bis zu 200 %, gemessen werden. Durch unterschiedliche Gestaltung der Elektroden können diese Verfahren u. a. zur Feuchtemessung an Schnittholz, Furnier und Spänen genutzt werden. Zur Schnellbestimmung des Feuchtegehaltes werden kleine, tragbare Feuchtemessgeräte in Taschenrechnergröße angeboten. Das Messprinzip wird vielfach zur Online-Kontrolle in der Industrie genutzt (Niemz & Sonderegger, 2021).

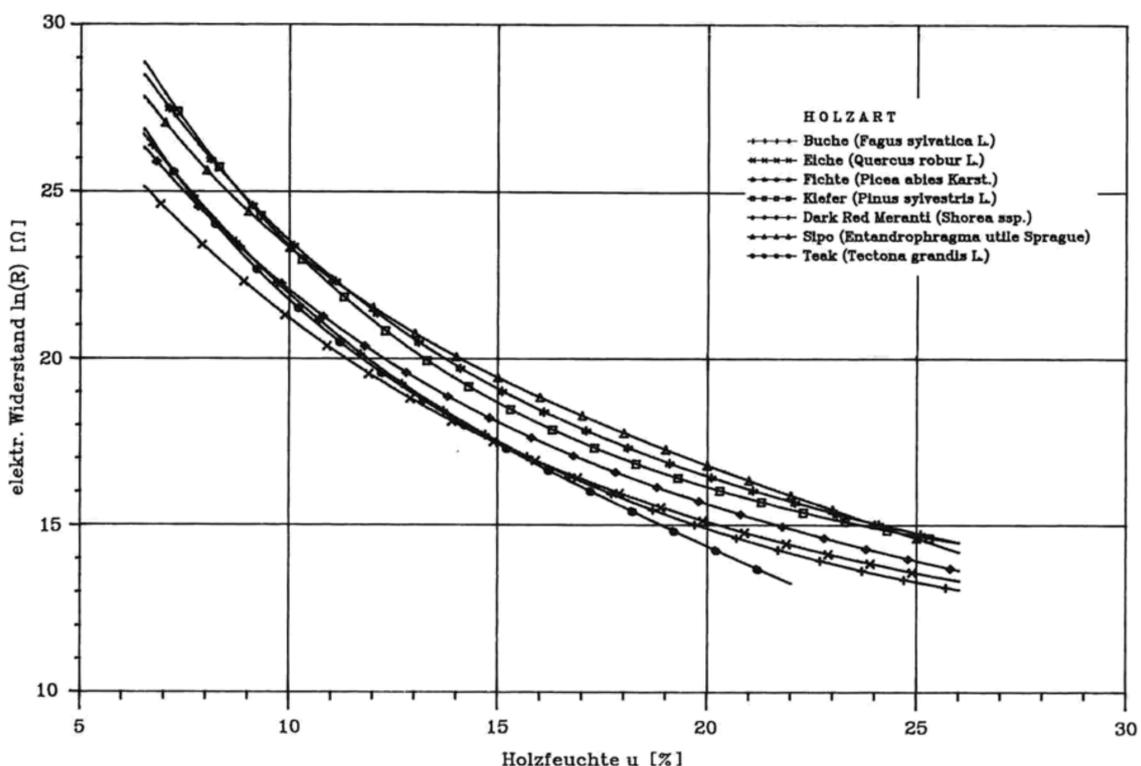


Abbildung 2-10: Vergleich der Widerstandskennlinien verschiedener Holzarten (Du et al., 1991)

Holz kann als ein System miteinander verbundener, kommunizierender Kapillaren betrachtet werden. Entscheidend für den Feuchtetransport über das Makrosystem sind der Durchmesser, das Volumen bzw. die Querschnittsform der Strukturelemente wie Poren, Tüpfel oder Holzstrahlen. Durch ein vorhandenes Dampfdruckgefälle verdunstet Wasser an den ausgelasteten Menisken, diffundiert durch die luftgefüllten Poren an die gegenüberliegenden und kondensiert an den nicht ausgelasteten Menisken. Unterhalb des Fasersättigungsbereichs sind Diffusionserscheinungen die wesentlichen Feuchtetransportmechanismen. Diffusion beschreibt alle molekularen Bewegungsvorgänge, bei denen Moleküle aufgrund eines Konzentrationsunterschiedes wandern. Diffusionsvorgänge in Holz können vereinfachend durch das erste Fick'sche Gesetz nach der Gleichung 2-10 beschrieben werden (Niemz & Sonderegger, 2021).

$$g = -D \cdot \frac{\vartheta_c}{\vartheta_x} \quad [\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})] \quad 2-10$$

g	$[\text{kg}/(\text{m}^2\text{s})]$	<i>Pro Zeit- und Flächeneinheit transportierte Feuchtemenge</i>
D	$[\text{m}^2/\text{s}]$	<i>Diffusionskoeffizient</i>
ϑ_c/ϑ_x	$[\text{kg}/\text{m}^4]$	<i>Konzentrationsgradient</i>

Als wichtigste Kenngröße für Diffusionsvorgänge wird häufig die dimensionslose Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl μ verwendet. Dieser gibt an, um wievielfach der Widerstand größer ist als der Widerstand einer Luftschicht gleicher Dicke. Der Wasserdampfdiffusionswiderstand ist abhängig von der Holzfeuchte, der Rohdichte und der Schnittrichtung und wird nach der Formel 2-11 berechnet.

$$\mu = \frac{\delta_a}{\delta} \quad [-] \quad 2-11$$

δ_a	$[\text{kg}/(\text{m s Pa})]$	<i>Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient der Luft</i>
δ	$[\text{kg}/(\text{m s Pa})]$	<i>Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizient des Prüfmateri als</i>

Der s_d Wert nach 2-12 gibt an, wie dick die Luftschicht sein muss, um den gleichen Diffusionswiderstand zu besitzen, wie der angegebene Baustoff mit der Schichtdicke d . Somit können Bauteilschichten unterschiedlicher Dicke miteinander verglichen werden (Schroeder, 2019).

$$s_d = \mu \cdot d \quad 2-12$$

Wie in Kapitel 2.1.3 handelt es sich auch bei Holz um ein hygroskopisches Material. Kommt trockenes Holz mit der Umgebungsluft in Kontakt, nimmt es Feuchtigkeit aus der Luft auf. Dieser Vorgang wird als Sorption bezeichnet und tritt bis zum Fasersättigungsbereich auf. Das so eingelagerte Wasser wird als „gebundenes“ Wasser bezeichnet. Bei der Sorption werden drei Phasen unterschieden, die mit zunehmender Feuchteaufnahme nacheinander ablaufen. Im Bereich von 0 bis 6 % findet die Chemiesorption statt. Physisorption oder Adsorption, bezeichnet den Holzfeuchtebereich von 6 bis 15 %. Kapillarkondensation findet ab 15 % bis zum Fasersättigungsbereich statt (vgl. Abbildung 2-11) (Niemz & Sonderegger, 2021).

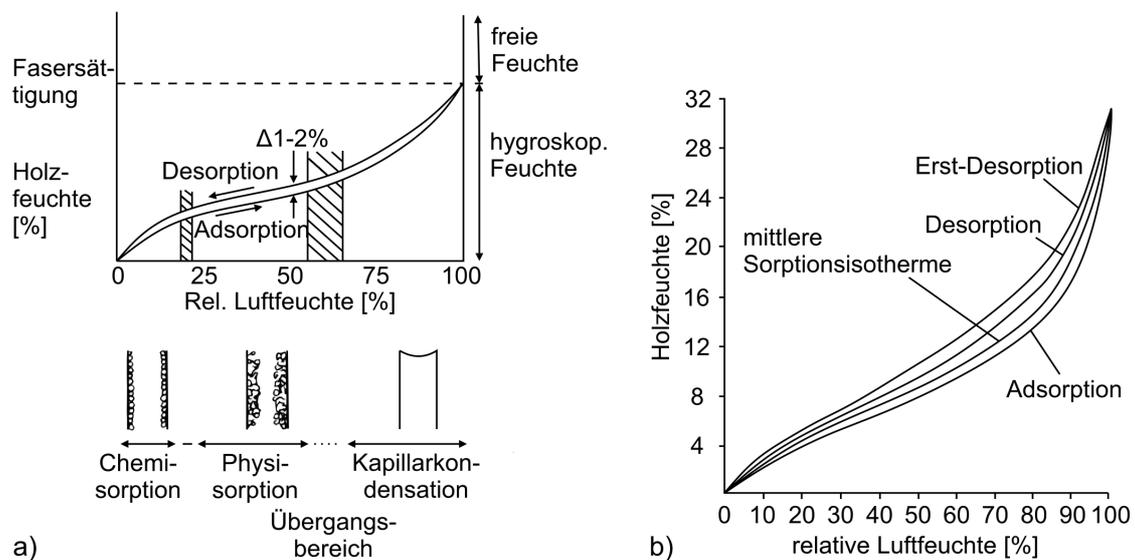


Abbildung 2-11: Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers a) Phasen der Sorptionsisothermen b) Hystereseeffekt bei erster Desorption von noch nie getrocknetem Holz sowie mehrfache Desorption (Niemz & Sonderegger, 2021)

Bei Raumtemperatur sind die Unterschiede in der Gleichgewichtsfeuchte zwischen den Holzarten bei niedrigen und mittleren relativen Flüchtigkeiten gering, werden aber in den Bereichen von hoher relativer Feuchtigkeit beträchtlich. Der Kontakt mit Wasser führt zu einer schnellen Änderung der Holzfeuchte, während die Änderungen durch die Wasserdampfsorption langsam verlaufen. Im Gegensatz zur flüssigen Wasseraufnahme, kann die Wasserdampfsorption den Feuchtigkeitsgehalt des Holzes nicht über die Fasersättigung bringen. Die Gleichgewichtsfeuchte zwischen den verschiedenen Holzarten variiert stark. So haben Baumarten wie Eibe und Robinie eine deutlich niedrigere Ausgleichsfeuchte als Fichte oder Buche. In der Abbildung 2-12 ist diese in Abhängigkeit der Temperatur für Fichte dargestellt (Niemz & Sonderegger, 2021; Samuel V.Glass, Samuel L. Zelinka, 2021).

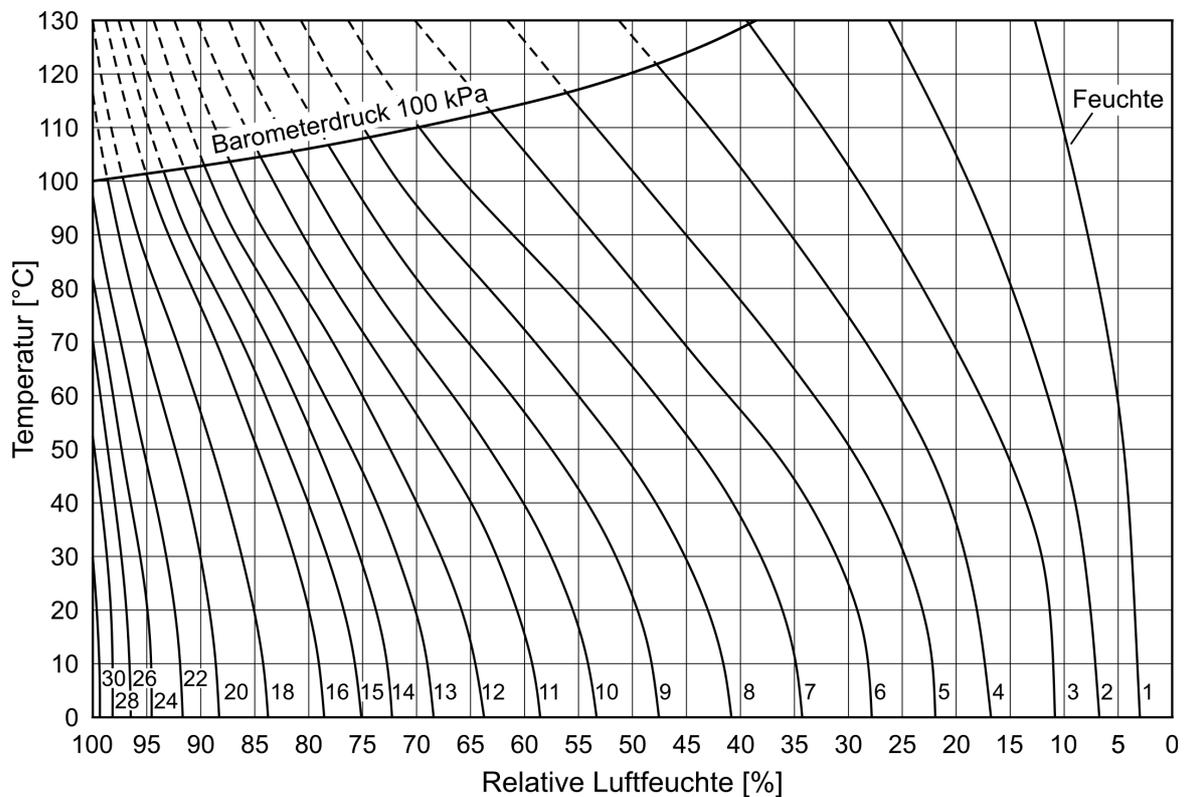


Abbildung 2-12: Ausgleichsfeuchte von Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur (Niemz & Sonderegger, 2021)

2.2.1 Schwind- und Quellverhalten unter Feuchteänderung

Eine Änderung der relativen Luftfeuchte führt zwangsläufig zur Änderung des Feuchtegehalts von Holz und damit zu Quell- und Schwinderscheinungen. Bei der Feuchteaufnahme von Holz in den Phasen von der Anlagerung des Wassers in den Poren des Mikrosystems bis zum Erreichen des Fasersättigungsbereichs kommt es zu einer Volumenzunahme, die als Quellung bezeichnet wird. Der Grund hierfür ist die Einlagerung der Wassermoleküle in den Hohlräumen, was zu einer Ausdehnung der Zellwand und der Wabenstruktur führt. Umgekehrt kommt es bei Feuchteabgabe in diesem Bereich zur Volumenkontraktion, die als Schwinden bezeichnet wird. Dieser Vorgang wird beim Erreichen des Fasersättigungsbereichs weitgehend beendet, weshalb Quell- und Schwindverformungen nur unterhalb des Fasersättigungsbereichs auftreten. Folglich ist Holz formstabil, wenn die Gleichgewichtsfeuchte größer ist als der Fasersättigungspunkt. Das Quell- und Schwindverhalten von Holz wird deutlich durch den anatomischen Aufbau, den Lignin Anteil, die Rohdichte und den Spätholzanteil, beeinflusst. Im Durchschnitt liegt das Längsschwindmaß der europäischen Hölzer bei 0,4 %, das Radialschwindmaß bei 4,3 % und das Tangentialschwindmaß bei 8,3 %. Somit schrumpft bzw. quillt es am meisten in Richtung der Jahresringe (tangential), etwa halb so stark über die Ringe (radial) und nur wenig entlang der Faser (längs). Abbildung 2-13 verdeutlicht am Beispiel von Rotbuchenholz das unterschiedliche Quellmaß in den drei Hauptschnittrichtungen und die durch Schwinderscheinungen auftretende Verzerrung der Querschnitte von Holz (Niemz & Sonderegger, 2021; Samuel V.Glass, Samuel L. Zelinka, 2021).

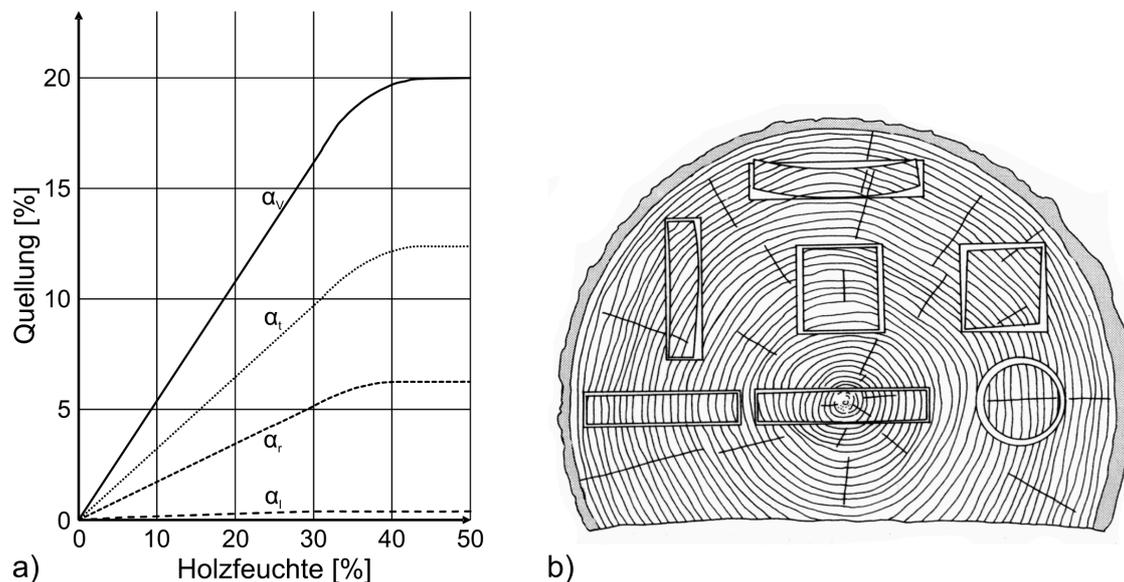


Abbildung 2-13: Quell- und Schwindverhalten von Holz: (a) Quellung von Rotbuchenholz: α_l längs, α_r radial, α_t tangential, α_v Volumen, (b) Verzerrung von Holz durch unterschiedliche Schwindung (Niemz & Sonderegger, 2021)

Die geringe Längsquellung bzw. -schwindung wird mit der Orientierung der Fibrillen in Faserlängsrichtung und dem relativ geringen Anteil quer zur Faser liegender Zellwände begründet.

Ursachen für den Unterschied zwischen Radial- und Tangentialrichtung sind der Verlauf und die Eigenschaften von Früh- und Spätholz in den Jahrringen, die unterschiedlichen Mikrofibrillen-Winkel in der Zellwand und die verstärkende Wirkung der Holzstrahlen. Das unterschiedliche Quell- und Schwindverhalten in den drei Hauptschnittrichtungen hat eine erhebliche Verformung des Holzes und innere Spannungen zur Folge. Auf diesem Effekt beruht auch das Wellig werden von Tischlerplatten, das sich u. a. häufigen der Markierung der Stäbchen nach einem längeren Alterungsprozess widerspiegelt. Gut erkennbar ist das oft an sehr alten, furnierten Möbeln. Bei unsachgemäßer Trocknung (d. h. bei einem zu hohen Feuchtegefälle zwischen den äußeren und inneren Schichten des Holzes) kommt es insbesondere bei Holz mit hoher Rohdichte zu erheblichen Rissbildungen (insbesondere in Radialrichtung). Denn mit zunehmender Rohdichte steigt auch die

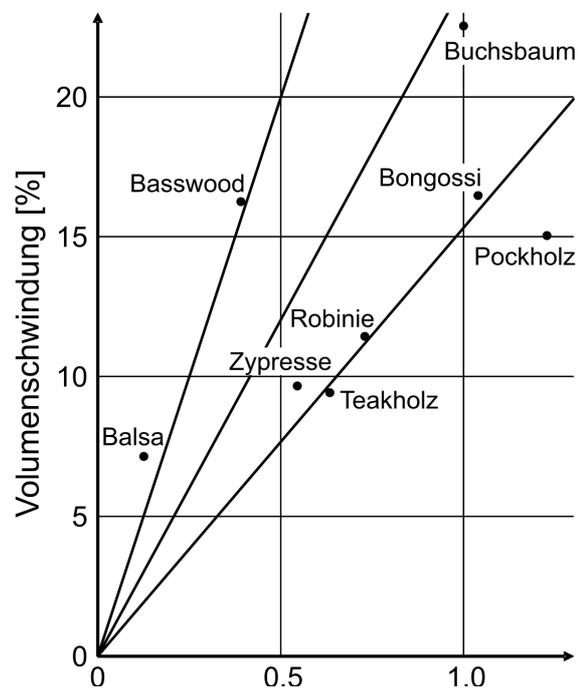


Abbildung 2-14: Einfluss der Darrdichte auf die Volumenschwindung verschiedener Holzarten (Niemz und Sonderegger 2021)

Volumenzunahme bei der Quellung (vgl. Abbildung 2-14). Gegenüber Chemikalien zeigt Holz ein anderes Quell-/Schwindverhalten als gegenüber Wasser. Dabei ist die Quellung in sauren Medien kleiner als in Wasser, in basischen Medien dagegen größer (Niemz & Sonderegger, 2021).

Wird darrtrockenes Holz befeuchtet und dabei am Quellen behindert, so treten je nach Holzart und Schnittrichtung unterschiedlich hohe Quelldrücke auf. Diese Kräfte können in Faserrichtung Werte bis zu 30 N/mm^2 oder senkrecht zur Faserrichtung bis zu 4 N/mm^2 betragen und wurden bereits im alten Ägypten zum Sprengen von Felsen genutzt. Der Quellungsdruck steigt mit dem Feuchtegehalt und der Dichte des Holzes. Die Spannungen sind so hoch, dass schnell die Proportionalitätsgrenze überschritten wird und es zu plastischen Verformungen kommt. Wird die Quellung/Schwindung durch äußere Kräfteeinwirkungen verhindert, kann das Zellgefüge des Holzes verändert werden. Somit tritt bei behinderter Quellung und nachfolgender Wiedertrocknung auf den ursprünglichen Feuchtegehalt eine dauernde Schwindung, das heißt plastische Verformung, ein. Bei Proben, die mehrfach in der Quellung behindert wurden, eine ständige Reduzierung der Probenabmessung in Richtung der Quellbehinderung ein (vgl. Abbildung 2-15). Diese Erkenntnisse sind bei Passungen zu berücksichtigen. Ein trocken eingepasster Axtstiel, der anschließend behindert quillt und danach rückgetrocknet wird, wird also lockerer werden. Dieses Verhalten kann als Beispiel von sorptionsbedingter Druckermüdbarkeit des Holzes angeführt werden und liegt im Wesen aller abgestorbenen Pflanzengewebe (Perkitny, 1960).

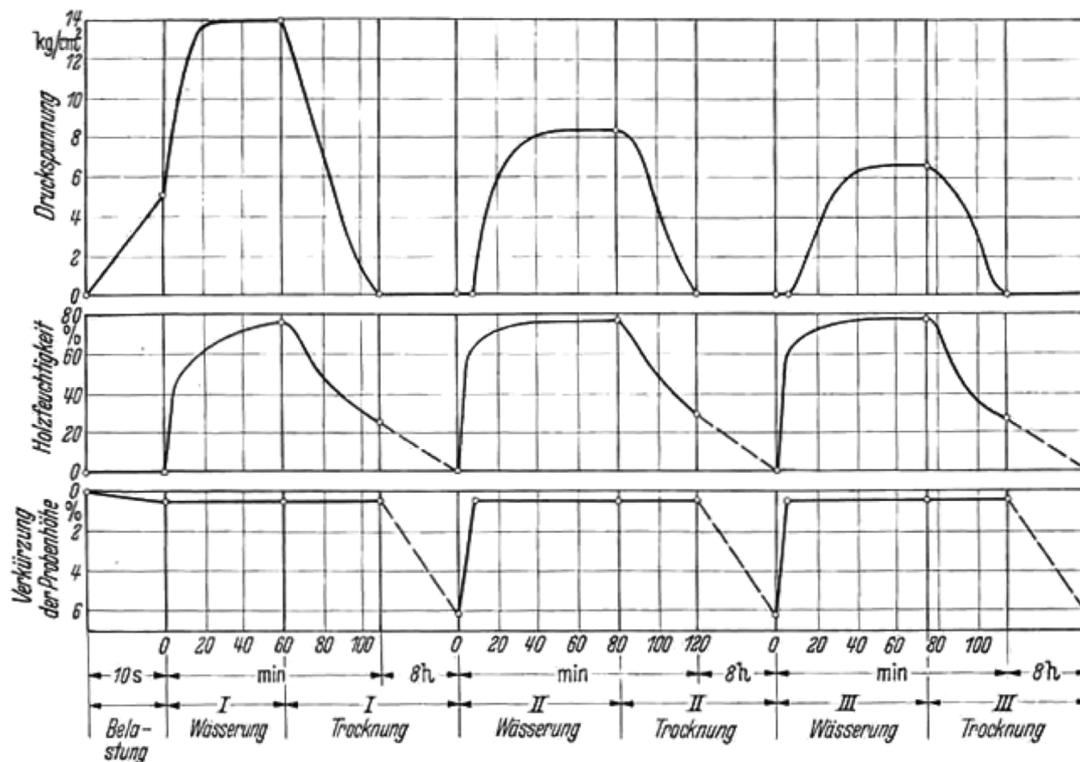


Abbildung 2-15: Änderungen des tangential gerichteten Druckes, der Feuchtigkeit und der Höhe einer Kiefersplintprobe in Abhängigkeit von der Wässerungs- und Trocknungszeit bei einer Anfangsfeuchtigkeit von 0% und einer Druck-Vorspannung von 5 kg/cm² (Perkitny, 1960)

Kenngößen zur Beurteilung des Quell- und Schwindverhaltens von Holz sind das Quellmaß und das Schwindmaß. Dabei wird das Quellmaß auf den Darrzustand, das Schwindmaß auf den maximal gequollenen Zustand bezogen. (Niemz & Sonderegger, 2021):

Die Schwindung, welche am Fasersättigungspunkt beginnt, setzt sich ziemlich linear fort, bis das Holz vollständig trocken ist. Wenn die Oberflächenfeuchte unter den Fasersättigungspunkt fällt, beginnt sie zu schrumpfen, obwohl das Innere noch ziemlich nass sein kann und nicht schrumpft. Die genaue Form der Schwindkurve mit Feuchtigkeitsgradienten hängt von mehreren Variablen ab, vor allem von der Größe und Form des Werkstücks, der Holzart und den verwendeten Trocknungsbedingungen. (Samuel V. Glass, Samuel L. Zelinka, 2021).

2.2.2 Schäden an Holztafelgemälden

Tafelbilder bestehen aus Holzbrettern, die durch Querstreben, Dübel oder Klebstoffe wie Leim miteinander verbunden sind. Zum Fügen der Holzbretter wurden diese stumpf oder überlappend gestoßen oder es wurden Nut- und Federverbindungen verwendet. Bretter aus massiven Holzstämmen wurden entweder mittels Radial- oder Tangentialschnitt herausgeschnitten. Deshalb kann sich bei der Untersuchung der Holzkonstruktionen für Tafelbilder auf diese beiden Schnittrichtung eingeschränkt werden. Hierbei wird Holz aus dem Kernholz eines Baumes bevorzugt. Die Präsenz von Ästen ist nicht selten und wird entweder mit Fasern bedeckt oder herausgeschnitten und durch Holz höherer Qualität ersetzt. Die meisten Kunstwerke entstanden auf lokal verfügbaren Holzarten. Zu den gängigsten Nadelhölzern, welche als Untergrund verwendet wurden, gehören Holzarten wie Kiefer, Tanne, Lärche und Fichte. Bei den Laubholzarten wurden neben Eiche und Pappel auch Ahorn, Kastanie, Buche oder Esche verwendet. Die bemalte Oberfläche besteht aus Farbschichten, aufgetragen auf Stoff und Vorbereitungsschichten wie Gesso (Kos & Duin, 2014).

Wie in Kapitel 1.1 genannt wurde waren Schwankungen der relativen Luftfeuchte und die damit einhergehende Volumenänderung des Holzes, die Ursache für die meisten Schäden an Kunstwerken. So kann aus Abbildung 2-16 entnommen werden, wie die Durchbiegung des Holztafelgemäldes „Le Couronnement d'Epines“ beinahe zeitgleich den Änderungen der relativen Luftfeuchte folgte (Colmars, 2013).

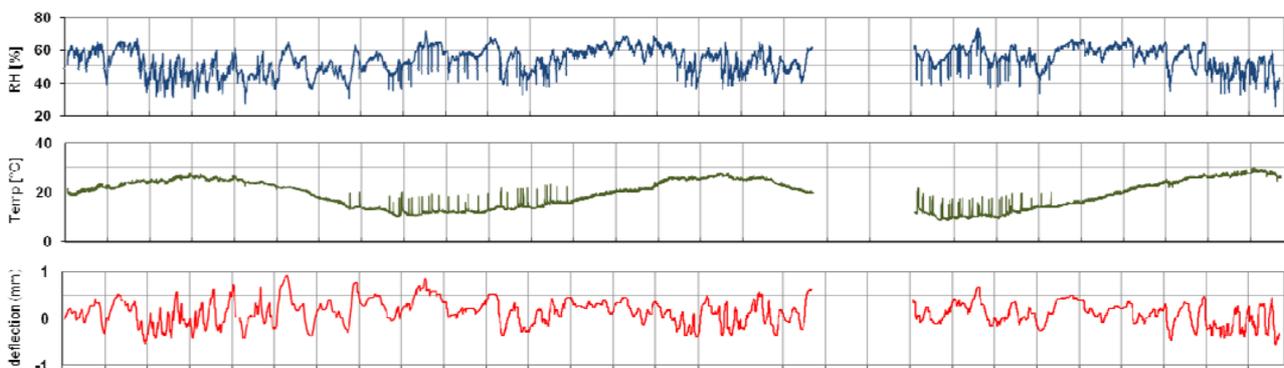


Abbildung 2-16: Relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur hinter der Platte sowie Durchbiegung der oberen Platte über einen Zeitraum von 2 Jahren (Colmars 2013).

Schwankungen der relativen Luftfeuchte können verschiedene Arten von Schäden an Kunstwerken verursachen. Der Feuchtigkeitsaustausch mit der Umgebung beginnt an der freiliegenden Holzoberfläche und dringt langsam durch die Zellstruktur ein. Das langsame Eindringen führt zu einem Feuchtegradient durch die Dicke des Holzes. Dies führt zu ungleichmäßigen Dimensionsänderungen in den gesamten Strukturen, welche lokale innere Eigenspannungen und somit mechanischen Schäden zur Folge haben (Kos & Duin, 2014). Bei historischen Objekten wie zum Beispiel bei Tafelbildern, die durch einen Rahmen in ihrer Bewegung gehemmt sind, können starke Spannungen entstehen, die zu bleibenden Deformationen und schließlich zu Rissen führen können. Bei massiven Holzobjekten kann ausgeprägtes tangenciales Schwinden nicht durch die

weitaus geringeren radialen Dimensionsänderungen ausgeglichen werden und es kommt zu inneren Spannungen. Wiederholte Schwankungen der relativen Luftfeuchte können zu Kumulation Effekten im Sinne einer irreversiblen Verformung führen. Risse schwanken somit nicht um dieselben Öffnungswerte und öffnen sich irreversibel weiter. Messungen mithilfe von akustischen Emissionen haben gezeigt, dass die Schadensbeeinträchtigung größer ist, je schneller diese Schwankungen ablaufen (Alexandra Troi, 2009).

Auch wenn der hölzerne Untergrund ein Bestandteil des Kunstwerkes ist, wird der Wert eines Gemäldes stets von der bemalten Oberfläche definiert. Bei zu niedriger relativer Luftfeuchte kann es zum Austrocknen von organischen Bestandteilen der Tafelgemälde kommen. Folgen sind Eigenspannungen, Versprödung im Materialgefüge und das Abplatzen von Farbschollen. Steigt die Luftfeuchte zu sehr an, kommt es zum Quellen organischer Materialien und verwendete Bindemittel können dadurch ihre Klebkraft verlieren. Außerdem können weniger hygroskopische Malschichten beim Ausdehnen von Holz und Leinwand abgesprengt werden (Fachgruppe Restaurierung, 2015). Besonders gefährdet sind inhomogene Systeme wie das eines Holztafelgemäldes. Die einzelnen Schichten aus Holz, Leinwand, Leim, Kreidegrund, Öl- und Temperafarben, Wachs und Lacke reagieren jeweils unterschiedlich auf Änderungen von Temperatur und Feuchte. Es kommt somit zu Spannungen in und zwischen den Materialien. Vor allem das ausgeprägte Quell- und Schwindverhalten des Leims spielt bei Holztafelbildern die dominierende Schadensrolle. Wegen der Anisotropie des Holzes wird die Farbfassung in unterschiedliche Richtungen gedehnt bzw. gestaucht. Aus der Abbildung 2-17 wird deutlich, dass sich ein Kreidegrund deutlich weniger dehnt als Holz (Alexandra Troi, 2009; Mecklenburg Marion, Tumosa Charles, Erhardt David, 1994).

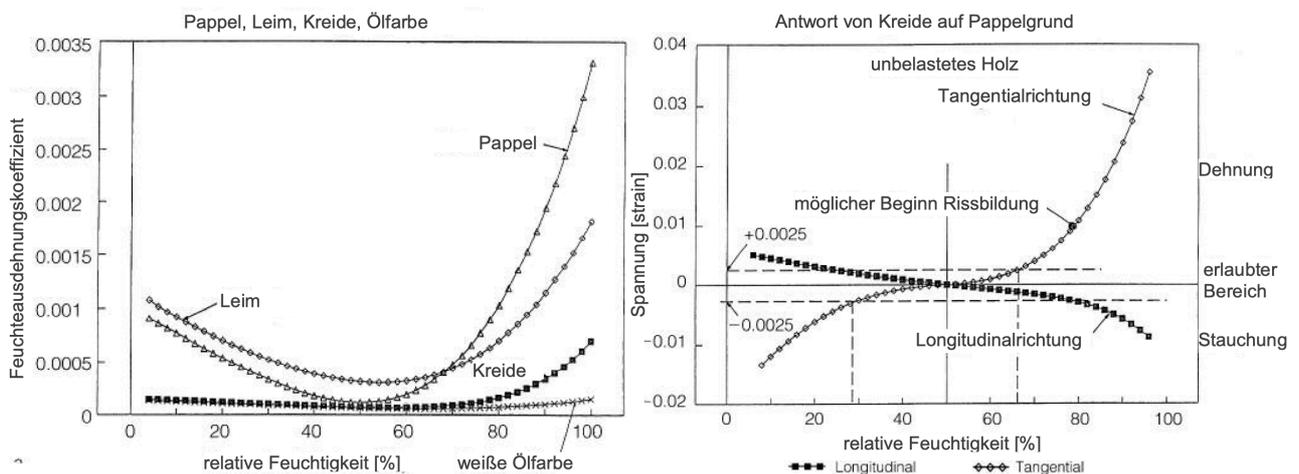


Abbildung 2-17: Links: Feuchteausdehnungskoeffizient für Pappel, Leim, Kreidegrund und Ölfarbe. Rechts: von Ausgangsfeuchte 50 % berechnete kombinierte Dehnung und Stauchung für Kreidegrund auf Pappel in Faserrichtung und quer dazu (Alexandra Troi, 2009; Mecklenburg Marion, Tumosa Charles, Erhardt David, 1994)

Bei einem starken Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit kommt es somit zu Rissen in Kreidegrund und Farbschicht. Diese verlaufen parallel zur Faser, da sich das Holz quer zu dieser stärker ausdehnt. Kommt es zum Austrocknen des Holzes aufgrund einer zu niedrigen relativen Luftfeuchte, kann es parallel zur Faserrichtung zum Aufstellen von Kanten kommen, da die Farbschicht durch die tangential schwindende Holzunterlage gestaucht wird (Alexandra Troi, 2009).

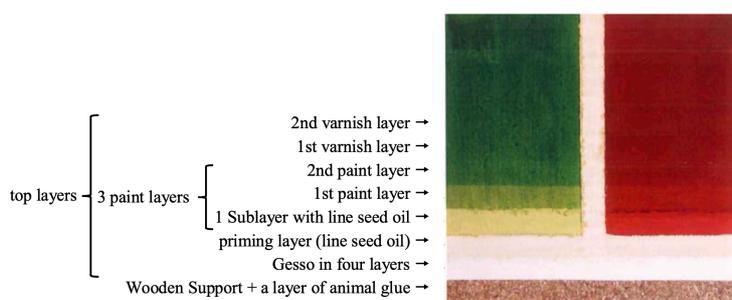
Aufgrund der diffusionshemmenden Malschichten auf Holztafelgemälden, kommt es zu einer asymmetrischen Feuchtesorption und Desorption. Dies hat einen Feuchtigkeitsgradienten zur Folge. Durch diese eingeschränkte Holzbewegung auf der Rückseite der Platte kommt es zu Kompressionsschädigung der äußeren Zellwände während Zyklen mit einer hohen relativen Luftfeuchte. Aufgrund der plastischen Verformungen erholen sich die Zellwände nur unvollständig zu ihren ursprünglichen Abmessungen. Die relative Luftfeuchte kann nicht nur mechanisch bedingte Schäden hervorrufen, sondern auch der Grund für biologische Verschlechterungsfaktoren sein. So können zu hohe Feuchtegehalte in Holz und Umgebung, Schimmelbefall begünstigen (Kos & Duin, 2014).

2.2.3 Einfluss von Farbschicht und Beschichtung

Holztafelbilder sind gekennzeichnet durch einen mehrschichtigen Aufbau. Der typische Aufbau besteht aus Vorbereitungsschichten, mehreren Farbschichten und Firnis (vgl. Abbildung 2-19). In der Tabelle 2-2 sind die hierfür übliche Materialien, die in der Zeitspanne von 1883 bis 1914 verwendet wurden, gelistet (De Backer et al., 2018; Hendrickx et al., 2016).

Tabelle 2-2: Übliche Beschichtungsmaterialien von Holztafelgemälden

Vorbereitungsschichten	Malschichten
Leim	Ölfarben
Kreide	Lack
Leinwand	
Eitempera	
Wachs	



Das hygrothermische Verhalten dieser Platten wird durch die Dampfdurchlässigkeit des Holzes und der Barrierewirkung der verschiedenen Materialschichten gesteuert. Deshalb sind die hygrischen Materialeigenschaften aller Schichten und ihr Zusammenspiel erforderlich, um zuverlässige Annahmen der lokalen Feuchtegehaltsgradienten im Objekt zu treffen. Die unterschiedlichen

Abbildung 2-19: Zusammensetzung der Schichten von alten Holztafelgemälden (De Backer u. a. 2018)

Durchlasskoeffizienten verschiedener Schichten führen zu einem asymmetrischen Feuchtegehalt. Dies führt zu unterschiedlichen Verformungen und Spannungen. Überschreiten diese die Festigkeiten entstehen Risse und es kommt zum Abblättern der Farbschicht (De Backer et al., 2018). Teilweise wurden auch die Rückseiten der Tafelbilder gewachst, um die Geschwindigkeit des Feuchtigkeitstransport von und zur Platte zu verringern. In der Literatur wurden quantitative Untersuchungen der Durchlässigkeit von verschiedenen Komponenten, die in einem traditionellen Ölgemälde verwendet wurden, untersucht.

Die Untersuchungen der Beschichtungen wurden meistens mithilfe der genormten Cup Methode durchgeführt (DIN EN ISO 12572, 2017). Der Versuchsaufbau besteht aus einer Box, die in eine Klimakammer platziert wird. Es wird ein Konzentrationsunterschied verursacht indem in der Box eine andere relative Feuchtigkeit wie in der Klimakammer eingestellt wird. Auch hier werden, wie die in Kapitel 2.3.2 vorgestellten, gesättigten Salzlösungen verwendet. Durch den Konzentrationsunterschied erfolgt nach dem ersten

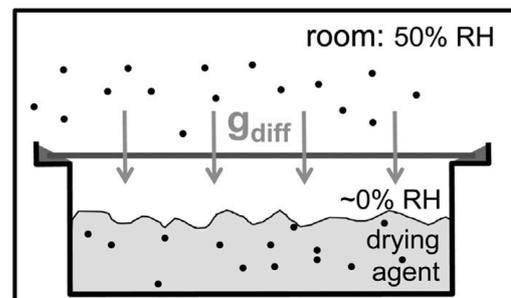


Abbildung 2-18: Cup-Methode (Hendrickx u. a. 2016)

Fick'schen Gesetz Diffusion durch die Grenzschicht, auf der die verschiedenen Beschichtungssysteme aufgetragen werden. Als Trägermaterial werden hier hoch durchlässige Polyethylen Gitter oder Keramikfritten verwendet (Hendrickx et al., 2016).

Die Ergebnisse zeigen den großen Unterschied zwischen den dampföffenen Leinwand- und Präparationsschichten auf der einen Seite und den dampfdichteren Ölfarben und Lacken auf der anderen Seite (Hendrickx et al., 2016). Während die Barrierewirkung von weißem Untergrund, Gesso-Schichten, Eitempera eine hohe Permeabilität vorweist, sorgen Lackschichten, Ölfarben und Harzölfirnissen für eine deutliche Erhöhung des Diffusionswiderstands. Auch Imprägnierungen mit Wachs zeigen eine ähnlich hohe Dampfbeständigkeit auf (vgl. Abbildung 2-20) (Stöcklein et al., 2022).

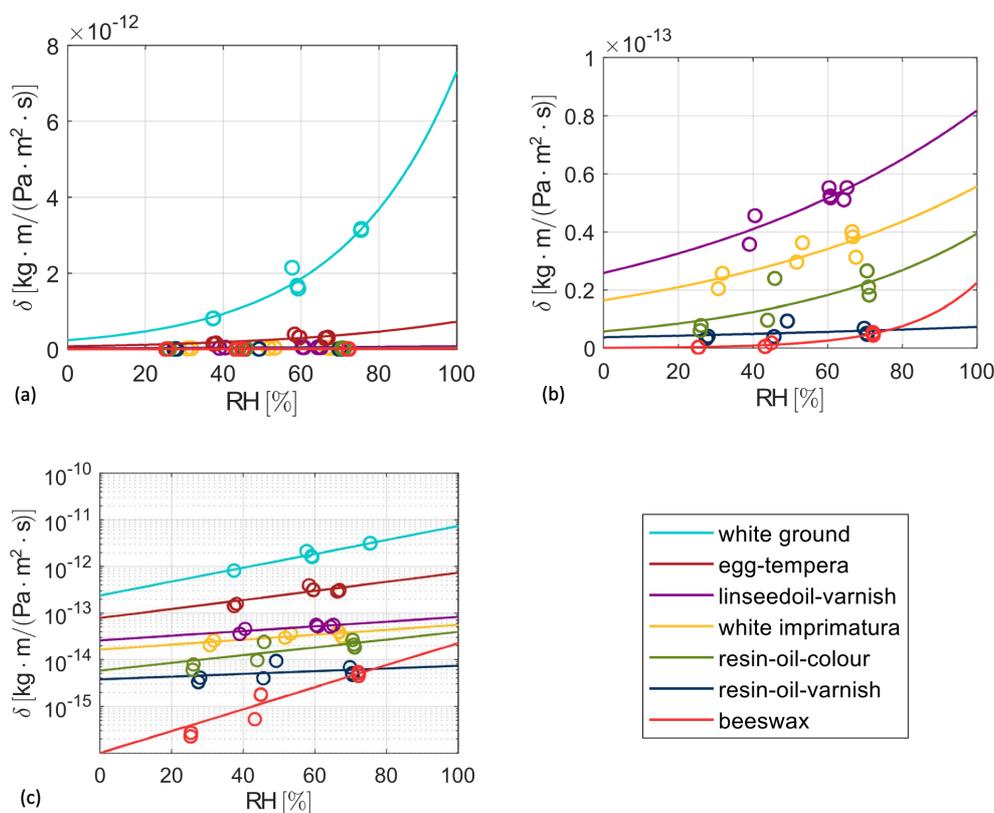


Abbildung 2-20: Vergleich der Permeabilität der in der C-Reihe verwendeten Beschichtungen. Experimentelle Werte (o) und Regressionsfunktionen (-) in drei verschiedenen Maßstäben aufgetragen: (a) Gesamtvergleich, (b) Vergleich der Beschichtungen mit höherem Widerstand (Stöcklein et al., 2022)

Die verwendeten Materialien unterscheiden sich nicht nur in ihrer Permeabilität, sondern auch hinsichtlich ihres Sorptionsverhaltens. Deshalb wurden die Eigenschaften der verschiedenen Beschichtungsmaterialien in Abbildung 2-21 anhand der Parameter a und b ausgedrückt. Während Parameter a die Feuchtedurchlässigkeit der einzelnen Schicht beschreibt, zeigt Parameter b die Feuchteabhängigkeit der Schichten. Dabei fällt auf, dass Wachs zwar den geringsten Feuchtedurchlasswert besitzt, aber gleichzeitig auch die höchste Feuchteabhängigkeit. Das bedeutet, dass bei einer hohen relativen Luftfeuchte der Durchlasswiderstand von Wachs stark

nachlässt (Stöcklein et al., 2022). Leinwand als Trägermaterial ist stark hygroskopisch und nimmt in feuchter Umgebung bis zu 20 % seines Trockengewichts an Feuchtigkeit auf. Der Leim, mit dem die Leinwand fixiert wird, nimmt noch größere Mengen an Feuchtigkeit auf. Die höchste Feuchteabhängigkeit wird bei Bienenwachs beobachtet. Lacke dagegen sind weitgehend feuchteunabhängig. Mit zunehmender relativer Feuchtigkeit nimmt auch die Durchlässigkeit aller Beschichtungen zu. Weiterhin hängt die Reaktion des Gesamtsystems nicht nur von der Feuchtigkeitsaufnahme der einzelnen Schichten ab, sondern auch von deren Fähigkeit, Feuchtigkeit an benachbarte Schichten oder an die Umgebung abzugeben. Auch die Art und Weise, wie der Leim aufgetragen wird, beeinflusst den Feuchtigkeitstransport durch die Leinwand. Abgekühlter, als Gel aufgetragener Leim führt zu einem größeren Wasserdampf Widerstand als warm aufgetragener flüssiger Leim (Hendrickx et al., 2016).

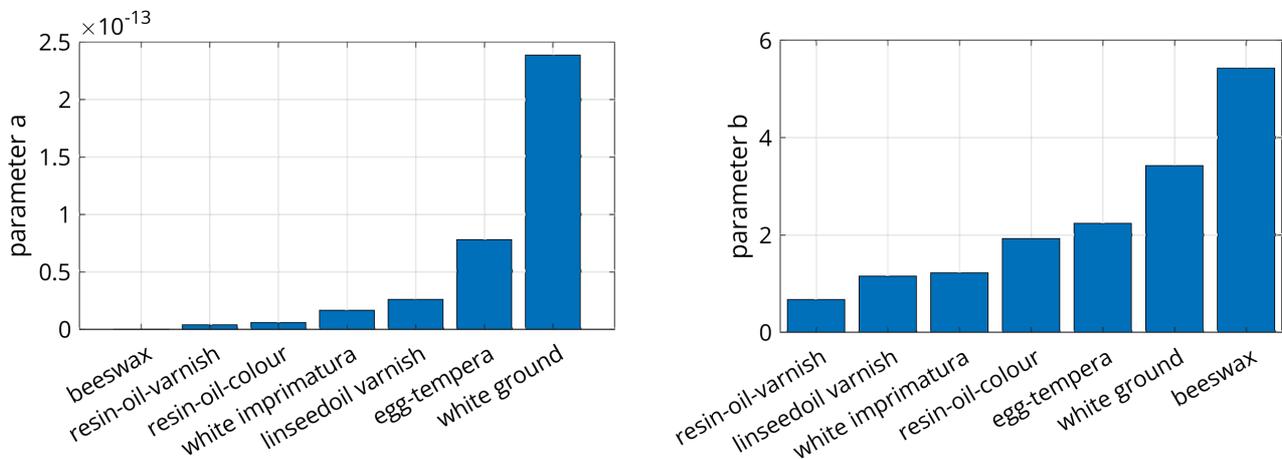


Abbildung 2-21: Vergleich der Parameter a und b einer exponentiellen Regressionsfunktionen für die Permeabilität verschiedener Beschichtungen (Stöcklein u. a. 2022)

Es wurden nicht nur Einzelbeschichtungen untersucht, sondern auch deren Zusammenspiel. Aus der Abbildung 2-22 und der Abbildung 2-23 kann entnommen werden, dass im Allgemeinen bei vergleichbaren Klimarandbedingungen die Gesamtpermanenz abnimmt, wenn weitere Schichten aufgebracht werden und die Dicke zunimmt. Dabei wurde aber beobachtet, dass die einfache Addition der Wasserbeständigkeit einzelner Beschichtungen die Widerstandsfähigkeit eines Gesamtbeschichtungssystems unterschätzt. Bei Untersuchungen zeigte sich, dass die Widerstandsfähigkeit des gesamten Beschichtungssystems doppelt so groß ist wie der Wert, der sich durch Addition der einzelnen Parameter ergeben würde. Es wird vermutet, dass dieses Verhalten mit den Übergangszonen der einzelnen Schichten zusammenhängt. Es sind weitere Studien nötig, um den Widerstandskoeffizienten eines zusammengesetzten Beschichtungssystems bestimmen zu können. Das einfache Summieren der einzelnen Schichten ist nicht ausreichend (Stöcklein et al., 2022).

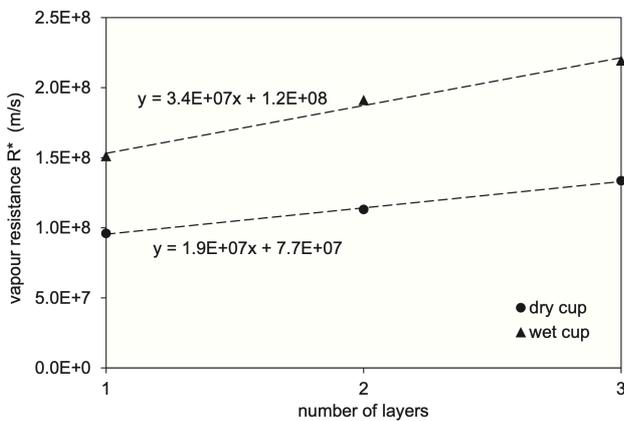


Abbildung 2-22: Gemessener Dampfwiderstand von Leinwand in einfacher, doppelter und dreifacher Lage (Hendrickx u. a. 2016)

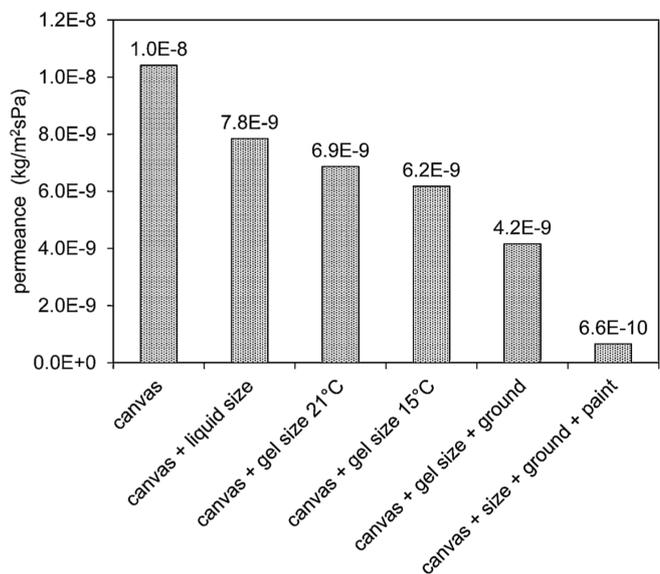
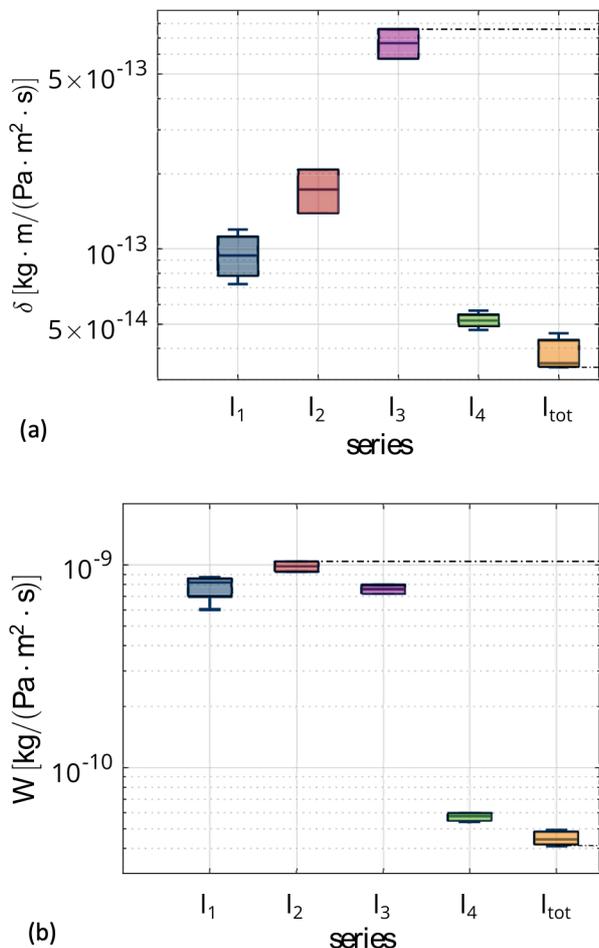


Abbildung 2-23: Durchlässigkeit von Anstrichsystemen mit schrittweiser Zugabe von Zusatzschichten (Hendrickx u. a. 2016)



Jedoch nimmt die Permeabilität nach dem Auftragen einer zweiten Schicht nicht zwangsläufig ab. Aus Versuchen wird erkenntlich, dass nach dem Auftragen einer Vorbereitungsschicht die Gesamtpерmeabilität zunimmt. So kann der Abbildung 2-24 entnommen werden, dass nach dem Auftragen der Schicht I_2 (Kreide) die Durchlässigkeit der zweiten Schicht ansteigt. Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich beim Auftragen der neuen Schicht ein Verbundwerkstoff bildet, der sich in der Leimungsmasse unterscheidet und den Wert beeinflusst. Die größte Steigerung der Permeabilität wird durch das Auftragen der Farbschicht und der Olifa in I_4 erreicht. Die Lackschicht I_{tot} sorgt für die niedrigste relative und absolute Permeabilität. Die Permanenz wird von der widerstandsfähigsten Schicht und nicht von der Gesamtdicke des Beschichtungssystems geleitet. Bei unbekanntem Schichtdicken der einzelnen Schichten und der Beschaffenheit der Übergangszonen wird empfohlen, die Permanenz, d.h. die absolute Durchlässigkeit, ohne Berücksichtigung der Schichtdickenanteile zu berechnen (Stöcklein et al., 2022).

Abbildung 2-24: Vergleich der Permeabilität der Beschichtungen bei RH 0% / 50 (a) die relative Permeabilität δ und (b) die Permeanz W (Stöcklein u. a. 2022)

Das exakte Nachbilden eines solchen Beschichtungssystems wäre aufgrund der eben genannten Komplexität des Zusammenspiels einzelner Materialschichten nicht möglich. Deshalb wurde bei der in Kapitel 3 vorgestellten Versuchsreihe die diffusionshemmende Wirkung anhand von Acrylfarbe mit ähnlich hohen Werten nachgeahmt. Bei Untersuchungen von wässrigen Farben auf Acrylbasis wurde festgestellt, dass die Barriere Eigenschaften mit verringertem Bindemittelgehalt abnehmen. Grund hierfür ist die ungleichmäßige Verteilung der Pigmente. Wässrige Lacke enthalten in der Regel unterschiedliche Additive. Eine geeignete Auswahl dieser Additive stellt für die Forschung eine Herausforderung dar. Auch hier bei diesen Versuchsreihen wurde die Cup-Methode verwendet. Acrylpolymerer und Copolymerer werden aufgrund ihrer guten Haft- und Filmbindungseigenschaften häufig als Bindemittel in Farben verwendet. (Topçuoğlu et al., 2006).

Aus der Abbildung 2-25 kann die drastische Abnahme der Permeabilität mit zunehmendem Bindemittelgehalt entnommen werden. Dieses Verhalten wird durch die Bildung einer porösen

Struktur erklärt, wenn der Bindemittelgehalt von 40 auf 10 % abnimmt. Neben der Porenbildung trägt auch die inhomogene Verteilung der Lackinhaltsstoffe wie Pigmente und Füllstoffe zur Abnahme der Barrierewirkung bei. Es wird darauf hingewiesen, dass eine ungleichmäßige Verteilung von Pigmentkristallen zu einer Erhöhung der Wasserdampfdurchlässigkeit führt. Große Abweichungen in den Messungen befinden sich in den Farben mit einem geringen Bindemittelgehalt. Dies wird durch die inhomogene Struktur und die ungleichmäßige Verteilung der Pigmente und Füllstoffe verursacht. Die meisten gebräuchlichen anorganischen Pigmente und Füllstoffe sind feuchteundurchlässig. Daher findet der Feuchtetransport hauptsächlich im Bindemittelanteil statt. Die häufigsten Elemente wurden als Kohlenstoff, Sauerstoff, Kalzium, Titan, Silizium, Magnesium, Aluminium und Natrium bestimmt. Der Bindemittelanteil in wässriger Acrylfarbe ist ein wichtiger Parameter, da er die homogene oder ungleichmäßige Verteilung der Pigmente, die Porenbildung in der Endstruktur und folglich den Wassertransport und die Barriere Eigenschaften maßgeblich beeinflusst (Topçuoğlu et al., 2006).

Es ist schwierig vorliegende Acrylfarben mit anderen Forschungsergebnissen zu vergleichen, da es sich um eine komplexe Mehrkomponentenmischung mit einer unterschiedlichen Verteilung der Inhaltsstoffe handelt. Deshalb wurden keine Berechnungen von Widerstandswerten durchgeführt, sondern lediglich die diffusionshemmende Wirkung nachgeahmt. Der Feuchtigkeitstransport im inneren einer Holzplatte wird unterhalb des Fasersättigungspunkt meist als Massendiffusionsprozess in einer Dimension senkrecht zur lackierten Oberfläche behandelt. Infolgedessen kann der Feuchtetransport im Material mathematisch durch das Fick'sche

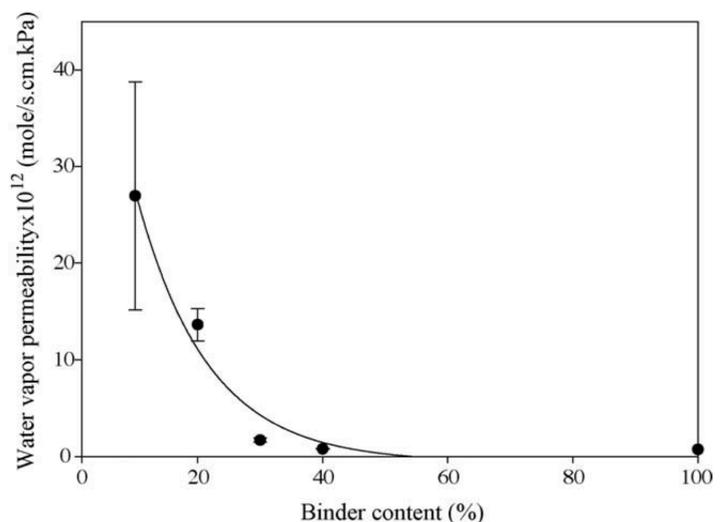


Abbildung 2-25: Wasserdampfdurchlässigkeit von Acrylfarbe in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt (Topçuoğlu, Altinkaya, und Balköse 2006)

Gesetz beschrieben werde. Dieser drückt den Stofftransport als Beziehung zwischen dem Dampfdruck und dem Konzentrationsgradienten aus. Die treibende Kraft ist der Feuchtegehalt im Holz. Holzplatten, die mit Farbe, Lack oder Wachs imprägniert sind, weisen eine geringere Feuchtigkeitsaufnahme auf. Die verminderte Sorption wird durch die Verstopfung der Poren in der Nähe der Oberfläche verursacht. Außerdem nimmt der Dampfdruck der Schichten mit steigender relativer Feuchtigkeit ab (De Backer et al., 2018).

2.3 Befeuchtungsmethoden im Vergleich

2.3.1 Funktionsweise und Auswirkungen von Klimaschränken

Sollen Kunstwerke in Räumlichkeiten ausgestellt werden, deren klimatische Randbedingungen ungeeignet für die Kunstwerke selbst sind, stellen Klimaschränke eine funktionierende Lösung bereit. Diese kommen in der Geschichte der Kunstwerksrestaurierung häufig vor, wenn es darum geht, in einem vom Raumklima abgekoppelten Volumen eine bestimmte relative Luftfeuchte und Temperatur aufrecht zu erhalten. Dabei wird zwischen aktiven und passiven Systemen unterschieden. Während aktive Methoden Geräte zum Heizen, Kühlen, Befeuchten und Entfeuchten der Luft verwenden, konzentrieren sich passive Systeme darauf die Innenraumbedingungen durch eine geeignete Luftdichtheit und Komponenten, die in der Lage sind, Dampfsorptionskapazität hinzuzufügen, zu stabilisieren (Romano et al., 2015). Der grundlegende Unterschied zu aktiven Systemen ist, dass ein Puffersystem eine sinkende oder steigende Tendenz nicht umkehren kann, sondern diese lediglich verlangsamen. Der ausschlaggebende Gedanke basiert darauf, dass durch das Verlangsamen der klimatischen Außenbedingungen das System innerhalb der Vitrine nicht in den Bereich von kritischen Werten gelangt, bei denen Kunstwerke Schaden nehmen würden (vgl. Abbildung 2-26) (Thomson, 1977).

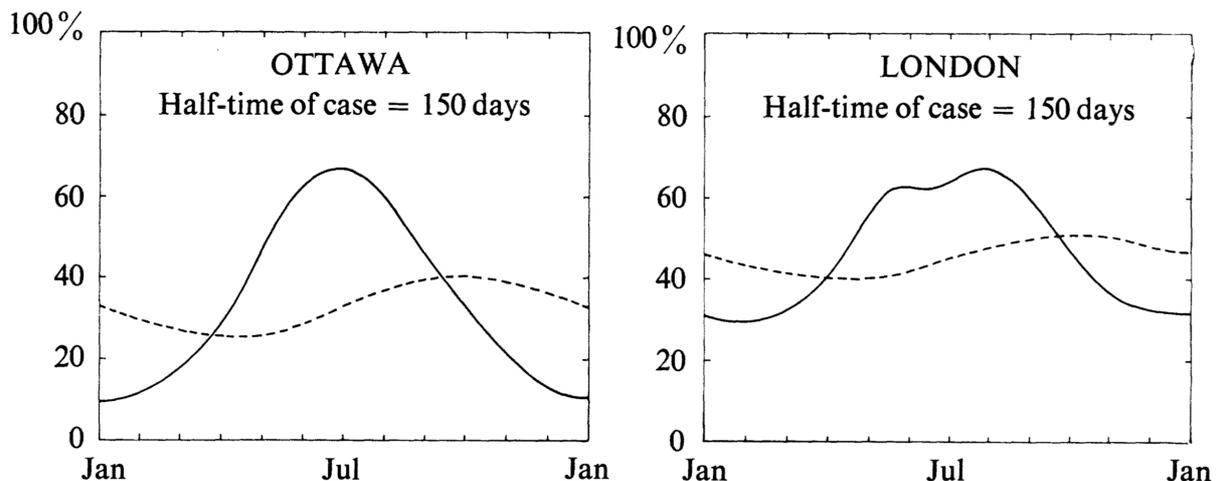


Abbildung 2-26: Jährliche RH-Zyklen in Raum (durchgezogene Linie) und Gehäuse (gestrichelte Linie). Die Raumzyklen stammen aus aufgezeichneten Datensätzen. Gehäuse Zyklen sind berechnet (Thomson, 1977)

Die Konstruktion sollte aus feuchteundurchlässigen Materialien wie Metall oder Glas angefertigt werden, um die Wasserzufuhr durch Diffusion zu eliminieren. Wird Holz als Material verwendet, kann dieses mit einer Reihe von Beschichtungsstoffen dampfdicht gemacht werden. Hierbei eignen sich Feuchtigkeitsbarrieren wie Latexanstriche, Metallfolie, aluminierete Kunststoffolie oder Polyvinylidenchloridfolie (Saran). Zum Abdichten von Fugen eignet sich additionsvernetzendes Silikonharz. Zudem ist darauf zu achten Fugenspalte am besten mittig auf gleicher Höhe durchzuführen. (Michalski, 1994).



Abbildung: Frans van Mieris
(Sozzani, 1997)

In der Literatur gibt es Beispiele zu ökonomisch gestalteten Klimavitrinen für Tafelbilder (vgl. Abbildung 2-27 und Abbildung 2-28). Es wurden unterschiedliche Einhausungen wie Holzrahmenkonstruktion oder solche aus Aluminium getestet. Bei einer konstanten Temperatur und Schwankungen der relativen Luftfeuchte in der Umgebung zwischen 30 und 70 % wurden keine Veränderungen in den Vitrinen beobachtet. Umgekehrt schwankten bei Zyklen mit einer konstanten relativen Luftfeuchte, aber Temperaturveränderungen von 10 bis 30 °C, sowohl die innere Temperatur als auch die innere relative Feuchtigkeit, unabhängig vom Inhalt der Konstruktion. Dieser Feuchtigkeitsaustausch zwischen dem Holz und Luft kann bei der Messung der relativen Luftfeuchte im geschlossenen Raum einer Vitrine als große Änderung aufgezeichnet werden, aber

tatsächlich sind die beteiligten Wassermengen recht gering und führen zu geringen bis zu keinen wesentlichen Dimensionsänderungen im Tafelbild. Folgendes Rechenbeispiel soll die Auswirkungen von temperaturbedingten Feuchteschwankungen in der Klimavitrine verdeutlichen. Luft kann wie in Kapitel 2.1 beschrieben in Abhängigkeit der Temperatur eine geringe Menge an Wasser aufnehmen. In einer Vitrine mit 5400 cm³ ist das Luftvolumen sehr gering und dementsprechend auch die enthaltenen Wassermengen. Bei einem Temperaturanstieg von 10°C auf 30°C würde die Luft bei Zugabe von 0,063 g Wasser ein Feuchtgleichgewicht erreichen. Diese Änderung des Feuchtigkeitsgehalts wird durch die Abgabe von Feuchtigkeit aus dem Holz ausgeglichen. Diese zusätzliche Feuchtigkeit, wenn sie vollständig aus einer 400 g schweren Platte freigesetzt wird, entspricht nur 0,18 % der 36 g Wasser, die in der Holzplatte bei 20 °C enthalten sind. Diese Feuchteausaustausche zwischen Holz und Luft können bei der Messung der relativen Luftfeuchte in einem geschlossenen Raum wie einer Vitrine als große Änderungen erscheinen, aber die beteiligten Wassermengen sind relativ gering und führen zu keinen oder nur minimalen Maßänderungen des Holztafelgemäldes (Sozzani, 1997).

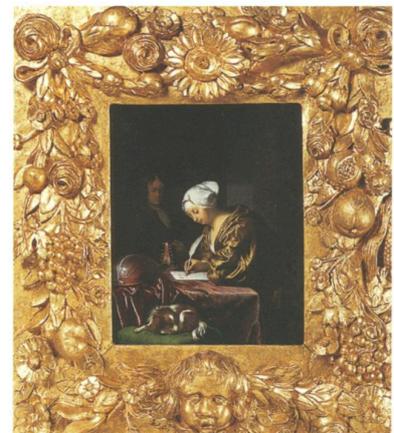


Abbildung: Frans van Mieris
(Sozzani, 1997)



Abbildung 2-27: Frans van Mieris, Der Briefschreiber, 1680, Öl auf Eichentafel, Rijksmuseum, Amsterdam, in einem Rahmen, der die Funktion einer Mikro-Klimavitrine erfüllt. Foto des Rijksmuseums (Sozzani, 1997)

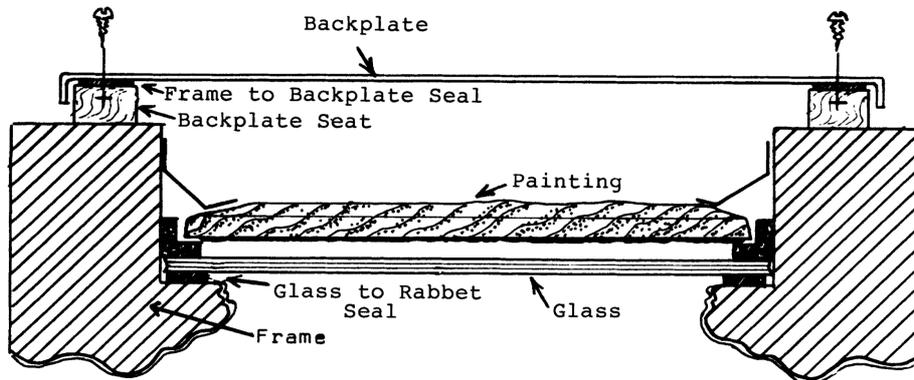


Abbildung 2-28: Schematische Darstellung des Querschnitts einer Mikroklima-Rahmenvitrine (Sozzani, 1997)

Hygrometrische Halbwertszeit

Wenn ein System mit einer relativen Luftfeuchte einer Umgebung mit einer anderen relativen Luftfeuchte ausgesetzt ist, dann wird sich die relative Luftfeuchte mit der Zeit der Umgebung anpassen. Zu jedem Zeitpunkt t nähert sich die relative Feuchte im Gehäuse der relativen Feuchte im Raum mit einer Geschwindigkeit an, die proportional ist zur Differenz der relativen Feuchte zwischen Raum und Gehäuse ist. Mathematisch ausgedrückt durch die Gleichung 2-13 (Thomson, 1977).

$$-\frac{dC}{dt} = k \cdot (C - R) \quad 2-13$$

C	$[\%]$ Relative Luftfeuchte der Vitrine zum Zeitpunkt t
R	$[\%]$ Relative Luftfeuchte der Umgebung zum Zeitpunkt t
k	$[-]$ Konstante des exponentiellen Zerfalls

Die Zeit bis zum Erreichen der Hälfte der endgültigen relativen Luftfeuchte wird hygrometrische Halbwertszeit genannt. Mit der Methode der hygrometrischen Halbwertszeit kann berechnet werden, wie lange ein System braucht, um sich dem äußeren Umgebungsklima vollständig anzupassen. Damit kann auch die Dichtigkeit solcher Vitrinen überprüft werden. Dabei ist die hygrometrische Halbwertszeit von zwei Faktoren abhängig. Von der Undichtigkeit der Vitrine und die damit verbundene Luftaustauschrate pro Tag und den Puffermaterialien (Thomson, 1977).

Nach Michalski kann Wasser auf drei verschiedenen Arten aus einer Vitrine gelangen. Durch die Infiltration von Luftströmen, der Diffusion und der Dampfdurchlässigkeit von Materialien (vgl. Abbildung 2-29). Meist sind Fugenspalte der maßgebende Faktor für Undichtigkeiten und nicht die Durchlässigkeit der verwendeten Materialien. Dabei kommt es vor allem auf die Fugenbreite, Fugentiefe und den Lochdurchmesser an. Oben oder unten liegende Spalte erzeugen einen Kamineffekt, welcher sich sehr nachteilig auf die Dichtigkeit auswirkt. Bei der Infiltration gelangt

Wasser durch die Druckunterschiede zwischen Vitrinen Luft und umgebender Raumluft ins Innere. Die Ursachen hierfür können Temperatur- bzw. Feuchteunterschiede zwischen Innenseite und Außenseite sein. Dabei erzeugt eine Temperaturdifferenz von 1 °C eine ebenso große Druckdifferenz wie ein Feuchteunterschied von etwa 40 %. Die Abbildung 2-30 gibt die Undichtigkeiten von Vitrinen mit einem Raumvolumen von 0,1 und 1,0 m³ als eine Funktion von Rissbreite, lichter Weite der Öffnung und der Wand Durchlässigkeit aus (Michalski, 1994).

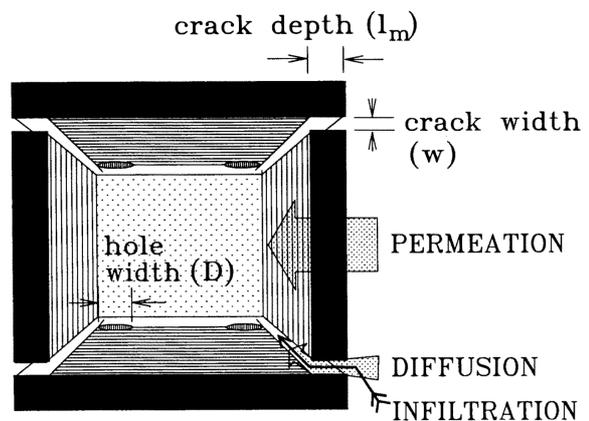


Abbildung 2-29: Leckagemechanismen eines Gehäuses (Michalski 1994)

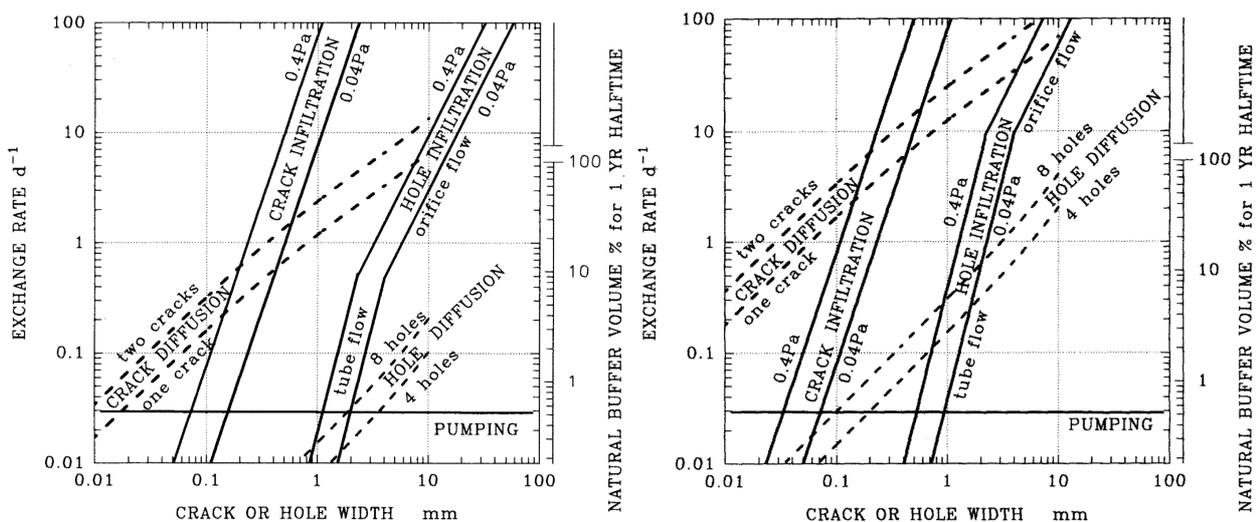


Abbildung 2-30: Links: Leckage-Diagramm für mittelgroße quaderförmige Gehäuse sicher (1 m³). Rechts: Leckage-Diagramm für dünne, vertikale, mittelgroße Gehäuse (100 x 100 x 5cm) Loch an jeder Ecke, Fuge rundum oben und unten, Wandstärke von 5 mm (Michalski, 1994)

Bei einer mittelgroßen Vitrine kann mit einer Spaltbreiten von etwa 0,3 mm ein Dichtigkeitswert von einem Luftaustausch pro Tag erreicht werden (Michalski, 1994). Angenommen es sind keine Puffermaterialien im System enthalten, dann wäre die Halbwertszeit genau die halbe Dauer einer Luftaustauschrate. Bei einer handelsüblichen Konstruktion ohne besondere Maßnahmen kann eine Luftaustauschrate/Tag von 1 erreicht werden. (Thomson, 1977).

2.3.2 Gesättigte Salzlösungen

Eine in der Literatur mit umfangreiche Datensätze verfügbare Methode zur Kontrolle der Luftfeuchte ist die Verwendung von Salzlösungen. Sie stellt eine traditionelle und bequeme Methode zur Bereitstellung von Standard-Relativfeuchten, die einen breiten Wertebereich abdecken. Hierzu gehören wässrige Schwefelsäurelösungen, Glycerin- und Wasserlösungen sowie einfache und binäre Salzlösungen. Bei ungesättigten Salzlösungen kann durch Veränderung der Konzentration ein bestimmter Grad der Feuchteregulierung erreicht werden. Eine einzige Salzlösung kann je nach Konzentrationsgehalt einen breiten Feuchtebereich abdecken (vgl. Abbildung 2-31). Schwefelsäurelösungen können dabei Lösungen mit Gleichgewichtswerten der relativen Feuchtigkeit von 0-95 % liefern (Young, 1967). Jedoch ist die Verwendung von diesen Lösungen mit Einschränkungen verbunden, da die Genauigkeit von den gemessenen Konzentrationen abhängig ist. Nicht nur die Konzentration der Lösung muss bestimmt werden, sondern auch das Vorhandensein von Feuchtigkeitsquellen. Zusätzlich können anfängliche Ausgleichsprozess im Raum die Konzentration der Lösung verändern (Greenspan, 1977).

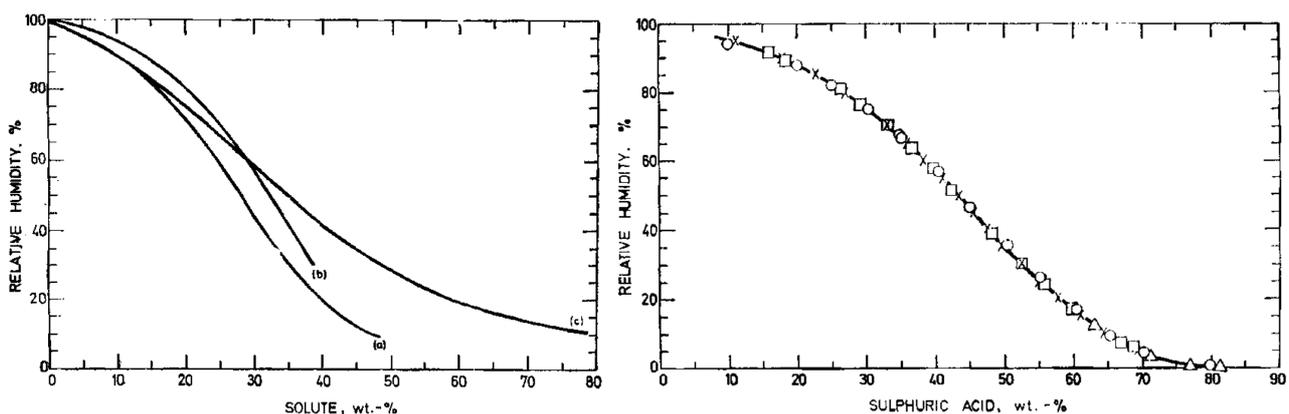


Abbildung 2-31: Variation der relativen Luftfeuchtigkeit mit der Konzentration für einige Salzlösungen bei 25 C (a) NaOH.H₂O, (b) MgCl₂.6H₂O, (c) LiCl.H₂O, (XO) Schwefelsäurelösung (Young, 1967) (Kutzelnigg & Königsheim, 1963)

Deshalb eignet sich die Verwendung von binär gesättigten wässrigen Lösungen (hauptsächlich von einzelnen Salzen) besser zur Feuchtigkeitsregulierung. Denn die Konzentration einer gesättigten Lösung ist bei jeder Temperatur fest und muss nicht bestimmt werden. Durch die Bereitstellung eines Überschusses an gelösten Stoffen bleibt die Lösung selbst dann gesättigt, wenn andere Feuchtigkeitsquellen vorhanden sind. Diese Salzlösungen haben die Eigenschaft, dass sich eine bestimmte Luftfeuchte über der Lösung einstellt. Die sich einstellende relative Luftfeuchte wird auch als Deliqueszenz Feuchte bezeichnet. Ist es erwünscht eine andere Luftfeuchtigkeit zu erreichen, muss hierfür eine andere Salzlösung verwendet werden (Greenspan, 1977). Die Verwendung von gesättigten Salzlösungen zur Kontrolle der relativen Luftfeuchtigkeit ist sowohl eine einfache als auch kostengünstige Methode. Die meisten Reagenzien stehen in angemessener Reinheit zur Verfügung, sind sicher in der Handhabung und nicht flüchtig, wodurch eine Kontamination der Probe vermieden wird. Verunreinigungen unter 1 % haben nur einen geringen Einfluss auf die definierten Feuchtigkeitswerte. Gesättigte Salzlösungen könne große Mengen an Wasser freisetzen und

aufnehmen, ohne die relative Luftfeuchtigkeit zu beeinflussen. Jedoch zeigen einige Untersuchungen, dass wenn solche Proben nennenswerte Mengen an Wasser aufnehmen, die tatsächliche relative Feuchte etwas niedriger blieb als erwartet. Tabelle 2-3 listet gesättigte Salzlösungen auf, welche die besten Ergebnisse versprechen. (Young, 1967).

Tabelle 2-3: Tabelle zur Feuchtigkeitskontrolle empfohlener gesättigter Salzlösungen (Young, 1967)

Salt	Temperature range, °C	$\frac{d(RH)}{dT}$, % per °C	% R.H. at 25°C	Comparisons of % R.H. at 25°C		
				Ref. 1	Ref. 3	Ref. 4
NaOH.H ₂ O	15—25 30—45	0·00 -0·07	7·0 —	— —	6·5 —	7·0 —
LiCl·2H ₂ O	-10—15	-0·17	—	—	—	—
LiCl.H ₂ O	20—70	-0·01	11·3	15*	13	11·1
CaCl ₂ ·2H ₂ O	50—80	+0·03	—	—	—	—
CH ₃ .COOK·1·5H ₂ O	-10—30	-0·12	22·2	20*	19	22·5
MgCl ₂ ·6H ₂ O	10—50	-0·06	32·7	—	33	33·0
NaI·2H ₂ O	5—35	-0·32	39·2	—	—	—
KNO ₂	20—40	-0·18	48·2	45*	45*	—
Mg(NO ₃) ₂ ·6H ₂ O	0—50	-0·29	52·8	52	52	52·9
Na ₂ Cr ₂ O ₇ ·2H ₂ O	0—50	-0·27	53·7	52*	52*	—
NaBr·2H ₂ O	-10—35	-0·28	58·2	58*	57	57·7
NaNO ₂	20—40	-0·19	64·4	—	66	—
CuCl ₂ ·2H ₂ O	10—30	0·00	68·4	—	—	—
NaCl	5—60	-0·02	75·1	—	75—76·5	75·3
(NH ₄) ₂ SO ₄	25—50	-0·07	80·2	81	81—89	80·0
KCl	5—40	-0·16	84·2	—	84·5—89	84·3
K ₂ CrO ₄	20—40	-0·06	86·5	88*	88*	—
BaCl ₂ ·2H ₂ O	5—60	-0·08	90·3	88	88	90·2
(NH ₄)H ₂ PO ₄	20—45	-0·12	92·7	93	93	—
K ₂ SO ₄	15—60	-0·05	97·0	—	100	—
CuSO ₄ ·5H ₂ O	25—40	-0·05	97·2	—	—	—

*% R.H. at 20°C

Die sich über einer gesättigten Salzlösung einstellende relative Luftfeuchte ist hauptsächlich von der Temperatur abhängig (Young, 1967). Die Temperaturabhängigkeit des Dampfdruckes ist auf die Löslichkeit und gegebenenfalls auf eine Änderung des Wassergehaltes des Bodenkörpers zurückzuführen. Da die Löslichkeit der Salze mit der Temperatur zunimmt und der Wassergehalt der Lösung abnimmt, nimmt der Dampfdruck der Salzlösung und damit die relative Feuchte mit steigender Temperatur ab, sofern sich der Hydratationszustand nicht ändert. Für den Dampfdruck von Lösungen mit großen Temperaturkoeffizienten der Löslichkeit ergeben sich oft unterschiedliche Werte, je nachdem, ob bei steigender oder fallender Temperatur gemessen wird. Wie stark sich die Temperaturschwankungen auf die relative Feuchte auswirken, verdeutlicht Abbildung 2-32. Mit der stündlichen Erhöhung der Temperatur um 4,3 Grad Celsius sank auch die relative Luftfeuchtigkeit im Klimaschrank (Kutzelnigg & Königsheim, 1963). Außerdem konnte festgestellt werden, dass die Menge an zur Verfügung gestellter gesättigter Lösung keinen Einfluss auf die Stabilität der relativen Luftfeuchte hat (Gonzalo Quincot, 1967).

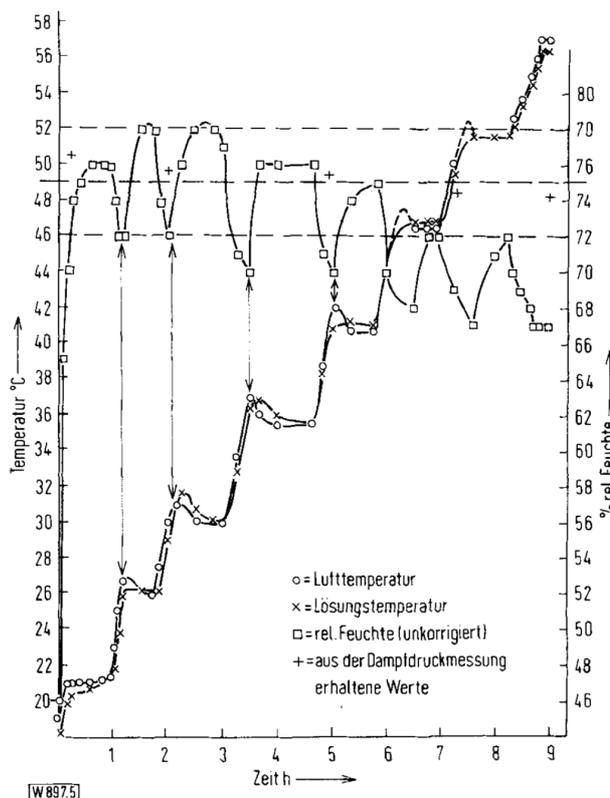


Abbildung 2-32: Gang der relativen Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur (gesättigte NaCl-Lösung) (Kutzelnigg und Königsheim 1963)

Salzhydratpaare sind eine dritte Alternative zur Kontrolle der relativen Feuchtigkeit. Diese können so gewählt werden, dass sie den gesamten Feuchtigkeitsbereich abdecken. Es gibt jedoch Nachteile, die die Verwendung bei sehr niedrigen Luftfeuchten etwa unter 7 % beschränken. So könnte das Vorhandensein einer flüssigen Phase unerwünscht sein. Die

Tabelle 2-4: Relative Luftfeuchte über einigen Hydratpaaren und deren Übergangstemperaturen (Young 1967)

Salt	Hydrates	% R.H. at 25°C	$\frac{d(RH)}{dT}$, % per °C	References
Na ₂ SO ₄	0+10	81	0.89	16, 24—26
ZnSO ₄	1+6	58, 55	0.73	16, 25
SrCl ₂	2+6	35	0.50	5, 11, 16
CH ₃ COONa	0+3	27	0.45	5, 16, 26
BaBr ₂	1+2	15.5	0.40	11
NaI	0+2	11	0.19	5, 16
Oxalic acid	0+2	11	0.16	24, 26
SrBr ₂	2+6	8.7	0.20	5, 11
ZnBr ₂	0+2	7.5	0.13	16
CdSO ₄	0+1	2.7	0.07	16
Mg(NO ₃) ₂	2+6	2.1	0.03	10

Salt	Transition	Temperature, °C	References
NaOH	H ₂ O→anhydrous	64·3	9
LiCl	2H ₂ O→H ₂ O	18·8	9
CaCl ₂	6H ₂ O→4H ₂ O	29·4	9, 11
	4H ₂ O→2H ₂ O	45·5	9, 11
NaI	2H ₂ O→anhydrous	68·1	12
Ca(NO ₃) ₂	4H ₂ O→3H ₂ O	42·7	8
Mg(NO ₃) ₂	6H ₂ O→2H ₂ O	90·0	10
Na ₂ Cr ₂ O ₇	2H ₂ O→anhydrous	74·8	12
NaBr	2H ₂ O→anhydrous	50·6	12
Sr(NO ₃) ₂	4H ₂ O→anhydrous	31·3	27
SrCl ₂	6H ₂ O→2H ₂ O	61·5	11
SrBr ₂	6H ₂ O→H ₂ O	88·0	11
BaCl ₂	2H ₂ O→H ₂ O	101·9	11
BaBr ₂	2H ₂ O→H ₂ O	107·9	11
CuSO ₄	5H ₂ O→3H ₂ O	95·9	11

meisten Salzlösungen sind recht stabil, doch es sollte darauf geachtet werden, keine Lösungen bei Temperaturen in der Nähe der Übergangspunkte zu verwenden, an denen neue Hydrate gebildet werden, da Temperaturschwankungen dann nicht linear sind. Relative Luftfeuchte über einigen Hydratpaaren und deren Übergangstemperaturen können der Tabelle 2-4 entnommen werden (Young, 1967).

Das Verhältnis der Lösungsoberfläche zum Rauminhalt spielt eine große Rolle, wenn es um Zeit geht, die benötigt wird, um das Gleichgewicht zu erreichen. Damit brauchten Lösungsoberflächen, die um das Fünffache reduziert wurden, etwa 10-mal so lang um 80 % des Gleichgewichtswertes zu erreichen (Kutzelnigg & Königsheim, 1963). Trotzdem wird sich nach ausreichend Zeit ein Gleichgewicht einstellen, auch wenn die Oberfläche klein ist. Folgendes Diagramm verdeutlicht den Einfluss der Lösungsoberfläche auf die Zeit, die benötigt wird, damit sich ein Gleichgewicht einstellt (Astrup, 1990). Eine wesentliche Rolle spielt dabei auch die Luftzirkulation. Abbildung 2-33 verdeutlicht den Unterschied einer Klimakammer ohne bzw. mit integrierten Umluftgeräten. Die Werte beziehen sich auf einen Klimaschrank mit einem Luftvolumen von 280 Liter und einer Lösungsoberfläche von 0,16 m² (Kutzelnigg & Königsheim, 1963).

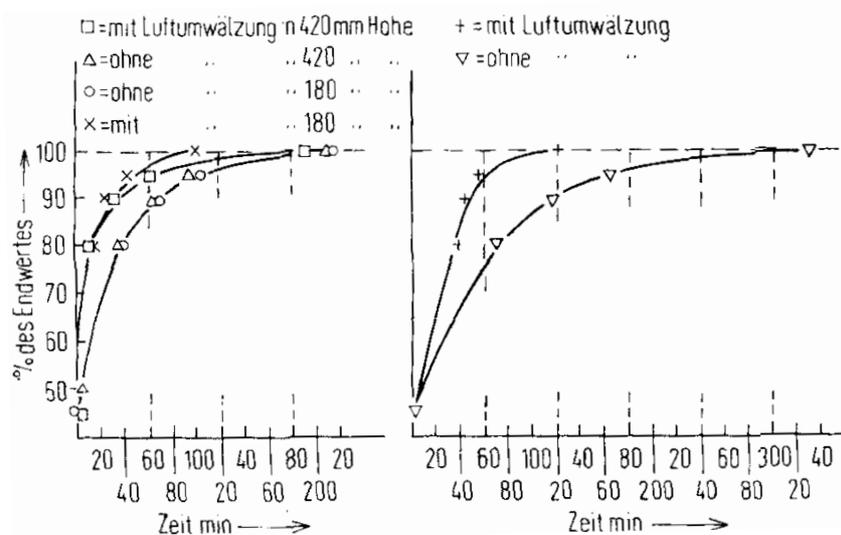


Abbildung 2-33: Einfluss der Luftumwälzung auf die Gleichgewichtseinstellung (Kutzelnigg & Königsheim, 1963)

Ein häufig genannter Einwand gegen die Nutzung von Salzlösungen ist das Kriechen der Salze über die Behälter hinaus. Dies ist jedoch hauptsächlich eine Frage des geeigneten Behältermaterials (vgl. Tabelle 2-5). Die Verwendung von hydrophoben Materialien wie Polypropylen unterbinden in aller Regel das Kriechverhalten. Es kommt auch auf das verwendete Salz an. Während Salze wie Natriumchlorid kein Kriechverhalten aufzeigen, kriechen Salze wie beispielsweise Natriumbromid unabhängig vom verwendeten Behältermaterial. Behälter aus Metall performen im Hinblick auf das Kriechverhalten der Salze identisch, sollten aber aufgrund von chemischen Angriffen der Salze vermieden werden (Astrup, 1990).

Tabelle 2-5: Die Tendenz von Salzen, an den Wänden von Behältern aus verschiedenen Materialien hochzukriechen. 0 entspricht keinem Kriechen, während +, ++ und +++ ein geringes bis starkes Kriechen der Salze anzeigen (Astrup, 1990)

Salze	Container Material			
	Edelstahl	PVC	SAN	PE
$Ca(NO_3)_2 \cdot 4H_2O$	0	0	0	0
$Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$	++	+	+	0
$Na_2CO_3 \cdot NaHCO_3$	++	+++	0	0
$NaBr$	+++	+++	+++	+++

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Feuchteregulierung mithilfe einer gesättigten Salzlösung ist die Ausstellung von Wikingerschiffen in Oslo. Hier wird erfolgreich mithilfe von Kalziumnitrat seit über 40 Jahren eine relative Luftfeuchte von 55 + 5 % aufrecht gehalten. Das Verhältnis der Oberfläche zum Raumvolumen beträgt hierbei 0,2 m² pro m³ Raumvolumen. Der einzige Aufwand ist es einmal pro Jahr destilliertes Wasser hinzuzugeben (Astrup, 1990).

Nach Young (1967) werden folgende Entwurfsgrundsätze geliefert, die die Konstruktion eines geeigneten Klimakasten ermöglichen. Jeder geometrisch geeignete, abgedichtete Container kann als Feuchtigkeitskammer verwendet werden. Es ist zu beachten, dass das Vorhandensein von Luft über der gesättigten Salzlösung den Wasserdampfdruck beeinflusst. Daher gibt es einen Unterschied zwischen den Gleichgewichtsfeuchtwerten gegenüber einer Salzlösung unter Vakuum oder unter Atmosphärendruck. Die Unterschiede sind jedoch gering und liegen bei nur wenigen Zehntel Prozent und können für alle außer präzisen Arbeiten ignoriert werden. Die meisten Messungen der relativen Luftfeuchte wurden unter Betriebsbedingungen unter Verwendung von Salzen in Reagenzqualität und atmosphärischem Druck durchgeführt. Die Konstruktion sollte aus nicht hygroskopischen Materialien gefertigt werden, um die Feuchtigkeitsaufnahme der Oberfläche zu verhindern, die eine Verzögerung des Gleichgewichts verursachen würden. Der Kontakt mit Metallen sollte vermieden werden, um Korrosion zu vermeiden. Die Konstruktion sollte ausreichend dicht sein. Die Klimakammer und ihr Inhalt sollten in ein thermisches Gleichgewicht gebracht werden und auf einer konstanten Temperatur gehalten werden. Auch bei Salzlösungen mit einem kleinen Temperaturkoeffizienten ist es wichtig, die Temperatur konstant zu halten. Die Oberfläche der Salzlösung sollte so groß wie praktisch möglich sein. Bei größeren Kammern ist es ratsam ein Medium zur interne Luftzirkulation bereitzustellen. Die wichtigsten Faktoren, die die Zeit bis zum Erreichen des Gleichgewichts bestimmen sind: das Verhältnis der freien Oberfläche der Salzlösung zum Kammervolumen, die Menge der internen Luftzirkulation und die Absorptionseigenschaften der Konstruktionsoberfläche. Bei der Einhaltung dieser konstruktiven Maßnahmen, kann eine Genauigkeit der relativen Luftfeuchte von 2 % eingehalten werden. Ist eine genauere Kontrolle erwünscht, muss dem Design der Kammer und der Kontrolle der Versuchsvariablen mehr Beachtung gegeben werden (Young, 1967).



Abbildung 2-34: Vitrine auf der Veste Coburg mit Magnesiumchloridlösung in Kunststoffbehältern im unteren Teil während der Wartung (Eggert 2022)

2.3.3 Lehm und Baumwolle als Beispiel hygroscopischer Puffermaterialien

Hygroscopische Materialien können in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte Wasser aus der Umgebung aufnehmen oder an diese abgeben. Diese Eigenschaft wurde sich in der konservatorischen Literatur durch sogenannte Puffermaterialien zunutze gemacht. In Museumsvitrienen sind kurzfristige Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit auf Temperaturänderungen zurückzuführen, während langfristige Schwankungen auf saisonal bedingten Schwankungen der Außenluft zurückzuführen sind. Ein passives System kann durch den Einsatz von Puffermaterialien kurzfristige Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit kontrollieren und jährliche Schwankungen um einen durchschnittlichen Jahreswert aufrechterhalten (Isetti et al., 1996). Diese Feuchtigkeitskontrolle in Konstruktionen geringen Volumens ist aufgrund der geringen Luftaustauschrate der Vitrienen mit fast jedem hygroscopischen Material möglich (Tim Padfield, 1998). Die in dieser Arbeit verwendeten Puffermaterialien Lehm und Baumwolle sollen deshalb im Folgenden näher beschrieben werden.

Lehm

Lehm als Baustoff wird aufgrund seiner ökologischen, klimaregulierenden und ästhetischen Eigenschaften schon seit Jahrtausenden vielseitig genutzt. Neben den raumakustischen und geruchabsorbierenden Vorteilen besitzt es vor allem raumklimatische Qualitäten. So haben Räume mit Innenputzen aus Lehm eine bis zu dreimal höhere Luftfeuchtigkeitsregulierung wie konventionelle Innenputze (*Im Detail*, 2012). Denn diese haben einen niedrigen μ Wert und damit eine hohe Diffusionsfähigkeit. Dadurch kann sich die Gleichgewichtsfeuchte schnell einstellen. Lehmstoffen besitzen bei Raumbedingungen Ausgleichsfeuchten in der Größenordnung zwischen 2-3 Masse-%. Damit ist sie als Beispiel mineralischer Baustoffe deutlich niedriger im Vergleich zu Materialien wie Holz, Textil oder Papier. Die Größe der Gleichgewichtsfeuchte ist darüber hinaus abhängig von der Tonmineralstruktur des Lehmstoffes (Schroeder, 2019).

Lehm ist ein typisches Beispiel für gemischtkörnige Böden. Es handelt sich um einen bindigen Boden, bei dem die Tonkomponente für die Eigenschaften von besonderer Bedeutung ist. Verschiedene Lehme enthalten unterschiedliche Anteile an Schluff, Sand und Kies und haben dadurch unterschiedliche hygroscopische Eigenschaften (Krause, o. J.). Bei Tonmineralien wird zwischen 3-Schicht und 2-Schicht-Typen unterschieden. Erstere besitzen aufgrund ihrer größeren spezifischen Oberfläche und einem entsprechend höheren Anteil im Kapillar- und Mikrobereich über ein größeres Potential für die Wasseranlagerung. Bei schnell wechselnden Dampfdrücken werden nur die ersten 1-2 cm der Bauteiloberfläche wirksam. Mit zunehmender Einwirkungsdauer reicht die Feuchteaufnahme- bzw. -abgabe in größere Bauteiltiefen. Die Leistungsfähigkeit der Lehmstoffe hinsichtlich ihrer Wasserdampfaufnahme wird in der DIN 18947 durch Wasserdampfsorptionsklassen bewertet und kann der Tabelle 2-6 entnommen werden.

Tabelle 2-6: Wasserdampfadsorptionsklassen von Lehmputzmörtel nach DIN 18947 (DIN 18947, 2018; Schroeder, 2019)

Nr.	Wasserdampfadsorptionsklasse	Wasserdampfadsorption [g/m ²] nach x [h]				
		0,5	1	3	6	12
1	WS I	≥ 3,5	≥ 7,0	≥ 13,5	≥ 20,0	≥ 35,0
2	WS II	≥ 5,0	≥ 10,0	≥ 20,0	≥ 30,0	≥ 47,5
3	WS III	≥ 6,0	≥ 13,0	≥ 26,5	≥ 40,0	≥ 60,0

Die Fähigkeit, Wasser in einer bestimmten Zeit aufzunehmen, ist bei den verschiedenen Tonen sehr unterschiedlich ausgeprägt: Magere Tone können nur wenig Wasser aufnehmen und benötigen dafür eine kurze Zeit. Fette Lehme oder Tone besitzen dagegen aufgrund ihres hohen Tonmineralgehaltes ein großes Wasseraufnahmevermögen, das aber wegen des höheren Quellpotentials mit einer wesentlich längeren Zeitdauer verbunden ist. Die Intensität der Quellvorgänge wird durch die Qualität der Tonminerale bestimmt und kann die Wasseraufnahme zusätzlich behindern. Übertragen auf den Mechanismus des Feuchtetransports in Baustoffen und Bauteilen aus Lehm bedeutet dies: In fetten Tonen und Schluffen reicht der kapillare Feuchtetransport aufgrund der kleineren Poren im Vergleich zu mageren Tonen weiter. Wegen der stärkeren Quelldeformation der fetten Lehme und Tone ist er aber im Vergleichszeitraum effektiv kürzer, da die quellfähigen Tonminerale das weitere Vordringen der Feuchte behindern. Beeinflusst wird dieser Mechanismus durch die Rohdichte mit entsprechender Porenstruktur sowie ggf. durch Zusatzstoffe und Zusatzmittel der verwendeten Lehmstoffe (Schroeder, 2019).

Baumwolle

Der Grund für das hygroskopische Verhalten der Baumwolle ist die Zellulose. Sie macht als Hauptbestandteil etwa 90 bis 95 % der Trockenmasse aus und gehört in die Klasse der Kohlehydrate mit der Bruttoformel n (Clément & Rivière, 1923). Die Moleküle der Zellulose enthalten eine große Anzahl von Hydroxylgruppen (-OH), die stark polar sind und daher leicht Wasserstoffbrückenbindungen mit Wassermolekülen eingehen können. Diese Bindungen ermöglichen es, effektiv Feuchtigkeit aus der Umgebungsluft zu adsorbieren. Weiterhin besitzt die faserige Struktur der Zellulose einen hohen Prozentsatz an Kapillaren und Zwischenräumen, in denen sich Wasser anlagern kann. Zellulose besteht aus amorphen (ungeordneten) und kristallinen (geordneten) Bereichen. Während die amorphen Bereiche flexibler sind und mehr Feuchtigkeit aufnehmen können, sind die kristallinen Bereiche weniger reaktiv gegenüber Feuchtigkeit. Das liegt daran, dass die amorphen Bereiche mehr freie Hydroxylgruppen haben, die Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden können (Céline et al., 2014).

Liegt Baumwolle als Endprodukt beispielsweise in Form eines Tuches vor, so besitzt es ähnlich wie Papier oder Pappe eine große Oberfläche. Über diese kann Wasserdampf aus der Umgebung besonders schnell aufgenommen, gespeichert und wieder abgegeben werden, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Das Gleichgewichtszustand der Baumwolle mit seiner Umgebung wird durch die Sorptionsisotherme beschrieben. Diese sind abhängig von der Struktur, den Inhaltsstoffen und der Oberfläche. Sie stellen eine charakteristische Funktion des jeweiligen Materials dar und müssen empirisch ermittelt werden. Eine Vorausberechnung ist aufgrund der komplexen Eigenschaften wie Materialzusammensetzung oder Verarbeitung nicht möglich (Wernecke, 2003).

In einer Studie zeigt Tim Padfield (1998), wie effektiv Baumwolle als Puffermaterial von Museumsvitrinen zum Einsatz kommen kann. Aus der Abbildung 2-35 kann entnommen werden, wie durch den Einsatz von Baumwolle die durch Temperaturänderungen hervorgerufene Änderung der relativen Luftfeuchte stabilisiert wird (Tim Padfield, 1998).

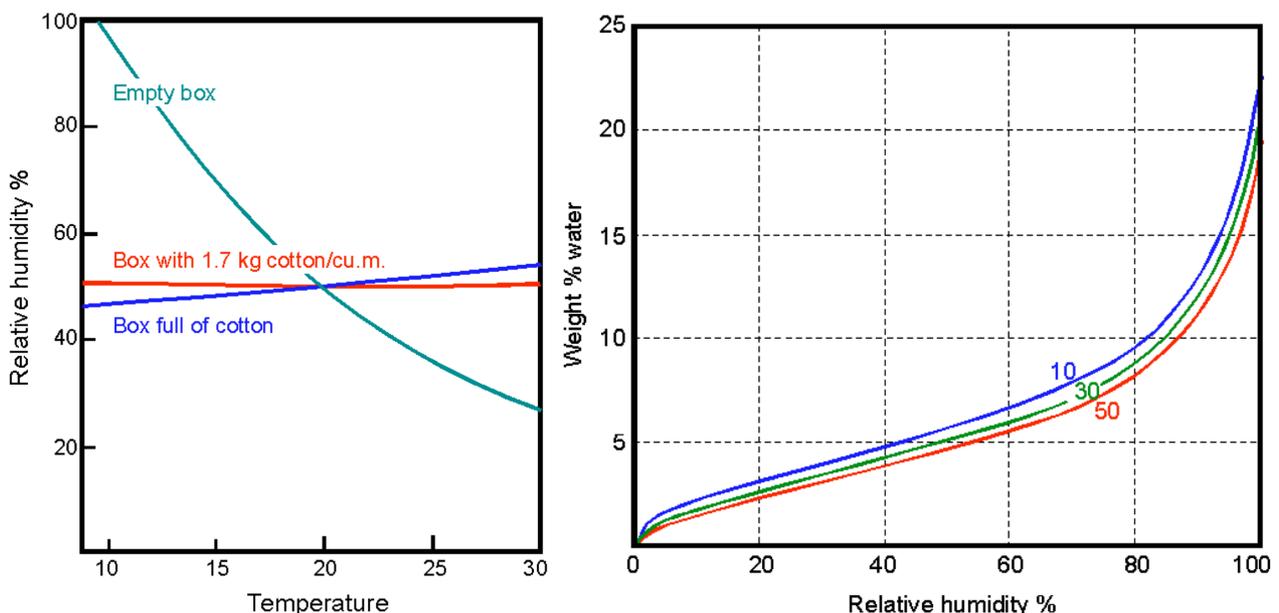


Abbildung 2-35: Links: Die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit mit der Temperatur in einer 1m³ Box mit und ohne Baumwolle als Feuchtigkeitpuffer. Rechts: Die Absorptionsisotherme von Baumwolle bei drei Temperaturen (Tim Padfield, 1998)

Hierbei wird die Abnahme der relativen Feuchtigkeit durch die automatische Freisetzung von Wasser aus der der Baumwolle kompensiert. Aus dem Diagramm kann abgelesen werden, dass bei einer steigenden Temperatur die relative Luftfeuchte tatsächlich leicht zunimmt. Dies liegt daran, dass das austauschbare Wasser in der Baumwolle mit 600 g weitaus größer ist als die ursprünglichen 8,5 g in der Box. Bei einem Ansteigen der Temperatur (horizontale Bewegung bei der Sorptionsisotherme Baumwolle) ist die Baumwolle in der Lage die relative Feuchtigkeit im Raum leicht zu erhöhen, indem es eine kleine Menge Wasser an die Umgebung abgibt. Dieses Beispiel zeigt, dass im geringen Raumvolumen ohne Luftaustausch die relative Feuchtigkeit der Umgebung von den eingebundenen Materialien gesteuert wird. Im auffälligen Gegensatz zur Außenwelt, in der die Materialien der

Feuchtigkeit der riesigen zirkulierenden Luftmassen ausgesetzt sind und mit dieser Umgebung ins Gleichgewicht kommen. Mithilfe von Puffermaterialien können nicht nur temperaturbedingte Schwankungen der Luftfeuchte kompensiert werden, sondern auch solche die durch die absoluten Wassermengen im Raum gesteuert werden. So kann der Abbildung 2-36 entnommen werden, wie ohne das Puffermaterial schon 17 Gramm Wasser ausreichen, um die relative Luftfeuchtigkeit von 0 auf 100 % ansteigen zu lassen. Befinden sich lediglich 1,7 kg Baumwolle in der Konstruktion, wären etwa 400 Gramm Wasser, also die fast 10-fache Menge an Wasser nötig, um denselben Effekt zu erzeugen.

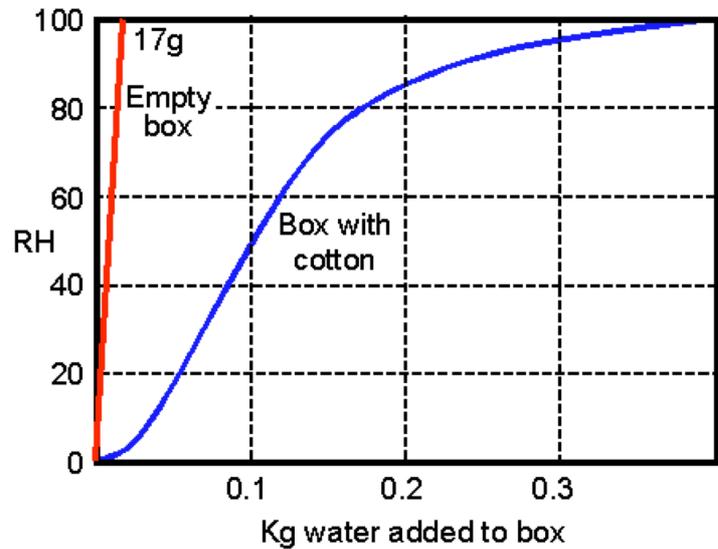


Abbildung 2-36: Pufferung der relativen Luftfeuchtigkeit einer Box gegen den Effekt der Zugabe von Wasser (Tim Padfield 1998)

Es wurde erklärt, inwiefern hygroskopische Materialien dazu beitragen, eine bestimmte relative Luftfeuchte in einem geschlossenen Volumen zu steuern. In der in Kapitel 3 vorgestellten Versuchsreihe wurden eine Lehmbauplatte und Baumwolle als Puffermaterialien verwendet. Um einen Richtwert zu haben, wieviel Wasser anfangs in das System eingeführt werden muss, wurden die Sorptionsisotherme der beiden Materialien verwendet. Diese wurden aus Rohdaten der Literatur nach der Methode der kleinsten Quadrate approximiert. Die Isotherme der Baumwolle wird durch eine Polynomfunktion 5.Grades beschrieben. Für die Lehmbauplatte ergeben sich zwei lineare Funktionen. Eine Funktion beschreibt das Verhalten unter einer relativen Feuchte von 93 % und die andere das Verhalten darüber. Anhand der Sorptionsisotherme konnte ermittelt werden wieviel Wasser benötigt wird, um eine bestimmte relative Luftfeuchtigkeit zu schaffen.

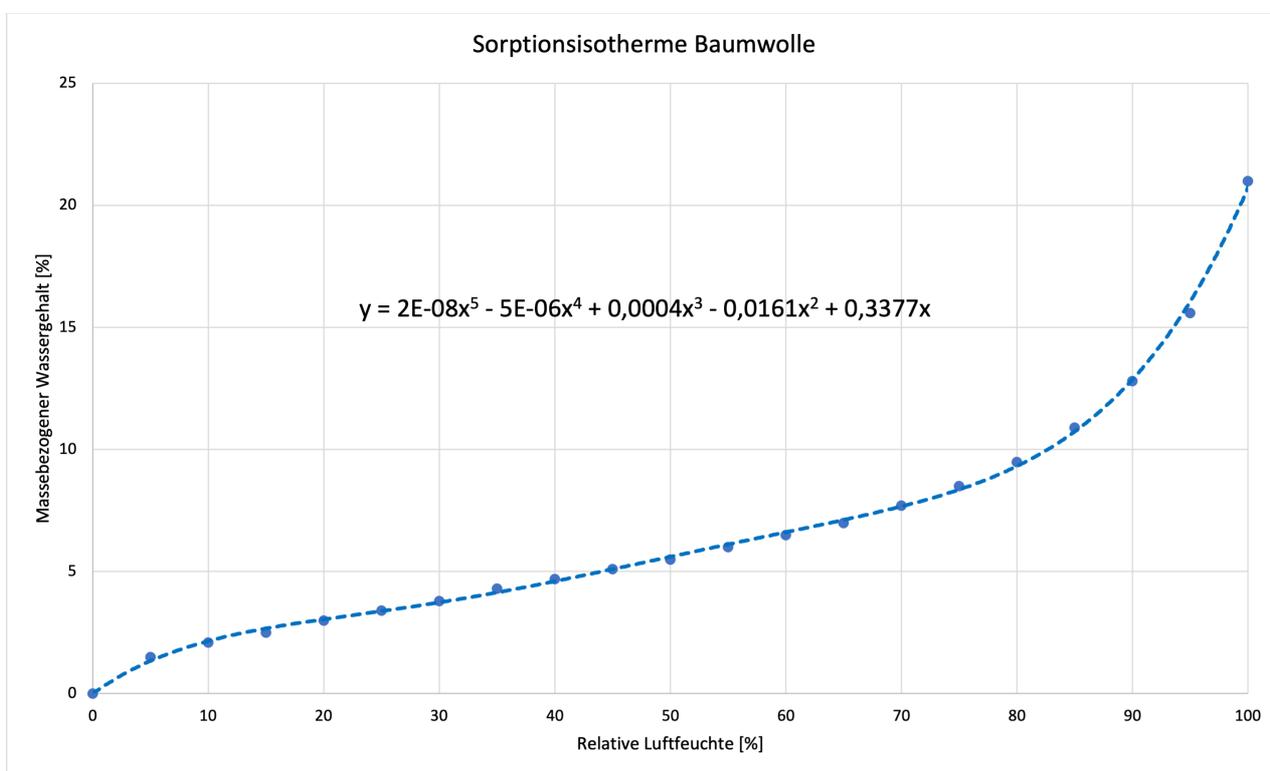


Abbildung 2-37: Sorptionsisotherme Baumwolle (Urquhart & Williams, 1924)

Tabelle 2-7: Messdaten Baumwolle Adsorption (Urquhart & Williams, 1924)

Relative Luftfeuchtigkeit %	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Massebezogener Feuchtegehalt %	0	2,1	3	3,8	4,7	5,5	6,5	7,7	9,5	12,8	21

Tabelle 2-8 - Annäherungsfunktion Sorptionsisotherme Baumwolle aus Rohdaten

Parameter	A1	A2	A3	A4	A5	A6
Funktion	2,4472E-08	-5,3197E-06	0,00043295	-0,0158215	0,33219273	0,03306172

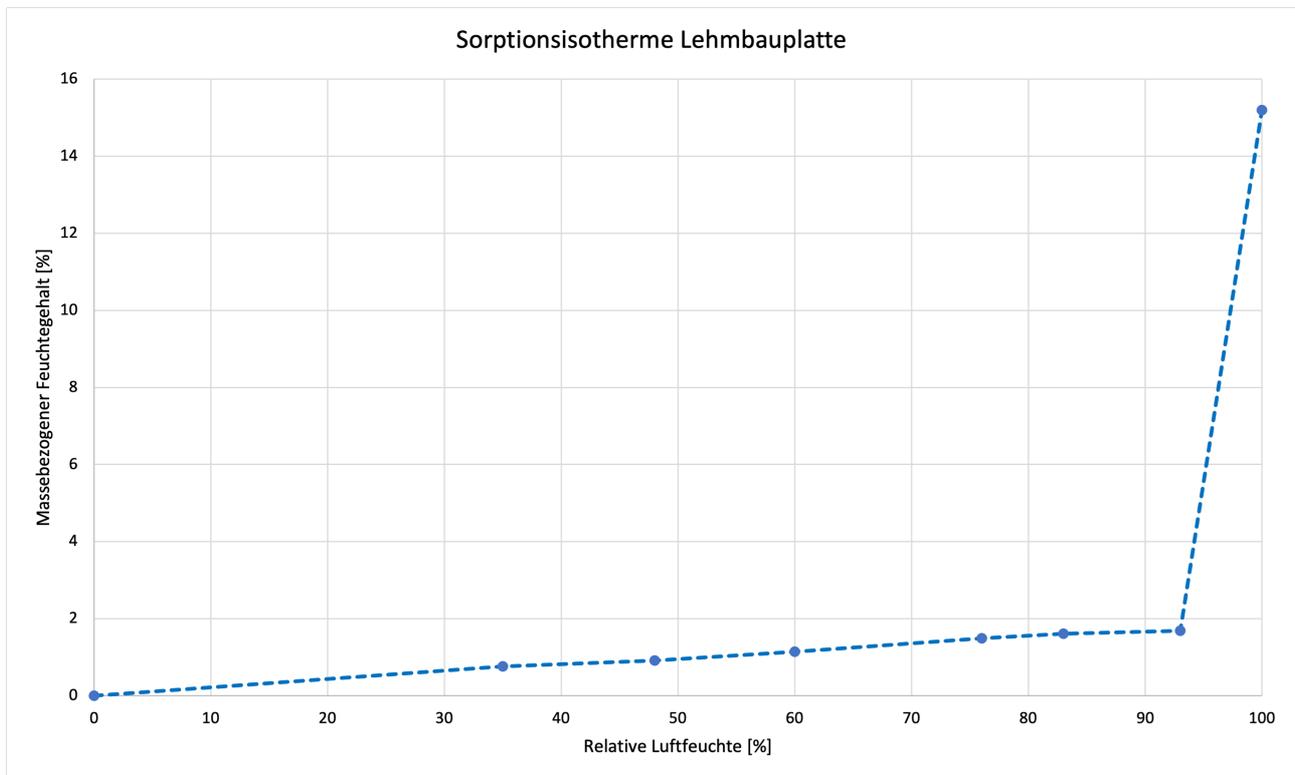


Abbildung 2-38: Sorptionsisotherme Lehmbauplatte (Marina Ineichen, 2020)

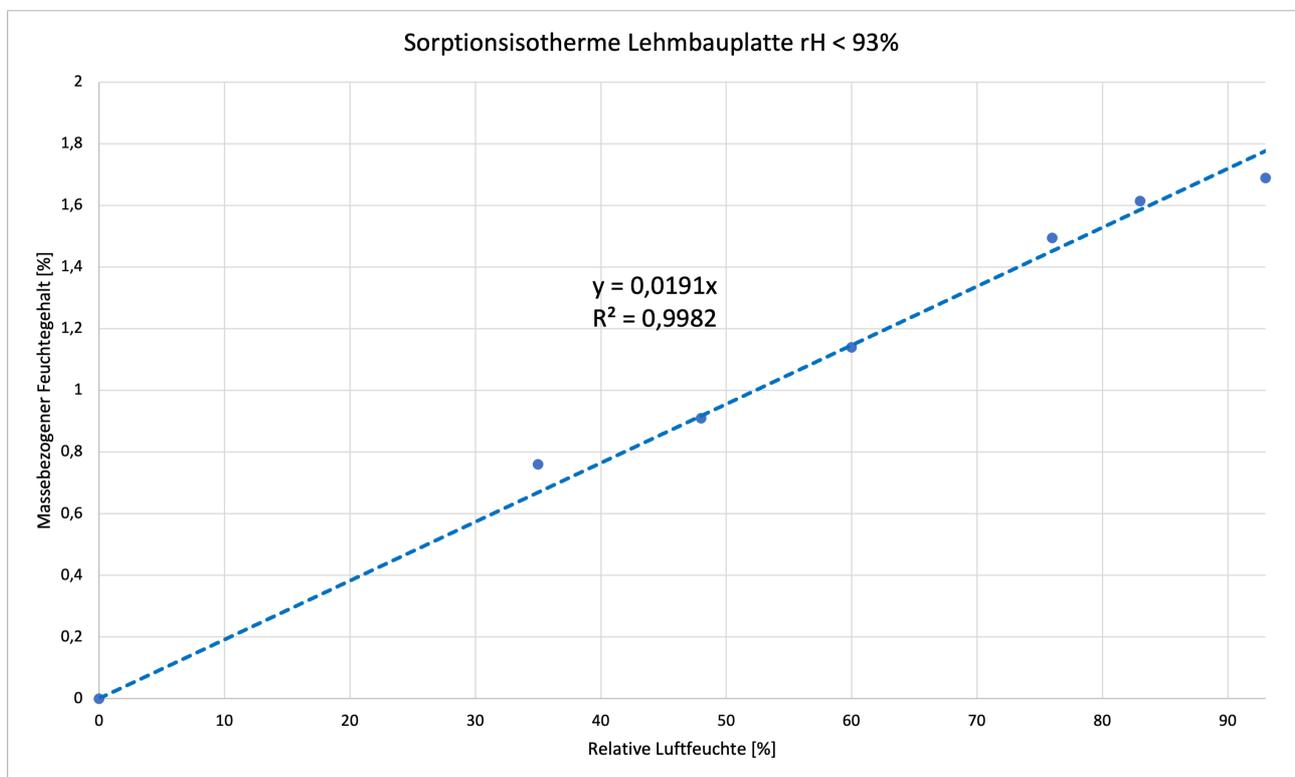


Abbildung 2-39: Sorptionsisotherme Lehmbauplatte rH < 93 % (Marina Ineichen, 2020)

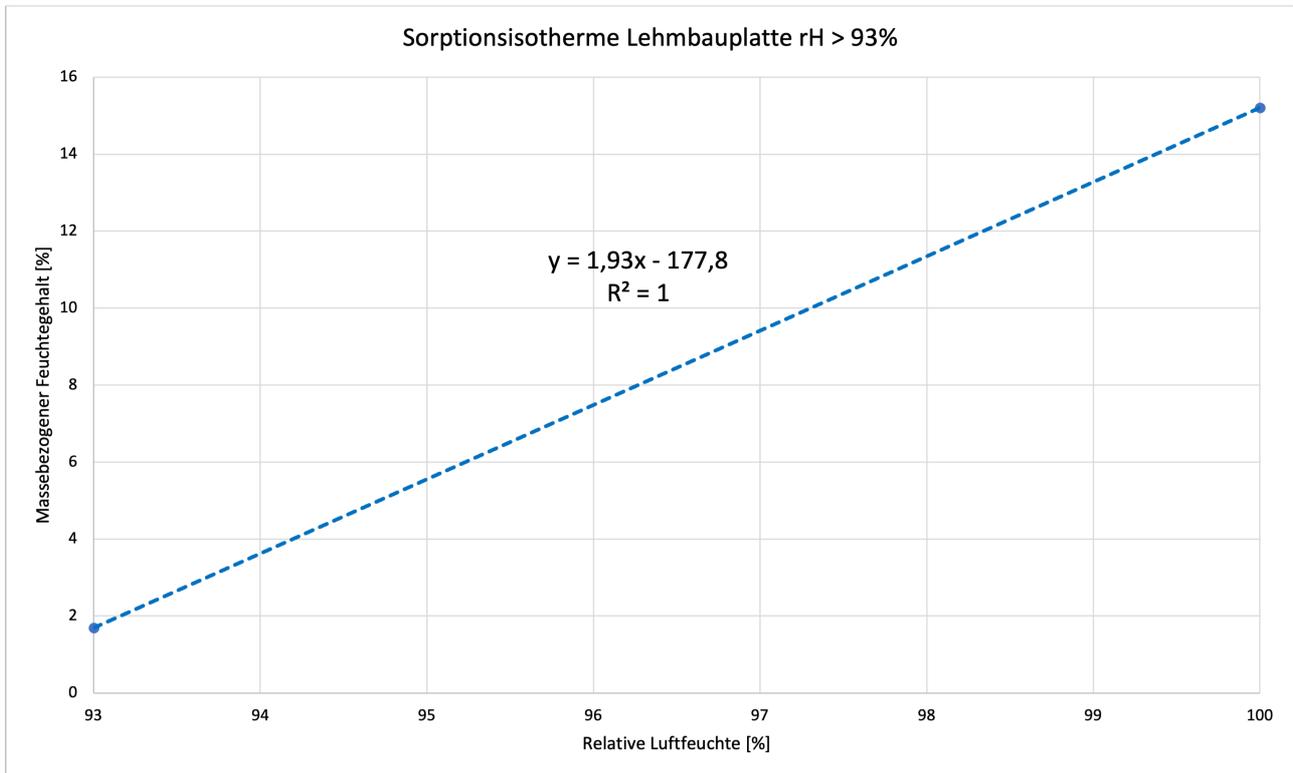


Abbildung 2-40: Sorptionsisotherme Lehm- bauplatte rH > 93 % (Marina Ineichen, 2020)

Tabelle 2-9 - Messdaten Adsorption Lehm- bauplatte (Marina Ineichen, 2020)

Relative Luftfeuchtigkeit %	0	35	48	60	76	83	93	100
Massebezogener Feuchtegehalt %	0	0,76	0,76	1,14	1,495	1,615	1,69	15,2

Tabelle 2-10 - Annäherungsfunktion Sorptionsisotherme Lehm- bauplatte aus Rohdaten

Parameter	Relative Feuchtigkeit < 93 %		Relative Feuchtigkeit > 93%	
	A1	A2	A1	A2
Funktion	0,0185406	0,04092314	1,93	-177,8

3 Entwicklung einer Befeuchtungsmethode

3.1 Methodik

In einem ersten Teil der Arbeit wurde eine Versuchsreihe aufgebaut, um in einem zweiten Teil unter der Zuhilfenahme der ersten Versuchsergebnisse eine automatisierte Systemsteuerung zu entwerfen.

3.1.1 Versuchsserie

Mit der Aussicht, erste Versuchsergebnisse für die Möglichkeit einer ressourcenschonenden Wiederauffeuchtung eines Holztafelgemäldes zu liefern, wurde eine Versuchsreihe aufgebaut. Anstatt das Klima im gesamten Raum zu verändern, sollte nur die relative Feuchtigkeit hinter dem Holztafelgemälde verändert werden. Dieses vom Raumklima abgekoppelte kleine Volumen hinter dem Gemälde, sollte die historische „feuchte Rückwand“ nachahmen. Hierzu wurde eine Versuchsserie gestartet, die modellhaft das Umgebungsklima und das Holztafelgemälde nachbilden sollte. Es wurde der Einsatz einer gesättigten Salzlösung und der beiden Materialien Lehm und Baumwolle als Beispiele hygroskopischer Materialien hinsichtlich ihrer Eignung als Befeuchtungsmittel, untersucht (vgl. Abbildung 3-1). Das Ziel war es eine bestimmte relative Luftfeuchte über einen möglichst langen Zeitraum konstant zu halten. Der hier angestrebte Wert der Luftfeuchtigkeit betrug, basierend auf den bisherigen Projektergebnissen des DBU-Forschungsprojektes, 75 %.

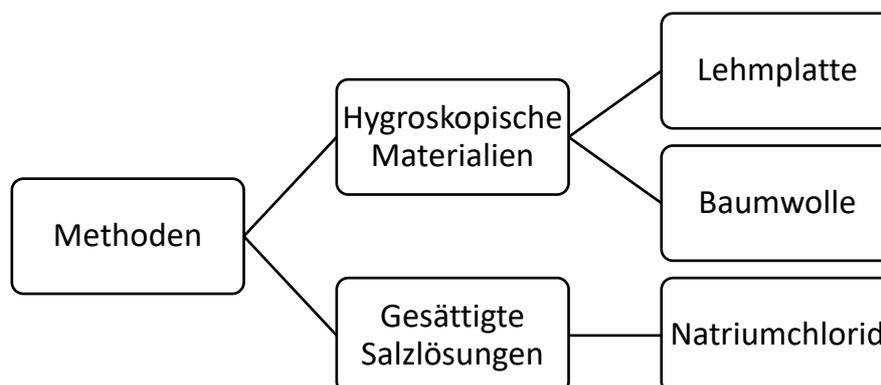


Abbildung 3-1: Flussdiagramm Versuchsdurchführung

Die Versuchsreihe bestand aus drei verschiedenen Versuchskörpern. Es wurden luftdichte Kästen ausgebildet, wobei die Stirnseite aus Fichtenholz bestand, welches zweischichtig mit Acrylfarbe beschichtet wurde. Das beschichtete Holz stellte das Ölfarben gemälde dar, wobei der Kasten den vorhandenen Luftspalt und somit die historisch feuchte Rückwand simulierte (vgl. Abbildung 3-2).

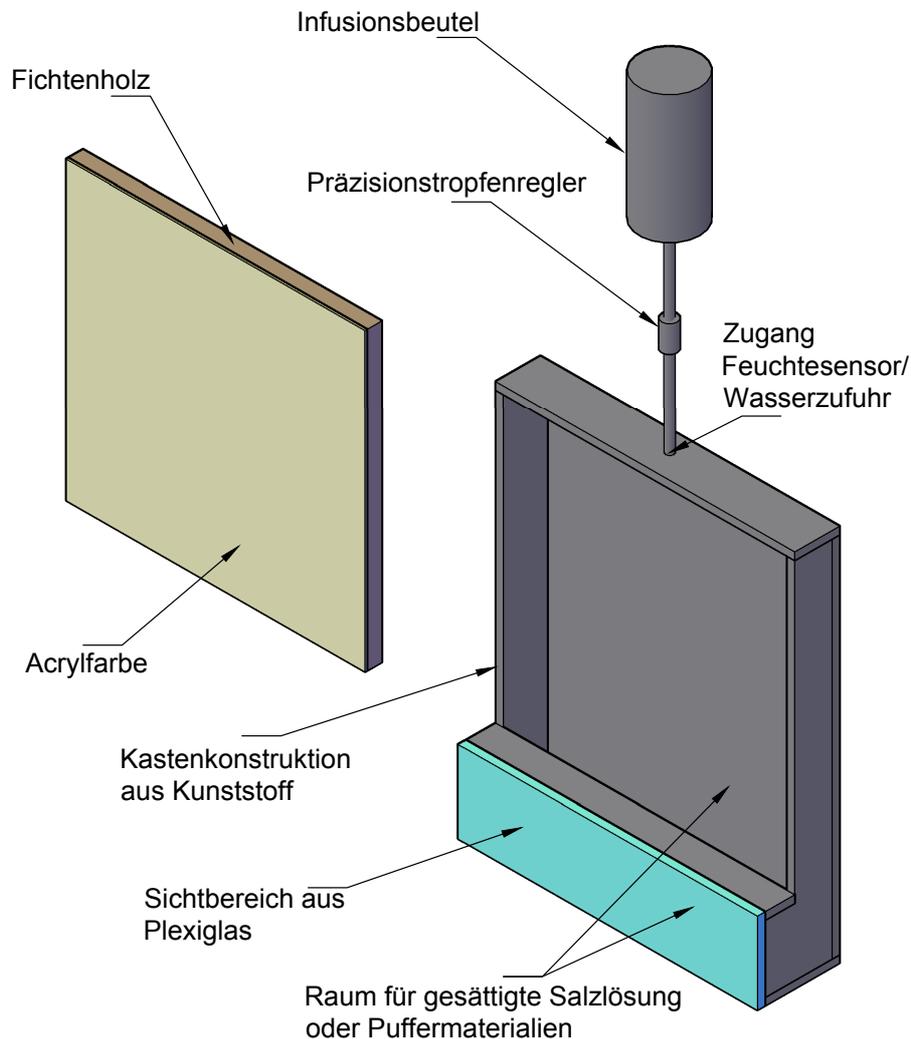


Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Versuchskörper

Die theoretische Grundlage für die Nutzung der Lehmbauplatte und der Baumwolle als Mittel zur Feuchteregulierung, bildeten die in Kapitel 2.1.3 vorgestellten Sorptionsisothermen. Hygroskopische Materialien haben die Eigenschaft, abhängig von ihrer Umgebungsfeuchte eine spezifische Materialfeuchte anzustreben. Dieser Zusammenhang zwischen dem Wassergehalt und der Gleichgewichtsfeuchte wird durch die sogenannten Sorptionsisotherme dargestellt. Die Tatsache, dass verschiedene Materialien zu einer Ausgleichsfeuchte mit der umliegenden Umgebung kommen, ist ersichtlich. Verschiedene Studien zeigen aber auch, dass die relative Luftfeuchtigkeit in einem abgeschlossenen Raum mit einer geringen Luftaustauschrate vom eingeschlossenen Material kontrolliert werden kann (Tim Padfield, 1998). Es sollte ermittelt werden, inwieweit eine solche Feuchtigkeitskontrolle umgesetzt werden kann.

Wie in Kapitel 2.3.3 aufgezeigt wurde, spielt hierbei das Verhältnis des Raumvolumens zur eingesetzten Menge an Puffermaterial eine wesentliche Rolle (Tim Padfield, 1998). Um diesen Zusammenhang vergleichen zu können, wurde der Einsatz einer schweren Lehmplatte dem einer

geringen Menge Baumwolle gegenübergestellt. Die beiden Materialien wurden ohne Vorkonditionierung in zwei unterschiedliche Versuchsaufbauten eingebracht. Begleitend, wurden die sich einstellenden Klima- und Messdaten über 12 Wochen Versuchslaufzeit, aufgezeichnet. Da sich ein Dampfdruckgefälle vom Kasteninneren nach außen einstellte und Undichtigkeiten nicht ausgeschlossen werden konnten, musste das aus dem System diffundierende und entweichende Wasser wieder eingeführt werden. Dies wurde durch einen Wasserzugang mit Hilfe von Infusionsbeuteln realisiert. Dadurch konnten die Puffermaterialien periodisch regeneriert werden. Während der 12 Wochen Versuchslaufzeit wurde dieser Schritt manuell ausgeführt. Um aber eine wirtschaftlichere und zuverlässigere Lösung aufzuzeigen wird in Kapitel 3.1.2 eine Möglichkeit aufgezeigt, wie dieser Schritt automatisiert werden kann.

Eine weitere Möglichkeit der Feuchtigkeitsregulierung ist der Einsatz von gesättigten Salzlösungen. Diese befinden sich bei konstanter Temperatur im Gleichgewicht mit einem festen Dampfpartialdruck des Wassers und definieren daher eine feste relative Feuchte (Young, 1967). Da eine gegebene gesättigte Salzlösung bei jeder gewünschten Temperatur nur eine relative Feuchte liefert, kann ein anderer Wert nur durch die Wahl eines anderen Salzes erreicht werden. In der Literatur finden sich große Datensätze und Tabellenwerke, in denen diese spezifischen Werte aufgelistet sind (Greenspan, 1977; Young, 1967). Hierbei wurde NaCl verwendet, um die relative Luftfeuchtigkeit von 75 % sicherstellen zu können. Die Versuchsergebnisse sollten Aufschluss darüber geben, wie gut sich ein solches System unter den präzisen Anforderungen eines Kunstwerks, eignet.

Datenerhebung

Es wurden die relative Luftfeuchte, die Temperatur sowie die Holzfeuchte ermittelt. Aufgrund der in Kapitel 2.2.2 erwähnten Relevanz der relativen Luftfeuchte wurde diese sowohl im erschaffenen Raumklima als auch im Umgebungsklima gemessen. Um die Auswirkungen der verschiedenen Befeuchtungsmethoden auf den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte zu dokumentieren, wurde diese über den gesamten Versuchszeitraum mittels elektrischer Widerstandsmessung ermittelt. Da diese Messmethode wie bereits in Kapitel 0 erläutert fehleranfällig ist, wurde die Holzfeuchte zusätzlich zum Abschluss der Versuchsserie mit der Darrmethode bestimmt. Hiermit sollte überprüft werden, ob die mit der Widerstandsmessung ermittelten Werte der Holzfeuchte mit den tatsächlich vorliegenden Werten übereinstimmen.



Abbildung 3-3: Einschlagelektroden der elektrischen Widerstandsmessung (Osman Kocan, 2024)

3.1.2 Ansatz zur Automatisierung

Um die relative Luftfeuchte konstant zu halten, erforderten die Versuchskörper mit den hygroskopischen Puffermaterialien aufgrund der Undichtigkeit der Kastenkonstruktionen und den aus dem System diffundierenden Wassermengen eine periodische Regeneration. Die Wasserzugabe erfolgte dabei in einem zeitlichen Abstand von etwa einer Woche. Die Entscheidungsgrundlage, wann und wie viel Wasser zugeführt werden sollte, war die aktuelle relative Luftfeuchte. Falls diese unter dem Zielwert lag, wurde genug Wasser zugeführt, um die relative Luftfeuchte des Systems auf den gewünschten Wert zu bringen. Es sollte ein Konzept entworfen werden, wie eine solche periodische Wasserzufuhr realisiert werden kann. Mithilfe der Arduino Open-Source-Elektronikplattform wurde das Steuerungssystem in Abbildung 3-4 entwickelt.

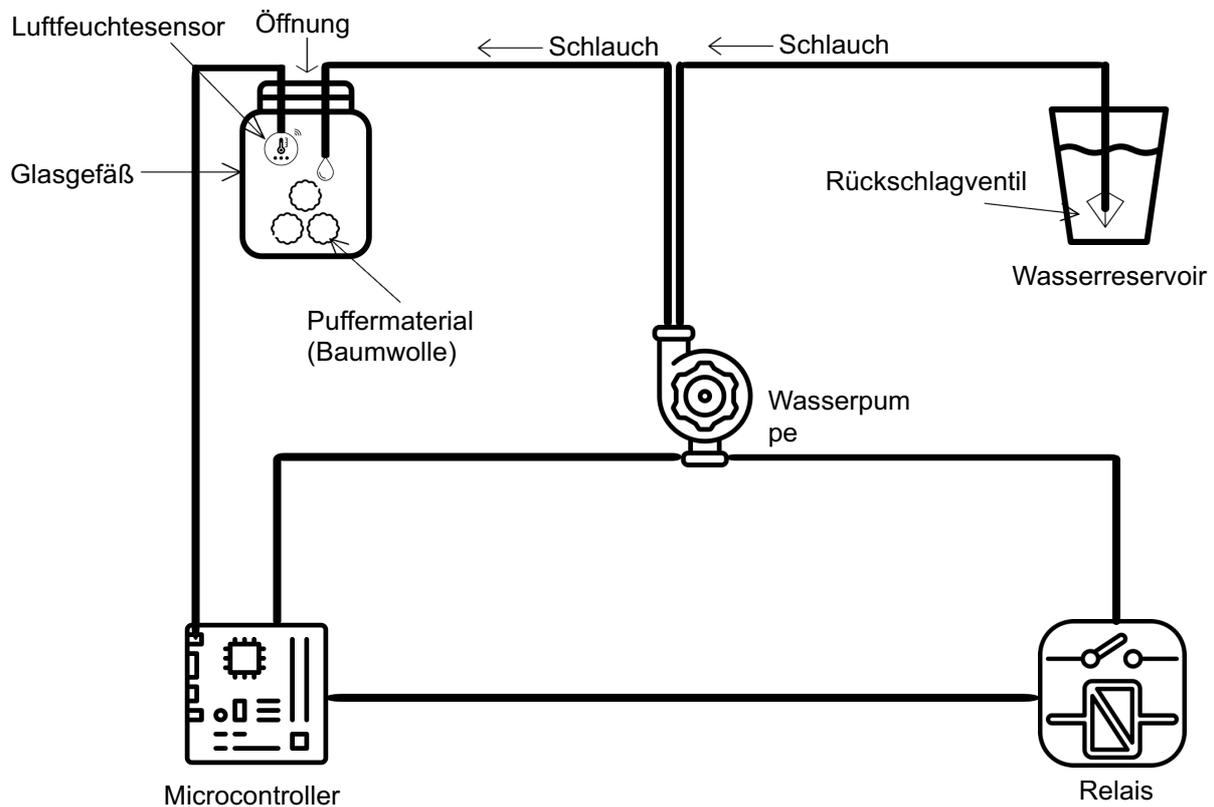


Abbildung 3-4: Schematische Darstellung automatisierte Systemsteuerung

Das System besteht aus einem Microcontroller, einer Pumpe und einem Feuchtesensor. Der Feuchtesensor befindet sich im Raumvolumen, dessen relative Luftfeuchte kontrolliert werden soll. Dieser ermittelt im Drei-Sekunden-Takt die aktuell vorherrschende relative Luftfeuchte. Die Pumpe verbindet über einen Schlauch das außenliegende Wasserreservoir mit dem zu kontrollierenden Raumvolumen. In der integrierten Arduino Entwicklungsumgebung wurde ein Sketch im C++ Maschinencode für den Microcontroller geschrieben, der entscheidet, wann und wie viel Wasser dem System zugeführt wird. Dem System wurde nur dann eine bestimmte Menge Wasser zugeführt, wenn beide folgenden Bedingungen erfüllt waren:

- Die aktuell gemessene relative Luftfeuchte liegt unterhalb der gewünschten relativen Luftfeuchte
- Die relative Luftfeuchte befindet sich nicht in einem Aufwärtstrend, also fällt oder bleibt gleich

Die Implementierung der zweiten Bedingung ging aus den Ergebnissen der Versuchsreihe hervor. Hier reagierte das System aufgrund des Puffermaterials verzögert auf die Wasserzugabe. Wie in Kapitel 4.4 aufgezeigt wird, kann es mehrere Stunden dauern, bis sich die maximale relative Luftfeuchte einstellt. Um deshalb eine Übersättigung des Systems zu vermeiden, wurde die zweite Bedingung eingeführt. Diese sollte die Wasserzugabe zwischen dem Zeitpunkt der ersten Wasserzufuhr und dem Erreichen der maximalen relativen Luftfeuchte verhindern. Die Methode wurde wie folgt implementiert (vgl. Anhang):

Es wird ein Array mit 20 Felder erstellt. Dieses Array wird mit der Zeit mit 20 Werten der relativen Luftfeuchte aufgefüllt. Nachdem das Array gefüllt ist, wird der Durchschnitt der ersten zehn Felder und letzten zehn Felder gebildet. Anschließend wird der Mittelwert der ersten zehn Werte vom Mittelwert der letzten zehn Werte subtrahiert. Wenn die Differenz kleiner oder gleich null ist, heißt es, dass der Durchschnitt der ersten zehn Felder größer war als der Durchschnitt der letzten zehn Felder. Somit befindet sich die relative Luftfeuchte in einem Abwärtstrend und die zweite Bedingung ist erfüllt. Um einzelne Messfehler aussortieren zu können, wurde der Durchschnitt von zwei Wertemengen miteinander verglichen und nicht zwei einzelne Werte. Bei der Erfüllung beider Bedingungen wurde die Pumpe aktiviert. Diese lief so lange, bis die Zugabe der definierten Menge Wasser abgeschlossen war.

3.2 Prüfkörper und Versuchsaufbau

3.2.1 Versuchsserie

Um die verschiedenen Methoden unabhängig voneinander untersuchen zu können, wurden drei Versuchskörper aufgebaut. Das Modell des an der Wand hängenden Ölgemäldes wurde durch eine Kastenkonstruktion, deren Vorderseite durch eine Holzplatte aus Fichte ausgebildet wurde, realisiert. Die Holzplatten aus Fichte hatten die Abmessungen 40 x 40 x 2 cm und wurden mittels Radialschnitt herausgeschnitten. Die Schmalseiten der Holzplatten wurden mit Alutape verklebt. Wesentliche Aspekte der Klimakästen waren die Spaltdichtigkeit, sowie die Feuchte Undurchlässigkeit der verwendeten Materialien. Denn das Aufrechterhalten eines konstanten und zuverlässigen Klimas basiert vor allem auf der geringen Luftwechselrate des Systems. Werte um 0,03 Luftwechsel / Tag gelten als hervorragend, wobei Werte um 0,1 meist ausreichend sind (Michalski, 1994). Die Kästen für die Lehmplatte und die Baumwolle waren Euroboxen aus dampfundurchlässigem Kunststoff mit den Abmessungen 60 x 40 x 7,5 cm. Die Lehmplatte wurde passgenau hineingelegt, wobei die Baumwolle zweilagig auf eine Holzrahmenkonstruktion gespannt wurde. Das Gewicht der Lehmplatte betrug 5171 Gramm, wobei die Baumwolle ein Gewicht von nur 72 Gramm hatte. Damit sich die geplante Materialfeuchte zeitgleich einstellen sollte, wurde die wesentlich schwerere Lehmplatte vor dem Verschließen des Klimakasten mit 50 Gramm Wasser befeuchtet.

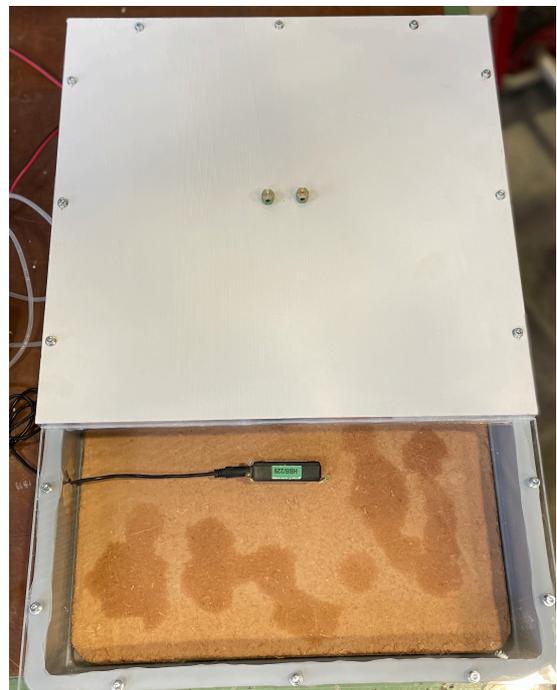


Abbildung 3-5: Links: Prüfkörper mit der eingeschlossenen Baumwolle als Puffermaterial Rechts: Prüfkörper mit der eingeschlossenen Lehmplatte als Puffermaterial (Osman Kocan, 2024)

Für das Platzieren der gesättigten NaCl Salzlösung war ein separates Fach innerhalb der Konstruktion notwendig. Deshalb wurde hierfür eine eigne Klimavitrine angefertigt. Wegen der leichten Verarbeitbarkeit wurden diese aus 15 mm dicken Hart Polyethylen Kunststoffplatten konstruiert. Alternativ können Holzplatten mit dampfdicht überzogenen Schichten verwendet werden. Besonders gut eignen sich hier dicke Latexanstriche, Alufolie kaschierte Oberfläche oder Dampfsperrfolien (Michalski, 1994). Zur Herstellung der Salzlösung wurden 251 Gramm Natriumchlorid in 500 ml Wasser bis zur maximalen Sättigung aufgelöst. Die Aufnahmefähigkeit von NaCl in diesem Wasservolumen beträgt 179,5 Gramm, weshalb der überschüssige Anteil des Salzes als Bodenkörper in der Lösung erhalten blieb. Die Wahl eines geeigneten Lösungsbehälters ist besonders wichtig. Zwar ist das Kriechverhalten vom verwendeten Salz abhängig, doch wird maßgeblich von der Oberflächenbeschaffenheit des Behälters bestimmt. Das Problem des Kriechen kann, wie in Kapitel 2.3.2 beschrieben, durch die Verwendung von hydrophoben Materialien wie z.B. in diesem Fall verwendeten Polyethylen oder einer hydrophoben Beschichtung wie Paraffin überwunden werden (Astrup, 1990).

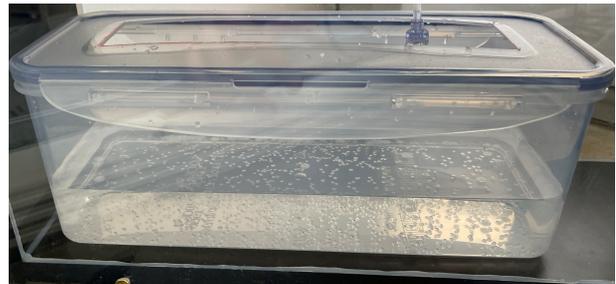


Abbildung 3-6: Links: Versuchskörper mit eingeschlossener Natriumchlorid Salzlösung Rechts: Polyethylen Behälter der gesättigten Natriumchlorid Salzlösung mit sichtbarem Bodensatz (Osman Kocan, 2024)

Da das Holz des Tafelgemälde zu großen Teilen aus Fichtenholz besteht, wurde für die Versuchsreihe diese Holzart verwendet. Es handelte sich um 2 cm dicke verleimte und auf 40 x 40 cm zugeschnittene Fichte. Um zu untersuchen, ob sich ein Unterschied der Holzfeuchte in den unterschiedlichen Tiefen der Holzplatte einstellen würde, wurde eine der drei Platte mit zwei unterschiedlichen Dicken hergestellt. Die Holzplatte mit einer Dicke von zusätzlich 4 cm wurde auf den Probekörper mit der gesättigten Salzlösung angebracht, da hier die besten Versuchsergebnisse erwartet wurden. Da das exakte Rekonstruieren der Ölfarben zu komplex wäre, wurden die Holzkörper mit einer Schicht überzogen werden, welche die diffusionshemmende Wirkung des gesamten Beschichtungssystems nachahmt (vgl. Kapitel 2.2.3). In Abstimmung mit dem Fraunhofer Institut für Kunstwerkserhaltung wurde Acrylfarbe mit einem hohen Bindemittelanteil verwendet. Es wurde 50 Gramm Acrylfarbe mit 10 Gramm Wasser verdünnt, um auf die drei Holzkörper jeweils 20 Gramm verdünnte Acrylfarbe aufbringen zu können. Die Farbe wurde 2-schichtig in sowie quer zur Faserrichtung auf die Holzkörper mit Hilfe einer Lackierwalze aufgetragen.



Abbildung 3-7: Mit Acrylfarbe bestrichene Holzplatte aus Fichte (Osman Kocan, 2024)

Es wurde diskutiert, ob das Innere der Probekörper nach dem Zusammenbau zugänglich bleiben sollte. Da hierdurch die Dichtigkeit hätte beeinflusst werden können, wurde sich dafür entschieden die Konstruktion mittels Schrauben zu verschließen. Die Dichtigkeit der Arbeitsfugen wurde durch den Einsatz von additionsvernetzendem Silikonharz unter ausreichendem Anpressdruck sichergestellt. Alle Klimakästen hatten zusätzlich einen mit Silikon und Alufolie abgedichteten runden Wasserzugang mit einem Durchmesser von 8 mm. Hier wurden die Schläuche der Infusionsbeutel durchgesteckt.



Abbildung 3-8: Mit additionsvernetzendem und unter Anpressdruck ausgebildete Fugen (Osman Kocan, 2024)

Messtechnik:

Es wurden insgesamt drei Messgrößen aufgezeichnet. Darunter die relative Luftfeuchte und Temperatur in den Klimakästen, sowie in der Umgebung. Zur Aufzeichnung der Klimadaten wurden Thermo-Hygro-Sensoren und Datenlogger der Firma *Scantronik Mugrauer GmbH* verwendet. Diese wurden durch Einhängen oder Befestigung mittels Formschluss mittig in den Kästen platziert. Die Holzfeuchte wurde mithilfe teilisolierter Einschlagelektroden anhand elektrischer Widerstandsmessungen quer zur Faser ermittelt. Diese wurden bei jedem Probekörper mittig bis 1 cm unter die Oberfläche eingetrieben. Da der Holzprobekörper beim Versuchsaufbau mit der Salzlösung zwei unterschiedliche Dicken hatte, konnte hier festgestellt werden, ob sich ein Unterschied bei der Aufweitungsgeschwindigkeit zwischen dicker und dünner Platte ergeben würde. Somit wurden an den drei Probekörpern insgesamt vier Paar Tiefenelektroden angebracht. Die Daten wurden alle über ein gemeinsames *Gigamodul* an einen Datenlogger übergeben. Um eine sichere Datenerfassung zu gewährleisten, wurden alle Daten in regelmäßigen Abständen von etwa vier Tagen ausgelesen. Die graphische Analyse und Weiterverarbeitung der Messwerte erfolgte mit der mitgelieferten *SOFTFOX*-Analysesoftware. Die Kontrolle der Wasserzufuhr erfolgte manuell über einen mechanischen Präzisionstropfenregler. Dieser waren an den Schläuchen der Infusionsbeutel integriert und konnten auf einen Durchfluss von null bis 300 ml/St kalibriert werden.

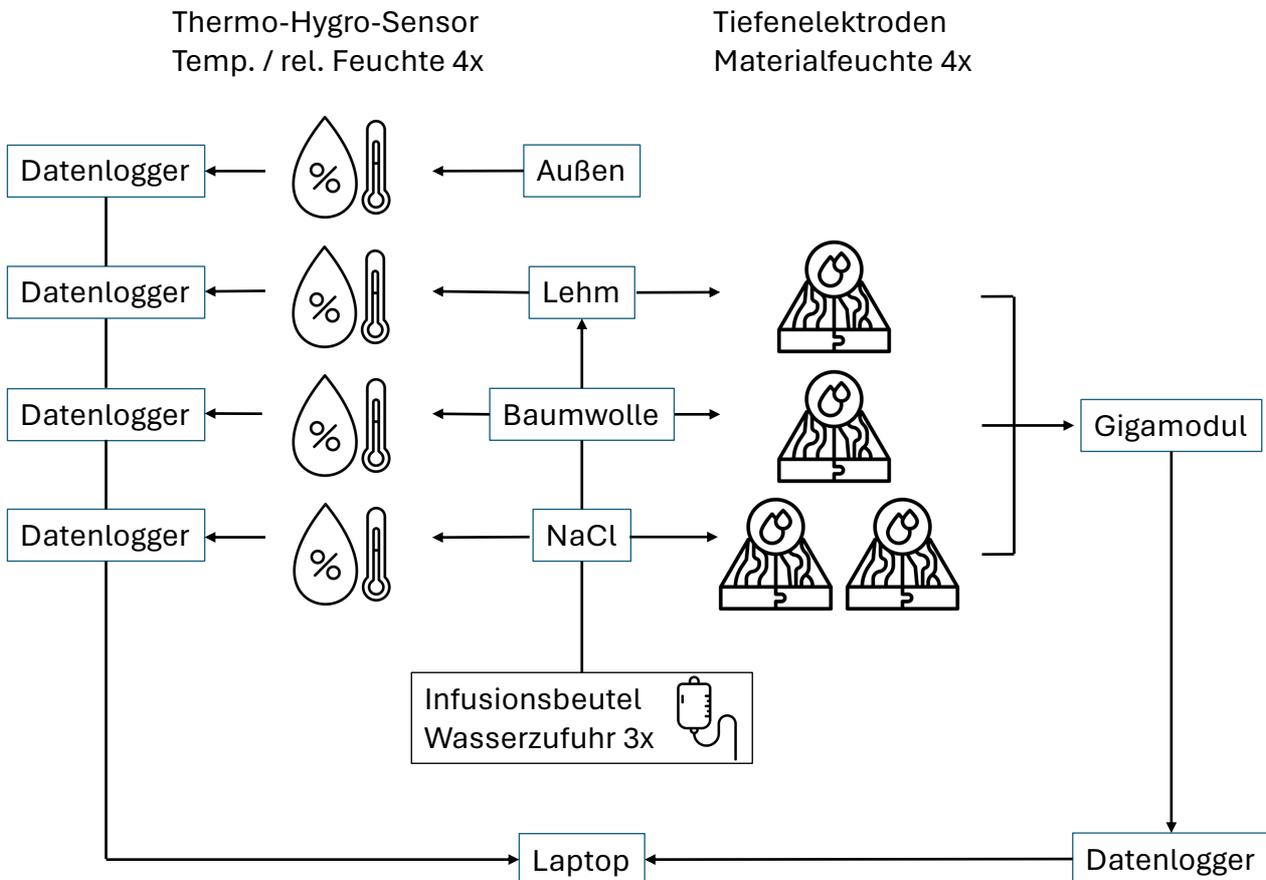


Abbildung 3-9: Flussdiagramm Messtechnik

3.2.2 Automatisierte Systemsteuerung

Um die automatisierte Systemsteuerung zu testen, wurde ein separater Versuchsaufbau entworfen. Die technischen Komponenten, die benötigt wurden, war der *ESP8266* Microcontroller, der *DHT22* Feuchte- und Temperatursensor, ein Relais des Herstellers *Az-Delivery* und eine handelsübliche Wasserpumpe. Um eine Klimavitrine nachzustellen, wurde ein luftdichtes Gefäß aus Glas mit einem Volumen von 1 Liter verwendet. In den Deckel dieses Gefäßes wurden zwei Löcher platziert, welche die Undichtigkeit einer Vitrine simulieren sollten. Als Puffermaterial wurde ein einfaches 270 Gramm schweres Stück Stoff aus Baumwolle verwendet und in das Glasgefäß hineingelegt. Die Pumpe war über einen Schlauch mit einem Wasserreservoir verbunden, aus dem das benötigte Wasser entnommen wurde. Um einen Rücklauf des im Schlauch stehenden Wassers zu verhindern, wurde am Schlauch ein Rücklaufventil verwendet. Ein weiterer Schlauch führte von der Pumpe in das Glasgefäß, wodurch das Wasser hineingepumpt werden konnte. Der Feuchtesensor befand sich im Gefäß und war in der Lage im Drei-Sekunden-Takt die aktuelle Luftfeuchte auszugeben. Der Versuchsaufbau wurde in Räumlichkeiten mit Raumbedingungen ähnlich der Versuchsserie in Kapitel 3.2.1 platziert. Die Versuchsergebnisse wurden über eine Dauer von 2 Wochen beobachtet. Es erfolgte keine Dokumentation der Versuchsdaten, sondern lediglich eine Überprüfung der Systemstabilität in einem Intervall von zwei Tagen.

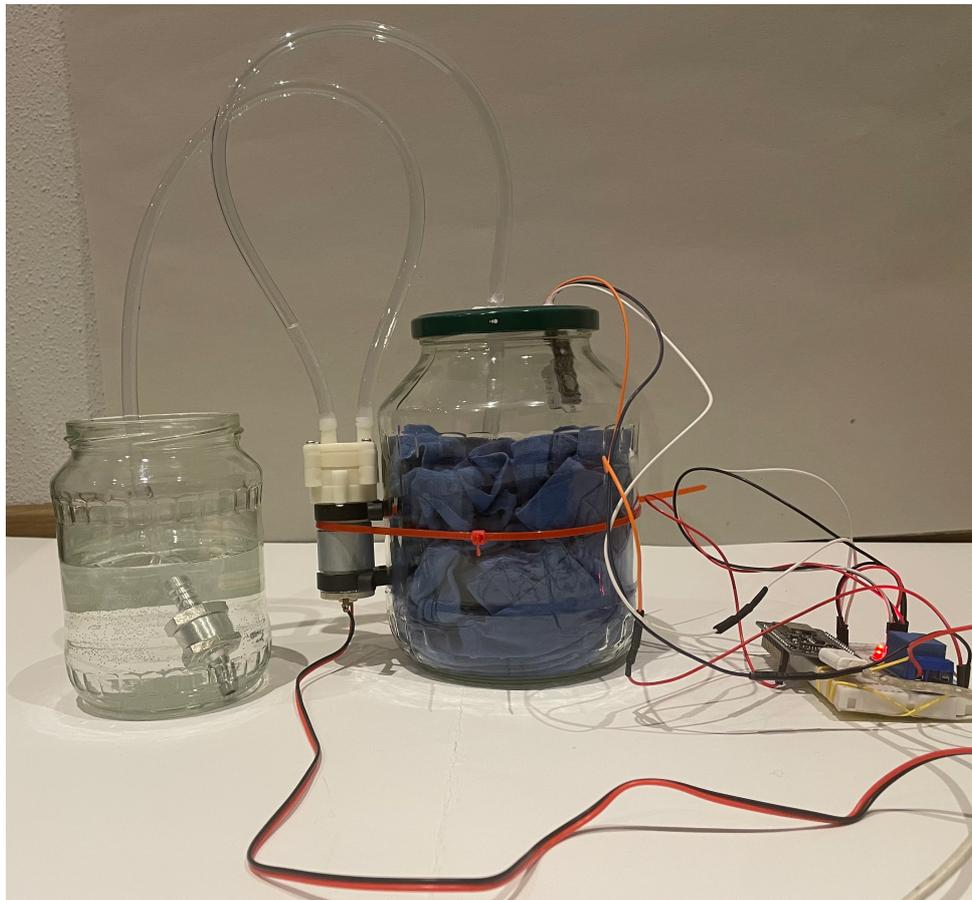


Abbildung 3-10: Versuchsaufbau der automatisierten Systemsteuerung (Osman Kocan, 2024)

3.3 Versuchsdurchführung

Alle Probekörper wurden denselben Umgebungsbedingungen ausgestellt. Sie wurden über einen Zeitraum von 12 Wochen in den Räumlichkeiten des Lehrstuhls für Holzbau und Baukonstruktion der TU München platziert. Lediglich in der sechsten Woche wurden die drei Probekörper auf die Abschlussstagung des Forschungsprojektes „In-Situ-Befeuchtung und Monitoring am Beispiel des Gründonnerstagsretabels im Dom zu Freising“ gebracht. Hier wurden die Versuchskörper über eine Dauer von drei Tagen einem anderen Klima ausgesetzt.

Da die hygroskopischen Materialien anfangs nicht auf die notwendige Materialfeuchte vorkonditioniert wurden, musste die Befeuchtung iterativ erfolgen. Es sollte dem System so lange Wasser zugeführt werden, bis sich die gewünschte relative Luftfeuchte von 75 % im Klimakasten einstellen würde. Durch das Abschließen der Konstruktion mit einer Fichtenholzplatte an der Vorderseite erlaubte das System Diffusion nach außen und somit einen Wasserverlust aus dem Innenklima. Da die Dimensionen dieser Wassermengen zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt waren, wurde auch dem Probekörper mit der gesättigten Salzlösung Wasser zugeführt, um ein Austrocknen der Lösung zu vermeiden. Dem System wurden die ersten 48 Stunden Wasser mit einem Durchfluss von 5 ml/h zugeführt. Es stellte sich heraus, dass das System über eine ausreichende Dichtigkeit verfügte und die Wassermengen, die anfangs zugeführt wurden, zu groß waren. Bei der Lehmplatte und der Baumwolle wurde dadurch eine höhere Materialfeuchte erreicht und es stellte sich somit eine höhere relative Luftfeuchte ein. Im System mit der Lehmplatte konnte eine Luftfeuchtigkeit von 93 % dokumentiert werden. Das System mit der Baumwolle wurde übersättigt und erreichte eine relative Feuchte von 100 %. Die Salzlösung hatte genug Bodensatz zur Verfügung um gesättigt zu bleiben.

Infolge der hohen relativen Luftfeuchtigkeit in den Klimakästen mit den hygroskopischen Materialien bildete sich innerhalb der ersten Woche Schimmel auf der Lehmplatte und der eingespannten Baumwolle. Dieser wuchs so lange bis die Luftfeuchtigkeit in den Probekörpern wieder absank. Der Schimmel auf der Lehmplatte war in einzelnen Bereichen punktuell verteilt und wies eine grüne Farbe auf. Der Schimmelbefall auf der Baumwolle war bräunlich und bildete sich in kleinen Bereichen wolkenartig aus.



Abbildung 3-11: Links: Schimmelbefall der Baumwolle. Rechts: Schimmelbefall der Lehmplatte (Osman Kocan, 2024)

In Kapitel 4 werden die Versuchsergebnisse über die 12 Wochen Versuchslaufzeit dargestellt.

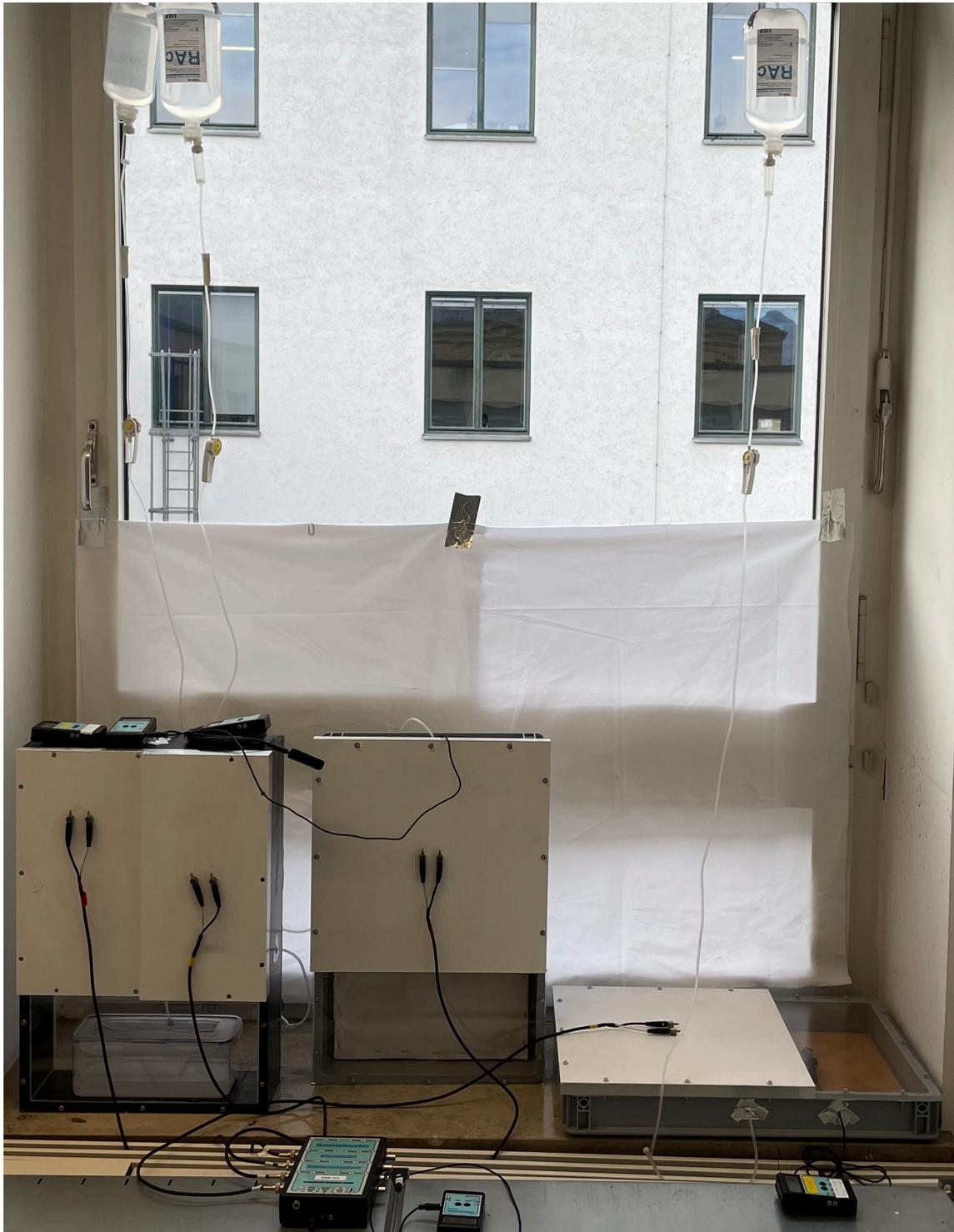


Abbildung 3-12: Versuchsaufbau der Probekörper am Lehrstuhl der Technischen Universität München
(Osman Kocan, 2024)

4 Ergebnisse und Auswertung

Bei der Auswertung der Daten werden zunächst alle gesammelten Versuchsdaten aufgezeigt. Es wird auf den Verlauf der Holzfeuchte eingegangen. Anschließend wird die Temperaturabhängigkeit der Deliqueszenz der gesättigten Natriumchloridlösung analysiert. Schließlich wird der Diffusionsvorgang und der Verlauf der Wiederauffeuchtung des Puffermaterials Baumwolle beschrieben. In einem letzten Schritt werden für alle Versuchsergebnisse deskriptive Statistiken aufgestellt.

4.1 Gesammelte Versuchsdaten

Der Abbildung 4-1 kann der zeitliche Verlauf der Temperatur und relativen Luftfeuchte über den Versuchszeitraum entnommen werden. Die Temperatur blieb über den gesamten Zeitraum beinahe konstant bei etwa 21 °C und erhöhte sich leicht gegen Ende der Versuchslaufzeit, ab dem Monat April. In dem kurzen Aufenthalt in der Sakristei im Freisinger Dom Mitte März sank die Temperatur um etwa 4 °C auf 18 °C. Die relative Luftfeuchte in diesem Zeitraum lag mit etwa 55 % auch wesentlich höher als im restlichen Zeitfenster mit Werten von etwa 25 bis 40 %.

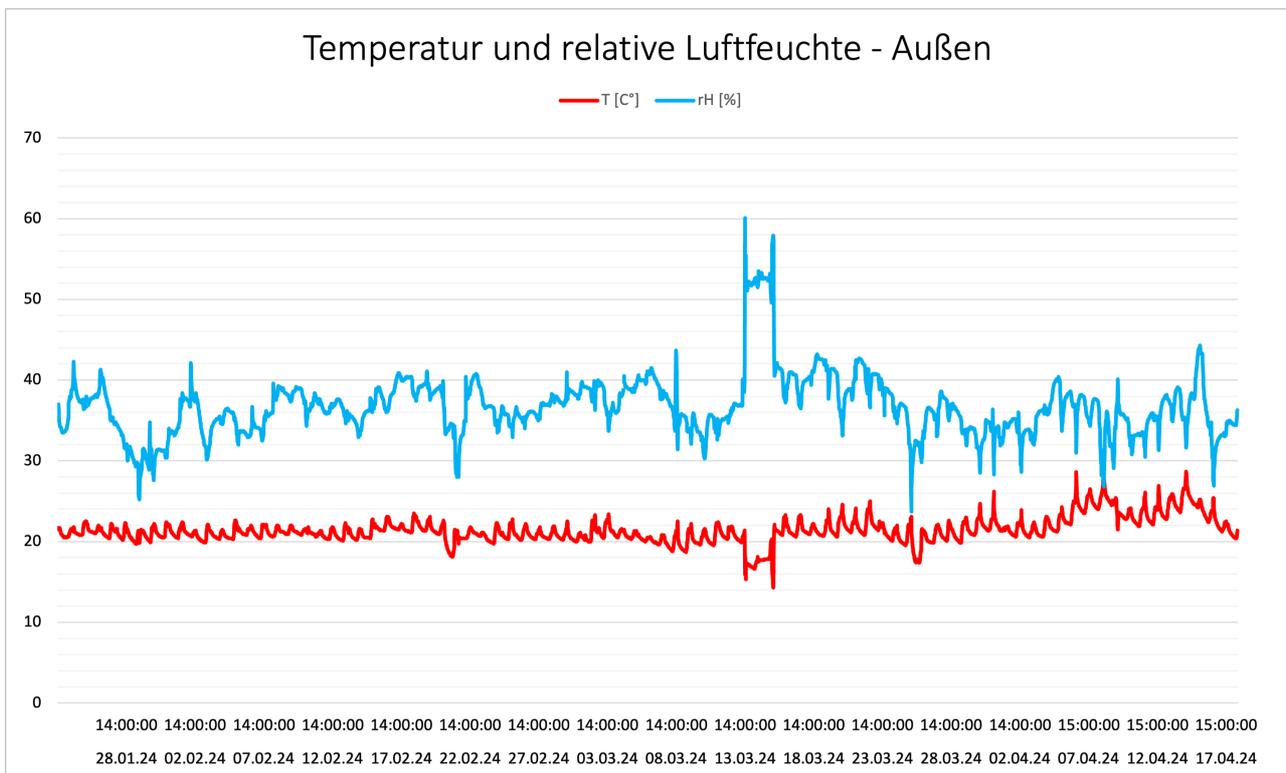


Abbildung 4-1: Temperatur und relative Luftfeuchte - Außen

Die X-Achse beschreibt den zeitlichen Verlauf, wobei der Y-Achse die Informationen der relativen Luftfeuchtigkeit, der Holzfeuchte, der Temperatur und der Wasserzufuhr entnommen werden können. Bei allen Messungen der Holzfeuchte gab es Störungen, weshalb die Versuchsdaten bis zur dritten Woche nicht verwendet werden konnten.

Der Abbildung 4-2 können die Versuchsdaten des Probekörpers mit der gesättigten Natriumchlorid Lösung entnommen werden. Die innere relative Luftfeuchtigkeit stieg anfangs innerhalb von 48 Stunden sprunghaft von 35 % auf 76 % an. Nach diesem Anstieg wurde die relative Luftfeuchte von durchschnittlich 76 % beinahe durchgehend konstant zu halten. Lediglich über dem Zeitraum in der Sakristei kann ein leichter Abfall auf 73 % dokumentiert werden. Die Amplituden um den sich einstellenden inneren Feuchtigkeitswert waren über den gesamten Zeitraum mit maximal 4 % gering. Mit dem Ansteigen der Temperatur gegen Ende der Versuchslaufzeit erreichte die innere relative Luftfeuchte niedrigere Werte bis zu 68 %. Die Holzfeuchte wurde bei diesem Versuchskörper an zwei Stellen gemessen. Die rote Diagrammkurve zeigt die Werte in der 2 cm dicken Platte, während die gelbe die Messdaten im 4 cm breiten Bereich darstellt. Insgesamt stellte sich auch hier ein konstanter Wert von 11% im dünneren und 9 % im dickeren Querschnitt ein. Im Zeitraum der Sakristei gab es einen kurzzeitigen Abfall der Holzfeuchte auf etwa 5 %.

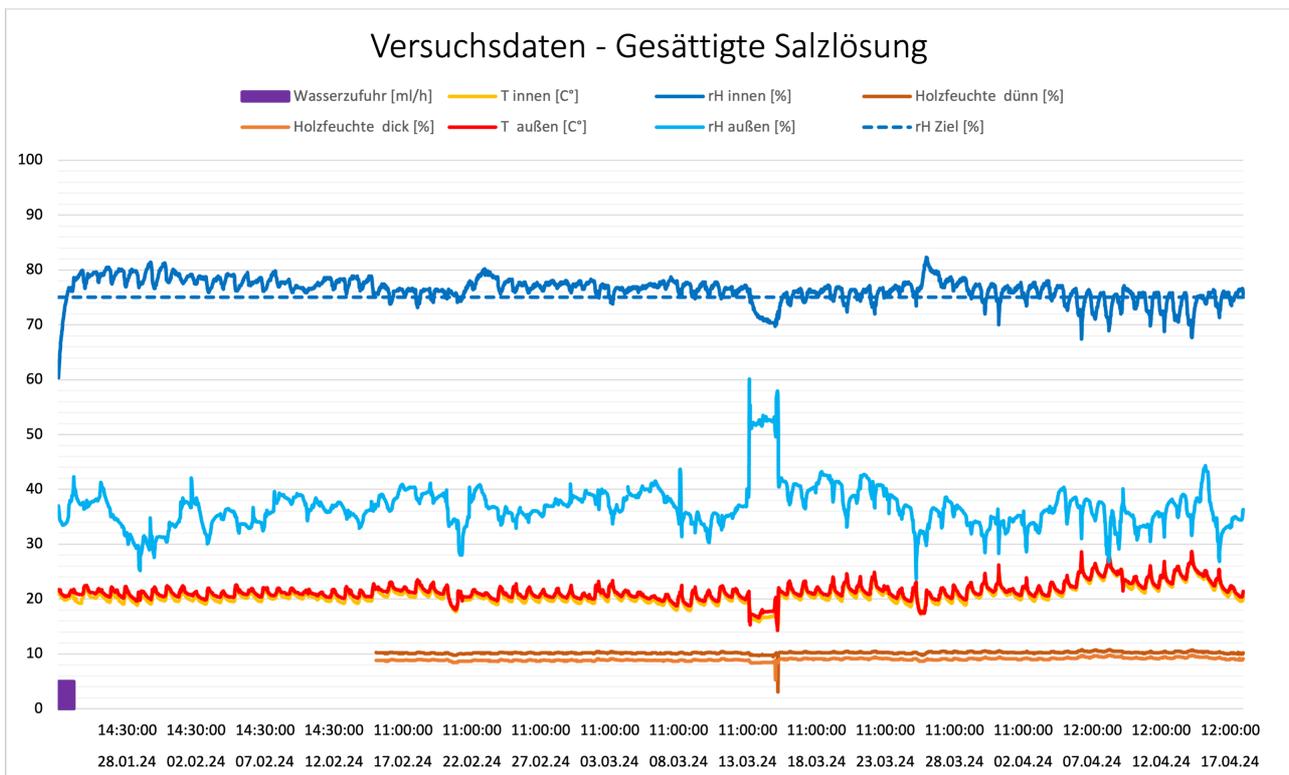


Abbildung 4-2: Versuchsdaten - Gesättigte Salzlösung

Der Abbildung 4-3 können die Versuchsdaten des Probekörpers mit der Lehmplatte als Puffermaterial entnommen werden. In den ersten 48 Stunden wurde dem System Wasser mit einem Durchfluss von 5 ml/St zugeführt. Die innere relative Luftfeuchtigkeit stieg anfangs innerhalb von 72 Stunden sprunghaft von 77 % auf 92 % an und erreichte erst nach weiteren 10 Tagen die maximale relative Luftfeuchte von 96 %. Nach diesem Anstieg wurde die relative Luftfeuchte für einen Zeitraum von etwa vier Wochen auf einem Wert von etwa 94 % gehalten und sank linear in weiteren sechs Wochen auf den Wert von 84 % ab. Dabei wurde bei der Holzfeuchte ein zeitgleicher Abfall von 16 % auf 12 % beobachtet.

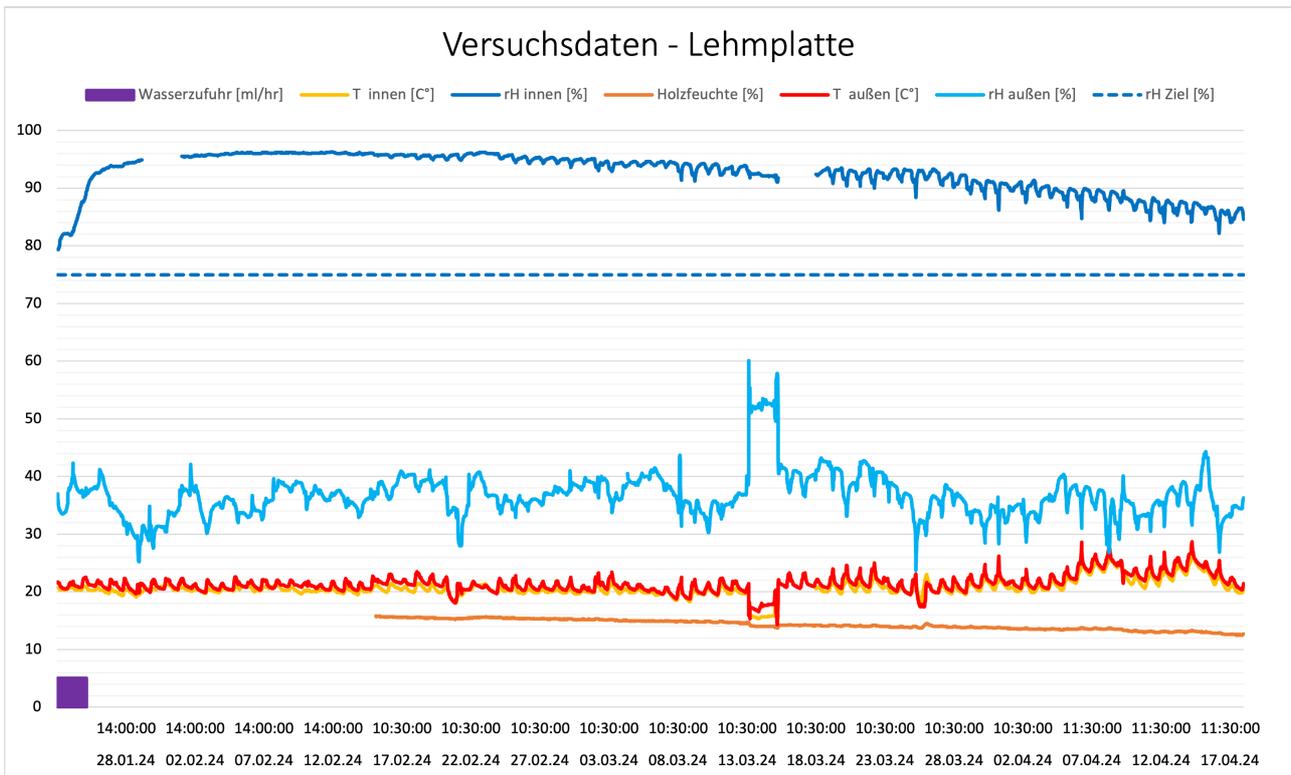


Abbildung 4-3: Versuchsdaten - Lehmplatte

Der Abbildung 4-4 können die Versuchsdaten des Probekörpers mit der Baumwolle als Puffermaterial entnommen werden. In den ersten 48 Stunden wurde dem System Wasser mit einem Durchfluss von 5 ml/St zugeführt. Die innere relative Luftfeuchtigkeit sprang anfangs innerhalb von 24 Stunden von 53 % auf 100% und blieb 10 Tage lang auf diesem Wert. In diesem Zeitraum war das System übersättigt und es hatte sich Wasser am Boden der Klimabox gestaut. Nachdem das überstehende Wasser aus dem System diffundierte und über die Undichtigkeiten entwich, sank die innere relative Luftfeuchte linear mit einer Geschwindigkeit von etwa 0,05 % / Tag. Als der Wert der relativen Luftfeuchte sich im Bereich des Zielwertes von 75 % befand und nicht weiter abfallen sollte, wurde die Baumwolle periodisch regeneriert. Es erfolgte eine Wasserzufuhr von einem bis vier Gramm Wasser im sechs bis 10 Tage Intervall. Der exakte Verlauf der periodischen Regeneration des Puffermaterials wird in Kapitel 4.4 beschrieben. Auch hier wurde bei der Holzfeuchte ein Abfall 13 % auf 9 % dokumentiert. Die kurzfristigen Erhöhungen der inneren Luftfeuchte aufgrund der periodischen Regeneration hatten dabei keinen Einfluss auf die Holzfeuchte.

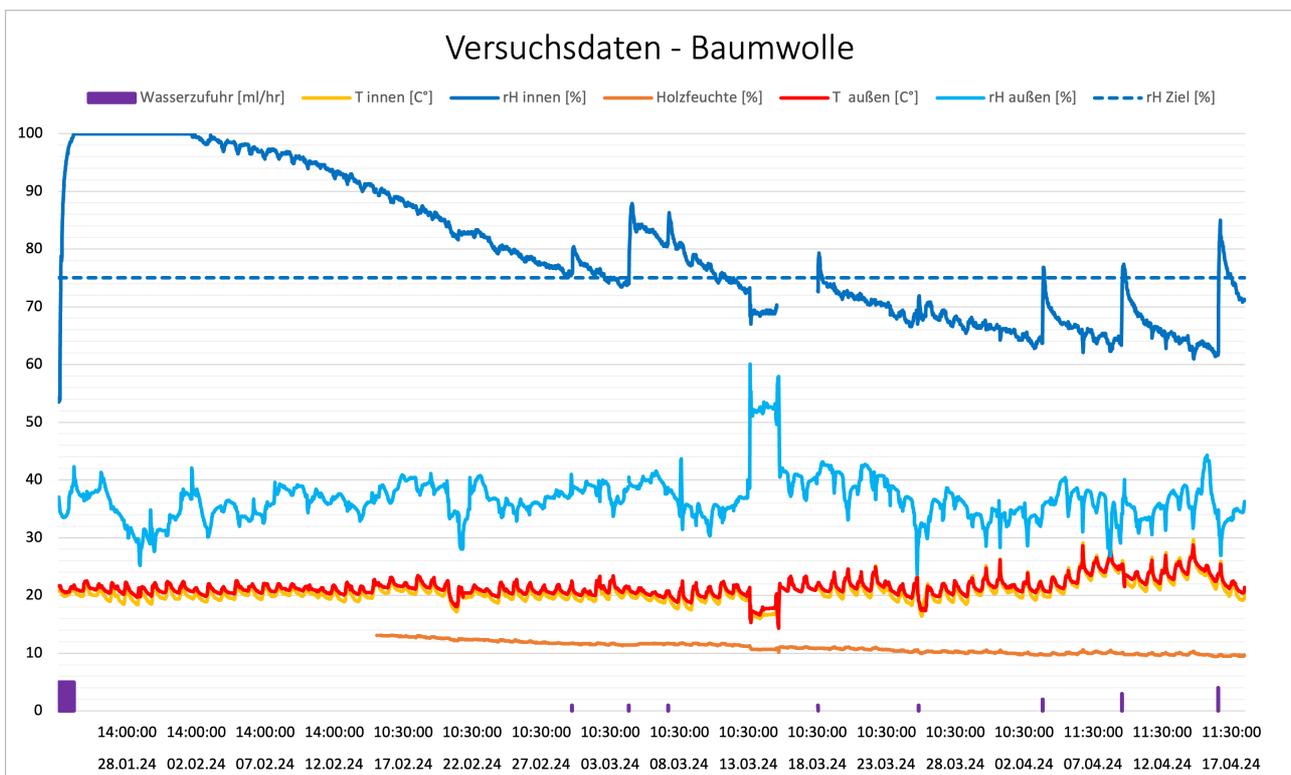


Abbildung 4-4: Versuchsdaten - Baumwolle

4.2 Abhängigkeit der Holzfeuchte

Aufgrund der Versuchsanordnung waren die Holzplatten aus Fichte auf der unbeschichteten Seite anderen klimatischen Bedingungen ausgesetzt als auf der beschichteten Seite. Die relative Luftfeuchte auf der unbeschichteten Seite im Probenkörperinneren wurde von der gesättigten Salzlösung und den Puffermaterialien gesteuert. Das Klima auf der beschichteten Seite unterlag den schwankenden Außenbedingungen. Der Abbildung 4-5 und Abbildung 4-7 kann die Korrelation der Holzfeuchte mit der inneren relativen Luftfeuchte entnommen werden. Abbildung 4-6 und Abbildung 4-8 beschreiben die Korrelation der Holzfeuchte mit der äußeren relativen Luftfeuchte. Diese Abbildungen wurden auf entsprechend des Datenbereichs unterschiedlich skaliert.

Während die Werte der Holzfeuchte in Abhängigkeit von der inneren relativen Luftfeuchte dem Trend einer linear steigenden Funktion folgen, lassen sich die Werte in Abhängigkeit der äußeren relativen Luftfeuchte keiner bestimmten Funktion zuordnen. Obwohl die Holzplatten zu gleichen Anteilen unterschiedlichen klimatischen Bedingungen ausgesetzt sind, wird die Holzfeuchte maßstäblich von der inneren relativen Luftfeuchte bestimmt. Beim Versuchskörper mit der gesättigten Salzlösung bleiben die Werte der Holzfeuchte trotz Schwankungen der relativen Luftfeuchte von bis zu 15 % beinahe konstant (vgl. Abbildung 4-9). Der Abbildung 4-7 kann entnommen werden, dass nicht alle Messwerte der linearen Trendlinie folgen. Hierbei bleiben die Werte der Holzfeuchte auch bei Differenzen der relativen Luftfeuchte von bis zu 25 % konstant.

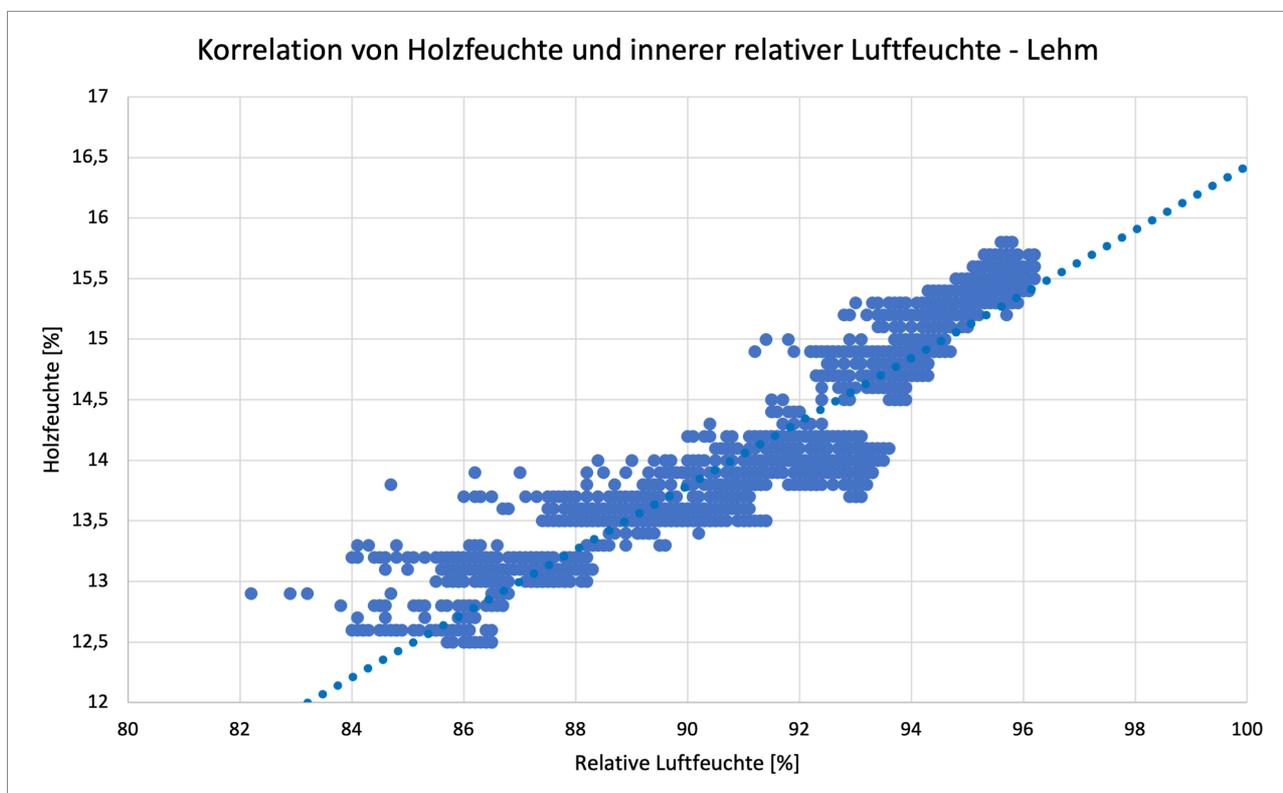


Abbildung 4-5: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - Lehm

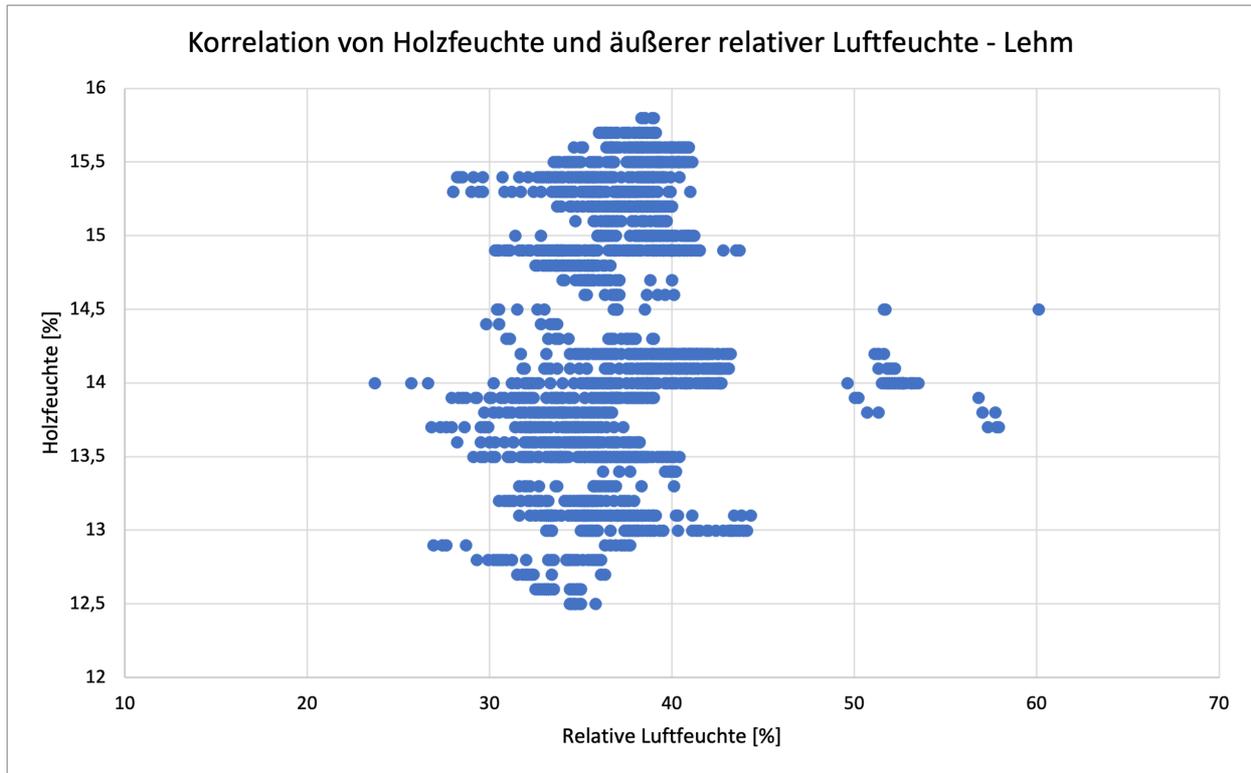


Abbildung 4-6: Korrelation von Holzfeuchte und äußerer relativer Luftfeuchte - Lehm

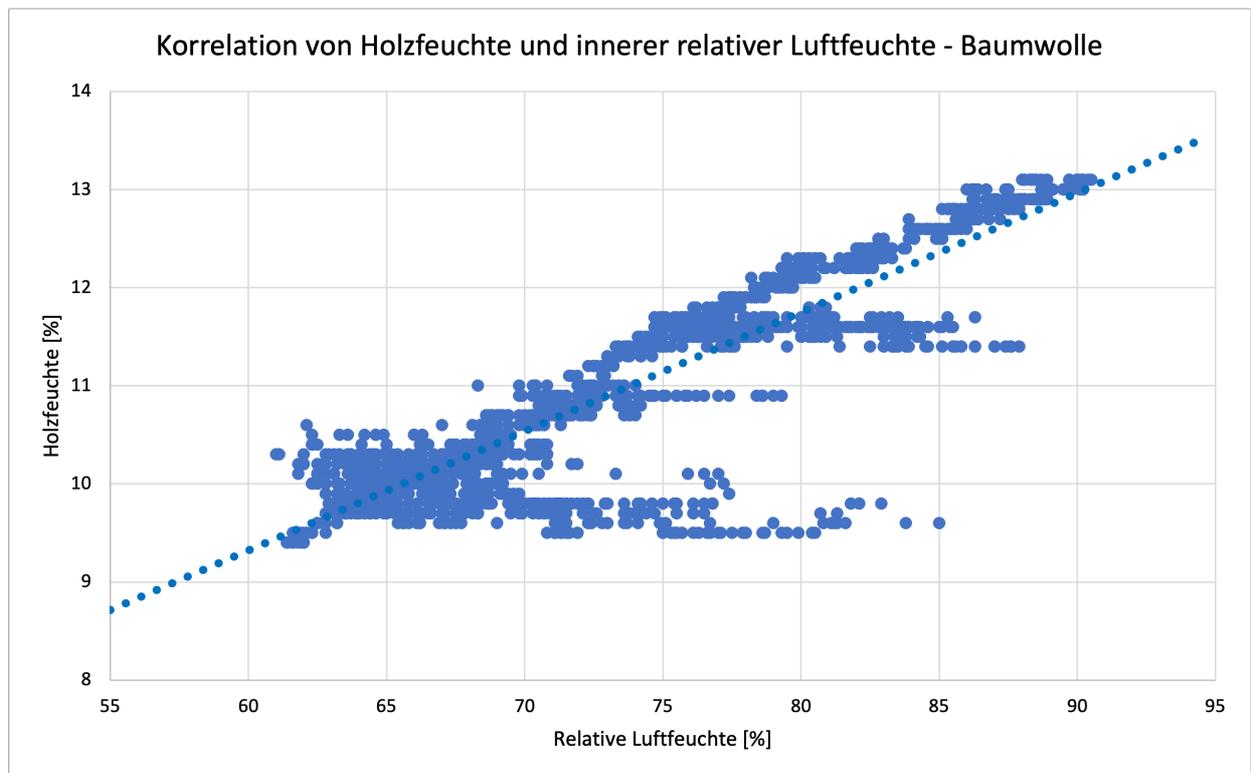


Abbildung 4-7: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - Baumwolle

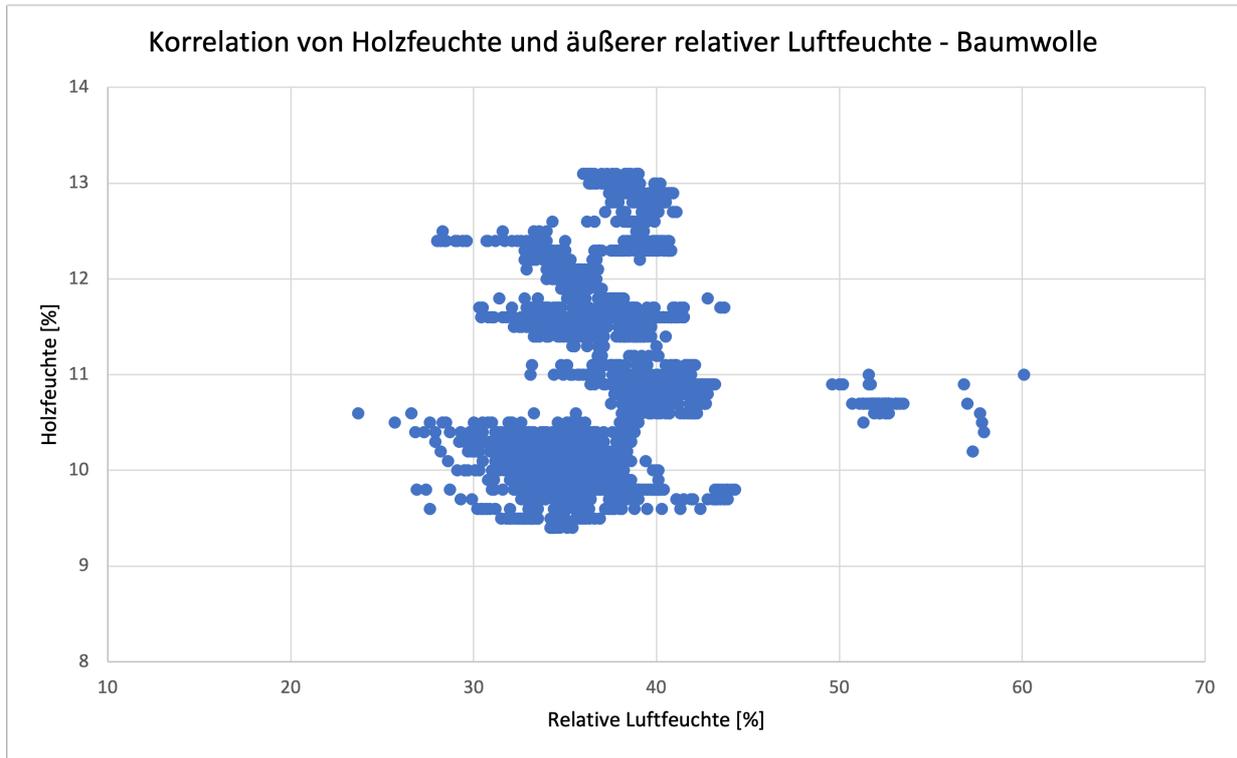


Abbildung 4-8: Korrelation von Holzfeuchte und äußerer relativer Luftfeuchte - Baumwolle

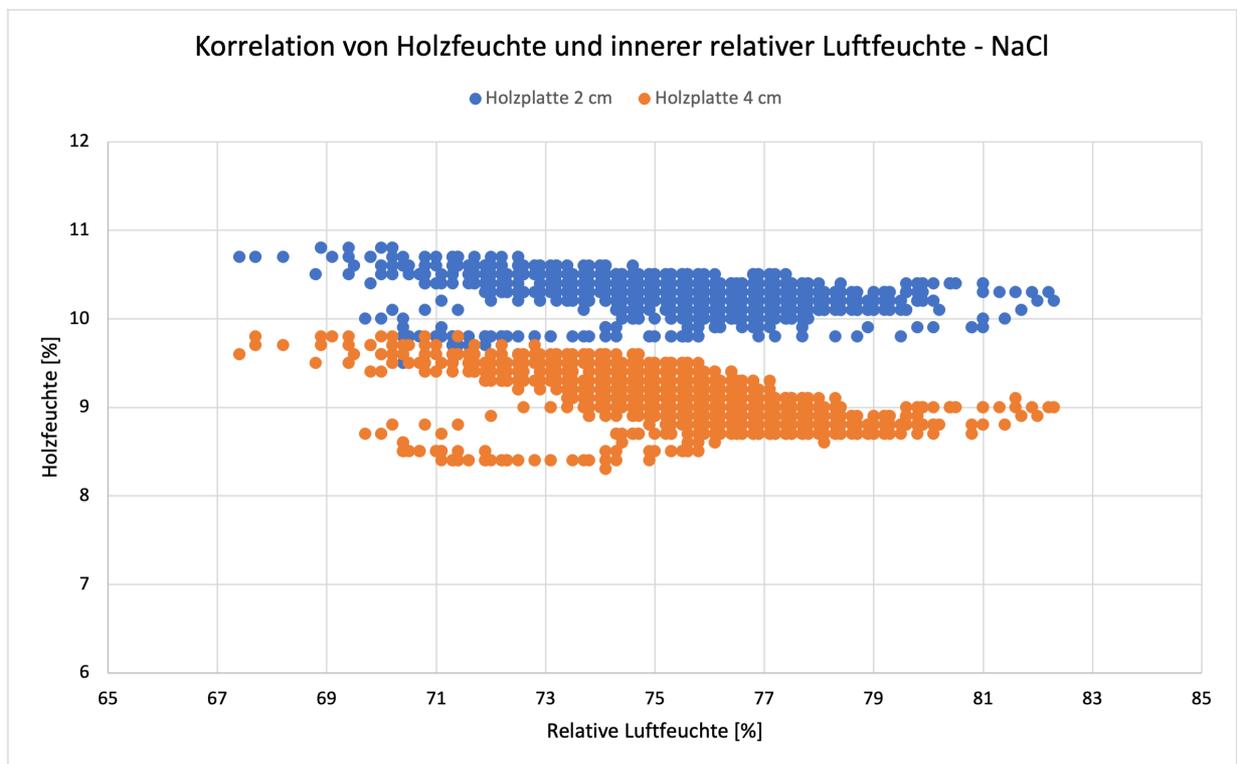


Abbildung 4-9: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - NaCl

Da die Ermittlung der Holzfeuchte durch elektrische Widerstandsmessung wie, in Kapitel 2.2 erklärt wurde, ungenau sein kann, wurden die Messwerte mithilfe der Darmmethode überprüft. Die beiden Holzplatten der Versuchskörper mit den Puffermaterialien wurden hierfür am Ende der Versuchslaufzeit abmontiert und ihr Feuchtegehalt wurde gravimetrisch bestimmt. Die Holzplatten wurden dabei in einem Trocknungsöfen bis zur Massekonstanz getrocknet. Die Massekonstanz war erreicht, als die prozentuale Differenz zwischen zwei Wägevorgängen geringer als 0,01 % betrug. Der zeitliche Abstand dieser betrug zwei Stunden. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 4-1 aufgelistet.

Tabelle 4-1: Vergleich der Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessung mit Darmmethode

		Gewicht [g]	Differenz [%]	Holzfeuchte Darmmethode [%]	Holzfeuchte elektrisch [%]	Differenz [%]
Holz Textil	<i>Feucht</i>	136,51	-			
	<i>Trocknung 1</i>	124,3	8,9	9,8	9,6	0,2
	<i>Trocknung 2</i>	124,32	0,00			
Holz Lehm	<i>Feucht</i>	150,5	-			
	<i>Trocknung 1</i>	133,1	11,6	13,0	12,7	0,3
	<i>Trocknung 2</i>	133,2	0,00			

Mit einer geringen Abweichung von nur etwa 2 % stimmen die Werte der gravimetrischen Holzfeuchtemessung ausreichend genau mit den Werten der elektrischen Widerstandsmessung überein. Anhand dieser Überprüfung konnte davon ausgegangen werden, dass die Messwerte über den gesamten Zeitraum ausreichend genau aufgezeichnet wurden. Außerdem kann davon ausgegangen werden, dass die Werte der Holzfeuchte des Versuchskörpers mit der gesättigten Salzlösung ebenfalls korrekt waren.

Obwohl die Holzfeuchte maßstäblich von der relativen Luftfeuchte im Probekörperinneren bestimmt wird, liegt diese unterhalb der Werte, die in der Literatur für Fichtenholz anzufinden sind. Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt ist Holz ein hygroskopisches Material dessen Holzfeuchte von der relativen Luftfeuchte abhängig ist. In der Tabelle 4-2 sind folgende Werte der Holzfeuchte gegenübergestellt:

- [1] Holzfeuchte, die sich einstellen würde, wenn die Holzplatten vollständig im Probekörperinneren eingeschlossen wären
- [2] Holzfeuchte, die sich einstellen würde, wenn die Holzplatten vollständig den natürlichen äußeren Klimabedingungen ausgesetzt wären
- [3] Holzfeuchte, die sich tatsächlich bei der einseitigen Befeuchtung einstellte

Die theoretischen Werte [1] und [2] der Holzfeuchte wurden mit der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte des jeweiligen Systems und der Zuhilfenahme der Abbildung 4-10 ermittelt.

Tabelle 4-2 – Einstellung der Holzfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen

	[1] Holzfeuchte %	[3] Holzfeuchte %	[2] Holzfeuchte %
Versuchskörper NaCl	15	10,2	7
Versuchskörper Baumwolle	16	11,1	7
Versuchskörper Lehmplatte	22	14,5	7

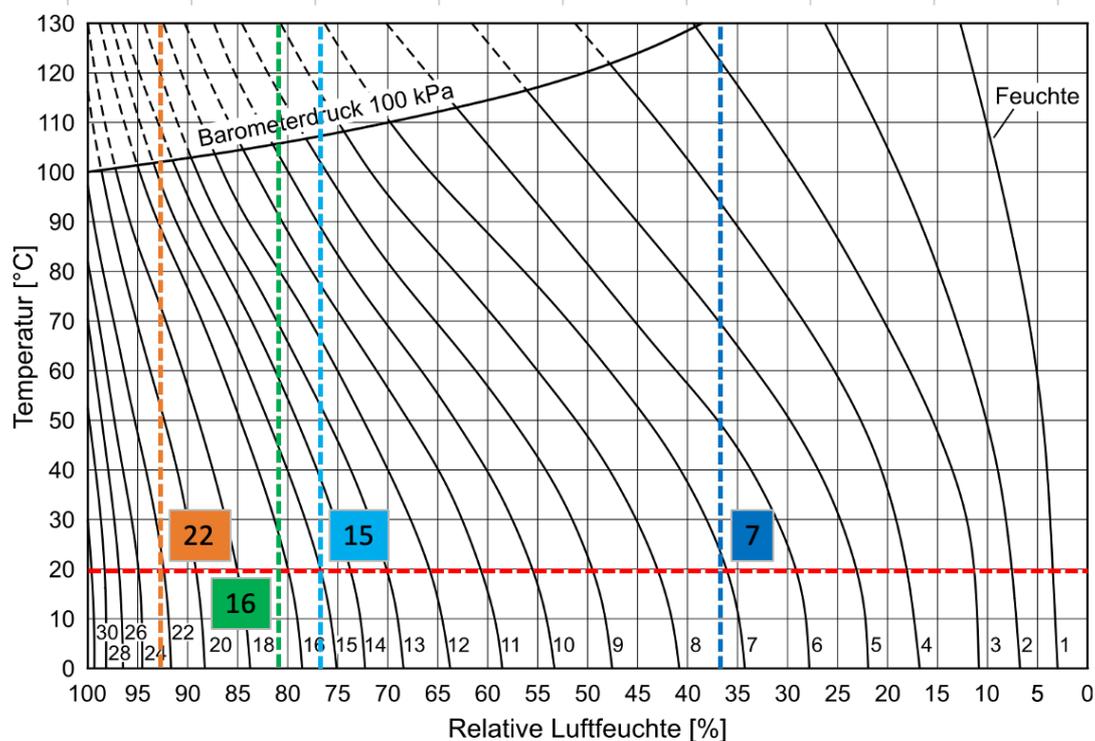


Abbildung 4-10 - Hygroskopisches Gleichgewicht Fichte(Niemz & Sonderegger, 2021)

4.3 Temperaturabhängigkeit der Deliqueszenz

Der Abbildung 4-11 kann die sich einstellende innere relative Luftfeuchte des Probekörpers mit der gesättigten Natriumchlorid Lösung in Abhängigkeit der Temperatur entnommen werden. Dabei zeigt sich, dass die relative Luftfeuchte mit steigender Temperatur einer linear sinkenden Trendlinie folgt. Es wurden aber auch abweichende Werte aufgezeichnet, die der Trendlinie nicht folgen.

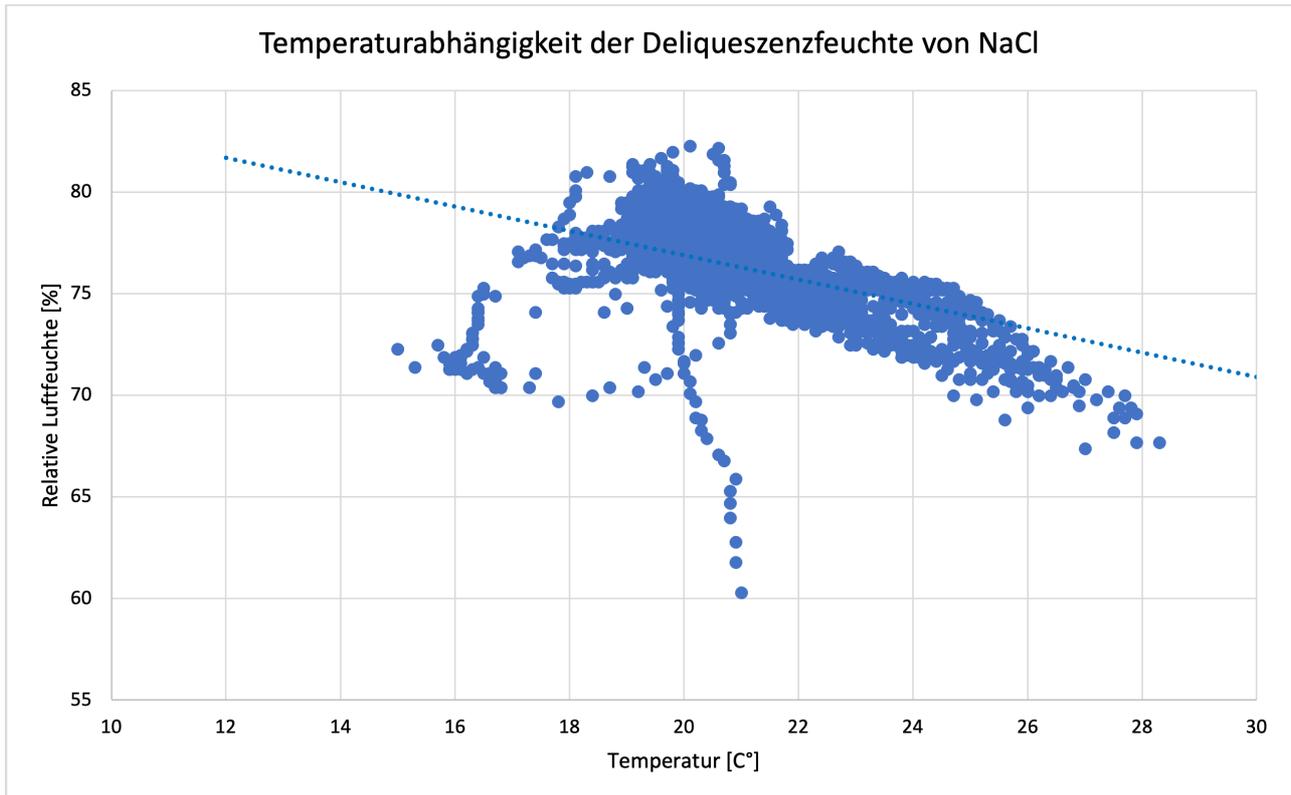


Abbildung 4-11: Temperaturabhängigkeit der Deliqueszenzfeuchte von NaCl

Abbildung 4-12 zeigt einen Ausschnitt des zeitlichen Verlaufs der Versuchsdaten auf. Hier werden zwei gegensätzliche Beobachtungen ersichtlich. Als die Probekörper in ihrer gewohnten Umgebung waren, sank die relative Luftfeuchte bei einer Erhöhung der Temperatur (vgl. Abbildung 4-12). Dies entspricht auch der aus Abbildung 4-11 gewonnen Erkenntnis. Als sich die Probekörper jedoch für einen Zeitraum von drei Tagen in der kälteren Umgebung der Sakristei befanden, kam es zu einer entgegengesetzten Reaktion und die kältere Außentemperatur führte zu einer Senkung der relativen Luftfeuchte (vgl. Abbildung 4-12).

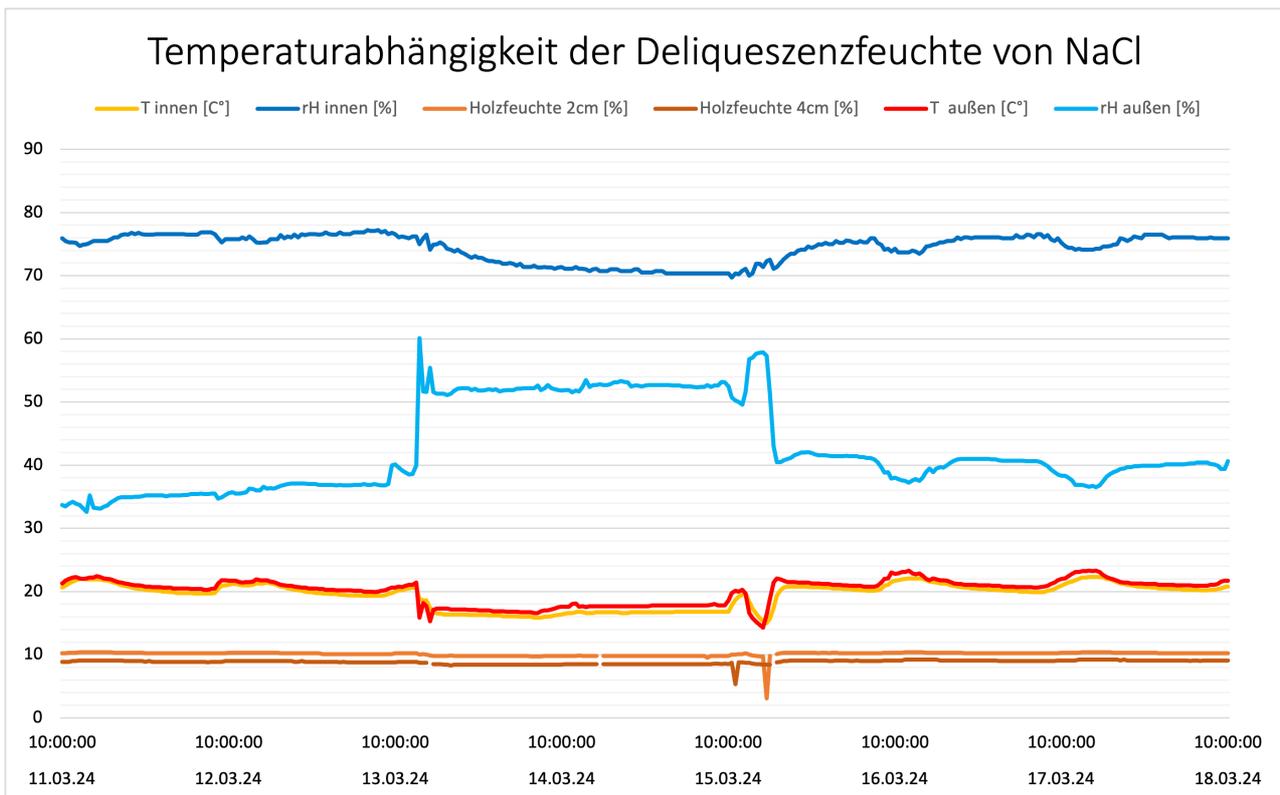


Abbildung 4-12: Zeitlicher Verlauf der Deliqueszenzfeuchte von NaCl

4.4 Diffusionsvorgang und Verlauf der Feuchteregeneration

Der Abbildung 4-13 kann der zeitliche Verlauf des Wasserverlust des Probekörpers mit der Baumwolle und der damit verbundene Abfall der inneren relativen Luftfeuchte entnommen werden. Der Abfall der relativen Luftfeuchte kann mithilfe der linearen Funktion beschrieben werden.

$$rH(t) = -0,05t$$

Der zeitliche Verlauf der Erhöhung der relativen Luftfeuchte wurde aufgrund der periodischen Wasserzugabe separat in Abbildung 4-14 dargestellt. Um den Verlauf der Wiederauffeuchtungsreaktionen zu analysieren, wurden diese einzeln in der Abbildung 4-15 projiziert. Hierbei wurden die Funktionen nach der Methode der kleinsten Quadrate approximiert, die den Verlauf der Versuchsdaten am besten beschreiben. Die besten Resultate lieferten Polynomfunktionen 3.Grades die in der Tabelle 4-3 aufgelistet sind.

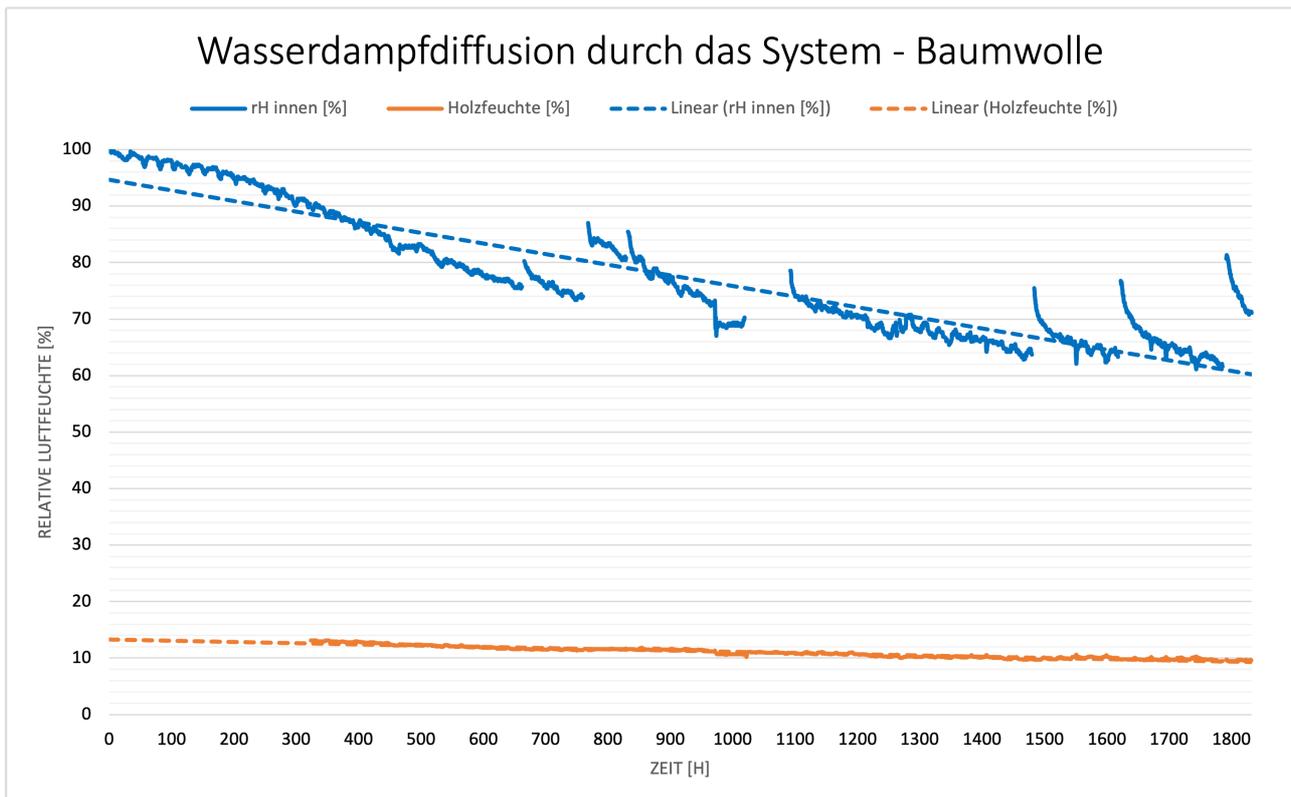


Abbildung 4-13: Wasserdampfdiffusion durch das System - Baumwolle

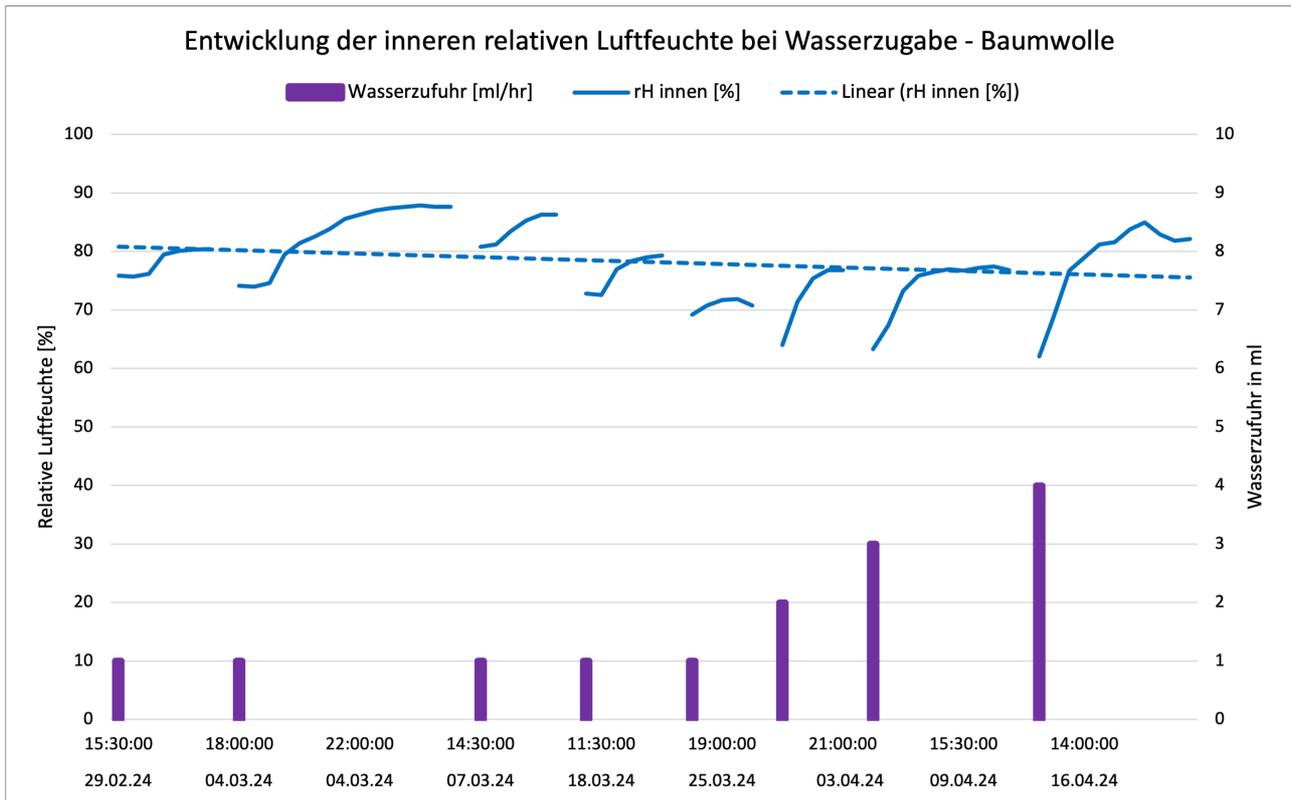


Abbildung 4-14: Entwicklung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle

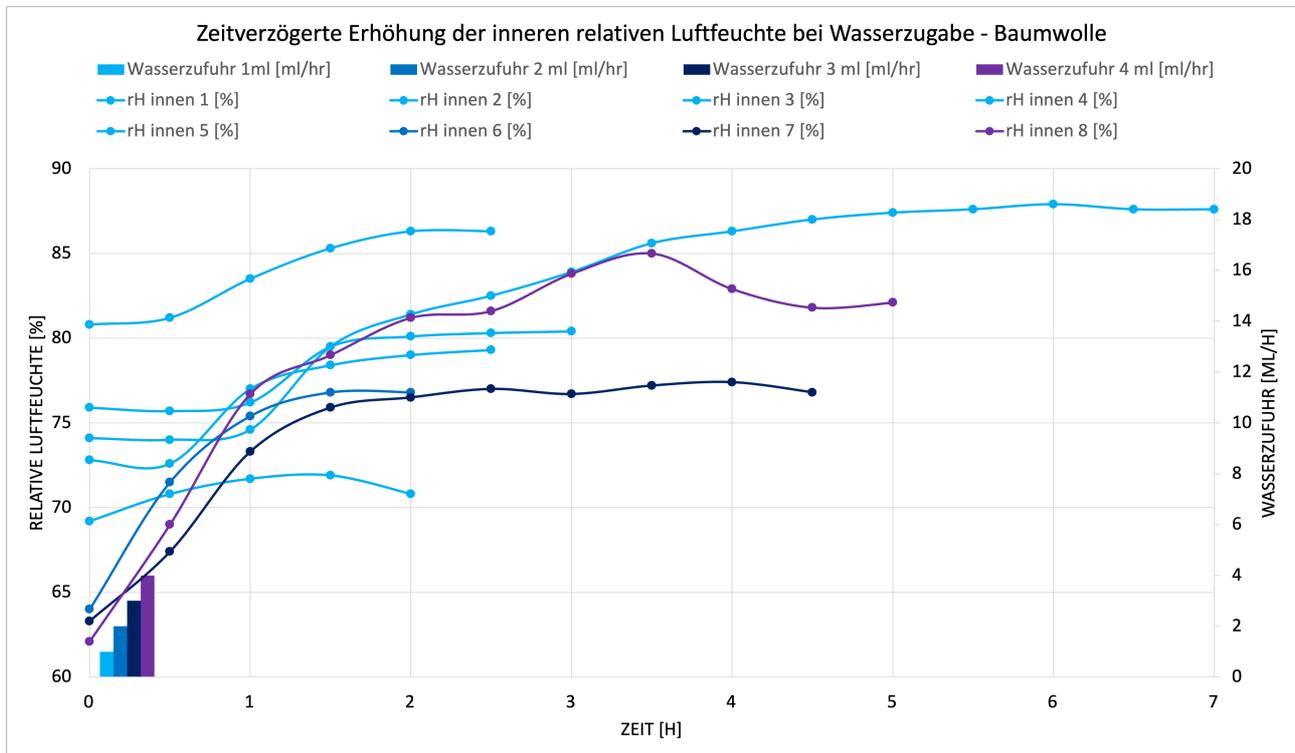


Abbildung 4-15: Zeitverzögerte Erhöhung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle

In der Abbildung 4-15 ist der zeitverzögerte Verlauf von acht Wiederfeuchtungsreaktionen dargestellt. Dabei wurden fünf Reaktionen durch die Zugabe von 1 ml Wasser, eine durch die Zugabe von 2 ml Wasser, eine durch die Zugabe von 3 ml Wasser und eine durch die Zugabe von 4 ml Wasser ausgelöst. Es konnte beobachtet werden, dass es unabhängig von der Wassermenge zwischen zwei und sieben Stunden dauerte, bis die maximale relative Luftfeuchte erreicht wurde. Es konnte weiterhin beobachtet werden, dass abhängig von der eingeführten Wassermenge die Sprünge der relativen Feuchte vergrößert wurden, wenn eine größere Menge Wasser zugeführt wurde. Mithilfe der gewonnenen Versuchsdaten wurde versucht, eine resultierende Funktion abzuleiten. Es wurde der Durchschnittswert der acht verschiedenen Parameter gebildet, um die Polynomfunktion 3. Grades in Abbildung 4-16 aufzustellen. Der Verlauf zeigt eine stetige Erhöhung der relativen Luftfeuchte nach der Wasserzugabe, bis der Maximalwert erreicht wird und die Funktion wieder fällt. Dieser stetige Anstieg bis zum Maximalwert wurde verwendet, um eine Bedingung in den Algorithmus der automatisierten Systemsteuerung in Kapitel 3.1.2 zu implementieren. Hierdurch konnte eine Übersättigung durch Überwässerung verhindert werden.

Tabelle 4-3: Annäherungsfunktionen Auffeuchtung der Umgebungsluft durch Baumwolle

Parameter	A1	A2	A3	A4
Funktion 1	-0,8888889	3,74285714	-1,7730159	75,7952381
Funktion 2	-0,0303838	-0,1007506	4,24984797	72,7547386
Funktion 3	-1,1407407	3,76349206	-0,0727513	80,7134921
Funktion 4	-1,3259259	4,06507937	0,76084656	72,4650794
Funktion 5	-0,4	-0,5428571	3,48571429	69,2085714
Funktion 6	1,46666667	-9,4	19,3333333	64
Funktion 7	0,4035742	-4,11958042	13,5234654	62,8587413
Funktion 8	0,33006993	-4,23216783	16,8559441	62,2
Resultierende Funktion	-0,19820357	-0,85299092	7,04542305	0

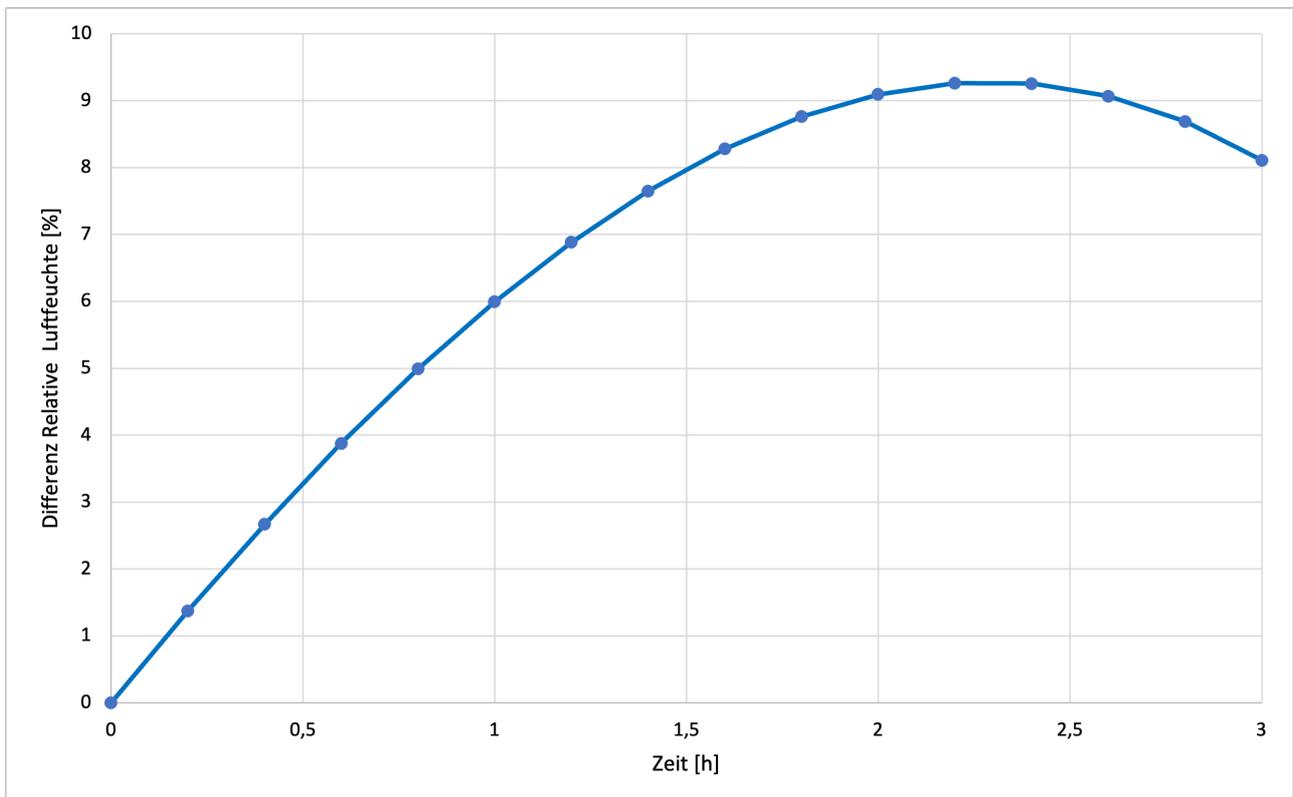


Abbildung 4-16: Approximierte zeitverzögerte Erhöhung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle

4.5 Deskriptive Statistik

Die Raumtemperatur, in der sich die Probekörper befanden, betrug im Durchschnitt 21,4 Grad Celsius mit einer Standardabweichung von 1,6 Grad Celsius. Die durchschnittliche relative Luftfeuchte betrug 36,7 % mit einer Standardabweichung von 3,9 %. Während die Temperatur über den gesamten Zeitraum sehr konstant blieb, unterlag die relative Luftfeuchte geringen Schwankungen (vgl. Tabelle 4-4).

Tabelle 4-4: Deskriptive Statistik Außenbereich

	Relative Luftfeuchte %	Temperatur °C
Mittelwert	36,7	21,4
Standartfehler	0,06	0,02
Median	36,5	21,2
Modus	37,6	20,9
Standartabweichung	3,9	1,6
Wertebereich	36,4	14,4
Minimum	23,7	14,3
Maximum	60,1	28,7

Der Tabelle 4-5 kann die deskriptive Statistik für den Probekörper mit der gesättigten Natriumchlorid Lösung entnommen werden. Die relative Luftfeuchte betrug im Durchschnitt 76,4 % mit Werten zwischen 60,3 % und 82,3 %. Die durchschnittliche Holzfeuchte betrug 10,2 % bei der dünneren Holzplatte und 9,0 % bei der dickeren. Das gesamte System unterlag insgesamt sehr geringen Schwankungen und hat dadurch sehr geringe Standardabweichungen.

Tabelle 4-5 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit Natriumchlorid

	Relative Luftfeuchtigkeit %	Holzfeuchte 2cm %	Holzfeuchte 4cm %
Mittelwert	76,4	10,2	9,0
Standartfehler	0,033	0,004	0,005
Median	76,6	10,2	9,0
Modus	76,6	10,2	8,8
Standardabweichung	2,12	0,21	0,26
Wertebereich	22	7,7	4,5
Minimum	60,3	3,1	5,3
Maximum	82,3	10,8	9,8
Konfidenzniveau (95%)	0,065	0,007	0,01

Der Tabelle 4-6 kann die deskriptive Statistik für den Probekörper mit der Lehmplatte als Puffermaterial entnommen werden. Die relative Luftfeuchte betrug im Durchschnitt 92,6 % mit Werten zwischen 77,1 % und 96,3 %. Die durchschnittliche Holzfeuchte betrug 14,3. Das gesamte System unterlag bis zur halben Versuchslaufzeit geringen Schwankungen. Danach fing die relative Luftfeuchte langsam abzufallen und zeitgleich auch die Holzfeuchte.

Tabelle 4-6 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit Lehmbauplatte

	Relative Luftfeuchtigkeit %	Holzfeuchte %
Mittelwert	92,6	14,3
Standartfehler	0,05	0,02
Median	93,6	14,2
Modus	96,1	14
Standardabweichung	3,5	0,7
Wertebereich	19,2	3,3
Minimum	77,1	12,5
Maximum	96,3	15,8
Konfidenzniveau (95%)	0,11	0,03

Der Tabelle 4-7 kann die deskriptive Statistik für den Probekörper mit der Baumwolle als Puffermaterial entnommen werden. Die relative Luftfeuchte betrug im Durchschnitt 80 % mit Werten zwischen 53,5 % und 99,9 %. Die durchschnittliche Holzfeuchte betrug 10,9. Das gesamte System unterlag den größten Schwankungen mit einer Standardabweichung von 12,4 % für die relative Luftfeuchte. Trotz der großen Schwankungen der relativen Luftfeuchte blieb der Wert der Holzfeuchte weitestgehend konstant und fiel langsam mit dessen Durchschnitt.

Tabelle 4-7 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit der Baumwolle

	Relative Luftfeuchtigkeit %	Holzfeuchte %
Mittelwert	80,0	10,9
Standartfehler	0,2	0,02
Median	77,4	10,9
Modus	99,9	11,6
Standardabweichung	12,4	1,0
Wertebereich	46,4	3,7
Minimum	53,5	9,4
Maximum	99,9	13,1
Konfidenzniveau (95%)	0,4	0,04

4.6 Zuverlässigkeit der automatisierten Systemsteuerung

Beim sporadischen Auslesen der Versuchsdaten fiel auf, dass das Steuerungssystem in der Lage war über den Zeitraum von zwei Wochen Werte der relativen Luftfeuchte um 75 % zu liefern. Dies entsprach den gewünschten Ergebnissen. Dank der Versuchsdaten aus Kapitel 4.4 konnte ein geeigneter Algorithmus entwickelt werden, der die verzögerte Erhöhung der relativen Luftfeuchte berücksichtigt und verhindert, dass das System übersättigt wird. Das System war trotz der zwei Löcher im Deckel des Glasgefäßes unerwartet dicht. Deshalb wurde nach der anfänglichen Wasserzufuhr im Laufe der Versuchslaufzeit wenig Wasser aus dem Reservoir entnommen.

5 Diskussion und Ausblick

Es wurde der Einsatz von einer gesättigten Salzlösung, einer Lehmplatte und eines Textils aus Baumwolle hinsichtlich ihrer Eignung als Befeuchtungsmittel untersucht. Mit den Versuchsergebnissen der vorliegenden Arbeit sollten Erkenntnisse über die Effektivität und Verträglichkeit einer einseitigen Befeuchtungsmethode gewonnen werden. Es sollte Aufschluss darüber gegeben werden, wie diese sich auf den zeitlichen Verlauf der Holzfeuchte auswirken und wie gut sich ein solches System unter den präzisen Anforderungen eines Kunstwerks, eignet. Das grundlegende Bewertungskriterium war dabei, mit welcher Genauigkeit die relative Luftfeuchte in einem geschlossenen Volumen auf einem bestimmten Wert gehalten werden konnte. Dabei spielte das Langzeitverhalten eine wichtige Rolle.

Die Verwendung der Natriumchloridlösung als Beispiel einer gesättigten Salzlösung lieferte die besten Ergebnisse. Die relative Luftfeuchte wurde über die gesamte Versuchslaufzeit von 12 Wochen sehr konstant mit sehr geringen Abweichungen auf einem durchschnittlichen Wert von 76,1 % gehalten. Es trat trotz der hohen relativen Luftfeuchte kein Schimmelbefall am Holzprobekörper auf. Besonders ausgezeichnet hat sich dabei die Wirtschaftlichkeit des Systems, da es nach der initialen Einrichtung ohne weitere Wartungsarbeiten stabil blieb. Im vorhandenen Raumvolumen von 0,01 m³ war über 12 Wochen Versuchslaufzeit genug Wasser über dem Bodensatz der 500 ml gesättigten Salzlösung vorhanden, um die Wasserverluste auszugleichen. Die Diskussion in der Literatur über das Kriechverhalten von Salzen konnte in diesem Fallbeispiel nicht bestätigt werden. Im Behältermaterial aus Polyethylen kam es zu Gunsten der Ergebnisse zu keinen Kriecherscheinungen der Salzlösung. Die Temperaturabhängigkeit der Deliqueszenz stütze die bisherigen Ergebnisse der Literatur und fiel mit steigender Temperatur.

Werden Museumsvitrinen mit hygroskopischen Puffermaterialien betrachtet, so wurden diese in der Literatur weitestgehend dafür verwendet, um Feuchtigkeitsextremen zu verhindern. Dabei wurde der Trend der Umgebungsfeuchte gepuffert, konnte aber nicht umgekehrt werden. Die in dieser Arbeit verwendeten hygroskopischen Puffermaterialien Lehm und Baumwolle sollten mithilfe einer integrierten periodischen Regeneration in der Lage sein, eine bestimmte relative Luftfeuchte unabhängig von den äußeren Bedingungen aufrecht zu erhalten. Mit den beiden Versuchskörpern wurden zwar Umgebungen mit einer abweichenden relativen Feuchte erschaffen, diese entsprachen aber nicht den präzisen Anforderungen eines Kunstwerkes. Aufgrund der anfänglichen Übersättigung des Systems stellte sich bei beiden Systemen eine zu hohe relative Luftfeuchte ein. Aus den Versuchsergebnissen geht der Einfluss des Verhältnisses von Raumvolumen zu verwendetem Puffermaterial hervor. Die große Menge an Lehm im Versuchskörper war in der Lage die anfangs zugeführte Wassermenge komplett aufzunehmen, zu speichern und über einen langen Zeitraum ein konstantes Klima aufrecht zu erhalten. Obwohl die gewünschte relative Luftfeuchte nicht erreicht wurde, konnte dadurch ein sehr konstantes Klima mit geringen Schwankungen aufrechterhalten werden. Die Wasserreserven im Lehm waren dabei so groß, dass, trotz des Wasserverlustes durch Diffusion, die relative Luftfeuchte über 12 Wochen Versuchslaufzeit nicht auf den gewünschten Wert von 75 % abfiel. Im Gegensatz dazu musste die geringe Menge an Baumwolle im Versuchskörper periodisch im Intervall von sechs bis zehn Tagen durch Wasserzufuhr

regeneriert werden, damit sich die Werte der relativen Luftfeuchte um den Zielwert von 75 % befinden. Um eine wirtschaftliche Lösung aufzeigen, die periodische Regeneration der Puffermaterialien durch Wasserzugabe zu automatisieren, wurde eine Systemsteuerung vorgestellt. Mithilfe einfacher Steuerungselemente wie einem Microcontroller, einem Feuchtesensor und einer Pumpe konnte ein erster Ansatz realisiert werden. Anhand der Versuchsergebnisse der Wiederauffeuchtungsreaktionen der Puffermaterialien (vgl. Abbildung 4-15) konnte ein passender Algorithmus entwickelt werden. Dieser implementierte die verzögerte Erhöhung der relativen Luftfeuchte des Systems als eine von zwei Bedingungen, als Entscheidungsgrundlage der periodischen Regeneration. Das System war in der Lage über einen längeren Zeitraum von mehreren Wochen eine konstante relative Luftfeuchte mit geringen Schwankungen aufrecht zu erhalten.

Die Ergebnisse der Versuchsserie zeigen, dass trotz einseitiger Befeuchtung die Holzfeuchte maßgeblich von der inneren relativen Luftfeuchte auf der diffusionsoffenen Seite der Holzplatte gesteuert wird. Die sich einstellende Holzfeuchte lag jedoch unterhalb der Werte, die in der Literatur für Fichtenholz anzufinden sind. Es liegt nahe, dass der Grund hierfür die einseitige Befeuchtung ist, bei der die diffusionshemmende beschichtete Seite der Holzplatte den äußeren Umweltbedingungen ausgesetzt ist. Der zeitliche Reaktionsverlauf der Holzfeuchte mit der relativen Luftfeuchte war konsistent mit den Befunden vorheriger Studien. Die Holzfeuchte reagierte dabei nur auf langfristige Änderungen der relativen Luftfeuchte und ignorierte kurzfristige Schwankungen. Somit kann auch die Streuung der relativen Luftfeuchte bei gleichbleibender Holzfeuchte in der Abbildung 4-7 und der Abbildung 4-9 erklärt werden. Weiterhin zeigten die Ergebnisse, dass sich die Holzfeuchte in verschiedenen Tiefen der Holzplatte unterscheidet. Dabei war die Holzfeuchte an den Messstellen, die näher an der nicht beschichteten befeuchteten Seite lagen, höher. Wie in Kapitel 2.2.2 aufgezeigt wurde kann daraus geschlossen werden, dass sich im Holz ein von der diffusionshemmenden beschichteten zur gegenüberliegenden Seite steigender Feuchtegradient ausbildet.

Die vorliegenden Forschungsergebnisse können die bisherigen Modelle von Klimavitrinen ergänzen. Im wesentlichen Unterschied zu herkömmlichen Konstruktionen in denen Kunstwerke eingeschlossen werden, bildete das zu befeuchtende Objekt selbst den Sichtbereich aus. Es konnte bestätigt werden, dass in einem solchen System trotz der größeren Wasserverluste durch Diffusion ein stabiles Klima mit ressourcenschonenden Mitteln aufrechterhalten werden konnte. Dabei kommt es im Wesentlichen auf die Dichtigkeit des Gesamtsystems, das Raumvolumen und die verwendete Menge an Puffermaterial an. Ein großes undichtes System in der eine geringe Menge Puffermaterial vorhanden ist, muss demnach öfter periodisch regeneriert werden. Aufgrund folgender Aspekte kann davon ausgegangen werden, dass die vorgestellte Studie valide Versuchsergebnisse liefert, die in zukünftige Projekte miteinfließen können:

- Konstruktion der Klimavitrine in Anlehnung an vorhandene Studien
- Lange Versuchslaufzeit über 12 Wochen
- Verwendung von gesättigter Salzlösung mit großen Datensätzen in der Literatur
- Verwendung von Puffermaterialien, die für ihre feuchteregulierende Wirkung bekannt sind

- Überprüfung der durch elektrische Widerstandsmessung ermittelten Holzfeuchte mittels der präzisen Darmmethode

Trotzdem müssen auch auf die Limitationen der vorliegenden Arbeit eingegangen werden. Mit drei Probekörpern konnte nur eine geringe Anzahl an verschiedenen Befeuchtungsmitteln untersucht werden. Es sollten weitere Salzlösungen die unterschiedliche Feuchtebereiche abdecken untersucht werden. Es konnten zwar größere Messfehler der Holzfeuchte ausgeschlossen werden, doch diese wurde nur in einer Tiefe der Holzplatte bestimmt. Dadurch war es nicht möglich den exakten Verlauf des Holzfeuchtegradienten zu ermitteln. Die Versuchskörper waren fast ausschließlich denselben klimatischen Außenbedingungen ausgesetzt. Selbst eine geringe Änderung der Umgebungsbedingungen sorgte wie in Abbildung 4-12 aufgezeigt wurde für eine unerklärliche Umkehrung der Reaktion der Deliqueszenz auf die Temperatur. In weiterführenden Studien könnten die Systeme unterschiedlichen klimatischen Randbedingungen ausgesetzt werden, um die Auswirkungen einer veränderten Umgebung besser zu untersuchen. Die Systeme mit den Puffermaterialien wurden anfangs übersättigt, da sie iterativ auf die gewünschte relative Luftfeuchte gebracht werden sollten, die Kontrollintervalle der Wasserzugabe aber zu lang waren. Besser wäre es gewesen, die Puffermaterialien mithilfe der vorgestellten Sorptionsisotherme zu konditionieren. Ein System, welches mithilfe von Baumwolle auf 75 % relativer Luftfeuchte gehalten werden muss, sollte sich demnach zuvor in einer Klimakammer bei dieser relativen Luftfeuchte auf die richtige Materialfeuchte anpassen. Ist dies nicht erwünscht, sollte wie in Kapitel 3.2.2 vorgestellt eine automatisierte Wasserzufuhr verwendet werden.

Abschließend lässt sich sagen, dass es möglich ist mit einer einseitigen Befeuchtung die Holzfeuchte zu steuern. Vor allem die Verwendung einer gesättigten Salzlösung stellt eine funktionierende, wirtschaftliche und angenehme Möglichkeit der Feuchtigkeitskontrolle in einem diffusionsoffenen System dar. Bei der Verwendung von Puffermaterialien als Befeuchtungsmittel, muss eine genaue Ermittlung der interagierenden Wassermengen erfolgen. Dabei können Sorptionsisotherme bei der Materialfeuchtigkeit, hygrothermische Halbwertszeiten bei der verwendeten Klimavitrine und automatisierte Systemsteuerungen bei der periodischen Regeneration verwendet werden. Die vorliegende Thesis leistet einen wissenschaftlichen Beitrag zur konservatorischen Praxis, um die uns erhaltenen Kunstwerke und historischen Objekte in den bestmöglichen Konditionen an künftige Generationen weiterzugeben.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Carrier-Diagramm – Zusammenhang Lufttemperatur, absolute und relative Feuchte (Vogdt et al., 2022)	6
Abbildung 2-2: Taupunkttemperatur θ_s der Luft in Abhängigkeit der relativen Feuchte und Lufttemperatur (Willems, Schild, und Stricker 2018).....	7
Abbildung 2-3: Feuchtetransportmechanismen in Abhängigkeit des Porenradius (Willems et al., 2018).....	8
Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der Wasserdampfdiffusion und Kapillarleitung in einer Kapillarpore (Vogdt et al., 2022)	9
Abbildung 2-5: Kapillare in einem festen Stoff 1: Adsorbatwasser an der Randfläche, 2: Wasserdampf im Öffnungsbereich, 3: Flüssigwasser im Inneren (Wernecke 2003).....	10
Abbildung 2-6: Schematische Darstellung einer Sorptionsisotherme (Willems et al., 2018).....	11
Abbildung 2-7: Schematische Darstellung des strukturellen Aufbaus von Holz: (a) Makrostruktur von Nadelholz (b) Mikrostruktur von Nadelholz (Niemz & Sonderegger, 2021)	12
Abbildung 2-8: Schematische Darstellung der Holzzelle – Wasserabgabe und -aufnahme der Holzzelle unter- und oberhalb des Fasersättigungsbereiches (Marina Ineichen, 2020).....	13
Abbildung 2-9: Elektronische Holzfeuchtemessung Optimale Position zur Bestimmung der Holzfeuchte mit isolierten Einschlagelektroden (Holzbau Deutschland-Institut e.V. 2023)	14
Abbildung 2-10: Vergleich der Widerstandskennlinien verschiedener Holzarten (Du et al., 1991)	15
Abbildung 2-11: Sorptionsisothermen von Holz und Bindungsformen des Wassers a) Phasen der Sorptionsisothermen b) Hystereseffekt bei erster Desorption von noch nie getrocknetem Holz sowie mehrfache Desorption (Niemz & Sonderegger, 2021).....	17
Abbildung 2-12: Ausgleichsfeuchte von Fichte in Abhängigkeit von der Temperatur (Niemz & Sonderegger, 2021)	18
Abbildung 2-13: Quell- und Schwindverhalten von Holz: (a) Quellung von Rotbuchenholz: α_l längs, α_r radial, α_t tangential, α_v Volumen, (b) Verzerrung von Holz durch unterschiedliche Schwindung (Niemz & Sonderegger, 2021).....	19
Abbildung 2-14: Einfluss der Darrdichte auf die Volumenschwindung verschiedener Holzarten (Niemz und Sonderegger 2021).....	20
Abbildung 2-15: Änderungen des tangential gerichteten Druckes, der Feuchtigkeit und der Höhe einer Kiefernspintprobe in Abhängigkeit von der Wässerungs- und Trocknungszeit bei einer Anfangsfeuchtigkeit von 0% und einer Druck-Vorspannung von 5 kg/cm ² (Perkitny, 1960).....	21
Abbildung 2-16: Relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur hinter der Platte sowie Durchbiegung der oberen Platte über einen Zeitraum von 2 Jahren (Colmars 2013).....	22

Abbildung 2-17: Links: Feuchteausdehnungskoeffizient für Pappel, Leim, Kreidegrund und Ölfarbe. Rechts: von Ausgangsfeuchte 50 % berechnete kombinierte Dehnung und Stauchung für Kreidegrund auf Pappel in Faserrichtung und quer dazu (Alexandra Troi, 2009; Mecklenburg Marion, Tumosa Charles, Erhardt David, 1994)	23
Abbildung 2-18: Cup-Methode(Hendrickx u. a. 2016).....	25
Abbildung 2-19: Zusammensetzung der Schichten von alten Holztafelgemälden (De Backer u. a. 2018).....	25
Abbildung 2-20: Vergleich der Permeabilität der in der C-Reihe verwendeten Beschichtungen. Experimentelle Werte (o) und Regressionsfunktionen (-) in drei verschiedenen Maßstäben aufgetragen: (a) Gesamtvergleich, (b) Vergleich der Beschichtungen mit höherem Widerstand (Stöcklein et al., 2022)	26
Abbildung 2-21: Vergleich der Parameter a und b einer exponentiellen Regressionsfunktionen für die Permeabilität verschiedener Beschichtungen (Stöcklein u. a. 2022).....	27
Abbildung 2-22: Gemessener Dampfwiderstand von Leinwand in einfacher, doppelter und dreifacher Lage (Hendrickx u. a. 2016).....	28
Abbildung 2-23: Durchlässigkeit von Anstrichsystemen mit schrittweiser Zugabe von Zusatzschichten (Hendrickx u. a. 2016).....	28
Abbildung 2-24: Vergleich der Permeabilität der Beschichtungen bei RH 0% / 50 (a) die relative Permeabilität δ und (b) die Permeanz W (Stöcklein u. a. 2022)	29
Abbildung 2-25: Wasserdampfdurchlässigkeit von Acrylfarbe in Abhängigkeit vom Bindemittelgehalt (Topçuoğlu, Altinkaya, und Balköse 2006).....	30
Abbildung 2-26: Jährliche RH-Zyklen in Raum (durchgezogene Linie) und Gehäuse (gestrichelte Linie). Die Raumzyklen stammen aus aufgezeichneten Datensätzen. Gehäuse Zyklen sind berechnet (Thomson, 1977).....	31
Abbildung 2-27: Frans van Mieris, Der Briefschreiber, 1680, Öl auf Eichentafel, Rijksmuseum, Amsterdam, in einem Rahmen, der die Funktion einer Mikro-Klimavitrine erfüllt. Foto des Rijksmuseums (Sozzani, 1997).....	32
Abbildung 2-28: Schematische Darstellung des Querschnitts einer Mikroklima-Rahmenvitrine (Sozzani, 1997).....	33
Abbildung 2-29: Leckagemechanismen eines Gehäuses (Michalski 1994).....	34
Abbildung 2-30: Links: Leckage-Diagramm für mittelgroße quaderförmige Gehäuse sicher (1 m ³). Rechts: Leckage-Diagramm für dünne, vertikale, mittelgroße Gehäuse (100 x 100 x 5cm) Loch an jeder Ecke, Fuge rundum oben und unten, Wandstärke von 5 mm (Michalski, 1994).....	34
Abbildung 2-31: Variation der relativen Luftfeuchtigkeit mit der Konzentration für einige Salzlösungen bei 25 C (a) NaOH.H ₂ O, (b) MgCl ₂ .6H ₂ O, (c) LiCl.H ₂ O, (XO) Schwefelsäurelösung (Young, 1967) (Kutzelnigg & Königsheim, 1963).....	35
Abbildung 2-32: Gang der relativen Feuchte in Abhängigkeit von der Temperatur (gesättigte NaCl-Lösung) (Kutzelnigg und Königsheim 1963).....	37
Abbildung 2-33: Einfluss der Luftumwälzung auf die Gleichgewichtseinstellung (Kutzelnigg & Königsheim, 1963)	38

Abbildung 2-34: Vitrine auf der Veste Coburg mit Magnesiumchloridlösung in Kunststoffbehältern im unteren Teil während der Wartung (Eggert 2022).....	40
Abbildung 2-35: Links: Die Änderung der relativen Luftfeuchtigkeit mit der Temperatur in einer 1m ³ Box mit und ohne Baumwolle als Feuchtigkeitspuffer. Rechts: Die Absorptionsisotherme von Baumwolle bei drei Temperaturen (Tim Padfield, 1998).....	43
Abbildung 2-36: Pufferung der relativen Luftfeuchtigkeit einer Box gegen den Effekt der Zugabe von Wasser (Tim Padfield 1998).....	44
Abbildung 2-37: Sorptionsisotherme Baumwolle (Urquhart & Williams, 1924).....	45
Abbildung 2-38: Sorptionsisotherme Lehmbohle (Marina Ineichen, 2020).....	46
Abbildung 2-39: Sorptionsisotherme Lehmbohle rH < 93 % (Marina Ineichen, 2020).....	46
Abbildung 2-40: Sorptionsisotherme Lehmbohle rH > 93 % (Marina Ineichen, 2020).....	47
Abbildung 3-1: Flussdiagramm Versuchsdurchführung.....	48
Abbildung 3-2: Schematische Darstellung der Versuchskörper.....	49
Abbildung 3-3: Einschlagelektroden der elektrischen Widerstandsmessung (Osman Kocan, 2024).....	50
Abbildung 3-4: Schematische Darstellung automatisierte Systemsteuerung.....	51
Abbildung 3-5: Links: Prüfkörper mit der eingeschlossenen Baumwolle als Puffermaterial Rechts: Prüfkörper mit der eingeschlossenen Lehmbohle als Puffermaterial (Osman Kocan, 2024).....	53
Abbildung 3-6: Links: Versuchskörper mit eingeschlossener Natriumchlorid Salzlösung Rechts: Polyethylen Behälter der gesättigten Natriumchlorid Salzlösung mit sichtbarem Bodensatz (Osman Kocan, 2024).....	54
Abbildung 3-7: Mit Acrylfarbe bestrichene Holzplatte aus Fichte (Osman Kocan, 2024).....	55
Abbildung 3-8: Mit additionsvernetzendem und unter Anpressdruck ausgebildete Fugen (Osman Kocan, 2024).....	55
Abbildung 3-9: Flussdiagramm Messtechnik.....	56
Abbildung 3-10: Versuchsaufbau der automatisierten Systemsteuerung (Osman Kocan, 2024).....	57
Abbildung 3-11: Links: Schimmelbefall der Baumwolle. Rechts: Schimmelbefall der Lehmbohle (Osman Kocan, 2024).....	58
Abbildung 3-12: Versuchsaufbau der Probekörper am Lehrstuhl der Technischen Universität München.....	59
Abbildung 4-1: Temperatur und relative Luftfeuchte - Außen.....	60
Abbildung 4-2: Versuchsdaten - Gesättigte Salzlösung.....	61
Abbildung 4-3: Versuchsdaten - Lehmbohle.....	62
Abbildung 4-4: Versuchsdaten - Baumwolle.....	63
Abbildung 4-5: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - Lehm.....	64
Abbildung 4-6: Korrelation von Holzfeuchte und äußerer relativer Luftfeuchte - Lehm.....	65
Abbildung 4-7: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - Baumwolle.....	65

Abbildung 4-8: Korrelation von Holzfeuchte und äußerer relativer Luftfeuchte - Baumwolle	66
Abbildung 4-9: Korrelation von Holzfeuchte und innerer relativer Luftfeuchte - NaCl	66
Abbildung 4-10 - Hygroskopisches Gleichgewicht Fichte(Niemz & Sonderegger, 2021).....	68
Abbildung 4-11: Temperaturabhängigkeit der Deliquesenzfeuchte von NaCl	69
Abbildung 4-12: Zeitlicher Verlauf der Deliquesenzfeuchte von NaCl	70
Abbildung 4-13: Wasserdampfdiffusion durch das System - Baumwolle	71
Abbildung 4-14: Entwicklung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle ...	72
Abbildung 4-15: Zeitverzögerte Erhöhung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle	73
Abbildung 4-16: Approximierte zeitverzögerte Erhöhung der inneren relativen Luftfeuchte bei Wasserzugabe - Baumwolle	74

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1-1: Allgemein gültige Museumsrichtlinien vorgelegt von der Fachgruppe Restaurierung der Arbeitsgemeinschaft Deutscher Schlösserverwaltungen (Fachgruppe Restaurierung, 2015)	1
Tabelle 2-1: Kennwerte des Gasmisches Luft im oberflächennahen Bereich der Atmosphäre (Willems et al., 2018)	4
Tabelle 2-2: Übliche Beschichtungsmaterialien von Holztafelgemälden	25
Tabelle 2-3: Tabelle zur Feuchtigkeitskontrolle empfohlener gesättigter Salzlösungen (Young, 1967).....	36
Tabelle 2-4: Relative Luftfeuchte über einigen Hydratpaaren und deren Übergangstemperaturen (Young 1967)	37
Tabelle 2-5: Die Tendenz von Salzen, an den Wänden von Behältern aus verschiedenen Materialien hochzukriechen. 0 entspricht keinem Kriechen, während +, ++ und +++ ein geringes bis starkes Kriechen der Salze anzeigen (Astrup, 1990)	39
Tabelle 2-6: Wasserdampfadsorptionsklassen von Lehmputzmörtel nach DIN 18947 (DIN 18947, 2018; Schroeder, 2019)	42
Tabelle 2-7: Messdaten Baumwolle Adsorption (Urquhart & Williams, 1924)	45
Tabelle 2-8 - Annäherungsfunktion Sorptionsisotherme Baumwolle aus Rohdaten.....	45
Tabelle 2-9 - Messdaten Adsorption Lehmbauplatte (Marina Ineichen, 2020)	47
Tabelle 2-10 - Annäherungsfunktion Sorptionsisotherme Lehmbauplatte aus Rohdaten	47
Tabelle 4-1: Vergleich der Holzfeuchte mittels elektrischer Widerstandsmessung mit Darmmethode	67
Tabelle 4-2 – Einstellung der Holzfeuchte in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen	68
Tabelle 4-3: Annäherungsfunktionen Auffeuchtung der Umgebungsluft durch Baumwolle.....	74
Tabelle 4-4: Deskriptive Statistik Außenbereich	75
Tabelle 4-5 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit Natriumchlorid	75
Tabelle 4-6 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit Lehmbauplatte	76
Tabelle 4-7 - Deskriptive Statistik Versuchskörper mit der Baumwolle	76

Literaturverzeichnis

- Alexandra Troi. (2009). *Kirchenheizung Eine Gratwanderung zwischen Behaglichkeit, Kosten und Denkmalpflege*.
- Astrup. (1990). *SATURATED SALT SOLUTIONS FOR HUMIDITY CONTROL OF SHOWCASES - CONDITIONS FOR A SUCCESSFUL SYSTEM*.
- Barry Knight and David Thickett. (2007). *Determination of response rates of wooden objects to fluctuating relative humidity in historic properties*.
- Céline, A., Fréour, S., Jacquemin, F., & Casari, P. (2014). The hygroscopic behavior of plant fibers: A review. *Frontiers in Chemistry, 1*. <https://doi.org/10.3389/fchem.2013.00043>
- Clément, L., & Rivière, C. (1923). *Die Zellulose: Die Zelluloseverbindungen und ihre technische Anwendung - Plastische Massen* - (K. Bratring, Hrsg.). Springer Berlin Heidelberg : Imprint : Springer.
- Colmars. (2013). *Hygromechanical response of a panel painting in a church: Monitoring and computer modeling*.
- Cui, Y., Gao, S., Zhang, R., Cheng, L., & Yu, J. (2020). Study on the Moisture Absorption and Thermal Properties of Hygroscopic Exothermic Fibers and Related Interactions with Water Molecules. *Polymers, 12*(1), 98. <https://doi.org/10.3390/polym12010098>
- De Backer, L., Laverge, J., Janssens, A., & De Paepe, M. (2018). Evaluation of the diffusion coefficient and sorption isotherm of the different layers of early Netherlandish wooden panel paintings. *Wood Science and Technology, 52*(1), 149–166. <https://doi.org/10.1007/s00226-017-0949-y>
- DIN 18947*. (2018). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2897115>
- DIN EN 13183-1*. (2002). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/9199967>

DIN EN ISO 12572. (2017). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/2429972>

DIN ISO 2533. (1979). Beuth Verlag GmbH. <https://doi.org/10.31030/1339377>

Du, Q. P., Geissen, A., & Noack, D. (1991). Widerstandskennlinien einiger Handelshölzer und ihre Meßbarkeit bei der elektrischen Holzfeuchtemessung. *Holz als Roh- und Werkstoff*, 49(7–8), 305–311. <https://doi.org/10.1007/BF02663796>

Fachgruppe Restaurierung. (2015). *Konservatorische Richtlinien für Ausstellungen in Denkmälern*.

Gonzalo Quincot, J. F. (1967). Humidity control in the laboratory using salt solutions. *Journal of Applied Chemistry*, 17(9), 241–245. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010170901>

Greenspan, L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards Section A: Physics and Chemistry*, 81A(1), 89. <https://doi.org/10.6028/jres.081A.011>

Hendrickx, R., Desmarais, G., Weder, M., Ferreira, E. S. B., & Derome, D. (2016). Moisture uptake and permeability of canvas paintings and their components. *Journal of Cultural Heritage*, 19, 445–453. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.12.008>

Holzbau Deutschland-Institut e.V. (2023). *Holzschutz Bauliche Maßnahmen*.

Im Detail: Einfach bauen. 2. (2012). Ed. Detail - Inst. für Internationale Architektur-Dokumentation.

Isetti, C., Magrini, A., & Nannei, E. (1996). The application of vapour-permeable synthetic membranes to the climatic stabilization of museum showcases. *Studies in Conservation*, 41(4), 229–240. <https://doi.org/10.1179/sic.1996.41.4.229>

Kos, N., & Duin, P. van (Hrsg.). (2014). *The conservation of panel paintings and related objects: Research agenda, 2014-2020*. Getty Foundation.

- Krause. (o. J.). *Feuchtespeicherfunktion und Feuchtetransport verschiedener Lehme und Lehmbaumstoffe*.
- Kutzelnigg, A., & Königsheim, F. (1963). Die Einstellung der relativen Feuchte mit Hilfe von gesättigten Salzlösungen. *Materials and Corrosion*, *14*(3), 181–186. <https://doi.org/10.1002/maco.19630140306>
- Ł. Bratasz. (2005). *Allowable thresholds in dynamic changes of microclimate for wooden cultural objects: Monitoring in situ and modelling*.
- Marina Ineichen. (2020). *Bestimmung und Gegenüberstellung der Materialkennwerte von hygroskopisch aktiven Baustoffen*.
- Mecklenburg Marion, Tumosa Charles, Erhardt David. (1994). *Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity*.
- Michalski, S. (1994). Leakage prediction for buildings, cases, bags and bottles. *Studies in Conservation*, *39*(3), 169–186. <https://doi.org/10.1179/sic.1994.39.3.169>
- Niemz, P., & Sonderegger, W. U. (2021). *Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte* (2., aktualisierte Auflage). Hanser.
- Osman Kocan. (2024).
- Perkitny, T. (1960). Die Druckschwankungen in verschieden vorgepreßten und dann starr eingeklammerten Holzkörpern. *Holz als Roh- und Werkstoff*, *18*(6), 200–210. <https://doi.org/10.1007/BF02617977>
- Romano, F., Colombo, L. P. M., Gaudenzi, M., Joppolo, C. M., & Romano, L. P. (2015). Passive control of microclimate in museum display cases: A lumped parameter model and experimental tests. *Journal of Cultural Heritage*, *16*(4), 413–418. <https://doi.org/10.1016/j.culher.2014.10.001>
- Samuel V. Glass, Samuel L. Zelinka. (2021). *Wood Handbook—Wood as an Engineering Material*.

- Schroeder, H. (2019). *Lehmbau: Mit Lehm ökologisch planen und bauen* (3., aktualisierte Auflage). Springer Vieweg.
- Sozzani, L. S. G. (1997). An Economical Design for a Microclimate Vitrine for Paintings using the Picture Frame as the Primary Housing. *Journal of the American Institute for Conservation*, 36(2), 95–107. <https://doi.org/10.1179/019713697806373163>
- Stöcklein, J., Konopka, D., Grajcarek, G., Tietze, O., Oertel, S., Schulze, A., & Kaliske, M. (2022). Hygro-mechanical short-term behaviour of selected coatings: Experiments and material modelling on vapour permeability and mechanical properties. *Heritage Science*, 10(1), 141. <https://doi.org/10.1186/s40494-022-00768-5>
- Thomson, G. (1977). STABILIZATION OF RH IN EXHIBITION CASES: HYGROMETRIC HALF-TIME. *Studies in Conservation*, 22(2), 85–102. <https://doi.org/10.1179/sic.1977.012>
- Tim Padfield. (1998). *THE ROLE OF ABSORBENT BUILDING MATERIALS IN MODERATING CHANGES OF RELATIVE HUMIDITY*.
- Topçuoğlu, Ö., Altinkaya, S. A., & Balköse, D. (2006). Characterization of waterborne acrylic based paint films and measurement of their water vapor permeabilities. *Progress in Organic Coatings*, 56(4), 269–278. <https://doi.org/10.1016/j.porgcoat.2006.02.003>
- Urquhart, A. R., & Williams, A. M. (1924). THE EFFECT OF TEMPERATURE ON THE ABSORPTION OF WATER BY SODA-BOILED COTTON. *Journal of the Textile Institute Transactions*, 15(12), T559–T572. <https://doi.org/10.1080/19447022408661326>
- Vogdt, F. U., Bredemeyer, J., Fischer, J., Hofmann-Böllinghaus, A., Nisse, J., & Schaudienst, F. (Hrsg.). (2022). *Bauphysik: Grundwissen für Architekten*. Springer Vieweg.

- Wernecke, R. (2003). *Industrielle Feuchtemessung: Grundlagen, Messmethoden, technische Anwendungen*. Wiley-VCH.
- Willems, W. M., Schild, K., & Stricker, D. (2018). *Feuchteschutz: Grundlagen - Berechnungen - Details*. Springer Vieweg. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-05685-8>
- Willems, W. M., Schild, K., & Stricker, D. (2022). *Formeln und Tabellen Bauphysik: Wärmeschutz – Feuchteschutz – Klima – Akustik – Brandschutz* (7. Auflage). Springer Vieweg.
- Young, J. F. (1967). Humidity control in the laboratory using salt solutions—A review. *Journal of Applied Chemistry*, 17(9), 241–245. <https://doi.org/10.1002/jctb.5010170901>

Anhang

```
//Variablen Temperatur und relative Luftfeuchte
float t=0;
float h=0;

//Variablen zur Verwendung des Zeitmanagements
long lastValueTime=0;
long lastPumpTime=0;
long lastCWaiTime=0;

//Variablen zum Erstellen von einem Array mit 20 Klimadaten
const int COUNT=20;
float humids[] = {0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0,0};
int pos=0;

//Definition des digitalen Ausgang vom Micro-Controller für die Pumpe
const int PUMP_PORT=D2;
bool pumpRunning=false;

//Parameter Systemkonfiguration
int HMIN=70; //%
int PUMP_TIME_MS=200;
int SENSOR_READ_INTERVAL_CWAI=60*60*1000/COUNT;
const int SENSOR_READ_INTERVAL=3000;
```

```
//Methode zum Senden von Klimadaten an den WebSocket
void sendSensorValues()
{
    JSONVar json;
    json["action"]="SENSOR_VALUES";//Art der Information unterscheidung
    json["t"]=t;
    json["h"]=h;
    wss.sendJSONAll(json);
}

//Methode, um Sensorwerte zu lesen, auf Gültigkeit zu überprüfen und zu senden
void readAndSendSensorValues()
{
    float h1 = dht.readHumidity();
    float t1 = dht.readTemperature();
    if(isnan(h1) || isnan(t1)) return;
    h=h1;
    t=t1;
    sendSensorValues();
}

//Methode, um Pumpe zu aktivieren oder deaktivieren
void pump(bool on)
{
    pinMode(PUMP_PORT, on?OUTPUT:INPUT);
    pumpRunning=on;
}

//Methode, um Pumpe zu starten
void pumpStart()
{
    lastPumpTime=millis();
    pump(true);
}

//Methode, um Pumpe zu stoppen
void pumpStop()
{
    if(pumpRunning)
    {
        pump(false);
    }
}

//Methode zum Initialisieren des Anfangszustandes der Pumpe
void pumpSetup()
{
    digitalWrite(PUMP_PORT,LOW);
}
```

```
//Methode zum Überprüfen, ob Pumpe gestartet werden soll
void checkIfPumpCanStart()
{
    humids[pos]=h;
    pos++;
    if(pos>=COUNT)
    {
        pos=0;
        float h1=0;
        float h2=0;
        int C=COUNT/2;
        for(int i=0;i<C;i++)
        {
            h1=h1+humids[i];
        }
        h1=h1/C;
        for(int i=10;i<COUNT;i++)
        {
            h2=h2+humids[i];
        }
        h2=h2/C;
        float dif=h2-h1;
        if(dif<=0 && h<HMIN)
        {
            pumpStart();
        }
    }
}

//Intervallmanagement des Microcontrollers: Endlosschleife mit Frequenz des
Microcontrollers (1 MHZ)
void loop()
{
    server.handleClient();
    wss.loop();
    long time=millis();
    if(time-lastValueTime>=SENSOR_READ_INTERVAL)
    {
        readAndSendSensorValues();
        lastValueTime=time;
    }
    if(time-lastCwaiTime>=SENSOR_READ_INTERVAL_CWAI)
    {
        checkIfPumpCanStart();
        lastCwaiTime=time;
    }
    if(time-lastPumpTime>PUMP_TIME_MS)
    {
        pumpStop();
    }
}
```

Selbständigkeitserklärung

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe.

.....

Osman Kocan

München, 30. Mai 2024

Einverständniserklärung (freiwillig)

Ich bin damit einverstanden, dass meine Abschlussarbeit veröffentlicht sowie wissenschaftlich interessierten Personen oder Institutionen zur Verfügung gestellt und zitiert werden kann. Korrektur- oder Bewertungshinweise in meiner Arbeit dürfen nicht zitiert werden.

.....

Osman Kocan

München, 30. Mai 2024