

Zur in situ Befeuchtung und Monitoring an anthropogen geschädigten Holztafelbildern

HANDLUNGSEMPFEHLUNG
DBU Projekt AZ 37502-01
Ausgabe: 31.08.2024



HANDLUNGSEMPFEHLUNG

zur in situ Befeuchtung und Monitoring an anthropogen geschädigten Holztafelbildern

Key Words

Kulturelles Erbe, Holztafelbild, Monitoring

Erläuterung

Diese Handlungsempfehlung entstand im Rahmen des DBU-Projekts „*Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*“ (Laufzeit 01.01.2022 – 31.08.2024). Ziel ist es, Planungsbüros, Restaurierungsfirmen sowie Eigentümern essentielle Planungsschritte und die Vorgehensweise zur Risikoabschätzung zur Verfügung zu stellen. Der Fokus liegt auf den im Projekt gewonnenen Erfahrungen zum in situ Monitoring und der Befeuchtungen von Holztafelgemälden.

Projektleitung

BLfD: Theresa Hilger, Julia Brandt, Manuela Hörmann

Projektpartner

KDWT: Kristina Holl

TUM: Alex Fröhlich

CFA: Elise Spiegel

Erarbeitung der Empfehlung

Beginn der Arbeiten: 01.08.2023

Ende der Arbeiten: 29.05.2024

Zielgruppe

Eigentümer; Bauherren; Bauämter; Denkmalpflege (Kunsthistoriker, Restauratoren); Nutzer (z. B. Mesner, Pfarrer, Putzpersonal); Städte; Architekten; Planer

© Alle Rechte liegen bei den Erstellenden: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD), Praktische Bau und Kunstdenkmalpflege, A V – Restaurierung | Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT), Professur für Restaurierungswissenschaft | Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion | CARE FOR ART (CFA) | Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK). | Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP). Nachdruck und Vervielfältigung, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung gestattet. Die Angaben der Handlungsempfehlung stützen sich auf das DBU-Projekt AZ 37502-01 [01.01.2022 – 31.08.2024] und den darin gewonnenen Stand der Kenntnisse. Die Erstellenden übernehmen keinerlei Haftung. Vorschläge oder Einwände, die gegebenenfalls bei einer Neuauflage berücksichtigt werden können, sind an das BLfD zu richten. Das Dokument findet sich auf der Homepage des BLfD. Hinweis: Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird auf eine geschlechtsspezifische Differenzierung verzichtet. Entsprechende Begriffe gelten im Sinne des Gleichbehandlungsgesetzes für alle Geschlechter

1 Einleitung

Die vorliegende Handlungsempfehlung entstand im Rahmen des DBU-Projekts „*Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*“ (Laufzeit 01.01.2022 – 31.08.2024). Ziel ist es, Planungsbüros, Restaurierungsfirmen sowie Eigentümern essentielle Planungsschritte und die Vorgehensweise zur Risikoabschätzung zur Verfügung zu stellen. Der Fokus liegt auf den im Projekt gewonnenen Erfahrungen zum in situ Monitoring und der Befeuchtungen von Holztafelgemälden. Details und weiterführende Informationen zu den einzelnen Elementen dieser Handlungsempfehlung finden sich im DBU-Abschlussbericht (Veröffentlicht auf der DBU-Homepage unter www.dbu.de).

Am DBU-Projekt waren neben dem Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD) die Technische Universität München (TUM, Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion), das Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Otto-Friedrich-Universität Bamberg und die restauratorische Beratungsgesellschaft „Care for Art“ beteiligt. Außerdem waren das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP) und das Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) im Unterauftrag tätig. Nur dieses interdisziplinäre Team ermöglichte es, ein so komplexes Vorhaben durchzuführen. Fachleute aus den Gebieten Restaurierung, Präventive Konservierung, Holzbau, Bauingenieurwesen und Materialanalytik haben eng zusammengearbeitet. Auch wenn nicht bei allen Befeuchtungsvorhaben ein so großes Team notwendig ist, sollten zumindest Fachleute aus dem Gebiet der Konservierung/Restaurierung und aus dem Bereich der Messtechnik involviert werden. Als besonders wichtig hat sich die Erforschung der Schadensursachen vorab erwiesen, die eine nachhaltige Konservierung des Objektes gewährleistet.

Viele Informationen mussten zu Beginn der Befeuchtung bereits vorliegen und wurden in einer Voruntersuchung ermittelt, welche bereits finanzielle Mittel erforderte (siehe **3 Grundlagenermittlung: Objekt und Umgebung**). Vor allem die Erfassung und Auswertung des Raumklimas über einen längeren Zeitraum (> 1 Jahr) war essentiell, um die darauffolgenden Schritte einzuleiten.

Die Befeuchtung bemalter Holztafeln ist ein komplexer Vorgang, der individuell auf das einzelne Kunstwerk abgestimmt und kontinuierlich von Fachleuten überwacht werden muss. Falsche bzw. zu schnelle Befeuchtung oder ggf. Rücktrocknung kann zu irreparablen Schäden am Kulturgut führen. Eine Befeuchtung sollte daher in jedem Fall mit restauratorischer Begleitung durchgeführt werden.

2 Anlass und Fragestellung

Anthropogene Einflüsse auf die langfristige Erhaltung von Kunst und Kulturgut

Der fortschreitende Klimawandel wirkt sich auch auf das Innenraumklima historischer Gebäude aus. In Folge zunehmender Wetterextreme gibt es sowohl deutlich trockenere als auch deutlich feuchtere Phasen im Jahresverlauf [1]. Vor allem in Gebäuden mit einer Heizung und unkontrollierter Lüftung können sich diese Effekte drastisch verstärken. Darüber hinaus verändert sich in einem zunehmenden Anteil historischer Gebäude die Nutzung, was einen starken Einfluss auf deren Raumklima bewirkt. Bei Kunstwerken aus Holz führen trockene Klimaperioden zu Volumenschwund. Daraus resultieren teils irreparable Schäden. Angesichts steigender Energiepreise und der Notwendigkeit, Ressourcen zu sparen, erscheint die kon-

ventionelle, energieaufwändige Klimatisierung historischer Räume nicht umsetzbar. Um historische Ausstattungsstücke an ihrem Ursprungsort zu erhalten, wird es in Zukunft notwendig sein, das Raumklima mit möglichst geringem Energieaufwand zu konditionieren, also in situ zu be- bzw. entfeuchten. Es wird nicht möglich sein, alle wertvollen historischen Ausstattungsstücke in Museen zu transferieren. Raumgebundene Ausstattung und große Altäre können aus logistischen Gründen nicht von ihrem Ursprungsort entfernt werden. Darüber hinaus erscheint die Musealisierung der Ausstattung aus denkmalpflegerischer, kunstgeschichtlicher und theologischer Sicht oft nicht wünschenswert. Auch für Museen wird zunehmend gefordert, enge Klimakorridore aufzuweiten, um Energie zu sparen [2]. Die Folgen der dann auftretenden Klimaschwankungen sind bisher nur in Einzelfällen nachgewiesen [3]. Obwohl im Rahmen dieser Forderungen immer betont wird, dass die Weitung der Klimakorridore ein enges Monitoring erfordert, fehlen entsprechende Konzepte bislang.

Kunstwerke aus gefasstem Holz sind besonders empfindlich gegenüber Klimaschwankungen, da der Träger in größerem Maße schwindet und quillt, als der darauf befindliche Bildschichtaufbau. Durch eine gewisse Elastizität des Malschichtsystems können kleinere Bewegungen über einen Zeitraum toleriert werden, abhängig von der Materialzusammensetzung bzw. einer möglichen Vorschädigung des Kunstwerks. Mit zunehmender Alterung verspröden die Materialien und mit höheren Raumklimaschwankungen werden die Materialbewegungen größer. Dadurch können die Kohäsion der Malschicht und die Adhäsion zum Untergrund versagen. Ablösungen, Blasenbildung und Stauchungen sind die Folge. Bei einem ungefassten Holzobjekt oder einer raumgreifenden Darstellung bleibt die Grundinformation, wenn auch entstellt durch Risse oder Fassungsverluste, trotz des beschriebenen Schadensprozesses weitgehend erhalten. Bei einem Gemälde ist die Darstellung und damit der Informationsgehalt nur in der Malschicht ablesbar. Fortschreitende Malschichtverluste bedeuten einen unwiederbringlichen Verlust an Information. Stellvertretend für gefasste bzw. bemalte hölzerne Ausstattungsobjekte wurde daher im Projekt ein großformatiges Holztafelgemälde ausgewählt.

Fallbeispiel Gründonnerstagsaltargemälde in der Sakristei in Freising

Das Gemälde mit ausgewählten Szenen der Karwoche (**Abbildung 1**) befindet sich seit 1495 als Teil eines Gründonnerstagsaltars in der Sakristei des Freisinger Doms (Bayern, Deutschland). Der Einbau einer Zentralheizung und der Bau einer Drainage für einen Teil der Wände führten seit Mitte des 20. Jahrhunderts zu einer Reduzierung der relativen Luftfeuchte. Dies verursacht ein Schwinden des Holzträgers und eine zunehmende Schädigung der Malschicht in Form von Lockerungen und Substanzverlusten der Bildschicht. In den letzten Jahrzehnten mussten deshalb in immer kürzeren Abständen Konservierungsmaßnahmen durchgeführt werden. Eine ausführliche Darstellung der Restaurierungsgeschichte findet sich im DBU-Abschlussbericht (s. o.). Der Träger war zu Projektbeginn bereits so stark geschrumpft, dass es nicht mehr möglich war, die aufstehende Bildschicht zu festigen, ohne Material zu entfernen (**Abbildung 2**). Das Gemälde steht stellvertretend für eine Vielzahl von nicht transferierbaren Kunstwerken, die in Zukunft durch Klimawandel bedingte Trockenperioden geschädigt werden könnten. Das Schadensphänomen in Freising ist zwar nicht direkt den Auswirkungen des Klimawandels zuzuordnen, zeigt aber auf, welches Schadenspotential künftig bei Hitze- und Trockenperioden zu erwarten ist.

Aufgrund seines Formats und des fragilen Zustandes konnte das Gemälde nicht aus der Sakristei entfernt werden und machte ein Arbeiten in situ notwendig. Vor Ort zu arbeiten bedeutet immer eine Abhängigkeit und fortwährende Anpassung an lokale Gegebenheiten und ist nicht mit dem besser erprobten Arbeiten in einer Werkstatt vergleichbar.

Das Ausmaß des Schadens, die Bedeutung des Gemäldes und die besonderen Bedingungen erforderten praktikable in situ Monitoring- und Befeuchtungsstrategien. In Hinblick auf den Schutz des globalen Klimas sollte dies möglichst ressourcenschonend geschehen, was im Rahmen des Projektes berücksichtigt wurde.



Abbildung 1 "Gründonnerstagsretabel" (1495) in der Sakristei des Freisinger Doms mit Notsicherungen (Foto: BLfD, 2022).



Abbildung 2 Detailaufnahme dachförmig aufstehender Malerschichtschollen vor der Notsicherung (Foto: BLfD, 2020).

3 Grundlagenermittlung: Objekt und Umgebung

Vor Beginn jeder Maßnahme sollte die Grundlagenermittlung zum Kunstwerk und dessen Umgebung (Raum, Gebäude, Außenanlage) stattfinden. Zunächst ist die Aufarbeitung der Historie im Sinne einer **Voruntersuchung**¹ erforderlich, die sowohl den Bestand als auch dessen Zustand erfasst [4]. Daneben müssen weitere Anforderungen berücksichtigt werden, wie etwa rechtliche Rahmenbedingungen, die Nutzung oder die Erhaltung anderer Kunstwerke/Objekte, welche mögliche Einschränkungen einer in situ Befeuchtung definieren.

Neben der Dokumentation und Untersuchung des Werkes selbst umfasst die Sammlung der relevanten Informationen **Archivrecherchen** (Dokumentationen, Fotos, Literatur, Akten), **Personenbefragungen** (Eigentümer, Nutzer, Beteiligte früherer Maßnahmen, etc.) und – falls nicht bereits vorhanden – ggf. die **Erhebung weiterer Daten** (Klimadaten, Materialanalysen, Schadstoffanalysen). Bei Schäden, die auf eine klimatisch bedingte Ursache hindeuten, empfiehlt es sich, besonderes Augenmerk auf Hinweise zu Nutzungsänderungen, baulichen Maßnahmen (auch nicht dokumentierte) sowie Personaländerungen zu legen.

Folgende Aspekte werden durch die Grundlagenermittlung idealerweise bereits geklärt:

- Objekt- und Restaurierungsgeschichte
- Schadensart, -ausmaß und –ursache(n)
- Ersteinschätzung der Objektsensibilität und –reaktion
- Einschränkungen durch äußere Vorgaben
- Anforderungen und Handlungsspielraum für die Befeuchtungsmethode

Die Grundlagenermittlung sollte vor Beginn einer geplanten Maßnahme abgeschlossen sein. Auch wenn es in manchen Fällen nicht möglich sein wird, alle Fragen im Vorfeld zu klären, bietet eine fundierte Grundlagenermittlung eine bessere Planungs- und Kostensicherheit für das anschließende Projekt.

Hinweis zur Einordnung der Wichtigkeit:

Vor der Durchführung einer in situ Befeuchtung bzw. eines Monitorings ist der dafür benötigte Aufwand kritisch zu hinterfragen - sowohl energetisch als auch personell und finanziell. Es sollte gründlich abgewogen werden, ob der Informationsgewinn, der durch invasive Untersuchungsmethoden (Materialproben, Befestigung von Sensoren etc.) erreicht werden kann, irreversible Veränderungen am Kunstwerk rechtfertigt. Die Bedeutung des Kunstwerks und dessen Priorität zum Erhalt ist daher unbedingt im Vorfeld zu evaluieren und das weitere Vorgehen darauf abzustimmen.

4 Risikobeurteilung

Das Thema Risikomanagement ist sehr komplex, insbesondere da alle Risiken, die zu Schäden führen können, zu berücksichtigen sind. Im Fall des Tafelgemäldes sind es insbesondere die konservatorischen Herausforderungen, die es zu bedenken gilt: Wie ist das hygroskopische Materialverhalten einzuschätzen? Welche klimatischen Schwankungen wirken sich bereits auf das sensible Materialgefüge aus? Welche konservatorischen Ziele werden festgelegt und sind diese realistisch? Nach welchen Kriterien ist der Klimazielkorridor festzulegen und mit welchem Spielraum kann davon schadensfrei abgewichen werden? Wie steht es um die Transferierbarkeit auf ähnliche Fälle?

Eine allgemeine Herangehensweise, anhand derer für jede Fragestellung ein individuelles Maßnahmenkonzept erarbeitet werden kann, basiert auf den folgenden sechs Fragen:

1. Was versuchen wir zu erreichen? (Rahmen abstecken / Zusammenhang herstellen)
2. Welche Risiken sind maßgeblich? (Identifikation der Risiken)
3. Welche Risiken sind derzeit die wichtigsten? Was muss im konkreten Einzelfall priorisiert werden? (Risikobewertung)
4. Wie sollte mit den wichtigsten Risiken verfahren werden? Was muss am dringendsten geschützt werden? Gibt es positive Effekte? (Entwicklung des Risikomanagementplans)

Nach der Umsetzung erfolgt eine Rückschau:

5. Hat die Herangehensweise funktioniert? (Risikoüberprüfung)
6. Was hat sich verändert seit dem letzten Mal? (Update Risikobewertung, gewonnene Erkenntnisse nach Schadenseintritt)

In der Handlungsempfehlung sind speziell die Aspekte beschrieben, die in Hinblick auf eine Maßnahme zur Befeuchtung eines Tafelgemäldes berücksichtigt werden sollten. Im Folgenden werden die oben aufgelisteten Punkte hinsichtlich der im Projekt erarbeiteten Belange angewandt.

1. Was versuchen wir zu erreichen?

Das grundsätzliche Ziel ist, unser kulturelles Erbe so lange wie möglich für unsere Nachwelt zu erhalten. Dabei gilt, dass die Maßnahmen, die dafür erforderlich sind, angemessen und nachhaltig insbesondere im Hinblick auf den Schutz des globalen Klimas umgesetzt werden.

Dementsprechend ist auch dem Einsatz von passiven Maßnahmen zum Erreichen des Klimakorridors sowie zur Klimastabilisierung der Vorzug zu geben.

Hinsichtlich der größten Risiken, sei auf die „10 agents of deterioration“ verwiesen [5]. Zur ganzheitlichen Risikoabschätzung ist auf den Seiten des Sicherheitsleitfadens Kulturgut SiLK [6] eine umfangreiche Auflistung zur Herangehensweise, wie auch weiterführende Literatur genannt. Alle zehn Punkte werden hinsichtlich ihres wahrscheinlichen Eintritts, wie auch ihres Schadensausmaßes untersucht und aufgelistet.

2. Welche Risiken sind maßgeblich?

Um das Tafelgemälde in einen konservierbaren Zustand zu versetzen und damit langfristig zu erhalten, ist eine Volumenzunahme des Bildträgers erforderlich. Diese kann aus konservatorischen Gründen nur durch die Erhöhung der relativen Feuchte erfolgen. Da organische Materialverbände sehr sensibel gegenüber klimatischen Veränderungen reagieren, liegt in der Veränderung von Klimabedingungen grundsätzlich ein Risiko. Daher muss die Analyse des Ist-Zustands und die Entwicklung eines Klimazielkorridors zur Befeuchtung und späteren Langzeitstabilisierung mit entsprechender Expertise durchgeführt werden und zuweilen auch kritisch hinterfragt werden [7].

Für die Ermittlung des Klimazielwerts ist es zunächst notwendig, das „historische“ Klima, also das bisher vorliegenden Raumklima (am besten über die letzten 13 Monate) zu analysieren [7]. Anhand des Jahresmittelwerts der relativen Feuchte lässt sich abschätzen, wo die Gleichgewichtsfeuchte liegt. Ausgehend davon wird die relative Feuchte erhöht, um eine Volumenzunahme zu bewirken. Sind aufgrund des vorliegenden Klimas nachweisbar Schäden aufgetreten, müssen diese Werte vermieden werden. Auch die Höhe kurzfristiger klimatischer Schwankungen (täglich bis 3-tägig) gilt es zu reduzieren.

Bei der untersuchten Fallstudie ist für die langfristige Lagerung eine relative Feuchte über 65 % r.F. notwendig, die Temperatur kann dabei jahreszeitlich gleiten. Als Schadensfaktoren werden das Auffeuchten bzw. das Rücktrocknen sowie die Gewährleistung von langfristig stabilen Klimakonditionen – insbesondere bei aktiver Klimatisierung – identifiziert. Mögliche Schäden sind Risse, Fugenöffnungen, Verformungen, Malschichtverluste oder Schimmel. Letzterer ist nicht nur unmittelbar am Tafelgemälde, sondern auch an angrenzenden Stellen zu berücksichtigen (Kondensationspunkte in der Nähe, die als Ursprung für die Verbreitung der Sporen ausreichend sind). Abhängig vom Substrat nimmt insbesondere bei Erhöhung der relativen Feuchte in Kombination mit steigenden Temperaturen das Risiko der Sporenauskeimung zu [8]. Ein regelmäßiges Monitoring und bei Bedarf durchzuführende konservatorische Maßnahmen helfen das Schadensrisiko einzugrenzen. Mit dem Verlust von originaler Substanz geht auch die Verminderung der Lesbarkeit einher. Bei langfristig zu hoher Feuchtigkeit können außerdem organische Bindemittel ihre Klebkraft verlieren [9].

Die Effekte, die sich aus der Feuchtezufuhr ergeben, müssen für das Tafelgemälde wie auch seine Umgebung berücksichtigt werden. So wurde aus energetischen, wie auch aus bauphysikalischen Gründen eine Einhausung zur Klimastabilisierung gewählt.

Um die Risiken, die durch die Änderung der Feuchtebedingungen am Tafelgemälde einhergehen, konkretisieren zu können, wurden für das Fallbeispiel kunsttechnologische Untersuchungen durchgeführt. Diese dienten anschließend dazu, mehr über die feuchtetechnischen Eigenschaften des Tafelgemäldes in Erfahrung zu bringen. Anhand des rekonstruierten Materialverbands wurden die Materialkenndaten (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme etc.) ermittelt, welche für hygrothermische Simulationen mit der Software WUFI®

eingesetzt wurden. Mit Hilfe des Programms kann das Temperatur- und Feuchteverhalten innerhalb der einzelnen Schichten des Tafelgemäldes bei klimatischen Schwankungen untersucht und abgeschätzt werden. Es diente außerdem der Entscheidungsfindung hinsichtlich der Geschwindigkeit des Auffeuchtens, wie auch zur Einschätzung des Verhaltens des Materialverbunds bei klimatischen Schwankungen.

Weitere Versuche erfolgten mit Probekörpern, die ebenfalls basierend auf den Ergebnissen der kunsttechnologischen Untersuchungen angefertigt wurden. Diese wurden für Versuche in einem Klimaschrank genutzt. Basierend auf diesen Resultaten erfolgten daraufhin in der Einhausung in situ Auffeuchtungsversuche. Die Reaktion des Tafelgemäldes wurde mittels optischem und messtechnischem Monitoring begleitet und bewertet.

3. Welche Risiken sind derzeit die wichtigsten? Was muss im konkreten Einzelfall priorisiert werden?

Grundsätzlich sind an der Entscheidungsfindung verschiedene Akteure (Eigentümer, Nutzer, Konservatoren, Denkmalschutzbehörden, etc.) beteiligt, wo je nach eigenem Schwerpunkt unterschiedliche Ansprüche im Vordergrund stehen. Diese gilt es zu berücksichtigen und gegeneinander abzuwägen. Das erfolgt idealerweise über gemeinsame Gespräche aller Beteiligten. Zur objektiven Beurteilung kann eine Entscheidungsmatrix dienen, die die möglichen Varianten mit den unterschiedlichen Kriterien und Ansprüchen gegenüberstellt. Je nach konkreter Situation werden die einzelnen Kriterien unterschiedlich gewichtet, und so die einzelnen Varianten objektiv bewertet. Das Ergebnis zeigt dann die Variante auf, die unter Berücksichtigung aller Kriterien am besten abschneidet. **Abbildung 3** zeigt beispielhaft eine Matrix, die für das konkrete Fallbeispiel des Tafelgemäldes aus dem Forschungsprojekt erarbeitet wurde. Hintergrund ist, dass das Holztafelgemälde in der Sakristei für die langfristige Erhaltung andere klimatische Bedingungen erfordert, als sie durch die derzeitige Nutzung des Raumes als Schaltzentrale gegeben sind (vgl. **2 Anlass und Fragestellung**). Aus den Diskussionen mit den Beteiligten (Nutzer, Eigentümer, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Hochbauamt, Diözesanmuseum) haben sich mehrere Varianten herauskristallisiert. Grundsätzlich gibt es zwei Möglichkeiten:

A Das Gemälde bleibt an seinem ursprünglichen und für die liturgische Nutzung vorgesehenen Ort.

B Es wird ausgelagert, beispielsweise in ein Museum (Variante **5**), um stabilere und für die langfristige Erhaltung potenziell förderliche klimatischen Bedingungen zu erzielen.

Für Fall **A** ergeben sich unterschiedliche Lösungen zur Erzielung verbesserter klimatischer Bedingungen:

- Die Übergangslösung belassen, also eine Einhausung, die die Sicht auf das Tafelgemälde verhindert. Dabei wird in den Varianten weiter unterschieden, ob der momentane Erhaltungszustand belassen wird (**1a** Status quo), oder das Gemälde konserviert / restauriert wird (**1b** Status quo + Restaurierung).
- Das Abschotten im Sinne einer "Raum in Raum"-Lösung, jedoch mit der Option das Tafelgemälde einzusehen oder durch eine offene Klimavitrine (**2** Abschotten).
- Das Raumklima der Sakristei durch das Einhausen der Nutzenden zu stabilisieren (**3** Einhausung Mesner). Im kleinen Raum könnten die Behaglichkeitsansprüche energieeffizient umgesetzt werden.

4. Wie sollte mit den wichtigsten Risiken verfahren werden?

Fazit aus den Forschungen zum Tafelgemälde ist, dass die langfristige Erhaltung am besten durch ein Auffeuchten des Tafelgemäldes und ein langfristiges Konditionieren auf ca. 65 % r.F. gewährleistet ist. Hinsichtlich der Erzielung der erforderlichen Klimabedingungen, bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. Diese unterscheiden sich grob in aktive und passive Lösungen (4 Rückseitenbefeuchtung). Letztere könnten z. B. über eine Rückseitenbefeuchtung, die durch konditionierte Salzlösung oder Lehmputz erfolgt, umgesetzt werden. Für das Thema „Befeuchtung“ muss jedoch eine gesonderte Risikoanalyse erfolgen, bei der alle Faktoren und Risiken aufgelistet werden, die eintreten können (beispielsweise das Brandrisiko, der Ausfall der Gerätschaften, die Wartung des Systems/der Gerätschaften, das Klima- und Oberflächenmonitoring).

Dementsprechend ist dieses Tool als Denkanstoß zur Entscheidungsfindung zu sehen. Wie die endgültige Entscheidung ausfällt, hängt häufig von weiteren Kriterien ab. So können politische Entscheidungen eine überproportional große Rolle spielen.

		Kriterien								
		Aufwand	Historischer Kontext	Einfluss auf Nutzung	Schadensrisiko	Erfolgschancen	Nachhaltigkeit	Öffentliche Zugänglichkeit	Wechselwirkung Umbaumaßnahmen	Σ
Varianten		0,20	0,05	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,05	1,00
A	1a Status quo									
	1b Status quo + Restaurierung									
	2 Abschotten									
	3 Einhausung Mesner									
	4 Rückseitenbefeuchtung									
B	5 Museum									

Abbildung 3 Beispielhafte Entscheidungsmatrix zur Erhaltung eines Holztafelgemäldes

5 Entwicklung Messkonzept und Befeuchtungsmethode

Im Anschluss an die Risikobeurteilung folgt die Konzeptentwicklung. Da dieser Prozess einige Arbeitsschritte umfasst, kann der zeitliche Aufwand erheblich sein. Um keine potenziell wichtigen Ereignisse zu verpassen, sollte möglichst früh mit einem reduzierten Monitoring begonnen werden (siehe 6 Umsetzung). Entsprechende Messtechnik hierfür ist im Idealfall unabhängig vom jeweiligen Projekt vorzuhalten. Parallel zur Umsetzung dieser Sofortmaßnahmen kann mit der Entwicklung des Konzepts begonnen werden. Folgende Punkte sind dabei u. a. zu berücksichtigen und beschreiben:

- Berücksichtigung von Einschränkungen (z. B. Stromversorgung und Platzangebot)
- Kostenplan (Einholung von Kostenangeboten, Planung der Finanzierung)
- Ressourcen- und Zeitplan (Meilensteine)
- Klimaschwankungen möglichst reduzieren (Einhausung, Nutzung anpassen)
- Ziel-Klimakorridor formulieren (aus Ursprungsdaten und Zustandsreport)
- Festlegung der zu überwachenden Messgrößen (minimales und erweitertes System)

- Methodenbeschreibung
- Monitoring (Messgrößen, Datenmanagement)
- Festlegung der Befeuchtungsmethode
- Ergänzende Verfahren (Probekörper/Laborversuche, Durchführung von Simulationen)

Bei all diesen Schritten sind eventuelle Einschränkungen, beispielsweise aus einer Schadstoffbelastung, zu berücksichtigen. Die notwendigen Arbeitsschutzmaßnahmen ergeben sich hierbei aus der Art des Schadstoffs und der Exposition.

Störende äußere Einflüsse, z. B. Klimaschwankungen, lassen sich durch Lichtschutzmaßnahmen und eine räumliche Trennung sehr effizient reduzieren. Bei der Planung einer Einhausung sind jedoch zahlreiche Faktoren mit einzubeziehen. Diese sind in **Anhang 2** zusammengefasst. Der Lichtschutz muss aus einem geeigneten Material (witterungsbeständig falls im Außenbereich angebracht) gefertigt sein und die entsprechenden Öffnungen vollflächig verschließen. Notsicherungen an Kunstwerken sind, falls nötig, so früh wie möglich und in angemessenem Umfang anzubringen.

Im Folgenden sind mögliche schädliche Umwelteinflüsse, deren Auswirkungen und geeignete Messmethoden zusammengefasst (**Tabelle 1**). Die Auflistung der Methoden ist nicht abschließend und kann sich im Laufe der Zeit durch technische Weiterentwicklungen verändern. Eine detaillierte Auflistung der Methoden und ihrer Vor- und Nachteile findet sich in

Anhang 3.

Bei der Entwicklung des Systems sollte auf die Kompatibilität der einzelnen Komponenten untereinander geachtet werden und möglichst nur eine zentrale Datenspeicherung erfolgen. Mit steigender Komplexität eines Monitoringsystems steigt der Wartungsaufwand, kommt es häufiger zu Ausfällen und nimmt der Arbeitsaufwand bei der Bearbeitung und Auswertung der Daten zu. Unter Umständen ist es sinnvoll einen Messtechnik-Experten zu involvieren.

Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Überwachung des Klimas und der Reaktionen des Kunstwerks darauf. Bei der Verformung können verschiedene Bereiche (Träger, Malschicht, Umgebung) verschieden reagieren und voneinander abweichende Ziel-Klimakorridore haben. Auftretende Risse sind als „abgebaute Spannung“ im Material zu verstehen und deuten auf Spannungen hin, die die Festigkeit überschreiten. Die Ursache für die Spannungen ist zu identifizieren und möglichst schnell zu beheben, um weitere Schäden zu vermeiden. Weitere wichtige Aspekte, die bei der Entwicklung des Messkonzepts zu berücksichtigen sind, sind in

Tabelle 2 dargestellt.

Tabelle 1 Zusammenfassung verschiedener Umwelteinflüsse, ihrer Auswirkungen und einiger geeigneter Mess-, Monitoring- und Analysemethoden.

Umwelteinflüsse	Auswirkungen	Einfachere Monitoringmethoden	Komplexere Monitoringmethoden
Chemisch <ul style="list-style-type: none"> - Organische Säuren - Oxidation - Salze 	<ul style="list-style-type: none"> - Korrosion metallischer Anteile - Degradation von Malschichten (Metallseifen- und Oxalatbildung) 	<u>Allgemein:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten - Dancheck Teststreifen (Schnelltest für Essigsäure in Vitrinen) - Logger zur Bestimmung der Luftwechselrate 	<ul style="list-style-type: none"> - Luftkorrosivitätsmessung - ATR-FTIR-Spektroskopie - Röntgendiffraktometrie (XRD) für mineralische Bindemittel, Mineralien, Salze, Pigmente und Korrosionsprodukte - Ionenchromatografie - REM-EDX
Physikalisch <ul style="list-style-type: none"> - Luftfeuchte - Lufttemperatur - Oberflächentemperatur - Sichtbares Licht + UV/Global/IR-Strahlung - Erschütterungen 	<ul style="list-style-type: none"> - Materialfeuchte - Verformungen - Materialeigenschaften - Erwärmung - Degradation - Innere Spannungen - Risse - Ablösungen - Ver-/Entfärbungen - Krepierung 	<u>Allgemein:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Schimmel, Trocknungsrisse, Algen- oder Moosbildung, Ausbleichen, Krepierungen, Ablösungen, Lichtschäden (Ausbleichen, Krepierung, strukturelle Schäden, etc.; Geruch (z. B. muffig); Tropfenbildung oder Wasserläufer) <u>Materialfeuchte:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Handmessgerät für elektrische Widerstandsmessung - Gravimetrisch <u>Klima:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Thermohygrograph - Digitale (Thermo-)Hygrometer - Klassische Datenlogger: Einzelmessgeräte (standalone-Datenlogger), Kabel-/Busbasierte- oder Funksysteme <u>Verformungen:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Fotovergleiche (histor. Aufnahmen / jetzt) - Erfassung der Maße (Länge, Breite, Dicke) über Zollstock, Lineal, digitale Messgeräte, Millimeterpapier, etc. <u>Licht:</u>	<u>Materialfeuchte:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Elektrische Widerstandsmessung - Darrproben - Kapazitive Holzfeuchtemessung - Gravimetrisch <u>Temperatur:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Oberflächentempersensoren - Infrarotthermometer - Lufttemperatursensoren - Thermografie <u>Luftfeuchte</u> <ul style="list-style-type: none"> - Kapazitive Luftfeuchtemessung - Impedanzsensoren <u>Verformungen:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Triangulationslaser - Extensometer - Dehnungsmessstreifen - Optische Fasern - Laserscans - Invar-Draht - Akustische Emission - Rissmonitore - Photogrammetrie - Digital Image Correlation - Opto-technische Methoden (terrestrischer Laserscanner, Streifenlichtscanner) <u>Licht:</u> <ul style="list-style-type: none"> - Strahlungsmessung mit Sensoren für UV-A, UV-B, IR-, Globalstrahlung, Beleuchtungsstärke (Lux)

		<ul style="list-style-type: none"> - Blauwollskala - Luxmeter - Einfache Farbmessgeräte 	<ul style="list-style-type: none"> - Farbmessgeräte - Micro Fading - Xenon-Bogen-Test
<p>Biologisch</p> <ul style="list-style-type: none"> - Holzerstörende Pilze u. Schimmel - Schädlinge (Insekten) 	<ul style="list-style-type: none"> - Abbau der Substanz - Verschlechterung der mechanischen Eigenschaften - Stabilitätsverlust - Verfärbungen 	<p><u>Holzerstörende Pilze und Schimmel:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Schimmel, Algen- oder Moosbildung, Ablösungen; Geruch (z. B. muffig) - ATP/AMP-Messung <p><u>Schädlinge (Insekten):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Optisches, schriftliches und fotografisches Erfassen von (sensorischen) Auffälligkeiten wie z. B. Flecken, Ablösungen, Sichtungen von Schädlingen oder Rückständen (z. B. Bohrmehl, Kot); Ausflugslöchern; Verlust konstruktiver Stabilität etc. - Insektenfallen (z. B. Klebe- oder Pheromonfallen) 	<p><u>Holzerstörende Pilze und Schimmel:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Luftqualitätsmessung - Beprobung (aktiv/passiv) <p><u>Schädlinge (Insekten):</u></p> <ul style="list-style-type: none"> - Beprobung - Akustische Emission

Tabelle 2 Weitere Aspekte, die bei der Entwicklung des Messkonzepts zu berücksichtigen sind.

Stakeholder	Anforderungen von Eigentümern, Planern, Architekten, Behörden, Öffentlichkeit, etc.
Kosten	Größte Kostenfaktoren sind in der Regel Personal- und Sachkosten. Letztere richten sich häufig nach der Präzision. Durch robuste Systeme und Fernzugriff kann der Arbeitsaufwand reduziert werden; restauratorische Kontrollen vor Ort sollten erhalten bleiben.
Auswahl der Messstellen	So wenige wie möglich, so viele wie nötig.
Messintervall	In Abhängigkeit der Veränderungsrate. Zu kleine Intervalle führen zu redundanten Werten und unnötigem Speicherplatzbedarf. Zu große Intervalle (z.B. über stündlichen Werten) können zu Fehlinterpretationen führen. Bei höheren Veränderungsraten sind kürzere Intervalle zu wählen.
Messgenauigkeit	Sollte auf die erwarteten Veränderungen abgestimmt sein; entscheidender Kostenfaktor.
Monitoring in historischen Gebäuden	(Stabilität der) Stromversorgung, Stromverbrauch, Anzahl Steckdosen, Internetverbindung, Platzbedarf, Beeinträchtigung der Nutzung, bauliche Einschränkungen, Anforderungen übriger Ausstattung, Einschränkung durch Nutzende (Öffnungszeiten), Sicherheit (Brand-schutz, Diebstahl), potenzielle Wärmeentwicklung durch Technik
Übertragungstechnik	Manuelles Auslesen vor Ort, Fernzugriff auf Mess-PC, Cloud-basierte Lösungen
Störungspotenzial	Möglichst geringe Anfälligkeit anstreben, ggf. mit Redundanzen arbeiten, Wechselwirkung zwischen Messmethoden (z.B. elektrische Felder) ausschließen
Datenmanagement	Datenspeicherung und -sicherung, Speicherformat(e), Datenmenge und -qualität, Langzeitverfügbarkeit/Archivierung, Festlegung der Zuständigkeiten
Kompatibilität	Schnittstellen, Steuerungssoftware, möglichst nur ein zentrales System zur Aufzeichnung der Messdaten (Datenlogger) verwenden
Wartungsbedarf	Durch robuste Systeme und Fernzugriff kann der Arbeitsaufwand reduziert werden. Regelmäßige Vor-Ort-Termine für Wartung und Pflege sind weiterhin notwendig.
Nachhaltigkeit	Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch, Umweltverschmutzung, soziale Nachhaltigkeit
Ethische Fragen	Nicht zerstörende bzw. minimalinvasive Prüfverfahren und Messmethoden bevorzugen, Kosten-Nutzen-Verhältnis abwägen

Primäres Ziel muss zunächst die Bestimmung der Schadensursachen sein. Aus der Beurteilung der Ergebnisse, der darauffolgenden Risikoabschätzung und dem Objektzustand ergeben sich die notwendigen Maßnahmen, welche an die örtlichen Gegebenheiten angepasst werden müssen. Die Ziele für das Objekt müssen hierbei den Grenzen, Möglichkeiten und Risiken (für das Objekt und die Umgebung) gegenübergestellt und ein Optimum angestrebt werden.

Neben den Personalkosten hat auch die gewählte Messtechnik einen erheblichen Einfluss auf die Gesamtkosten. Je nach verfügbaren Mitteln sollten Art und Umfang der Sensoren daher möglichst sparsam gewählt werden. Ein reduziertes Messsystem umfasst mindestens das Mo-

onitoring des Raumklimas (relative Luftfeuchte und Temperatur – je nach Objektgröße und individuellen Gegebenheiten auch an mehreren Stellen) und der Reaktion des Objekts. Dies kann z. B. mittels Messung der Holzfeuchte, Gewichts- oder Dimensionsänderung erfolgen. Je nach Fragestellung kann es erforderlich sein, weitere Messgrößen aus

Tabelle 1 zu ergänzen oder mehrere Methoden zu kombinieren. Ein Vorschlag für ein reduziertes Messsystem findet sich in **Anhang 1**.

Für eine risikoarme Befeuchtung sollte in jedem Fall ausreichend Zeit eingeplant werden, so dass jederzeit die Möglichkeit zum Eingreifen besteht, falls das Monitoring die Entstehung neuer Schäden andeutet. Zudem werden so die Feuchtegradienten im Kulturgut reduziert und das Schadensrisiko gesenkt.

6 Umsetzung

Die Umsetzung erfolgt nach dem anfänglich entwickelten Konzept. Allerdings kann es notwendig sein, erste Sofortmaßnahmen, wie etwa die Anbringung von Notsicherungen oder Klima-Datenloggern, so früh wie möglich durchzuführen. Dementsprechend sind erste Sofortmaßnahmen parallel zur Grundlagenermittlung und Konzeptentwicklung durchzuführen. Dies maximiert den Informationsgewinn und kann helfen, Risiken zu minimieren.

Zur Umsetzung gehört neben der Zusammenstellung und Montage der im Konzept festgelegten Technik eine fortlaufende **Funktionskontrolle**, **Wartung** und **Pflege**. Auch wenn Fernüberwachung einen Großteil der Vor-Ort-Termine überflüssig macht, so sind diese nie gänzlich zu ersetzen. Die regelmäßige konservatorische Begehung und Dokumentation des aktuellen Objektzustands ist unumgänglich bei der Evaluierung des Konzeptes (siehe **7 Bewertung**) und reduziert das Schadensrisiko. Des Weiteren ermöglicht dies, Unwägbarkeiten, die aus der Grundlagenermittlung nicht bekannt sind, zu begegnen. Beispiele hierfür sind Ausfälle der Technik, plötzliche Klimaänderungen oder unerwartete Messabweichungen durch externe Störquellen.

Ein zentraler Punkt bei der Umsetzung ist die richtige Wahl der Messpunkte. Da die Anzahl der Messpunkte meist aus finanziellen, konservatorischen oder technischen Gründen begrenzt ist, müssen sich diese an möglichst aussagekräftigen Stellen befinden. Dazu gehört zudem die Festlegung der erforderlichen Mindestanzahl an Messpunkten. Einen Einfluss auf die Wahl der Messstellen haben unter anderem folgende Punkte:

- Ziel der Messung: Was und warum soll gemessen werden?
- Messmethode: Wie wird gemessen? (punktuell, Raster, linienförmig, flächig, Volumen)
- Eingriff: berührungslos, zerstörungsfrei, zerstörend, minimalinvasiv
- Objekteigenschaften: Zustand, Oberflächenbeschaffenheit, Materialien, Geometrie, Vorder- und Rückseite, Fassung oder Malerei

Ebenso wichtig ist die korrekte Durchführung von Messungen bzw. Bedienung von Messgeräten. In Abhängigkeit von der Robustheit der Methode können Bedienfehler hier zu Messfehlern führen, die weit über der angegebenen Genauigkeit der Messgeräte liegen. Bei mangelnder Erfahrung sind entsprechende Schulungen, beispielsweise durch die Hersteller, zu besuchen.

Nach Installation der Messtechnik kann – angepasst an die Ergebnisse der Risikobeurteilung und einer ausreichenden zeitlichen Erfassung des Ist-Zustandes – mit begleitenden Versuchen wie Klimaänderungen o. Ä. begonnen werden. Diese sind ebenso wie die Messgrößen, -methoden und Zwischenergebnisse in aussagekräftiger Form zu dokumentieren. Für eine

spätere Nachvollziehbarkeit sollten auch vermeintliche Nebentätigkeiten wie Überprüfung, Wartung und Pflege erfasst werden.

7 Bewertung

Die Bewertung der umgesetzten Maßnahmen sollte nicht nur am Ende, sondern bereits während der gesamten Bearbeitung regelmäßig erfolgen (**Abbildung 4**). Auf diese Feedback-Schleifen muss dann bei Bedarf mit einer Anpassung des Konzepts oder Veränderungen bei der Umsetzung (Messtechnik, Wartung, Pflege) reagiert werden. Dies garantiert eine fortlaufende Qualitätskontrolle und sorgt für bestmögliche Ergebnisse.

Diese projektinternen Feedback-Schleifen gliedern sich in projektübergreifende Schleifen ein, die mittels einer entsprechenden Dokumentation langfristig zu einer Verbesserung der Methodik führen. Hierbei darf eine abschließende Bewertung der Strategie und ggf. Verbesserungsvorschläge nicht fehlen.

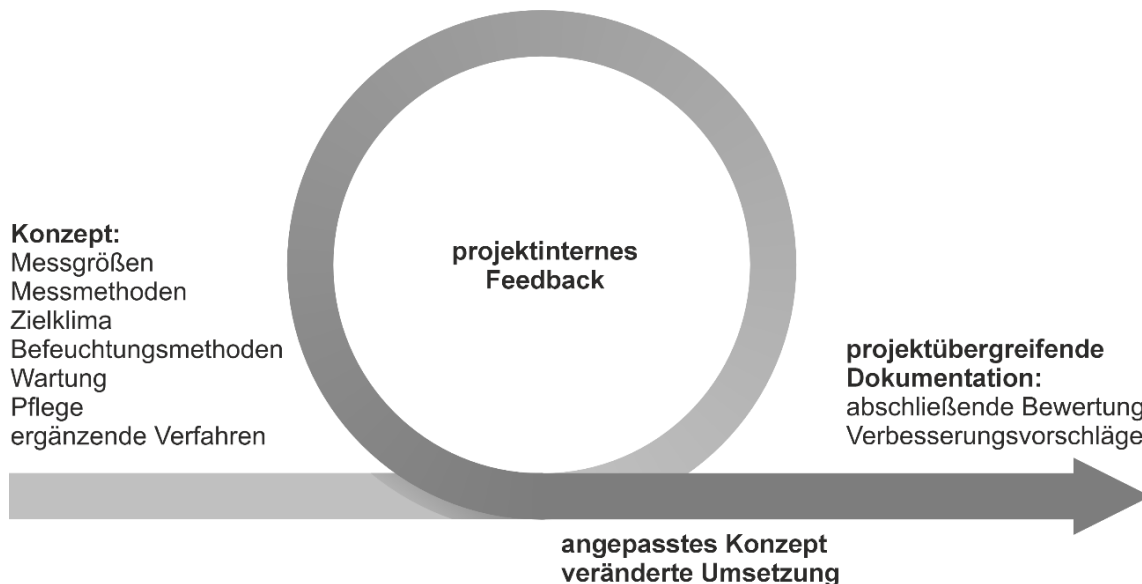


Abbildung 4 Projektinterne Bewertung als integraler Bestandteil der Umsetzung.

8 Fazit

Fachlich-inhaltliches Fazit aus dem Modellprojekt

Die Grundlagenermittlung, Risikoabschätzung, Konzeptentwicklung, Umsetzung und Beurteilung bilden die Standbeine eines Projektes zur Befeuchtung.

Im Projekt zeigte sich durch die Abkopplung des Klimas (Einhausung) eine schnelle und deutliche Klimastabilisierung am Gemälde. Sobald das Monitoring- und Messsystem gemäß der definierten Schadensursache und Zielsetzung installiert ist, rücken die Wartung und Pflege der Gerätschaften – aber vor allem auch die restauratorische Beobachtung des Kunstwerkes und seiner Reaktion – in den Fokus. Die einzelnen Auffeuchtungsschritte können dabei erst nach der Auswertung der bisherigen Ergebnisse und Reaktionen erfolgen und sollten stets im interdisziplinären Team abgestimmt werden. Die Befestigungen und Untersuchungen am Original sollten nach Möglichkeit zerstörungsfrei oder minimalinvasiv sein. Ob die Sensorbefestigung oder Eingriffe ethisch vertretbar sind, muss individuell auf das Kunstwerk und die Notwendigkeit der Maßnahme abgestimmt werden.

Für den Erfolg eines Auffeuchtungsprojektes muss neben den benannten Voruntersuchungen, und Abschätzungen nicht nur eine Befeuchtungsmethode gewählt oder entwickelt werden, sondern vor allem auch die möglichst dauerhafte und konstante Stabilisierung des Klimas nach der Befeuchtung berücksichtigt werden. Nur in seltenen Fällen der Denkmalpflege ist dabei aus finanziellen und Wartungsgründen eine technische Vollklimatisierung möglich. Wünschenswert ist die Wahl möglichst ressourcenschonender und nachhaltiger Lösungen. Hierzu gibt es vielversprechende Untersuchungen zu gesättigten Salzlösungen sowie synthetischen oder mineralischen Puffermaterialien (s. DBU-Abschlussbericht).

Planerisches Fazit

Für die Durchführung einer in situ Befeuchtung und eines Monitorings können gängige Projektmanagementstrategien angewendet werden. Diese beinhalten die Benennung einer Projektleitung und die anschließende Implementierung von Projektsteuerungstools durch diese.

Bereits in der Vorprojektphase sollte eine Problemanalyse durchgeführt werden, um mögliche Unwägbarkeiten zu identifizieren und entsprechende Projektalternativen zu entwickeln. Hierbei kann es sich sowohl um projektinterne Probleme wie Kündigungen oder Krankheitsfälle handeln, als auch um externe Faktoren wie globale Krisen (Pandemien, Kriege), lokale Katastrophenfälle (Brand, Überschwemmung) oder logistische Schwierigkeiten vor Ort (Stromausfälle, eingeschränkte Zugänglichkeit). Das Arbeiten in situ erfordert aufgrund der größeren Abhängigkeit von externen Faktoren ein hohes Maß an Flexibilität. Ein detaillierter Kosten-, Arbeits- und Zeitplan ist obligat für die Umsetzung eines umfangreichen Projektes. Deadlines, Meilensteine und die klare Zuweisung von Arbeitspaketen helfen, das Projekt zu strukturieren. Regelmäßige Jours fixes dienen dem Austausch von Ergebnissen und verbessern die Kommunikation innerhalb des Projektteams.

Nicht alle Szenarien können im Vorfeld erschöpfend analysiert werden, daher ist eine stetige Kontrolle des Soll- und Ist-Zustandes erforderlich. Abweichungen vom Zeit- und/oder Kostenplan sollten durch die jeweiligen Aufgabenverantwortlichen umgehend an die Projektleitung kommuniziert werden, um Anpassungen vornehmen zu können.

9 Literatur

- [1] Climate Service Center Germany: Klimaausblicke Bundesländer, URL: https://www.gerics.de/products_and_publications/fact_sheets/klimaausblicke/index.php.de (Stand 23.4.2024).
- [2] Deutscher Museumsbund: Empfehlungen zur Energieeinsparung durch die Einführung eines erweiterten Klimakorridors bei der Museumsklimatisierung, 2022, URL: <https://www.museumsbund.de/wp-content/uploads/2022/11/klimakorridor-fuer-sammlungsgut.pdf> (Stand 23.4.2024).
- [3] Verband der Restauratoren: Grenzen testen? Evaluation des erweiterten Klimakorridors, 2023, URL: <https://www.restauratoren.de/grenzen-testen-evaluation-des-erweiterten-klimakorridors/> (Stand 23.4.2024).
- [4] Müller, Andreas/Brandt, Julia: Kunst im Fokus. Fachliche Aspekte bei der Vorbereitung von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der künstlerischen Ausstattung, in: Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Von der Planung zur Ausführung. Denkmalpflegerische Restaurierungsprojekte an Kirchen in Bayern, München 2022, S. 55-71.

- [5] Canadian Conservation Institute: Agents of deterioration, 2017, URL: <https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration.html> (Stand 19.2.2024).
- [6] Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe BBK (Hrsg.): Sicherheitsleitfaden Kulturgut – Tool, URL: <https://www.silk-tool.de/de/> (Stand 19.2.2024).
- [7] DIN EN 15757:2010-12: Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien.
- [8] Sedlbauer, Klaus: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Stuttgart 2001.
- [9] Bridarolli, Alexandra/Freeman, Ashley Amanda/Fujisawa, Naoki/ Łukomski, Michał: Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity, in: Journal of Cultural Heritage, Volume 53, 2022, pp. 226-235.

Weiterführende Literatur:

Anaf, Willemien; Cabal, Ana; Robbe, Mie; Schalm, Olivier: Real-Time Wood Behaviour: The Use of Strain Gauges for Preventive Conservation Applications, in: Sensors, Volume 20, Issue 1, Basel 2020, pp. 1-14.

Ashley-Smith, Jonathan; Burmester, Andreas; Eibl, Melanie (Hrsg.): Climate for collections standards and uncertainties: Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November 2012, London/München 2013.

Bundesdenkmalamt (Hrsg.): Leitfaden. Zustandserhebung und Monitoring an Wandmalerei und Architekturoberfläche, 2. Fassung, online, 2019.

DIN EN 13183-1:2002-07: Feuchtegehalt eines Stückes Schnittholz – Teil 1: Bestimmung durch Darrverfahren.

DIN EN 16095:2012-10: Erhaltung des kulturellen Erbes – Zustandsaufnahme an beweglichem Kulturerbe.

Falciai, R.; Trono, C.; Lanterna, G.; Castelli, C.: Continuous monitoring of wooden works of art using fiber Bragg grating sensors, in: Journal of Cultural Heritage, Volume 4, Issue 4, 2003, pp. 285-290.

Forest Products Laboratory, United States Department of Agriculture Forest Service (eds.): Wood Handbook. Wood as an Engineering Material, Madison (Wisconsin) 2021.

Hering, Ekbert; Schönfelder, Gert (Hrsg.): Sensoren in Wissenschaft und Technik. Funktionsweise und Einsatzgebiete, 3. Auflage, Wiesbaden 2023.

Landesamt für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt (Hrsg.): Leitfaden zur restauratorischen Untersuchungsdokumentation, Halle (Saale), 2014.

Nevin, Austin; Sawicki, Malgorzata: Heritage Wood. Investigation and Conservation of Art on Wood, Cham 2019.

Science Europe: Practical Guide to the International Alignment of Research Data Management, (online) 2021.

VDI-Richtlinie 3798: Materielles Kulturerbe. Erfassung, Untersuchung und Erhaltung unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse, 2020.

WTA-Merkblatt 10-3: Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte, 2022.

¹ Vgl. Müller/Brandt 2022, S. 69f. Hier werden die wichtigsten Schritte in der Projektplanung sowie eine Checkliste zum Umfang einer restauratorischen Voruntersuchung und Maßnahmenvorbereitung dargestellt.

10 Anhang

Anhang 1: Vorschlag für ein reduziertes Messsystem

Messgröße	Kostengünstiges Monitoring	Optimales Monitoring	Allgemein (Handlungsempfehlung)
Raumklima	Thermohygrograph	Klimasensoren	1-2 am Objekt, 1 im Raum
Oberflächentemperatur	Oberflächentemperatursensoren		nur falls Diffusion simuliert werden soll oder Kondensationsprobleme zu erwarten sind
Deformation	Extensometer	Triangulationslaser	Ggf. auch DMS einsetzen (kleiner, keine Wärmeentwicklung)
Materialfeuchte	Elektr. Widerstandssensoren	Waage und Darrproben, falls Probekörper vorhanden	Eher moderne, LoRa-WAN-basierte Systeme einsetzen
Optisches Monitoring	Zeitrafferkamera	Streifenlichtscans	Hoher Arbeitsaufwand für Streifenlichtscans

Anhang 2: Anforderungen an Einhausungen/Klimaboxen

Anforderung		Bemerkung	Wichtige Aspekte
Maße/Volumen	Minimale Innenmaße/Maximale Außenmaße	Ausreichend Platz für Messtechnik u. Monitoring, Kontrollen am Objekt und ggf. Notmaßnahmen einplanen Ggf. Echtzeit-Überwachung und Fernwartung einrichten	- Volumen - Materialien
Aufbau	Schleuse/Tür Außenflächen		- Denkmalverträglicher Anschluss zum Bestand - Grundriss - Statik
Fernwartung	Messtechnik		- Möglichkeit einer Kamera für Fernwartung - Beleuchtung - Zugriff auf Messtechnik
Objekthandling	Positionierung des Kunstwerkes in der Einhausung	Hängend, stehend, liegend	- Einfluss der Positionierung für Klimatisierung/Monitoring/Notmaßnahmen?
	Vibrationsschutz und Statik	Belastungen durch nahe Baustellen oder Nutzung	- Ggf. Messungen notwendig - Gibt es Grenzwerte? - Entkopplung
Luftaustausch	Luftbewegung, Dampfdurchlässigkeit und Dichtigkeit der Flächen und Fugen	Gefahr von mikrobiellem Befall in der Einhausung, Verhinderung von Stratifikation	- Wie, wann und in welchem Maße erfolgt Luftbewegung? - Wo/wie lüften (nötig)? - Gleichmäßige Verteilung der Luft - Kein punktuell „Anblasen“ - Ggf. Schadstoffbelastung berücksichtigen
Klimaregulierung	Be-/Entfeuchtung der Raumluft	Aktiv: Ein- und Ausleitung gereinigter und be-/entfeuchteter Luft Passiv: konstante Feuchtigkeit halten durch Puffermaterial	- Steuerung und Geschwindigkeit der Luftbefeuchtung - Aktive oder passive Klimatisierung - Energiebedarf - Dauer der Maßnahme
Emissionen	Emissions-, Säure-, Weichmacher- und VOC-frei	VOC-Sensoren Aktive Raumluftmessung Passivsammler Korrosionsdetektoren	- Korrosionsschäden für Kunstwerke - Arbeitssicherheit/Gesundheitsschutz
Erscheinungsbild	z. B. transparente Front; Seiten-, Rückwände und Dach nicht zwingend	Beobachtung des Objekts von außen, Ästhetik, Kontrolle ggf. ohne Klimaänderung durch Öffnung möglich	- Anforderungen der Eigentümer/ Öffentlichkeit - Kosten - Dämmwirkung (Glas) - Licht(-schutz)

Anhang 3: Vergleich der Messmethoden

Messmethoden		Vorteile	Nachteile
Chemische			
	Optische Überwachung	– Keine technische Ausrüstung notwendig	– Erfordert Erfahrung – Subjektiv
	Luftkorrosivitätsmessung	– Kontinuierlich – Quantitativ	– Anfällig für elektrische Störfelder
Physikalische			
Materialfeuchte	Elektrische Widerstandsmessung	– Quasi-kontinuierlich	– Anfällig für elektrische Störfelder – invasiv
	Kapazitive Holzfeuchtemessung	– Minimalinvasiv	– Anfällig für Bedienfehler
	Darrprobe	– Exakte Bestimmung der Materialfeuchte	– Zerstörend
	Gravimetrisch	– Quasi-kontinuierlich – Extrem hohe Genauigkeit möglich	– Je nach Objekt schwer umsetzbar (Größe)
Temperatur	Oberflächentempersensoren	– Hohe Genauigkeit	– Anbringung erfordert i. d. R. Verklebung oder hohen Anpressdruck; restauratorisch verträgliche Methoden siehe DBU-Abschlussbericht
	Infrarotthermometer	– Messung aus Distanz	– Manuelle Bedienung notwendig – Messfehler bei hellen/glänzenden Oberflächen
	Lufttemperatursensoren	– Quasi-kontinuierlich	
Luftfeuchte	Luftfeuchtesensoren		
Verformungen	Triangulationslaser	– Berührungslos – Hohe Genauigkeit – Quasi-kontinuierlich	– Für beste Ergebnisse Anbringung von Keramikendmaßen nötig – Punktmessung – Kosten
	Extensometer	– Quasi-kontinuierlich	– Gute Messergebnisse nur bei Verschraubung mit Objekt – Geringe Genauigkeit
	Dehnungsmessstreifen	– Hohe Genauigkeit – Messung über Bereich	– Oberflächenvorbereitung u. Rückbau problematisch – Risse können zu Messfehlern führen
	Optische Fasern	– Hohe Genauigkeit – Messung über gesamte Länge	– Oberflächenvorbereitung u. Rückbau problematisch

	Laserscans	<ul style="list-style-type: none"> – Einfache Erfassung ganzer Objekte 	<ul style="list-style-type: none"> – Geringere Genauigkeit – Messfehler bei hellen/glänzenden Oberflächen
	Streifenlichtscanner	<ul style="list-style-type: none"> – Hohe Genauigkeit – Messung ganzer Bereiche 	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Personalaufwand – Sehr hohe Investitionskosten
	Invar-Draht	<ul style="list-style-type: none"> – Kostengünstig 	<ul style="list-style-type: none"> – Eher zur Überwachung von Gebäuden geeignet
	Akustische Emission	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert Hinweise auf Rissbildung 	<ul style="list-style-type: none"> – Interpretation erfordert hohes Maß an Erfahrung – Herkunft des Signals u. U. nicht eindeutig zuordenbar (siehe Biologische Umwelteinflüsse)
UV/Global/IR-Strahlung	Strahlungsmessung	<ul style="list-style-type: none"> – Liefert Einschätzung der Lichtexposition 	<ul style="list-style-type: none"> – Kosten für präzise Sensoren; sonst Fehleranfälligkeit
Biologische			
	Optisches Monitoring	<ul style="list-style-type: none"> – Kein Spezial-equipment notwendig – Geeignet zur Vororientierung 	<ul style="list-style-type: none"> – Hoher Personalaufwand – Begrenzte Aussagekraft zur Art eines mikrobiellen Befalls
	Luftqualitätsmessung	<ul style="list-style-type: none"> – Quasi-kontinuierlich 	<ul style="list-style-type: none"> – Qualitativ – Kosten
	ATP/AMP-Messung	<ul style="list-style-type: none"> – Schneller Nachweis zum Vorhandensein von Mikroorganismen 	<ul style="list-style-type: none"> – Begrenzte Aussagekraft bzgl. Aktivität des Befalls – Aussage örtlich u. zeitlich begrenzt – Keine Aussage zur Art der Mikroorganismen u. Gesundheitsrisiken – Hohe Fehleranfälligkeit (angepasste Probenahmemethode)
	Beprobung (aktiv/passiv)	<ul style="list-style-type: none"> – Artbestimmung möglich 	<ul style="list-style-type: none"> – Passiv: keine konkreten Aussagen zum Befall am Objekt möglich – Aktiv: ggf. invasiv (Materialprobe) bzw. Gefahr der Schädigung des Objektes
	Akustische Emission	<ul style="list-style-type: none"> – Beurteilung zur Befallsaktivität von holzzerstörenden Insekten 	<ul style="list-style-type: none"> – Interpretation erfordert hohes Maß an Erfahrung – Herkunft des Signals u. U. nicht eindeutig zuordenbar (s. Physikalische)