Abschlussbericht

DBU-Förderprojekt AZ: 37502/01

Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes

Laufzeit: Januar 2022 bis August 2024 (32 Monate)

Gründonnerstagsretabel im Dom St. Maria und Korbinian; Domkirchenstiftung Freising
© Diözesammuseum Freising, Foto: Walter Bayer

München, 28.11.2024

Projektbearbeitung und Gesamtredaktion:

Theresa Hilger (BLfD, Projektleitung)

Julia Brandt (BLfD)

Manuela Hörmann (BLfD)

Kristina Holl (KDWT)

Alex Fröhlich (TUM)

Bezugsmöglichkeit des Berichts:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege

Abteilung Praktische Bau- und Kunstdenkmalpflege

Referat AV, Restaurierung

Hofgraben 4, 80539 München

Dieser Bericht ist in elektronischer Form über die Website www.dbu.de und dem Aktenzeichen AZ 37502-01 sowie unter https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html abrufbar.

Zitiervorschlag: Hilger, T., Brandt, J., Hörmann, M., Holl, K., Fröhlich, A., Bellendorf, P., Pallas, L. & Löther, T. (2024). Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes. [DBU-Abschlussbericht]. AZ 37502-01 unter www.dbu.de.

Bewilligungsempfänger und Projektleitung:

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (BLfD), München

M.A. Theresa Hilger, Projektleitung
M.A. Julia Brandt, stv. Projektleitung
M.A. Manuela Hörmann, wissenschaftliche Mitarbeiterin [09.2022 – 08.2024]
Dipl.-Rest. Cornelia Hagn, Projektinitiative [bis 2021]
Dipl.-Rest. Univ. Judith Regensburger, wissenschaftliche Mitarbeiterin [03.2022 – 08.2022]
M.A. Vanessa Klee, Volontärin Gemälde u. Skulptur [2021 – 2022]
M.Sc. Jana Hungerecker, Volontärin Gemälde u. Skulptur [2023 – 2024]
Johanna Gerling, Semesterpraktikantin Textil [2023]
M.A. Josephine Opitz, wissenschaftl. Mitarbeiterin Gemälde u. Skulptur [2024]

Projektpartner:

Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT), Professur für Restaurierungswissenschaft, Bamberg

Prof. Dr. Paul Bellendorf
Dr. Kristina Holl, Projektstelle wissenschaftliche Mitarbeiterin
M.A. Leander Pallas, wissenschaftlicher Mitarbeiter
Dr. Max Rahrig [2020]
B.A. Jonatan May [2023 – 2024]
M.A. Natalie Koserog [2023 – 2024]

Technische Universität München (TUM), Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, München

M.Sc. Alex Fröhlich, Projektstelle wissenschaftlicher Mitarbeiter
Prof. Dr. Stefan Winter
Dr.-Ing. Patrik Aondio [2020 – 2023]
Dipl.-Ing. M. A. Architekt Stephan Ott [2020 – 2021]
Dennis Kerscher, Studentische Arbeit [2023]
Osman Kocan, Studentische Arbeit [2023 – 2024]
Jordan Tierney, Studentische Arbeit [2023]

Care For Art (CFA), restauratorische Beratungsgesellschaft, München:

Dr. Elise Spiegel

Unterauftragnehmer:

Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP), Benediktbeuern:

Dr. Kristina Holl

Institut für Diagnostik u. Konservierung an Denkmalen in Sachsen u. Sachsen-Anhalt e.V. (IDK), Dresden:

Dipl.-Ing Thomas Löther

Projektbegleitender Ausschuss:

Prof Dr. Marc-Aeilko Aris, Domrektor Freising
Elmar Hobelsberger, Verwaltungsleiter Domkirchenstiftung Freising
Dr. Michael Schmidt, BLfD, Gebietsreferent [seit 2021]
Dipl.-Ing. Arch. Christoph Spieß, Untere Denkmalschutzbehörde
Dr. Anja Schmidt, Hauptabteilungsleiterin, HA Kunst, EOM, Erzdiözese München-Freising (KdöR) [ab 2022]
Dr. Hans Rohrmann, Fachreferent für kirchliche Kunstpflege, HA Kunst, EOM, KdöR
Dr. Christoph Kürzeder, Direktor Diözesanmuseum Freising
Dr. Carmen Roll, Stv. Direktorin Diözesanmuseum Freising, Kuratorin
Dr. Matthias Weniger, Referent für Skulptur und Malerei vor 1550, Bayerisches Nationalmuseum
Dr. Norbert Jocher, Hauptabteilungsleiter, HA Kunst, EOM, KdöR [bis 2022]
Dr. Hildegard Sahler [bis 2020]
Dr. Nikolaus Könner [2020 – 2021]

06/02

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

Az	37502 / 01	Referat	**12**	Fördersumme	**360.767 €**

Antragstitel	*Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*
Stichworte	Denkmalschutz / Kulturgüterschutz Klimaschaden, Befeuchtung, Holztafelbild, Klimatisierung

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
32 Monate	**01.01.2022**	**31.08.2024**	**1**
Zwischenberichte	4		

Bewilligungsempfänger	Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege Bau- und Kunstdenkmalpflege, Restaurierung Hofgraben 4 80539 München	Tel: 089 2114 0 Fax: 089 2114 300 Projektleitung Theresa Hilger und Julia Brandt (Stv.) Bearbeiter Theresa Hilger (BLfD) Julia Brandt (BLfD) Manuela Hörmann (BLfD) Alex Fröhlich (TUM) Kristina Holl (KDWT)
Kooperationspartner	TU München, Lehrstuhl Holzbau und Baukonstruktion Uni Bamberg, Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien, Professur für Restaurierungswissenschaft Care For Art	
Unterauftragnehmer:	Institut für Diagnostik und Konservierung in Sachsen u. Sachsen-Anhalt Fraunhofer Institut für Bauphysik	

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Die perspektivisch zunehmende Austrocknung durch Klimawandel und anthropogene Einflüsse, z. B. menschliche Nutzung, führt zu erheblichen Schäden an Kunst- und Kulturgut in Denkmälern. Das materialabhängig unterschiedliche Quellen und Schrumpfen produziert Spannungen und Schäden innerhalb hygroskopischer Werkstoffe, aber auch zwischen den einzelnen Schichten. Typische Schadensbilder sind Risse, Verformungen sowie Ablösungen, die im Substanzverlust oder der vollständigen Zerstörung münden können. Die mangelnde Kontinuität der Umgebungsbedingungen und die Begrenzung der technischen, finanziellen und personellen Möglichkeiten zur Kontrolle, Pflege und Wartung geeigneter Klimakonzepte werden zu einer immer größeren Herausforderung in der praktischen Denkmalpflege.

Das Projekt möchte modellhaft die Möglichkeiten der Auffeuchtung von durch niedrige, anthropogen bedingte Luftfeuchten stark geschädigten Kulturgütern praxisorientiert untersuchen. Hierfür wird exemplarisch an einem national wertvollen Holztafelgemälde in denkmalpflegerischem Umfeld eine in situ Auffeuchtung durchgeführt und messtechnisch begleitet. Als Fallbeispiel dient das Gründonnerstagsretabel aus der Unteren Sakristei des Freisinger Doms; ein großformatiges Tafelgemälde (275 x 382 x 2 cm) aus dem 15. Jh. Der aus einzelnen Bohlen bestehende Holzträger ist aufgrund trockener Raumluft und Klimaschwankungen geschrumpft. Bis heute bewegt sich die Tafel in Abhängigkeit zum wechselnden Umgebungsklima und verursacht dabei zunehmende Malschichtschäden an der qualitätvollen und detailreichen Malerei von Hans Mair von Landshut. Die Konservierung der Malschicht – unter Erhalt der Originalsubstanz – ist aktuell

nicht möglich, da sie eine Annäherung des Holzträgers an seine geometrischen Ursprungsmaße voraussetzt.
Das vorgetragene Modellobjekt steht exemplarisch für eine große Anzahl von Objekten aus dem Bereich des Kulturgüterschutzes, die durch ein ungeeignetes Raumklima bereits geschädigt wurden oder geschädigt werden und wo eine nachhaltige Konservierung nur durch Behebung der Schadensursachen erfolgen kann. Im Projekt sollen deshalb die Zusammenhänge der Einflussparameter zur Klimatisierung beleuchtet, die konservatorische und restauratorische Bearbeitung wieder ermöglicht und weitere Verluste bzw. Schäden in Zukunft minimiert werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Vorarbeiten: Evaluierung der Restaurierungs- und Objektgeschichte (Archiv BLfD); Voruntersuchungen und erste Notmaßnahmen (Erfassung des Raumklimas Messung der Holz-feuchte, Dokumentation des restauratorischen Zustandes, Beginn 3D-Streifenlichtscans, Vorzustandsaufnahmen, Anforderungskatalog und Bau Einhausung/Klimabox).

AP 1: Mess- und Monitoringkonzept: Anbringung minimal-invasiver Messsysteme für Raum- und Mikroklima, VOC's, Holzträger und Malschicht, inklusive Steuerungsmodulen zur Be-/Auffeuchtung. Durchführung bildgebender Verfahren, u. a. fotografisches Langzeitmonitoring, 3D-Streifenlichtscans, Zeitrafferaufnahmen.

AP 2: Materialanalysen, hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche: Aufbauend auf analytischen Materialbestimmungen, Planung und Erstellung von Probekörpern für hygrothermische Simulation, Klimaschrankversuche und Referenzproben in der Einhausung; Bauphysikalisches Modell; Durchführung Simulationen und Klimaschrankversuche.

AP 3: Aktive Klimatisierung am Beispiel des Tafelbildes in Freising: gemäß Risikoabschätzung aus AP 1 und 2 Be-/Auffeuchtung der Raumluft zur Ausdehnung des Tafelbildes und Überprüfung der Reaktionen am Fallbeispiel sowie kontinuierliches Monitoring aus AP1.

AP 4: Entwicklung eines Handlungsleitfadens: Auswertung, Diskussion und Interpretation aller Daten und Arbeitsproben; Entwicklung einer Handlungsempfehlung; Entwicklung eines reduzierten Messsystems für die Nachprojektzeit (Langzeitmonitoring); Diskussion nachhaltiger Bedingungen für die Konservierung/Restaurierung und Erhaltung anthropogen geschädigter Kunstwerke; Abschlussbericht und Publikation.

Innovation: gezielte Feuchterückführungen sind grundsätzlich Stand des Wissens und der Technik in der Konservierung/Restaurierung von Kulturgütern aus organischen Materialien. Eine in situ Befeuchtung zur Ausdehnung an einem Objekt dieser Größe, Güte und Datierung – im denkmalpflegerischen Bereich – ist bislang nicht bekannt. Das Monitoring, die Risikoabschätzung und messtechnische Begleitung einer Auffeuchtung sind in dieser Konstellation einzigartig und gehen weit über den aktuellen Stand der Anwendungsmöglichkeiten in der Denkmalpflege hinaus. Die Einhaltung einer derartig entwickelten Klimastabilisierung soll zukünftige Schäden verhindern und die Nachhaltigkeit von Maßnahmen verbessern.

Ergebnisse und Diskussion

Das Projekt fasst wertvolle Grundlagen und neue Erkenntnisse zur in situ Auffeuchtung hygroskopischer Materialien eines – aufgrund anthropogener Klimaeinflüsse – bedrohten oder bereits geschädigten Holztafelbildes in einem Denkmal zusammen. Aufbauend auf der Risikoabschätzung einer Befeuchtung zur Ausdehnung (Recherche, Monitoring, Simulationen, Labor- und Klimaschrankversuche) konnte am Fallbeispiel in Freising eine aktive Auffeuchtung bzw. Klimastabilisierung geplant und schadensfrei durchgeführt werden. Die Abschätzung und Durchführung in situ ermöglicht den Nachweis des Verhaltens eines Tafelgemäldes dieser Größe, Güte und Datierung bei klimatischen Schwankungen. Der Großteil des Gründonnerstagsretabels befindet sich zum Projektende in einem konservierungsfähigen Zustand.

Die gewählten Mittel der Risikoabschätzung stellen probate Methoden dar. Das installierte Monitoringsystem, die konservatorische Begleitung und interdisziplinäre Zusammenarbeit erwiesen sich als zielführend, um das Materialverhalten der Tafel zu beobachten, (messtechnisch) zu erfassen und zu dokumentieren. Die Risiken, Einflussparameter und konservatorischen Herausforderungen (u. a. Sensoranbringung) wurden umfassend diskutiert, erprobt und vermittelt.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass ein an den historischen Mittelwert der relativen Feuchte angelehntes Umgebungsklima in Korrelation mit dem Außenklima zu einer Beruhigung der Bewegungen führt und weitere Schäden am Tafelgemälde verhindert. Dies zeigt, dass der Klima- und Bearbeitungshistorie eines Kunstwerkes besondere Bedeutung zukommt, wenn das Ausmaß plastischer, also irreversibler Verformungen abgeschätzt werden soll. Sowohl im Klimaschrank (junges Holz) als auch am Original (gealtertes Holz) zeigte sich, dass nach Befeuchtungsschritten von 5 % r. F. im Mittel 14 Tage für ca. 2 cm dickes Nadelholz notwendig sind, um die Ausgleichsfeuchte zu erreichen.

Mit Hilfe der Projektergebnisse kann auch an anderen Fallbeispielen eine Risikoabschätzung, Analyse, messtechnische Erfassung und Dokumentation zur Stabilisierung der Materialien und langfristigen Erhaltung durchgeführt werden. Der Handlungsleitfaden, Abschlussbericht und die Publikation unterstützen die Planung, Durchführung und Erfolgskontrolle derartiger Projekte.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Im Laufe der Projektzeit wurde das Forschungsthema verstärkt in der Öffentlichkeit präsentiert und vermittelt, um eine Sensibilisierung für die Gefährdung von Kulturgut durch den Klimawandel und anthropogene Schädigung zu erzielen. Darunter u. a. Kick-off-Treffen (Kolloquium), Pressemitteilungen, Zeitungsberichte, Projektinformationen über die Homepages der Projektpartner, Sensibilisierung der Mitarbeitenden, Führungen (u. a. Tag des offenen Denkmals, Tag der Restaurierung) und BLfD Imagefilm. Die Vorstellung, Präsentation und der Austausch mit Fachpersonen erfolgte an mehreren nationalen und internationalen Tagungen, in Expertenrunden, einer VDR-Exkursion sowie über die 2-tägige Abschlusstagung. Die Veröffentlichung des Handlungsleitfadens, Abschlussberichtes und von Tagungsbeiträgen soll eine Grundlage für ähnlich gelagerte Projekte darstellen. Neben der Evaluierung des aktuellen Standes des Wissens und der Techniken sollen insbesondere die ausführliche Darstellung der Projektergebnisse und Lösungsansätze einen Mehrwert bieten. Weitere Vermittlung erfolgt zukünftig an den beteiligten Universitäten sowie im Rahmen der Tätigkeiten des BLfDs.

Fazit

Es ist hinreichend bekannt, dass ein zu trockenes Raumklima dem dauerhaften Erhalt von organischem Kunst- und Kulturgut schadet. Dies wird auch im Projektverlauf deutlich, wo das Fallbeispiel, ein Holztafelbild, besonders in der trockenen Winterperiode starken Schaden nimmt. Die schadensfreie in situ Auffeuchtung des großformatigen Fallbeispiels zeigt die Möglichkeiten und Grenzen derartiger Projekte umfassend auf. Unabdingbar für eine Risikobeurteilung erwies sich die genaue Kenntnis der Objektgeschichte, Materialität und Raumsituation. Besondere Herausforderungen ergaben sich aus der in situ Situation. Örtliche Gegebenheiten, Stromausfälle, Internetanbindung und Anfahrtswege führten zu Verzögerungen und Messausfällen. Dies muss bei in situ Arbeiten entsprechend eingeplant werden, wofür der Abschlussbericht, die Publikation sowie die Handlungsempfehlung praktische Ansätze und „lessons learned“ vermitteln.
Wünschenswert ist der Einsatz energie- und kostenarmer Lösungsansätze, um nicht negativ auf die Umwelt einzuwirken.

Für die Zukunft ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von zentraler Bedeutung, da sie essenzielle Kenntnisse und Fähigkeiten vereint, um den Erhalt von Denkmälern und ihrer Ausstattung zu gewährleisten. Es ist wesentlich, dass Öffentlichkeit und Politik für die Belange der Denkmalpflege sensibilisiert werden, um einen breiten Rückhalt für nachhaltige Maßnahmen zu schaffen und zukünftige Generationen für den Wert kultureller Erbes zu begeistern.

INHALTSVERZEICHNIS

Abkürzungsverzeichnis und Definitionen 11

Kurzfassung 12

1 Projektbeschreibung 13

1.1 Hintergrund und Anlass 14
1.2 Projektziele 17
1.3 Projektentwicklung 18
1.4 Arbeitsplan 21

2 Grundlagenermittlung 22

2.1 Literaturbasierte Risikoermittlung zur Auffeuchtung 22
2.2 Fallbeispiel Freising 33
2.2.1 Zustand zu Projektbeginn 34
2.2.2 Restaurierungs- und Objektgeschichte 37
2.2.3 Kunsttechnologischer Aufbau 42
2.2.4 Konservierungsziel 49
2.3 Voruntersuchungen und erste Maßnahmen 50
2.3.1 Klimaaufzeichnungen 50
2.3.2 Messung des elektrischen Widerstands 51
2.3.3 Elektrodenauswahl für Widerstandsmessungen 52
2.3.4 Notsicherungen 55
2.3.5 Bau einer Einhausung 58
2.3.6 Lichtschutz 59
2.3.7 Biozid-Screening 60

3 Konzeptentwicklung und Monitoring 62

3.1 Mess- und Monitoringkonzept 62
3.1.1 Stützkonstruktion 65
3.1.2 Sensoranbringung 67
3.1.3 Klimamonitoring 71
3.1.4 Holzträgermonitoring 74
3.1.5 Datenmanagement 80
3.1.6 Malschichtmonitoring 83
3.1.7 Korrosivitäts- und Luftqualitätsmonitoring 90
3.2 Hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche 92
3.2.1 Herstellung von Probekörpern 93
3.2.2 Baukonstruktives/bauphysikalisches Modell 99
3.2.3 Bestimmung der Materialkenndaten 103

3.2.4 Hygrothermische Simulation mit *WUFI®* ... 105
3.2.5 Klimaschrankversuche an Probekörpern ... 107
3.3 Weitere Untersuchungen ... 108
3.3.1 Luftströmungsmessung ... 108
3.3.2 Luftwechselrate ... 109
3.3.3 Luftgeschwindigkeit ... 110
3.3.4 Thermografie ... 110
3.3.5 Untersuchung der Raumschale ... 111
3.3.6 Schimmeluntersuchung und -Monitoring ... 111
3.4 Auffeuchtungsversuch ... 114
4 Ergebnisse ... 115
4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes ... 115
4.1.1 Stützkonstruktion ... 115
4.1.2 Sensoranbringung ... 115
4.1.3 Klimamonitoring ... 116
4.1.4 Holzträgermonitoring ... 127
4.1.5 Datenmanagement ... 139
4.1.6 Malschichtmonitoring ... 139
4.1.7 Korrosivitäts- und Luftqualitätsmonitoring ... 143
4.2 Ergebnisse der hygrothermischen Simulation und Klimaschrankversuche ... 145
4.2.1 Herstellung von Probekörpern ... 145
4.2.2 Baukonstruktives/bauphysikalisches Modell ... 146
4.2.3 Bestimmung Materialkenndaten ... 147
4.2.4 Hygrothermische Simulation mit *WUFI®* ... 147
4.2.5 Klimaschrankversuche an Probekörpern ... 152
4.3 Ergebnisse der weiteren Untersuchungen ... 153
4.3.1 Luftströmungsmessung ... 153
4.3.2 Luftwechselrate ... 154
4.3.3 Thermografie ... 154
4.3.4 Untersuchung der Raumschale ... 155
4.3.5 Schimmeluntersuchung und –monitoring ... 156
4.3.6 Stromverbrauch ... 160
4.4 Auffeuchtungsversuch ... 161
5 Diskussion der Ergebnisse ... 164
6 Lösungsansätze ... 172
6.1 Einhausungen, Klimavitrinen und Puffermaterialien ... 175
6.2 Bewertungsmatrix für (anthropogen) geschädigte Tafelbilder ... 180

6.3 Fallbeispiel Freising ... 185
6.3.1 Konservierungsziel ... 185
6.3.2 Vorüberlegungen zur Klimastabilisierung ... 187
6.3.3 Klimastabilisierung ... 189
6.3.4 Anwendung der Bewertungsmatrix für das Tafelbild Freising ... 191
7 Fazit und Ausblick ... 193
7.1 Ausblick Fallbeispiel ... 194
7.1.1 Konservierungskonzept ... 196
7.1.2 Empfehlung zum weiteren Vorgehen ... 204
8 Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit ... 206
8.1 Handlungsleitfaden ... 209
9 Mittel- und Zeitplanung ... 210
Dank ... 210
Literaturverzeichnis ... 213
Abbildungsverzeichnis ... 232
Tabellenverzeichnis ... 237
Anhang ... 238
Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte ... 238
Anhang B: Voruntersuchungen ... 238
Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring ... 238
Anhang D: Hygrothermische Simulation ... 238
Anhang E: Weitere Untersuchungen ... 238
Anhang F: Ergebnisse ... 238
Anhang G: Lösungsansätze ... 239
Anhang H: Publikation und Öffentlichkeitsarbeit ... 239
Anhang I: Material- und Geräteliste ... 239

Abkürzungsverzeichnis und Definitionen

Abkürzungen

ATP-Messung	**A**denosin**t**ri**p**hosphat-Messung
ATR-FTIR-Spektroskopie	**F**ourier-**T**ransformations-**I**nfra**r**ot-Spektroskopie in abgeschwächter Totalreflexion (engl. **A**ttentuated **T**otal **R**eflection)
CFK	**C**arbon**f**aserverstärker **K**unststoff
GC/MS-Analyse	**G**as**c**hromatographie gekoppelt mit **M**assen**s**pektro-metrie
HEPA-Filter	**H**igh **E**fficient **P**articulate **A**ir Filter
OF-T-Sensor	**O**ber**f**lächen**t**emperatursensor
REM-EDS-Analyse	**R**aster**e**lektronen**m**ikroskopie mit energie**d**ispersiver **R**öntgenspektro-skopie
r.F.	**r**elative Luft**f**euchtigkeit
RLU	**R**elative **L**ight **U**nit
ULPA-Filter	**U**ltra **L**ow **P**enetration **A**ir Filter
VOC	**V**olatile **O**rganic **C**ompounds
XRD-Messung	Röntgendiffraktrometrie (engl. **X**-**R**ay **D**iffraction)

Definitionen

Aktive Klimatisierung / Befeuchtung	Klimatisierung mittels verschiedener Geräte zur Befeuchtung oder integrierter Anlagetechniken
Passive Klimatisierung / Befeuchtung	Klimatisierung mittels feuchtesorptiver / hygroskopischer Puffermaterialien
Rückklimatisierung	Befeuchtung organischer Trägermaterialien nach einer Schädigung durch niedrige relative Luftfeuchtigkeit und folglich Schwinden der Substanz
Befeuchtung	Allgemeine Erhöhung der relativen Luftfeuchte
Auffeuchtung	Weitere Erhöhung der relativen Luftfeuchte mit dem Ziel eine Aus-dehnung der Tafel zu erreichen („Auffeuchtungsschritte“)
Monitoring	(Dauer) Beobachtung eines Systems (hier: Messtechnik)
	Restauratorische (Dauer) Beobachtung des Tafelbildes

Kurzfassung

Ziel des Projektes war es zu ermitteln, ob es möglich ist, das natürliche Quellen und Schwinden der hygroskopischen Materialien eines bereits geschädigten Holztafelbildes so zu beeinflussen, dass eine Stabilisierung der Materialien und ein langfristiger Erhalt möglich werden.

Um die Risiken, die durch die Änderung der Feuchtebedingungen am Tafelgemälde einhergehen, konkretisieren zu können und mehr über die feuchtetechnischen Eigenschaften des Tafelgemäldes in Erfahrung zu bringen, wurden für das Fallbeispiel kunsttechnologische Untersuchungen durchgeführt. Anhand des rekonstruierten Materialverbunds wurden die Materialkenndaten (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme) 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. Durch das begleitende Klima-, Holzträger- und Malschicht-Monitoring konnten die Ergebnisse direkt mit der Situation vor Ort verglichen werden.

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. Das Monitoring unterteilte sich in eine Überwachung des Raumklimas, des Holzträgers und der Malschicht.

Im Projekt konnte gezeigt werden, dass ein stabiles, am „historischen“[1] Mittelwert der relativen Feuchte angelehntes Umgebungsklima zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte im Tafelgemälde führt und dadurch weitere Schäden am Tafelgemälde verhindert werden. Die Auffeuchtung der Tafel bewirkte nicht ganz die erwartete Ausdehnung. Zwar kam es zu Rückformungen und Ausdehnungen, aber in erheblich geringerem Maße als erforderlich ist, um alle aufstehenden Schollen wieder niederlegen zu können. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Klima- und Bearbeitungshistorie eines Kunstwerkes besondere Bedeutung zukommt, wenn das Ausmaß plastischer, also irreversibler Verformungen abgeschätzt werden soll. Nichtsdestotrotz erwiesen sich die gewählten Mittel der Risikoabschätzung (Recherche, Versuche an Probekörpern, Hygrothermische Simulation, Monitoring des Originals) als probate Methoden. Sowohl im Klimaschrank als auch am Original zeigte sich, dass nach Auffeuchtungsschritten von 5 % im Mittel 14 Tage notwendig sind, um die Ausgleichsfeuchte zu erreichen. Die größten Verformungen ereignen sich hier in den ersten fünf Tagen. Daran lässt sich ableiten, dass aus konservatorischer Sicht insbesondere klimatische Änderungen, die sich über diesen Zeitraum ergeben, zu verhindern sind. Das konservatorische Monitoring und die Streifenlichtscans erwiesen sich als geeignete Methoden, um Veränderungen an der Malschicht

[1] Basierend auf den Raumklimamessungen in der Sakristei ab 2020.

zu dokumentieren. Im Rahmen des Projektes wurden ein Handlungsleitfaden für ähnliche Projekte sowie eine objektschonende Anbringung von Oberflächentemperatursensoren entwickelt.

1 Projektbeschreibung

Kunst- und Kulturgüter sind durch vielfältige Risiken gefährdet. Dabei stellen die klimatischen Voraussetzungen bzw. ungeeignete klimatische Bedingungen eine wesentliche Schadensursache dar. Hierbei sind sowohl das Außenklima als auch der Mensch selbst wesentliche Faktoren im Hinblick auf die Klimasituation. Nicht selten wird Kunst- und Kulturgut durch zu geringe Luftfeuchte geschädigt, die eine direkte Folge des Heizens oder des unkontrollierten Öffnens und Schließens von Fenstern ist. Daraus resultierende Schadensbilder sind beispielsweise bei hölzernen Bildträgern Schwundrisse in der Holzsubstanz und das Schüsseln von Holzbrettern. Malschichten werden in der Weise geschädigt, dass sich Bereiche sowohl im Malschichtverbund als auch vom Bildträger lösen und es in der Folge zu Malschichtlockerungen, (dachförmig) aufstehenden Malschichtschollen oder gar Verlusten von Malschicht kommt. Fatal ist, dass die Passgenauigkeit und damit die Verbindung von Malschicht und Holzbildträger durch den (starken) Volumenschwund des Holzes häufig verloren geht.

Das Projekt ist an das Förderthema 12 „*Bewahrung und Sicherung national wertvoller Kulturgüter vor schädlichen Umwelteinflüssen*“ der Deutschen Bundesstiftung Umwelt adressiert. Es steht im Kontext mit anthropogenen Emissionen in die Umwelt, welche zu massiven und unwiederbringlichen Schäden an national wertvollen Kunst- und Kulturgütern geführt haben und weiterhin führen werden. Es handelt es sich daher um die Entwicklung und modellhafte Anwendung neuer Methoden und Verfahren zum Schutz national wertvoller Kulturgüter. Das Projekt möchte modellhaft die Möglichkeiten der Auffeuchtung von durch niedrige, anthropogen bedingte Luftfeuchten stark geschädigten Kulturgütern praxisorientiert untersuchen. Hierfür wird exemplarisch an einem national wertvollen Holztafelgemälde in denkmalpflegerischem Umfeld eine in situ Auffeuchtung durchgeführt und messtechnisch begleitet.

Der Modellcharakter des Projekts ergibt sich durch das Fallbeispiel eines großformatigen Holztafelgemäldes[2], welches exemplarisch für eine große Anzahl von Kunstwerken aus dem Bereich des Kulturgüterschutzes steht, die durch ein ungeeignetes Raumklima bereits geschädigt wurden oder aktuell geschädigt werden. Dies betrifft nicht nur den Standort Kirchen und Sakristei, sondern auch Andachtsräume, Kapellen und Klöster. Zudem finden sich Kunstwerke in Profanbauten, wie z. B. Pfarr-, Rat- oder Privathäuser und Schlösser. Eine in situ Auffeuchtung und messtechnische Begleitung an einem Objekt dieser Größe, Güte und Datierung im denkmalpflegerischen Bereich ist bislang nicht bekannt.

[2] Gründonnerstagsretabel von Hans Mair von Landshut (15. Jh.) in der Domsakristei Freising, ca. 3 x 4 m.

Tafelgemälde sind komplexe Materialkombinationen, die in kontinuierlichen Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung stehen. Die nachfolgenden Lösungsstrategien beziehen sich auf das intensiv untersuchte Kunstwerk in der Sakristei im Freisinger Dom und seiner Anforderungen in Abhängigkeit zur Raumsituation, Objektgeschichte und Risikoabschätzung.

Die vorgestellten Stabilisierungskonzepte bedürfen in ihrer Ausführung eine umfangreiche Expertise sowie konservatorische, restauratorische und ggf. auch messtechnische Begleitung. Die nachfolgenden Lösungsstrategien können und sollen für ähnliche Objekte als Beispiele und Orientierungshilfe dienen. Es muss beachtet werden, dass keine der vorgestellten Techniken ein „Allheilmittel“ ist und die Hinzuziehung entsprechender Fachleute und Beteiligter der Genehmiungsprozesse in ähnlich gelagerten Fällen oder Projekten dringend empfohlen wird.

1.1 Hintergrund und Anlass

Das Klima in Kirchenräumen stellt ein komplexes System dar, das aus vielen Bestandteilen und deren Wechselwirkungen besteht. Neben dem Außenklima, dem Standort und den baulichen Gegebenheiten beeinflusst auch die Nutzung das Innenraumklima. Die besondere Problematik in Kirchen stellen u. a. Weyer (2019), Eckermann (2019) oder Kilian et al. (2019) zur Tagung „Klimazone Kirche“ dar.

Das EU-Projekt „*Climate for Culture*“ (2009 - 2014) erforschte die Auswirkungen des Klimawandels auf die Innenräume historischer Gebäude und ihrer Kunstsammlungen. Als Prognose wurde deutlich: heiße Sommer und Trockenphasen werden bis zum Ende des Jahrhunderts auch im Süden Deutschlands zunehmen.[3] Der sich in den letzten Jahren abzeichnende Trend zu höheren Temperaturen und trockener Luft, aber auch zunehmende extreme Wetterereignisse (Hitze, Dürre, Starkregen, Hochwasser) sind unter anderem auf die globale Erwärmung zurückzuführen. Seit Beginn der systematischen Wetteraufzeichnungen 1881 lagen neun der zehn wärmsten Jahre zwischen 2000 und 2019 (Stand 2019) und die Tendenz steigt weiter.[4]

Dabei erhöht sich nicht nur die Zahl der heißen Tage, mit Spitzenwerten von mindestens 30 °C, sondern auch die Vegetationsperioden werden durch die längeren Jahreszeiten[5] Frühling, Sommer und Herbst, verschoben. Zudem werden die Temperaturschwankungen immer größer und schwerer vorhersehbar.[6] Die Schäden, welche durch höhere Temperaturen und

[3] Leissner, J., Kaiser, Urban, Kilian, Ralf. (2014). Climate for Culture: Built Cultural Heritage in Times of Climate Change.
[4] Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV; Hrsg.). Homepage Umwelt Bundesamt zu „Weltweite Temperaturen und Extremwetterereignisse seit 2010“. URL: https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/weltweite-temperaturen-extremwetterereignisse-seit#Chronik [Stand September 2024].
[5] S. Homepage Umweltbundeamt;URL: https://www.umweltbundesamt.de/daten/umweltindikatoren/indikator-heisse-tage#wie-ist-die-entwicklung-zu-bewerten [Stand November 2024]. Der Frühling in Deutschland beginnt, im Vergleich zu 1991, 16 Tage eher. Gleichzeitig hat sich der Sommer verlängert und die Laubbäume im Herbst werfen ihre Blätter knapp 20 Tage später ab. Quelle: Greenpeace; URL: https://www.greenpeace.de/publikationen/ibisch_et_al_2021_der_wald_in_deutschland_auf_dem_weg_in_die_heisszeit_final.pdf [Stand 09.03.2021].
[6] Monitoringbericht 2023 des Umweltbundesamtes, URL: https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/monitoringbericht-2023; Deutscher Wetterdienst, URL: https://www.dwd.de/DE/klimaumwelt/klimawandel/klimawandel_node.html; Greenpeace, URL: https://www.greenpeace.de/publikationen/ibisch_et_al_2021_der_wald_in_deutschland_auf_dem_weg_in_die_heisszeit_final.pdf [Stand 21.11.2024].

den erhöhten Lichteinfall und die Bestrahlung der Ausstattungsstücke entstehen, sind Austrocknung, chemische und physikalische Änderung der Materialien, biologische Abbauprozesse, Ausbleichen, u. v. m.

Ein weiterer großer Einfluss geht unmittelbar vom Menschen aus. Durch das Öffnen und Schließen von Fenstern und vor allem durch das Einbringen von Heizenergie wird das Innenraumklima massiv beeinflusst. Die Erhöhung der Lufttemperatur führt zu einer Reduktion der relativen Luftfeuchte im Innenraum, welche als Immission einen direkten Einfluss auf das Kulturgut hat. Besonders die Schnittstelle zwischen Kulturgüterschutz und Nutzung führt im Arbeitsalltag zu Konflikten, denn die Idealbedingungen historischer Kirchenräume für ihre Ausstattungsstücke stehen häufig im Widerspruch zur heutigen, multifunktionalen Nutzung als Konzertraum, Arbeitsplatz, für Gottesdienste verschiedener Art und vieles mehr. Wird zu viel geheizt, um die Räume behaglich zu gestalten und ggf. den Arbeitsschutz zu erfüllen, können aufgrund der damit verbundenen zu niedrigen relativen Luftfeuchte (r.F.) Klimaverhältnisse entstehen, welche die Ausstattung irreversibel schädigen. Neben Schäden an der Fassung, vermehrten Schmutzablagerungen und Schimmel geben heutzutage auch Energie- und CO_2-Verbrauch zu denken. Erfolgt das Heizen unkontrolliert und in Zusammenhang mit regem Personenverkehr und/oder unsachgemäßer Lüftung verstärkt sich dieser Effekt. So werden in den letzten Jahrzehnten vermehrt Kulturgüter mit solchen klima- und nutzungsbedingten Schäden beobachtet, die einer sehr rasch fortschreitenden Verschlechterung unterliegen.

Die im Denkmal vorhandenen Kunst- und Kulturgüter aus hygroskopischen Materialien wie porösem Stein, Putz, Holz, Textil oder Papier und deren z. T. polychrome Oberflächen oder Beschichtungen unterliegen den klimatischen Schwankungen dabei besonders stark.

Temperatur (T) und relative Luftfeuchte (r.F.) stehen in direkter Korrelation zueinander und nehmen Einfluss auf sorptionsfähige Stoffe. Das materialabhängig unterschiedliche Quellen und Schwinden führt zu Spannungen und Schäden innerhalb der Werkstoffe, aber auch zwischen den einzelnen Schichten. Typische Schadensbilder sind Risse, Verformungen sowie Lockerungen, die bis zum Substanzverlust oder der vollständigen Zerstörung des Gefüges führen können.

Unter Restauratoren sind die Verfahren zum Nachvollziehen der Schadensursachen und die Möglichkeiten zum Einleiten passender Gegenmaßnahmen in der Theorie bekannt. Das Monitoring des Klimas mit modernen Messgeräten und -techniken ist häufig ein Teil der präventiven Konservierung und seit Jahren gängige Praxis. Dennoch fehlt zumeist die Verknüpfung der ermittelten Messdaten eines Monitorings mit den Gegebenheiten der Kulturgüter vor Ort, nicht zuletzt aufgrund fehlender Fallbeispiele, standardisierter Maßnahmenpakete oder Empfehlungen. Es werden zwar immer öfter Klimadaten erhoben, jedoch wird in der Baudenkmalpflege – im Gegensatz zum musealen Umfeld – bisher nur in Einzelfällen oder Großprojekten aktiv darauf reagiert. Erfolgreiche Beispiele für raumklimatische Untersuchungen und darauffolgende Klimastabilisierung durch gesteuerte Lüftung oder passive Anlagen wurden in

Schloss Rossewitz (2005)[7], der Celler Schlosskapelle[8] (2017 – 2019) , St. Georg auf der Reichenau[9] (2017) sowie der Schlosskapelle Augustusburg[10] (2019) durchgeführt. In der Denkmalpflege Bayerns sind sensorgesteuerte Lüftungstechnik oder Handlungsempfehlungen für die Nutzung (z. B. Heizen und Lüften) üblich.

Eine Verknüpfung einzelner Messgeräte zu einem bisher so noch nicht getesteten Gesamtkonzept, der umfassende interdisziplinäre Charakter der Problemstellung und das Ziel der konservatorisch und restauratorisch begleiteten Rückverformung sind äußerst anspruchsvoll und ohne entsprechende Vorkenntnisse nicht möglich. Das irreversible Schadenspotenzial für die Kunst- und Kulturgüter bei falscher Handhabung ist enorm hoch. Auch der hohe Personalaufwand und die Kosten, die mit den nötigen Voruntersuchungen und der Entwicklung eines individuellen und geeigneten Messsystems einhergehen, sind für die Eigentümer und Restauratorinnen/Restauratoren in der freien Wirtschaft nicht leistbar. Dort werden zumeist die akuten Probleme behandelt, selten können jedoch die Ursachen quantitativ belegt und größere Zusammenhänge bzw. Schadensmechanismen verändert werden.

Somit ist an dieser Stelle eine Grenze in der denkmalpflegerischen Praxis gesetzt, die eine in situ Klimatisierung bzw. Befeuchtung für zu trockene Kirchenräume und deren Ausstattungsstücke hemmt. Die bereits geschädigten Kulturgüter können folglich nicht den Anforderungen entsprechend nachhaltig konserviert werden. Es entstehen weitere Schäden, Verluste der Originalsubstanz und ein nicht endender Bedarf an wiederholten Eingriffen und kostspieligen Restaurierungsmaßnahmen. Im Laufe der Beratungstätigkeit wurde das BLfD auf zahlreiche Fallbeispiele aufmerksam, welche die oben genannten Schadensursachen und -Phänomene aufweisen, u. a:

- Holztafelbild in der Domsakristei, Freising
- Ausstattung in der Kirche St. Salvator und Sebastian, München
- Skulpturen der Andachtskapelle der Mönche, Benediktinerabtei Kloster Ottobeuren
- die Altäre in der Kirche Fraunwörth, Kloster Frauenchiemsee
- der Hochaltar der ehem. Klosterkirche St. Klara (St. Magnus), Regensburg

[7] DBU-Projekt [14964/01]: Modellhafte Entwicklung von Schutzkonzepten und passiven Anlagen zum Raumklimaausgleich am Beispiel der national wertvollen umweltgeschädigten Wandmalereien in Schloss Rossewitz. Schlüter (2005).
[8] DBU Projekt [AZ 33881/01]: Anhand von bauphysikalischen und restauratorischen Untersuchungen wurde eine Anlage entwickelt, die zur automatischen Be- und Entlüftung sowie zur Entfeuchtung dient. Im Gegensatz zu dem in diesem Bericht vorgestellten Projekt war die Schlosskapelle – aufgrund einer Übernutzung durch starken Besucherverkehr seit 1960 – unbeheizt, deutlich zu feucht und z. T. mikrobiell belastet. Anhand von Strömungssimulationen und 3D Modellen konnten sensorgesteuerte Luftentfeuchter installiert werden, die eine teilweise touristische, kirchliche und denkmalverträgliche Nutzung wieder ermöglichen. DBU Abschlussbericht Achhammer et al. (2021).
[9] Dörthe, Jakobs, Garrecht, Harald (Hrsg.). (2017). UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau. Die Wandmalereien in der Kirche St. Georg. Interdisziplinarität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Denkmalpflege, Tagungsband des DBU-Abschlusskolloquiums 22.– 24. März 2017, Fraunhofer IRB Verlag.
[10] Eisbein, M. konnte die Schwankung der r.F. (24,8 – 99,9 %) und Kulturgutschäden (Malschicht und Fassungsschäden aufgrund von Trockenheit) in der Kapelle auf die speziellen meteorologischen Verhältnisse (umwindeter Standort), globalen Temperaturanstieg sowie die nutzungsbedingte Durchwärmung und Austrocknung zurückführen. Zur Stabilisierung des Klimas entschloss man sich schließlich für zurückhaltende bauklimatische Änderungen sowie eine holzkonservatorische Maßnahme (Verstärkung der Holztafel mit Balsaholz sowie Entwicklung einer Jalousie mit drehbaren Lamellen zur Pufferung des Klimas an der Tafelrückseite) am geschädigten Cranach-Altar. Auch hier wird zwar das Klima kontrolliert, die Trägersubstanz jedoch nicht wie im vorliegenden Projekt aktiv befeuchtet oder verändert. Aus: Weyer & Birkenbeul, 2019.

Allen genannten Beispielen gemein sind die klimatischen Bedingungen, mit wiederholten Trockenperioden bzw. zyklischen Feuchteschwankungen, die zu einer Schädigung der darin befindlichen Ausstattung führen. Durch den akuten Handlungsbedarf zu ihrem Schutz und den Mangel an Lösungsstrategien ist das vorliegende, praxisorientierte Projekt essentiell. Ein Fallbeispiel bietet die Möglichkeit entsprechende systematische Untersuchungen und Messungen durchzuführen und die allgemeine Raum- und Schadenssituation zu analysieren und dokumentieren, um diese anschließend gezielt zu beeinflussen. Die im Projekt gewonnenen Erkenntnisse werden in einem Handlungsleitfaden (s. 8.1) zusammengefasst, um sie auf die Vielzahl von national und international wertvollen Kulturgütern, die auf diese Weise geschädigt wurden und werden, transferierbar zu machen. Als exemplarisches Modellobjekt wird ein großformatiges Tafelbild (300 x 280 x 2 cm) in der Domsakristei Freising ausgewählt.

Das Kunstwerk besteht aus mehreren Holzbrettern, die sich aufgrund einer Austrocknung, insbesondere durch klimatische Veränderungen in den letzten Jahren, stark zusammengezogen haben. Hinweise darauf bieten ein Spalt zur umgebenden Einrahmung sowie rückseitig leicht geöffnete Brettfugen und Veränderungen der Malschicht. Letztere konnte dem Schwinden des Trägers nicht folgen, wodurch große, dachförmige Malschichtabhebungen, jeweils von bis zu 10 cm² Fläche und Verluste entstanden sind. Weitere großflächig gelockerte Bereiche werden bei unverändert fortlaufenden Schadensmechanismen ebenfalls zu einer dachförmig aufgeschobenen bzw. auch komplett abgelösten Malschicht führen. Weiterhin lässt sich beobachten, dass die Tafel aus dem umgebenden Zierrahmen gerutscht ist und sich dort z. T. konvex verformt hat. Für eine Konservierung müsste der Holzträger daher zuerst klimatisch konditioniert und aufgefeuchtet werden, damit er sich ausdehnen kann, um genug Platz für die Malschicht zu schaffen. Details und Abbildungen unter Abschnitt 2.

1.2 Projektziele

Im Falle einer (anthropogenen) Schädigung durch zu geringe relative Luftfeuchte sowie materialspezifische Sekundärfolgen sollen im Projekt die spezifischen Risiken einer Auffeuchtung herausgestellt werden. Im Vordergrund stehen dabei die klimatischen und konservatorischen Herausforderungen. Für eine nachhaltige Koservierungs- und Erhaltungsstrategie stellt sich daher die zentrale Forschungsfrage:

> *Ist es möglich, das natürliche Quellen und Schwinden der hygroskopischen Materialien eines – aufgrund anthropogener Klimaeinflüsse – bedrohten oder bereits geschädigten Holztafelbildes so zu beeinflussen, dass eine Stabilisierung der Materialien und deren langfristiger Erhalt möglich sind?*

Die Risiken einer Auffeuchtung, das hygroskopische Materialverhalten, Art, Intensität, Dauer und Folgen der klimatischen Schwankungen auf das sensible Materialgefüge eines Holztafelbildes sowie konservatorische Ziele stehen dabei im Vordergrund. Die Ermittlung eines verträglichen Klimakorridors und schadensfrei mögliche Abweichungen davon, sollen anhand einer umfassenden Grundlagen- und Risikoermittlung festgelegt werden.

Vor diesem Hintergrund sollten im Projekt auch folgende Fragen beantwortet werden:

- Wenn ja, wie, in welchem Umfang und wie schnell kann eine solche Beeinflussung von statten gehen?
- Welche Möglichkeiten, Grenzen und Gefahren bietet das Eingreifen in die Umgebungsbedingungen?
- Welche Parameter (z. B.: Oberflächen- und Raumtemperatur, Luft- und Materialfeuchten) spielen eine Rolle? Wie werden sie gewichtet?
- Wie (schnell) reagieren die unterschiedlichen Materialien (Holz, Textil, Klebstoffe und Bindemittel, Malschicht) im Verbund eines Holztafelbildes auf Veränderungen und unterschiedliche Raumluftbedingungen?
- Bewahrheitet sich die Hypothese, dass bei gealtertem Holz „*Ermüdungserscheinungen*“ bestehen, sodass zum heutigen Zeitpunkt keine Quellung mehr möglich ist?
- Wie kann die konkrete Auffeuchtung erfolgen?
- Wann entsteht ein Risiko für Schimmelbildung am Kulturgut oder der Einhausung?
- Wie lange dauert es, bis sich das Tafelbild auf die gewünschte Größe ausgedehnt hat?
- Wie kann ein stabiler Zustand der Materialen nachhaltig ermöglicht werden, ohne energie- und kostenintensive Klimavitrinen zu benötigen, welche die Umwelt weiter belasten?

1.3 Projektentwicklung

Insbesondere das denkmalpflegerische Umfeld birgt komplex Herausforderungen. Museale Klimawerte sind oft nicht einzuhalten; technische, finanzielle und personelle Möglichkeiten sind begrenzt und die herrschenden Umgebungsbedingungen nicht kontinuierlich. Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurden die Grundlagen der Klimasensibilität am Beispiel eines mittelalterlichen Tafelgemäldes (Fallbeispiel) nachgewiesen, um daran geeignete Befeuchtungsstrategien abzuleiten. Dies sollte die konservatorische und restauratorische Bearbeitung derart geschädigter Kunstwerke wieder ermöglichen sowie weitere Verluste und Schäden in Zukunft minimieren. Aufbauend auf umfangreichen Voruntersuchungen sollte in diesem Modellprojekt die in situ Auffeuchtung für Kulturgüter, im denkmalpflegerischen Kontext anthropogener Immissionen – anhand eines Fallbeispiels – untersucht werden. Dabei war es wünschenswert für die Zukunft energie- und kosteneffiziente Lösungsansätze umzusetzen und nicht durch Geräte mit hohem energetischem Aufwand negativ auf die Umwelt einzuwirken.

1.3.1 Struktur des Vorhabens und Teilprojekte

Dem Vorhaben wurde folgende organisatorische Struktur zugrunde gelegt:

1.3.1.1 Kernteam und Projektteam

Das Projekt wurde durchgehend von Fachleuten der verschiedenen Disziplinen, der genannten Institutionen und Hochschulen, begleitet und durchgeführt. Der konservatorisch-restauratorische Anteil setzte sich aus einer restauratorischen Projektstelle, in Zusammenarbeit mit Mitarbeitenden des Bayerischen Landesamt für Denkmalpflege (BLfD, Ref. Restaurierung)

sowie der Professur für Restaurierungswissenschaft des Kompetenzzentrums für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Uni Bamberg zusammen. Das genannte Teilgebiet am BLfD umfasste neben der Projektsteuerung, allgemeiner Planung, Öffentlichkeitsarbeit, Koordination und Durchführung von Aufgaben v. a. die Grundlagen-/Archivalienrecherche, konservatorischen (Notsicherungs-)Maßnahmen, Material- und Maltechnikanalysen, Monitoring und Klimaschrankversuche. Letztere wurde in Zusammenarbeit mit dem KDWT durchgeführt, welches weiterhin das Monitoring der Malschicht über opto-technische Verfahren ausführte und sich inhaltlich maßgeblich beteiligte. Die holztechnische Begleitung, Entwicklung des Messsystems sowie der Be- und Auffeuchtungsmethode sowie Auswertung davon erfolgte durch den Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion, der TU München (TUM). Diese wurde vom Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) zusätzlich bei Themen wie Klimatisierung, Luftströmung/ -wechselrate und Messkonzept unterstützt. Lindner Design unterstützte die TUM im Datenmanagement, -bereitstellung und -speicherung. Die Überwachung sowie Einschätzung der Luftqualität in der Einhausung, mittels iAIR-Sensor, übernahm CARE FOR ART (CFA). Die Durchführung und Bewertung der Klimasimulation *WUFI®* erfolgte im Unterauftrag durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik (IBP).

Die einzelnen Arbeitspakete und Schritte wurden maßgeblich vom Kernteam geplant und ausgeführt. Dieses setzte sich aus den jeweiligen Projektstellen (BLfD, KDWT, TUM) sowie der Projektleitung zusammen und traf sich ca. alle zwei Wochen bzw. ergänzend nach Bedarf. Alle Treffen wurden protokolliert.

Einmal pro Quartal sowie zu größeren Anlässen wurde der aktuelle Stand sowie das weitere Vorgehen innerhalb des Projektteams vorgestellt, abgesprochen und interdisziplinär diskutiert, um eine gemeinsame Beurteilung und Interpretation der Ergebnisse für das weitere Vorgehen zu erarbeiten. Halbjährliche Zwischenberichte erhielt die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) sowie in gekürzter Form der projektbegleitende Ausschuss.

1.3.1.2 Fachbeirat „Projektbegleitender Ausschuss“, Kick-off und Expertenrunde

Gemäß den Bewilligungsauflagen, erlassen durch das Kuratorium der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), wurde ein Fachbeirat (sog. „*projektbegleitender Ausschuss*“) gegründet. Der Ausschuss bestand aus allen im Genehmigungsverfahren des Fallbeispiels beteiligten Personen, d. h.: Eigentümer (Domrektor und Domkirchenstiftung Freising), Gebietsreferat des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Diözese München Freising, Hauptabteilung Kunst, Untere Denkmalschutzbehörde Freising und der Kreisheimatpfleger und wiss. Referent für Malerei und Skulptur vor 1550 am Bayerischen Nationalmuseum (s. Auflistung Bericht S. 3).

Darüber hinaus gab es Expertenrunden, wie z. B. Kick-off-Treffen (KO, 22.07.22), Expertentreffen (ER, 14.03.23), VDR-Exkursion (27.01.24), diverse Vorträge an Tagungen vor nationalem und internationalem Publikum (s. Projektkennblatt DBU) sowie eine Abschlussveranstaltung (14.-15.03.2024). Dort wurden die drängenden Fragen, Herausforderungen und ersten Ergebnisse im Projektverlauf diskutiert und kritisch beleuchtet.

Folgende Fachleute waren dankenswerterweise an den jeweiligen Veranstaltungen beteiligt:

- KO: Rest. Gabi Landskron [Restaurierungswerkstatt Landskron, Restauratorin]
- KO: Rest. Andreas Landskron [Restaurierungswerkstatt Landskron, Restauratorin]
- KO: Dipl.-Rest. Georg Prast [Kunsthistorisches Museum Wien, Restaurator]
- KO: Rest. Barbara Staudacher [Münchner Werkstätten, Restauratorin]
- ER: Prof. Dr. Klaus Dreiner [HNE Eberswalde, Professur für Holzbe- und verarbeitung]
- ER: Dipl.-Rest. Manfried Eisbein [Landesamt Sachsen und IDK]
- ER: Dipl. Rest. (FH) Christoph Fiebiger [NLD, Referats- und Werkstattleiter]
- ER: Constanze Fuhrmann [Referatsleiterin DBU, FR. Umwelt und Kulturgüterschutz]
- ER: Hon.-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer [NLD, ehem. Abteilungsleiter]
- ER: Dr. Nanke Schellmann [Schellmann Conservation, Restauratorin]

1.3.1.3 Projekt- und Abschlussarbeiten

Im Zuge von z. B. Master-/Projektarbeiten wurden einzelne Fragestellungen ausgelagert:

- Osman Kocan, Masterarbeit, TUM [11/2023-05/2024, Experimentelle Untersuchung ressourcenschonender in-situ Befeuchtungsmethoden für historische Holztafelgemälde]
- Dennis Kerscher, Bachelorarbeit, TUM [04-09/2023, Erarbeitung von klimatischen Systemen zum Erhalt von Holzkulturgütern]
- Jordan Tierney, Studentische Arbeit, MIT [08/2023, Austauschprogramm TUM PREP]
- Yuxin Jiang, Studentische Arbeit, New York University Abu DhabJai [08/2022, Austauschprogramm TUM PREP]
- Natalie Koserog, Masterarbeit, KDWT [09/2023- 05/2024, Bewertung der Auswirkungen von Temperatur- und Feuchteveränderungen auf gefasste Holzoberflächen anhand von Klimaschrankversuchen]
- Johanna Gerling, Semesterpraktikantin, BLfD [August 2023, Bestimmung Wergproben]

1.4 Arbeitsplan

Die Projektlaufzeit von Januar 2022 bis August 2024 umfasste vier Arbeitspakete:

Vorarbeiten: Evaluierung der Restaurierungs- und Objektgeschichte (Archiv BLfD), Voruntersuchungen, Staubschutz und erste Notmaßnahmen (Erfassung des Raumklimas Messung der Holzfeuchte[11]; Dokumentation des restauratorischen Zustandes; Beginn 3D-Streifenlichtscans des KDWT; Vorzustandsaufnahmen; Anforderungskatalog und Bau Einhausung/Klimabox, Notsicherungen) (2021 bis Projektstart 01/2022); Kolloquium (07/2021).

AP 1: Mess- und Monitoringkonzept: Anbringung minimal-invasiver Messsysteme für Raum- und Mikroklima, VOC's, Holzträger und Malschicht, inklusive Steuerungsmodulen zur Be-/Auffeuchtung. Es werden zudem bildgebende Verfahren, u. a. fotografisches Langzeitmonitoring, Aufnahmen mit dem 3D-Streifenlichtscanner und Zeitrafferaufnahmen durchgeführt. (Aufbau: Juli 2022 bis Mai 2023; Monitoring über den Projektverlauf und darüber hinaus).

AP 2: Materialanalysen, hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche: Aufbauend auf analytischen Materialbestimmungen (Herbst 2022 / Frühjahr 2023) → Planung und Erstellung von Probekörpern für hygrothermische Simulation, Klimaschrankversuche und Referenzproben in der Einhausung (Dezember 2022 – Mai 2023); Bauphysikalisches Modell; Durchführung Simulationen und Klimaschrankversuche (2023).

AP 3: Aktive Klimatisierung am Beispiel des Tafelbildes in Freising: Gemäß Risikoabschätzung aus AP 1-2 Be-/Auffeuchtung der Raumluft zur Ausdehnung des Tafelbildes und Überprüfung der Reaktionen am Fallbeispiel sowie kontinuierliches Monitoring aus AP1. (Aufgrund jährlicher Beheizung Oktober - April: Notwendigkeit eines Klimakorridors seit 2022).

AP 4: Entwicklung eines Handlungsleitfadens, Vermittlung und Publikation: Auswertung, Diskussion und Interpretation aller Daten und Arbeitsproben (März 2024 – August 2024); Entwicklung einer Handlungsempfehlung (Dezember 2023 – Mai 2024); Entwicklung eines reduzierten Messsystems für die Nachprojektzeit (Langzeitmonitoring; April – Juni 2024); Diskussion nachhaltiger Bedingungen für die Konservierung/Restaurierung und Erhaltung anthropogen geschädigter Kunstwerke (hier: Fallbeispiel; Mai – Juni 2024); Abschlussbericht (Mai – November 2024) und Vorbereitung der Publikation (Juli – Oktober 2024).

[11] Firma Testo 606-2 Messgerät für Mateialfeuchte- / Temperatur- / Luftfeuchte.

2 Grundlagenermittlung

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 erforderlich, die sowohl den Bestand als auch dessen Zustand erfasst. S. beispielhafter Ablauf einer Projektplanung (Müller & Brandt, 2022).

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:

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

2.1 Literaturbasierte Risikoermittlung zur Auffeuchtung

Ein bemaltes Holztafelgemälde ist ein komplexes System. Die unterschiedlichen Materialien (z. B. Holz, Textil, Klebstoffe und Bindemittel, Malschicht) reagieren im Verbund unterschiedlich schnell und stark auf klimatische Veränderungen. Schon den frühen Tafelmachern war bekannt, dass Holztafelbilder Formänderungen unterworfen sind (s. Reclam, 1997; Straub, 1963). So wurden bereits im Herstellungsprozess Qualitätsmerkmale beachtet oder stabilisierende und stützende Konstruktionselemente angewandt, um eine Verformung zu verhindern. Herstellung, Querleisten, Stabilisierung und Beschichtungen, Rahmung s. Eibner, 1928; Straub, 1968; Reclam, 1984; Nicolaus, 2003; Taube, 2005. Das Verlangen der Begradigung verwölbter Tafeln und die Vermeidung von Deformationen hat sich über die Zeit erhalten (vgl. Nicolaus, 1989, Zillich, 1991). Ursächlich dafür sind u. a. die ästhetische Beeinträchtigung einer Verformung und die Gefährdung der Lesbarkeit sowie Malschichtverluste. Zillich (1991) beschreibt die Verformung und Begradigung von Holz und dessen Eigenschaften ausführlich in ihrer Diplomarbeit. Ein DFG-Projekt „*Strukturelle und technologische Untersuchungen an verwölbten und verformten Tafelbildern und deren Begradigung*“ (Dreiner et al., 1994) blieb unveröffentlicht. Dort wurden u. a. bereits Oberflächentopografien von Holztafelbildern mittels CCD-Kamera und Antriebsmotor systematisch erfasst.

Auf internationaler Ebene wurde der Bedarf an Konservierungsstrategien für Holztafelgemälde von der Getty Foundation, dem Getty Conservation Institute und dem J. Paul Getty Museums im Projekt „*Panel Painting Initiative*“ aufgegriffen. Veröffentlichungen erfolgten nach dem 1. Symposium „*The Structural Conservation of Panel Paintings*“, das sich mit einer

Vielzahl von Themen, darunter Holzwissenschaft und -technologie, Geschichte der Plattenherstellung, Tafelrestaurierung sowie aktuellen Ansätzen zur Konservierung befasste (The J. Paul Getty Trust, 1998). Das 2. Symposium „*Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, an Training*“ (J. Paul Getty Trust, 2011) thematisierte die jüngsten Entwicklungen in der Forschung und Konservierung von Tafelbildern, die von spezifischen Behandlungskonzepten bis zu artverwandten Ausstellungsfragen reichten.

Die Fachtagung des VDR zur „*Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*“ 2015 in Dresden präsentierte den Forschungsstand der geschichtlichen Entwicklung, der Erhaltung aus Deutschland, Österreich, der Schweiz und Luxemburg (s. Verband der Restauratoren, 2019). Der geschichtliche Abriss zeigte erneut, dass aufwendige restauratorische Eingriffe keine Seltenheit waren. So z. B. Format- und Konstruktionsänderungen, Stabilisierungsmaßnahmen wie das Aufleimen von Querleisten, Rückseitenanstriche, Behandlungen mit Lösemitteln oder Dünnungen des Trägers sowie Schädlingsbekämpfung und Stützsysteme (Parkettierung). Letztere wurden bis ins späte 19. Jh. vielerorts durchgeführt und erwiesen sich im weiteren Verlauf zumeist als kontraproduktiv für den (geraden) Erhalt.

Darüber hinaus fasst die Research Agenda „The Conservation of panel paintings and related objects” 2014 – 2020 (NWO, 2014) den aktuelleren Wissensstand im internationalen Raum zusammen. Ferner gibt es zahlreiche einzelne Artikel und Studien, die sich mit den verschiedenen Einflussfaktoren einer Befeuchtung zur Ausdehnung befassen. Diese werden im folgenden Überblick dargestellt.

(Hygro)Thermische Eigenschaften von Holz

Im Projekt soll ein Tafelgemälde für seine Konservierbarkeit über Befeuchtung ausgedehnt werden. Da das Holz in Tafelbildern üblicherweise mit Abstand den größten Massen- und Volumenanteil hat, dominieren dessen Reaktionen. Diese sind hinreichend erforscht; s. Holl (2016), Niemz & Sonderegger (2021b) oder Engelund Thybring & Frederiksson (2023). Holz quillt und schwindet je nach Schnittrichtung unterschiedlich stark. Faserparallel ist das Schwindmaß (% Längenänderung je % Holzfeuchteänderung) sehr gering. Radial beträgt das Schwindmaß von z. B. Fichte[12] etwa 0,16 und tangential etwa 0,32 % (Niemz & Sonderegger, 2021b). Je nach Provenienz gibt es aber auch Abweichungen innerhalb einer Art. Laut Bratasz et al. (2012a) liegen im Holz gebundenes Wasser (an der Oberfläche und in den Zellwänden) sowie Lumenwasser (in den Kapillaren der Holzmikrostruktur) vor. Sinkt die r.F., entleeren sich zuerst die Kapillaren, bis der (Faser-)Sättigungspunkt erreicht ist. Unter 60 % r.F. ist dieser Verlust des flüssigen Wassers vollständig; ab hier bestimmt das Verhältnis von Holzfeuchte zu Klima die hygroskopischen Eigenschaften des Materials. Je nach Temperatur und r.F. erreicht Holz ein bestimmtes Niveau, das als Gleichgewichtsfeuchte bekannt ist. Anhand der Typ-II-Isotherme der IUPAC 1985-Klassifikation (gemäß Sing et al., 1985) beschreiben Bratasz et al. (2012a) die Beziehungen zwischen der Menge des gebundenen Wassers in den Zellwänden und der relativen Luftfeuchtigkeit; auch bekannt als Sorptionskurven. Weiterhin wurde die „Drei-Parameter-Sorptionsgleichung“ von Guggenheim-Andersen-de Boer

[12] Maßgebliche Holzart des Fallbeispiels im Modellprojekt.

(GAB) verwendet, um die Physisorption von Wasser auf Holz zu interpretieren. Die Reaktion wird dabei als prozentuale Gewichtszunahme (cm^3/g) ausgedrückt. Die Adsorption [V_m] von z. B. Fichte[13] beträgt demnach 0.068 cm^3/g; die Desorption 0.080 cm^3/g.

Der Feuchtigkeitstransport innerhalb des Holzes sowie Austausch mit seiner Umgebung beginnt bei einseitig bemalten Holztafelbildern an der oft unbehandelten Rückseite oder den Querschnitten. In Abhängigkeit zum Umgebungsklima variiert die Geschwindigkeit. Die schnellere Adsorption (Feuchteaufnahme) als Desorption (Feuchteabgabe) beschreibt auch Holl (2016). Eine Bestimmung der Quellung und Schwindung ist in DIN 52184:1979-5 (1979) sowie DIN 1052:2008 (2004) für Vollholz bereitgestellt. Buck (1998) erläuterte die Gefahr, dass nach einer rückseitigen Schrumpfung und erneuten Befeuchtung eines Holztafelbildes (je nach Dicke und aufgrund des vorderseitigen Schutzes durch Malschicht) ein spannungsreicher, trockenerer Kern durch unterschiedliche Feuchtegradienten möglich ist. NWO (2014) nennen Versuche zum diffusen Wasserdampfdurchfluss durch Fichtenproben mit 16 verschiedenen Beschichtungskombinationen von Allegretti et al. (2008). Bei der Nachbildung verschiedener Farbfilme war die Barriere-Wirkung von Tempera auf Kreidegrund im Vergleich zu Ölfarbe, Vergoldung und Lack gering. Eine Verlangsamung der Diffusion bei niedrigen Temperaturen wird angenommen (s. Lukomski, 2010 und 2011). Bylund Melin (2012) beschreibt, dass das Gefälle der r.F und Temperatur von der Vorder- zur Rückseite einer Holztafel in einem entfeuchteten Raum stärker ausgeprägt ist. Simulationen von Duivenvoorden et al. (2023) deuten darauf hin, dass eine höhere r.F. hinter einer bemalten Leinwand zu einer höheren Wasserkonzentration in der unteren Farbschicht führt; dies könnte auch für Holztafelbilder der Fall sein. Die genauen Schadprozesse langfristiger und zyklischer Diffusion auf das Materialgefüge sind bisher nicht genauer erforscht und sollten präventiv bedacht werden.

Neben der Feuchtigkeit hat auch die Umgebungstemperatur einen, wenn auch geringeren, Einfluss auf die Bewegung von Tafelgemälden. Legrum (1992) beschreibt zwei Prozesse, wie Oberflächen von Tafelgemälden auf eine Temperaturerhöhung reagieren. Während in der oberflächennahen Zone ein Schwinden durch Austrocknung erfolgt, gibt es gleichzeitig eine thermische Ausdehnung durch die Wärmezufuhr. Bei kurzer Erwärmung spielt sich dies vorwiegend in der Malschicht und im Kreidegrund ab, da Holz eine schlechte Leitfähigkeit besitzt. Fuesers et al. (2005) verdeutlichen, dass sich das Klima unterschiedlich und zeitverschoben auf die Holzbewegung auswirkt. Während sich das Holz bei Temperaturanstieg ausdehnt, schwindet es gleichzeitig aufgrund der Feuchteabgabe. In den Versuchen dominieren die Temperaturschwankungen den Einfluss der Schwankungen der r.F. Von Bedeutung ist laut den Verfassenden nicht nur die Klimaschwankung, sondern auch, ob sie sich in feuchter oder trockener Umgebung abspielt.

Mecklenburg et al. (1994) untersuchten die Reaktionen von bemaltem Holz unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Materialeigenschaften (Holz, Grundierung, Malerei und Überzüge). Die Ergebnisse zeigten, dass Kunstwerke aus feuchter Umgebung häufig Schäden in

[13] Maßgebliche Holzart des Fallbeispiels im Modellprojekt.

einem kontrollierten Museumklima erleiden und dass es auch bei gleicher Holzart große Unterschiede im mechanischen Verhalten (z. B. Steifigkeit, Festigkeit) gibt, dies jedoch nicht unbedingt einen Einfluss auf die Streckgrenze und plastische Verformung hat. Unbeheizte, kalte Kirchen werden – z. T. trotz hoher Feuchtigkeit – als weniger geschädigt empfunden, was auch Brunskog (2012) und Holl (2013) zeigen.

Wadum (1998b) verweist auf Experimenten mit Buche (Hartholz) und Kiefer (Weichholz), wonach Hartholz eine etwas höhere Feuchtigkeitsänderungsrate und dementsprechend größere Änderungen als Weichholz aufweist. Je höher die Temperatur, desto schneller ist die Rate des Feuchtigkeitsaustausches. Letztere ist ebenfalls schneller, je höher die relative Luftfeuchtigkeit ist. Die klimatischen Schwankungen ändern zudem die Steifigkeit bzw. Festigkeit der Malmaterialien auf den historischen Holztafeln.

Auch die Dicke der Tafel hat laut Wadum (1998b) einen großen Einfluss auf die zu erwartende Reaktion. In der, dem unveröffentlichten DFG-Projekt (Dreiner et al. 1994) zugehörigen Diplomarbeit beschreibt Hartl (1996), dass dünne Tafeln schneller und mit großen – temporären – Verwölbungen auf kurzfristige Schwankungen reagieren. Dabei ist insbesondere die Malschicht gefährdet. Laut Buck (1998) sind kurzfristige Schwankungen ferner schädlicher für Holztafeln. In dicken Tafeln hingegen entwickeln sich Spannungen durch Feuchtegradienten, die zu höheren, plastischen und damit irreversiblen Verformungen führen. Der langsame Aufbau einer solchen Verformung sei für die Malerei weniger schädigend.

Bratasz et al. (2007a) zeigten in einer Rissmonitoringstudie an den Skulpturen eines Altares in Santa Maria Magdalena, dass (tägliche) Kurzzeitschwankungen, aufgrund der niedrigeren Feuchtigkeitsgradienten, schädigender als ähnliche (saisonale) Langzeitschwankungen sind. Größere, dickere Hölzer reagieren dabei langsamer, durch den größeren Dimensionsfluss der äußeren Holzschichten mit größeren Spannungen. Auch externe Zwänge (z. B. Rahmung, Gratleisten, Hängung, etc.) sind als Risiken zu berücksichtigen (s. a. NWO, 2014, ab S. 32). Neben der Amplitude und Rate der Klimaänderung spielen dann auch Zustand, Beschichtungen, Maße und ggf. Gewicht des Kulturguts sowie Grad der Vorschädigung eine maßgebliche Rolle. Bei einem Tafelbild von wenigen Zentimetern Dicke finden kleinste Verformungen bereits in weniger als einer Stunde statt. Eine neue Gleichgewichtsfeuchte wird in der Regel nach ein bis zwei Wochen erreicht. Schmidt (2017a und b) begleitete das Monitoring des Tucheraltares (Kath. Pfarrkirche zu Unserer Lieben Frau, Nürnberg, BY) und installierte Rissmessungssensoren (Dehnungsmessstreifen) zur Überwachung der Stabilisierung der Rückseite und Modifizierung der Konstruktion mittels Schrauben. Eine Bewegung (Öffnen und Schließen der Fugen) in zeitversetzter Abähngigkeit zur Feuchtigkeit (ca. 6-8 h) wurde ermittelt. Insebsondere r.F. < 60 % führten zur Vergrößerung der Risse. Das Monitoring wird fortgeführt und mittlerweile auch digital erfasst. Dionisi Vici et al. (2006) ermittelten die hygrometrischen Reaktionszeiten zum Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte mit ca. drei bis sechs Monaten (asymmetrische Tafelbilder brauchten länger). Dabei zeigten symmetrische Tafeln schnellere Reaktionen und langsamere Verformungen; asymmetrische eine schnellere Reaktion und starke Verformungen. Spitzenwerte wurden nach ca. zwei Wochen erreicht, welche dann über weitere drei Monate abklangen. Holl (2016) zeigte, dass die höchste

Gewichtszu- oder abnahme bei Änderung des Ausgangsklimas insbesondere zu Beginn (innerhalb der ersten Stunden) auftritt. Laut ihr stellt eine abrupte Änderung der Umgebungsfeuchte deshalb eine stärkere Belastung dar als eine langsame. Je höher die Amplitude dabei ist, desto stärker fällt die Reaktion aus. Große Gefahr geht von einer plötzlichen Änderung, z. B. bei zu schneller Austrocknung, aus. So zeigen Kunstwerke aus feuchter Umgebung im kontrollierten Museumsklima häufig Schäden (Mecklenburg et al., 1994). Bratasz et al. (2007a) definieren beispielsweise ± 15 % als verträgliche Schwankung der r.F. Bujok et al. (2024) stellten fest, dass die Amplitude der Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit entscheidender ist, als die Geschwindigkeit dieser Änderung.

Bratasz et al. (2008) publizierten Sorptions- und Desorptions-Isothermen (inkl. zu erwartenden Dimensionsänderungen in radialer und tangentialer Richtung) für 21 Holzarten historischer Objekte. Auch das Verhältnis der Oberfläche zum Volumen und der Faserschnitt spielen dabei eine wichtige Rolle. New et al. (2011) beobachteten Längsverformungen bei einer Längsbeschränkung, z. B. bei Parkettierungen. Auch konvexe Krümmungen quer zur Faser wurden in nicht-parkettierten Tafelbildern beobachtet. Druckverformungen (bei einseitig bemalten Tafelbildern) entstehen durch die asymmetrische Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit, wobei die eingeschränkte Holzbewegung auf der Tafelrückseite zu plastischen Kompressionsschäden führt. Da sich die äußeren Holzzellen dort nicht vollständig regenerieren, erfolgte eine konvexe Verformung quer zur Faserrichtung.

Erhardt et al. erforschen 1996, dass es keine nennenswerten Unterschiede zwischen neuem Holz und jenem aus dem 17. Jh. gibt und entwickelten Isotherme. Bezüglich der verbreiteten Sorge, Zellen gealterten Holzes würden „ermüden“ und keine Feuchtigkeit in großem Ausmaß wiederaufnehmen können, verweist Wadum (1998b) auf Untersuchungen, wonach die Bewegung eines neuen Eichenbrettes analog zu jenen eines Brettes aus dem 17. Jh. erfolgten. Weiterhin bestätigt Buck (1998), dass gealtertes Holz seine hygroskopischen Fähigkeiten behält und Feuchtigkeitsbarrieren die Reaktionen zwar verlangsamen, sie jedoch nicht vollständig verhindern können. Neuere Arbeiten (NWO, 2014) zeigten, dass über die Alterung chemische Änderungen entstehen, da der Anteil von Carbon, Hydrogen und Mineralsalzen sich erhöht, während der Anteil von Oxygen und Nitrogen sich verringert. Darunter Inagaki et al (2010), wonach die Alterung zu einer Verminderung der Adsorptionsstellen der Hemicellulose, amorphen Cellulosemoleküle und Gleichgewichtsfeuchte führt. Kawai et al. bestätigen dies 2010 und führen es auf einen langsamen thermo-oxidativen Prozess aufgrund von Oxygen in der Luft zurück. Auch die Zunahme der Festigkeit und Steifigkeit sowie Abnahme der Widerstandsfähigkeit gegen Alterung wird beobachtet. Habaru et al. (2015) beschreiben, dass bei einer Rückklimatisierung eines kurz davor aufgetretenen Klimaschadens an einem Holztafelgemälde (1. H. 17. Jh.) bei bis zu 83 % r.F. innerhalb von 14 Monaten eine ausreichend große Fläche zum Niederlegen der Malerei entstehen konnte.

Bei einer Auffeuchtung müssen jedoch alle Materialien beachtet werden, zumal insbesondere die Malschicht der Träger der Bildinformationen oder -botschaft ist und Verluste vermieden werden müssen. Im Folgenden wird auf einige Aspekte genauer eingegangen.

(Hygro)Thermische Eigenschaften ausgewählter Bindemittel

Bei langfristig zu hoher Feuchtigkeit können organische Bindemittel ihre Klebkraft verlieren (Bridarolli et al., 2022).

2009 untersuchten Kozlowski et al. die mechanischen Eigenschaften und Quellungsreaktion von Materialien bemalter Holzobjekte von 1998 weiter: dabei wurden die Streckgrenzen (d. h. die Dehnungsniveaus, bei denen sich Materialien dauerhaft zu verformen beginnen) für Hölzer, Farben und Klebstoffe bei 0,4 % und für Kreidegrund bei 0,25 % definiert. Es wurde festgestellt, dass viel höhere Veränderungen (- 0,9 %) oder mehr notwendig sind, um ein Versagen zu verursachen. Während diese Raten vergleichsweise niedrig klingen, zeigen Holz und Leim im Bereich von 40 - 60 % relativer Luftfeuchtigkeit einen dramatischen Anstieg der Reaktion im Vergleich zu weit weniger darauf ansprechenden Kreidegrundierung und Farben. Die mangelnde Übereinstimmung in der Reaktion von Kreidegrund und Holz, insbesondere in der am stärksten ansprechenden Tangentialrichtung des Holzes, wird folgendermaßen erklärt: nach dem Austrocknen übersteigt die Schrumpfung des Holzes jene des Kreidegrundes, der hingegen eine Kompression erfährt. Während der Holzquellung entstehen ferner Spannungen in der Kreidegrundschicht. Ein Bruch sei bei diesen Belastungen erst nach mehreren zehntausend Zyklen aufgetreten.

Holl (2016) beschreibt beispielsweise die Sorptionsisothermen vieler organischer Materialien (z. B. Tierleim) mit ihren geringen Reaktionen zwischen 40 – 60 % r.F. und großen Dimensions- und mechanischen Änderung über 70 % r.F. sowie die hydrolytische Spaltung von Cellulose bei hoher Luftfeuchtigkeit. Reaktionen der Grundierungs-, Mal- und Bindemittelschichten für das Fallbeispiel wurden daher unter anderem anhand gängiger Literatur abgeschätzt:

Mecklenburg & Tumosa (1991) forschten über die Dimensionsänderung sowie Verformung (Spannung und Dehnung) von Kreidegrundierungen, proteinischen Leimen und Ölfarben in Abhängigkeit zur Feuchtigkeit und Temperatur. Historisch verwendeter, proteinischer Klebstoff kann demnach zwischen 0 – 85 % r.F. auf über 3,5 % seiner Trockenlänge aufquellen. Bei der Trocknung durch niedriger r.F. schrumpft Hasenhautleim stärker zwischen 70 – 85 % r.F., als in der Spanne zwischen 0 – 70 % r.F. Kreidegrund reagiert ähnlich wie reiner Leim; jedoch ändert sich die Gesamtlänge deutlich weniger und der bedeutende Umkehrpunkt der Quellraten liegt bei 80 % r.F: (nicht 70 % r.F.). Das Verhältnis von Leim und Kreide beeinflusst die Quellung; je höher das Verhältnis, desto kleiner die Summe der dimensionalen Reaktion auf r.F. Freibewegliche Leim- und Kreideproben zeigten laut Mecklenburg (1991) über mehrere Zyklusänderungen der r.F. fortschreitende und permanente Schrumpfung; wobei diese von Zyklus zu Zyklus kleiner wird.

Schellmann (2007 und 2009) bietet eine Übersicht über die wichtigsten konservierungsrelevanten Eigenschaften von tierischen Klebstoffen. Sie identifizierte die Molekulargewichtsverteilung als ausschlaggebend für die Lösungsviskosität und Gelfestigkeit. Auch die Stabilität der Proteinmatrix (beeinflusst durch Wasserstoff und andere chemische Bindungen) hat Auswirkungen auf die Leistung des Klebers (u. a. Festigkeit, mechanisches Verhalten, Empfindlichkeit gegenüber Umgebungstemperaturen, Umwelt und Stabilität mit dem Alter). Unter normal Umgebungsbedingungen (50 % r.F; Raumtemperatur) enthalten Leimfilme auf Gelatine-

basis ca. 12 – 14 % Strukturwasser. Eine Austrocknung unter 0,2 % kann zu kovalenter Vernetzung der Proteinmoleküle führen, was den Film unlöslich werden lässt. Weiterhin führt die Trocknung zu hohen inneren Spannungen, schrumpfen und Sprödigkeit. Hausenblase weist bei Trocknung höhere Spannungen als Gelatine auf. Bei über 25 % Feuchtigkeitsgehalt geht der Klebstoff vom glasigen in gummiartigen Zustand über, die Glasübergangstemperatur reduziert sich und es treten fortschreitende Spannungsverluste ein. Bei hohen r.F. (über 85 %) unterliegen tierische Leimfilme einer fortlaufende Neubildung helikaler Strukturen, was bei anschließenden Trocknung zu neuen, höheren Belastungen und aufgrund der Kontraktion zu einem starken Schrumpfen führen kann. Letzteres ist häufig nur z. T. rückführbar und kann sich zur dauerhaften Untergrundverformung und Schrumpfung entwickeln. Warme Hautleimen reagieren geringer auf schwankende relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur als Kaltleime. In ihrer Alterung reagiert Gelatine mit erhöhter Zugfestigkeit, wird allerdings auch steifer und spröder; sie kann anschwellen oder kriechen. Hausenblasenleim bleibt härter, robuster und elastischer als Gelatine und entwickeln die geringeren permanenten Dimensionsänderung.

Bridarolli et al., (2022) analysierte die mechanischen Eigenschaften ausgewählter Klebstoffe (bei 10 – 85 % r. F.; 10 – 40 °C). Dabei behielten nur Fischleim, Hasenhautleim und in geringerem Maße Störleim bei 80 % r.F. und über 20 °C eine gewisse Steifheit. Störleim geht allerdings in den Versuchen bei ca. 75 % r. F. und 10 °C bzw. 58 % r.F. und 40 °C vom glasigen in den gummiartigen Zustand über und ist somit mechanisch am empfindlichsten gegenüber erhöhter Luftfeuchtigkeit. Zugtests unterhalb der Glasübergangstemperatur zeigten, dass die Säugetierklebstoffe eine höhere Festigkeit und Bruchdehnung aufwiesen als die Fischleime. Hasenhautleim wurde in den Versuchen als der stärkste und duktilste aller getesteten Klebstoffe identifiziert.

Soppa & Zumbühl (2023) untersuchten das Spannungs-Dehnungs-Verhalten von Gelatine, Störleim und Methylzellulose bei schwankender relativer Luftfeuchtigkeit (53 – 75 – 53 % r. F. bei ca. 21 ± 1 °C). In der Theorie dehnen sich die Klebstofffilme bei der Befeuchtung aus und ziehen sich beim Trocknen zusammen. In den Versuchen wurde eine Längenänderung (Schrumpfung) nach den Feuchtigkeitszyklen beobachtet. Als Erklärung wurden eine Plastifizierung durch Wasseraufnahme (irreversible Streckung) oder Neuordnung der Molekülstruktur (verbesserte molekulare Mobilität und strukturelle Organisation → kleinere Filmdimension) vermutet. Die Abnahme der molekularen Beweglichkeit bei hoher r.F., die zur bereits erwähnten Sprödigkeit führt, die Stabilität gegenüber den Klimazyklen sowie die minimale Schrumpfung der Folien liefert bei Gelatine und Methylcellulose vergleichbare Ergebnisse. Sie werden deshalb mit Elastomeren verglichen. Störleim hingegen bildet nur begrenzt stabilisierende Strukturen und ist dadurch sehr empfindlich und bildet starke plastische Verformungen. Die Unregelmäßigkeit der Beobachtungen verdeutlicht die Heterogenität und schwache Kohäsion des Störleims unter diesen Einflüssen. Soppa et al. (2023) ergänzen, dass warme Fischleime und Säugetier-Gelatine sich wie Elastomere verhalten. Kalte Fischleime hingegen eine andere Filmbildung zeigen und mit Thermoplasten vergleichbar sind.

(Hygro)Thermische Eigenschaften ausgewählter Grundier- und Farbschichten

Bezüglich der Grundierung und Farbschichten beschreiben Mecklenburg et al. (1994) u. a. folgende Prozesse: je höher die Konzentration von Füllstoff in einer Grundierung ist, desto schwächer, steifer und weniger formstabil ist sie. Bei Grundierungen mit niedrigerem Füllstoffanteil nimmt die Belastbarkeit mit steigender Luftfeuchtigkeit stark ab und es setzt ein Kraftverlust ein. Allerdings sind die Belastungen bei niedriger Luftfeuchtigkeit noch höher. Dennoch können Grundierungen mehr Schwankungen ertragen als die anderen Materialien. (Mecklenburg et al., 1994).

Bei der Untersuchung von Ölfarben wurden von Mecklenburg & Tumosa (1991) 11 Pigmente („*Flockweiß*“[14], Bleiweiß, gebrannter Umbra, Alizarin Crimson, Cadmiumgelb, Cerulean, Preußischblau, Sienna, Titanweiß, Ultramarin und Vermillion) in Distelöl und Leinöl getestet. Herausgegriffen werden exemplarisch Flockweiß (in Distelöl gemahlen) und gebrannter Umbra (in Leinöl). Ersteres quillt von 0,18 – 0,6 % mit dem größten Anstieg zwischen 70 – 95 % r.F. auf; Zweiteres bei 95 % r.F. auf max. 2,6 %. Als grundlegende Quellungsbereiche der meisten getesteten Farben ermitteln die Autoren eine geringere Quellrate von 0 - 70 % r.F. und ab 70 - 95 % r.F. einen deutlichen Anstieg der Quellung. Bleihaltige Farben zeigten dabei eine geringere dimensionale Reaktion als z. B. Erdfarben. Es wurde rückgeschlossen, dass mit zunehmender Trocknung der Farben die Quellreaktion auf die r.F. abnimmt. Darüber hinaus wurden der Einfluss der Temperatur und eine Fixierung der Materialien in Simulationen untersucht (Mecklenburg & Tumosa, 1991). S. a. weitere Untersuchung der damaligen Probekörper durch Janas et al. (2022) und Janas et al. (2024). Dort wurde u. a. entdeckt, dass die vorliegenden Proben immer spröder und steifer werden: die plastische Verformung nimmt ab und das elastische Verhalten zu. 30 Jahre später zeigt die Rückschau von Arcadiusz et al. (2022) zu Mecklenburgs Versuchen von 1991, dass Ölfarben immer steifer und spröder werden, was darauf hinweist, dass das Farbmolekularsystem sich noch weiterentwickelt. Auch hier nimmt die plastische Verformung mit zunehmender Alterung ab und das elastische Verhalten zu. Entgegen früheren Vorhersagen verschlechterten sich die Filmeigenschaften nicht mit der Trocknungszeit und Zunahme der Steifigkeit. Die Versuche zeigte hingegen, dass einige Ölfarben spröder als die Grundierung und daher anfälliger für Risse sein können.

Saunders & Kirby (2004) beschreiben die Effekte der r.F. auf Künstlerfarben, deren Materialverhalten unter bestimmten Bedingungen den Kunstschaffenden der Freskomalerei schon lange bekannt waren. Beispielsweise wurden alkalisch empfindliche Pigmente nicht für die Anwendung in oder auf Kalkputzen empfohlen oder erst nach dessen Trocknung appliziert. Insbesondere Bleipigmente reagieren beispielsweise mit Aufhellung oder Verdunkelung empfindlich auf Feuchtigkeit. Die genaue Rolle von Licht- und Salzeinfluss ist dabei nur bedingt bekannt. Die Veränderungen von Pigmenten beziehen sich zum einen auf deren Verhalten in und Wechselwirkungen mit unterschiedlichen Bindemitteln oder der Umgebung. So reagieren beispielsweise Kupferpigmente oder Ultramarin (Ultramarinkrankheit; s. Baier, 2020) mit trocknenden Ölen oder Malachit in tierischen Leim über die Hydrolyse zu Schwefelsäure.

[14] Aus dem engl. für „Flake White“ bezeichnet laut Elliott & Ray (2024) eine Mischung aus basischem Bleicarbonat und Zinkoxid.

Natürliche Farbstoffe gelten als besonders lichtempfindlich. Je nach Bindemittel und Einbindung der Pigmente ist zum anderen eine bessere oder schlechtere Schutzwirkung vor Feuchtigkeit bekannt: Trocknendes Öl überzieht die Pigmentpartikel während dem Anreiben und schützt diese somit gut vor Feuchtigkeit. Getrocknete Eitempera ist relativ beständig gegen Feuchtigkeit, wobei die Pigmente weniger gut gebunden sind als im Öl. Tierische Leime oder Farbfilme auf Basis von Gummen haben eine offenere Struktur und weniger geschützte Partikel, wodurch Feuchtigkeit aufgenommen werden kann, was den Farbfilm anfälliger für Schäden durch hohe r.F. macht. Die Untersuchungen zeigten, dass eine Vielzahl der getesteten Pigmente mit steigender r.F. eine steigende Anfälligkeit auf lichtinduzierte Veränderung entwickeln. Aus der Wandmalerei bekannte Phänomene (z. B. Änderungen in Zusammenhang mit flüssigem Wasser, gelösten Salzen oder ungewöhnlich hohen pH-Werten) bestätigten sich und können auch für manche Gemälde in Betracht kommen. Mecklenburg (2007) beschreibt u. a., dass Leim und Erdfarben dazu tendieren bei hoher r.F. aufzuquellen und zu verfärben; bei Austrocknung hingegen reißen und schrumpfen sie. Bleicarbonat, Titandioxid und Zinkoxid sind hingegen sehr formstabil. Poznańska et al. (2024) untersuchten Temperafarben (u. a. Bleiweiß, Azurit, gelber Ocker in Eigelb) mit Kaninchenhautleim als Bindemittel. In ihren Versuchen dominierten Wasserdampfsorption und feuchtigkeitsbedingte Quellung durch proteinhaltige Bestandteile der Bindemittel. Die Elastizitätsmodule im mittleren Bereich der r.F. waren mit denen von gealterten Ölfarben vergleichbar. Weiterhin werden die dortigen Temperafarben als spröder als die Leimfarben, Kreidegrund und gealterte Ölfarben eingeschätzt.

Coccato et al. (2017) bieten eine Literaturübersicht zu mittelalterlichen anorganischen Pigmenten. Laut ihnen gelten einige Pigmente als beständig gegen Feuchtigkeit. Andere hingegen können sich verändern, wie z. B. grüne Erden (in Öl), Cobalt (in Leim), Azurit (in Öl und Eitempera), Malachit (in Leim), Kupferchloride, -Sulphate, Auripigment und Realgar (insbesondere in polysaccaridischen Bindemitteln oder Eitempera), Vermillion, Bleiweiß, Massicot, rotes und gelbes Blei. Alviz-Mezaet al. (2021) untersuchten darüber hinaus die thermodynamische Stabilität von vergoldetem Kupfer und Pigmenten bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit und unter Umgebungsbedingungen in Lima, Peru.

2.1.1 Schadensprozesse der Ablösung im Materialverbund

Schon Mecklenburg et al. (1994) stellten fest, dass Schäden unter bestimmten Umständen wahrscheinlicher eintreten. So verursacht ein hoher Anstieg der r.F. Risse parallel zur Holzmaserung (Längsrichtung); die Senkung der r.F. Risse quer zur Faser sowie eine Kompression der Grundierungs- und Farbschichten (Spaltungen und Rillen parallel zum Substrat). Auch kann ein Gemälde, das bei extrem hoher oder niedriger r.F. in eine Ausgleichsfeuchte kommt, laut ihnen nicht auf einen moderaten Wert zurückgeführt werden, ohne Schäden zu verursachen.[15] Zu den Bruchmechanismen einer Vergoldung s. Michalski (1991).

[15] Die Ergebnisse werden kritisch betrachtet, da es Holzarten gibt, deren Materialeigenschaften sich stark unterscheiden. Außerdem wurden die Kennwerte an kleinen, fehlerfreien und neuen Holzproben ermittelt und auch bereits vorhandene Spannungen, eingebrachte Restaurierungsmaterialien, rheologisches Verhalten und Änderungsgeschwindigkeit der r.F. wurden dabei nicht berücksichtigt.

Die Bildung von umweltbedingten Alterungsrissen in Tafelgemälden wurde von Mecklenburg et al. (1998) analysiert und auf die komplexen dimensionalen Reaktionen der mehrschichtigen Struktur eines Gemäldes auf Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit seiner Umgebung zurückgeführt. Durch die feuchtigkeitsbedingten Dimensionsänderungen der einzelnen Schichten wie Holz, Tierleim, Kreidegrund und Farben entstehen Spannungen, die zu Rissen in den Grund- und Farbschichten führen können. Holl (2016, S. 153) beschreibt, dass es auf die Schichtstärke und Diffusionseigenschaften der einzelnen Schichten ankommt. Insbesondere bei geringen Schichtdicken, beeinflussen äußere, hygroskopischere Schichten, wie stark ein Kunstwerk auf Feuchteschwankungen reagiert. Sie wies weiterhin optisch nach, dass sich kurzfristige Schwankungen unmittelbar auf klimatisch träge (vorgeschädigte) Holzoberflächen auswirken können.

Brewer (2000) entdeckte ein Muster von Längsverwölbungen bei Veränderungen der r.F. mit sattelförmigen Verwerfungen statt zylindrischen (Schrumpfungen quer zur Faser). Rachwał et al. (2012) untersuchten Feuchtigkeitsbewegung und -dehnung von Holztafeln mit Kreidegrund in wechselnden Klimabedingungen anhand systematischer numerischer Modellierung. Mit dem Mechanismus der Bildung von Craquelé-Mustern auf Tafelgemälden beschäftigten sich Krzemień et al. (2016). Er beschreibt Trocknungscraquelé, Enthärtungsschrumpfung und reversible Schrumpfungen. Ersteres sind allgemeine Schrumpfung des Kreidegrundes während der Trocknung, die zu Rissen, senkrecht zur Faserrichtung, führen. Dies hängt mit Materialien und Methoden der Vorbereitung des Holzuntergrunds und der Herstellung zusammen. Eine weitere, dauerhafte Schrumpfung, „*Enthärtungsschrumpfung*“ (engl. Annealing shrinkage), beschreibt eine permanente Trocknungsschrumpfung, die bei anschließenden Zyklen hoher relativer Luftfeuchtigkeit eintreten kann. Letztere ist eine reversible Dimensionsänderung, die das hygroskopisches Material bei der Aufnahme und Abgabe von Feuchtigkeit quellen und schrumpfen lassen.

Wie zuvor für den Leim beschrieben, erfährt auch Kreidegrund (in Hasenhautleim) in hohen Bereichen der r.F. dramatische Verluste der Steifigkeit. Die Untersuchung des Kreidegrundes von Krzemień et al. (2016) auf die Bildung von Rissmustern zeigte weiterhin, dass die ersten Risse in den dickeren Grundierungsschichten (bis zu 10 Schichten; mit und ohne vorheriger Leimschicht) nach 4 – 5 Schwankungszyklen (90 – 20 % r.F.) auftraten, bis sie schlussendlich gebrochen war. Je dünner die Grundierungsschicht, desto weniger Risse traten auf. Die Rissbreite nahm mit aufeinanderfolgenden r.F.-Zyklen zu; die Dichte hing dabei von der Grundierungsdicke ab. In dickeren Grundierschichten wurden häufig Blasen und Hohlräume beobachtet und es schien, dass diese als Ausgangspunkt für die Risse dienten. Auch eine ungefähre Proportionalität des Bruchabstands zur Dicke der gebrochenen Schicht (Bruchsättigung) wird vermutet.

Bezüglich der Brucheigenschaften delaminierender mehrlagiger Beschichtungen beschreiben Schellmann & Taylor (2015), dass die interlaminare Ebene den geringsten Bruchwiderstand aufweist. Dies führt häufig zu einem Versagen parallel zur laminaren Struktur. In Versuchen beobachteten sie Instabilitäten aufgrund einer Inhomogenität im Material, wodurch verschiedene Bruchvarianten entstanden. Diese hatten sich größtenteils kohäsiv durch die Grundierungsschicht, aber auch adhäsiv an den Grenzflächen zwischen Grundierung und

Holz ausgebreitet. Holl (2016) nimmt an, dass Feuchtedifferenzen zwischen den Schichten von Leinwandgemälden eine Lockerung oder Schichtenablösung bewirken können. Laut Wood et al. (2018) entwickelten Keck (1969) und Jaskierny & Young (2018) einfache Klassifizierungen der Brucharten.

Wie u. a. Ekelund et al. (2017b) beschreiben, ist der Zusammenhang zwischen der **Konstruktion**, ihrem Zustand und dem Zustand der Malschichten darauf bekannt. So führen z. B. Risse im Träger oder offene Leimfugen häufig zu Verlusten oder Abhebung der Bildschicht. Klimaschwankungen führen dabei zu Spannungen und Mikrorissen, die bei wiederholter Belastung (Belastungszyklen) wachsen können, bis sie Makrobrüche bilden (s. Bratasz & Kozlowski (2005); Camuffo et al. (2007)). NWO (2014) erklärt u. a., dass die Randbereiche von Holztafelbildern durch die schnellere Feuchtigkeitsaufnahme und Reaktion des Hirnholzes häufig stärker geschädigt sind. Bratasz et al. (2020) zeigen, dass die Anfälligkeit von Gemälden gegenüber Klimaschwankungen sich in Abhängigkeit des Craquelénetzes erheblich verändern kann. Ein Tafelgemälde mit ausgeprägtem Craquelé ist dabei anfälliger für Klimaschwankungen als ein unbeschädigtes Exemplar. Auch Sereshk & Bratasz (2018) und Antropov & Bratasz (2024) beschäftigen sich mit der Entwicklung von Craquelé-Mustern in Papier- bzw. Holztafelbildern. Im Falle letzteren wurden Simulationsmodelle von Eitempera und Ölfarben auf Kreidegrund erstellt und ausgewertet; so z. B. Rissmuster beim Trocknen von Kreidegrund; in den Farbschichten oder bei einer Ausdehnung des Holzträgers durch Feuchtigkeit.

2.1.2 Weitere Einflüsse und Grenzen

Zusätzlich können sich auch textile Kaschierungen und rückseitige Anstriche auf das Verhalten von Holztafeln auswirken. Laut Monfardini (2009) beschreibt schon Cennini im 14. Jh. eine altbewährte Technik, Textil- bzw. Leinwandschicht als Isolierschicht und zum Schutz vor Bewegungen zwischen Holz und Malschicht zu kleben. Später wurden verschiedenste Rückseitenbeschichtungen (z. B. Wachs, Harz oder Balsaholz) sowie konstruktive Festigungshölzer auf die Holztafeln aufgebracht, um die Reaktion auf Klimaschwankungen zu verringern und eine Dimensionsstabilisierung zu erlangen. Doch gerade diese Feuchtebarrieren und Befestigungen führten oftmals zu neuen Spannungen und Schäden bis zu Abhebungen der Malschicht. Textile Träger (z. B. Leinen) können web- und faserbedingt sowohl zwischen 80 – 85 % r.F. als auch steigender r.F. schrumpfen. Leinen ist bekannt dafür, im feuchten Zustand straff zu sein und während dem Trocknen an Spannung zu verlieren. Im Falle eines vorgeleimten Leinens ist die Straffheit im trockenen Zustand auf den getrockneten Kleber zurückzuführen. Dieser ist dadurch der primäre Träger, der auf die Umgebungsbedingungen reagiert (Mecklenburg & Tumosa, 1991). Bezüglich der rückseitigen Anstriche untersuchte z. B. Brewer (1991) wärmeinfundiertes und nicht infundiertes Bienenwachs, Acryloid B-72, Saran F-310, kommerzielles Polyurethan und eine unbeschichtete Kontrolle auf vier verschiedenen Holzarten (Mahagoni, Eiche, Linde, Pappel) als Feuchtebarriere.

Ergänzend zu beachten ist die mögliche Gefahr eines mikrobiellen Befalls bei erhöhter r.F., Objektfeuchte, Wasserschäden u. ä. Sind mehrere Einflussfaktoren (Substrat, Temperatur,

Luftfeuchtigkeit, genügend Zeit, pH-Wert, Licht, Salzgehalt, Sauerstoff, Oberflächenbeschaffenheit, Biotik) gegeben, ist mit Befall zu rechnen, da Schimmelsporen ubiquitär, d. h. überall verbreitet, sind. In Anbetracht der klimatischen Veränderungen der letzten Dekaden und einer Änderung der Nutzungsgewohnheiten entwickelten sich laut Hennen et al. (2018) veränderte und teils sogar verbesserte Lebensbedingungen für Schimmel. Deshalb sollten v. a. Temperatur, relative Luftfeuchte und Sauberkeit gut aufeinander abgestimmt und kontrolliert werden (s. Ojanen et al., 2011). Grundlagen zu Schimmel, dessen Monitoring und Bekämpfung erscheinen in der Publikation zu diesem Projekt (2025/26 – in print).

Für eine individuelle Risikoabschätzung des Materialverhaltens sind Zustandserhebnungen, Oberflächenmonitoring, Simulationen und Klimaschrankversuche an Probekörpern zielführend. Dafür sollten der notwendigen Materialkenndaten evaluiert werden. S. dafür u. a. Mecklenburg & Tumosa (1991), Jakieła, et al. (2008), Schuster (2011), Bylund Melin (2012), Broström et al. (2013), Dionisi-Vici et al. (2013), Holl (2016), Bylund Melin et al. (2018); Sereshk & Bratasz (2018), Jamalabadi et al. (2021), CULTWOOD-Projekt[16] (Stöcklein et al., 2022); Lee et al. (2022), Soboń & Bratasz (2022), Auber—Le Saux et al. (2023), Koserog (WS23/24), Antropov & Bratasz (2024) und Soboń, & Bratasz (2024). Diese Möglichkeiten wurden im Projekt ebenfalls genutzt (s. Abschnitt 3.2).

Die Recherche machte deutlich, dass eine möglichst genaue Kenntnis der Umgebungsbedingungen, des historischen Klimas, technologischen Aufbaus, der verwendeten Materialien und Zustand für eine Risikoermittlung essentiell ist. Im Folgenden werden die durchgeführten Untersuchungen am Fallbeispiel vorgestellt.

2.2 Fallbeispiel Freising

Für die im Rahmen des vorliegenden Projektes durchgeführten Untersuchungen diente ein großformatiges Holztafelgemälde aus dem Freisinger Dom. Das inschriftlich auf 1495 datierte spitzbogige Holztafelgemälde geht auf eine Stiftung des Freisinger Domkustos Tristram von Nußberg zurück und wurde sowohl liturgisch als auch hinsichtlich seines Formats explizit für den Standort in der Unteren Domsakristei geschaffen, an dem es sich auch heute noch befindet (s. Abbildung 2-1). Das Gemälde wird Hans Mair aus Landshut zugeschrieben und zeigt Szenen des Gründonnerstags (sog. „Gründonnerstagsretabel“).

Mit der Ermittlung der wichtigsten Grundlagen zum Kunstwerk und dessen Umgebung wird der Ausgangspunkt für das spätere Monitoring- und Be-/Auffeuchtungskonzept geschaffen. Eine erste Voruntersuchung, welche die Bestimmung der Schadensursachen des Freisinger Gemäldes zum Ziel hatte, fand bereits im Vorfeld des Projektes statt und wurde von der Firma Landskron (2016) ausgeführt. Darauf aufbauend wurden innerhalb des Projektes weitere Untersuchungen durchgeführt. Neben der Dokumentation und Untersuchung des Werkes selbst umfasste die Sammlung der relevanten Informationen Archivrecherchen (Dokumentationen,

[16] Hygro-mechanische Finite-Elemente. Analysen historischer Holzobjekte unter mechanischer und klimatischer Beanspruchung zur Schädigungsrisikoabschätzung. Technische Universität Dresden; Laufzeit: 06/2019 - 05/2022. URL: https://www.validierungsfoerderung.de/validierungsprojekte/cultwood [Stand 26.07.2024].

Fotos, Literatur, Akten), Personenbefragungen (Eigentümer, Nutzer, Beteiligte früherer Maßnahmen, etc.) und die Erhebung weiterer Daten (u. a. Klimadaten, Materialanalysen, Schadstoffanalysen, Bestimmung des mikrobiellen Befalls).

Abbildung 2-1: Gründonnerstagsretabel von Hans Mair von Landshut (1495), Domkirchenstiftung Freising
© Diözesanmuseum Freising, Foto: Walter Bayer.

2.2.1 Zustand zu Projektbeginn

Während der Planung und zum Projektstart befand sich das Tafelbild bereits in einem sehr fragilen Zustand. Durch die Schrumpfung des Holzbildträgers stand die Malschicht dachschollenförmig auf (s. Abbildung 2-2). Eine Konservierung war nicht mehr möglich, ohne Schäden zu verursachen oder Teile der Malerei entfernen zu müssen. Rückseitig hatten sich mehrere Fugen geöffnet (s. Abbildung 2-3/Abbildung 2-4) Auf der rechten Seite saß das Gemälde teilweise nicht mehr im Rahmenfalz, sodass sich die Tafel in diesem Bereich den Klimabedingungen folgend nach hinten verwölbt hatte (s. Abbildung 2-5/Abbildung 2-6). In wieweit der Spalt die tatsächliche Schrumpfung des Gemäldes anzeigt, kann heute nicht mehr eindeutig ermittelt werden. Möglicherweise spielen hier auch Veränderungen des Rahmens (Neuzusammensetzung) und die derzeitige Lagerung (auf Tribüne stehend statt hängend) zu einem gewissen Grad eine Rolle für die Größe des Spalts.

Ein Transport oder eine Lageänderung schienen aufgrund der hohen Empfindlichkeit ausgeschlossen. Erst durch den Einbau der Einhausung (April 2022) zum Projektstart und die eintretende Stabilisierung des Klimas entwickelte sich ein stabilerer Gesamtzustand, der die weiteren Arbeitsschritte ermöglichte.

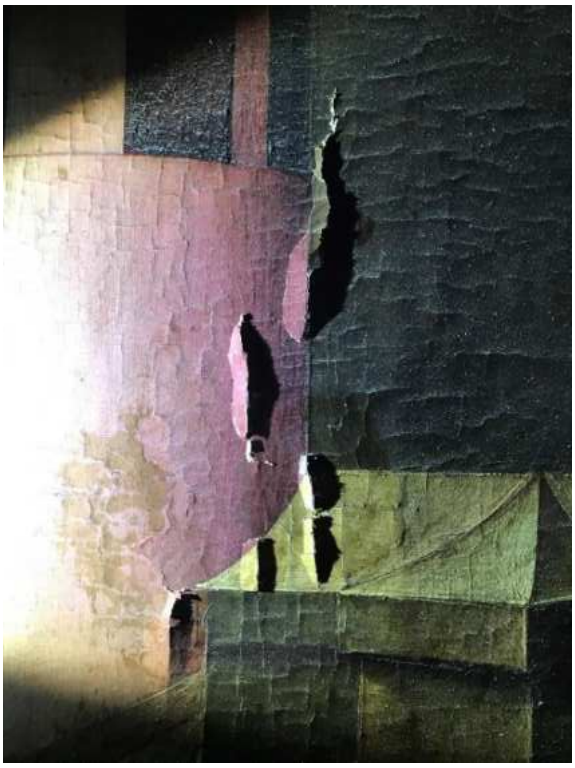

Abbildung 2-2: Aufstehende Malschichtschollen im Streiflicht (Foto: T. Hilger, BLfD).

Abbildung 2-3: Geöffnete Fuge auf Gemälderückseite (Foto: M. Hörmann, BLfD).

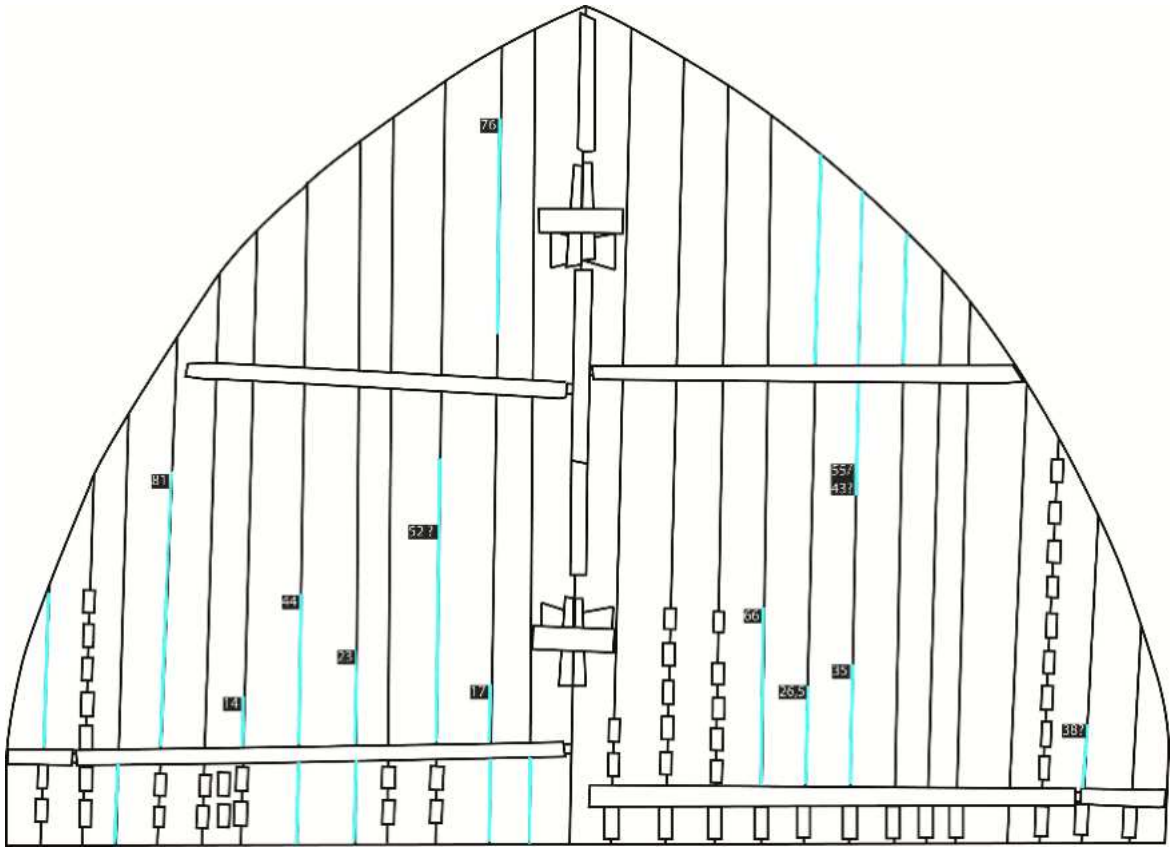

Abbildung 2-4: Kartierung der geöffneten Fugen (blau) auf der Gemälderückseite mit Angabe der Längenausdehnung in schwarz (Grafik: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 2-5: Rechter Gemäldebereich mit Spalt zum Rahmen – Beginn rot markiert (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 2-6: Seitlich von rechts sichtbare Verwölbung der Tafel (Foto: K. Holl, KDWT)

2.2.2 Restaurierungs- und Objektgeschichte[17]

Der Zustand des Gemäldes wird erstmals 1838 in der Zusammenstellung der *„Alterthümer in der Domkirche in Freising“* erwähnt. Hier findet sich der Hinweis: *„Sehr beschädigt. Deßen Herstellung ist sehr wünschenswerth.“* (Nadler & Hildebrandt 2004, S. 128 f.). Ob daraufhin eine Restaurierung durchgeführt wurde, ist nicht überliefert. Landskron (2016, S. 4) stellte zumindest eine vor 1904 durchgeführte Maßnahme fest *(„Abarbeiten der linken Tafelhälfte im unteren Bereich der Mittelfuge und Ergänzen der Malerei in diesem Bereich“*).

Der erste ausführliche Zustandsbericht ist aus dem Jahr 1902 erhalten.[18] Aufgrund des äußerst schlechten Zustandes werden umfassende Restaurierungsmaßnahmen am Gemälde vorgeschlagen und 1903/04 in den Werkstätten der „*Königlichen Centralgemäldegalerie*“ (heute: alte Pinakothek) unter Alois Hauser durchgeführt. Um das Gemälde aus der Sakristei zu transportieren, mussten die beiden Tafelhälften getrennt werden. Unklar bleibt, ob eine Teilung des Gemäldes schon früher stattgefunden hat. Besonders der im Zustandsbericht erwähnte „*Holzwurm*“-Befall[19] und die geplante Beschichtung des Holzes zum Schutz gegen

[17] Die nachfolgenden Ausführungen basieren im Wesentlichen auf den Untersuchungen von Landskron (2016) und wurden durch weitere Informationen (Archiv des BLfD, Maßnahmendokumentationen, etc.) ergänzt.
[18] Schreiben von Dr. H. Graf an die Direktion des erzbischöflichen Klerikalseminars, Betr. *„Gemälde in der Domsakristei, Domkreuzgang u. im Klerikalseminar“*, 08.12.1902 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1886-1922).
[19] Ebenda.

Feuchtigkeit deuten auf ein insgesamt zu feuchtes Milieu am Standort des Gemäldes hin. Neben großflächigen Malereiergänzungen (vor allem im unteren Bildteil) fanden umfangreiche Maßnahmen am Bildträger statt. An der linken Tafelhälfte wurde der hölzerne Bildträger im unteren Bereich gedünnt und geschwächte Holzsubstanz gefestigt. Zur Stabilisierung der Brettfugen wurden an mehreren Bereichen kleine Holzklötzchen[20] aufgeleimt und zur Verbindung der beiden Tafelhälften Keilschlösser angebracht, für deren Anbringung die Tafel teilweise abgehobelt werden musste (s. Abbildung 2-7). Gekennzeichnet wurden diese Überarbeitungen durch rückseitige Inschriften.

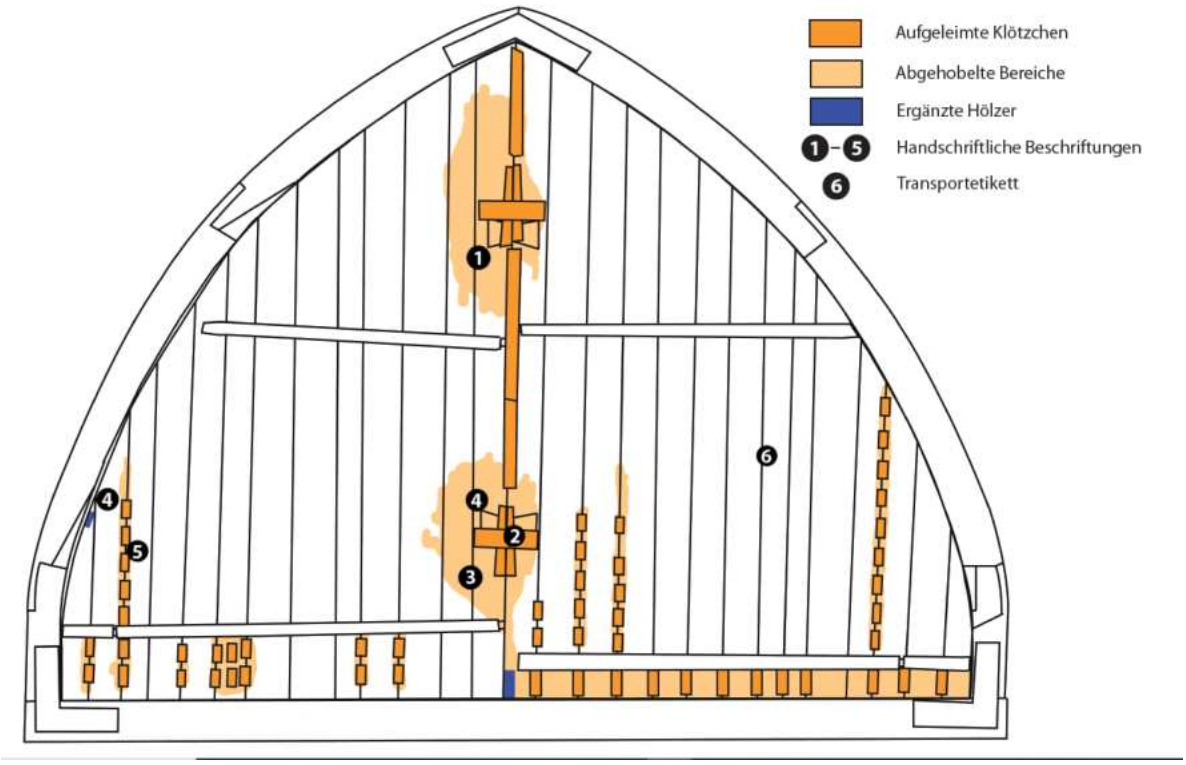

Abbildung 2-7: Kartierung der Überarbeitungen auf der Rückseite im Zuge der Restaurierungsmaßnahme 1903/04 (Grafik: M. Hörmann, BLfD).

Im Kostenvoranschlag von 1903 wird das Gemälde mit einer Größe von 3,60 x 3,38 m (h x b) angegeben. Die Richtigkeit dieser Maße kann angezweifelt werden, da das Gemälde heute eine Breite von ca. 3,82 m aufweist und keine Anzeichen für Ergänzungen in der Breite zeigt. Denkbar ist hingegen, dass der untere Bereich – womöglich aufgrund des schlechten Zustandes des Holzes – leicht gekürzt wurde.

[20] Die Stabilisierung mittels Holzklötzen war an der Kgl. Centralgemäldegalerie in München Anfang des 20. Jh. wohl gängige Praxis, vgl. hierzu auch Schießl, Ulrich: History of Structural Panel Painting Conservation in Austria, Germany, and Switzerland, in: The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul-Getty-Museum, April 1995, 1998, S. 225.

Der Gemälderahmen wurde ebenfalls umfassend bearbeitet. Neben der Stabilisierung der Eckverbindungen mittels aufgeschraubten Eisenwinkeln und der Erneuerung des Konstruktionsholzes des rückseitigen unteren Rahmenschenkels, wurde eine Neufassung des Rahmens (vermutlich nach Befund) durchgeführt (Landskron 2016, S. 6).

Ein weiteres Mal verließ das Gemälde die Sakristei für die 1960 in München stattfindende Ausstellung *„Bayerische Frömmigkeit“*. Es ist davon auszugehen, dass das Tafelbild im Vorfeld dazu ebenfalls einer Restaurierung unterzogen wurde. Das im Ausstellungskatalog abgebildete Gemälde zeigt keinerlei Schäden (Stadtmuseum München 1960, Tafel 58/59). Zum Transport mussten Gemälde und Rahmen ein weiteres Mal auseinandergenommen werden.

1962 wurde zur Beheizung der Sakristei ein *„neuer Kamin“* eingebaut (Nadler & Hildebrandt 2004, S. 184). Bereits 1969 wurden neue Schäden am Gemälde dokumentiert *(„neue Abhebungen und Blasenbildungen an der Grundier-Malschicht“).* Die Schäden erstreckten sich über das gesamte Gemälde, erschienen jedoch besonders stark an der „*unteren Bildhälfte*“ und wurden in erster Linie auf das spitzbogige Format zurückgeführt.[21] Die damals vorgeschlagenen Konservierungsmaßnahmen wurden jedoch nicht umgesetzt (Kroiß/Bauer-Empl 1989, S. 2). In den 1970er Jahren[22] sollte die Trockenlegung der Mauerwerksfundamente u. a. der Sakristei erfolgen. Betroffen hiervon waren jedoch nur die südlichen und östlichen Außenwände der Sakristei. Die Westwand blieb dabei ausgenommen, da sie teilweise an ein weiteres Gebäude angrenzt.

In den 1980er Jahren wurde eine Innenrestaurierung der Domsakristei veranschlagt. Vermutlich im Zuge dessen kam es 1986 zur Restaurierung des Tafelgemäldes durch den Kirchenmaler Fronske, welche nicht weiter dokumentiert ist. Aus den Akten geht hervor, dass ein neuer Firnis aufgetragen wurde.[23] In der Befunduntersuchung von Landskron (2016, S. 5) wurde dieser als eine Schicht, die unter UV-Licht eine *„bläulich-trübe Fluoreszenz“* zeigt, identifiziert. Außerdem wurden dieser Bearbeitungsphase kleine, auf dem Firnis liegende Retuschen zugeordnet. Bereits 1988 wurden neue Schäden am Tafelgemälde bemerkt und empfohlen, das Raumklima zu messen sowie die Notwendigkeit zur Drosselung der Heizung in Betracht gezogen.[24] Daraufhin wurde 1989 durch die Restauratorinnen des Diözesanmuseums eine Notsicherungsmaßnahme am Gemälde durchgeführt. Die Niederlegung der Malschichtabhebungen *(„Blasen“)* erfolgte mittels der in das Craquelée der Malschicht eingebrachten Gelatine (Kroiß/Bauer-Empl 1989, S. 6).

Der Einbau eines Zentralheizkörpers 2005 ersetzt den bis dahin vorhandenen Ölofen[25] in der Unteren Sakristei. Dieser sollte für eine konstante Temperierung der Sakristei auf 15 °C im

[21] Schreiben von Dr. T. Gebhard (Generalkonservator) an den Freisinger Domrektor, Betr. „*Gotische Tafelbilder im Dom zu Freising*“, 26.06.1969 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1962-1969).
[22] Der genaue Ausführungszeitpunkt der geplanten Maßnahmen geht aus den vorliegenden Akten nicht hervor.
[23] Schreiben von Dr. Baur an E. Emmerling – Betr. „Sicherungsarbeiten am Tafelbild des Mair v. Landshut“, 9.11.1988 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1970-1988).
[24] Schreiben des BLfD an Domrektor B. Haßlberger, 11.08.1988 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1970-1988).
[25] Laut Aktennotiz Staatliches Hochbauamt Freising, Betr. „*Gesamtsanierung Dom Freising*“, 15.06.2005 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 2005) befand sich an derselben Stelle ehemals ein Kachelofen. Der neue Heizkörper sollte ebenfalls an dieser Stelle installiert werden.

Winter sorgen und nur etwa *„2/3 der Wärmeleistung des alten Ölofens abdecken“.*[26] Noch im selben Jahr (Nov. 2005) zeigten sich erneute Malschichtstauchungen. Im darauffolgenden Herbst wurden durch die Restauratoren Hess & Thieme Festigungsarbeiten mittels Störleim (4 % in Wasser) durchgeführt, welche jedoch bereits im Februar 2007 erneut notwendig waren (Hess/Thieme 2006/07). Das Schadensbild verschlechterte sich in den folgenden Jahren kontinuierlich, sodass im Jahr 2010/11 durch die Restauratorinnen des Diözesanmuseums Notsicherungsmaßnahmen mittels Japanpapieren durchgeführt wurden.

Zur Klärung der Schadensursachen wurde im Jahr 2016 eine Befunduntersuchung durch die Fa. Landskron ausgeführt, wobei erstmals auch die Rückseite des Gemäldes näher untersucht wurde. Im Zuge dessen wurde das Gemälde von der Wand genommen und auf einer Arbeitstribüne stehend montiert (s. Abbildung 2-8), auf der es sich bis heute befindet. Stark gefährdete Malschichtbereiche wurden mittels Störleim (4 % in dest. Wasser) bzw. Japanpapiersicherungen (Klucel EF in dest. Wasser) gesichert (Landskron 2016, S. 2).

Abbildung 2-8: Montage des Gemäldes auf der Arbeitstribüne von 2016 (Foto: T. Hilger, BLfD).

Zur weiteren Untersuchung der Schadensursachen wurden ab 2020 verschiedene Überlegungen angestellt. Typische Schäden für Holztafelbilder, welche inneren Spannungen oder äußeren Zwängen ausgesetzt sind, wären nach Nicolaus (1998, S. 62) beispielsweise Waschbrettbildung[27], Verwölbungen, Öffnung der Leimfugen, Risse im Träger oder Schrumpfungen des Bildträgers (mit folgender Schichtentrennung und Craquelé der Bildschicht).

[26] Aktennotiz Staatliches Hochbauamt Freising, Betr. *„Gesamtsanierung Dom Freising“,* 15.06.2005 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 2005).
[27] Unterschiedlich konvexe und konkave Verwölbungen einzelner, aneinandergefügter Bretter.

In Anbetracht des hohen Alters der Holztafel sowie der – trotz dem vorherrschenden Klima und der vielen Bewegung – geringen Verformungen des Gesamtkonstruktes, wurden herstellungstechnische Ursachen (z. B. ungeeignetes Holz, mangelnde Qualität, falsche Füge- oder Leimtechniken) eher ausgeschlossen. Auch mangelnde Maltechniken sowie unnötige oder unsachgemäße Restaurierungseingriffe (z. B. falsche Materialwahl, Dünnungen, o. ä.) wurden nicht als Hauptursache identifiziert. Zur Überprüfung wurden verschiedene Kartierungen des Holztafelbildes angefertigt und verglichen. Abbildung 2-9 zeigt die dafür verwendete, anhand der Orthoaufnahme der Rückseite[28] erstellte Skizze. Diese Skizze wurde gespiegelt auf eine Orthoaufnahme der Vorderseite[29] gelegt. Das Übereinanderlegen sollte konstruktive bedingte Ursachen mit Schadbereichen der Vorderseite verknüpfen. Die konstruktiven Merkmale (z. B. Gratleisten, aufgeleimte Klötzchen, Fugen, Astlöcher, etc.) der Rückseite wurden demnach nicht als Hauptursache der Malschichtschäden eingeordnet.

Das Tafelbild weist zudem keine vorder- oder rückseitig sichtbaren Risse über merhere mm auf. Weiterhin ist die Malerei nicht nur entlang der Brettfugen oder Holzmaserung geschädigt; obwohl sich v. a. im unteren Tafelbereich vermehrt Dachschollen entlang der Brettfugen gebildet haben. Dies könnte neben einer schlechten Gleitfähigkeit auch dem schlechten Vorzustand (fraßgeschädigtes und in früheren Maßnahmen gefestigte Holzsubstanz) oder eingebrachter Festigungsmittel obliegen. Auch unterschiedliche Klimazonen (z. B. oben/unten sowie linke und rechte Tafelhälfe) sowie andersartige Behandlungen oder Expositionen (z. B. Licht, Kondensationsfeuchte der Außenwände, o. ä.) einzelner Bildbereiche wurden diskutiert. Dies brachte jedoch ebenfalls keine alleinige Schadursache zu Tage.

[28] KDWT, generiert aus einem Laserscan (Faro Focus S 350, Fa. FARO).
[29] S. o.

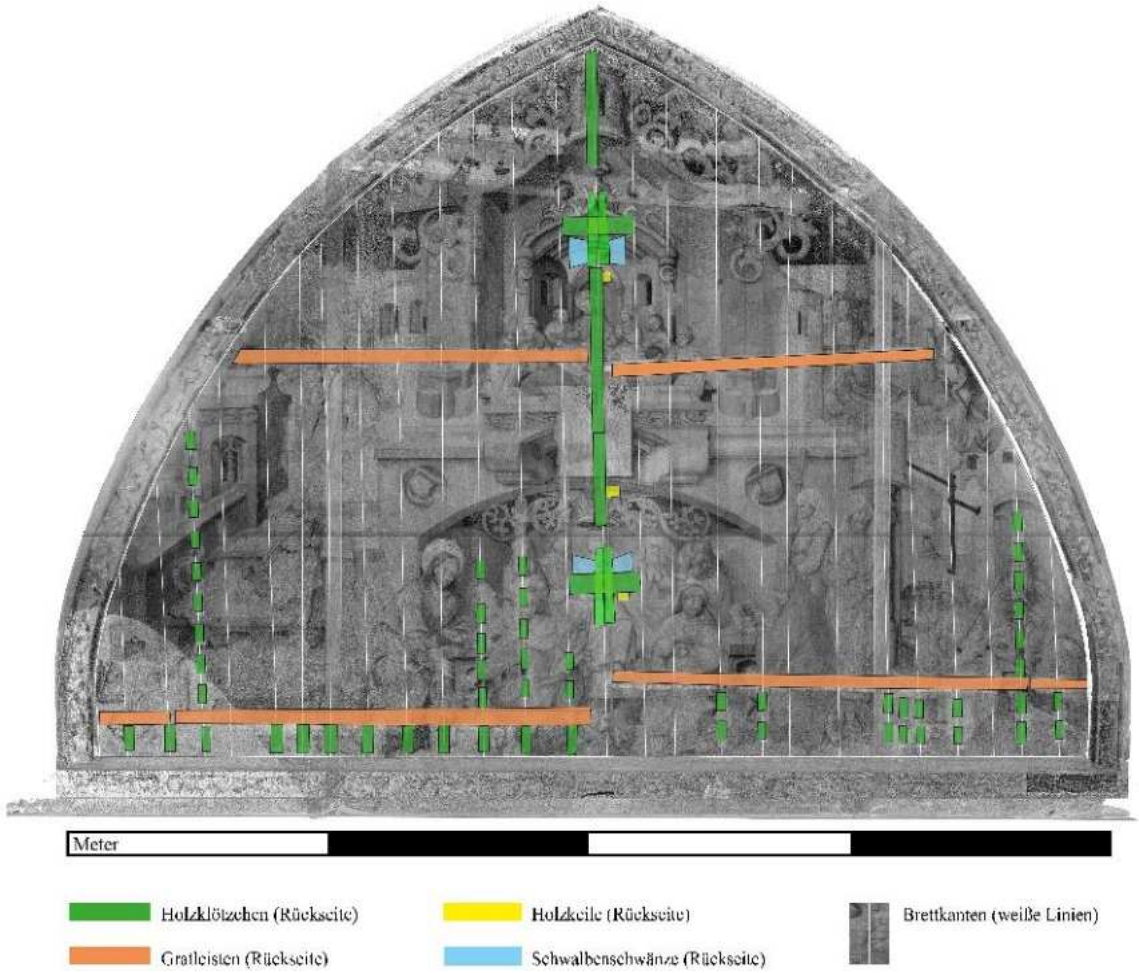

Abbildung 2-9: Kartierung konstruktiver Merkmale auf eine Gesamtaufnahme der Vorderseite gespiegelt (Foto: Ortohaufnahme, generiert aus Laserscan L. Pallas, KDWT; Bearbeitung in Photoshop Josephine Opitz, BLfD).

Nachdem aufgrund der schwankenden Klimabedingungen in der Sakristei weiterhin Malschichtverluste am Gemälde auftraten, mussten zu Beginn des DBU-Projektes 2022 weitere Notsicherungen mittels Japanpapier durchgeführt werden. Eine ausführlichere Beschreibung hierzu findet sich unter 2.3.4 Notsicherungen.

2.2.3 Kunsttechnologischer Aufbau

Im Rahmen der Grundlagenermittlung wurden kunsttechnologische Untersuchungen und Materialanalysen durchgeführt, um die Reaktion des Gemäldes auf Klimaschwankungen und somit auf die später geplante Auffeuchtung einschätzen zu können. Die Klärung des kunsttechnologischen Aufbaus und der Materialien waren für die Herstellung der Probekörper zur Durchführung von Klimaschrankversuchen sowie zur Ermittlung der Materialkennwerte für die hygrothermischen Simulationen essentiell (s. 3.2 und 4.2). Eine Hilfestellung für die Einordnung bedeutender Parameter liefern Ekelund et al. (2017a, S. 8), wobei Holztafelbilder in die Gruppen Konstruktion, Material, Geschichte und Zustand unterteilt werden (s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte).

2.2.3.1 Konstruktiver Aufbau[30]

Das spitzbogige Holztafelgemälde hat eine Größe von etwa 275 x 382 cm (h x b)[31] und besteht aus zwei Tafelhälften mit einer mittigen, annähernd vertikalen Stoßfuge. Die genaue Breite ist nicht exakt zu erfassen, da die Tafel auf einer Seite in der Rahmennut sitzt und gleichzeitig durch Fraßgänge Ausbrüche an der Rahmenkante aufweist.[32] Die Tafeln sind gefalzt, wobei die linke Seite nach vorne hin überlappt. Ursprünglich wurden sie durch zwei hölzerne Schwalbenschwanzverbindungen zusammengehalten, die rückseitig eingesetzt sind. Heute sind sie durch später aufgeschraubte und verleimte hölzerne Keilschlösser verbunden. Die Tafelhälften bestehen jeweils aus 13 bzw. 14 stehend verleimten Holzbrettern (s. Abbildung 2-10/Abbildung 2-11). Die vermutlich mit stumpfem Stoß[33] verleimten Holzbretter weisen jeweils eine Breite zwischen 9,5 bis 19,0 cm sowie eine Stärke von ca. 1,8 bis 1,9 cm auf[34]. Für die Herstellung des Gemäldes wurde hochwertiges Nadelholz verwendet (weitgehend stehende Jahrringe, mittelbreite Jahrringe, wenige Astlöcher). Rückseitig wurden je zwei Gratleisten pro Tafelhälfte horizontal in eine Nut eingeschoben, welche sich ober- sowie unterhalb der Tafelmitte befinden. Vermutlich handelt es sich hierbei um die originalen Gratleisten. Die Verwendung von sog. Einschubleisten war durchaus bereits im Mittelalter bekannt (Uzielli 1998, S. 122; Taube 2005, S. 135) und auch die Ergebnisse aus der im Rahmen des Projektes beauftragten ^{14}C-Datierung deuten darauf hin (s. Abschnitt 2.2.3.3). Darüber hinaus sind Spuren der rückseitigen Bearbeitung (Hobel) zu sehen, sowie gegenläufig diagonale Ritzungen entlang der Brettfugen und überwiegend horizontal verlaufende Wergabklebungen vorhanden (s. Abbildung 2-12). Die Tafel ist umlaufend am Rand abgefast und in einen dreiteiligen Zierrahmen eingenutet.

[30] Die Beschreibung erfolgt aus Frontalansicht der Vorderseite; sofern nicht anders angegeben.
[31] Maße ohne Rahmen – mit Rahmen betragen die Maße 300 x 405 cm.
[32] In den früheren Maßnahmendokumentationen finden sich jeweils unterschiedliche Maßangaben, wobei nicht klar ist, wo genau gemessen wurde und ob die verschiedenen Maßangaben bereits auf die Schrumpfung des Trägers hindeuten.
[33] Ohne in das bestehende Gefüge des Gemäldes einzugreifen oder aufwendigere bildgebende Verfahren (z. B. Röntgenanalyse) konnte nicht zweifelsfrei geklärt werden, ob die Bretter lediglich stumpf verleimt wurden oder durch eine Verblattung gefügt wurden. Messungen der Fugenabstände an Vorder- und Rückseite des Gemäldes deuten jedoch auf eine stumpfe Verleimung hin. An zwei Bereichen scheint eine Verblattung vorzuliegen. Weitere Untersuchungen im Rahmen einer Konservierung wären wünschenswert.
[34] Die Brettstärke wurde anhand der 3D-Aufnahmen des terrestrischen Laserscanners (Faro Focus S 350, Fa. FARO) ermittelt.

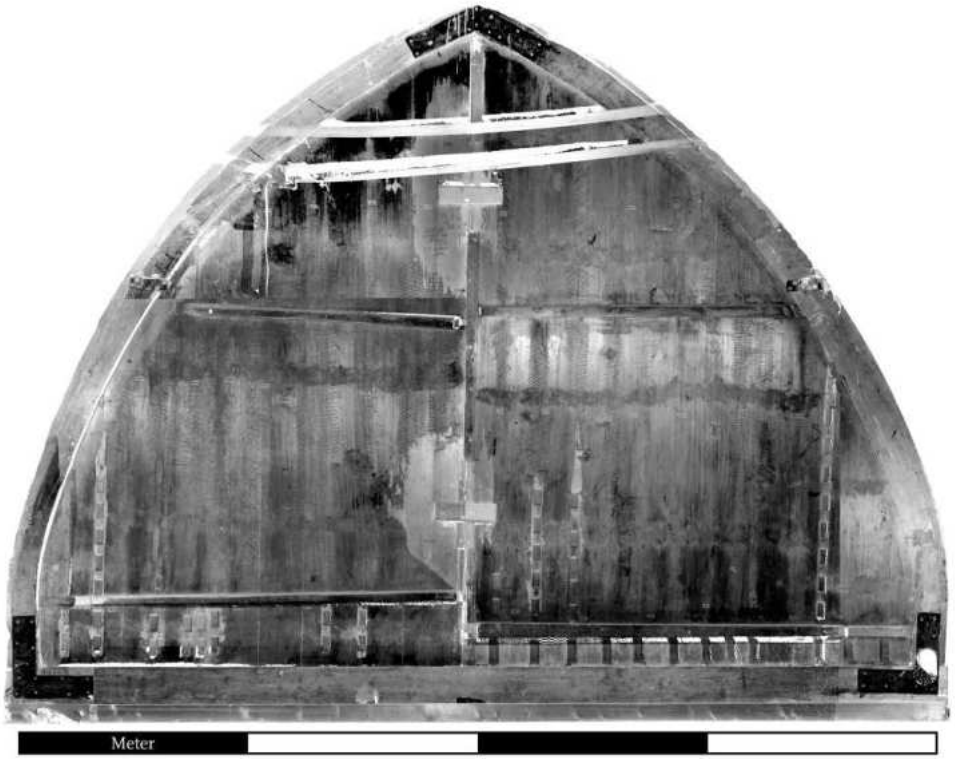

Abbildung 2-10: Orthofoto der Gemälderückseite, generiert aus Laserscan (Foto: L. Pallas, KDWT).

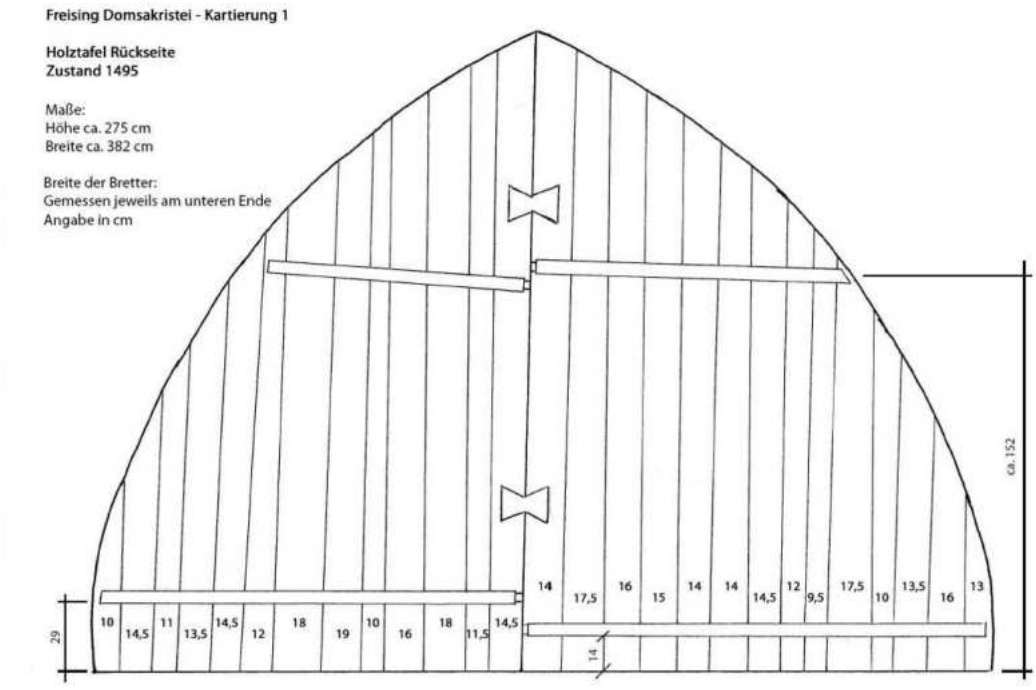

Abbildung 2-11: Kartierung der Brettbreiten (Grafik: Fa. Landskron, 2016)

Abbildung 2-12: Detailfoto der diagonalen Brettritzungen, horizontalen Wergabklebungen und Rückseitenbeschichtung. Im unteren Bereich abgehobelt mit freiliegenden Fraßgängen (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Der Zierrahmen ist mit großer Sicherheit ursprünglich dem Gemälde zugehörig. Er ist aus Holz gefertigt und besteht aus drei Rahmenschenkeln, die jeweils eine Nut für den Bildträger aufweisen. Er besitzt eine relativ einfache Profilierung mit einer tiefen Hohlkehle, in die geschnitzte Rankenornamentik umlaufend eingepasst ist. Die jetzige Fassung ist nicht ursprünglich, jedoch ist die Farbgebung (goldfarbenes Schnitzwerk und rote und blaue Farbe für die Profilierung) vermutlich der ursprünglichen Gestaltung nachempfunden.

2.2.3.2 Malschichtaufbau und Überzüge

Der Malschichtaufbau ist für ein spätmittelalterliches Tafelgemälde typisch (Reclam, 1997; Taubert 2003): Auf dem Bildträger wurden partielle Leinwandabklebungen aufgebracht, welche die Bildschicht im Bereich der Leimfugen vor mechanischen Belastungen bei Bewegungen des Holzes schützen sollen (vgl. Skaug 2008). Darüber folgt eine in mindestens fünf Schichten aufgetragene, weiße Grundierung mittlerer Dicke (600 – 800 µm).[35] Im oberen Bilddrittel, den Hintergrund darstellend, folgt eine Vergoldung. Darüber hinaus sind einzelne Bildelemente der Malerei, wie z. B. Nimben, vergoldet. In den Bereichen mit Malerei wurde auf die Grundierung, eine vermutlich mit dem Pinsel oder Federkiel (flüssiges Medium) ausgeführte, dunkle Unterzeichnung aufgetragen. Diese tritt heute durch die gealterte Malschicht besonders in den dargestellten Inkarnaten in Erscheinung. Die Malerei wurde teils relativ dünn und teils pastos aufgetragen. In den untersuchten Malschichtquerschliffen konnten jeweils eine bis zwei Schichten in einer Dicke von 16 – 34 µm ermittelt werden (je nach Anzahl

[35] Anhand der angefertigten Proben-Querschliffe gemessen.

der Farbschichten). Darüber folgen zwei Firnisschichten, die zusammen eine Dicke von 23 – 25 µm aufweisen. Hierbei handelt es sich jedoch um später aufgetragene Überzüge.

Auf der Rückseite der Tafel sind darüber hinaus mehrere teils nur partiell erhaltene Überzüge zu finden (s. Abbildung 2-13). Die komplette Tafel- und Rahmenrückseite wurde zu einem nicht näher bestimmbaren Zeitpunkt (vor 1904) braun gebeizt. Darüber hinaus findet sich eine Leimschicht auf der Gemälderückseite. Bei der Tafelherstellung wurde die sog. Leimlösche vermutlich beidseitig aufgetragen, um eine Deformation des Holzes während der Beschichtung zu vermindern. Darüber folgt eine ungleichmäßig dick erscheinende Leinölschicht, die vermutlich zur Imprägnierung des Holzes zum Schutz gegen Feuchtigkeit aufgetragen wurde. Auch ein frühzeitlicher Rückseitenschutz, mit Ritzungen zur besseren Haftung, wird nicht ausgeschlossen. Gemälderückseiten im Rahmen von Restaurierungsmaßnahmen mit heißem Leinöl einzulassen wurde Anfang des 20. Jahrhunderts auch an der Pinakothek in München praktiziert (vgl. Schießl 1998, S. 227). Laut der Bindemitteluntersuchung ist das Öl vermutlich in mehreren Arbeitsgängen aufgetragen worden.[36] Im entnommenen Querschliff zeigte sich eine Eindringtiefe von etwa 350 µm.

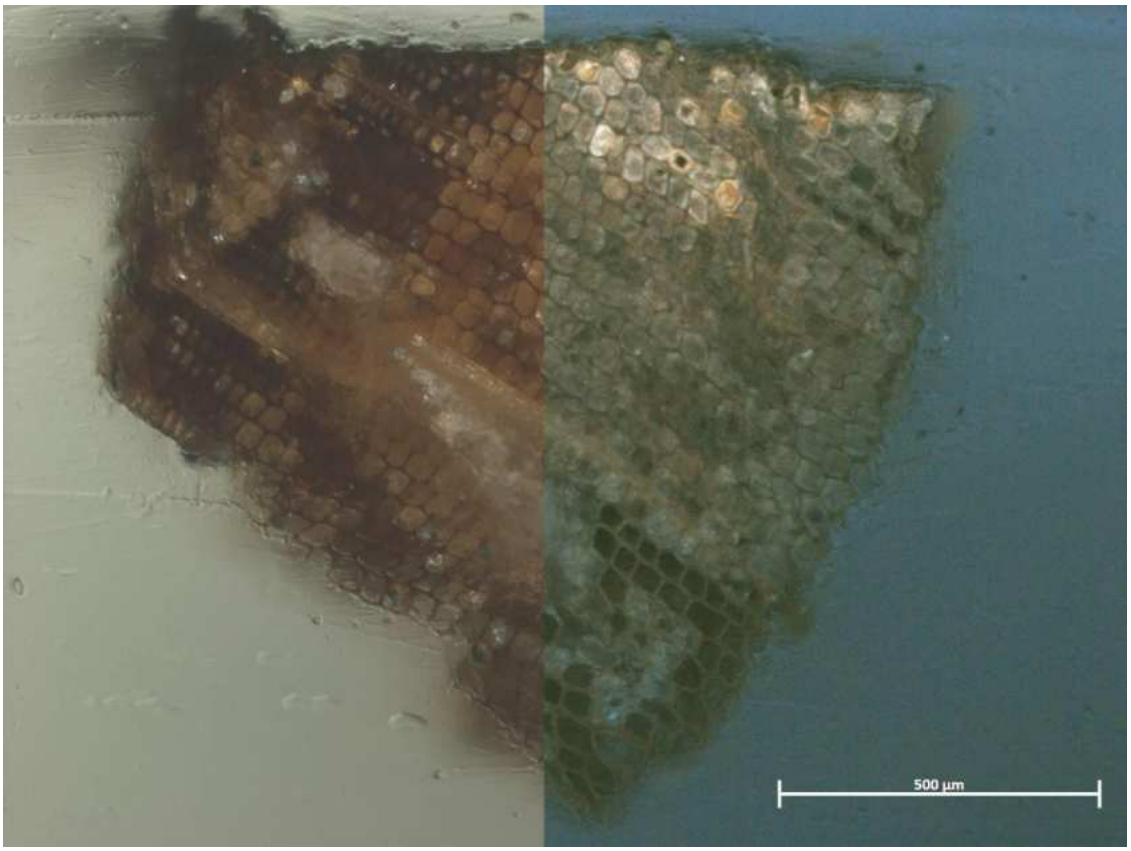

Abbildung 2-13: Querschliff der Holzprobe der Gemälderückseite (Probenr. PB 8), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD).

[36] S. Untersuchungsbericht Dipl.-Chem. Frank Mucha, Naturwissenschaftliches Labor, FH Erfurt, 2023, S.3 (Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte).

2.2.3.3 Materialanalysen

Jene Materialien, welche die hygrothermischen Eigenschaften des Gemäldes wesentlich beeinflussen, wurden genauer analysiert. Ebenso sollten mithilfe der Untersuchungen u. a. auch deren Originalität geklärt werden.

2.2.3.3.1 Holzartenanalyse und ^{14}C-Datierung

Die Holzarten der verwendeten Bauteile wurden anhand kleiner Holzproben mikroskopisch (*Axiophot, ZEISS*) bestimmt. Die Analyse erfolgte überwiegend durch das Referat Restaurierung des BLfD. Eine Probe der Tafel wurde zur Verifikation an das Holzforschungszentrum der TUM geschickt.[37] Die Tafel, der Rahmen und die zwei unteren Gratleisten bestehen demnach aus Fichte *(Picea spec.).* Das Schnitzwerk des Rahmens besteht aus Linde *(Tilia spec.).* Die beiden oberen Gratleisten wurden aus Tanne *(Abies spec.)* hergestellt. Untersuchungsberichte s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte.

Nachdem durch die Untersuchung am Objekt nicht abschließend geklärt werden konnte, ob es sich bei den Gratleisten um originale Bestandteile der Konstruktion handelt, wurde eine ^{14}C-Analyse bei der *Curt-Engelhorn-Zentrum Archäometrie gGmbH* in Auftrag gegeben. Die Untersuchung erfolgte mit einem AMS-System vom Typ MICADAS. Analysiert wurde jeweils eine Probe von der linken unteren und oberen Leiste. Während die Probe der unteren Gratleiste sehr wahrscheinlich in das 15. Jahrhundert (cal AD 1409-1440, Wahrscheinlichkeit 95 %) zu datieren ist, ist der Zeitraum bei der Probe der oberen Gratleiste weiter gefasst (cal AD 1452-1620, Wahrscheinlichkeit 95 %).[38] Dabei ist zu berücksichtigen, dass das analysierte Alter nicht gleichzusetzen ist mit dem Entstehungszeitpunkt der Leisten. Abhängig vom sog. Altholzeffekt sowie der Lage der Probe im Stamm kann dieser mehr oder weniger stark abweichen. Die Analyseergebnisse wiedersprechen jedoch nicht der Annahme, dass es sich bei der Gratleisten-Konstruktion um einen originalen Bestandteil oder zumindest eine sehr frühe Überarbeitung des Tafelgemäldes handelt. Untersuchungsberichte s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte.

2.2.3.3.2 Werganalyse

An insgesamt zehn Probeentnahmestellen wurden Fasern entnommen, die jeweils in drei separate Proben aufgeteilt wurden und lichtmikroskopisch untersucht wurden.[39] Der Zustand der Fasern (Oberflächenstruktur; Tränkung mit Bindemitteln) erschwerte die Identifizierung. Die überwiegende Mehrheit der identifizierbaren Fasern wurden als Hanf bestimmt, hinzu kommen evtl. kleine Anteile an Flachs. Sowohl Hanf- als auch Flachsfasern sind als Materialien für rückseitige Wergabklebungen auf mittelalterlichen Holztafelgemälden möglich[40] und auch zu späteren Zeiten noch verwendet worden, weshalb allein über die Materialität keine

[37] Die Untersuchung der eingesendeten Holzprobe von der Tafelrückseite erfolgte durch Dr. Michael Risse, Sachverständiger für Holz (TUM Holzforschung München, Winzererstr. 45, 80797 München). Die Probe konnte ebenfalls als Fichte (*Picea spec.*) identifiziert werden.
[38] S. Untersuchungsbericht zur ^{14}C-Datierung, Dr. Susanne Lindauer, CEZA 2024 (Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte).
[39] Die Untersuchung erfolgte durch Johanna Gerling, die als Semesterpraktikantin in der Textilrestaurierung des BLfD tätig war.
[40] Vgl. Véliz, Zahira: Wooden Panels and Their Preparation for Painting from the Middle Ages to the Seventeenth Century in Spain, in: Dardes, Kathleen/Rothe, Andrea (eds.): The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings at the J. Paul Getty Museum, 24-28 April 1995, Los Angeles 1998, S. 140.

nähere zeitliche Einordnung erfolgen kann. Untersuchungsbericht s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte.

2.2.3.3.3 Pigment- und Bindemittelanalyse

Die Pigment- und Bindemittelanalysen konzentrierten sich auf Materialien, die großen Anteil an der Gesamtfläche und somit potentiell großen Einfluss auf klimainduzierte Bewegungen des Tafelbildes haben. In diesem Fall handelt es sich um eine braun-grüne sowie eine rosafarbene Farbschicht, die überwiegen in der Darstellung der Architektur vorliegen sowie der Vergoldung im oberen Bilddrittel. Da die braun-grüne Farbfläche augenscheinlich den größten Anteil ausmacht und daher als Vorbild für die später erstellten Probekörper dienen sollte, wurde anhand einer Probe aus diesem Bereich die Bindemittelanalyse mittels GC-MS-Verfahren durchgeführt. Die Analyse der Proben erfolgte am naturwissenschaftlichen Labor der FH Erfurt durch Frank Mucha. Im Vorfeld fand bereits eine Vorbestimmung der Bindemittelklassen mithilfe von FTIR-Spektroskopie am Labor des BLfD (Dr. Markus Roos) statt. Die Bestimmung der Pigmente und Füllstoffe erfolgte an Querschliffen (s. Abbildung 2-14/Abbildung 2-15/Abbildung 2-16) anhand der Elementanalyse mit REM-EDS (Simon Mindermann) im Abgleich mit der lichtmikroskopischen Untersuchung.

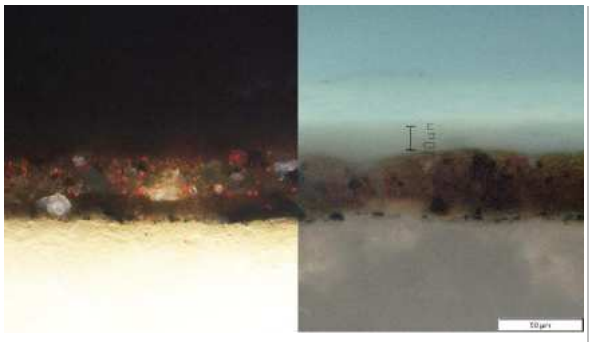

Abbildung 2-14: Querschliff der Probe aus der braun-grünen Architekturdarstellung (Probenr. PF2), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Pristl, KDWT, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD).

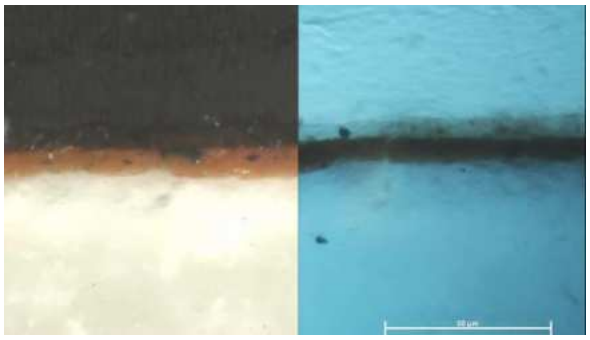

Abbildung 2-15: Querschliff der Probe aus der rosa Architekturdarstellung (Probenr. PF3), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD).

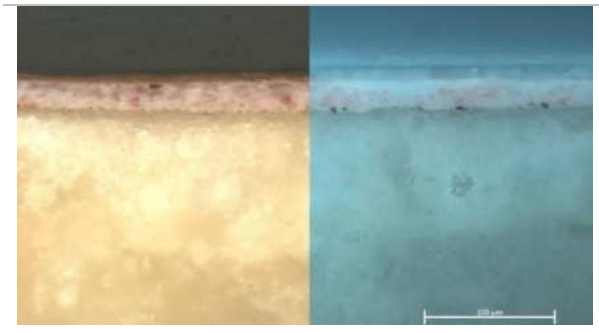

Abbildung 2-16: Querschliff der Probe aus dem vergoldeten Hintergrund (Probenr. PF1), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD)

Bei der Grundierung handelt es sich in allen Fällen um eine Kreidegrundierung (Nachweis von Calciumcarbonat), welche mittels tierischem (Glutin-)Leim gebunden ist. Bei der Vergoldung wurde zusätzlich ein weißes Tonmineral (vermutlich weißer Bolus) und eine dünne Schicht rotes Tonmineral als Poliment aufgebracht. Darauf erfolgte die Vergoldung mit Echtgold. Es handelt sich also um eine typische Polimentvergoldung.

Das Material der im Querschliff als Unterzeichnung angenommenen Schicht konnte leider nicht näher bestimmt werden. Da diese allerdings auch nicht als flächig deckende Schicht vorliegt, ist ihr Einfluss auf das hygrothermische Verhalten des Tafelgemäldes vernachlässigbar.

Für die heute braun erscheinende Malschicht legen die Ergebnisse der REM-EDS-Analyse als Hauptbestandteile ein kupferhaltiges Grünpigment, Kreide, ein rotes Eisenoxid sowie Bleiweiß nahe. Eine nähere Bestimmung des Grünpigments ist mit dieser Methode nicht möglich. Die anschließend durchgeführte polarisationsmikroskopische Untersuchung zeigte sehr vereinzelt kleine Malachitkörner. Der Nachweis von Malachit schließt jedoch nicht die Verwendung von Grünspan aus, da dieses Pigment u. a. bei der Probenpräparation häufig zerstört wird (Wülfert 1999, S. 239). Gebunden ist die Farbe in Leinöl. Die rosa Malschicht besteht aus Bleiweiß und einem roten Farblack.

Die beiden Firnisse konnten für die Bindemittelanalyse leider nicht voneinander getrennt untersucht werden. Als Hauptbestandteile wurden Dammarharz sowie Schellack detektiert. Außerdem zeigte sich ein geringer Anteil eines trocknenden Öls, wobei dieses evtl. auch aus der darunterliegenden Farbschicht stammen könnte.[41] Die FTIR-spektroskopische Voruntersuchung deutet darauf hin, dass die obere Schicht vermutlich ausschließlich aus Dammar besteht, der Schellack hingegen eher in der unteren Firnisschicht zu verorten ist[42]. Über die Mengenverhältnisse der einzelnen Bindemittelkomponenten konnten keine näheren Aussagen getroffen werden.

Von der holzsichtigen Rückseite der Tafel konnten Proben von zwei unterschiedlich gebundenen Anstrichen, die übereinander aufgetragen wurden, entnommen werden. Sowohl mittels FTIR-Spektroskopie als auch mittels GC-MS-Analyse zeigte sich, dass die untere Schicht aus Glutinleim besteht, die darüber liegende aus Leinöl. Untersuchungsberichte s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte.

2.2.4 Konservierungsziel

Bereits vor Projektbeginn wurde als Ziel für das Tafelbild in Freising eine „Konservierbarkeit“ angestrebt. Bedingt durch die Schrumpfung des Holzträgers war kein ausreichender Platz mehr für die Niederlegung der Dachschollen vorhanden, ohne diese zu Beschneiden, Stauchen oder Übereinanderlegen zu müssen.

[41] S. Untersuchungsbericht Dipl.-Chem. Frank Mucha, Naturwissenschaftliches Labor, FH Erfurt, 2023, S.2 (Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte).
[42] Informationen laut E-Mail von Frank Mucha (Naturwissenschaftliches Labor, FH Erfurt) vom 16.02.2023.

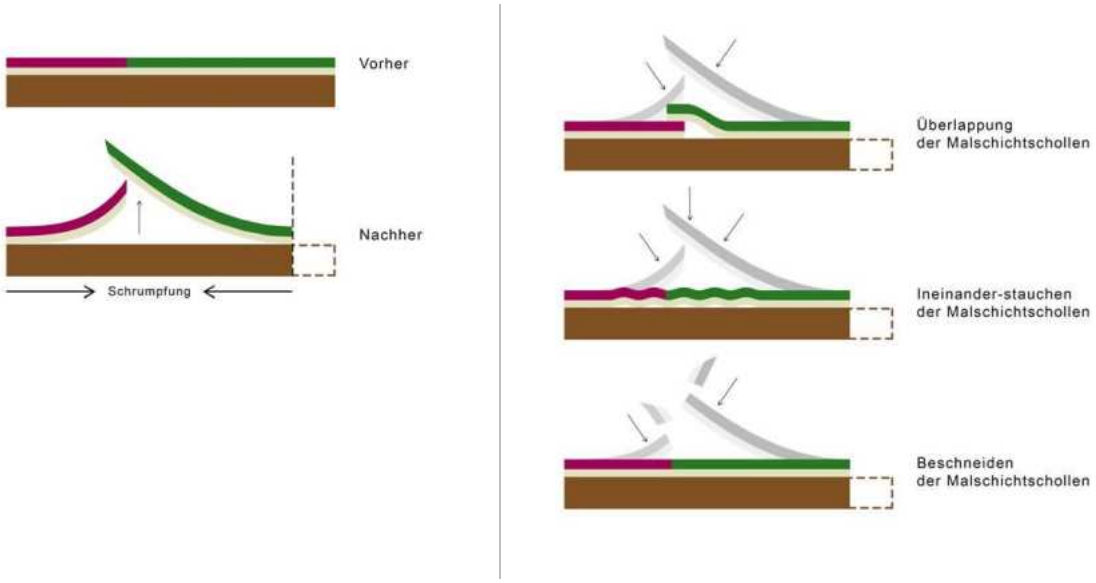

Abbildung 2-17: Skizze zum Niederlegen der Malschichtschollen (Foto: L. Lunau)

Es wurde daher rückgeschlossen, dass durch eine Auffeuchung und einer damit einhergehenden Ausdehnung des Trägers eine Konservierbarkeit der Malerei erreicht werden könnte. Der Frage, ab wann die Dachschollen konservierbar sind, sollte über das Malschichtmonitoring (s. 3.1.6) geklärt werden. Im Zuge der Notfestigung musste zudem eine gelockerte Malschicht-Blase kontrolliert abgenommen und aufbewahrt werden. An dieser Stelle sollte exemplarisch durch eine Laserscan-Messung die Korrelation der Fläche der Fehlstelle mit jener der Farbscholle eine Aussage über den notwendigen Platz zum Niederlegen ermöglichen. Weitere Bereiche mussten im Projektverlauf über makroskopische Sichtungen und einfache Längenmessungen erprobt werden. Art, Umfang und Erreichbarkeit des Ziels „Konservierbarkeit“ sollte im Projektverlauf definiert und erarbeitet werden. Ergebnisse s. 6.3.1.

2.3 Voruntersuchungen und erste Maßnahmen

Bereits in der Vorprojekt-Phase wurde damit begonnen erste Daten (Klima, Holzfeuchte) zu sammeln, um ein möglichst umfassendes Verständnis der klimatischen Bedingungen vor Ort zu erhalten. Darüber hinaus erfolgten im Hinblick auf die geplante Be-/Auffeuchtung und Einrichtung des Monitoringsystems ab Projektbeginn vorbereitende Maßnahmen, die im Folgenden näher beschrieben werden.

2.3.1 Klimaaufzeichnungen

Bereits 1988 ist erstmals die Empfehlung des BLfD zur Aufzeichnung des Raumklimas vor Ort dokumentiert[43], weshalb ab April 1989 Messungen mittels Thermohygrographen durchgeführt wurden. Während der Untersuchungen und Konservierungsmaßnahmen der Firma

[43] Schreiben des BLfD an Freisinger Domrektor B. Haßlberger, Protokoll 7.7.1988 (BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1970 – 1988).

Landskron im Jahr 2016 wurden Klimadaten eines fest installierten Messfühlers (an der Nordwand neben dem Sakristeizugang) ab 2009 ausgelesen. Nach Abschluss der Arbeiten wurden an den Fixierungsstangen der errichteten Arbeitsbühne zwei neue Datenlogger befestigt, die einen Jahreszyklus (20.06.2018 – 19.06.2019) aufzeichneten und 2020 durch die Fa. Landskron ausgelesen wurden. Im Mai 2020 montierte das BLfD zwei neue Klimadatenlogger (EL-USB-Datenlogger[44], *Firma Easylog*) an der Vorder- und Rückseite des Tafelbildes, die erst auf ein stündliches, später auf ein 10-minütiges Intervall eingestellt wurden. Mit Installation des Messsystems ab September 2022 wurden diese durch das neue Datenloggersystem ergänzt, welches die Fernabfrage der Klimawerte in Echtzeit ermöglicht. Näheres dazu und zur Auswertung der Messungen ist in den in den entsprechenden Abschnitten beschrieben (s. 3.1.5 zum Datenmanagement; 3.1.3 und 4.1.3 zum Klimamonitoring).

2.3.2 Messung des elektrischen Widerstands

Zwischen 2020 und 2021 wurden seitens des BLfD in regelmäßigen Abständen Messungen des elektrischen Widerstands mithilfe eines Materialfeuchte-Handgeräts (*Serie 606-2, testo*) durchgeführt[45]. An 34 Messstellen auf drei unterschiedlichen Höhen (25 cm, 140 cm und 210 cm) auf der Tafelrückseite wurde für die Messung das Gerät jeweils fünf Mal an den jeweiligen Messstellen angesetzt und der Mittelwert gebildet. Daraus wurde der Durchschnitt berechnet. Die Messwerte wurden dokumentiert und sollten über den elektrischen Widerstand eine erste Einschätzung zum Feuchtgehalt der Holzbretter sowie Identifikation der vom Durchschnitt abweichenden Holzbrettern möglich machen.

Die Ergebnisse werden kritisch beurteilt, da zum Zeitpunkt der Messungen noch keine Holzartenbestimmung möglich war und die Messspitzen aus restaurierungsethischer Sicht nicht eingeschlagen wurden (oberflächennahe Messung, wo das Holz erwartungsgemäß trockener und der Einfluss der Beschichtung groß ist). Dennoch ist zu vermerken, dass die Messwerte im oberen Bereich höher sind als in den unteren beiden Bereichen. Die Werte der rückseitig betrachtet rechten Tafelseite sind niedriger, jene der linken Seite höher. Außerdem konnten einzelne Bretter bzw. Messpunkte ausgemacht werden, deren Werte sich vom Durchschnitt abheben und dadurch ggf. auf eine Inhomogenität des Holzes, die Messung störende frühere Restaurierungsmaßnahmen (z. B. eingebrachtes Bindemittel), Messfehler oder andere Einflussfaktoren hinweisen. Im Rahmen des Projektes sollten diese Annahmen in Abgleich mit den mittels Schraubelektroden erfassten elektrischen Widerstandsmessungen überprüft werden. Außerdem sollte die Eignung von Materialfeuchtehandgeräten als kostengünstige Methode zum Monitoring des elektrischen Widerstandes („Holzfeuchte“) während einer Auffeuchtung bewertet werden.

[44] Messgenauigkeit: ± 0,5 °C (Temperatur) und ± 3,0 % r.F. (Feuchtigkeitsbereich). URL: https://www.omega.de/pptst/OM-EL-USB-1.html#:~:text=Bei%20aufgesetzter%20Verschlusskappe%20sind%20die,kosteng%C3%BCnstig%20und%20zuverl%C3%A4ssige%20Datenaufzeichnung%20erfordern.&text=Genauigkeit%3A%20%C2%B11%2C0%C2%B0C%20typ. [Stand September 2024].

[45] Entwicklung des Messschemas Dipl.-Rest. Doris Zeidler, damalige Volontärin am BLfD.

2.3.3 Elektrodenauswahl für Widerstandsmessungen

Zu Beginn der Projektlaufzeit wurden an der TUM erste Vorversuche zum Einsatz von Leitgummielektroden und möglichen Fehlerquellen bei der Messung der Holzfeuchte mit ihnen durchgeführt. Speziell sollte der Einfluss der bei Kulturgütern und in der Restaurierung üblichen Beschichtungen auf die Messwerte untersucht werden. Parallel dazu ergaben sich auch Erkenntnisse, die für den Einsatz der Elektroden im Langzeitmonitoring von Bedeutung sind.[46]

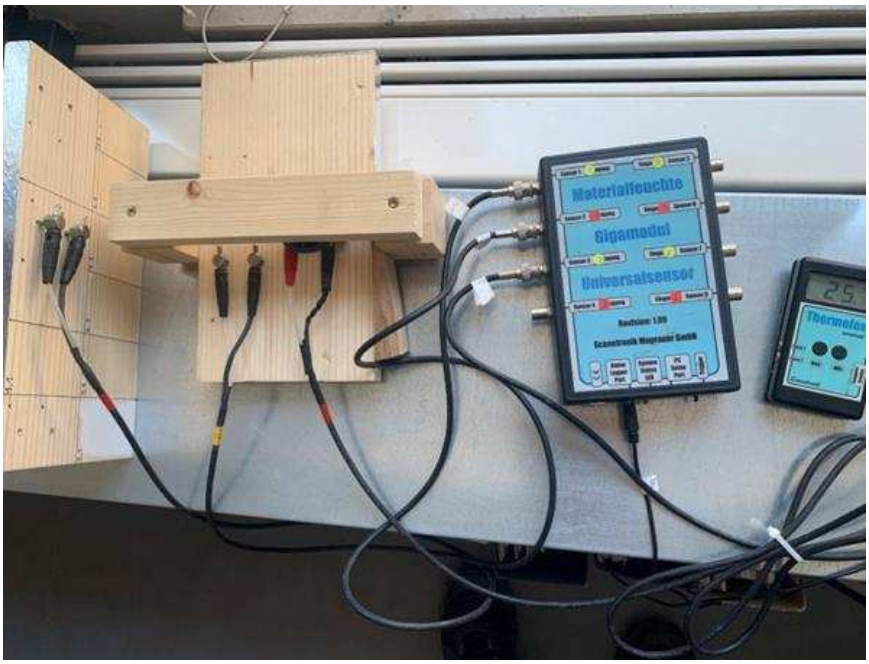

Abbildung 2-18: Probekörper und Holzfeuchtemonitoringsystem, bestehend aus Einschlagelektroden, Verbindungskabeln, Gigamodul (Sensor) und Thermofox (Datenlogger). Der Rahmen um den rechten Probekörper presst die Leitgummielektroden auf die Holzoberfläche. (Foto: Yuxin Jiang, TUM)

Das Monitoring wurde an zwei Probekörpern aus 2 cm dicken Fichtenbrettern durchgeführt (s. Abbildung 2-18). Bei beiden Probekörpern waren die Schmalseiten mit Aluminiumklebeband abgeklebt, um dort eine Feuchteaufnahme zu verhindern. Bei einem Probekörper wurde eine Messfläche gehobelt, die andere wurde mit feinem Sandpapier geschliffen. Auf beiden Seiten wurden sieben Teilflächen markiert und mit unterschiedlichen Anstrichen versehen. So ergaben sich insgesamt 14 unterschiedliche Messflächen für Vergleichsmessungen mit den Leitgummielektroden. Die Materialien für die Anstriche wurden von Vanessa Klee (BLfD) vorbereitet und der TUM zur Verfügung gestellt. Die verwendeten Anstriche sind in Tabelle 2-1 dargestellt.

[46] Die Untersuchungen wurden in Zusammenarbeit mit einem Austauschstudenten, Yuxin Jiang, von der New York University Abu Dhabi im Rahmen des Practical Research Experience Program der TUM (TUM PREP) durchgeführt. Zeitraum waren die Monate Juli und August 2022.

Tabelle 2-1: Bezeichnung der Anstriche und Zuordnung zu den Teilflächen

Bezeichnung (Mischungsverhältnis)	Teilflächennummer*
Schellack in Ethanol (1:4)	1.1, 1.2
Gesso (Champagner- & Bolognakreide, 1:1 in Hautleim 7%)	2.1, 2.2
Mastix in Ethanol (1:6)	3.1, 3.2
Dammar in Balsamterpentin (1:4)	4.1, 4.2
Paraloid B-72 1,5% in Methoxypropanol PM	5.1, 5.2
Leinsamenöl 50 P mit Balsamterpentin (4:3)	6.1, 6.2
Hautleim 7 %	7.1, 7.2

*Format „m.n“: m = Beschichtung, n = Vorbehandlung (1 = geschliffen, 2 = gehobelt)

Die Messwerte der Leitgummielektroden wurden alle 24 Std. mittels einer *Hydromette* der Firma *Gann* erfasst. Die Holzfeuchte beider Probekörper wurde mittels vorgebohrter, teilisolierter Einschlagelektrodenpaare und einem Paar Leitgummielektroden auf dem zweiten Dummie mit einem Messzyklus von 1 Std. gemessen. Hierzu wurde ein *Gigamodul Multisensor* und ein *Thermofox*-Datenlogger der Firma *Scanntronik Mugrauer GmbH* verwendet. Ein weiterer *Thermofox*-Datenlogger diente zur Überwachung der Umgebungstemperatur und relativen Luftfeuchte.

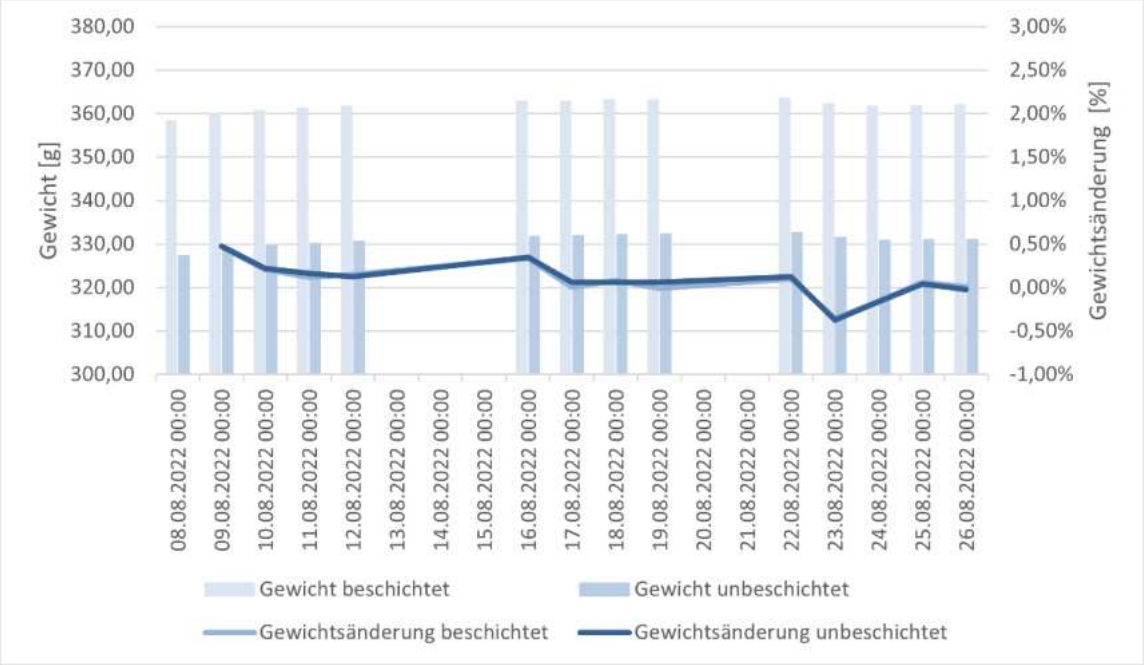

Abbildung 2-19: Ergebnisse der gravimetrischen Messungen (Daten: Yuxin Jiang, TUM)

Die in Abbildung 2-19 dargestellten Ergebnisse der gravimetrischen Feuchtemessung zeigen die Reaktion der Probekörper auf das Umgebungsklima. Da das Klima im Untersuchungszeitraum sehr stabil war, fielen die gemessenen Gewichtsänderungen mit ± 0,5 % sehr gering aus. Die zeitgleich aufgezeichneten Daten der Klima- und Holzfeuchtesensoren sind in Abbildung 2-20 dargestellt. Es zeigt sich deutlich, dass die mittels Leitgummielektroden gemessenen Werte von den mittels Einschlagelektroden gemessenen abweichen. Die Unterschiede sind mit bis zu 3 %-Punkten signifikant größer als die Messungenauigkeit. Vor allem in Hinblick auf ein Langzeitmonitoring wurden die Verformung der Leitgummis unter konstantem

Anpressdruck als kritisch gesehen. Eine solche Verformung hätte zu Messfehlern aufgrund sich ändernder Übergangswiderstände führen können. Zudem war keine einfache Lösung für das Aufbringen des Anpressdrucks ohne Gegendruck auf der Malschichtseite des Gemäldes verfügbar.

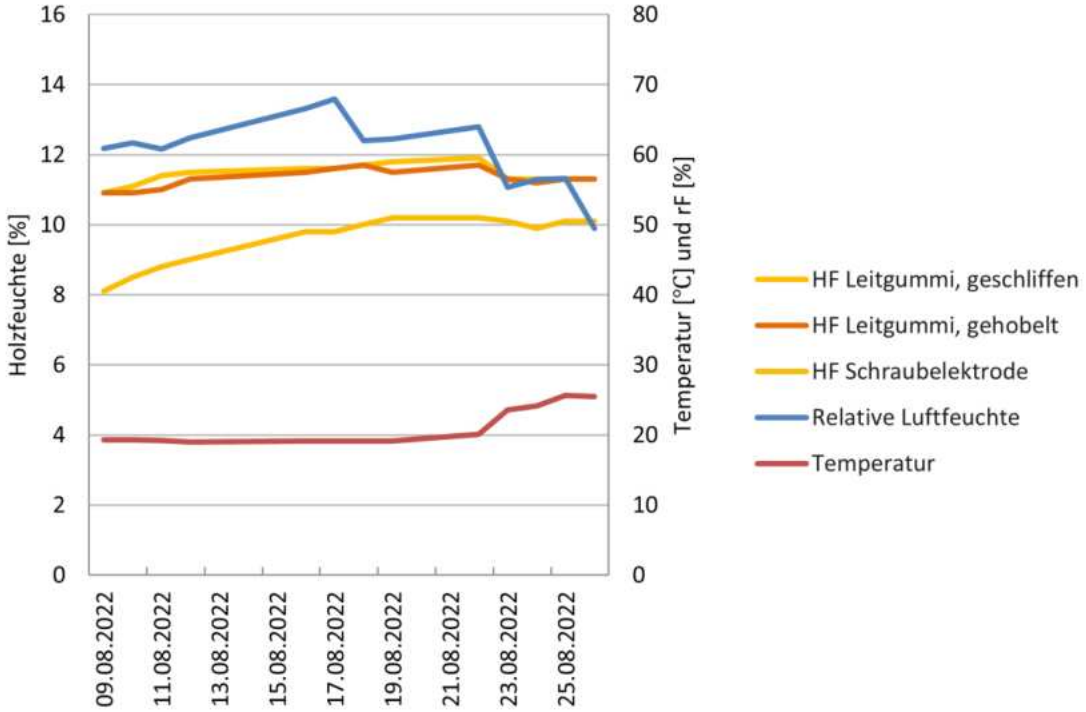

Abbildung 2-20: Messdaten der Klima- und Holzfeuchtesensoren. Die Daten der Leitgummielektroden sind jeweils Mittelwerte der sieben Teilflächen. (Daten: Yuxin Jiang, TUM)

Letztendlich wurde von den Leitgummielektroden auch deshalb Abstand genommen, da der Übergangswiderstand und damit das Messergebnis maßgeblich durch Oberflächenbeschichtungen beeinflusst wird. Die in Abbildung 2-21 dargestellten Holzfeuchte-Messwerte zeigen Abweichungen von 0,9 bis 1,3 %-Punkten zwischen den verschieden beschichteten Teilflächen und damit den Einfluss der Oberflächenbearbeitung und -beschichtung. Diese Abweichungen bewegen sich im Bereich der Messungenauigkeit der elektrischen Widerstandsmessung.

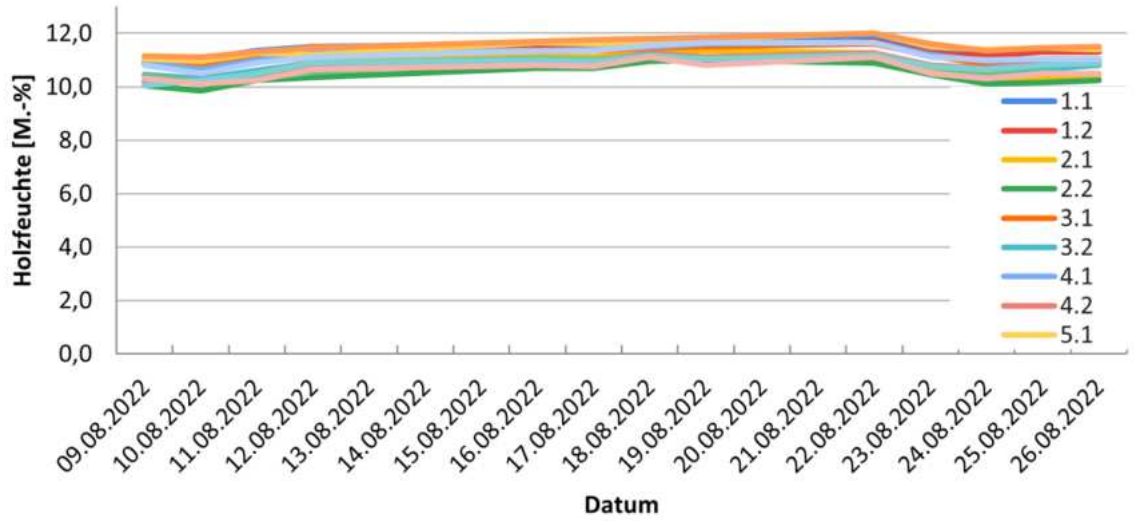

Abbildung 2-21: Messdaten Leitgummielektrode auf unterschiedlichen Beschichtungen. Daten: Yuxin Jiang, TUM)

2.3.4 Notsicherungen

Wie bereits beschrieben wurden seit 2006/07 mehrfach Notsicherungen auf die gelockerten Malschichtbereiche aufgebracht, die deren Verlust verhindern sollten. Aufgrund des zu Jahresbeginn 2022 weiter verschlechterten Zustands der Malschichtlockerungen, sowie als Schutzmaßnahme bei möglichen Erschütterungen durch den Bau der geplanten Einhausung bzw. durch die zum damaligen Zeitpunkt aktive Großbaustelle am Domberg, ergab sich die Notwendigkeit zur Durchführung weiterer Notsicherungen (s. Abbildung 2-22). Die Auswahl des Klebstoffes musste aus Zeitgründen verkürzt erfolgen und wurde mit Hilfe einer kleinen Testreihe zur Klebefähigkeit und Klebekraft der Materialien und deren Reversibilität auf dem vorhandenen Firnis (Testreihe s. Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte) ermittelt. Mit *Tylose MH300* (2 % in demin. Wasser) und Japanpapier konnte das beste Ergebnis erzielt werden.[47]

Die Notsicherungspapiere von 2016 wurden flächig über die gelockerten Malschichtbereiche geklebt (s. Abbildung 2-23). Durch die Kraft der aufstehenden Dachschollen wurden diese zum Teil gedehnt bzw. begannen sie zu reißen. Deshalb wurden innerhalb des Projektes zwei andere Möglichkeiten zur Sicherung erprobt. Zum einen wurden die gelockerten und dachförmig aufstehenden Malschichtschollen nicht direkt mit dem Vlies verklebt, sondern zu ihrer Sicherung ein Netz aus dem Vlies darüber gespannt und an direkt angrenzenden intakten Bereichen angeklebt (s. Abbildung 2-24). Dies sollte weiterhin ein Aufkleben auf flächig stark gelockerten Bereichen und potenzielle Ablösung dieser Farbschichten verhindern. Zum anderen wurden aus dem Vlies schmale Streifen geschnitten oder gerissen, um mit diesen

[47] Die Durchführung und Auswertung des Tests erfolgte durch Dipl.-Rest. Judith Regensburger (ehem. wiss. Mitarbeiterin im DBU-Projekt, BLfD). Ergänzung [BLfD, 29.07.2024]: die Auswahl der Klebstoffe erfolgte 2022 anhand damals vorliegender Restaurierungsberichte (Diözesanmuseum, 1989; Hess & Thieme 2006/07; Landskron 2016). Als Materialien wurden vor 2022 bereits Gelatine (1989, Festigung) Störleim (2006/07, Vornetzen mit 0,5 % Surfinol in Wasser; Festigung mit 4%igem Störleim) sowie Klucel EF (2016, nach Tests im Vergleich mit 4%igem Störleim) angewendet. Die Entscheidung fiel daher und anhand der praktischen Versuche auf den Celluloseether Tylose® MH300. Weitere zu berücksichtigende Faktoren bei der Klebstoffauswahl s. 7.1.4.1 Bewertung der Notsicherungsmethoden und 7.1.4.6 Konsolidierung der Malschicht. Oddy-Tests zu Celluloseethern s. Steger et al., 2022.

Streifen einzelne Schollen gezielt auf intakte Bereiche der Malschicht rückzusichern (s. Abbildung 2-25). Die grundsätzliche Überlegung hinter diesen Techniken liegt darin, die Schollen bestmöglich zu schützen und ihnen zum anderen im Hinblick auf die spätere Konditionierung und daraus folgende Ausdehnung der Holztafel Bewegungsfreiheit zu geben und sie nicht durch evtl. vorhandene Zugspannung am Niederlegen zu behindern. Eine abschließende Bewertung der unterschiedlichen Methoden findet sich in Abschnitt 7.1.4.

Nach dem Einbau der Einhausung wurden an zwei Bereichen die Sicherungen wieder abgenommen, die als Referenzflächen für die 3D-Scans dienen sollten. Das aufliegende Japanpapier hätte zu einem relativ großen Informationsverlust bei der Messung geführt. In Bereichen, in denen die Stabilität der Malschichtschollen als unkritisch bewertet wurde, konnten die Notsicherungen abgenommen werden. In besonders sensiblen und fragilen Bereichen wurden sie trotz des Informationsverlustes belassen.

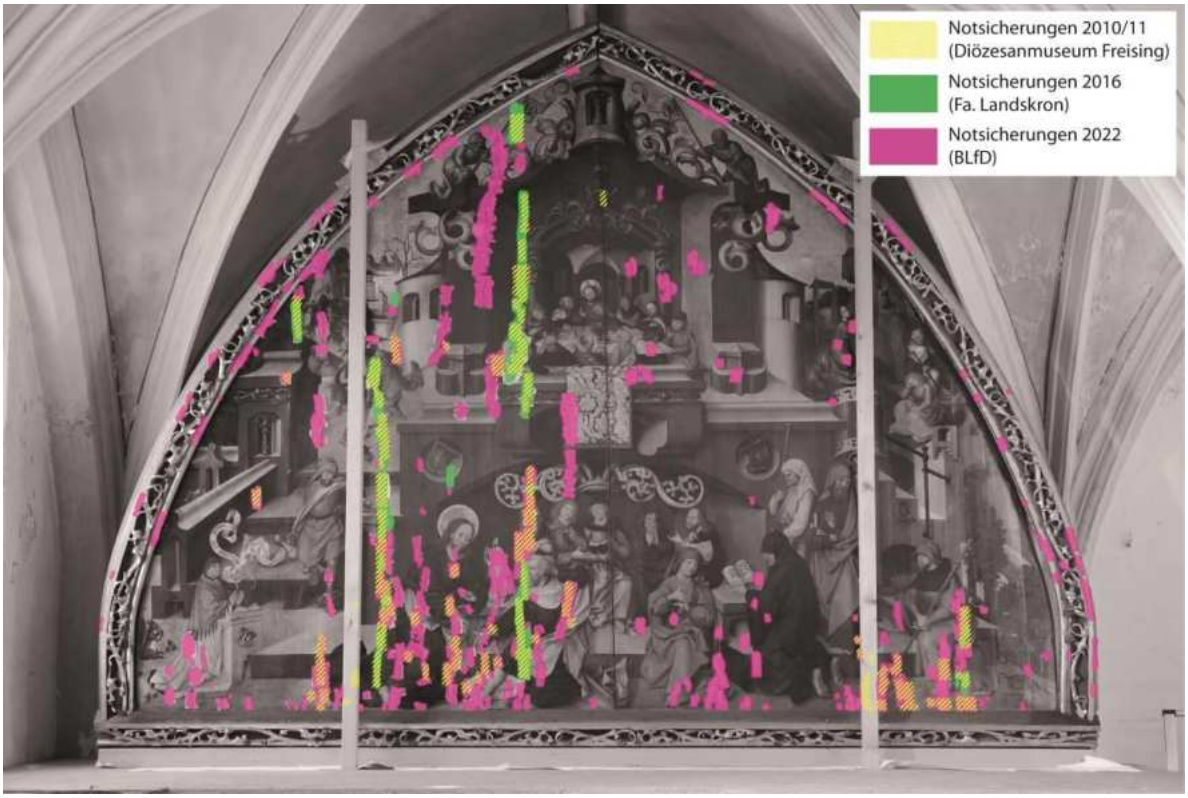

Abbildung 2-22: Kartierung der Notsicherungen zwischen 2011 – 2022 (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann).

Abbildung 2-23: Flächige Kaschierung gelockerter Malschichtbereiche von 2016 (Foto: T. Hilger, BLfD).

Abbildung 2-24: Überspannung der gelockerten Malschichtbereiche von 2022 (Foto: T. Hilger, BLfD).

Abbildung 2-25: Sicherung entlang der Schollenränder von 2022 (Foto: T. Hilger, BLfD).

2.3.5 Bau einer Einhausung

Um das Gemälde vor den Einflüssen der Nutzung und den damit verbundenen Klimaschwankungen zu schützen und somit vor weiteren Schäden zu bewahren, wurde es mittels einer Einhausung von der Sakristei abgekoppelt. Anforderungen für den Bau s. Anhang B: Voruntersuchungen. Die Einhausung misst 5,25 x 5,20 x 4,65 m und umfasst damit ein Raumvolumen von ca. 120 m^3.[48] Der neu geschaffene Raum lässt sich über eine dem Gemälde gegenüberliegende und abschließbare Tür betreten (s. Abbildung 2-26/Abbildung 2-27). Der gesamte Aufbau ist so konzipiert, dass keine Eingriffe in die historische Raumschale notwendig waren und er problemlos rückbaubar ist. Die Aussteifung der Einhausung erfolgt über Stützen aus Fichtenholz sowohl innerhalb als auch außerhalb der Einhausung über bereits in der Wand befindliche Haken. Zum Schutz des Bodens wurden Hartfaserplatten ausgelegt.

Die Einhausung selbst wurde als Trockenbauwand aus einem Metallständerwerk, Gipskartonplatten (Spezifikation für Räume mit erhöhter Luftfeuchte), Gips zum Verspachteln der Stöße und Mineralwolle als Dämmmaterial gefertigt. Die umlaufende Fuge der Trockenbauwand zum Bestand wurde zusätzlich mittels dampfdiffusionsdichter Folie abgedichtet. Die Folie wird durch Dämmmaterial formschlüssig an die historische Bausubstanz angedrückt. Die Außenseite der Einhausung wurde weiß gestrichen.

Im Vorfeld des Baus der Einhausung musste ein Sakristeischrank aufgrund seiner Größe und Position umgelagert werden. Über die Projektlaufzeit stand dieser im Raum vor der Sakristei. Die dem Retabel zugehörige Mensa, die sich unterhalb der Arbeitstribüne befand, wurde aus präventiven Gründen ausgebaut.[49] Zum einen war deren Verbleib in der Einhausung nicht erforderlich, zum anderen bestanden Bedenken, dass die Mensa durch die geplante Befeuchtung einem unnötigen Schadensrisiko ausgesetzt werden könnte. Während des Baus der Einhausung in wenigen Tagen wurde das Gemälde mittels eines textilen Staubschutzes (*Tyvek®*) von den Arbeiten abgeschirmt. Für die Laufzeit des Projektes wurde ein Begehungsprotokoll (Datum, Personenanzahl, Begehungsgrund und -zeitraum) vor Ort angebracht, um etwaige Schwankungen der Messwerte rückführen zu können. Weiterhin Empfehlen sich Anleitungen und Checklisten für die Wartung und Pflege der Messtechnik, Be- und Entfeuchter sowie konservatorisches Monitoring und Klimamessungen. Bewertung der Einhausung s. Kapitel 3.4 und 6.3; Exemplarische Checkliste für Wartung und Pflege s. Anhang B: Voruntersuchungen).

[48] Der Bau der Einhausung wurde als Sponsoring an den Domberg Freising von der Firma Adldinger Unternehmensgruppe, Ringstraße 56, 85402 Kranzberg durchgeführt.
[49] Hier sollten eine separate Zustandsuntersuchung und ggf. konservatorische Maßnahmen erfolgen. Ein Ausbau wäre solange die Einhausung steht nicht mehr möglich.

Abbildung 2-26: Außenansicht temporäre Einhausung Richtung Südwesten (Foto: T. Hilger, BLfD).

Abbildung 2-27: Innenansicht temporäre Einhausung Richtung Süden (Foto: T. Hilger, BLfD).

2.3.6 Lichtschutz

Innerhalb der Einhausung befindet sich in der südlichen Außenwand ein Fenster, durch welches das Gemälde am jetzigen Standort je nach Tageszeit der direkten Sonneneinstrahlung ausgesetzt ist (s. Abbildung 2-27). Aus konservatorischen Gründen und zur Durchführung der Zeitrafferaufnahmen wurde zu Beginn des Projektes ein Lichtschutz im Außenbereich zwischen Fenster und Gitter angebracht.

Für das Material bestanden folgende Anforderungen: es sollte den Einflüssen im Außenbereich standhalten (Wind, Frost, starke Sonneneinstrahlung/Wärme, Regen, Nebel, Kondensationsfeuchte, etc.) und Schutz vor Global-, IR- und UV-Strahlung bieten. Darüber hinaus war eine gewisse Dämmwirkung wünschenswert. Da dieses Fenster der Domsakristei von außen nicht direkt einsehbar ist und es sich um eine temporäre Maßnahme handelte, waren ästhetische Anforderungen (Oberflächengestalt, Farbe und Reflexion) des angebrachten Materials nachrangig.

Zunächst wurde eine Auto-Frontscheibenabdeckung aus reflektierender Isolierfolie mittels zwei in die Fensterlaibung eingespannten Teleskopgardinenstangen befestigt (s. Abbildung 2-28).[50] Da die Abdeckung aufgrund ihres Formats nicht für ausreichend Abdunkelung in der Einhausung sorgte, wurde diese im Dezember 2022 durch ein äquivalentes Material (Meterware, Thermostoff *Isotherm*) ersetzt. Die Befestigung erfolgte durch Magneten und Klettverschluss (s. Abbildung 2-29).

[50] Verwendete Materialien: Auto-Frontscheibenabdeckung (cartrend), ausdrehbare Gardinen-Sannstange aus Metall (GARDINIA Spannstange, ausziehbar 80-130 cm), doppelseitiges Klebeband (RENOVO).

Abbildung 2-28: Erste Variante Lichtschutz mit Autofrontscheibenabdeckung (Foto: J. Regensburger, BLfD).

Abbildung 2-29: Zweite Variante Lichtschutz zur flächigen Abdunkelung (Foto: T. Hilger, BLfD).

2.3.7 Biozid-Screening

Die vor allem im unteren Bereich des Tafelgemäldes sichtbaren Fraßgänge und Ausfluglöcher wiesen auf einen ehemaligen Anobienbefall hin. Aus der Aktenrecherche ging allerdings nicht eindeutig hervor, ob und wie das Gemälde dagegen behandelt wurde. Es war zunächst unklar, ob die rückseitig aufgebrachten Überzüge ein historischer Rückseitenschutz, Bindemittel zur Holzfestigung oder ein Hinweis auf Schadstoffe sein könnten. Schon während der Entstehungszeit des Gemäldes waren diverse Methoden zum Holzschutz bekannt, deren Palette sich bis ins 20. Jahrhundert stetig erweiterte (Unger 1990, S. 35-64, S. 157). Mittels einer Staubprobe wurden im Biozid-Screening daher auf die Prüfgruppen Organo-Chlor-Biozide, Organo-Phosphor-Biozide, Pyrethroide, Pyrethrum, Piperonylbutoxid und toxische Metalle (insbesondere Quecksilber und Arsen) getestet. Die Analyse wurde im *ARGUK Umweltlabor GmbH* durchgeführt. Aus dem Untersuchungsbefund zum Vorkommen von toxischen Metallen im Bodenstaub (s. Prüfbericht ARGUK 2022-7913-2) war eine Prüfung auf eine Raumluftbelastung durch Quecksilber begründet[51]. Zu prüfen ist, ob der Vorsorgewert (Richtwert I (RWI)) für Quecksilber (35 ng/m^3) in den belasteten Räumen unterschritten wird. Eine erhöhte Belastung (> RWI) über einen Zeitraum von 12 Monaten ist aus Gründen der Gesundheitsvorsorge nicht akzeptabel. Bei einer Überschreitung des Einschreitwerts (RW II, Quecksilber 350 ng/m^3) besteht unverzüglicher Handlungsbedarf.

[51] Beauftragung durch die Domkirchenstiftung Freising.

Aufgrund des Minimierungsgebots für Gefahrstoffe/CMR-Stoffe und aus Gründen der gesundheitlichen Vorsorge wird die Einhaltung des Vorsorgewerts (RW I)/Gefahrenwert angestrebt. Die in der Folge durchgeführten Röntgenfluoreszenzanalysen des BLfD wiesen bereits auf Farbpigmente als Ursprung der Belastung hin. Die erweiterten Analysen zeigten keine erhöhte Belastung in der Luft. Der Vorsorgewert für Quecksilber (Richtwert I 35 ng/m3) wird nicht überschritten. Eine Minimierung der Exposition konnte demnach durch einfache Schutzmaßnahmen (Verhinderung von Hautkontakt mit und oraler Aufnahme von Partikeln) erfolgen, um die Beschäftigten bei Arbeiten am Objekt zu schützen.

3 Konzeptentwicklung und Monitoring

Nach der Grundlagenermittlung erfolgte die inhaltliche Bearbeitung der Kernaspekte des Forschungsvorhabens. In interdisziplinärer Zusammenarbeit wurde dabei zunächst ein geeignetes Mess- und Monitoringkonzept geplant und in situ umgesetzt. Parallel dazu fanden hygrothermische Simulationen, Klimaschrankversuche an eigens hergestellten Probekörpern und zahlreiche begleitende Untersuchungen statt. Dadurch konnten Risiken besser abgeschätzt und mit der aktiven Klimatisierung begonnen werden. Aufbauend auf diesen Arbeiten wurden ein Konservierungskonzept und verschiedene Lösungsansätze entwickelt.

Für die Konzeption waren insbesondere die Festlegung notwendiger Messgrößen, -dauer, Sensorpositionierung, -auswahl und Messgenauigkeit, Intervalle und Kosten von Bedeutung. Generell sollte für die ganzheitliche Analyse und Bewertung der Forschungsfrage(n) ein Klima-, Holzträger- und Malschichtmonitoring erfolgen.

Bezüglich der Messintervalle gilt, je kürzer das Intervall, desto besser werden kurzzeitige Schwankungen abgebildet. Häufig werden deshalb für derartige Projekte Intervalle zwischen 10 bis max. 15 min gewählt. In Ausnahmefällen (weniger genutzte Denkmäler, Vermeidung zu großer Datenmengen und längere Haltbarkeit des Speichers) kann ein Intervall von z. B. 60 min ausreichen. Alle zuvor beschriebenen Punkte (Messgrößen, -dauer, Sensorpositionierung, -auswahl und Messgenauigkeit, Intervalle) sollten während der Durchführung, aber v. a. im Nachgang verständlich dokumentiert und archiviert werden. S. Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring. Es sollten darüber hinaus auf Beeinträchtigungen (z. B. Ausfall von Messtechnik oder andere Auffälligkeiten) hingewiesen werden. Die Aufbereitung (z. B. als Graphen oder Diagramme; u. a. Wochen-, Monats- oder Jahresübersichten) mit entsprechender Legende (inkl. nachvollziehbarer Bezeichnungen und Maßstäbe) sowie eine Auswertung, Interpretation und Speicherung der Rohdaten ist sinnvoll. In den folgenden Unterpunkten wird genauer auf die Entwicklung der einzelnen Monitoring-Methoden und Messgrößen eingegangen. S. a. Birkenbeul & Lohse, 2019; Reeb & Garrecht, 2019; Reeb, 2023.

3.1 Mess- und Monitoringkonzept

Das verwendete Mess- und Monitoringkonzept umfasst diverse Sensoren zur Überwachung des Raumklimas, seiner Änderungen und der Reaktionen der Holztafel auf diese Änderungen. Es entstand in Kooperation des interdisziplinären Forschungsteams im Austausch mit zahlreichen weiteren Fachleuten. Berücksichtigt wurden neben Mikroklima, Raumklima, Witterung, nutzungsbedingte Einflüsse, solare Einträge, Risikopotenzial biogenen Befalls, Tauwasserausfall/Kondensationsrisiken und weitere Aspekte (z. B. Betriebsdauer von mind. 12 Monaten, angepasste Intervalle, geeignete Sensorpositionen, unterschiedliche Messgrößen und deren Messgenauigkeiten Installation des Systems, Datenaufbereitung und Überwachung, etc.). In Abbildung 3-1 ist die eingesetzte Messtechnik schematisch dargestellt. Linien deuten Datenverbindungen an.

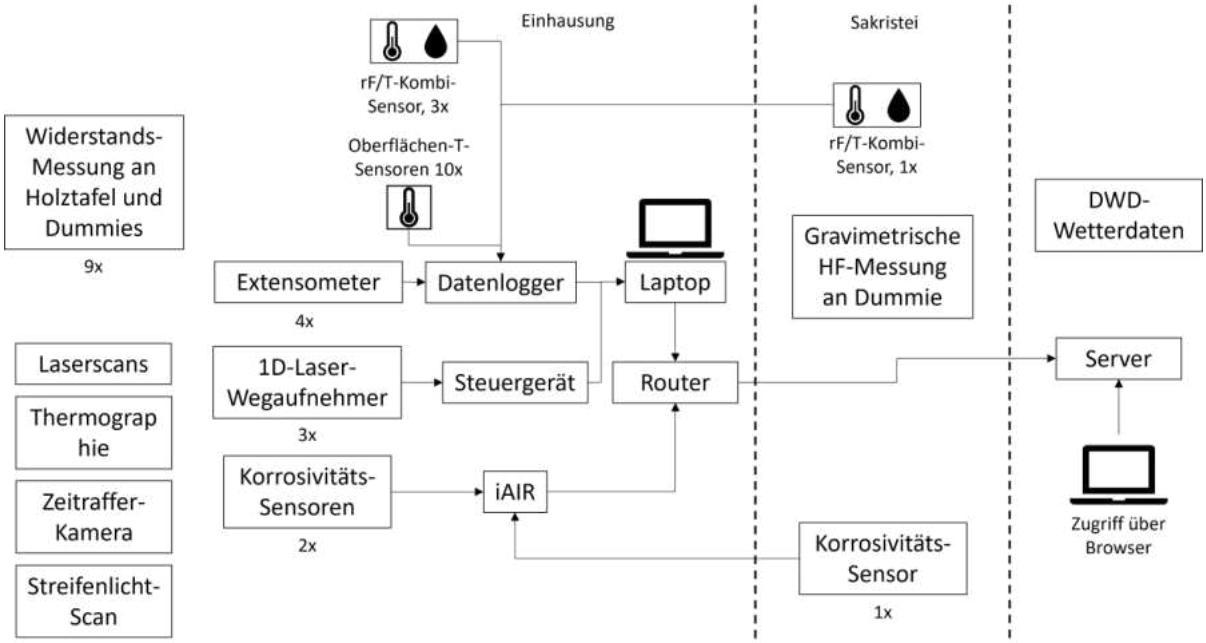

Abbildung 3-1: Schema Messsystem

Die Messtechnik wurde einerseits mittels einer Stützkonstruktion (s. Abschnitt 3.1.1) am und um das Holztafelbild fest installiert und andererseits für Einzelmessungen auf- und wieder abgebaut. Die mobile Messtechnik ist im Schema links zu finden (Laserscans, Thermographie, Streifenlichtscan). Abbildung 3-2 und Abbildung 3-3 zeigen die genaue Position der am Tafelgemälde angebrachten Sensoren. Die Verortung aller verbauten Sensoren ist in Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring zu finden.

Abbildung 3-2: Verortung Messsensoren auf Gemäldevorderseite
(Foto: G. Petta; Bearbeitung: M. Hörmann (BLfD).

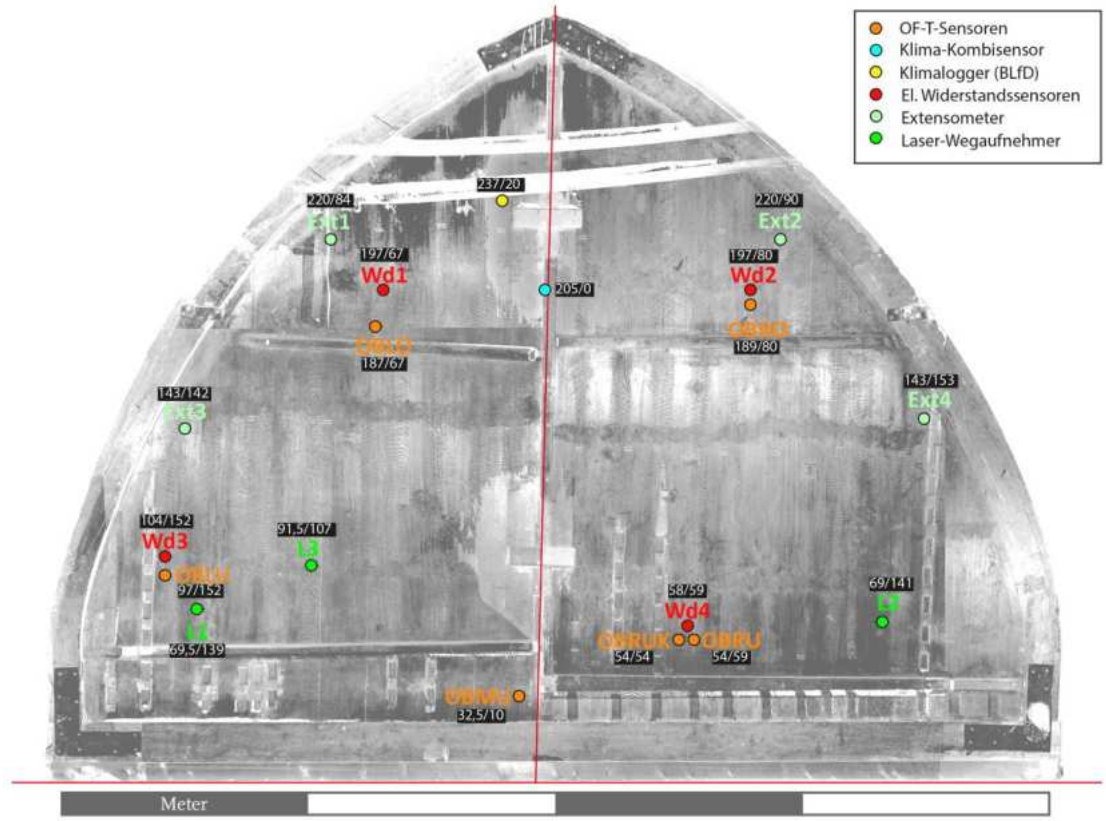

Abbildung 3-3: Verortung der Messsensoren auf der Gemälderückseite
(Foto: L. Pallas, KDWT; Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD).

Weiterhin wurde im August 2022 ein Stromzähler an jener Steckdose installiert, welche die Messtechnik in der Einhausung mit Strom versorgt. Es erfolgte eine ca. monatliche Ablesung der Kilowattstunden (kWh) und elektrische Leistung P (in Watt (W)). Somit sollten neben dem Stromverbrauch auch die Kosten beobachtet werden und eine spätere Prüfung der Nachhaltigkeit eines solch umfassenden Systems ermöglichen.

3.1.1 Stützkonstruktion

Aufgrund des durch das trockene Klima in der Sakristei verschlechterten Zustands (weiter geschwunden, stärker aufgestellte Malschichtschollen) der Tafel im März 2022 wurde von früheren Überlegungen, die Tafel wieder an den Ösen aufzuhängen, abgesehen. Auch eine horizontale Lagerung wurde diskutiert, um das Herabfallen von Malschichtschollen zu verhindern. Die beim Umbau auftretenden Erschütterungen und die Lastveränderung durch die veränderte Position erschienen allen Projektpartnern als nicht akzeptabel. Es wurde entschieden, das Gemälde an Ort und Stelle zu belassen, bis sich der Zustand verbessert hat bzw. Konsolidierungsmaßnahmen möglich sind. Alle Arbeiten am und um das Gemälde sollten daher möglichst berührungsfrei und erschütterungsarm gestaltet werden.

Zu Projektbeginn erschien eine Entkopplung des Tafelbilds und der (Messgeräte-)Stützkonstruktion vom Podest als wünschenswert, um die Qualität und Aussagekraft der Messdaten zu erhöhen. Das Betreten des Podests führte zu Bewegungen der gesamten Konstruktion. Hierbei standen mehrere Varianten zu Diskussion:

1. Entkopplung der Kanthölzer, die die Tafel bislang aufrecht halten, von der Stützkonstruktion des Podests (Spalt mit elastischer Füllung, eigene Fußpunkte für die Kanthölzer).
2. Errichtung einer Stahlkonstruktion, an welcher sowohl das Tafelbild gehängt als auch die CFK-Rohre für die Messtechnik angebracht werden. Diese Konstruktion wäre vorteilhaft, da der Stahl weniger stark auf Temperatur- und Luftfeuchteschwankungen reagiert als die bisherige Holzkonstruktion.
3. Tafel und Podest werden unverändert belassen, und ein separates Messgerüst wird errichtet.

Da davon auszugehen war, dass die für die Entkopplung nötigen Umbauten zu unverträglich starken Erschütterungen führen, wurde die dritte Variante gewählt. Eine Vermeidung weiterer Schäden war höher zu werten als die genaueren Messergebnisse.

Bei Testmessungen stellte sich heraus, dass die Bewegungen des Podests und des Tafelbilds tolerierbar sind. Zwar registrieren die Wegaufnehmer das Betreten des Podests, jedoch sind diese Schwankungen sehr kurzfristig und meist kleiner als ± 0,02 mm. Als zusätzliche Maßnahme wurde jeweils vor Ort das Betreten der Einhausung protokolliert, um mögliche Ausreißer, auch im Raumklima, später nachvollziehen und von der Analyse ausschließen zu können.

Abbildung 3-4: Messgerüst mit der angeschlossenen Messtechnik. (Foto: A. Fröhlich, TUM)

Um eine leichte Verarbeitung mit hoher Flexibilität zu verbinden, wurde das Traggerüst für die Messtechnik aus Aluminium-Profilschienen mit 40 x 40 mm Querschnitt zusammengesetzt. So konnten auch während des Projektverlaufs einfach und schnell Befestigungspunkte ergänzt, verschoben oder entfernt werden. Aus den Profilschienen wurde ein Rahmen zusammengesetzt, der die Wegaufnehmer und die weiteren Sensoren wie die r.F.-T-Kombisensoren trägt. Der Rahmen ist mit dem Podest verschraubt und die horizontale Lagesicherung erfolgt an den bereits vorhandenen Wandhaken, an denen das Holztafelbild ursprünglich hing. Somit ist kein Eingriff in die historische Bausubstanz notwendig.

Sowohl die Montagepunkte der Messtechnik als auch die horizontale Lagesicherung wurde dabei in carbonfaserverstärktem Kunststoff (CFK) ausgeführt. CFK wurde aufgrund seiner Unempfindlichkeit gegenüber Änderungen der relativen Luftfeuchte und des sehr geringen Wärmeausdehnungskoeffizienten gewählt. So ist ein möglichst konstanter Abstand der Messgeräte innerhalb einer Ebene und zum Tafelbild sichergestellt. Bei dem vorliegenden Abstand des Gerüsts von der Wand und einer Temperaturschwankung von 20 K im Jahresverlauf entstünde bei einer Verwendung von Aluminium-Elementen durch die thermische Ausdehnung bzw. Kontraktion ein Messfehler von ca. 0,5 mm. Dies wurde durch den Einsatz von CFK verhindert. Die CFK-Lamellen wurden an einem Auflager fixiert und am anderen Auflager gleitend gelagert. Dies ermöglicht die thermische Ausdehnung des Aluminiumrahmens, ohne Zwänge auf die CFK-Rohre auszuüben. Für die gleitende Lagerung wurde das Gleitfolien-Klebeband *iglidur®* der Firma *igus* verwendet.

Die Verbindungswinkel und -schellen, mit denen die Sensoren an den CFK-Rohren befestigt wurden, sind aus einem 1,5 mm starkem Blech gefertigt und mit Edelstahlbolzen verschraubt. Fast das komplette System ist somit modular und demontierbar und kann für zukünftige Forschungsprojekte modifiziert oder wiederverwendet werden.

3.1.2 Sensoranbringung

Internationale Chartas und Richtlinien fassen laut Verband der Restauratoren e. V. (2017) die wichtigsten Orientierungen und Prinzipien zusammen und gelten für allgemein akzeptiertes, moralisches Handeln in den Disziplinen der Denkmalpflege, Konservierung und Restaurierung. Daneben sind dort auch Handlungsanweisungen der gesetzlichen europäischen und nationalen Normen erfasst. Restaurierungsethik ist häufig ein Überbegriff für die Schaffung von verantwortbaren Grundsätzen der konservatorischen und restauratorischen Praxis. Für die Entscheidung was „gut" oder „richtig" für das entsprechende Kunstwerk und seine Problemstellung ist, werden Wissen um Material/-Verhalten (u. a. Chemie, Biologie, (Kunst-) Geschichte), (Berufs-) Erfahrungen und für die praktische Ausführung auch handwerkliches Geschick vorausgesetzt. Auch ein restaurierungsethisches Gewissen ist von Bedeutung, um nach den aktuell geltenden fachlichen Grundsätzen zu handeln. Diese können sich im Laufe der Zeit jedoch auch ändern und sind meistens keine absolute Wahrheit; weiterhin sind sie z. T. durch Zeitgeschehnisse oder Umweltbedingungen beeinflusst. Siehe auch Janis (2005) oder Schädler-Saub (2019).

Im vorliegenden Projekt kamen vor allem bezüglich der ethischen Vertretbarkeit der Sensorbefestigung an einem originalen Kunstwerk, der Abnahme von Notsicherungsmaßnahmen zu Gunsten bildgebender Verfahren sowie dem Risiko der Befeuchtung generell Bedenken auf. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt. Die Auswahl der Messstellen erfolgte 2022 im Kernteam und wurde in drei Kategorien eingeteilt:

A) Sensoren und Messtechnik OHNE Kunstwerkkontakt
u. a. Be- und Entfeuchter; Ventilator; AtemX Luftfiltergerät; Mess-PC, Router, Steuergeräte; Datenlogger; Messgeräte / Sensoren des Klimas; Messgeräte/Sensoren der Korrosivität und Luftqualität; Zeitrafferkamera; Waage

B) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → reversible Anbringung
Oberflächentemperatursensoren, Extensometer, Triangulationslaser, Millimeterpapier

C) Sensoren und Messtechnik MIT Kunstwerkkontakt → irreversible Anbringung
Schraubelektroden für elektrischen Widerstand (sog. Holzfeuchte)

Auswahlkriterien der Messpunkte und Verortung der Sensoren s. Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring sowie bei den jeweiligen Unterkapiteln 3.1.3, 3.1.4 und 3.1.7. Im Folgenden wird nur auf die reversible Anbringung jener Messtechnik mit Kunstwerkkontakt eingegangen, die direkt auf der Oberfläche zu befestigen war sowie jene Sensoren und Messtechnik mit Kunstwerkkontakt und irreversibler Anbringung.

Alle Sensoren mit Kunstwerkkontakt sollten möglichst so appliziert werden, dass sie sowohl bei Anbringung als auch Demontage das Tafelgemälde nicht schädigen. Sie sollten bei Bedarf leicht zu entfernen sein, ohne sich jedoch über den Zeitraum der Messung zu lösen.

Die Oberflächentemperatursensoren (OF-T) befanden sich vorwiegend auf der Holztafelrückseite, um die fragile Malschicht der Vorderseite nicht zu schädigen und die OF-Temperaturen möglichst nah an den Messpunkten des elektrischen Widerstandes ermitteln zu können.

Außerdem wurden Sensoren an der Außenwand oberhalb der Tribüne, an der kondensationsgefährdeten Außenwand unterhalb der Tribüne und an der Wand hinter dem Tafelgemälde angebracht. Ein Sensor wurde auf der Vorderseite des Gemäldes mit der unten beschriebenen Methode «sticky-note» für empfindliche Oberflächen montiert. Mit derselben Methode wurde ein Referenzsensor auf der Rückseite direkt neben einem Sensor mit einer bereits länger erprobten und abgewandelten Methode befestigt. Über die Laufzeit des Projektes wurden die beiden Methoden miteinander verglichen, um abschließend die Eignung der konservatorisch schonenderen Anbringung der «sticky-note» beurteilen zu können (s. Abschnitt 4.1.2).

Als Ausgangspunkt für die Überlegungen zur Anbringung dienten zwei Publikationen, die bereits Methoden zur Sensoranbringung an Kulturgütern beschreiben. Bei Raffler et al. (2015) werden mehrere Lagen Japanpapier mit Celluloseethern/Acrylaten/Cyclododecan (je nach Objektanforderung) auf der Oberfläche appliziert. Der Sensor wird anschließend mittels Heißkleber darauf montiert. Uzielli et al. (2012) stellt eine Methode vor, bei der Japanpapier mit Gelatine auf den Holzträger geklebt wird. Anschließend wird darauf Sperrholz mittels Vinylkleber befestigt, an denen die Sensoren angebracht werden können.

Versuche an Probekörpern (s. Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring) ergaben, dass der warme Heißsiegelkleber auch bei mehreren Lagen Japanpapier auf die Oberfläche dringt und die Ablösung erschwert. Die Befeuchtung mit Wasser an den mit Heißsiegelkleber bedeckten Bereichen geschieht nur unzureichend, die Methylcellulose wird dadurch nicht erweicht. Die Folge waren Schäden an empfindlichen Oberflächen bei allen Versuchen.

Für die vergleichsweise unempfindliche Rückseite und die Wand sollte die am BLfD abgewandelte und weiterentwickelte Methode angewandt werden. Dafür wurde eine Abfolge aus Japanpapier – Hollytex® dünn – Japanpapier mit dem Pinsel und Celluloseether Tylose® MH 300 5% in Wasser (Auftrag nass in nass; Trocknungszeit mind. 3 – 7 Tage) auf die Oberfläche aufgebracht. Der Sensorkopf wird mit Heißkleber aus der Heißklebepistole befestigt; er muss dafür recht zügig und mit adäquatem Druck in den Tropfen aus heißem Klebstoff eingedrückt werden. Die Fläche der Papiere sollte groß genug sein, die umliegenden Bereiche vor dem Heißsiegelkleber zu schützen und eine gute Verarbeitung zu gewährleisten; im vorliegenden Fall waren es ca. 4 x 6 cm. Die Anbringung der Extensometer erfolgte analog dieser Technik mittels *Tylose® MH300* 5 % auf dreilagigem Schichtenaufbau. Das Gegenstück des Extensometers wurde auf ein Holzklötzchen geschraubt und mit Heißsiegelkleber auf den Japanpapieren befestigt. Die Auswahl des Klebstoffs Tylose® MH300 erfolgte anhand der Testreihe zur Notsicherung 2.3.4.

Für die Vorderseite kam diese Methode aufgrund der Vorversuche nicht infrage. Stattdessen sollte eine Methode für empfindliche Oberflächen gefunden werden. Ziel dabei war es, eine Aushärtung des Heißsiegelklebers außerhalb der Bildoberfläche zu ermöglichen und damit den notwendigen Anpressdruck und Wärmeeinfluss auf der Kunstwerkoberfläche zu reduzieren – die sogenannte «sticky-note» Methode. Hierzu wurden Japanpapierstücke auf einer einseitig silikonisierten Hostaphanfolie mit dem thermoplastischen Dispersionsklebstoff

Lascaux® 303 HV beschichtet (Pinsel). Dieser Klebstoff besitzt eine niedrige Glasübergangstemperatur und bleibt bei Raumtemperatur dauerhaft klebrig. Auf diese Stücke wurden nach der Trocknung (Trocknungsdauer mind. 24 h) die Oberflächentemperatursensoren mit Heißsiegelkleber (s. o.) befestigt. Parallel dazu wurde Japanpapier mit oben genannter *Tylose® MH300* und Technik auf die Oberfläche der Tafel geklebt. Nach erfolgter Trocknung konnte das beschichtete Japanpapier mit Sensor durch Handwärme und leichten Druck auf dem Japanpapier in situ befestigt werden.

Die Bedenken zur Minderung der Leitfähigkeit und potenziellen Messungenauigkeit durch eine zu hohe Dicke der Papier- und Klebstofflagen zwischen Gemäldeoberfläche und Sensor wurden praktisch erprobt. Es wurden zwei der evaluierten und konservatorisch verträglichen Methoden neben der Befestigung eines Sensorkopfes direkt auf der Oberfläche mit Heißkleber auf einer farbig gefassten Probeplatte in der Einhausung überprüft. Die Messung ergab, dass die Temperaturdifferenz zwischen den drei Sensoren innerhalb der Messtoleranz des Sensors liegt und somit ohne Relevanz ist.

Für die Anbringung der Endmaße für die Triangulationslaser-Messung war wiederrum eine weitere Methode notwendig, da diese teils senkrecht zur Tafelrückseite angebracht wurden. Im Vorfeld wurde eine kleine Testreihe mit unterschiedlichen Klebstoffen ausgeführt, um deren Eignung für den Einsatz vor Ort zu prüfen. An den zu verwendenden Klebstoff wurden folgende Anforderungen gestellt: Die Verarbeitung sollte auch bei relativ niedrigen Temperaturen möglich sein (in der Einhausung war zu diesem Zeitpunkt die Temperatur bereits auf unter 13 °C gefallen). Darüber hinaus sollte eine gute Klebkraft auch bei geringem Anpressdruck gewährleistet sein sowie ein schnelles Abbinden bzw. eine gute Anfangshaftung, um die Verarbeitung in situ zu ermöglichen. Als geeignete Variante wurde die Anbringung mittels doppelseitigem Klebeband (*Tesa® Verlegeband, extra stark klebend*) ausgewählt.

Als Träger für die Keramik-Endmaße, auf denen der Lasersensor misst, dient eine keilförmig zugeschnittene *KAPA®*-Platte *(KAPA® Line*). Zum Schutz der Holzoberfläche wurde ein Papier-Vlies-Sandwich als „Opferschicht“ aufgebracht (wie bei der Anbringung der OF-T-Sensoren), auf das anschließend mittels doppelseitigem Klebebands ein Keil geklebt wurde. Die Keramik-Endmaße wurden ebenfalls mit diesem Klebeband auf der KAPA®-Platte befestigt. Um die Stabilität aller getesteten Befestigungsvarianten über den Projektzeitraum zu prüfen, wurde die Probeplatte mit den Testklebungen ebenfalls in die Einhausung gestellt.

Im Projektverlauf wurden an den beiden Enden der Gratleisten zwei Teile Millimeterpapier mit Tylose MH300 (5 % in H_2O) sowohl auf die Gratleiste als auch auf die Holztafel aufgeklebt und im Rahmen des restauratorischen Monitorings regelmäßig überprüft (s. Abb. Abbildung 3-5).

Abbildung 3-5: Aufgeklebtes Milliemeterpapier. (Foto: M. Hörmann, BLfD)

Die einzige nicht zerstörungsfreie und reversible Anbringung von Messtechnik bezieht sich auf die Schraubelektroden des elektrischen Widerstandes (s. 3.1.4.4). Wie in Abschnitt 2.3.3 bereits beschrieben, kam zur Ermittlung des el. Widerstandes nur die Messung mittels Einschraubelektroden infrage, was einen Eingriff in die Originalsubstanz des Gemäldes erforderte. Zuerst erfolgte eine gründliche Abwägung restaurierungsethischer Bedenken (s. a. Ashley-Smith, J. (1982) oder Schädler-Saub & Szmygin (2019)). Darunter vor allem bezüglich des irreversiblen Eingriffes in die Originalsubstanz durch das Bohren von Löchern sowie daraus entstehende, potenzielle Schwachstellen für das Gesamtgefüge. Anhand der Abwägung wurde beschlossen, die Messung durchzuführen, um einen möglichst hohen Erkenntnisgewinn mit dem Projekt zu erzielen, sodass ein solches Vorgehen für andere Projekte vielleicht nicht mehr zwingend notwendig wird. Die Auswahl der Messpunkte erfolgte so, dass auf der Vorderseite keine kleinteiligen Darstellungsbereiche oder stark geschädigte Partien vorliegen. Auch sollten die Stellen mit Inhomogenitäten im Bildträger (z. B. Astlöcher, Ritzungen, dicker Rückseitenanstrich) vermieden werden. Nach dem Leitsatz „so viele wie nötig, so wenig wie möglich“ wurden vier Messpunkte als notwendig erachtet. Diese sollten mögliche Feuchteunterschiede zwischen rechter und linker Tafelhälfte sowie zwischen oberem und unterem Gemäldeteil erfassen. Dafür sind jeweils zwei Elektroden (Schrauben) je Messpunkt notwendig. Für die Einbringung wuren somit acht Löcher gebohrt[52].

[52] Vorbohrung mit dem Handbohrer Ø 6,5 mm; 3 mm Tiefe und Einschrauben per Hand auf ca. 14 mm Tiefe.

3.1.3 Klimamonitoring

Das Klimamonitoring sollte v. a. Außen-, Raum-, Mikro- und Nahfeldklima (Temperaturen und Luftfeuchten) umfassen. Ergänzt wurde dies zur Einschätzung des Schimmel- und Taupunktrisikos um die Messung der Oberflächentemperaturen. Weitere Untersuchungen (Luftströmung, Luftwechselrate, Thermografie) wurden herangezogen, um das Klima in der Einhausung besser abschätzen und ggf. entsprechend steuern zu können. Ein Abgleich mit dem vorherrschenden Außenklima über den Deutschen Wetterdienst sowie der Nutzung und sich dadurch ggf. verändernden Bedingungen erschien sinnvoll. Aufgrund des angebrachten Lichtschutzes und somit Ausschlusses des Sonnenlichtes war keine Messung von Strahlungen, punktuellen Temperaturen oder Lichtstärke erforderlich. Das Holzträgermonitoring befasste sich mit den hygrothermischen Verformungen (geometrische Längenausdehnung und an der rechten Seite Verformungen aus der ebene heraus) sowie dem elektrischen Widerstand (sog. Holzfeuchte) und opto-technischen Methoden. Beim Malschichtmonitoring sollten vor allem die Verformungen und Veränderungen der Dachschollen und ggf. anderer Bildschichten über opto-technische Verfahren, makroskopische Begutachtung und Langzeit-Fotografie beobachtet und erfasst werden. Die Korrosivität und Luftqualität (VOCs und andere Schadstoffe) und bauphysikalischen Untersuchungen (u. a. Perkussions- und Porositätstests sowie eine Salzprobe) spielte ebenfalls eine Rolle. Weiterhin kann die Erfassung der Nutzung (z. B. Heizung, Lüftung, Status der Türen/Fenster, Besuchergruppen) oder der Stromverbrauch von Bedeutung sein und messtechnisch erfasst werden. Aus Kostengründen wurde ersteres im vorliegenden Projekt über Begehungsprotokolle nachvollzogen.

Die Dauer eines derartigen Monitorings sollte als Kurzzeit-Monitoring mindestens 13 Monate umfassen. Für die Erfassung von Klimatrends empfiehlt die Weltorganisation für Meteorologie[53] mindestens 30 Jahre oder gar Jahrhunderte bis Jahrtausende. Im vorliegenden Fall sollte ein Großteil der Projektlaufzeit zur Erkenntnisgewinnung messtechnisch erfasst werden. Im Anschluss des Projektes sollte ein reduziertes Messsystem als Langzeit-Monitoring über weitere Jahre vor Ort bleiben.

Generell ist bei der Positionierung (je nach Denkmalgröße und Raumvolumen) darauf zu achten im Innenraum unterschiedliche Raumsituationen zu berücksichtigen; so z. B. Himmelsrichtungen (Nord/Süd) oder Höhenlagen. Bei spezifischen Fragestellungen sollte es zusätzlich eine Erfassung des Mikro- und Nahfeldklimas (nahe an den Objekten/Kunstwerken, Schnittstellen zu Wänden oder Böden sowie Risikostellen z. B. im Falle von Kondensation, Heizungen oder Schimmel) geben. Im vorliegenden Projekt wurde der Fokus neben den Außen-, Sakristei- und Einhausungsbedingungen v. a. auf das Tafelbild selbst (u. a. unterschiedliche Höhen, Vorder- und Rückseite, linke und rechte Tafelhälfte), auf die Außenwand der Sakristei (Kondensation?) sowie Rückwand des Tafelgemäldes (Kondensation? Befeuchtungspotenzial?) und den Bereich unterhalb der Tribüne (Kondensation? Schimmelrisiko? Befeuchtungspotenzial?) gelegt.

[53] https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/haeufige-fragen-klimawandel#klima [Stand September 2024].

Je präziser die Messtechnik, desto teurer kann diese sein. Wünschenswert ist generell eine möglichst hohe Genauigkeitsklasse. Insbesondere beim Langzeitmonitoring oder in Bereichen mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit oder Staubbelastung können Messfehler oder Messungenauigkeiten durch nachlassende Kalibrierungen entstehen. Dies sollte regelmäßig überprüft werden. Ob Einzelmessgeräte (stand-alone-Datenlogger), Kabel-/Busbasierte- oder Funksysteme gewünscht sind, ist abhängig von den technischen Voraussetzungen am Standort (Strom-, Internetanbindung vorhanden?) sowie den finanziellen Mitteln und den Möglichkeiten zur Wartung. Je nach öffentlicher Zugänglichkeit und Voraussetzungen können auch Diebstahlsicherheit und Vandalismusgefahr, Ästhetik, Brandschutz und ähnliche Anforderungen eine Rolle spielen. Weiterhin ist die ggf. eingeschränkte Befestigung der Sensoren in und an originaler Substanz (Bohrlöcher und Aufkleben nicht immer möglich) zu berücksichtigen. Die Sensorwahl und deren Messgenauigkeit erfolgte im Projekt abhängig von den Messgrößen sowie primär anhand des finanziellen Spielraums. Eine möglichst hohe Messgenauigkeit und Fernauslese über Funksysteme sowie Kompatibilität der Systeme war dabei gewünscht.

Die seit 2020 laufenden digitalen Klimalogger (*Lascar Electronics*, Modell: *EL-USB-2 RH/TEMP. Data Logger)* des BLfD, die an der Vorder- und Rückseite des Tafelbilds angebracht sind, wurden am 18.01.2023 durch einen weiteren Datenlogger unter dem Podest ergänzt, um die Stratifikation innerhalb der Einhausung zu erfassen. Sie sind batteriebetrieben und müssen manuell über ihre USB-Schnittstelle ausgelesen werden.

Abbildung 3-6: Klimasensor an der Tafelrückseite. (Foto: A. Fröhlich, TUM)

Nach der Entwicklung des Messkonzepts und Beschaffung der Messtechnik wurde diese sukzessive aufgebaut. Die vier Klimasensoren (Vorder- und Rückseite, in der Einhausung 2 m über dem Podest und in der Sakristei) wurden am 16.09.2022 installiert. Hierbei handelt es sich um Kombi-Sensoren der Firma *Ahlborn (*Modell*: FHAD46C2)*, welche Temperatur, relative Luftfeuchte, Taupunkt und Luftdruck erfassen (s. Abbildung 3-6). Weitere Methoden der Messung von Temperatur und relativer Feuchte s. Birkenbeul & Lohse (2019) oder Reeb & Garrecht (2019). Befestigt wurden diese mittels Kabelbindern an Holzstützen (Einhausung, Sakristei, Gemäldevorderseite) bzw. frei hängend an der Tafelrückseite, jeweils etwa gleicher Höhe (ca. Tafelmitte). Die Daten wurden mittels *Almemo 5690*-Präszisionsmessgerät erfasst

und anfangs – ebenso wie die Oberflächentemperatur- und Extensometerdaten (s. Abschnitt 3.1.4) – auf einem Mess-PC lokal gespeichert. Dies minimierte den Reiseaufwand erheblich, der andernfalls für die Überwachung und das Auslesen von Messdaten nötig wäre. Wie in Abschnitt 3.1.5 erläutert, wurde diese System später erweitert und umgebaut. Für die Erhebung des Außenklimas wurden die Daten der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdiensts (DWD, Stations-Nr. 1262) am Münchner Flughafen herangezogen.

Oberflächentemperatursensoren

Um Feuchteprobleme durch Kondensation auszuschließen, wurden sowohl an mehreren Stellen am Tafelbild als auch an aussagekräftigen Punkten der Mauern Oberflächentemperatursensoren (OF-T-Sensoren Modell *FPA611* von *Ahlborn*) angebracht. Die Messwerte konnten dann mit den Taupunkt-Messungen der Klimasensoren verglichen und so selbst eine lokale Unterschreitung der Taupunkttemperatur sofort erkannt werden. Die erwähnten OF-T-Sensoren wurden ebenfalls an das *Almemo*-Messgerät angeschlossen. Hier wurde die zuvor beschriebene Befestigungsmethode des BLfD angewandt. Insgesamt wurden zehn OF-T-Sensoren installiert; s. Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring. Auf der Gemälderückseite wurden vier Stück in der Nähe der el. Widerstandssensoren angebracht, um möglichst aussagekräftige Temperaturwerte zu erhalten. Ein Sensor wurde zusätzlich zur Überprüfung der neu entwickelten Sensoranbringungsmethode angebracht. Darüber hinaus findet sich mittig unten auf der Vorder- und Rückseite jeweils ein Sensor, um den lokalen Temperaturunterschied zwischen Vorder- und Rückseite zu erfassen. An den Wänden (Außenwand Südseite und Westwand hinter dem Gemälde) wurden insgesamt drei Sensoren verbaut, um die Gefahr von Taupunktunterschreitungen zu prüfen.

Klimatisierung

Im Projekt wurde in der Einhausung, die als Klimabox fungierte, eine indirekte – anstelle einer direkten – Feuchtezufuhr angestrebt. Dafür kamen neben der Befeuchtung der Raumluft (z. B. über klassische Luftbefeuchter, Konstant-Feuchtegeräte, Feuchte-/Wärmetauscher oder gesättigte Salzlösungen) auch sorptionsfähige Feuchtepuffer (z. B. hygroskopische Isolierungen aus dünnen Holzplatten oder noch besser Hirnholzstücken, Textil oder Silikagel) in Frage. Ziel war ein Feuchteausgleich, der die extremen Schwankungen und Spitzenwerte der Luftfeuchte dämpft und so das sensible Ausstattungsstück schützt. Die Wirkung der Befeuchtung und die damit einhergehende Auffeuchtung des Holzträgers – mit Bewegung der Malschicht – wurde in Hinblick auf Schädigungen kontinuierlich über die zuvor beschriebenen Monitoringsysteme überprüft.

Zusätzlich zur Messtechnik wurden zum Projektbeginn aktive Klimatisierungsgeräte (Be- und Entfeuchter) eingesetzt, um einerseits das Raumklima in der Einhausung zu stabilisieren und andererseits eine gezielte Auffeuchtung zu ermöglichen. Zum Einsatz kam ein Luftbefeuchter der Firma *Brune* (Modell: *B 500 Electronic*) und ein Entfeuchter der Firma *AirBlue* (Modell: *OD 150 TH*). Beide Geräte wurden innerhalb der Einhausung in Kunststoff-Auffangwannen positioniert, um Wasserschäden bei einer Leckage zu verhindern. Zudem wurden sie an ein *sicCareFOX-1H* Vorschaltgerät der Firma *PASStec* angeschlossen, über das jeweils der r.F.-Grenzwert eingestellt werden konnte, ab dem die Geräte eingeschaltet werden sollten.

Zu Beginn des Monitorings in der Einhausung wurde zunächst das Raumklima, welches sich ab April natürlich einstellte, betrachtet. So sollte ein „Schutzkorridor“ eingestellt werden, der Extremwerte und Klimaspitzen vermeidet. Dies diente ferner der Abschätzung inwieweit das Raumklima im Zeitraum ohne Beheizung konditioniert werden muss. Parallel dazu wurde das Raumklima der Messungen zwischen 2020 und 2022 analysiert, um abzuschätzen, wo in der Vergangenheit die Gleichgewichtsfeuchte des Tafelgemäldes lag. Die Auswertung des Jahresmittelwerts ergab einen Wert von ca. 65 % r.F. Der Feuchtekorridor in der Einhausung wurde daher zu Projektbeginn [ab 04.08.2022] bei 50 – 74 % r.F. reguliert. Im weiteren Projektverlauf [ab 12.12.2022] erfolgte eine Eingrenzung auf 60 – 70 % r.F. In zwei Auffeuchtungsversuchen im Frühjahr 2023 [s. 3.4] wurde die r.F. von 65 auf 70 und später 75 % angehoben.[54] Das Begehungsprotokoll (ausgedruckte Tabelle mit Datum, Uhrzeit für Ein- bzw. Austritt, Grund für Begehung / auszuführende Arbeiten, Personen(-Anzahl)) in der Einhausung sollte die Korrelation plötzlicher Klimaänderungen mit einer veränderten Nutzung ermöglichen.

3.1.4 Holzträgermonitoring

Zunächst wurden anhand einer Marktanalyse und Literaturrecherche diverse mögliche Messmethoden zur Erfassung der geometrischen Längenänderung betrachtet (S. Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring). Basierend auf dieser Recherche wurden Extensometer und Triangulationslaser als geeignete Methoden ausgewählt. Durch die parallele Verwendung beider Systeme konnte deren Eignung für das in situ Monitoring historischer Holztafelbilder verglichen werden.

3.1.4.1 Triangulationslaser

Aus den obigen Erläuterungen ergeben sich für den vorliegenden Fall Triangulationslaser als technisch ideale Messmethode. Aufgrund der hohen Kosten (i. H. v. mehreren Tausend €) für Laser-Sensoren mit ausreichender Genauigkeit und Messstrecke konnten jedoch nur die Verformungen auf einer Höhe des Tafelbilds beobachtet werden.

Zwei davon messen das Quellen und Schwinden der Tafel in Tafelebene quer zur Faser, über annähernd die gesamte Tafelbreite: wie Abbildung 3-7 zeigt messen Laser 1 (links) und Laser 2 (rechts) jeweils vom Laserkopf bis zum Keramik-Endmaß nach außen hin (weiße Pfeile); die Messdistanz beträgt jeweils 16 cm. Dabei umfassen die Messdistanzen jeweils zwei Tafelbretter, welche durch jeweils eine Leimfuge verbunden sind. Zwischen den beiden Laserköpfen ist ein, vom Stützgerüst vorgegebener Abstand von ca. 247 cm (oranger Pfeil). Die fast vollständig inerte CFK-Unterkonstruktion ermöglicht es den Abstand zwischen den Laserköpfen als gleichbleibend anzusehen. Die Gesamtverformung der Tafel ließe sich somit über die Veränderungen der Laser errechnen (Messdistanz: 247 cm + 2 * 16 cm = 279 cm). Ein dritter Laser nimmt von der Rückseite und auf einer Höhe von ca. 96 cm die Verformung

[54] Nach einer langsamen Reduktion der r.F. nach den Auffeuchtungsversuchen wurde zum Projektende (Vermeidung von Materialschäden und Schimmel) die maximale r.F. von 68 % anhand der Risikoabschätzung und des historischen Klimas eingestellt.

aus der Tafelebene mit 16 cm Abstand heraus auf. Die Laser wurden auf matte, ebene Keramik-Endmaße (Hersteller *Mitutoyo*), welche auch bei den Labortests der Laser verwendet werden (s. Abbildung 3-7), ausgerichtet. Dies erhöht die erreichbare Genauigkeit der Laser nach Angaben der Hersteller deutlich. Diese ca. 1 mm dünnen Keramikplättchen wiederum wurden an leichten Quadern aus Leichtschaum (Kapa®) angebracht, welche reversibel an der Tafel befestigt werden (s. Abschnitt 3.1.2).

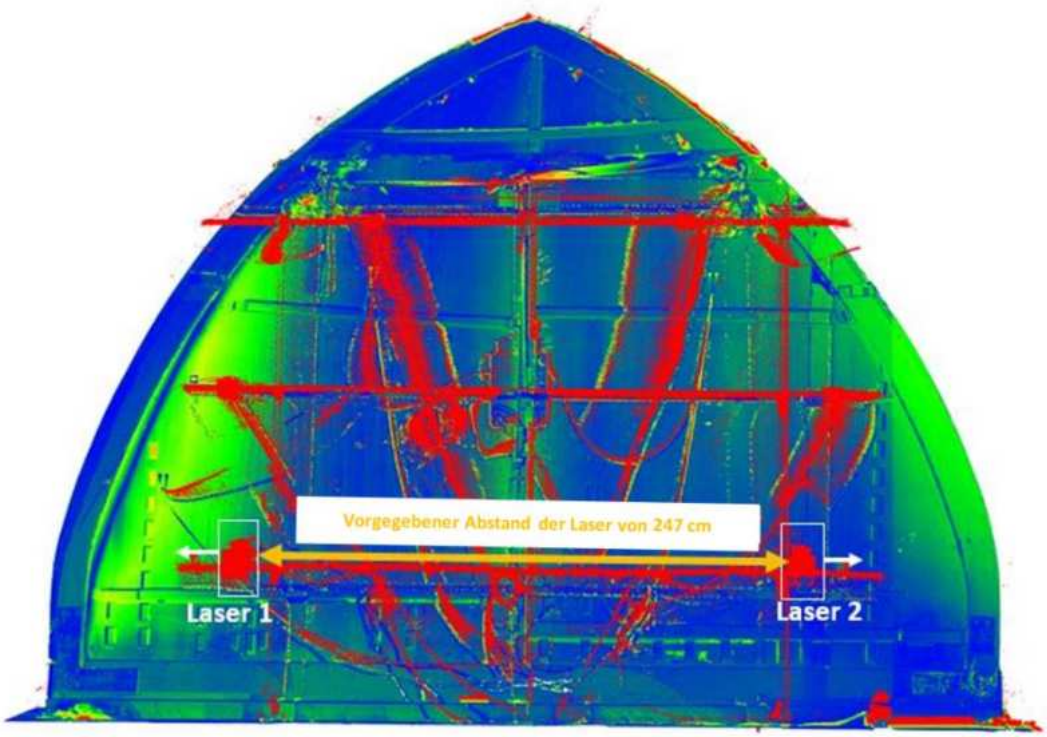

Abbildung 3-7: Erläuterung zur Messung der Triangulationslaser (Foto: L. Pallas, KDWT; Bearbeitung T. Hilger , BLfD)

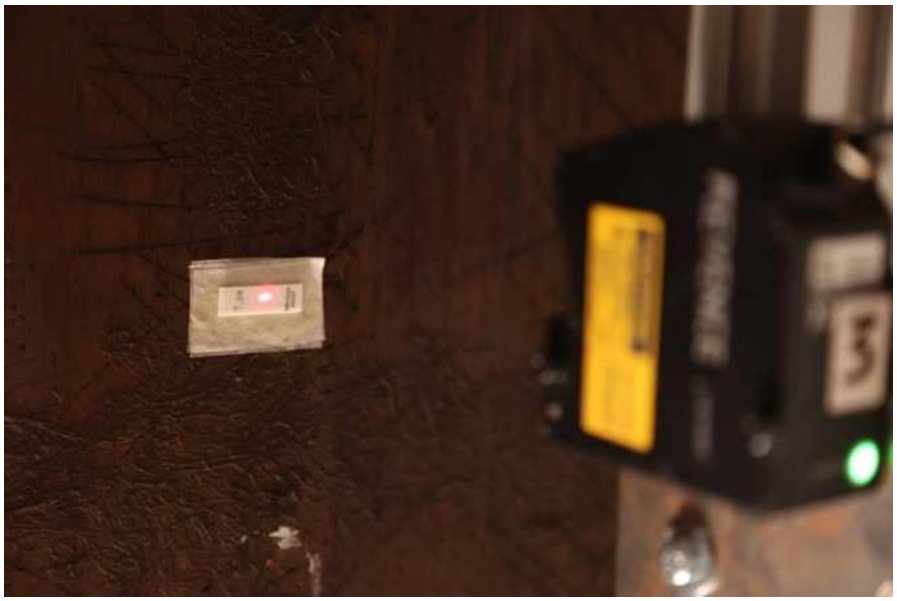

Abbildung 3-8: Triangulationslaser (rechts) und angebrachtes Endmaß auf der Rückseite der Tafel (links). Deutlich sind auch die Ritzungen und Wergabklebungen erkennbar. (Foto: A. Fröhlich, TUM)

3.1.4.2 Extensometer

Um die Verformung der Holztafel in mehreren Ebenen zu überwachen und gleichzeitig einen Vergleich mehrerer Messmethoden zu ermöglichen, wurden in zwei weiteren Ebenen jeweils zwei Extensometer (Modell: *FWA050TX2*, Firma *Ahlborn*) angeordnet (Abbildung 3-9). Diese waren wie die Klima- und OF-T-Sensoren mit dem *Almemo 5690*-Präzisionsmessgerät verbunden. Durch Einsatz von Kugelgelenken an den Befestigungspunkten der Extensometer wurde eine Winkeltoleranz der Extensometer von ± 2,5° erreicht. Diese ließen auch die 3D-Verformung der Tafel zu. Ungenauigkeiten aus dem Winkelfehler waren in diesem Fall unvermeidbar. Durch ihre horizontale Anordnung erfassten sie die Verformung quer zur Faser des Holztafelbilds. In dieser Richtung waren aufgrund der Anisotropie des Holzes die größten Verformungen zu erwarten. Wie bei den Triangulationslasern beschrieben, wurden die Extensometer so auf dem Stützgerüst montiert, dass annähernd die gesamte Tafelbreite zwischen den Messpunkten liegt und somit die Verformungen über die annähernd die ganze Tafel erfasst werden.

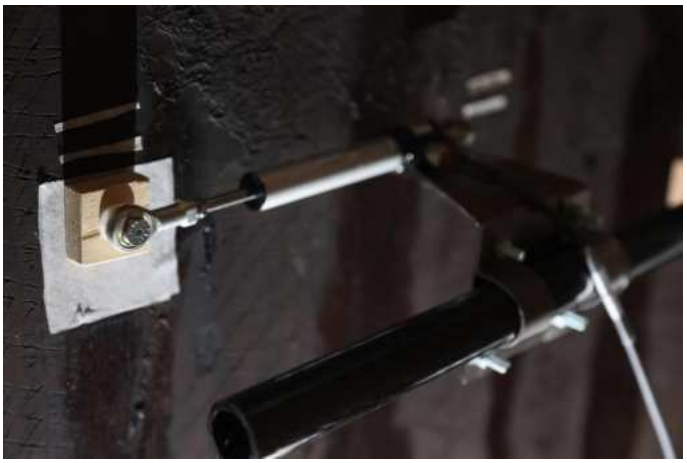

Abbildung 3-9: Extensometer. An der Tafelrückseite befestigt und mit Messgerüst verschraubt.
(Foto: A. Fröhlich, TUM)

3.1.4.3 Millimeterpapier

Vor den beiden Auffeuchtungsschritten von 65 % auf 70 % bzw. 75 % r.F. (s. 3.4) wurden mit Tylose MH300 (5 % in H2O) Millimeterpapiere (MMP) an der Rückseite der Holztafel und ihren Gratleisten angebracht. Pro Gratleiste (insgesamt 4 Stück) wurden jeweils zwei MMP – am linken und rechten Gratleistenende – auf die Holztafel geklebt. Es wurde dabei direkt am Übergangspunkt zur Gratleiste angesetzt. Ein weiteres MMP wurde dann jeweils möglichst passgenau auf die Gratleiste platziert (ebenfalls direkt am Übergangspunkt zur Holztafel). Die etwas dickere Markierung der 1 cm Abstände des MMP wurde mittig angesetzt; links und rechts davon liegen jeweils 1 cm mit dünneren mm-Strichen. Die 1 cm Markierungen dienten somit als Strichmarkierung, die von der Holztafel auf die Gratleisten übergeht und bei Bewegungen der Tafel die Gängigkeit der Gratleisten und entsprechenden Bewegungsabstand durch verschieben an den MMP anzeigt (vgl. Messsysteme von mit-gmbh.biz oder saugnac-jauges.fr). Die MMP wurden nach ihrer Anbringung sowie im Rahmen des restauratorischen Monitorings regelmäßig überprüft und insbesondere zu den Auffeuchtungsschritten fotografisch dokumentiert (s. Abbildung 3-5).

3.1.4.4 Holzfeuchtemessung

Die Holzfeuchte kann mit diversen Verfahren gemessen werden. Viele scheiden im vorliegenden Fall aus, da sie einen zu großen Eingriff in das historische Tafelbild erfordern. Dazu gehört etwa die Darrmethode. Andere Methoden wie die Mikrowellenmessung befinden sich noch im Entwicklungsstadium oder eignen sich nicht für das Langzeitmonitoring. Gravimetrische Messungen am gesamten Tafelbild waren aufgrund der Einbausituation und konservatorischer Bedenken nicht umsetzbar. Die einfache Messung über den elektrischen Widerstand ist ein weit verbreiteter Stand der Technik und macht die Ergebnisse reproduzierbar. Da für die Tafel keine Kennlinie für das Verhältnis von Holzfeuchte zu elektrischem Widerstand vorhanden ist, und diese ohne erheblich Eingriffe auch nicht bestimmt werden konnte, wurde im Rahmen dieses Projekts nur der elektrische Widerstand überwacht. Dieser lässt sich zudem leichter mit den Werten zukünftiger Projekte vergleichen. Zur besseren Anschaulichkeit werden die Ergebnisse[55] unter Abschnitt 4.1.4.5 aber als % Holzfeuchte dargestellt.

Wie in Abschnitt 2.3.3 bereits beschrieben, kam zur Ermittlung des el. Widerstandes nur die Messung mittels Einschraubelektroden infrage, was einen Eingriff in die Originalsubstanz des Gemäldes für vier Messpunkte erforderte (zur ethischen Abwägung und Sensoranbringung s. 3.1.2). Für die Auswertung ist zu bedenken, dass die Ergebnisse keine Feuchtegradienten über die gesamte Tafeldicke darstellen können. Alternative (zerstörungsfreie) Methoden wie Simulationen oder NMR s. Abschnitt 5.

Die Widerstandsmessung erfolgte ab Dezember 2022 an der Tafel und ab 30.05.2023 zusätzlich an vier beschichteten und zwei unbeschichteten Probekörpern. Dies sollte den Vergleich des hygroskopischen Verhaltens des historischen, gealterten Tafelbilds mit den Probekörpern aus rezentem Holz und mit intakter Malschicht ermöglichen.

Hierzu wurde Messtechnik der Firma *Scanntronik Mugrauer GmbH* verwendet. Als Datenlogger dienten zwei *Thermofox universal*, welche mit je einem *Gigamodul* und einem OF-T-Sensor verbunden waren. An einem *Gigamodul* liefen die Kabel der vier Elektrodenpaare in der Holztafel zusammen, am anderen die der sechs Probekörper. Als Elektroden wurden teilisolierte 20 mm-Einschraubelektroden verwendet, welche in vorher angefertigte Bohrungen eingebracht wurden. Die Löcher für die Schraubelektroden wurden an den zuvor festgelegten Stellen mit einem Handbohrer (Ø 6,5 mm) 3 mm tief vorgebohrt und anschließend die Schraubelektroden per Hand etwa 14 mm tief eingedreht, um Vibrationen und Verschiebungen der Tafel zu minimieren. Die Messung des Widerstands erfolgte quer zur Faser. Das gesamte System war batteriebetrieben und arbeitete völlig autark. Allerdings konnte das Auslesen der Daten mit den verfügbaren Geräten nur vor Ort vorgenommen werden. Dies wurde im monatlichen Rhythmus durch die Projektbeteiligten erledigt.

Die Probekörper wurden nahe dem Tafelbild positioniert und ihre Reaktion auf Veränderungen des Klimas in der Einhausung aufgezeichnet und mit der Reaktion der Holztafel verglichen. Die Probekörper in der Einhausung sollten absichtlich einfach gehalten werden und

[55] Die entsprechenden Daten können beim Projektpartner TUM zur Ansicht angefragt werden.

einen Ausschnitt einer theoretisch unendlich großen Tafel repräsentieren. Die Herstellung wird in Abschnitt 3.2.1 genauer erläutert.

Einer der Probekörper wurde zudem kontinuierlich gewogen und so die Holzfeuchteänderung gravimetrisch überwacht. Die Wägung erfolgte mit einer Laborwaage der Firma *Sartorius* (Modell: *ED623S-CW*) mit einer Ablesbarkeit von 0,001 g und einer Linearitätsabweichung von weniger als ± 0,002 g. Die Messung erfolgte in einem 60-sekündigen Intervall und die Messdaten des gravimetrischen Feuchtemonitorings wurden auf einem separaten Mess-PC des KDWT gespeichert. Wie in Abbildung 4-20 erkennbar, führte das Netzteil der Waage jedoch wegen elektromagnetischer Interferenzen zu großen Messfehlern bei der elektrischen Widerstandsmessung. Daher wurde der gravimetrisch überwachte Dummie samt Waage und zugehörigem Mess-PC an einen neuen Standort außerhalb der Einhausung gestellt. Die Messdaten der Waage waren ohne erheblichen Arbeitsaufwand nicht auswertbar. Sie konnten aufgrund der Trennung vom *Scanntronik*-System nicht verglichen werden, was die Wichtigkeit der Systemkompatbilität aufzeigt. Auf eine Auswertung im Rahmen des Projekts musste daher verzichtet werden.

3.1.4.5 Opto-technisches Monitoring

Im ursprünglichen Konzept des Projektes war für das Monitoring des Tafelgemäldes nur der Streifenlichtscanner vorgesehen. Dieser wurde eingesetzt, um den Materialverbund des Kunstwerks zu untersuchen. Da Träger und Malschicht für das Monitoring nicht separat betrachtet werden können, sind die Streifenlichtscans unter Abschnitt 3.1.6 verortet.

Der Einsatz des terrestrischen Laserscanners diente zunächst dazu, anhand der Aufnahmen des gesamten Tafelgemäldes eine Kartierungsgrundlage zu erstellen und nach Projektende einen absoluten Vergleich der Veränderung des Tafelgemäldes zu generieren. Nachdem sich bei der ersten Messung im Februar 2022 jedoch mit dem bloßen Auge sichtbare Reaktionen des Tafelgemäldes auf das Raumklima abzeichneten, wurde im März 2022 ein weiterer Laserscan durchgeführt, um zu testen, ob mit dieser Methode eine Oberflächenveränderung detektierbar ist. Es zeigte sich, dass dies im Rahmen der Messgenauigkeit möglich ist.

Die Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes wurden mit dem terrestrischen Laserscanner *Faro Focus S 350* der Firma *FARO* erstellt (s. Abbildung 3-10). Nach dem Messprinzip des Phasenvergleichs tastet der Laser sein Umfeld in einem Bereich von 360° horizontal und 270° vertikal ab und erstellt so eine dreidimensionale Punktwolke seiner Umgebung. Für die Aufnahmen wurde ein Punktabstand von 6,1 mm auf 10 m Radius gewählt. Damit hat ein einzelner Scan bis zu 43,7 Millionen Punkte. Durch mehrere Scanpositionen verdichtet sich die Punktwolke. Um das Tafelgemälde einschließlich seiner Aufstellungssituation aufnehmen zu können, wurden Scans von mehreren Positionen um das Objekt herum erstellt. Die Aufnahmen beinhalten damit sowohl Vorder-, als auch Rückseite des Tafelgemäldes.

Um die Scandaten weiterverarbeiten zu können, wurden die einzelnen Scanstandorte mit der Software *FARO Scene 2020.0.7* zueinander registriert. Aus der daraus resultierenden Punktwolke konnten dann verzeichnungsfreie Orthofotos der Vorder- und Rückseite generiert werden. Gerade auf der Rückseite war es aufgrund des geringen Abstands zur Rückwand

schwierig, eine Gesamtaufnahme mittels Fotografie durchzuführen. Die Abbildungen befinden sich im Anhang (s. Abbildung 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse, Scans 1-4).

Tabelle 3-1 listet die Zeitpunkte der Laserscans des Tafelgemäldes (jeweils Vorder- und Rückseite) auf. Für den Vergleich der Scans zu unterschiedlichen Zeitpunkten wurden diese mittels der Software *Faro Scene 2020* punktwolkenbasiert stationiert. Dabei handelt es sich um ein geometrisches Best-Fit-Verfahren, bei dem anhand der Geometrie der Einzelscans diese zueinander ausgerichtet werden. Die fertig ausgerichteten Punktwolken wurden anschließend mit der Open-Source Software *Cloud Compare v.2.12.0* miteinander verglichen. Dabei wurden beide Punktwolken als Ganzes ebenfalls mittels Best-Fit-Verfahren zueinander ausgerichtet, um dann Abweichungen grafisch darstellen zu können. Anders als bei den Vergleichen mit dem Streifenlichtscanner wurden hier keine fertig vermaschten Oberflächenmodelle für den Vergleich verwendet, sondern die Punktwolke selbst. Die Standardabweichung dieses Registrierungsprozesses betrug ca. 1 mm.

Tabelle 3-1: Auflistung der Zeiträume der Laserscannings des Tafelgemäldes. durchgeführt wurden, © KDWT.

Datum	**Scans**
27.01.2022	Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Laserscanner (FARO) Vorder- und Rückseite
05.04.2022	Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Laserscanner (FARO) Vorder- und Rückseite
24.11.2023	Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Laserscanner (FARO) Vorder- und Rückseite
16.04.2024	Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Laserscanner (FARO) Vorder- und Rückseite

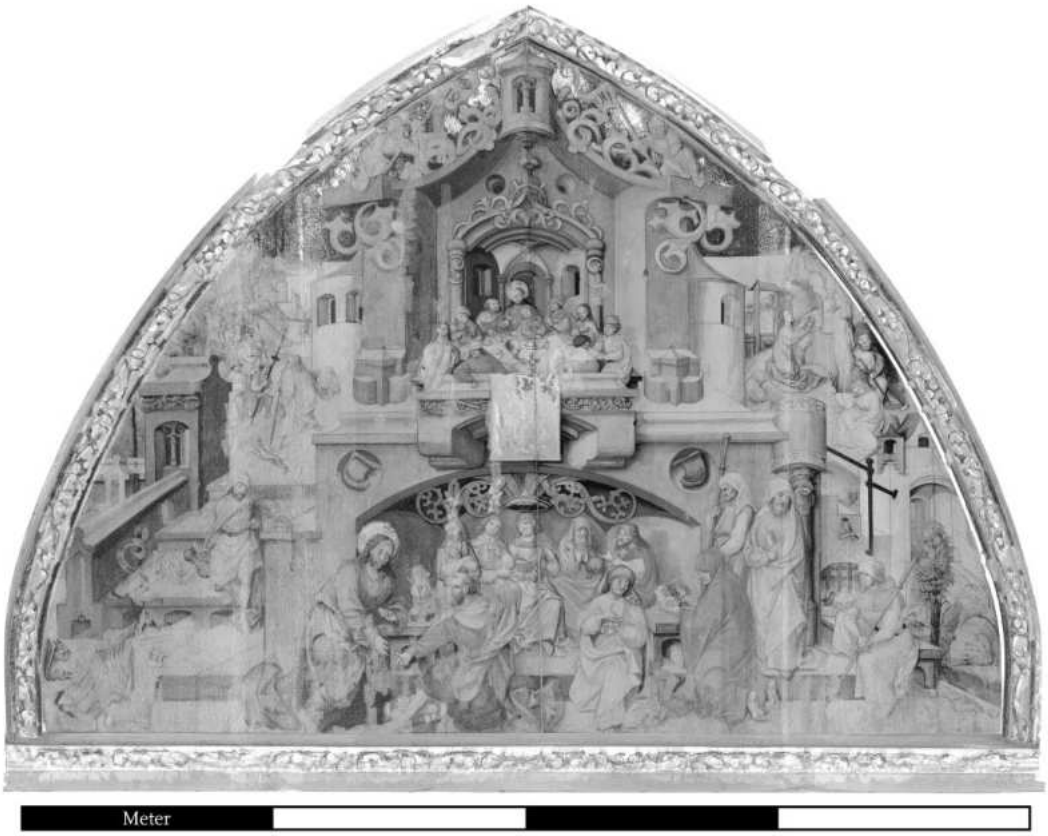

Abbildung 3-10: Orthogonale Gesamtaufnahme des Tafelgemäldes, erstellt mit einem Laserscanner (FARO) (Foto: L. Pallas, KDWT).

3.1.5 Datenmanagement

Das Auslesen der Messdaten via Fernzugriff auf den Mess-PC erfolgte bis 30.05.2023 im wöchentlichen Rhythmus. Die elektrischen Widerstandsdaten wurden jeweils bei den Vor-Ort-Terminen, üblicherweise alle vier Wochen, ausgelesen. Dabei hat sich herausgestellt, dass die weitere Verarbeitung der Daten sehr zeitaufwendig ist, da das Messintervall der *Almemo*- und *Thermofox*-Datenlogger nicht exakt mit dem der Triangulationslaser übereinstimmt. Dies wurde durch das elektromechanische Zeitrelais verursacht, das bei den Laser-Wegaufnehmern die Speicherung auslöste. Dieses ließ sich nur manuell über eine Stellschraube justieren, was keine exakte Einstellung auf das Intervall von 10 min. ermöglichte. Nötig war das Relais, da der Controller und die mitgelieferte Software nur eine minimale Messfrequenz von 5 *Hz* zuließen. Diese hohe Frequenz würde jedoch zu unpraktikabel großen Datenmengen im Verlauf des Langzeitmonitorings führen. Deshalb wurde konstant gemessen, die Speicherung aber über das externe Zeitrelais ausgelöst.

Aufgrund dieses zeitlichen Versatzes zwischen den Messzeitpunkten mussten die Daten jeweils manuell nachbearbeitet werden, was arbeitsintensiv und fehleranfällig war. Daher wurde von der Firma *Florian Lindner Design* eine Lösung erarbeitet, die sowohl eine digitale und damit exakte Auslösung der Triangulationslaser als auch einen automatisierten Abruf der Messdaten erlaubt (s. Schema in Abbildung 3-11). Zudem werden die Daten automatisch auf einem Server gespeichert und sind dort jederzeit in Echtzeit für alle Projektbeteiligten verfügbar. Die neue, digitale Lösung lief ab 30.05.2023 auf einem neuen Mess-PC des BLfD, auf

dem mehrere Betriebssysteme[56] arbeiten, die verschiedene Teilaufgaben wie die Auslösung der Laser-Wegaufnehmer, die Speicherung der *Almemo*-Daten und den Export auf den Server und Speicherung lokaler Datenbackups übernehmen. Seit dem Wechsel wurden auch die Einschaltzeiten der Be- und Entfeuchter mittels smarter Steckdosen (*Shelly Plug*) digital erfasst. Anhand der gesammelten Daten konnte so der Stromverbrauch der Geräte über den Projektverlauf hinweg verfolgt werden. Außerdem bot dies die Möglichkeit, einzusehen in welchen Intervallen zusätzlich befeuchtet werden musste und wie lange die Geräte jeweils aktiv waren.

[56] Dies war aufgrund der eingesetzten Software (Programme und Systemdienste) notwendig, da nicht alle Programme für ein Betriebssystem vorhanden sind. Aus Stabilitäts- und Verlässlichkeitsgründen kam daher ein Linux-Basissystem mit mehreren virtualisierten Rechnern für verschiedene Aufgaben (Messwerterfassung, Netzwerkkonnektivität, Fernwartung) zum Einsatz.

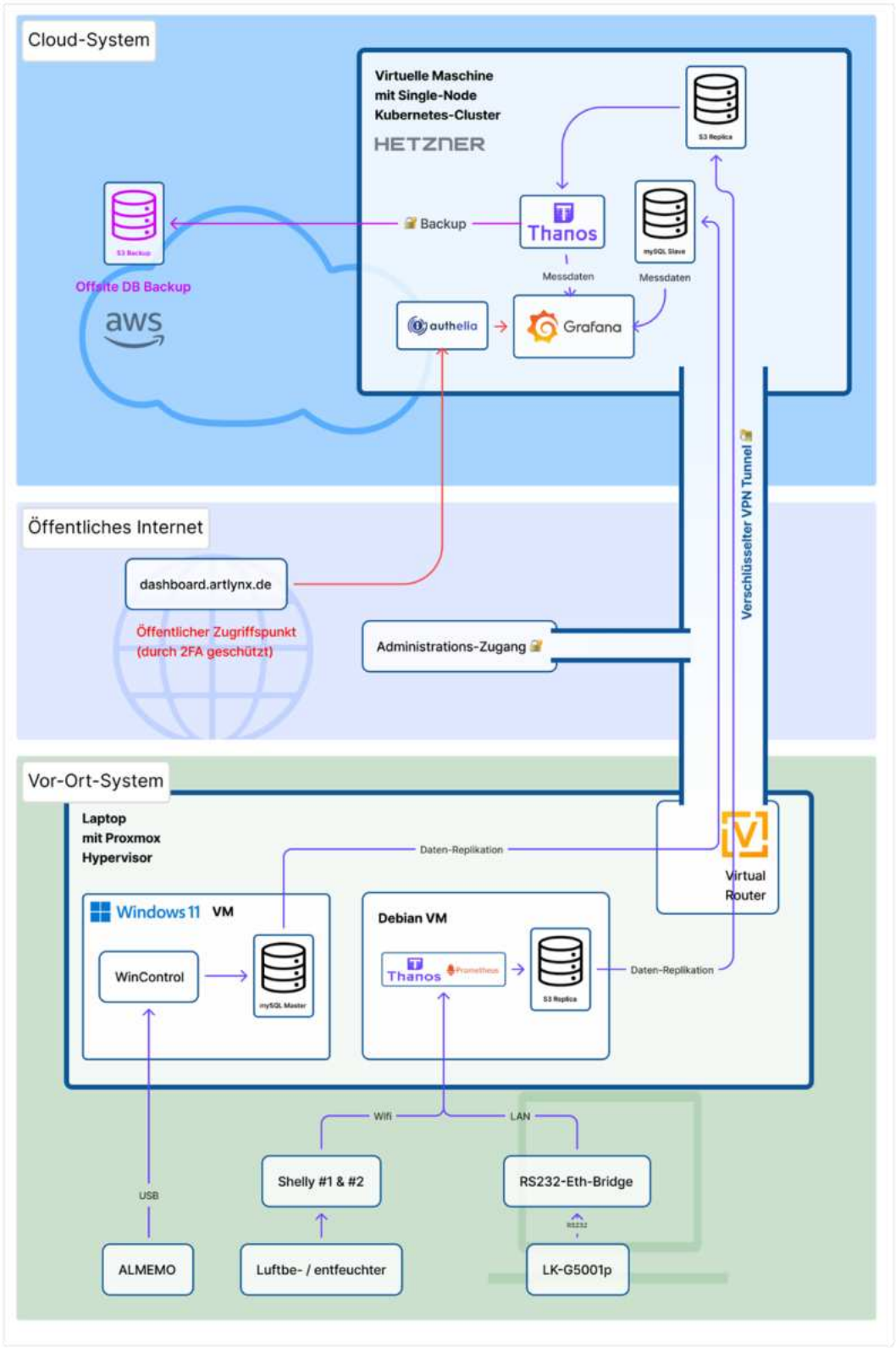

Abbildung 3-11: Schematische Darstellung des neuen Systemaufbaus (Grafik: Florian Lindner, Lindner Design)

3.1.6 Malschichtmonitoring

Zur Erfassung von Oberflächenveränderungen der Bildschicht kamen die im Folgenden beschriebenen Methoden zum Einsatz.

3.1.6.1 Streifenlichtscans

Für die Untersuchung des Tafelgemäldes wurden bereits vor Projektbeginn in Absprache mit dem BLfD exemplarische Oberflächen mit einem hochauflösenden 3D-Scanner aufgenommen. Die Auswahl der Probeflächen wurde aus konservatorischen Gründen im Projektteam festgelegt: Position 1 wurde als Schnittstelle zwischen den zwei Tafelhälften (Stoßfuge der beiden Seiten) und großflächig vorgeschädigte Malschicht gewählt. Weiterhin befinden sich in der Fläche sowohl gemalte als auch vergoldete Bereiche; weshalb sie im Projektverlauf zusätzlich vergrößert wurde. Position 2 wurde aufgrund ihrer Vorschädigung der Holzsubstanz und Möglichkeit der Referenzierung über den Zierrahmen gewählt. Außerdem wurde vor Projektbeginn eine starke Verformung im rechten unteren Tafelbereich bemerkt, da die Tafel dort aus dem Rahmenfalz gewandert und relativ frei beweglich war. Ab März 2022 wurde das Monitoring um eine Fläche auf der Rückseite, Position 3, erweitert. Die Flächen wurden regelmäßig aufgenommen und ausgewertet. (s.

Abbildung 3-12).

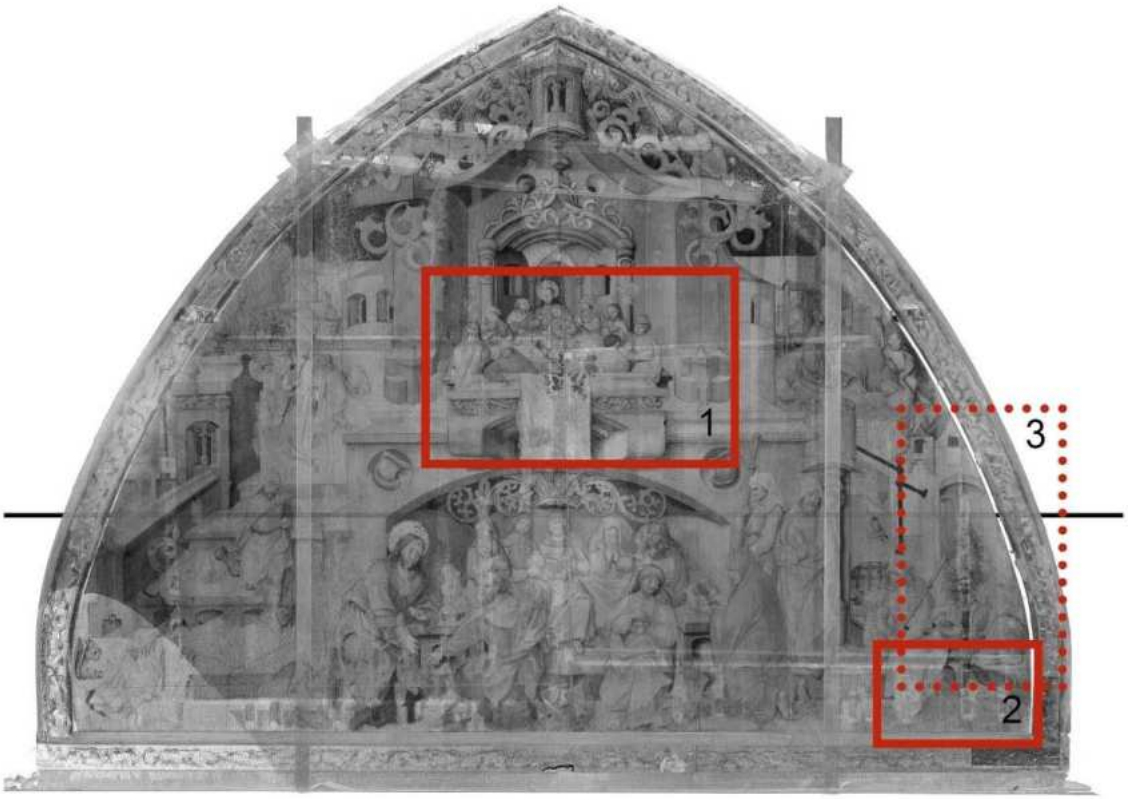

Abbildung 3-12: Orthofoto des Tafelgemäldes mit Kennzeichnung der Referenzscanflächen (Foto: L. Pallas, KDWT).

Zum Einsatz kam der Streifenlichtscanner *COMET LƎD 5M* der *Carl Zeiss Optotechnik GmbH*, ehemals *Steinbichler Optotechnik GmbH* (s. Abbildung 3-13).

Beim Scanprozess wird durch die Projektionseinheit ein sich veränderndes Streifenmuster auf die Oberfläche geworfen, welches durch die systemintegrierte Erfassungseinheit mit 2448 x 2050 Pixel aufgezeichnet wird. Die Oberfläche des Objektes wird so in x-y-z-Koordinaten transferiert; das digitale Abbild besteht also aus einer Vielzahl an einzelnen 3D-Punkten, allerdings ohne Farbwert (Rahrig & Street, 2020). Mithilfe des Verfahrens ist es möglich, je nach Projektor- und Kameraobjektiv unterschiedlich große Oberflächen zu scannen. Die Referenzflächen wurden mit den 250 mm-Objektiven aufgenommen, die einen Ausschnitt von 260 x 215 x 140 mm³ mit einem Punktabstand von 100 µm erfassen.

Um die Zustandsänderung im Abgleich mit dem Raumklima analysieren zu können, wurden die Scanaufnahmen im regelmäßigen Turnus (ca. monatlich) wiederholt. Insgesamt wurden mit dem Streifenlichtscanner 22 Messungen durchgeführt, s. Tabelle 4-7.

Der Grad der Verformung kann über den digitalen Vergleich zweier Scans untersucht werden. Dafür wird aus den Scandaten aus je zwei Messkampagnen, nach Ausrichtung und etwaiger Beschneidung mittels Geomagic Wrap, in *GOM Inspect*, bzw. seit 2023 *dann ZEISS Inspect* ein so genannter Soll-Ist-Vergleich erstellt werden. Hier werden die Oberflächendaten der 3D-Messung aus einer späteren Messkampagne (Ist) passgenau auf die Daten einer früheren Messung (Soll) gelegt und anschließend die Abweichungen berechnet. Die Veränderungen werden numerisch und optisch in einem Falschfarbenbild dargestellt, in dem angezeigt wird, um wie viel sich das Objekt an bestimmten Stellen verändert hat. Die Scans der Sollmessung dienen als Ausgang der Abweichungsberechnungen. Im Abgleich mit den Klimadaten sind somit Aussagen über die quantitative Formänderung in Korrelation mit dem Raumklima möglich. Abbildung 3-14 verdeutlicht am Beispiel von Position 3 die Auswertung. Die grün gefärbten Flächen zeigen keine Veränderung an, dunkelgrüne bis blaue Bereichen entsprechen einer Bewegung nach hinten, orange/rot Flächen einer nach vorne. Im angegebenen Zeitraum von Mai bis Dezember 2022 reagierte das Tafelgemälde auf das stabile Klima in der Einhausung durch ein Befeuchten. Dieses zeigte sich durch die Bewegung nach „hinten“, also zurück in den Zierrahmen.

Abbildung 3-13: Messung mit dem Streifenlichtscanner zu Projektbeginn (Foto: K. Holl, KDWT).

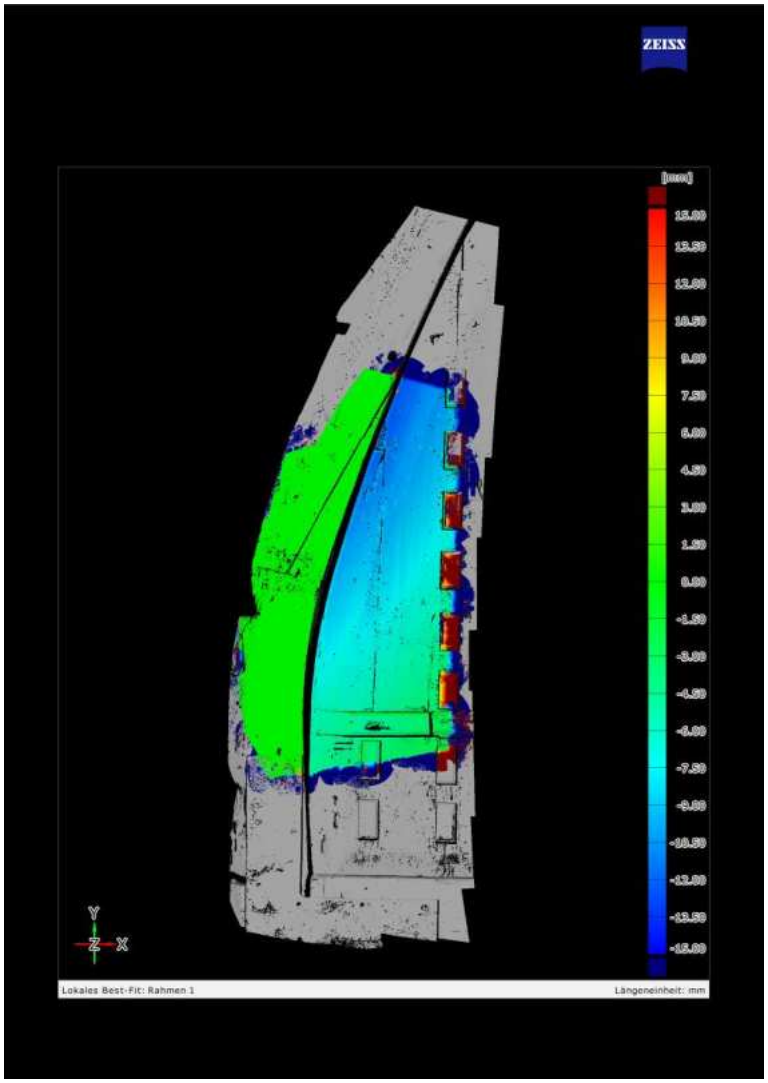

Abbildung 3-14: Auswertung der Streifenlichtscans an Position 2; 20.05.2020 mit 20.12.2022. (Foto: L. Pallas, KDWT).

3.1.6.2 Auswahl der Matchingflächen für das Best-Fit

Zunächst wurden zwei Datensätze anhand von drei Punktpaaren grob ausgerichtet. Anschließend konnten am Referenzmodell Oberflächenbereiche ausgewählt werden, die als Referenz für einen Best-Fit-Algorithmus, bzw. eines Iterative Closest Point Algorithm dienten. Dieser Algorithmus positioniert dann die beiden Modelle anhand der Geometrie mathematisch bestmöglich (s. Rahrig & Street, 2020).

Das Tafelgemälde besteht aus vielen einzelnen Holzbrettern, die sich bei Feuchtigkeitszu- und -abnahme jeweils unterschiedlich ausdehnen und zusammenziehen. Das Verhalten dieser Hölzer bei klimatischen Schwankungen variiert teilweise sehr stark, weswegen hier entweder einzelne Hölzer als Referenz für die Ausrichtung dienen oder aber Hölzer mit wesentlich größerem Querschnitt (s. Pallas et al., 2022).

Für einen Vergleich werden zwei 3D-Modelle übereinandergelegt und die Genauigkeit mittels geometrischen Best-Fit-Algorithmus verfeinert. Die Areale, auf die der Best-Fit-Algorithmus wirkt, können dabei ausgewählt werden. Um aus den Oberflächenvergleichen aussagekräftige Schlüsse ziehen zu können ist es entscheidend, welche Fläche als Referenzbereich ausgewählt wird. Deshalb wurden für die Soll-Ist-Vergleiche folgende Bereiche jeweils mittels Best-Fit übereinandergelegt:

Position 1: Für die Referenzfläche in der Mitte des Tafelgemäldes wurden zwei Hölzer auf der linken Seite der Tafel ausgewählt (s. Abbildung 3-15).

Position 2: Für die Referenzfläche unten rechts wurde der Zierrahmen ausgewählt. Dieser ist wesentlich dicker und verhält sich bei Schwankungen wesentlich träger und eignet sich deshalb sehr gut als Bezugsfläche (s. Abbildung 3-16 links).

Position 3: Für die Referenzfläche auf der Rückseite wurde wie für Position 2 der Rahmen ausgewählt (s. Abbildung 3-16 rechts).

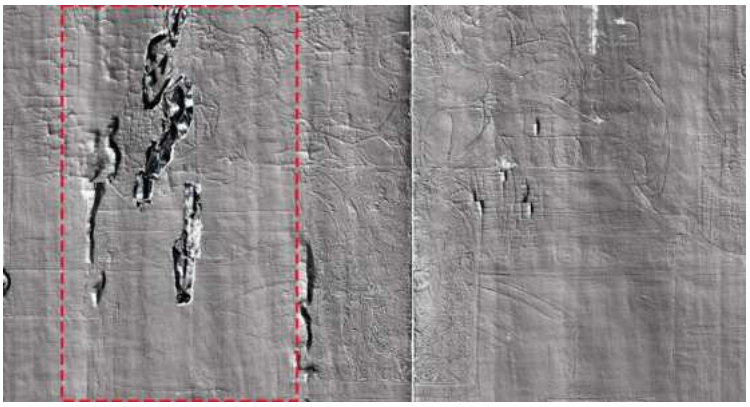

Abbildung 3-15: Referenzfläche 1 unter Angabe der ausgewählten Fläche für das Best -Fit (rot gestrichelte Linie) (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).

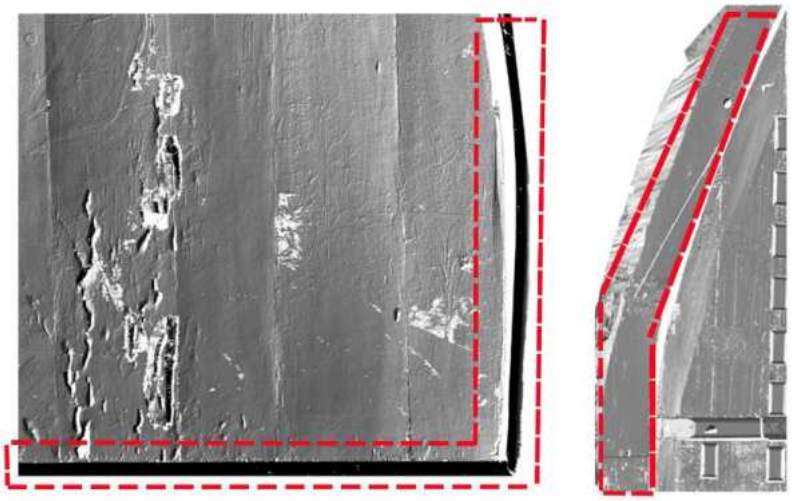

Abbildung 3-16: Referenzfläche 2 (links) und 3 (rechts) unter Angabe der ausgewählten Fläche für das Best -Fit (rot gestrichelte Linie) (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).

3.1.6.3 Langzeit-Fotografie

Bei dieser Methode wurde die Malschicht oder Verformung mit einer zeitgesteuerten, fest vor der Tafel installierten Fotokamera über einen längeren Zeitraum aufgezeichnet. Dadurch können Bewegungen an Oberflächen sichtbar gemacht werden. Bisher wurde diese Methode eingesetzt, um die Reaktion gelockerter Oberflächen auf kurzfristige klimatische Schwankungen zu dokumentieren. Aus den fortlaufenden Fotografien einer bereits geschädigten Musterfläche kann bei kurzen Aufnahmeintervallen ein Video generiert werden, das die Verformung im Zeitraffer zeigt. Diese Untersuchungsmethode stellt die Bewegungen in Abhängigkeit von dem sich ändernden Klima dar und ermöglicht somit das Verknüpfen der Malschichtveränderungen mit den erfassten Klimawerten. Im Rahmen des Projektes sollten weitere Auswertungen zur Verformung in Hinblick auf klimatische Änderungen getestet werden (pixelbasierte Bildauswertung).

Über den Projektzeitraum hinweg wurde das Verfahren an insgesamt drei Referenzbereichen getestet. Über die Vergleiche der terrestrischen Laserscans (s. Abbildung 3-17) konnte die rechte Seite des Tafelgemäldes als Bereich mit den größten Verformungen identifiziert werden. Deshalb wurde nach Fertigstellung der Einhausung die Kamera zunächst frontal vor der rechten Seite des Tafelgemäldes installiert. Im Zeitraum vom 28.4. bis 17.05.2022 nahm die Fotokamera *Nikon Z6* (Objektiv *Z 24-70 mm 1:4 S*) alle 20 Minuten ein Foto auf. Die Einstelloptionen (Blende, Belichtung, Schärfe, Iso-Wert) der Kamera wurden so gewählt, dass die Bilder möglichst identisch aufgenommen werden konnten. Im Anschluss an die Messungen wurden die Einzelaufnahmen in *Adobe Photoshop* zu einem Zeitrafferfilm geschnitten. Über den angegebenen Zeitraum war jedoch aus der frontalen Position mit der Kamera keine Bewegung festzustellen. Daraufhin wurde die Kamera seitlich auf die Tafel gerichtet, s. auch Abbildung 2-6. Sie wurde dafür an der Wand der Einhausung montiert. Dies hat den Vorteil, dass die Kamera von den Erschütterungen, die sich durch das Betreten des Podests im Zuge der Arbeiten am Tafelgemälde ergeben, entkoppelt ist. Die Aufnahmen begannen am 07.06.2023 mit einer 30-minütigen Taktung (Blende: 8, Zeit: 1/30 ISO: 800). Diese wurden später auf eine Stunde ausgedehnt und der Abbau der Kamera erfolgte am 10.05.2024.

Vor Beginn der Auffeuchtung wurde ein neuer Bereich ausgewählt. Das anfängliche Kamera-Setup des KDWT wurde dabei ersetzt. Zum Einsatz kam die Kamera *Nikon Z6 II,* die Speicherung erfolgte über den neu aufgestellten Mess-PC (s. Abschnitt 3.1.5). Ein auf säurefreiem Archivpapier gedrucktes Maßstabslineal wurde direkt auf einen intakten Bereich der Malerei mittels *Tylose MH 300* (5 % in Wasser) aufgeklebt. Durch ein hartes Streiflicht (LED Ringlicht) sollten dreidimensionale Veränderungen dieser Bereiche, die durch das seit 20.06.2023 begonnene Auffeuchten des Gemäldes zu erwarten sind, visuell sichtbar gemacht werden. Ziel war es, anhand der Aufnahmen eine Einschätzung zu erlangen, ab wann der Bildträger ausreichend ausgedehnt ist, um die Konsolidierung der Mal- und Grundierschicht durchzuführen. Die Aufnahmen wurden zunächst in einem 30-minütigen Intervall angefertigt (Belichtung: 1/10 Sec., Blende: 14, ISO: 800). Das Ringlicht war mit einer Zeitschaltuhr versehen. Diese schaltete das Licht erst kurz vor einer Aufnahme an, um die Lichtexposition so gering wie möglich zu halten. Innerhalb einer fünfwöchigen Erprobungsphase der Kameraeinstellung ließen sich fotografisch keine sichtbaren Veränderungen an der Testfläche feststellen. Aufgrund der relativ konstanten Klimaverhältnisse in der Einhausung, der dadurch zu erwartenden minimalen Dimensionsänderungen des Tafelgemäldes und des hohen Datenaufkommens wurde das Intervall ab 14.07.2023 auf eine Stunde ausgedehnt.

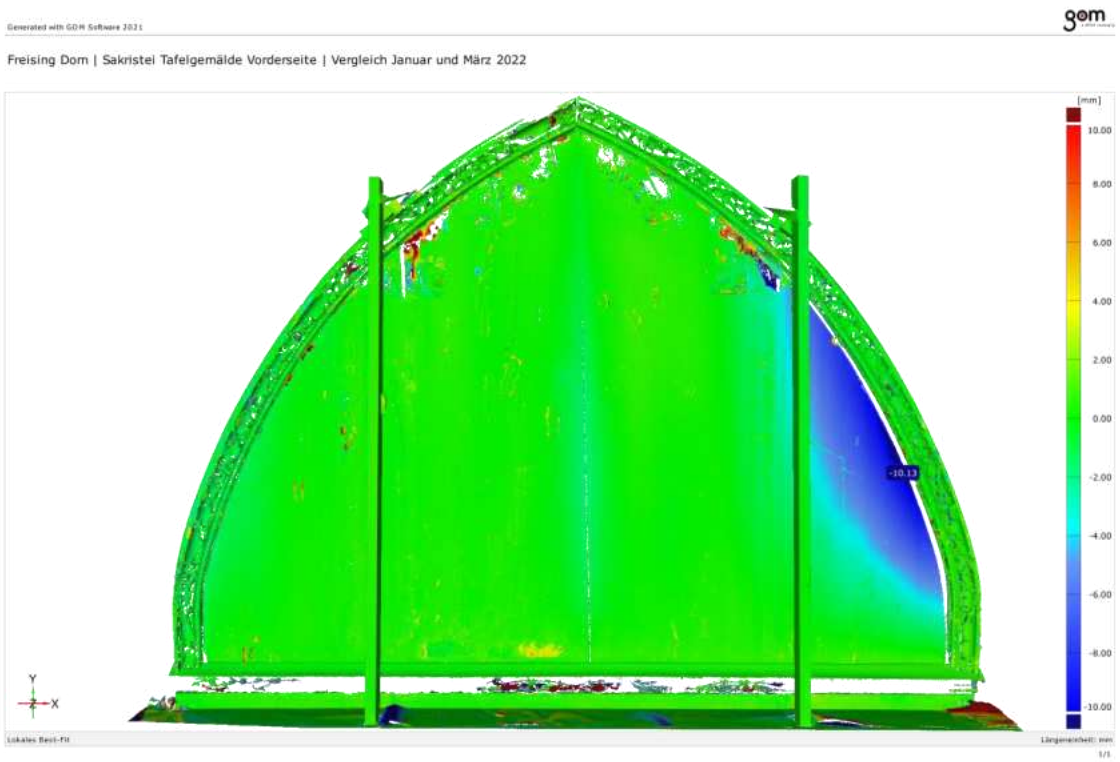

Abbildung 3-17: Vergleich der Laserscans im Januar und März 2022. Grün gefärbte Flächen weisen keine Veränderungen auf, hell- bis dunkelblaue Flächen haben sich nach hinten gewölbt, rechts über 10 mm Verformung (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).

Abbildung 3-18: Kamera-Setup ab 07.06.23 (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 3-19: Bildausschnitt für die Zeitrafferaufnahmen ab 07.06.23 (Foto: M. Hörmann, BLfD).

3.1.6.4 Konservatorisches Monitoring

Neben den sensorgestützten Verfahren erfolgte in regelmäßigen Abständen (alle 7 – 14 Tage) eine konservatorische Überprüfung der fragilen Malschicht. Anhand von Vergleichsaufnahmen und Kartierungen wurde überprüft, ob Veränderungen an den bestehenden Malschichtschollen sichtbar oder neue Schäden entstanden sind.

3.1.7 Korrosivitäts- und Luftqualitätsmonitoring

Echtzeitinformationen über die tatsächliche Korrosivität der Luft sind entscheidend für einen effektiven Korrosionsschutz wertvoller Objekte. Der *iAIR*-Sensor setzt mit einer parallelen Erfassung von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Luftdruck und Luftgüte auf eine neuartige multiparametrische Kombination der Sensorik. Der *iAIR*-Sensor misst und registriert die zeitliche Veränderung des elektrischen Widerstands einer dünnen Leiterbahn (Kupfer-Foliensensor), die auf einem isolierenden Untergrund aufgebracht ist. Korrodiert das Metall, so verringert sich die Querschnittsfläche der Spur und der Widerstand erhöht sich. Diese Änderung wird direkt in eine Korrosionsrate umgerechnet.

Nachdem der *iAIR*-Sensor bislang auf die Anwendung in musealer Umgebung (Vitrinen) im Ausstellungsraum ausgerichtet war, wurde in einem ersten Schritt ein Anforderungsprofil für die Anwendung in der Einhausung in Freising erstellt. Zentral für die Anwendung in der Einhausung bleibt die zeitnahe Indikation potentieller Schäden an Kulturgütern – in diesem Anwendungsfall dem Tafelgemälde während der Auffeuchtung. Weiter wurden konkrete Anforderungen hinsichtlich Stromversorgung, Standzeiten und Verbau der Sensorelemente bestimmt. Diese Anforderungen flossen in die im nächsten Arbeitsschritt anzupassenden Sensoren ein. Da der *iAIR*-Einsatz im vorliegenden Projekt auf die Anwender in der Denkmalpflege zielt, wurden die Anforderungen an die Auslegung des *iAIR*-Systems in enger Zusammenarbeit mit den kooperierenden Projektpartnern abgleitet und in diesem Arbeitsschritt weiter geschärft.

3.1.7.1 Anforderungen an den *iAIR*-Sensor

Aktueller Anwendungsfall ist die Überwachung der Luftgüte in der Einhausung. In der Einhausung kann durch die Überwachung eine Frühindikation für mögliche VOC-Belastungen und dementsprechende Ableitung von Maßnahmen (Luftwechsel, Einsatz von Filtern etc.) erfolgen.

In der Einhausung hat eine Überwachung der VOC-Belastung hohe Relevanz. Aufgrund der zeitlichen Beschränkung bei gleichzeitig starkem Kostendruck, wurden preisgünstige, für den Museumseinsatz nicht umfassend erprobte Materialien verwendet (s. Anhang I: Material- und Geräteliste), die tendenziell ein höheres Schädigungspotential (Korrosion) aufweisen können. Parallel muss die Überwachung des umgebenden Kirchenraums (Sakristei) auf VOC-Belastung dargestellt werden, um Messungen in der Einhausung zu referenzieren und Transparenz über mögliche Anreicherungen von in der Umgebungsluft vorhandenen Schadstoffen in der Einhausung zu schaffen.

Der verwendete Korrosionssensor (Prototyp des *iAIR*-Sensors) ist in der Lage, mit hoher Sensitivität zu messen und damit frühzeitig potenzielle und drohende Schädigung durch Korrosion zu erkennen. Im Bedarfsfall, bei erhöhter Korrosionsrate, muss dies durch feinanalytische Labormessungen korrosionsrelevanter Schadstoffe (u. a. Essigsäure, Ameisensäure, Acetaldehyd und Formaldehyd) und deren Summenwerte unterstützt werden.

Zur Bewertung des Schadenrisikos für Kunst- und Kulturgüter ist die Überwachung von Essigsäure (und Ameisensäure) in Innenräumen und Vitrinen von großer Bedeutung (s. Dahlin, 2014). Nachweislich beschädigen organische Säuren – primär Essigsäure – Kulturgut aus Blei, Kupfer, historischem Glas, kalkhaltigen Materialien, Lacken, Pigmenten, empfindlichem Papier und anderen Materialien (s. Grøntoft, 2019).

Auch die niedrigen Aldehyde (Formaldehyd und Acetaldehyd) gehören zu den Hauptschädigern im vorliegenden Anwendungsfall. Formaldehyd kommt von allen Aldehyden die größte technische Bedeutung zu. Quellen liegen in der Verwendung von verleimten Hölzern und Kunstharzen, die u.a. auch im Lager- und Ausstellungsbau eingesetzt werden (s. Schieweck 2014, S. 53 f.).

Auch Acetaldehyd ist eine weit verbreitete Industriechemikalie, die als Lösungsmittel ebenso wie als Zwischenprodukt, z.B. bei der Herstellung von Essigsäure eingesetzt wird. Darüber hinaus kann Acetaldehyd im Innenraum aus ungesättigten Fettsäuren, die Bestandteile von Linoleum, Alkydharzen und -lacken sowie Lacke, Öle und Klebstoffe auf Naturstoffbasis sind, entstehen (s. Schieweck, 2014). Auch hier finden sich potentielle Quellen im Vitrinen-, Lager- und Ausstellungsbau.

- ⇨ Messparameter: Aus Sicht der Projektpartner ist die zentrale Anforderung eine Frühindikation für eine mögliche Schädigung von Exponaten zu erhalten. Je direkter die Aussagekraft der Testergebnisse, desto vorteilhafter. Daher besteht ein Konsens, den Fokus vorrangig auf Messprinzipien zu legen, die nicht nur das Vorhandensein potentiell schädigender Substanzen anzeigen, sondern auch eine potentiell schädigende Wirkung. Dies kann bekanntermaßen durch Korrosionssensoren, wie dem *iAIR*-Sensor, dargestellt werden.
- ⇨ Stromversorgung: Die Verwendung einer festen Stromversorgung ist für die Sensoreinheit die präferierte Lösung, um ein möglichst wartungsarmes System bereitzustellen. Damit können auch störende Einflüsse z.B. durch regelmäßige Wartungsintervalle sicher vermieden werden.
- ⇨ Datentransfer: Analog zur Stromversorgung ist eine feste LAN-Verbindung für die Sensoreinheit die präferierte Lösung, um ein möglichst sicheres und wartungsarmes System bereitzustellen. Hierzu wurde ein *iAIR*-System bestehend aus 3 *iAIR*-Sensoreinheiten mit einem entsprechend konfiguriertem *Raspberry Pi* gekoppelt, der den Datenaustausch via LAN und damit eine dauerhafte Überwachung ermöglicht.
- ⇨ Standzeiten: Als Richt-Lebensdauer der Sensoreinheit in der Einhausung wurde ein Zeitraum von 12 bis 18 Monaten angestrebt. Die Wartungsintervalle für die Sensoreinheiten könnten so mit den Wartungsintervallen, die sich durch die Klimatisierung ergeben, synchronisiert werden. Ein Sensorwechsel kann durch CFA oder geschulte Restauratoren erfolgen (im Zuge der Koordination der Einhausung).
- ⇨ Optische Gestaltung der Sensoreinheiten und Verbau: Da die Einhausung nicht für den Besucherverkehr zugänglich ist, bestehen keine abweichenden Ansprüche an

die optische Gestaltung der Sensoreinheit. Die Anforderungen der kooperierenden Partner sind aus technologischer Sicht erfüllbar und konnten im Rahmen der Anpassung des *iAIR*-Sensors im vorliegenden Projekt dargestellt werden. Die Ergebnisse des vorhergehenden Schrittes wurden in das Design eines neuen Sensortyps integriert. Es wurde insbesondere auf eine hohe Zuverlässigkeit und Unempfindlichkeit (Robustheit) des *iAIR*-Systems geachtet. Der integrierte MOX-Sensor entspricht darüber hinaus den musealen Anforderungen für Luftfeuchtigkeit (+/- 3 % r.F.), Temperatur (+/- 0.5°C absolut) (und Luftdruck), in Bezug auf die hier vorliegende Fragestellung.

3.1.7.2 Messaufbau

Es wurden insgesamt drei *iAIR*-Korrosionssensoren in die Testumgebung eingebracht (s. Abbildung 3-20). Zwei Sensoren in direkter Nähe zu dem Tafelgemälde in der Einhausung und ein Sensor außerhalb der Einhausung in der Sakristei. Die zwei Sensoren in der Einhausung waren seit dem 24.08.2022 online. Die nötige Bauteilöffnung für den Anschluss des dritten Sensors in der Sakristei konnte nach schadstoffbedingten Unterbrechungen der Arbeiten am 25.08.2022 erfolgen. Seitdem wurden kontinuierlich Messdaten aufgezeichnet, die in Echtzeit in der Webapplikation eingesehen werden konnten.

Abbildung 3-20: Generation iAIR(wired) mit Basisstation (Foto: E. Spiegel, CFA).

3.2 Hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche

Die hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche dienten als Mittel der Risikoabschätzung. In Ergänzung zu den bereits aus der Literatur bekannten Risiken wurden hier die Materialien und Materialkenndaten des Fallbeispiels ermittelt und in der Simulation und an hölzernen Probekörpern verwendet. Dies ermöglicht eine präzisere, auf den konkreten Fall zugeschnittenen Vorhersage. Zu Möglichkeiten und Grenzen der hygrothermischen Simulation s. Holl & Krus (2019).

3.2.1 Herstellung von Probekörpern

Die zur Risikoabschätzung geplanten hygrothermischen Simulationen und Klimaschrankversuche erforderten die Herstellung geeigneter Probekörper, um das zu erwartende Verhalten des Tafelgemäldes abzuleiten. Zur Herstellung der Probekörper sollten historische Verfahren und traditionelle Techniken angewendet werden, damit sich die Probekörper so nah wie möglich – jedoch in z. T. vereinfachter Weise – an das Original annähern. Zusätzlich zum originalen Malschichtaufbau kommen in einem Tafelgemälde teils zahlreiche Überarbeitungen und Restaurierungen mit unterschiedlichsten Materialien. Da es sich nicht um standardisierte Materialien und Auftragstechniken handelt, variiert die Zusammensetzung innerhalb eines Gemäldes stark (vgl. Kapitel 2.2.3). Hinzu kommt der Einfluss diverser Alterungsprozesse und Schadensmechanismen. Dieses System exakt nachzustellen und zu modellieren ist nicht möglich. Für die Probekörper und die Simulation ist daher eine Vereinfachung des Systems notwendig. Wichtig sind hierbei vor allem die Materialien, die großen Anteil an der Gesamtfläche und so potentiell großen Einfluss auf klimainduzierte Bewegungen des Tafelbildes haben. Dies sind im Falle des Freisinger Tafelbildes das Trägermaterial Holz, die Grundierung, die Vergoldung und die am häufigsten vorkommenden Farbbereiche inklusive (vollflächigen) Überzügen. Für die Herstellung der Probekörper wurden daher insbesondere folgende Faktoren berücksichtigt: Holzart des Bildträgers, Jahrringbreite und -ausrichtung, Anzahl der Risse, Astlöcher und andere Holzfehler, Ausführung der Fugen sowie der (Bild-)Schichtaufbau (Dicke, vorherrschende Pigmente und Bindemittel). Nicht berücksichtigt wurden hingegen die rückseitig aufgebrachte Beize und die Wergabklebungen sowie die Leinwandkaschierungen, die sich partiell unter der Grundierung befinden. Durch die Beize ist keine signifikante Veränderung des hygrothermischen Verhaltens des Holzes zu erwarten. Aufgrund der Vielzahl an potenziellen Einflussparametern wurde von den Wergabklebungen und Leinwandkaschierungen abgesehen.

Weitere Ziele für die Herstellung waren möglichst kontrollierte, einheitliche und definierte Schichtdicken sowie Gleichmäßigkeit, Homogenität und Reproduzierbarkeit. Schichtdicken werden u.a. vom Material (z. B. Zusammensetzung, Rezepturen, spezifische Materialeigenschaften), aber auch der Auftragsart, -technik, -trocknung und Umgebungsparametern (z. B. Temperatur und Luftfeuchtigkeit) beeinflusst.

3.2.1.1 Herstellung und Beschichtung der hölzernen Probekörper

Wie bereits erwähnt (Abschnitt 2.2.3.1), konnte die Verbindungsart der einzelnen Tafelbretter nicht zweifelsfrei geklärt werden. Da sowohl die stumpfe als auch verblattete Fügung häufig bei spätmittelalterlichen Holztafelgemälden vorkommen und es Anhaltspunkte für beide Techniken am untersuchten Tafelgemälde gab, wurden für die Erstellung der Probekörper beide Varianten betrachtet (s. Abbildung 3-21). Um die Wirkung der Gratleisten in dem Gefüge zu überprüfen, wurden zusätzlich Probeplatten mit eingeschobenen Gratleisten erstellt.

Obwohl die Beschichtung größerer Flächen und späteres Zerschneiden zu homogeneren Aufträgen und Schichtdicken führen kann, mussten die Probeplatten zu Gunsten der verschiedenen Fügetechniken vor ihrer Beschichtung hergestellt und entsprechend ihrer Endmaße verleimt werden. Da sich die Verhältnisse zwischen der Größe der Holzfläche und dem

Querschnitt der Gratleisten nicht exakt proportional verkleinern lassen, wurde der Querschnitt der Gratleisten auf die kleinste technisch machbare Größe festgelegt. Ausführliche Informationen zu den unterschiedlichen Varianten lassen sich aus Tabelle 3-2 entnehmen. Insgesamt wurden drei Sets à vier beschichteter Probekörper hergestellt – ein Set für die Einhausung (Set 1) und zwei für die Klimaschrankversuche (Set 2 u. Set 3). Davon wurde eines mit ausgewählten Schimmelpilzen in dem Maße vorgeschädigt (Set 2), sodass deren Zustand einer gealterten Malschicht möglichst nahekommen sollte.[57] Set 1 umfasst zudem zwei unbeschichtete Probekörper.

Beim Rohmaterial für den Bildträger handelt es sich um ein handverlesenes Fichtenmittelbrett von hoher Qualität mit mittelbreiten, stehenden Jahrringen der Güteklasse A.[58] Damit sollte eine dem Tafelbild ähnliche Jahrringanordnung und ein möglichst ähnliches hygroskopisches Verhalten gewährleistet werden.

Tabelle 3-2: Varianten der hölzernen Probekörper

Bezeichnung	Beschreibung
Blanko	Aus einem Stück gefertigt
Stumpfer Stoß	Aus zwei faserparallel stumpf gestoßenen und verleimten Teilstücken
Verblattung	Aus zwei faserparallel gestoßenen und verleimten Teilstücken mit 10 mm breiter Verblattung als Stoßfuge
Verblattung + Gratleiste	Aus zwei faserparallel gestoßenen und verleimten Teilstücken mit 10 mm breiter Verblattung als Stoßfuge; zusätzlich rückseitig mit einer Gratleiste quer zur Faser versehen (Querschnitt: 20 mm Breite/20 mm Tiefe)

[57] Den Hinweis zur künstlichen „Alterung“ von Probekörpern mittels Schimmelpilzbefall gab dankenswerterweise Dr. Nanke Schellmann, die hierzu im Rahmen ihrer Dissertation erste Erfahrungen gemacht hatte. Vgl. hierzu auch: Schellmann, Nanke: Consolidation of Stressed and Lifting Decorative Coatings on Wood. The effect of consolidant choice on the structural integrity of multi-layered East Asian lacquer coatings with gesso-type foundation layers, dissertation, Dresden 2012, p. 141.
[58] Nach DIN EN 1927 1 entsprechen Jahrringbreiten <4 mm in der höchsten Qualitätsklasse A, unter 7 mm ist Qualitätsklasse Klasse B.

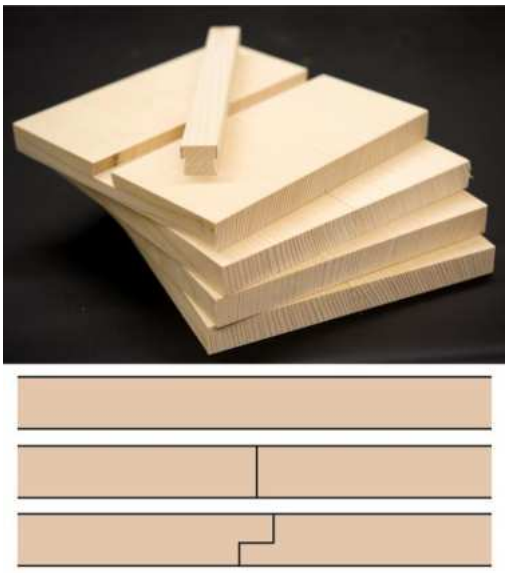

Abbildung 3-21: Unbeschichtete Holzprobekörper mit Darstellung der unterschiedlichen Fügearten (Foto: M. Hörmann, BLfD).

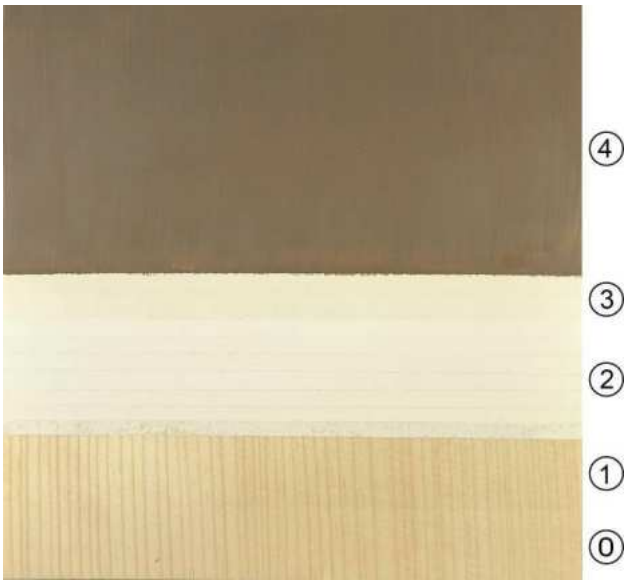

Abbildung 3-22: Vorderseitiger Schichtaufbau der Probeplatten: 0: Bildträger - 1: Isolierung - 2: Grundierung (7x) - 3: Sperrschicht (2x) - 4: Malschicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Alle Verleim- und Beschichtungsschritte wurden unter klimatisierten Umgebungsbesindungen von ca. 19-21 °C und 53-55 % r.F. in den Werkstätten des BLfD (Zimmer 126) durchgeführt. Konkrete Zusammensetzung, Schichtanzahl und Auftragsmtethode(n) s. Anhang D: Hygrothermische Simulation. Die Bretter wurden mittels Hautleim (40 % in demin. Wasser; Auftrag mit einem Pinsel) verleimt. Nach einer Trocknungszeit von fünf Wochen wurden sie auf die gewünschten Endmaße (200 x 200 x 20 mm) zugeschnitten und abgerichtet. Drei der Probekörper erhielten jeweils rückseitig eine mittig eingeschobene Gratleiste aus Fichtenholz, welche in eine leicht konisch zulaufende Nut eingetrieben und nicht verklebt wurde, um ihre Gängigkeit zu gewährleisten.

Im weiteren Verlauf wurde die Anwendung professioneller Geräte zur Erstellung möglichst einheitlicher und definierter Schichtdicken diskutiert. Ein Filmziehen mit Rakeln oder Spiralen von Hand konnte aufgrund der Abmessungen (Probeplatten = größer als Breite der Rakel) nicht angewendet werden. Aus finanziellen Gründen war die Nutzung elektromotorischer Filmzieh- oder Schichtdickenmessgeräte (s. z. B. Firma Erichsen) leider nicht möglich. Spritz- und Tauchverfahren wurden aufgrund der Verarbeitungseigenschaften oder -viskosität der Beschichtungsmaterialien nicht angewendet; stattdessen wurde überwiegend auf Streich- und Rollverfahren zurückgegriffen.

Der Aufbau der Grundier- und Malschicht erfolgte schließlich nach historischem Vorbild in mehreren Schichten (s. Abbildung 3-22). Zunächst wurde eine isolierende Schicht aus Hasenhautleim (7% in demin. Wasser) beidseitig mit dem Pinsel aufgetragen. Die anschließend vorderseitig aufgetragene Leim-Kreide-Grundierung besteht ebenfalls aus Hasenhautleim (7% in demin. Wasser), gemischt mit Champagnerkreide (natürliches Calciumcarbonat; 1:1,3 bzw. 1:1,4). Der Auftrag erfolgte mit dem Pinsel in insgesamt sieben Schichten, wobei die erste dünn aufgestupft wurde und die darauffolgenden jeweils abwechselnd längs und quer

zur Holzfaser aufgestrichen wurden. Nach dem Auftrag der siebten Schicht wurde die Oberfläche in mehreren Durchgängen feucht und trocken bis ca. 400er Körnung glattgeschliffen, bis die gewünschte Schichtdicke erreicht war.

Im Mittel ergab sich eine Schichtdicke von ca. 700 - 800 µm, was in etwa den Befunden der entnommenen originalen Mal- und Grundierschichtproben entspricht.[59] Um die Saugfähigkeit der Grundierung zu reduzieren, wurden zwei dünne Schichten Hasenhautleim (7% in demin. Wasser) als Sperrschicht aufgetragen. Die Auswahl der Pigmente für die Malschicht erfolgte in Anlehnung an die Ergebnisse der REM-EDS Untersuchung – als Hauptbestandteile der originalen Farbschicht im Bereich der braungrünen Architekturbereiche wurden demnach ein kupferhaltiges Grünpigment, Kreide, Bleiweiß und ein rotes Eisenoxid angenommen. Als „*kupferhaltiges Grünpigment*" wurde Grünspan (synthetisch)[60] ausgewählt und mit Champagner Kreide als Füllstoff gemischt. Als weitere farbgebende Bestandteile wurden Blutstein (natürliches Eisenoxid) und Kremserweiß (Bleiweiß) verwendet. Sonneneingedicktes Leinöl diente als Bindemittel für die Farbherstellung, da dies der historischen Zubereitungsweise[61] vermutlich am nächsten kommt. Der Vorteil gegenüber dem Rohleinöl ist, dass das sonneneingedickte bereits vorpolymerisiert ist und daher eine kürzere Trocknungszeit aufweist, was für die Herstellung der Probekörper aufgrund der engen Taktung der weiteren Arbeitsschritte notwendig war. Die Pigmente wurden jeweils einzeln per Hand mittels Glasreibeplatte und -läufer so lange im Leinöl angerieben, bis eine homogene Farbpaste entstand.[62] Die fertigen Farben wurden anschließend in einem Verhältnis gemischt, dass Farbeindruck und Helligkeit annähernd der originalen Malschicht entsprachen. Um eine für den sehr dünnen Farbauftrag ausreichend streichfähige Farbe zu erhalten, wurde sie vor dem Auftrag jeweils mit einer kleinen Menge Sangajol (Testbenzin) gemischt. Die Schichtdicke beträgt etwa 30 µm.

Die Bindemittelanalyse des rückseitigen Anstrichs deutete auf Leinöl hin. Da es sich bei der Schicht möglicherweise um eine Überarbeitung aus dem frühen 20. Jahrhundert handelt, als die Verwendung von Leinölfirnis (gekochtes Leinöl, sikkativiert) für transparente Überzüge gängige Praxis war (s. Hebing, 1909, S. 71 f., S. 46 f.; Linke & Adam, 1903, S. 90-93) und aufgrund der kürzeren Trocknungszeit, wurde für die Beschichtung der Probekörper Leinölfirnis (Mangan sikkativiert) genutzt. Die leinölgebundene Malschicht trocknete 18 Tage und die rückseitige Leinölfirnisschicht 13 Tage, bevor die Platten auf die jeweiligen Standorte aufgeteilt wurden. Aufgrund der insgesamt sehr kurzen Trocknungszeit der Leinölfarbe bis zur Weiterbearbeitung im Klimaschrank, musste auf den Auftrag der Firnisschichten auf der Malschicht verzichtet werden. In der Praxis erfolgt das Firnissen von Ölmalerei nach mehreren Monaten Trocknungszeit, im Idealfall frühestens nach einem Jahr, weshalb dies innerhalb

[59] Während des Schleifens wurde die Dicke mittels eines digitalen Messschiebers zwischengeprüft. Für ein genaueres Ergebnis wurde am Schluss eine Querschliffprobe an einer zusätzlich angefertigten Probeplatte entnommen und die Schichtdicke der Grundierung mikroskopisch bestimmt.

[60] Im Rahmen der Vorversuche konnte selbst mit dem feinsten verfügbaren Malachitpigment (0 – 20 µm Korngröße) keine gut streichfähige Ölfarbe hergestellt werden, mit Grünspan (synth.) hingegen, ließen sich gleichmäßige, dünne Aufstriche, ähnlich dem Original, erzielen. Da die traditionelle Herstellung von Grünspan sehr zeitaufwendig ist, wurde auf ein synthetisch produziertes Pigment zurückgegriffen. Hierbei handelt es sich chemisch betrachtet um Kupfer(II)-acetat-1-hydrat (basischer Grünspan).

[61] Vgl. Cennini, Cennino: Das Buch von der Kunst oder Tractat der Malerei, Wien 1871, S. 61: *„Wie man ein gutes und treffliches, an der Sonne gekochtes Oel macht".*

[62] Bleiweiß wurde aus Arbeitsschutzgründen nicht in Pulverform verarbeitet, sondern als gebrauchsfertige Leinölfarbe bezogen.

der Projektlaufzeit nicht realisierbar gewesen wäre. Für die Klimaschrankversuche wurde der Wasserdampfdiffusionswiderstand der Leinölfarbe ohne zusätzlichen Firnis als ausreichend hoch angenommen, um aussagekräftige Ergebnisse zu generieren. Dies zeigte Holl (2016, S. 116 und 153), wonach die Wahl des Bindemittels in der hygrothermischen Betrachtung hinsichtlich der Reaktion des Schichtenverbunds auf klimatische Schwankungen den stärksten Einfluss hat. Der Einfluss des Firnisses sollte in den hygrothermischen Simulationen nur näherungsweise dargestellt werden.

Die Probekörper wurden vor und nach Beschichtung angelehnt an „*DIN EN 325 – Bestimmung der Maße der Prüfkörper*“ gewogen und vermessen. Der Trocknungsprozess der leinölgebundenen Schichten wurde durch eine engmaschig durchgeführte Wägung (PCB 250-3, *Kern*; 0.001 g) der Probekörper begleitet. In der ersten Woche nach Auftrag erfolgten die Messungen einmal täglich, danach in teils größeren Abständen. Während der Beschichtung und Lagerung in den Werkstätten des BLfD bis zum Transport wurden die Platten bei einem Raumklima von ca. 55 ± 5 % r.F., 19,5 ± 2 °C aufbewahrt.

Neben den beschichteten Probekörpern wurde für Set 1 jeweils eine unbeschichtete „Blanko“-Platte aus rezentem und historischem[63] Holz erstellt, die als Referenz für die beschichteten Platten dienen sollten. Sie weisen die gleichen Maße auf, wie die beschichteten Probekörper.

Um die Feuchtigkeitsaufnahme und -abgabe über die Schmalseiten der Probekörper zu verhindern und ein „unendliches“ Brett zu simulieren, wurden die Ränder alle Probekörper mit einem Aluminiumklebeband (*Tesa® Aluminium Tape*) abgeklebt (s. Abbildung 3-23).

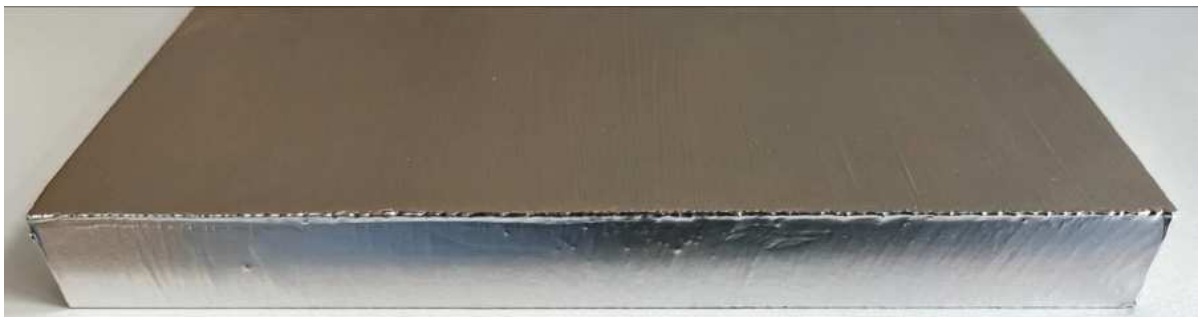

Abbildung 3-23: Probeplatte nach Abklebung mit Aluminiumklebeband (Foto: M. Hörmann, BLfD).

3.2.1.2 Vorschädigung hölzerner Probekörper für Klimaschrankversuche

Wie bereits erwähnt, sollte ein Satz (Set 2) der beschichteten hölzernen Probekörper vor der Durchführung der Klimaschrankversuche eine Vorschädigung durch Schimmelpilzbefall erfahren. Die Platten wurden dafür 52 Tage bei Klimabedingungen von 80 – 90 % r.F. und 30 °C im Klimaschrank der TUM in Weihenstephan (Professur für Pilzbiotechnologie in der Holzwissenschaft) gelagert, nachdem diese dort mit einer Schimmelpilzsporen-Suspension

[63] Es handelte sich hierbei um ein Fichtenholzbrett aus den Beständen des Bauarchivs des BLfD in Thierhaupten, welches vermutlich aus dem frühen 19. Jahrhundert stammt.

beimpft wurden.[64] Die Suspension setzte sich aus einer Mischung der Pilzspezies *Aspergillus niger, Aspergillus nidulans, Penicillium chrysogenum* und *Penicillium griseofulvum* zusammen[65]. Da das Wachstum anfangs sehr schleppend voranging – u. a. vermutlich aufgrund der grünspan- und bleiweißhaltigen Beschichtung – wurden die Oberflächen nach einigen Tagen zusätzlich mit einer Nährlösung (Mineralsalze + 0,2 % Glucose) besprüht. Bis zum Ende der Vorkonditionierungsphase entwickelte sich daraufhin ein teils ausgeprägter Schimmelpilzbefall sowohl an den Vorder- als auch den Rückseiten der Probekörper (s. Abbildung 3-24/Abbildung 3-25).

Anschließend erfolgte die Hemmung des oberflächlich sichtbaren Schimmelpilzbefalls mittels eines 80 %igen Ethanol-Wasser-Gemisches, welches mithilfe einer Sprühflasche auf die Oberfläche aufgebracht wurde. Nach 2 – 3 min. Einwirkzeit wurden die Platten mithilfe von Zellstofftüchern feucht gereinigt. Dabei zeigte sich, dass die ursprünglich aufgetragene Sporensuspension teilweise permanente Verfärbungen (dunkle Schlieren) auf der Malschicht hinterließ, die sich nicht reinigen ließen. Außerdem hatte der Schichtaufbau augenscheinlich an Stabilität verloren, was sich durch leichte Craquelébildung und leichtes Ablösen der Malschicht in den Randbereichen zeigte.

Im Anschluss an die Reinigung wurden die Platten für die folgenden Tests ans KDWT Bamberg transportiert. Das Einstellen der Probekörper in die Klimakammer erfolgte noch am selben Tag, sodass sie für die Klimaschrankversuche auf 80 % r.F. und 19 °C vorkonditioniert werden konnten.

Abbildung 3-24: Vorderseite der von Schimmel befallenen Probeplatte S_M_2 (Foto: M. Hörmann, BLfD).

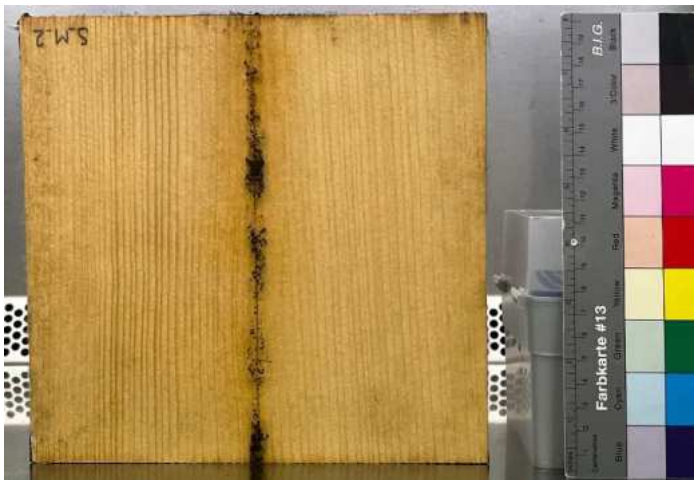

Abbildung 3-25: Rückseite der von Schimmel befallenen Probeplatte S_M_2 (Foto: M. Hörmann, BLfD).

[64] Das Vorhaben wurde freundlicherweise durch Prof. Dr. Philipp Benz (Professur für Pilztechnologie in der Holzwissenschaft, TUM) beraten und begleitet, die Umsetzung erfolgte durch Sabrina Klasen (technische Assistentin, TUM).
[65] Die Auswahl dieser Schimmelpilzarten erfolgte anhand der Beprobung in der Sakristei vorhandenen Schimmels sowie dank der zur Verfügungsstellung eines unveröffentlichten Berichtes zur Schimmelpilzbeständigkeit von Holzbeschichtungen (Flade, 2012a und b). Weiterhin wurden Arten gewählt, die unter den Prüfbedingungen gut und schnell wachsen sowie üblich für Kirchen in der Denkmalpflege sind (S. Zalar et al. 2023; Sterflinger et al. 2018, S. 12). Weidenbörner (2004) benennt dafür die Vertreter der Gattungen *Alternaria, Aspergillus, Cladosporium und Penicillium.*

3.2.1.3 Beschichtung der Glasfritten

Zusätzlich zu den hölzernen Probeplatten wurden Aufstriche des gesamten Schichtpakets auf Glasfritten (*DURAN® Filter Discs*, *Porosität 4, ⌀ 90 mm*) angefertigt (s. Abbildung 3-26), die als Grundlage für die Simulationen mittels *WUFI®* dienen. Zur Darstellung der unterschiedlichen Schichtpakete wurden insgesamt drei Sets hergestellt:

- Set 1: Mal- und Grundierschicht
- Set 2: Rückseitenbeschichtung
- Set 3: Firnisschichten (Schellack + Dammarharz)

Für die statistische Auswertung waren je drei Aufstriche pro Schichtpaket notwendig. Zusätzlich erfolgten wet-cup und dry-cup Messungen nach DIN EN ISO 12572:2001 09. Hierfür wurden insgesamt 18 Fritten beschichtet. Ergänzend zur Vermessung der Probekörper vor und nach der Beschichtung, wurde hier auch das Nass- und Trockengewicht der einzelnen Schichten dokumentiert. Die Aufbewahrungsbedingungen entsprachen denen der Holz-Probekörper.

Abbildung 3-26: Beschichtete Glasfritten für wet- und dry-cup Messungen (Foto: M. Hörmann, BLfD).

3.2.2 Baukonstruktives/bauphysikalisches Modell

Das **bauphysikalische Modell** basiert auf der historischen Einbausituation. Bis zur Errichtung des Podests 2016 hing das Tafelgemälde (bis auf wenige Ausnahmen, s. 2.2.2) mit ca. 10 cm Abstand an der feuchten und kühlen Westwand der Unteren Domsakristei. Die Rückwand wurde durch einen späteren Anbau zur Hälfte verdeckt, die andere Hälfte blieb Außenwand (s. ebenfalls 2.2.2). Dadurch stellte sich in dem Luftspalt zwischen Wand und Tafel ein grundsätzlich anderes Klima ein als in der restlichen Sakristei. Während die Sakristei durch offene Fenster und Türen regen Luftwechsel erfährt und spätestens seit dem 20. Jahrhundert auch beheizt wird (s. ebenfalls Abschnitt 2.2.2) wurde der Luftspalt bauphysikalisch vom Einfluss der Wand dominiert. Diese ist in das Erdreich eingebunden und fungiert somit nicht nur als Wärmesenke gegenüber der Raumluft, sondern aufgrund kapillar aufsteigender Bodenfeuchte auch als Feuchtequelle. Weiterhin gibt es ein Fenster, das z. T. einen Lichteinfall auf

das Tafelbild ermöglicht. Durch die Abnahme des Tafelbildes und Vorrücken auf das Arbeitspodest (Abstand zur Wand ca. 1 m) ergab sich dadurch eine veränderte Licht- und ggf. auch thermische Belastung.

Es ist anzunehmen, dass das Tafelbild viel von der Feuchtigkeit, die es über die Vorderseite an die (im Winter) trockenere und wärmere Raumluft abgibt, an der Rückseite aufgenommen hat. So stellte sich ein Diffusionsstrom im Holzträger ein. Die Spuren des Insektenbefalls im unteren Tafelbereich deuten darauf hin, dass zuvor über viele Jahre die Holzfeuchte infolge einer r.F. weit über 65 % zu hoch war (Child 2013, S. 422). Die vorderseitige Malschicht führt zudem zu einer asymmetrischen Feuchteverteilung im Holzträger, was zu zusätzlichen Spannungen und einem erhöhten Schadensrisiko führen kann (Gereke et al. 2011, S. 40). Diese Asymmetrie ist bei zahlreichen Holztafelgemälden der Grund für eine konvexe Verformung (van Grevenstein et al. 2014, S. 39), welche bislang in diesem Fallbeispiel größtenteils ausgeblieben ist. Grund dafür sind vermutlich die Fixierung des Holzträgers in der Nut des Rahmens sowie die rückseitigen Gratleisten. Diese verhindern die zyklischen Deformationen der Tafel, welche zur fortschreitenden Veränderung des Holzgefüges führt. Die rechte Tafelseite, die nicht mehr in der Nut sitzt, ist daher auch der einzige Teil der Tafel, der diese konvexe plastische Verformung in Ansätzen aufweist.

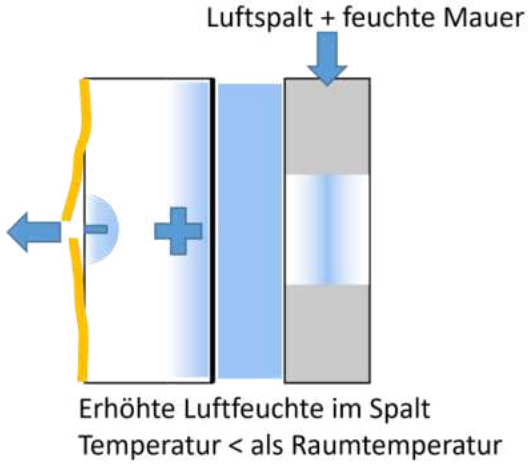

Abbildung 3-27: Bauphysikalisches Modell der historischen Einbausituation

Maßgebliche Änderungen an diesem System waren der Einbau diverser Heizungen in der Sakristei, die Trockenlegung der Wand und zuletzt die Abnahme des Tafelgemäldes von der Wand. Dadurch wurde nicht nur die Feuchteabgabe erhöht (trockeneres Klima durch Heizen), sondern auch der Feuchtenachschub unterbrochen (Trockenlegung) und die Luftzirkulation an der Tafeloberfläche verstärkt (Positionierung im Raum). Zudem ist die Tafel nun der Sonnenstrahlung durch das Fenster ausgesetzt. Diese Genese hat höchstwahrscheinlich zur fortschreitenden Schädigung des Tafelbilds beigetragen.

Das hygroskopische Verhalten der Holztafel kann in Annäherung durch Sorptionsisothermen (s. 3.2 sowie 4.2) beschrieben werden. Diese zeigen den Verlauf der Gleichgewichtsfeuchte, die sich bei konstanter relativer Luftfeuchte in einem Holzkörper einstellt. Da diese Kennlinien

auf Mittelwerten empirischer Versuche beruhen, ist ihre Aussagekraft für historische Kulturgüter mit unbekannter Belastungshistorie begrenzt. Dennoch konnte im Projekt so abgeschätzt werden, welche Luftfeuchteänderung theoretisch nötig ist, um die gewünschte Ausdehnung der Tafel zu erreichen.

Ein Ansatz für die dauerhafte Stabilisierung des Tafelgemäldes ohne den Einsatz energieintensiver Klimatechnik oder einer geschlossenen Vitrine ist es daher, den feucht-kühlen Luftspalt der ursprünglichen Einbausituation nachzubilden. Die Funktion der Wärmesenke wird dabei unverändert von der Außenwand erfüllt. Es sollte daher als Primärziel eine geeignete, ressourcenschonende Befeuchtungsmethode für den Luftspalt gefunden werden. Hierfür bieten sich verschiedene Puffermaterialien in Kombination mit einer elektronisch gesteuerten, luftfeuchteabhängigen Wasserzufuhr an. Die örtlichen Einschränkungen wie das Schimmelwachstum oder eine mögliche Salzbelastung der Wand müssen dabei beachtet werden.

Baukonstruktiv handelt es sich bei dem Holztafelgemälde höchstwahrscheinlich um stumpf gestoßene Fichtenbretter mit einer Dicke von ca. 2 cm. Die einzelnen Lamellen sind von hoher Qualität mit engen, stehenden Jahrringen und wenigen Fehlstellen wie Ästen oder Harzgallen. Die Jahrringlage konnte nicht direkt bestimmt werden, da die Schmalseiten vom Rahmen verdeckt werden. Es sind jedoch stehende Jahrringe anzunehmen, da die Einzelbretter nicht schüsseln (Colmars et al. 2009, S. 8). Die Tafel weist vorderseitig einen diffusionshemmenden Anstrich in Form der Malschicht auf und wird rückseitig mittels eingeschobener Gratleisten stabilisiert. Zudem wird die Tafel in der Nut eines umlaufenden, massiven Holzrahmens gehalten. Mutmaßlich durch das starke Schwinden der Tafel oder konstruktive Änderungen ist diese auf der rechten Seite aus der Nut herausgerutscht (vgl. Abschnitt 2.2.1). Hier treten die größten Verformungen der Tafel aus der Tafelebene heraus auf. Die Verformungen der Tafel werden zum einen durch die Beschichtungen (reduzierte, einseitige Feuchteaufnahme durch rückseitigen Anstrich, s. Abschnitt 2.2.3.2) und die Stützkonstruktionen (Gratleisten) bestimmt. Bis zuletzt konnte nicht geklärt werden, ob sie ihre Funktion noch vollständig erfüllen – also noch frei beweglich sind. Aufgrund der Vorgeschichte des Tafelbilds war vor Projektbeginn davon auszugehen, dass bereits plastische Verformungen aufgetreten waren und die Tafel sich nicht mehr auf ihre Ursprungsmaße bringen lässt (Bratasz, 2013, S. 12). Die Ergebnisse des Monitorings bestätigen diesen Eindruck (s. Abschnitt 4.1). Auch die Reibung in der Nut hat – ebenso wie die veränderte Lastsituation seit dem Abhängen von der Wand – möglicherweise einen Einfluss auf die Verformungen der Tafel. Weitere potenzielle Einflüsse s. 3.2.4.

Während des Projektverlaufs wurden in der Einhausung noch klassische, aktive Befeuchtungs- und Entfeuchtungsgeräte eingesetzt. Ziel des Projekts war es aber, alternative und ressourcenschonende Befeuchtungsstrategien zu untersuchen. Basierend auf dem bauphysikalischen Modell wurde hierbei der Ansatz verfolgt, mit einer passiven Klimatisierung die ehemals feuchte Rückwand nachzubilden.

Dieser wurde in zwei Abschlussarbeiten an der TUM (Kocan, 2024 u. Kerscher, 2023) im Rahmen des Projekts bearbeitet. Im Zuge der Literaturrecherche und im Kontakt mit einem weiteren DBU Projekt[66] hatten sich verschiedene hygroskopische Puffermaterialien sowie gesättigte Salzlösungen als mögliche Medien herausgestellt. Diese wurden an der TUM in Kleinversuchen experimentell untersucht.

Es wurden drei Probekörper aus Fichte mit engen, stehenden Jahrringen und den Maßen 400 x 400 x 20 mm hergestellt. Diese wurden einseitig mit Acrylfarbe beschichtet, um die diffusionshemmende Ölmalschicht des Holztafelbilds nachzubilden. Da der Diffusionswiderstand abhängig vom Bindemittelgehalt ist (Altinkaya et al., 2010, S. 421), wurde eine Acrylfarbe mit hohem Pigmentanteil gewählt. Diese imitiert den Diffusionswiderstand ausreichend genau, härtet aber wesentlich schneller aus (Derksen, 2021, S. 142). Die Schmalseiten wurden mit zuvor genanntem Aluminium-Klebeband abgedichtet. Rückseitig wurden Kunststoffbehälter luftdicht angebracht, in denen mittels Lehmbauplatten, Baumwolle und gesättigter NaCl-Lösung ein Klima ähnlich dem feuchten Luftspalt hinter dem Tafelbild aufrechterhalten werden sollte. Die Feuchtezufuhr erfolgte mit destilliertem Wasser über Infusionsbeutel und Präzisionstropfenregler (Kocan, 2024).

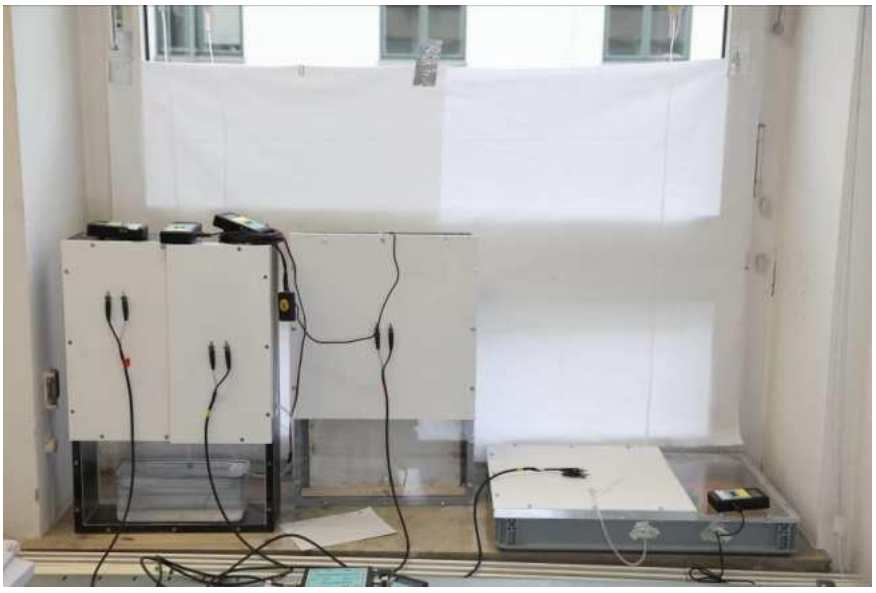

Abbildung 3-28: Versuchsaufbau der drei Auffeuchtungsmethoden (Foto: A. Fröhlich, TUM)

Die drei Aufbauten wurden am Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion einem üblichen Büroklima ausgesetzt (s. Abbildung 3-28). Über den Versuchszeitraum von zwölf Wochen hinweg wurde analog dem System am Holztafelgemälde (s. Abschnitt 3.1.4.3) die Holzfeuchte in den Probekörpern und die relative Luftfeuchte (r.F.) innerhalb und außerhalb der Klimaboxen gemessen und die Werte regelmäßig kontrolliert.

[66] DBU AZ 38338/01: Schutz national wertvoller Kulturgüter durch Einsatz gesättigter Salzlösungen in Vitrinen zur Absorption anthropogener Luftschadstoffe. Projektleitung: Universität des Saarlandes Lehrstuhl für Messtechnik Fachrichtung 7.4 Mechatronik [Campus A5 1, 66123 Saarbrücken]; Förderzeitraum 01.01.2023 – 31.12.2024. Freundlicher Austausch mit Prof. Dr. Gerhard Eggert [Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart], Dipl.Rest. Heiner Grieb [Veste Coburg] und M. A. Katja Siebel [Veste Coburg].

3.2.3 Bestimmung der Materialkenndaten

Um das hygrothermische Verhalten des Tafelgemäldes zu simulieren, wurde im ersten Schritt auf bereits bestehende Materialkenndaten zu historischen Tafelgemälden zurückgegriffen. Um jedoch die Simulation am konkreten Fallbeispiel durchführen zu können, war es erforderlich, die Materialkenndaten (Wasserdampfdiffusionswiderstand, Sorptionsisotherme etc.) des komplexen Bildschichtaufbaus des Tafelgemäldes labortechnisch zu bestimmen. Die dafür notwendigen Probekörper wurden am BLfD erstellt (s. Abschnitt 3.2.1); die Messungen im Unterauftrag durch das Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen durchgeführt. Ausführung, Untersuchungsberichte und Ergebnisse s. Anhang D: Hygrothermische Simulation.

3.2.3.1 Wasserdampfdurchlässigkeit nach DIN EN ISO 7783

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben erfolgte nach DIN EN ISO 7783 (s. DIN EN ISO 7783, 2012) durch das Feucht- und Trockenbereichsverfahren, auch als „wet - cup“ bzw. „dry - cup“-Verfahren bezeichnet. Als Prüfumgebung wurde in den Laboren des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik (IBP) eine Klimakammer mit einem konstanten Klima von 50 % r.F. und 23 °C verwendet. Bei diesem Verfahren wird der flächige Prüfkörper des Probenmaterials auf den Rand eines Prüfgefäßes gesetzt und mit diesem dampfdicht verbunden. Im Inneren des Gefäßes befindet sich beim Feuchtbereichsverfahren eine gesättigte Salzlösung, beim Trockenbereichsverfahren Silicagel. Beide Mittel sorgen für eine definierte und konstante relative Luftfeuchte: Ammoniumdihydrogenphosphat erzeugt im Gefäß für die wet-cup Messung eine relative Luftfeuchte von 93 % und bei der dry-cup Messung eine relative Luftfeuchte von 3 % r.F. Aufgrund des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen Gefäßinnerem und Klimakammer diffundiert Wasserdampf durch die Probe. Nach einiger Zeit stellt sich ein konstanter Diffusionsstrom ein, der eine konstante Gewichtsab- (wet-cup) bzw. -zunahme (dry-cup) des Messgefäßes pro Zeiteinheit zur Folge hat. Diese entspricht dem Diffusionsstrom. Die Formeln zur Umrechnung der Wasserdampf-Diffusionsstromdichte in den Wasserdampfdiffusions-Durchlasskoeffzienten, aus welchem sich über die Wasserdampfdiffusionsleitkoeffzienten schließlich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl errechnet, sind in (s. DIN EN ISO 12572, 2017) beschrieben. Daraus lässt sich die äquivalente Luftschichtdicke s_d bestimmen. Der s_d-Wert entspricht der Dicke einer ruhenden Luftschicht mit dem gleichen Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand wie der des Probekörpers.

Zur Ermittlung der Materialkenndaten des Tafelgemäldes entnahm das BLfD Materialproben am Holztafelgemälde für die am häufigsten verwendeten Farb- und Bindemittel (s. 2.2.3.3). Basierend auf den Ergebnissen wurden drei verschiedene Aufstriche auf Glasfritten (Trägerplatte) erstellt (s. Abbildung 3-26). Die Fritten wurden am 12.06.2023 mit entsprechender Dokumentation des Schichtenauftrags und des Gewichts dem Fraunhofer IBP übergeben. Analysiert wurde der Aufbau der Bildschicht (Probenbezeichnung „Aufbau Vorderseite VS“). Die originale Malschicht wurde mit ölhaltigem Bindemittel angefertigt. Darauf befinden sich noch zwei Firnisschichten. Da die Trocknungszeit von Ölmalerei sehr lange ist, wurde der Firnis auf separat Glasfritten aufgetragen (Probenbezeichnung „Aufbau Firnis SD“).

Auf der holzsichtigen Rückseite des Tafelgemäldes befindet sich ein Leinölfirnis. Dieser wurde ebenfalls auf separate Glasfritten aufgestrichen (Probenbezeichnung „Aufbau Rückseite RS“).

3.2.3.2 Sorptionsisotherme

Die Feuchtespeicherfunktion beschreibt, welcher Wassergehalt sich bei vorgegebener relativer Luftfeuchte in einem Material einstellt. Die Bestimmung der Sorptionsisotherme ist für Baustoffe mit einem messtechnisch unkomplizierten Verfahren möglich und in DIN EN ISO 12571 (s. DIN EN ISO 12571, 2022) als Klimakammerverfahren genormt. Hier wird die Probe bei konstantem Klima bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte (Massenkonstanz) gelagert. Diese wird durch periodisches Wiegen ermittelt. Hat sich die Ausgleichsfeuchte eingestellt, wird die Probe schrittweise in der jeweiligen Klimakammer bei höheren Luftfeuchten umgelagert. Aus den einzelnen Werten wird die Adsorptionsisotherme ermittelt. Der umgekehrte Vorgang senkt die relative Luftfeuchte schrittweise. Daraus ergibt sich die Desorptionsisotherme. Beim Vergleich beider Kurven wird ein Hysterese-Effekt erkennbar, die Desorption erfolgt im Vergleich zur Adsorption verzögert. Die Adsorptions- und Desorptionskurven der im Kunstwerk vorhandenen Materialien werden durch die Messung der Ausgleichsfeuchte bei unterschiedlichen relativen Luftfeuchten bestimmt. Für die in der Norm (s. DIN EN ISO 12571, 2022) beschriebene Vorgehensweise werden drei Proben zu mindestens zehn Gramm benötigt. Dies ist für die Ermittlung der Kennwerte mit geringen Schichtstärken nicht realistisch. Daher wurden die Materialeigenschaften der einzelnen Schichten mittels dynamischer Wasserdampfsorption (DVS = dynamic vapour sorption) ermittelt. Hier wird für die Gewichtsbestimmung eine Mikrowaage verwendet, sodass wenige Gramm einer Probe ausreichen. Für die Messung an der MPA in Stuttgart wurde nach Abschluss der Messungen zur Ermittlung des s_d-Werts von den Aufstrichen der Vorderseite (Grundierung und Malschicht) Material entnommen. Die Ergebnisse für die Vorderseite sind in Abbildung 3-29 dargestellt.

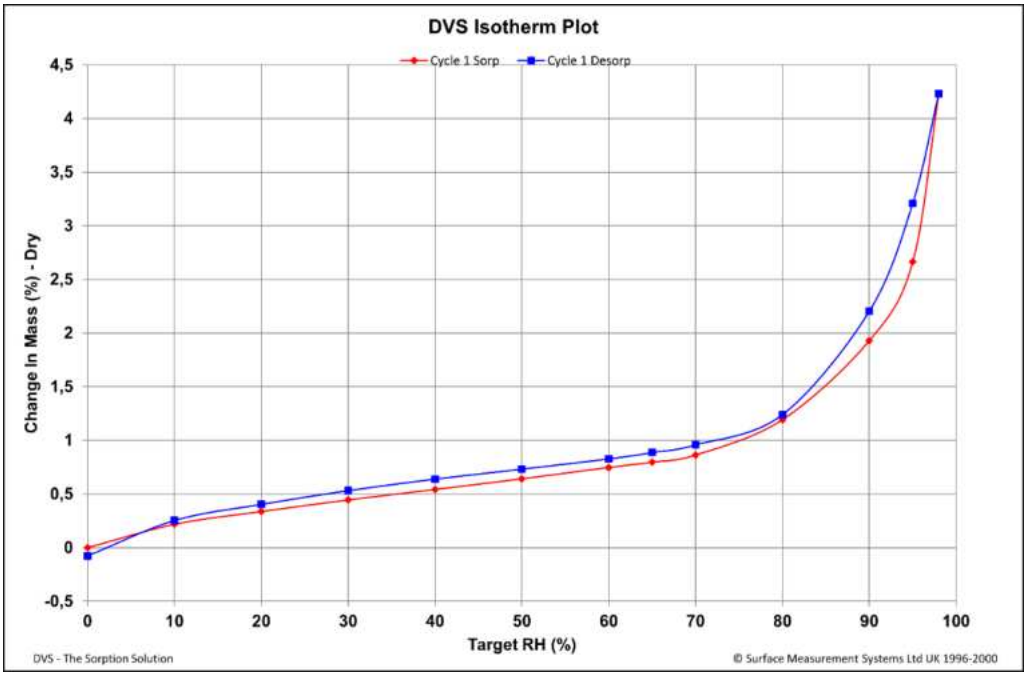

Abbildung 3-29: Sorptionsisotherme der Bildschicht gemessen mit DVS, © MPA Stuttgart.

3.2.4 Hygrothermische Simulation mit *WUFI®*

Künzel (1994) entwickelte, basierend auf den physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports zur Ermittlung des Feuchteverhaltens von mehrschichtigen Bauteilaufbauten unter natürlichen Klimarandbedingungen, ein geschlossenes Differenzialgleichungssystem. Dieses wurde im Softwareprogramm *WUFI®* numerisch umgesetzt, am Fraunhofer IBP entwickelt und mithilfe der Freilandversuchsstelle Holzkirchen experimentell verifiziert.

Die Prozesse, die in einem Kunstwerk ablaufen, sind mit denen eines Bauteils vergleichbar. In beiden Fällen handelt es sich um poröse Materialien mit spezifischen Eigenschaften sowie vergleichbaren Transportprozessen von Temperatur und relativer Luftfeuchte. Daher ist es naheliegend, die bestehenden hygrothermischen Simulationsprogramme auch auf Kunstwerke anzuwenden (Holl, 2016). Diese Methode ermöglicht, die Auswirkung von kurzfristigen Schwankungen auf unterschiedliche Materialverbünde in differenzierter Weise zu untersuchen.

Die hygrothermische Simulation des Tafelgemäldes wurde in unterschiedlichen Variantenberechnungen durchgeführt. Zunächst wurde die Reaktion des Tafelgemäldes auf das in der Sakristei vorliegende Klima untersucht und anschließend das in der Einhausung gemessene Klima zur Beurteilung der neuen klimatischen Situation eingesetzt. Begleitend zu den Klimaschrankversuchen, die an der Universität Bamberg mit Probeplatten durchgeführt wurden, erfolgte die Simulation der Szenarien. Hierfür werden die gemessenen Raumklimadaten, vor und nach dem Bau der Einhausung eingesetzt.

3.2.4.1 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde

Um die Temperatur- und Feuchteverläufe aufgrund des Raumklimas in den einzelnen Schichten des Kunstwerks zu untersuchen, eignet sich *WUFI®Pro*. Es berechnet anhand des eindimensionalen Querschnitts eines Bauteils die Veränderung von thermischen und hygrischen Bedingungen über den zeitlichen Verlauf.

In der Querschnittsansicht ist der Schichtenaufbau von links nach rechts (außen nach innen) sichtbar: Leinölfirnis, Holz, Bildschicht (Grundierung und Malschicht), Firnis (Schellack, Dammar). Um die Temperatur- und Feuchteverteilung innerhalb der einzelnen Schichten zu ermitteln, können in den einzelnen Lagen „Monitorpositionen“ gesetzt werden. Die so markierten Stellen werden bei der hygrothermischen Berechnung berücksichtigt und können gesondert ausgegeben werden (s. Abbildung 3-30). Dies ermöglicht die Beurteilung der Temperatur und relativen Feuchte sowohl an der Oberfläche als auch in den Bauteil- bzw. Malschichten. Dies ist messtechnisch, insbesondere bei sehr dünnen Schichten, nur schwer umzusetzen. Insbesondere für die Untersuchung der Variationsbreite der Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte im Verbund sind diese Informationen aufschlussreich – etwa zur Beurteilung des Schadensrisikos oder auch der Effizienz einer durchgeführten Maßnahme. Einige weitere Einstellungen, wie die Ausgangsbedingungen, Klimaparameter, Übergangs- und Randbedingungen, sind vor Beginn der Simulationsrechnung festzulegen.

Für eine genauere Berechnung der Feuchteverläufe im Gefüge wird im ersten Rechendurchgang eine für die jeweiligen Materialien typische Ausgleichsfeuchte angenommen. Anschließend wird der Wassergehalt für das gesamte Gefüge ausgegeben, dieser als neue Startbedingung in die Simulation eingegeben und nochmals berechnet. Das Ergebnis der Temperatur- und Feuchteverläufe ist entweder über die grafische Darstellung des Programmes sichtbar oder kann als Textdatei ausgegeben werden.

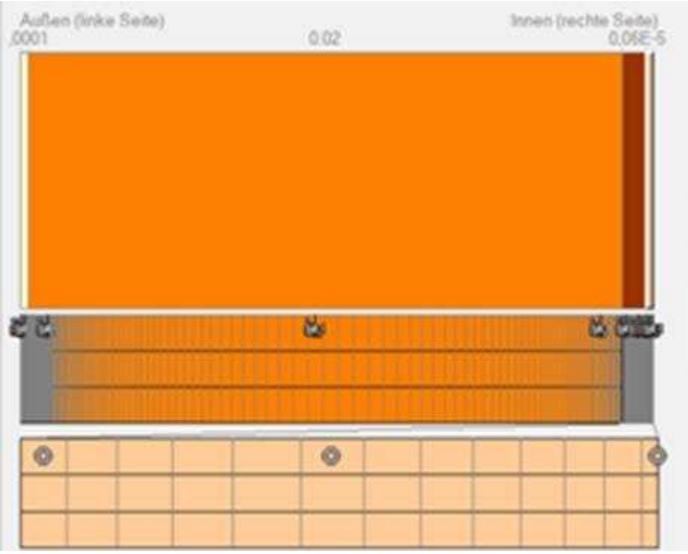

Abbildung 3-30: Bildschirmaufnahme aus dem Simulationsprogramm WUFI® Pro zeigt den Querschnitt des Holztafelgemäldes unter Berücksichtigung der gemessenen Materialproben (Überzug, Bildschicht, Firnis). Aufbau von links nach rechts: Leinölfirnis (0,1 mm) | Fichtenholz longitudinal (20 mm) | Mal- und Fassungsschicht (0,6 mm) | Firnis (0,06 mm). Die Videokamera kennzeichnet eine „Monitorposition“, an der die Temperatur- und Feuchtewerte berechnet werden, ©: Fraunhofer IBP.

3.2.4.2 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde

Für die Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde wurden die bisher beschriebenen Eingabedaten beibehalten und lediglich andere Klimadaten verwendet. Für die Untersuchung wurden Messdaten der Vorder- und Rückseite aus dem Jahr 2023 mit Einhausung verwendet (s. Abschnitt 4.1.3.3).

3.2.4.3 Simulation der Klimaschrankversuche

Für die Klimaschrankversuche wurde, basierend auf den gemessenen Klimadaten bei konstanter Temperatur eine maximale Feuchteänderung produziert, wie sie in der Realität stattgefunden hat. Während die reale Feuchteänderung über einen Zeitraum von mehreren Wochen abgelaufen ist, wurde diese hier auf den Zeitraum von 18 Tagen angesetzt.

Ziel der Tests im Klimaschrank war es, anhand der Prüfkörper die Reaktion des Materialverbunds eines Holztafelgemäldes bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. zu untersuchen. Dieser ist angelehnt an die Klimadaten, die in der Sakristei zwischen 2021 und 2022 gemessen wurden und mittels 3D-Scanning die größte Bewegung verzeichnet wurde (s. Abschnitt 4.1.6.1). Mithilfe der hygrothermischen Simulation wurde später aufgezeigt, wann die größten Bewegungen und damit das höchste Schadensrisiko auftritt (s. Abschnitt

4.2.4). Um lediglich den Einfluss der Feuchtigkeit zu untersuchen, erfolgte dieser Versuch bei einer konstanten Temperatur von 19 °C.

3.2.4.4 Simulation der passiven Auffeuchtung

Im Rahmen der Überlegungen zur künftigen Konservierung des Tafelgemäldes am originalen Standort mit passiven Methoden wurde an der TU München eine Masterarbeit durchgeführt (Kocan, 2024), s. auch Abschnitt 3.2.2. Hier wurden unterschiedliche Systeme (Lehmwand, Textil und gesättigte Salzlösung), die an der Rückseite von Probekörpern angebracht wurden, miteinander verglichen. Dieses Szenario wurde ebenfalls mithilfe der hygrothermischen Simulation untersucht. Hierzu wurde an der Rückseite des Schichtenaufbaus eine konstante relative Feuchte von 65 % r.F. angelegt und an der Vorderseite die 2021 in der Sakristei gemessenen Klimadaten eingesetzt.

3.2.5 Klimaschrankversuche an Probekörpern

Für die Klimaschrankversuche (Modell: *ClimeEvent C/340/40/3/M*[67] der Firma *Weiss Umwelttechnik GmbH*) wurde, basierend auf den gemessenen Klimadaten bei konstanter Temperatur eine maximale Feuchteänderung produziert, wie sie in der Realität stattgefunden hat. Während die reale Klimaschwankung über einen Zeitraum von mehreren Wochen abgelaufen ist, wurde diese hier auf den Zeitraum von 18 Tagen angesetzt.

Mithilfe der hygrothermischen Simulation wurde im Vorfeld untersucht, wann die größten Bewegungen und damit das höchste Schadensrisiko zu erwarten sind (s. Abschnitt 3.2.4). Dies wurde mit dem Versuch verifiziert. Zur Untersuchung des Feuchteverhaltens bei unterschiedlichen Temperaturen wurden vorkonditionierte Probeplatten (s. Abschnitt 3.2.1) im Klimaschrank bewittert und die Reaktion gemessen. Untersucht wurde die Reaktion mit hochauflösendem Streifenlichtscanning, Wägeversuchen und akustischer Emission. Die ursprünglich angedachte Messung des elektrischen Widerstands führte im Klimaschrank zu Fehlmessungen, sodass diese nicht bewertet werden konnten. Auch die akustische Emission zeigte im Klimaschrank starke Störsignale, sodass sie für die Auswertung nicht weiterverfolgt wurde.

Abbildung 3-31 zeigt den Versuchsaufbau im Klimaschrank am KDWT in Bamberg für Versuch 2. Täglich (ausgenommen die Wochenenden) wurden von allen Platten Streifenlichtscans angefertigt, das Gewicht einer Blankoholzplatte hinsichtlich der Gewichtsstabilisation nach dem Feuchtesprung überprüft und daran die Ausgleichsfeuchte abgeschätzt. Außerdem wurden zur Erfassung der akustischen Emission nacheinander jeweils zwei Sensoren an den Platten B-M-3 (Set 3) und B-M-2 (Set 2) montiert.

[67] Mit dem Gerät sind Klimaeinstellungen zwischen -42 – 180 °C und 10 – 98 % r.F. möglich.

Abbildung 3-31: Klimaschrankversuch am KDWT in Bamberg. Durch die eingestellte Glasscheibe ist es möglich, während des Versuchs, die Türe zu öffnen, ohne dass das darin befindliche Klima gestört wird, © KDWT, L. Pallas.

Im ersten Versuch (Set 3) trat nach vier Tagen im Klimaschrank eine Fehlermeldung auf, die dazu führte, dass das Klima im Schrank auf über 90 % r.F. anstieg. Dementsprechend ist ein direkter Vergleich der Reaktion beider Chargen nur für die ersten drei Tage möglich.

3.3 Weitere Untersuchungen

Zusätzlich zu den Untersuchungen am Tafelgemälde und dem Umgebungsklima wurde schnell deutlich, dass für eine integrale Betrachtung auch der Raum einbezogen werden muss. Lufttströmungen, Thermografieaufnahmen, Beschaffenheit der Raumschale sowie eine Bestimmung des Schimmels sollten sowohl mögliche Risiken durch die Befeuchtung als auch Potentiale des Raums verdeutlichen.

3.3.1 Luftströmungsmessung

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde es als sinnvoll erachtet, mehr über den raumklimatischen Zustand der jetzigen Einhausung zu erfahren. Zum einen gab es messbare Klimaunterschiede innerhalb der Einhausung, zum anderen wurde mikrobieller Befall an einigen Oberflächen festgestellt. Um bestehende Zugluftströmungen zu visualisieren, kann ein spezieller Theaternebel zum Einsatz kommen. Das IDK verwendet zur Visualisierung von Luftströmungen Nebel, der durch Nebelmaschinen erzeugt wird. Das Verfahren wird oft in Objekten mit wertvollen historischen Oberflächen wie Kirchen, Schlössern oder Museen eingesetzt. Der Einsatz von Nebel zur Visualisierung von Luftströmungen setzt jedoch voraus, dass die verwendeten Nebelfluide unbedenklich gegenüber den empfindlichen Materialoberflächen der zu untersuchenden Räume sind.

3.3.1.1 Nebelmaschine/Nebelfluid

Zur Visualisierung von Luftströmungen nutzt das IDK zwei unterschiedliche Nebelmaschinen. Für die punktuelle Betrachtung von Strömungsrichtungen und Intensitäten, beispielsweise an und in Orgeln oder Türsituationen, verwendet das IDK ein Nebelhandgerät der Firma *Flow-Marker* (Abbildung 3-32). Das Nebelhandgerät *FlowMarker* wird mit dem *FlowMarker Fog Fluid* der Firma *Safex* (*Günther Schaidt Safex® – Chemie GmbH Schenefeld*) betrieben. Laut Sicherheitsdatenblatt ist das Nebelfluid eine wässrige Lösung ungiftiger, hochreiner Polyole ohne gefährliche Inhaltsstoffe. *Safex* hat zudem eines ihrer Nebelfluide auf eine mögliche Gefahr von mikrobiotischem Wachstum hin untersuchen lassen. Dabei wurde von einem unabhängigen mikrobiologischen Testlabor festgestellt, dass sich bei der Bestimmung der Luftkeimzahlen keine aeroben Bakterien und keine Schimmelpilze nachweisen lassen. Weiteres zu Nebel, Nebelfluidherstellung und -zusammensetzung sowie Risikobetrachtung s. Anhang E: Weitere Untersuchungen.

Abbildung 3-32: Nebelhandgerät „FlowMarker“ im Einsatz (Foto: T. Löther, IDK)

3.3.2 Luftwechselrate

Im Rahmen Projektes erfolgten weiterhin raumklimatische Untersuchungen. Um die Simulationen (s. 3.2) richtig zu kalibrieren, ist die Bestimmung des natürlichen Luftwechsels eine wichtige Messgröße. Das IDK führte daher eine Tracergasmessung innerhalb der Einhausung durch, um eine Messgröße zum natürlichen Luftwechsel zu ermitteln.

Die Untersuchung des Luftwechsels erfolgt nach der Referenzgasmethode mithilfe von CO_2. Um den Luftwechsel eines Raumes zu bestimmen, wird dabei eine definierte Menge an Referenzgas in die Raumluft der temporären Einhausung abgegeben. Um die bestmögliche Vermischung des eingebrachten Gases mit der Raumluft zu erreichen, werden Lüfter eingesetzt, die das Gas sofort nach dem Austritt verteilen. Sensoren messen im Minutenabstand die Referenzgas-Konzentration, sowie Lufttemperatur und Luftfeuchte. Der Versuchsaufbau der Messung erfolgt in Anlehnung an DIN EN ISO 12569. Die Messwerte werden an ein Notebook gesendet und dort verarbeitet. Aus Art und Weise des Referenzgas-Konzentrationsanstiegs

und des anschließenden Konzentrationsabfalls erfolgt die Ermittlung des Luftwechsels mithilfe einer Modellrechnung. Die Berechnung wird einerseits nach den Vorgaben der DIN EN ISO 12569 ausgeführt und berücksichtigt lediglich die Abkonzentrationsphase des Referenzgases, alternativ dazu kommt ein Berechnungsverfahren zum Einsatz, das sowohl Auf- als auch Abkonzentrationsphase einbezieht. Dadurch wird der praxisrelevante Wert des mittleren Luftwechsels ermittelt.

3.3.3 Luftgeschwindigkeit

Eine Erfassung der Luftgeschwindigkeit war im Rahmen des Messkonzepts nicht notwendig. Das Verhältnis von relativer Luftfeuchte zur Reaktion der Tafel ist der Kernaspekt. Die Erfassung der Luftbewegung an einem oder mehreren Punkten in der Einhausung liefert hier keinen ausreichend großen zusätzlichen Nutzen, da die Messwerte nur sehr schwer oder gar nicht auf andere Umgebungen übertragbar sind. Die Vermeidung von Schimmelbildung in Bereichen mit lokal erhöhter Luftfeuchte sollte durch einen mittels Zeitschaltuhr gesteuerten Ventilator in Kombination mit regelmäßigen (wöchentlichen) visuellen Überprüfungen sichergestellt werden. Nach Abbildung 3-33 war für Substratgruppe I unterhalb einer relativen Luftfeuchte von 70 % nicht mit einem nennenswerten Schimmelpilzwachstum zu rechnen. In späteren Kapiteln wird erläutert, warum es dennoch zu Schimmelbildung gekommen ist.

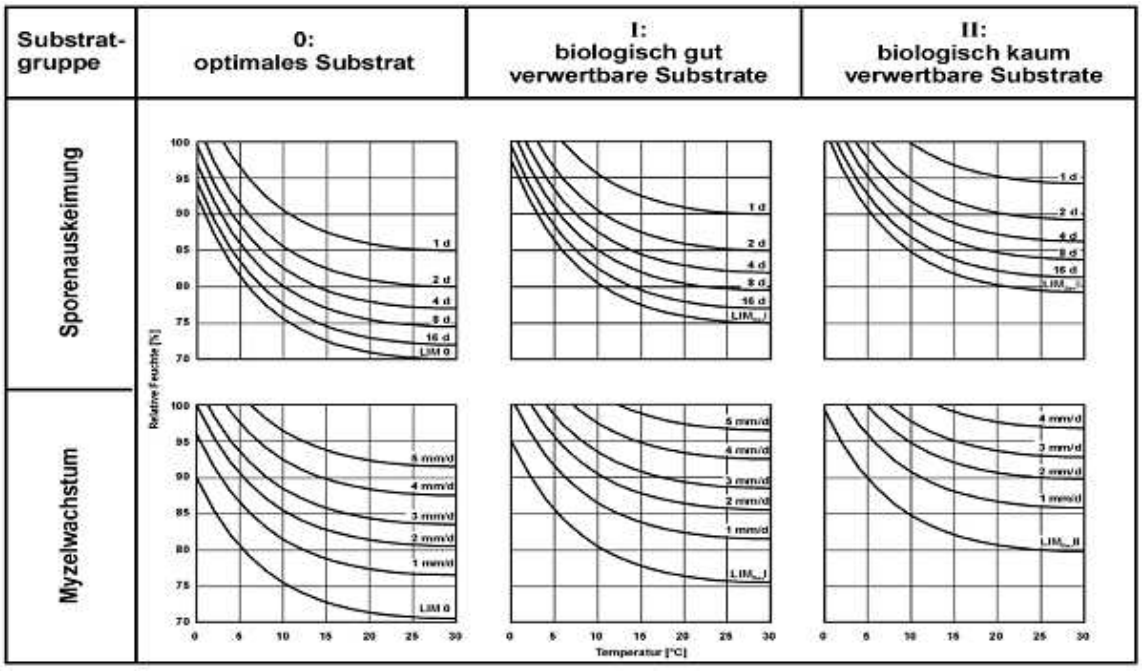

Abbildung 3-33: Isoplethendiagramme zur Schimmelbildung nach Sedlbauer und Kießl (2002)

3.3.4 Thermografie

Am 21.03.2023 wurden in der Einhausung Thermografieaufnahmen durch die TUM angefertigt, die bei der Bewertung der Luftwechsel-Messungen und der Detektion lokaler Taupunktunterschreitungen helfen sollten (s. auch 3.3.1 Luftströmungsmessung). Die Aufnahmen wurden mit einer Wärmebildkamera der Firma *InfraTec* (Modell: *VarioCAM® high resolution32*) aufgenommen und in der zugehörigen Software *IRBIS® remote 3.0* ausgewertet.

3.3.5 Untersuchung der Raumschale

Im Rahmen des Projektes wurde die Raumschale der Sakristei in Augenschein genommen und einige Untersuchungen durchgeführt, um den Zustand des Mauerwerks sowie die Wände einschätzen zu können und die weitere Vorgehensweise abzustimmen.[68] Neben der Durchführung von Perkussions- und Porositätstests wurde eine Salzprobe entnommen. Diese entstammte der Außenwandecke am Pfeiler, unterhalb der Tribüne. Die anschließend durch das Zentrallabor[69] mittels XRD-Messung analysiert wurde. Das Klima zum Zeitpunkt der Probeentnahme betrug ca. 58 % r.F. und 15 °C.

3.3.6 Schimmeluntersuchung und -Monitoring

Neben ästhetischen und gesundheitlichen Gründen, die es erforderlich machen, einen mikrobiellen Befall zu vermeiden, stellt für Kunst- und Kulturgut v. a. die Zersetzung und Degeneration von Materialien – hier v. a. organische, wie z. B. Holz, Bindemittel (Leime, Überzüge), etc. – eine Gefahr dar. Pilzmyzel kann zudem in Risse eindringen, Farbschichten unterwandern und zur Ablösung von Malerei führen, weshalb eine Verbreitung des Befalls auf das historische Tafelbild und andere Ausstattungsgegenstände zu vermeiden ist.

Bereits vor dem Bau der Einhausung zeigte sich im März 2022 ein nicht als aktiv eingestufter Schimmelpilzbefall am Sakristeischrank, der teilweise durch die 2016 errichtete Arbeitstribüne überbaut ist (s.Abbildung 3-34). Dieser wurde damals mit 70 %igem Ethanol gereinigt. Im Rahmen des konservatorischen Monitorings wurde im Herbst 2022 innerhalb der Einhausung ein leichter Schimmelpilzbefall bemerkt. Neben dem Sakristeischrank waren auch einige OSB-Grobspanplatten unterhalb der Arbeitstribüne befallen. Am stärksten betroffen war das Schrankinnere, das aufgrund der Arbeitstribüne nicht mehr zugänglich und nur schlecht belüftet ist. Nach Bekanntwerden des neuerlichen Schimmelwachstums wurden weitere Schritte eingeleitet. Zum einen erfolgte die Untersuchung der vorliegenden Schimmelpilzarten[70], zum anderen wurden ein engmaschiges Schimmelpilzmonitoring und regelmäßige Reinigungszyklen etabliert.

3.3.6.1 Identifikation des Schimmelpilzbefalls

Zur effektiven Minimierung des Schimmelpilzrisikos ist es zunächst notwendig zu wissen, unter welchen Bedingungen diese sich ausbreiten können. Gemäß Sterflinger (2010, S.49) wird *„das Wachstum von Pilzen in Innenräumen maßgeblich durch das Raumklima, die Menge verfügbarer Nährstoffe – aus der Atmosphäre und aus den Materialien selbst – sowie durch die Reinigungsintervalle bestimmt."* Weitere Faktoren sind der pH-Wert, Licht, Oberflächenbeschaffenheit, Sauerstoffgehalt und ggf. vorhandene wachstumshemmende Mittel. Klimabereiche, die das Auskeimen von Pilzsporen hemmen oder ermöglichen, wurden von Sedlbauer & Krus (2003) ausführlich in den Isoplethensystemen dargestellt. Laut Sterflinger et al. (2018) zeigen die Autoren Sedlbauer & Krus auch, *„dass hygroskopische Materialien das*

[68] Ortsbegehung am 5.4.2023 mit dem Referatsleiter des Zentrallabors und der Geo-Erkundung am BLfD (Dr. Sven Bittner) sowie einem Kollegen der Restaurierungsabteilung aus dem Fachbereich Wandmalerei und Architektur (Dr. Jan Menath).
[69] Björn Seewald, BLfD, ZI.
[70] Prof. Dr. J. Philipp Benz und Sabrina Klasen (Professur für Pilz-Biotechnologie in der Holzwissenschaft der TU München).

Wachstum von Pilzen bei niedriger relativer Luftfeuchtigkeit unterstützen können und dass der Wasserbedarf von der biologischen Abbaubarkeit des Substrats abhängt." So werden in den Studien einiger Pfeifenorgeln von 2018 Pilze mit hoher Toleranz gegenüber geringer Wasserverfügbarkeit (sog. xerotolerante bzw. xerophile Spezies) v. a. auf Bolus, Leder und Bindemitteln gefunden, welche aufgrund ihrer Hygroskopizität eine höhere Wasserverfügbarkeit und gute Kohlenstoffquelle als Nährboden anbieten.

In Zusammenarbeit mit Prof. Dr. J. Philipp Benz und seiner technischen Mitarbeiterin Sabrina Klasen (Professur für Pilz-Biotechnologie in der Holzwissenschaft der TU München), wurden zwei Mal Schimmelproben am Sakristeischrank und auf den OSB-Platten entnommen und im Labor identifiziert. Eine erste Inkubation auf klassischem Kartoffel-Dextrose-Agar (PDA) führte zu keinem sichtbaren Wachstum, was stark darauf hindeutete, dass es sich bei den Schimmeln um xerophile Arten handeln könnte. Nach einer erneuten Probenahme wurden die Kulturen auf DG18 Agar inkubiert, welches 18 % Glycerin (w/w) enthält, was laut Hersteller die Wasseraktivität (a_w) von 0,999 auf 0,95 senkt. Dies führte zu Wachstum ausgehend von den meisten Proben, sodass genug Material für eine Extraktion genomischer DNA zu Verfügung stand. Es erfolgte eine Sequenzierung des ITS Barcodes (White et al. 1990) als ein erster Schritt der molekularen Identifizierung.

3.3.6.2 Schimmelreinigung und –monitoring

Nachdem der Schimmelherd innerhalb des Sakristeischrankes durch die baulichen Gegebenheiten der Tribüne nicht zugänglich war, sollten zumindest alle anderen Quellen und Nährböden vermindert werden. So wurden, wo möglich, die OSB-Aussteifungsbretter der Tribüne durch leichter zu reinigende, feuchteabweisende Siebdruckplatten (phenolharzbeschichtetes Birken-Furnierschichtholz, 15 mm stark) ersetzt. Die historische Außenfläche des Schrankes und Einhausung wurden regelmäßig trocken gereinigt. Zudem wurde ein Schimmelmonitoring eingerichtet, sodass bei erneutem Befall frühzeitig interveniert werden konnte.

Zum Schutz des Kunstwerks und der Gesundheit der vor Ort tätigen Personen, sollte die Sporenkonzentration in der Luft reduziert werden. Ab Mai 2023 wurde hierfür von der Firma *IQAir* ein mobiles Luftreinigungsgerät (Modell: *Atem X*) zur Verfügung gestellt. Über die vorhandene WiFi-Verbindung und eine Web-/Smartphoneanwendung[71] ist die Überwachung der aktuellen Partikelbelastung im Raum in Echtzeit möglich. Das Gerät wurde mittig unter der Tribüne aufgebaut und läuft mit einer dynamisch an die Luftqualität angepassten Filterprogrammierung. Laut Herstellerangaben filtert es Partikel bis zu einer minimalen Größe von 0,3 µm aus der Luft und hat damit eine „*hohe Schimmelpilz-Abscheideleistung*".[72] Schimmelpilzsporen haben je nach Spezies einen Durchmesser von unter 10 µm (max. Bereich 2-100 µm), wobei die Sporen der Aspergillusarten nur 2-3 µm groß sind (Umweltbundesamt 2002, S. 5, S. 34).

[71] Das Programm „AirVisual" der Fa. IQAir ist als App und als Webanwendung verfügbar. Das Gerät muss hierfür mit einem Nutzeraccount verknüpft sein und kann so auch ferngesteuert werden.
[72] Laut „IQAir Atem X"-Produktbroschüre besitzt des Gerät eine Filtereffizienz von ≥ 99,5 % für Partikel ≥ 0,3 µm gemäß DIN EN 1822.

Um den Befall möglichst einzudämmen, wurde initial eine Reinigung der kontaminierten Oberflächen, die nicht ausgebaut werden konnten, durchgeführt. Da der Überzug des Sakristeischrankes alkohollöslich ist und die Effektivität der Reinigung mittels Ethanol (Besprühen/Bedampfen/Abwischen) keinen wesentlich größeren wachstumshemmenden Effekt gegenüber einer Trockenreinigung versprach, dagegen im schlimmsten Fall sogar das Wachstum fördern könnte, wurde auf die Behandlung des Sakristeischrankes mit Ethanol verzichtet. Da eine Inaktivierung bzw. Abtötung des Befalls unter den gegebenen Umständen nicht möglich war, sollte zumindest die Sporenkonzentration an der Quelle reduziert werden. Um die Verteilung der Sporen im Raum während der Reinigung möglichst gering zu halten, wurden die Myzelien zunächst mittels eines mit Testbenzin getränkten Wattestäbchens abgetupft. Anschließend wurde die Holzoberfläche mit einem HEPA-gefilterten Staubsauger abgesaugt und in einem zweiten Durchgang mit PU-Schwämmchen und Staubsauger nachgereinigt. Die OSB-Aussteifungsbretter, die nicht durch Siebdruckplatten ersetzt werden konnten, wurden dagegen mittels 70%igem Ethanol abgereinigt. Anschließend erfolgte alle 4 – 8 Wochen eine gründliche Trockenreinigung aller Oberflächen in der Einhausung[73], sowie ca. alle 2 Monate ein Monitoring mittels optischer Untersuchungen, Makrofotografie und ATP-Messungen der Oberflächen.

Die zwischen 03.05.2023 und 24.04.2024 durchgeführten ATP-Messungen sollten Aufschluss darüber geben, inwieweit eine Schimmelpilzkontamination der unterschiedlichen Oberflächen (Sakristeischrank, Gemäldevorder- und -rückseite) vorliegt. Dabei wurde jeweils eine 10 cm² große Testfläche mittels eines trockenen Teststäbchens (*LuciPac™ Pen*) über die Testfläche gerollt und die Luminiszenzreaktion der Probe mit einem Lumitester (*kikkoman Lumitester PD-20*) gemessen (s. Abbildung 3-35). Für die ATP-Messung im Bereich des Kulturgutmonitorings existieren keine einheitlichen Bewertungskriterien zur Beurteilung der Befallsintensität, zumal die Einheit RLU keine feste Größe darstellt, sondern sich von Gerät zu Gerät unterscheidet. Hammer (2017) stellt eine Einteilung in die Kategorien A bis D auf, wobei A (< 1.000 RLU/10 cm²) als sauber einzustufen ist und D (ab 10.000 RLU/10 cm²) auf aktiven Befall mit teils sichtbaren Pilzkolonien schließen lässt. Derksen (2021) weist darauf hin, dass dieser Wert niedriger anzusetzen sein müsste, da bei ihren Messungen teilweise augenscheinlich befallene Objekte Werte von unter 1.000 RLU/10 cm² aufwiesen. Sie schlägt eine Herabsetzung auf einen Wert von 500 RLU/10 cm² vor.

[73] Das Gemälde selbst wurde in diesem Zeitraum aufgrund seines fragilen Zustands der Bildschicht nur einmal trocken gereinigt (Staubsauger + PU-Schwämchen).

Abbildung 3-34: Von Arbeitstribüne überbauter Teil des Sakristeischrankes (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 3-35: ATP-Messung am Sakristeischrank (Foto: M. Hörmann, BLfD).

3.4 Auffeuchtungsversuch

Da nach dem Bau der Einhausung nur geringe Verformungen des Tafelbilds auftraten und die Informationen über die historische Raumsituation (ungeheizte Sakristei, feuchte Außenwand) auf ein wesentlich feuchteres historisches Raumklima hindeuteten, sollte das Verhalten des Tafelbilds bei höherer r.F. untersucht werden. Ziel war die Überprüfung, ob sich das Tafelbild für eine Konservierung an seine Ursprungsmaße annähern kann und bei welcher r.F. dies der Fall ist. Erst nach der Risikoabschätzung über Recherche (s. 2.1), Simulationen und Klimaschrankversuche (s. 3.2), konservatorische und messtechnische Begleitung (s. 3.1) sollte im Projektverlauf eine systematische Auffeuchtung stattfinden. Da die vorangestellten Ergebnisse Grundvoraussetzung für die Planung und Durchführung dieses Versuchs waren s. 4.4 für die weitere Beschreibung der Methodik, des Vorgehens und der Ergebnisse.

4 Ergebnisse

Im Folgenden werden die Ergebnisse analog zu den in Punkt 3 genannten Methoden vorgestellt.

4.1 Ergebnisse des Mess- und Monitoringkonzeptes

Das Mess-und Monitoringkonzept diente der Überwachung des hölzernen Trägers, der Malschicht sowie des Umgebungsklimas.

4.1.1 Stützkonstruktion

Die Stützkonstruktion hat sich im Langzeiteinsatz bewährt. Sie ist leicht zu transportieren und modifizieren und bietet eine stabile Plattform zur Installation verschiedenster Messtechnik. Die CFK-Rohre waren ausreichend unempfindlich gegenüber thermischen und hygrischen Einflüssen, dass mit den hochauflösenden Sensoren fehlerarme Messungen durchgeführt werden konnten. An den Metallwinkeln und Schellen, an denen die verschiedenen Wegaufnehmer montiert waren, trat teilweise Flugrost auf. Dieser hat weder die Messungen, noch das Objekt beeinflusst. Ob im weiteren Verlauf eine Abnahme oder Änderung der Montierung möglich ist, bleibt zu beobachten. Zukünftig und wie in der Restaurierung üblich, ist die Verwendung von rostfreien Materialien (z. B. Edelstahl) empfohlen.

4.1.2 Sensoranbringung

Bis auf wenige Ausnahmen hafteten die Sensoren über die gesamte Projektlaufzeit zuverlässig. Lediglich einzelne Extensometer lösten sich zwischenzeitlich, da die Haftung der Japanpapiere zum beschichteten Holz nicht hoch genug und das Eigengewicht der Sensoren zu stark war. Nach Neuverklebung am 20.7. bzw. 27.10.2023 hielten jeweiligen Sensoren jedoch bis zum Abschluss des Projektes. Aufgrund der geplanten Umstellung auf ein reduziertes Messsystem wurde zum Projektende ein Großteil der OF-T-Sensoren rückgebaut. Die Sensoren, die mittels der BLfD-Methoden angebracht wurden, konnten überwiegend spurlos abgenommen werden; dies erforderte jedoch einen nicht unerheblichen Aufwand. An einer Messstelle, an der das darunterliegende Holz durch die Fraßgänge bereits stark geschwächt war, lösten sich vereinzelt Holzpartikel der Oberfläche. Bei der Sensorentfernung an den Sakristeiwänden löste sich z. T. die oberste, nicht originale, Putzschicht. Für das weiterführende Monitoring wurden die verbleibenden OF-T-Sensoren daher mit der im Rahmen des Projektes entwickelten Variante mit Acrylklebstoff weiterverwendet. Die mit *Lascaux® 303 HV* beschichteten Japanpapiere «sticky-note» hafteten über die gesamte Projektlaufzeit zuverlässig; es bildete sich durch das Eigengewicht des Sensors auch keine Lufttasche unter deren Messkopf. Hinsichtlich der erfassten Messwerte konnte zwischen beiden Varianten kein signifikanter Unterschied, außerhalb der Messungenauigkeit, festgestellt werden (s. Abschnitt 4.1.3.4). Beim Austausch der Sensoren, blieb die darunterliegende Japanpapierabklebung intakt und konnte weiterverwendet werden. Diese Befestigungsmethode kann – sofern der Lascaux® Kleber als materialverträglich für das vorliegende Kunstwerk eingeschätzt wird – für ähnliche Anwendungsfälle empfohlen werden. Zu den Messpunkten der Gratleisten s. 7.1.4.7 Umgang mit dem Bildträger und der Konstruktion.

4.1.3 Klimamonitoring

Da das Objekt in ständigem Austausch mit dem Umgebungsklima steht, ist seine Überwachung und Auswertung integraler Bestandteil bei der Beurteilung von Schäden und Voraussetzung für das Finden von Lösungsstrategien.

4.1.3.1 Auswertung vorab gesammelter Klimadaten

Bei der Auswertung der bereits vorhandenen Klimadaten stellte sich heraus, dass die seit April 1989 mittels Thermohygrographen aufgezeichneten Daten unbrauchbar sind. Aufgrund teils leerer oder mehrfach beschriebener Blätter und fast durchgängig fehlender Datierung ließen sich keine langjährigen Messreihen zusammensetzen, die einen Jahresverlauf darstellen würden. Es könnte einzig ein Mittelwert für Temperatur und relative Luftfeuchte errechnet werden. Hierbei geht jedoch jegliche Information über jahreszeitliche und langjährige Klimaveränderungen – welche in diesem Projekt von Interesse wären – verloren. Abgesehen vom enormen zeitlichen Aufwand für die Digitalisierung der Datenblätter würden bei einer reinen Mittelung zusätzliche Probleme auftreten. Etwa, wie Datenlücken aufgrund leerer oder unvollständig beschriebener Blätter, in den Mittelwert eingehen. Oder wie mit unleserlichen, weil mehrfach beschriebenen Blättern vorgegangen werden soll. Die Datenblätter wurden daher zunächst nur eingescannt und nicht weiter ausgewertet.

Zum anderen wurden die von der Firma Landskron (Landskron, 2020) für 2018 bis 2019 sowie des BLfD seit Mai 2020 mittels Datenlogger aufgezeichneten Klimadaten (r.F., T) gesammelt und aufbereitet. Diese erfassten das Klima jeweils an der Tafelvorder- und Rückseite und sind in Abbildung 4-1 bis Abbildung 4-3 dargestellt.

Gerätename: FS Dom 1		24.07.2020 09:21:07			Seite 1/1
Startzeit: 20.06.2018 12:00:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte
Endzeit: 19.06.2019 03:00:00	no name [°C]	14,30	24,50	18,924	0.0/70.0
Messkanäle: 2	no name [%rF]	33,80	72,00	54,047	0.0/100.0
Messwerte: 2910					
36600890					
Vorderseite					

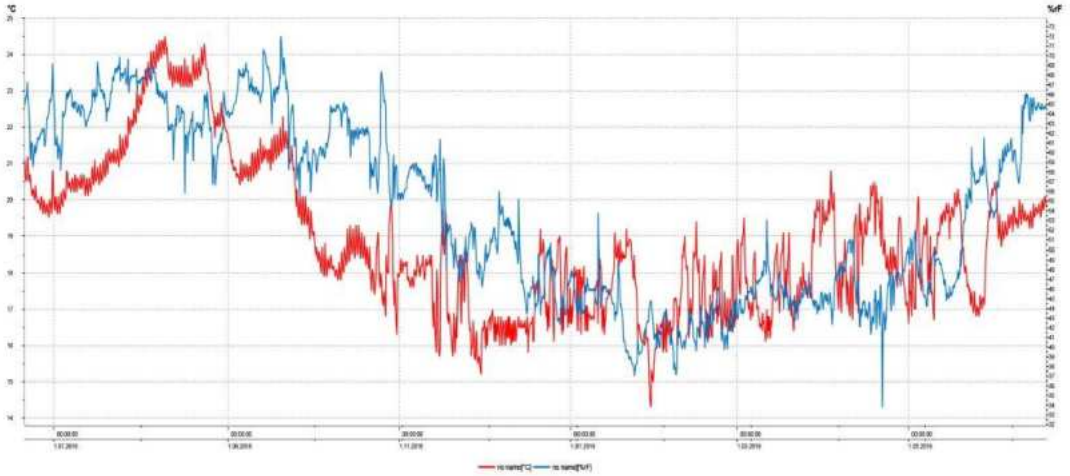

Abbildung 4-1: Klimadaten Landskron an der Vorderseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 20.06.2018 – 19.06.2019. (Quelle: Landskron, 2020).

Gerätename: FS Dom 2		24.07.2020 09:50:46			Seite 1/1
Startzeit: 20.06.2018 12:00:00		Minimum	Maximum	Mittelwert	Grenzwerte
Endzeit: 19.06.2019 03:00:00	no name [°C]	13,70	24,50	18,622	-5.0/70.0
Messkanäle: 2	no name [%rF]	33,60	69,20	53,250	0.0/100.0
Messwerte: 2910					
36626003					
Tafel Rückseite					

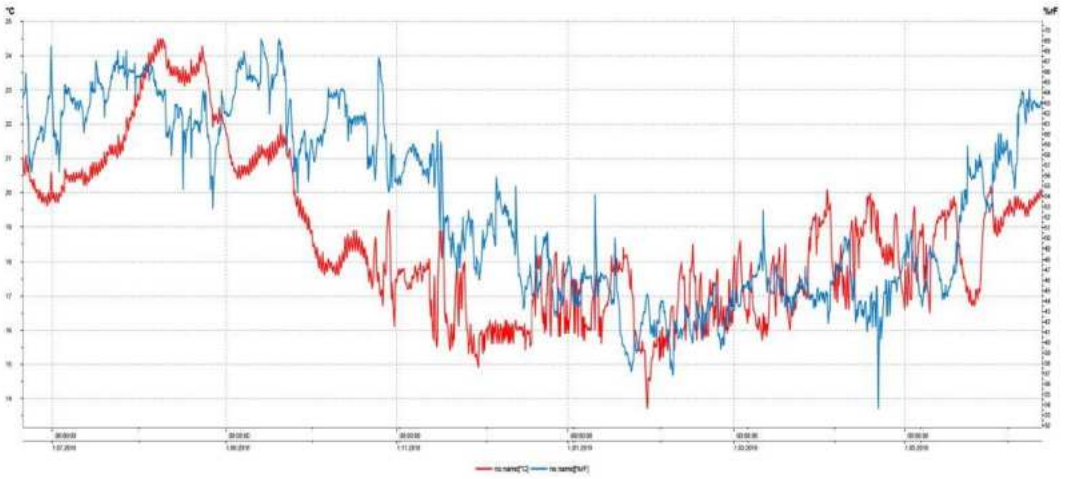

Abbildung 4-2: Klimadaten Landskron an der Rückseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 20.06.2018 – 19.06.2019. (Quelle: Landskron, 2020).

Der Jahresverlauf von 2018 – 2019 zeigt im min. bzw. max. 33,8 – 72,0 % r.F und 14,3 – 24,5 °C für die Vorderseite und für die Rückseite 33,6 – 69,2 r.F. und 13,7 – 24,5 °C. Für die Vorderseite ergibt dies im Mittelwert 54 % r.F. und 18,9 °C; die Rückseite unterscheidet sich mit 53,3 % r.F. und 18,6 °C nur leicht davon. Deutlich werden vor allem die hohen Schwankungen im Verlauf sowie hohe Temperaturen und dadurch bedingte sehr niedrige r.F. in der Heizperiode von ca. November bis Mai. Auch im Sommer wurden hohe Temperaturen erreicht, hierbei lag jedoch auch eine höhere r.F. vor.

Nach dem Einbau einer Zentralheizkörpers (statt bisheriger Ölheizung) 2005 lässt sich im Vergleich älterer Restaurierungsdokumentation (Hess & Thieme, 2007; Landskron, 2015; Landskron 2020) und den BLFD-Daten von 2020 bis 2024 ein fortschreitendes Austrocknen in Abhängigkeit zur Temperatur für den Beispielmonat Februar aufzeigen. Gerade im Vergleich der Jahre 2022 bis 2024 lassen sich weitere deutliche Unterschiede feststellen: während seit 2021 die Einhausung inkl. Befeuchtungsmöglichkeit vorhanden war, ergaben sich 2020 bis 2023 durch Corona, aber vor allem die Energiekrise, welche sich zwischen März 2022 und Juni 2023 intensivierte, gesonderte Nutzungs- und Klimasteuerungen. So war die r.F. 2023 bei niedrigeren Temperaturen adäquat hoch; der Befeuchter schaltete sich zu diesem Zeitpunkt nur ein, wenn die r.F. unter 60 % fiel.

Tabelle 4-1: Vergleich der Klimadaten von 2006, 2015, 2019 und 2020 anhand des Beispielmonats Februar.

Zeitraum	Messmethode	Temperatur [°C]	Relative Feuchte [%]	Quelle
Februar 2006	Thermohygrograph, Raumklima	Ø 15,0	50,0 – 55,0	Hess & Thieme (2007)
Februar 2015	Thermohygrograph, Raumklima	Ø 19,0	44,0 – 49,0	Landskron (2015)
Februar 2019	USB-Datenlogger; Nahfeldklima Vorderseite	Ø 16,0 - 19,0	37,0 – 46,0	Landskron (2020)
Februar 2020	USB-Datenlogger, Nahfeldklima Vorderseite	Ø 17,0	40,0 – 49,5	BLfD AZ 37502-01
Februar 2022	USB-Datenlogger, Nahfeldklima Vorderseite	Ø 17,0	39,0 – 49,0	BLfD AZ 37502-01
Februar 2023	USB-Datenlogger, Nahfeldklima Vorderseite	Ø 11,0	64,0 – 68,0	BLfD AZ 37502-01
Februar 2024	USB-Datenlogger, Nahfeldklima Vorderseite	Ø 13,0	71,5 – 73,5	BLfD AZ 37502-01

Tabelle 4-2: Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 01.01.2021 bis 31.07.2022.

Position	Anzahl	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ
Vorderseite T [°C]	13844	13,5	18,4	23,0	9,5
Rückseite T [°C]	13844	13,5	18,4	23,5	10
Vorderseite RH [% r.F.]	13844	33,4	61,1	76,9	43,5
Rückseite RH [% r.F.]	13844	34,4	62,3	77,4	43
Unterschied RH Vorderseite / Rückseite [% r.F.]	8758	0	1,3	8,5	-

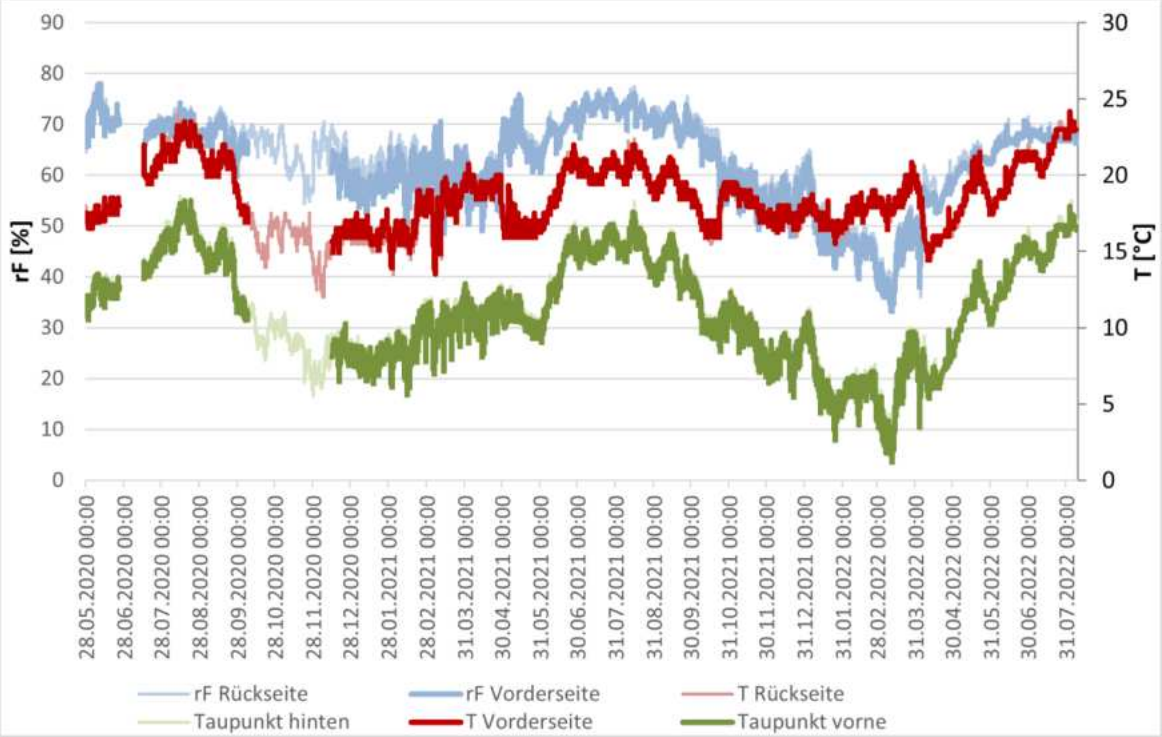

Abbildung 4-3: Klimadaten BLfD an Vorder- und Rückseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 28.05.2020 – 08.09.2022. Im Zeitraum von 06.10. – 14.12.2020 fehlen die Daten für die Vorderseite und von 24.06. – 14.07.2020 für beide Seiten (Quelle: BLfD; Diagramm: A. Fröhlich, TUM).

Auszug aus dem Untersuchungsbericht HTB-010/2024 des Fraunhofer Institutes für Bauphysik [11.06.2024]: *Hygrothermische Simulation des Tafelgemäldes in Freising in Hinblick auf die Vorgehensweise zur Auffeuchtung*; ab S. 7:

> *Für die Untersuchung der Schadensphänomene, die sich aufgrund der Situation in der Sakristei ergeben, wird der Zeitraum vor dem Bau der Einhausung* [Januar 2021 bis Juli 2022] *verwendet.* […] *Den größten Einfluss auf die Erhaltung des Tafelgemäldes hat die Nutzung der Sakristei. Im Winter wird der Raum nutzungsbedingt beheizt. Dies bewirkt eine starke Reduzierung der relativen Feuchte. 2021 wurde das Raumklima der Sakristei mit einem mobilen Befeuchter stabilisiert. Ohne zusätzliche Befeuchtung sinkt die relative Feuchte bis unter 40 % r.F. ab. Dies zeigt sich im Winter 2022. In diesem Zeitraum hat keine zusätzliche Luftbefeuchtung stattgefunden (Bild 3). Daraus resultierte eine geringe relative Feuchte mit Minimalwerten von 34,4 % r.F. am 13. März. In diesem Zeitraum wurden die größten Bewegungen (Schrumpfung) im Tafelgemälde festgestellt. Im Gegensatz dazu steigt im Sommer die relative Feuchte auf maximal rund 77 % r.F. (Vorder-*

seite: 76,9 % r.F., Rückseite: 77,4 % r.F.). Im Mittelwert (Gesamter Messzeit-raum Januar 2021 bis Juli 2022) liegt die relative Feuchte bei ca. 62 % r.F. (Vorderseite: 61,1 % r.F., Rückseite: 62,3 % r.F, siehe Tabelle 2.). Die Fenster der Sakristei werden im Jahresverlauf regelmäßig nach Bedarf durch die Mesner geöffnet. Dies erzeugt Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte und wirkt sich auf die Erhaltung des Tafelgemäldes aus. Ab April 2022 ist die Einhausung des Tafelgemäldes fertig gestellt (4.4.2022, […]*). Dies zeigt sich in den Messdaten unmittelbar anhand der deutlichen Reduzierung der Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte.*

Es ist also klar ersichtlich, dass sich seit der Errichtung der Einhausung im April 2022 ein stabileres Klima mit geringeren täglichen Schwankungen und steigender relativer Luftfeuchte eingestellt hat. Zugleich ist erkennbar, dass die Temperatur- und Luftfeuchteunterschiede zwischen Vorder- und Rückseite meist sehr gering sind. Teilweise war es in der Vergangenheit an der Rückseite der Tafel etwas feuchter, dies gilt vor allem für die kalte Jahreszeit oder bei größeren Besuchergruppen und der Durchführung von Wartungsarbeiten oder Messungen. Der Taupunkt war durchgehend weit unter der Lufttemperatur, sodass keine Kondensationsprobleme zu erwarten waren. Dies wurde während der Projektlaufzeit durch die Oberflächentemperatursensoren bestätigt.

Bei genauerer Betrachtung lässt sich zudem genau ablesen, wann und wie lange die Einhausung durch Personen betreten wurde. Üblicherweise schnellt die Temperatur, in Abhängigkeit von der Anzahl der Personen und der Aufenthaltsdauer oder -Tätigkeit um mehrere °C in die Höhe und die r.F. fällt um einige Prozent. Diese Auswirkungen klingen direkt nach Verlassen der Einhausung ab und es stellt sich innerhalb weniger Stunden wieder das Ursprungsklima ein. Wie die Ergebnisse in Abschnitt 4.1.4.3 zeigen, führen diese Schwankungen zwar z. T. zu einer Reaktion der Tafel, allerdings wurden diese als nicht kritisch eingestuft.

4.1.3.2 Stratifikation

In Innenräumen kann sich bei Abwesenheit von natürlich auftretenden oder mechanisch erzeugten Luftströmungen durch Dichteunterschiede verschieden warmer Luftmassen eine persistente Schichtung ähnlich der Stratifikation in Seen einstellen. Da hierdurch in verschiedenen Höhen verschiedene Lufttemperaturen und bei gleicher absoluter Luftfeuchte somit verschiedene relative Luftfeuchten herrschen, kann es zu zusätzlichen Spannungen in großen Kulturgütern kommen oder Klimatisierungsmaßnahmen ineffizient ablaufen. Die (thermische) Stratifikation hat somit einen Einfluss auf das Schadensrisiko von Kulturgütern (Backer et al. 2017). Dies gilt auch für das abgeschottete Luftvolumen in der Einhausung. Hier war jedoch weniger eine ungleiche r.F. über die Höhe des Tafelbilds, sondern das Schimmelrisiko infolge eines Kaltluftsees unter dem Podest von Bedeutung. Dabei gab es eine Stratifikation mit erhöhter r.F. in den kühleren Schichten (s. a. 4.1.4.5). Um dem entgegenzuwirken, wurde ein Ventilator unter dem Podest installiert, der mehrmals täglich die Luft unter dem Podest umwälzen sollte. Zudem wurde ein weiterer USB-Klimalogger des BLfD unter dem Podest angebracht, um die Verhältnisse zu dokumentieren.

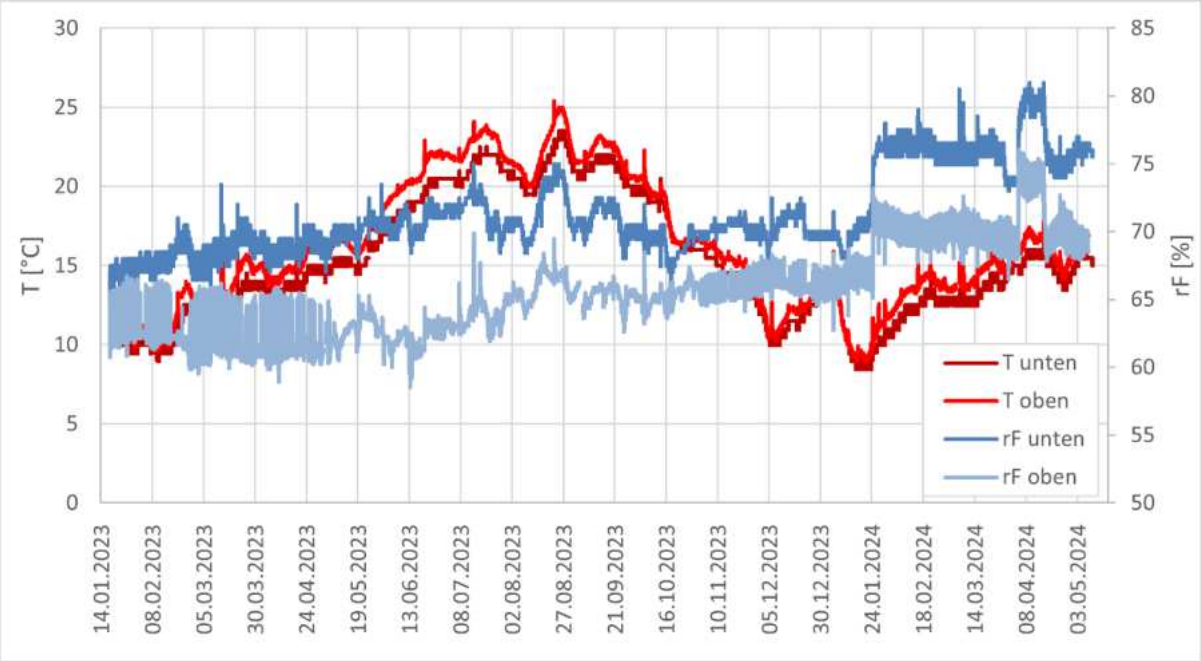

Abbildung 4-4: Temperatur und r.F. am Tafelbild und unter dem Podest. Die Werte oben sind jeweils Durchschnittswerte der Klimasensoren am Tafelbild. (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

In Abbildung 4-4 sind die Aufzeichnungen dieses Klimaloggers im Vergleich mit den Werten am Tafelbild von Januar 2023 bis Mai 2024 dargestellt. Es ist klar zu erkennen, dass unter dem Podest ein anderes Raumklima herrscht als am Tafelbild selbst. Während die Temperatur- und Luftfeuchteunterschiede am Tafelbild sehr gering sind (s. Abbildung 4-7), betragen die Temperaturunterschiede zwischen oben und unten bis zu 2 °C. Dies spiegelt sich auch in den Mittelwerten wider: Dieser liegt für die Temperatur unten knapp 1 °C unter dem Mittelwert oben. Wesentlich größer sind die Unterschiede jedoch bei der r.F.: Hier werden Unterschiede von bis zu 10 %-Punkten erreicht (6 % im Mittel). Während der letzten Auffeuchtungsphase wurden unter dem Podest bis zu 81 % r.F. gemessen. Dies war ein entscheidender Faktor für das wiederholte Schimmelpilzwachstum am Sakristeischrank und an Teilen des Podests, während am Tafelbild bis Juni 2024 kein einziger Befall registriert wurde.

4.1.3.3 Umgebungsklima

In Abbildung 4-5 sind zum Vergleich neben der Temperatur in der Einhausung auch die Daten aus der Sakristei und von der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdiensts (DWD, Stations-Nr. 1262) am Münchner Flughafen dargestellt. Hier wird besonders die dämpfende Wirkung der Gebäudehülle auf das Innenraumklima deutlich. Ganzjährig werden durch das massive Gemäuer die außerhalb auftretenden Temperaturspitzen gepuffert. Im Winter führt das Heizen in der Sakristei jedoch zu teils erheblichen Temperaturdifferenzen zwischen Außen- und Innenluft.

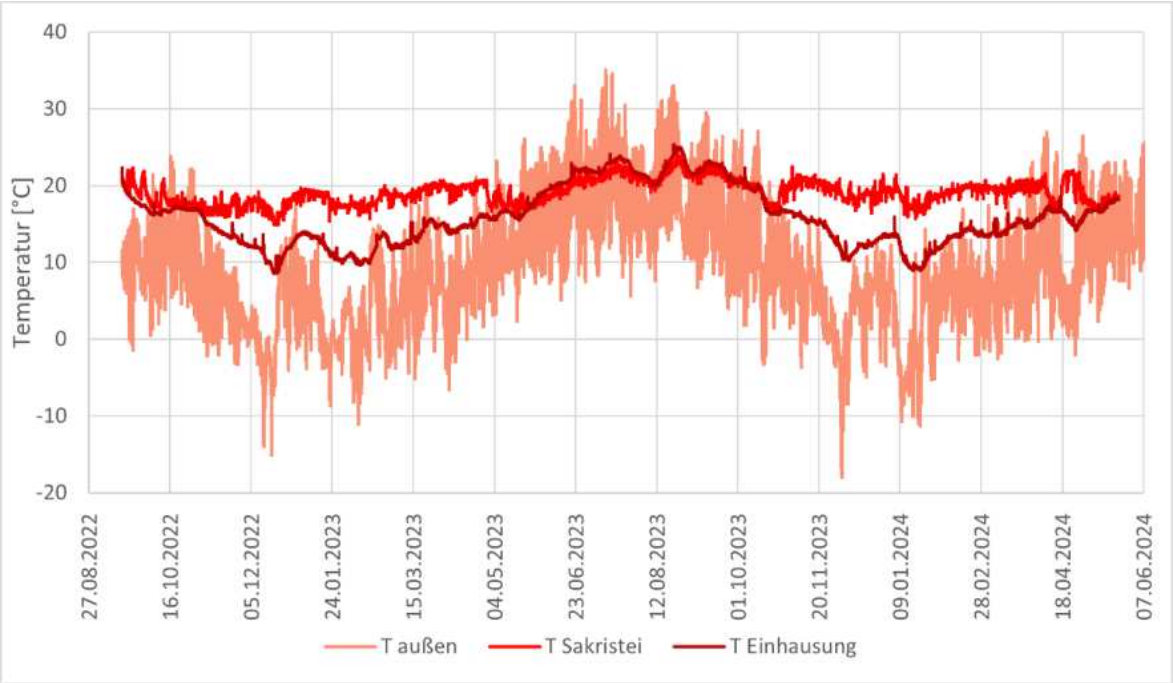

Abbildung 4-5: Verlauf der Temperatur in der Einhausung, in der Sakristei und an der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Quelle: Deutscher Wetterdienst; Grafik: A. Fröhlich, TUM).

In Abbildung 4-6 sind analog die relative Luftfeuchte am Flughafen, in der Sakristei und in der Einhausung dargestellt. Auch hier ist eine wesentlich geringere Schwankung im Innenraum im Gegensatz zur Umgebung zu beobachten. Zudem liegt die r.F. in der Sakristei besonders im Winter oft deutlich unter der außerhalb gemessenen Luftfeuchte. Dies ist auf den Betrieb der Heizung in der Sakristei zurückzuführen. Im Jahresdurchschnitt betrug die r.F. innen 63,7 %, außen 80,6 %. Die hochfrequenten Schwankungen der r.F. in der Einhausung wurden durch das Ein- und Ausschalten des Luftbefeuchters hervorgerufen.

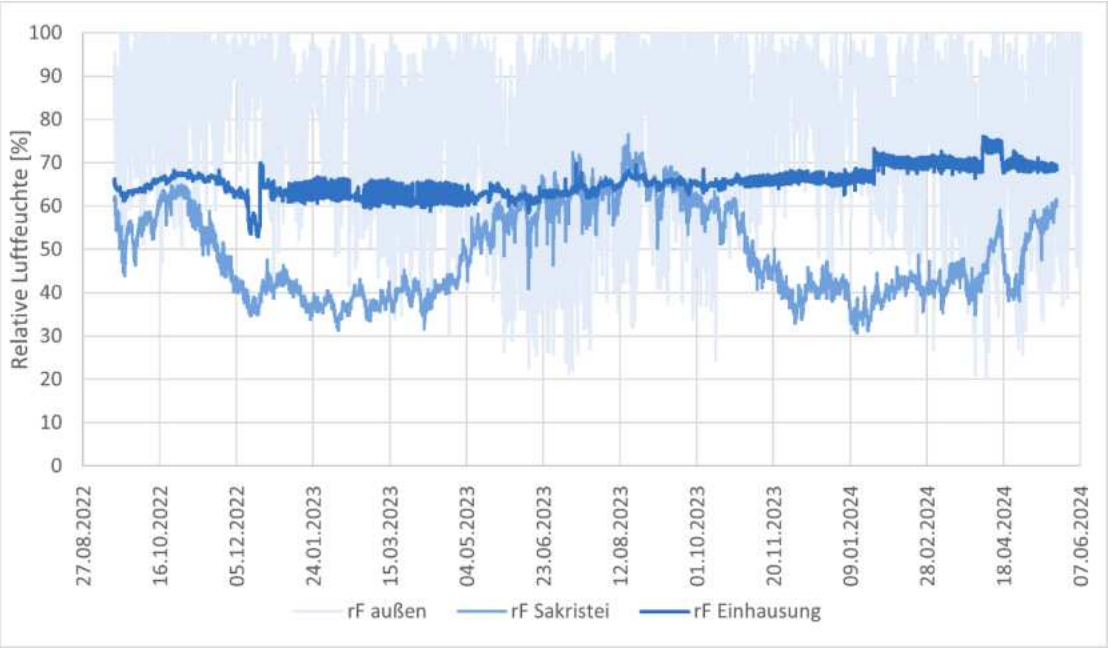

Abbildung 4-6: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Einhausung, in der Sakristei und an der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Quelle: Deutscher Wetterdienst; Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Wie in Abbildung 4-7 ersichtlich, stabilisiert die Einhausung in Verbindung mit dem Befeuchter das Innenraumklima gegenüber der restlichen Sakristei. In Folge des Heizungsbetriebs zeichnete sich in der Sakristei im Winter das übliche Abfallen der r.F. ab. In der Einhausung wirkte der Befeuchter dem Abfallen entgegen und hielt die r.F. innerhalb des festgelegten Korridors. Die Unterschiede zwischen den drei Messpunkten im oberen Bereich der Einhausung sind jedoch sehr gering, mit einer leichten Tendenz zu niedrigeren Temperaturen und höheren r.F. hinter der Tafel als davor. Ursächlich war hier die kühlende Wirkung der Außenwand hinter der Tafel und geringe Undichtigkeiten der Einhausung, welche einen geringen Luftaustausch mit der Sakristei erlauben.

Dass die relative Luftfeuchte in den Sommermonaten in der Einhausung zeitweise geringer ist als in der Sakristei, ist darauf zurückzuführen, dass die Sakristei morgens oft gelüftet wird und dadurch im Raum niedrigere Temperaturen herrschen als in der Einhausung. Dass im Sommer in der Einhausung höhere Temperaturen als in der Sakristei herrschen, deutet aber auch darauf hin, dass die Einhausung so gut von der restlichen Sakristei abgekoppelt ist, dass der Einfluss des Fensters maßgeblich wird. Insgesamt ist das Klima in der Einhausung jedoch näher an dem der Sakristei als am Umgebungsklima, wie auch Tabelle 4-3 zeigt.

Tabelle 4-3: Mittelwert, Maximum, Minimum in der Einhausung, der Sakristei und in der Umgebung
Zeitraum von 16.09.2022 bis 30.04.2024

Messwert	Mittelwert	Maximum	Minimum
T Einhausung [°C]	15,89	25,40	8,60
T Sakristei [°C]	19,24	25,00	15,00
T außen [°C]	9,39	35,10	-17,90
r.F. Einhausung [%]	65,23	76,10	53,10
r.F. Sakristei [%]	49,16	76,50	30,80
r.F. außen [%]	78,11	100,00	20,20

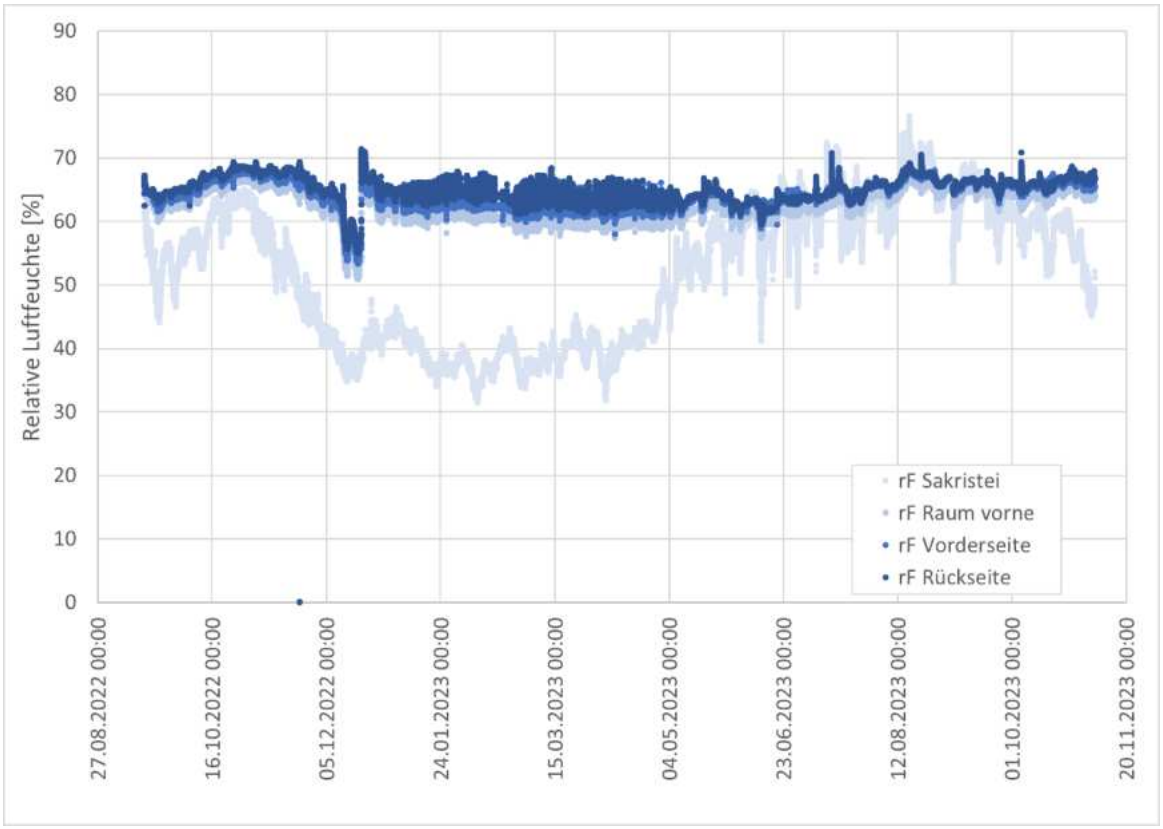

Abbildung 4-7: Relative Luftfeuchte an drei Positionen in der Einhausung und an einer Position in der Sakristei im Zeitraum von 16.09.2022 bis 06.11.2023 (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Über den gesamten Beobachtungszeitraum gesehen, liegt der Vorteil der Einhausung aber nicht nur in der Erhöhung der durchschnittlichen r.F., sondern auch in einer deutlichen Reduktion der Klimaschwankungen. In Tabelle 4-4 sind einige Kennwerte zusammengefasst. Hierbei werden vor allem die sehr geringen r.F.-Tiefstwerte in der Sakristei durch den Befeuchter ausgeglichen, wodurch die Spannweite der Werte von über 45 % in der Sakristei auf ca. 17 % in der Einhausung reduziert wird.

Tabelle 4-4: Mittelwert, Maximum, Minimum und Amplitude der r.F. an den vier Sensorpositionen Zeitraum von 16.09.2022 bis 30.04.2024

Sensorposition	Mittelwert r.F. [%]	Maximum [%]	Minimum [%]	Spannweite [%]
Rückseite	64,71	71,30	54,90	16,40
Vorderseite	63,96	70,30	53,30	17,00
Raum vorne	62,34	69,20	50,90	18,30
Sakristei	51,95	76,50	31,40	45,10

Dies schlägt sich auch in der Verteilung der Messwerte über diese Spannweite nieder, wie der Vergleich von Abbildung 4-8 und Abbildung 4-9 zeigt. Durch den Einsatz des Befeuchters treten in der Einhausung nur vereinzelt r.F.-Werte unter 60 % (bzw. 65 und 75 % während der Auffeuchtungsphasen) auf, während in der Sakristei ein Großteil der Werte unterhalb dieser Schwelle liegt.

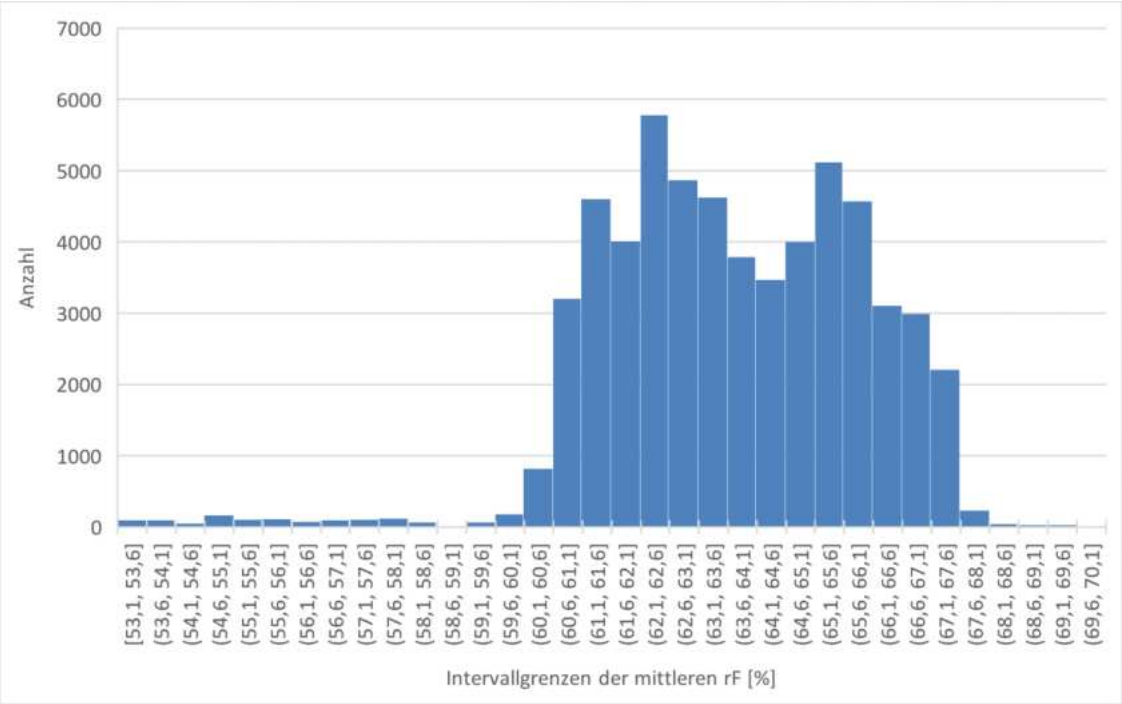

Abbildung 4-8: Histogramm der mittleren r.F. in der Einhausung (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

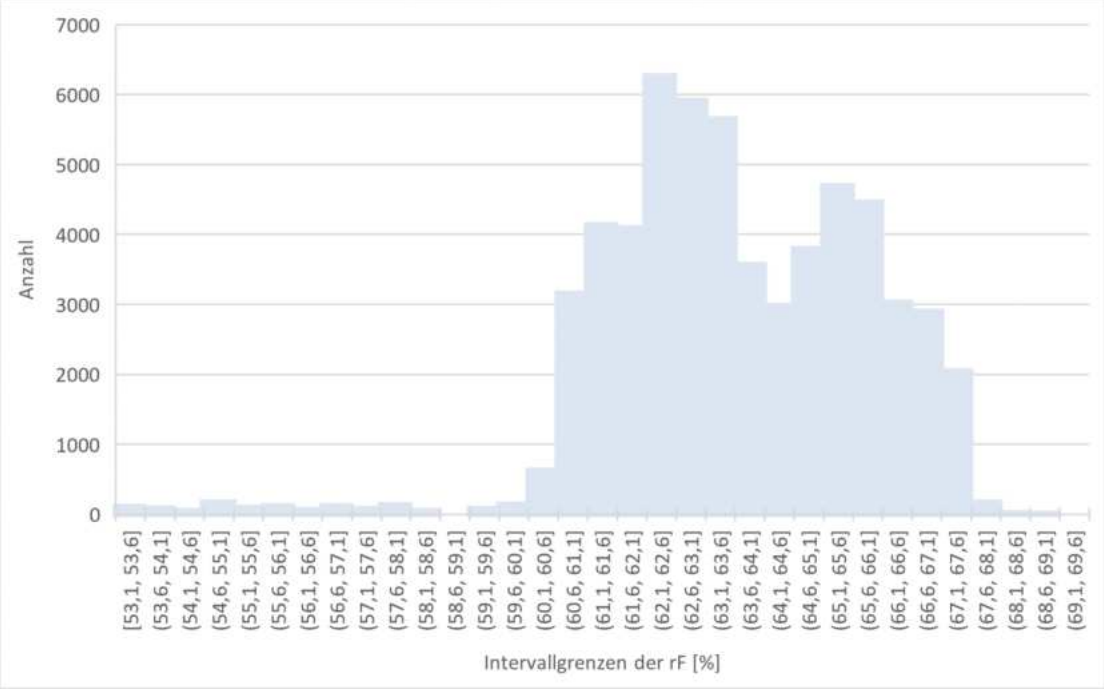

Abbildung 4-9: Histogramm der r.F. in der Sakristei (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

4.1.3.4 Oberflächentemperatur

Die Auswertung der Oberflächentemperaturen zeigte, dass es keine großen Unterschiede zwischen den einzelnen Oberflächen gibt. Die Differenzen sind im Winter größer als im Sommer, überschreiten aber nie 1 °C (s. Abbildung 4-10).

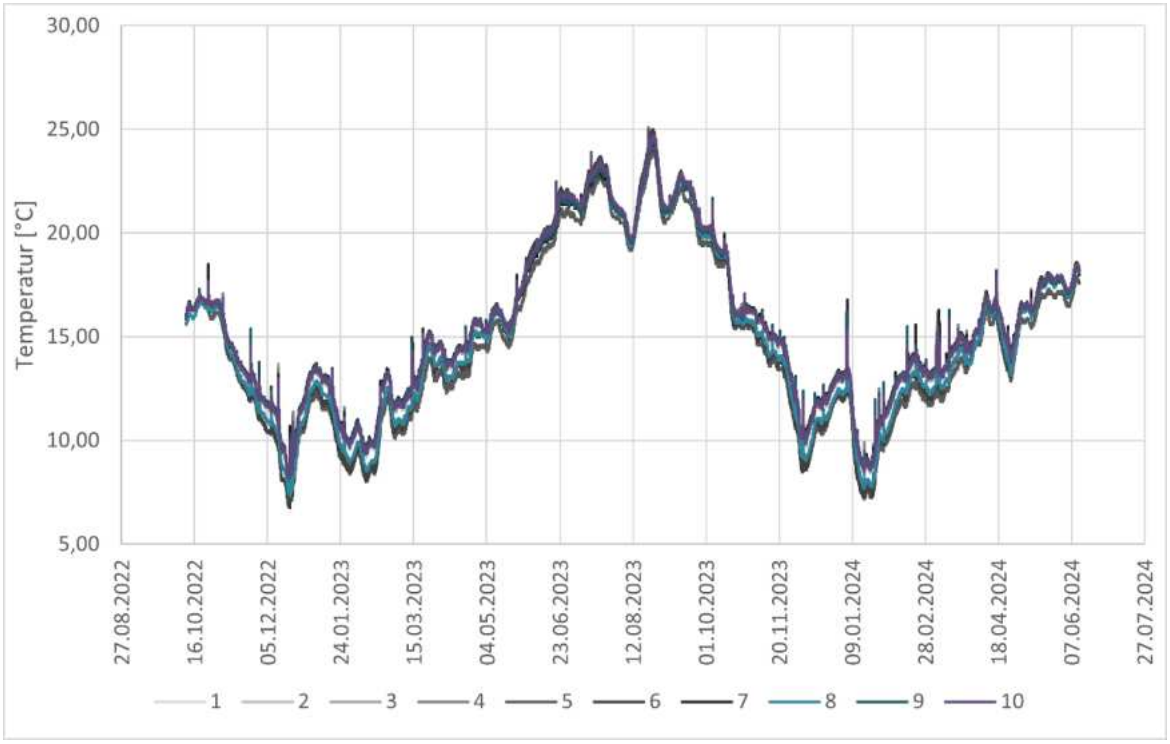

Abbildung 4-10: Oberflächentemperaturen der zehn Sensoren an der Tafel und den Außenwänden (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Tendenziell sind die Wandoberflächen (Grautöne) etwas kälter als die Tafeloberflächen (Grüntöne); dennoch folgen alle Oberflächen eng dem Raumklima (Abbildung 4-11). Die erkennbaren Spitzen in den Temperaturen sind die Folge des Aufenthalts von Personen in der Einhausung.

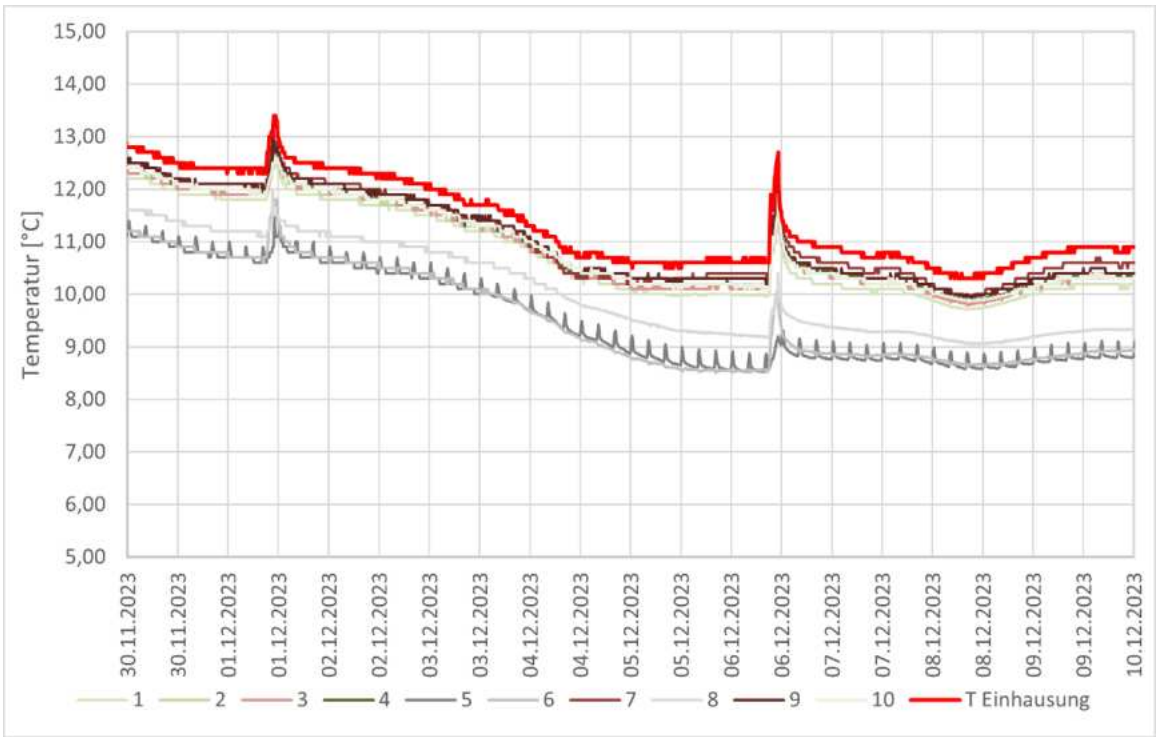

Abbildung 4-11: Ausschnitt der Messwerte der Lufttemperatur in der Einhausung und der Oberflächentemperaturen (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Ein Abgleich mit dem Taupunktmonitoring zeigte zudem, dass zu keinem Zeitpunkt und an keiner Messstelle die Gefahr von Taupunktunterschreitungen bestand. Somit können auch während der Auffeuchtungsphase Kondensationsprobleme ausgeschlossen werden.

4.1.4 Holzträgermonitoring

Der Holzträger wurde mit verschiedenen Methoden überwacht, um seine Reaktion auf das Umgebungsklima zu beobachten und zu dokumentieren. Die Ermittlung der maximalen Länge des Tafelbildes erwies und erweist sich auch weiterhin als schwierig. Dies liegt zum einen an fehlenden Fix-/Ansatzpunkten für die Messung (am Tafelbild oder am Rahmen messen; Nut des Rahmens) und zum anderen an den zahlreichen verleimten Brettfugen, welche durch ihre Quell- und Schrumpfbewegung das Messergebnis verfälschen könnten. Erschütterungen der Messgeräte durch das Wackeln der Arbeitstribüne beim Besteigen sind weiterhin nicht ausgeschlossen. Eine photogrammetrische Messung musste aus Platzgründen und eine Befestigung der Messtechnik an der Rückwand der Sakristei aus denkmalpflegerischen Gründen bisher ausgeschlossen werden. Die Methode des Scanvergleichs mittels Laserscan, der zu Beginn des Projektes durchgeführt wurde, und die Bewegung sichtbar machen konnte, die über die Wintermonate 2022 entstanden ist, sollte auch für die finale Auswertung herangezogen werden. Allerdings führte die Verkabelung der Rückseite, die in den Scans nicht herausgerechnet werden kann, zu einem zu großen Rauschen, sodass aus den Messungen keine validen Aussagen getroffen werden konnten (vgl. Abb. 4-20).

4.1.4.1 Triangulationslaser

Für die Auswertung wurde die gemessene Längenänderung zwischen Laserkopf und Keramik-Endmaß (Abstand jeweils 16 cm) herangezogen. Die Verformung ergibt sich dann aus der Differenz der einzelnen Messungen zueinander. Alle Werte beziehen sich dabei auf den ersten Messwert der Aufzeichnungen; der ab dann als 0 mm gilt. Positive Werte bedeuten eine Quellen der Tafel, negative Werte ein Schwinden (siehe Abb. 4-10). Steigt ein Wert, während der andere fällt, handelt es sich um eine Verschiebung der Tafel. Dabei wird die, durch das Stützgerüst vorgegebene Mittellänge nicht einberechnet. Die größten beobachteten Verformungen traten kurz vor dem Bau der Einhausung (April 2022) auf. Zu diesem Zeitpunkt war das Messsystem noch nicht vorhanden, wodurch die Verformungen im instabilen Klima nicht messtechnisch erfasst wurden. Über lange Zeiträume wurden nur sehr geringe Verformungen in der Größenordnung von 0,1 - 0,2 mm an der Tafel registriert. Dies liegt vor allem daran, dass das Raumklima sehr stabil war und kaum Holzfeuchteänderungen auftraten[74].

Der Einfluss der r.F. auf die Verformungen lässt sich während der Auffeuchtungsphase an allen Lasern erkennen. Besonders deutlich jedoch an Laser 2. Im ersten Auffeuchtungsschritt

[74] Messfehler: Nach der Installation der Laser-Wegaufnehmer (November 2022) wurden anfänglich Bewegungen von insgesamt ca. 2,6 mm beobachtet, die im Mai 2023 jedoch weitgehend abgeklungen waren. Bei den Messwerten handelt es sich nicht um tatsächliche Verformungen, sondern um einen Messfehler, der durch eine Verschiebung der Messmarke (aufgrund versehentlichen Lasteinwirkung durch ein Sensorkabel zwischen Dezember 2022 und Mitte Januar 2023) hervorgerufen wurde. Auch die sehr hohen gemessenen Verformungen, die an Laser 1 im Januar 2024 aufgezeichnet wurden, wurden durch eine temporäre Verschiebung der Messmarke verursacht, und stellen kein Quellen oder Schwinden der Tafel dar.

folgt die Verformung einem asymptotischen Verlauf, bis das neue Gleichgewicht erreicht ist. Beim zweiten Schritt deutet sich ein ähnlicher Verlauf an, die r.F. wurde jedoch reduziert, bevor die Gleichgewichtsfeuchte erreicht wurde. Es dauert jeweils ca. 14 Tage, bis die Verformungen abgeklungen sind. Weiteres zum Auffeuchtungsversuch s. 4.4.

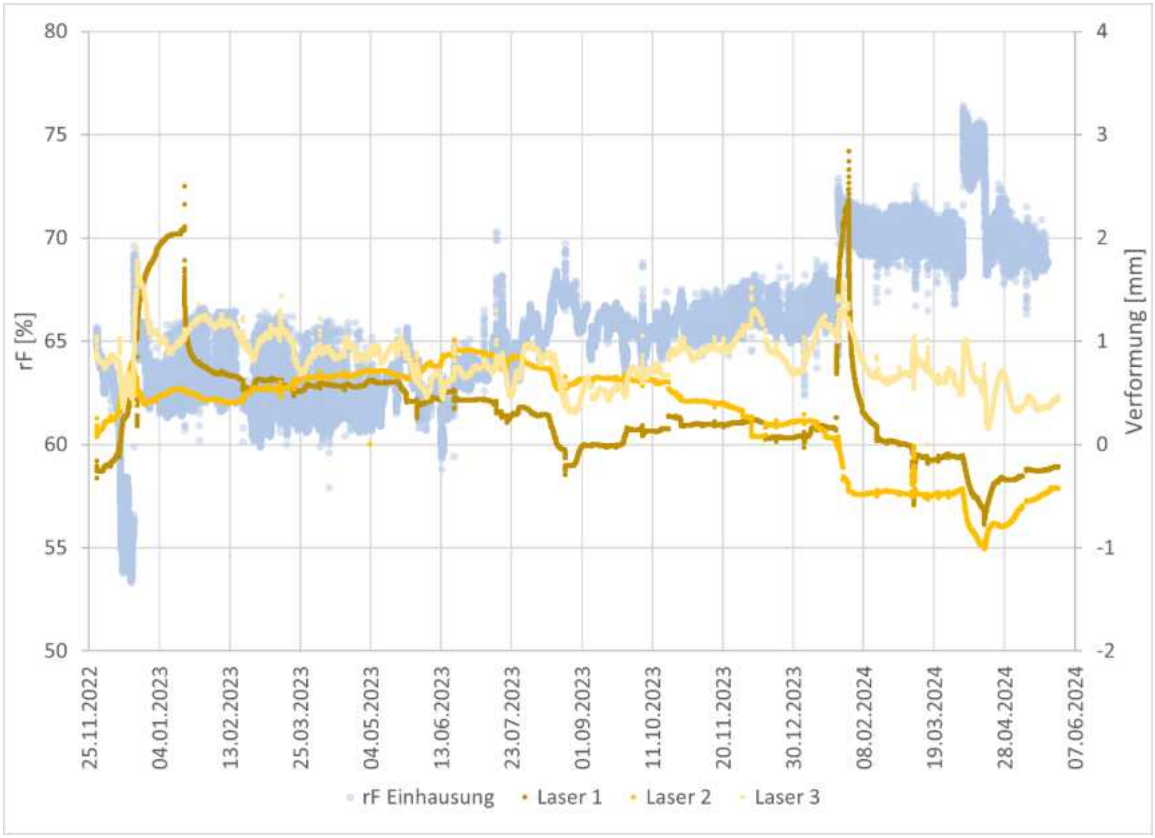

Abbildung 4-12: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und daraus resultierende Verformung der Tafel an den drei Triangulationslasern. Laser 1 und 2 sind in Tafelebene ausgerichtet, Laser 3 senkrecht dazu (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

In Abbildung 4-13 sind ergänzend die Werte der Laser 1 und 2 (in Tafelebene) aufsummiert, um die Gesamtverformungen hervorzuheben. Es tritt am vorliegenden Fallbeispiel eine Verformung von 2 mm bei einer Änderung der r.F. von 65 auf 75 % auf. Dies bleibt hinter den Prognosen zurück, die sich aus Sorptionsgleichungen (Bratasz et al. 2012a, S. 16) und dem Schwindmaß von rezentem Fichtenholz ergeben. S. a. Kupczak, et al. (2018). Mögliche Gründe dafür sind plastische Verformungen aus vergangenen Belastungen oder eine Behinderung des Quellens und Schwindens durch äußere Zwänge (z. B. Zierrahmen, Gewicht und schlechte Gleitfähigkeit).

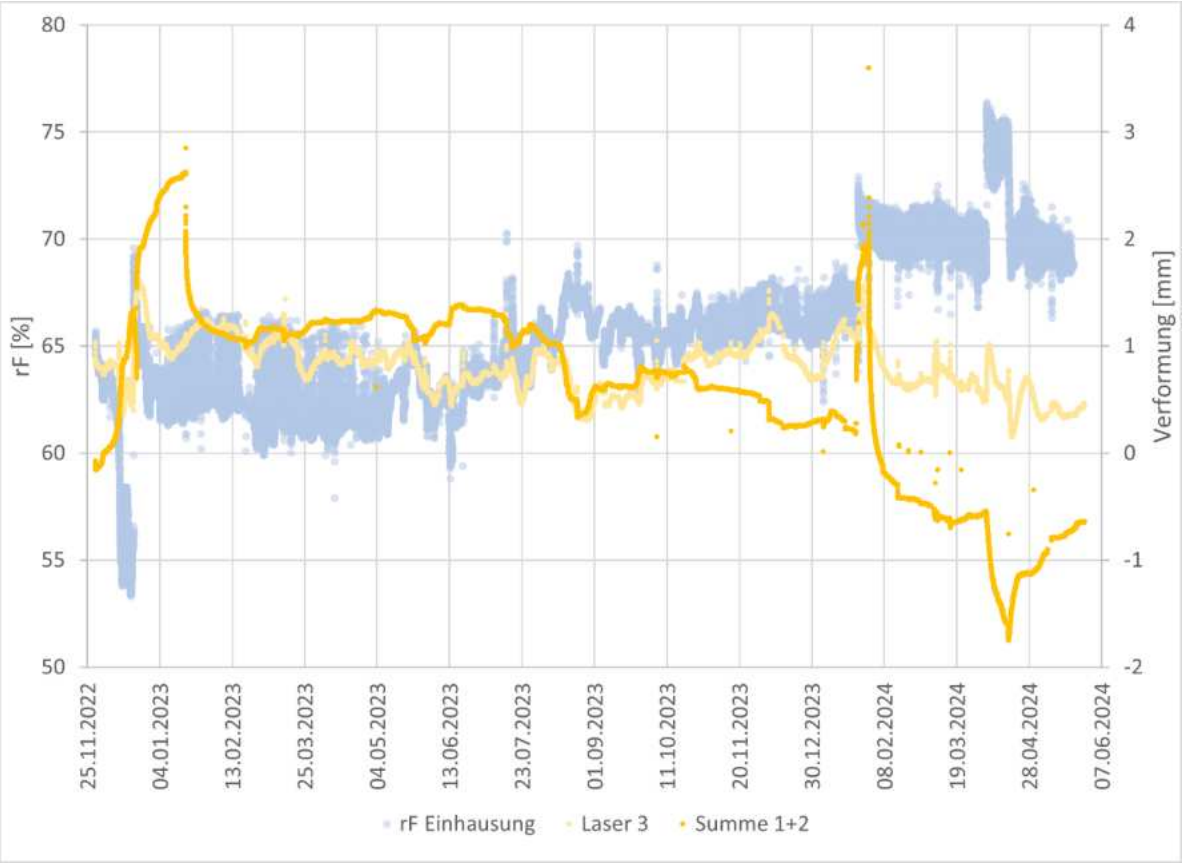

Abbildung 4-13: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und daraus resultierende Verformung der Laser 1 und 2 sind zusammengefasst, um die absolute Verformung hervorzuheben (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

4.1.4.2 Extensometer

Parallel zu den Triangulationslasern wurden die Bewegungen der Tafel auch mit Extensometern aufgezeichnet. In Abbildung 4-14 sind – zusammen mit der r.F. – die Absolutpositionen der mechanischen Wegaufnehmer angegeben. Diese sind abhängig von der Position der Messzylinder beim Einbau. Die Bewegung der Tafel bei Schwankungen der r.F. ist aufgrund der Skalierung nur schlecht zu erkennen. Die vereinzelten Messpunkte am unteren Rand der Abbildung wurden durch einzelne Messfehler oder Messdatenverluste hervorgerufen.

Die Verformung während der Projektlaufzeit lässt sich besser als Relativposition darstellen (s. Abbildung 4-15). Dies geschieht durch Addition beider Messwerte je Messebene und anschließende Normierung der Werte.

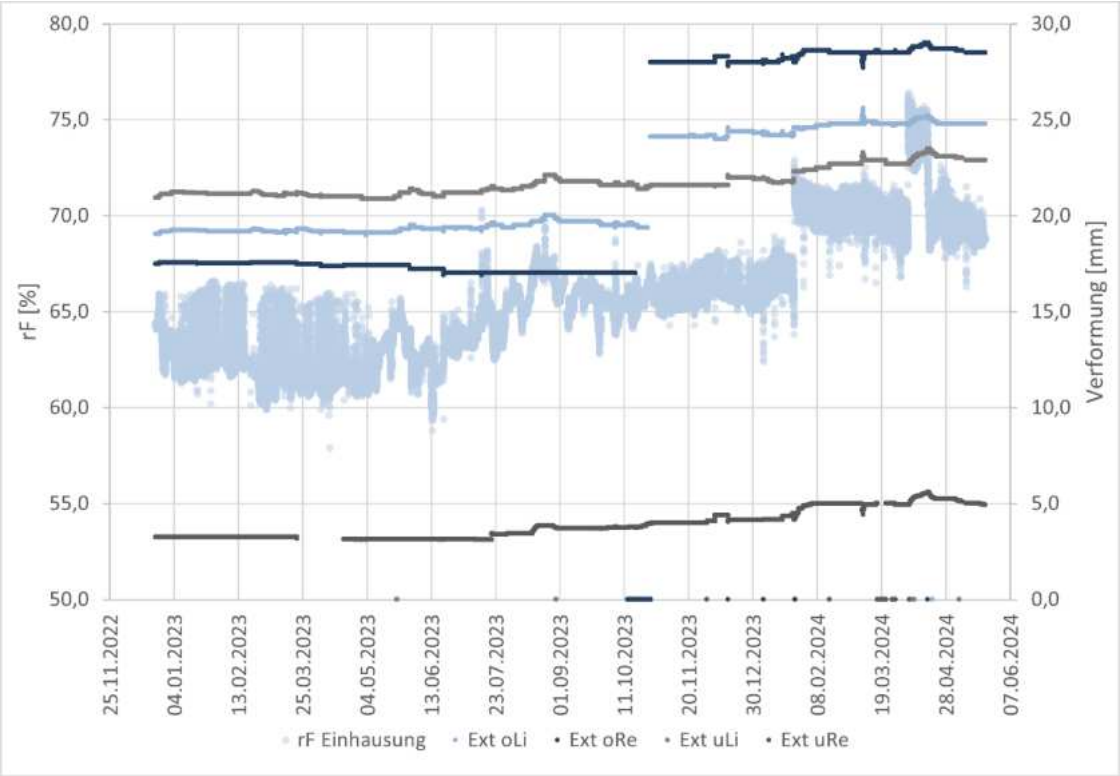

Abbildung 4-14: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und mittels Extensometern aufgenommene Verformungen des Holztafelbildes. Die Werte geben die absolute Position der Wegaufnehmer an (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Der Vergleich zwischen Laser-Wegaufnehmern und Extensometern zeigt, dass die Extensometer eine wesentlich geringere Auflösung bieten. Die Laser registrieren bereits kleinste Veränderungen ab wenigen µm, während die Extensometer nur Verformungen ab 0,1 mm zuverlässig erfassen. Grund hierfür kann neben der geringeren Auflösung auch die Art der Befestigung sein (s. Abschnitt 3.1.4.2). Dennoch konnte, besonders während der Auffeuchtungsphase, das Quellen der Tafel erfasst werden. In der unteren Extensometer-Ebene, welche ca. 70 cm über dem Podest liegt, dehnte sich die Holztafel um 4,6 mm aus. In der oberen Lage, 140 cm über dem Podest, wurden 2,05 mm erreicht. Die Ursache für diese Diskrepanz konnte nicht geklärt werden. Möglicherweise wiesen die Befestigungen mehr Spiel auf oder die Geometrie und Konstruktion der Tafel ist ursächlich dafür.

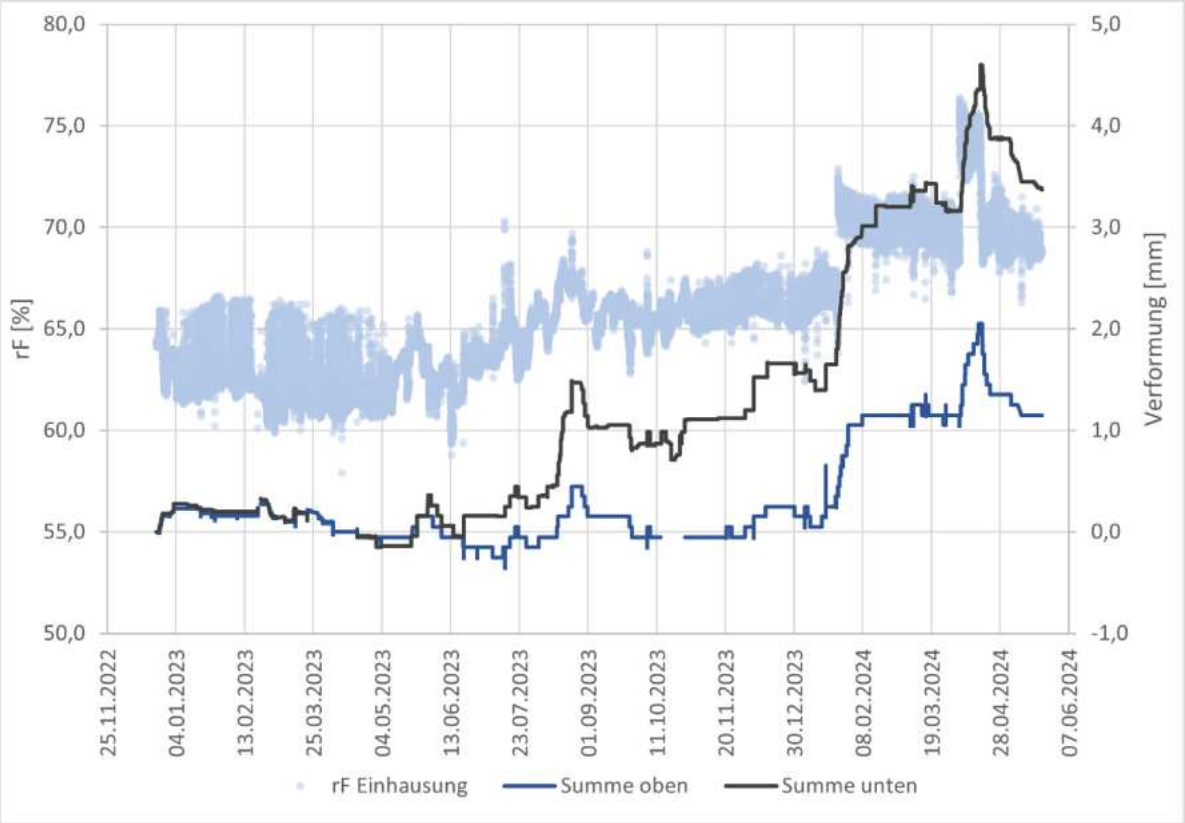

Abbildung 4-15: Relative Luftfeuchte und daraus resultierende Messwerte der Extensometer infolge Quellen und Schwinden der Holztafel (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

4.1.4.3 Millimeterpapierchen

Insgesamt zeigten sich an den Messpunkten nur geringe Verschiebungen. Zu bemerken ist hierbei, dass sich die Tafelhälften in beide Richtungen entlang der Gratleisten ausdehnen, wobei bei den unteren Gratleisten die Verschiebung hauptsächlich nach außen (also Richtung Rahmen) stattfindet. Dies könnte mehrere Ursachen haben, u. a. werden die Gratleisten zur Mittelfuge hin vermutlich durch die gegenüberliegende Tafelhälfte blockiert. Allein anhand der Beobachtungen lässt sich allerdings nicht feststellen, ob der geringe Volumenzuwachs der Tafel bei der Auffeuchtung darauf zurückzuführen ist, dass die Tafelbewegung durch die Gratleisten blockiert wird oder ob im Laufe der Historie des Gemäldes bereits ein derart großer Anteil an plastischer Verformung stattgefunden hat, dass eine Rückkehr zu den Ursprungsmaßen nicht mehr möglich ist. Um Gewissheit zu erlangen, ob die Gratleisten noch gängig sind, müsste das Gemälde aus dem Rahmen genommen und beide Tafelhälften voneinander gelöst werden, da die Leisten von der Mitte ausgehend in die beiden Tafelhälften eingeschoben sind.

4.1.4.4 Kurzfristige Reaktion der Tafel

Dass die Reduktion der Klimaschwankungen – selbst kurzzeitiger – notwendig ist, ist bekannt (Schellen und van Schijndel 2011, S. 86; van Grevenstein et al. 2014, S. 29) und wurde durch die folgende Analyse bestätigt. Exemplarisch werden die Messdaten vom 02.11.2023 ausgewertet; die beobachteten Zusammenhänge sind aber allgemeingültig. Es ist anzumerken, dass die kurzfristigen r.F.-Veränderungen v. a. aus der Tafelebene heraus (z-Richtung) zu

messbaren Verformungen geführt haben. Die anderen beiden Triangulationslaser haben keine derart signifikanten Verformungen in der Tafelebene (x-Richtung) registriert. Dies könnte u. a. an den geringen Änderungen durch die kontinuierliche Befeuchtung (⌀ ± 2-5 % r.F.) bedingt sein. Schon minimale und kurzfristige Veränderungen der r.F. führen allerdings zu messbaren Verformungen des Tafelbilds in z-Richtung und dies in hoher Geschwindigkeit[75] (s. 4.1.4.6 Opto-technischen Monitoring und 4.1.6 Malschichtmonitoring): Es vergehen nur 25 – 30 Minuten zwischen dem r.F.-Maximum und dem Verformungsmaximum (s. Abbildung 4-17). Ähnlich schnelle Reaktionen wurden auch von Dionisi Vici et al. (2006, S. 43) beobachtet. Diese Verformungen bewegen sich im Bereich von ca. 5 µm und sind damit sehr gering. Allerdings sind auch die r.F.-Veränderungen mit ca. 2 %-Punkten eher gering. Dies zeigt weniger, dass das Holztafelbild ungewöhnlich schnell große Mengen an Feuchte aus der Raumluft aufnimmt, sondern, dass es sehr empfindlich auf kleinste Veränderungen reagiert. Die kurze Reaktionszeit deutet auf eine nur oberflächliche Änderung der Holzfeuchte hin, welche aber trotzdem zu messbaren Verformungen führt. Eine Untersuchung der dadurch angestoßenen, tiefer reichenden Bewegungen der Feuchte im Tafelbild analog den Arbeiten von Melin und Bjurman (2017) war im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht möglich und muss Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeit sein.

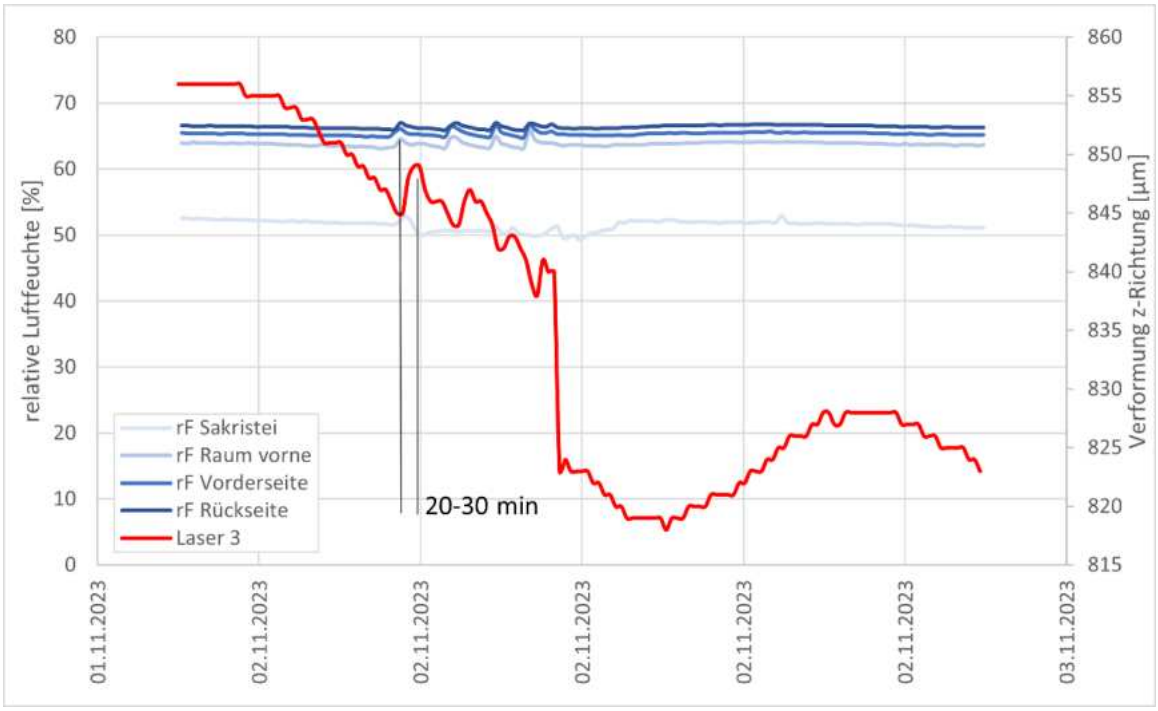

Abbildung 4-16: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel aus der Tafelebene heraus am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 3. Die rF hat ihren ersten Hochpunkt um 6:36 Uhr, die Verformung zwischen 7:00 und 7:10 Uhr

[75] Diese Verformungen wurden nur mit den Triangulationslasern erfasst; die Extensometer zeigten aufgrund der geringeren Messgenauigkeit keine Veränderung an.

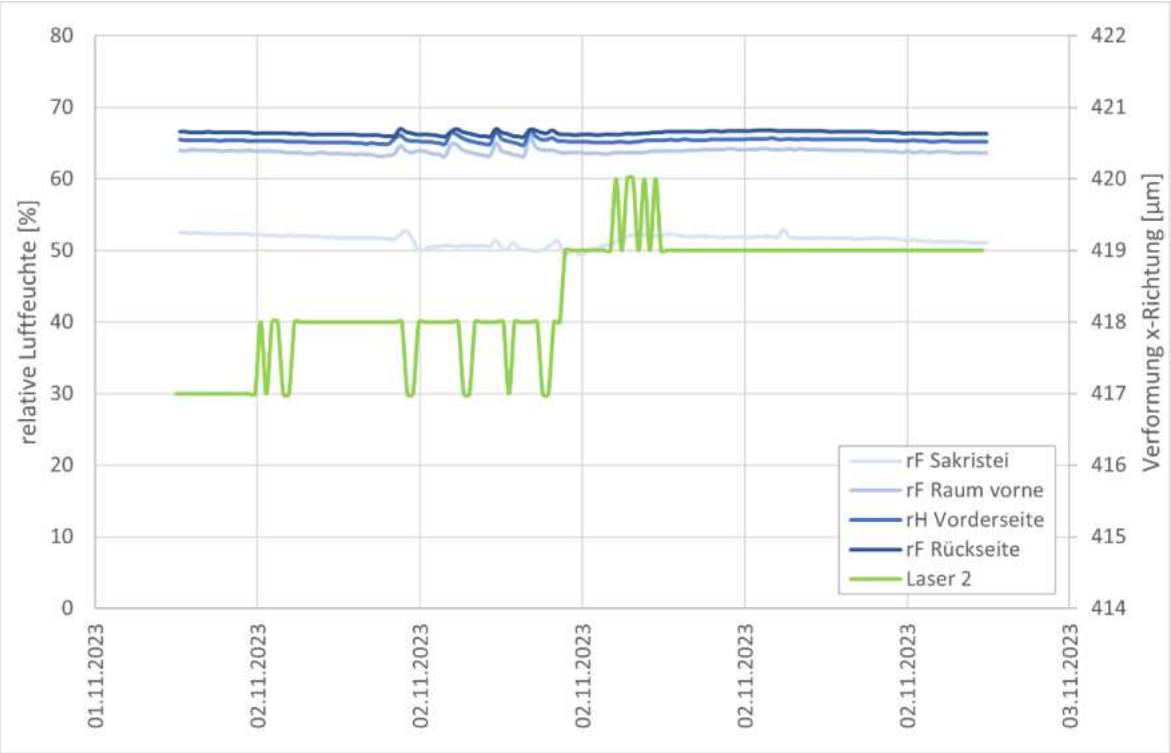

Abbildung 4-17: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel in der Tafelebene am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 2. (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Wie Abbildung 4-17 zeigt, werden zwar sehr geringe Ausschläge in der Größenordnung von 1 µm registriert, diese liegen allerdings im Bereich der maximalen Auflösung und sind nicht eindeutig von den Artefakten vor und nach den Auffeuchtungs-Maxima unterscheidbar. Die Extensometer haben aufgrund ihrer geringeren Genauigkeit ebenfalls keine kurzfristigen Reaktionen aufgezeichnet.

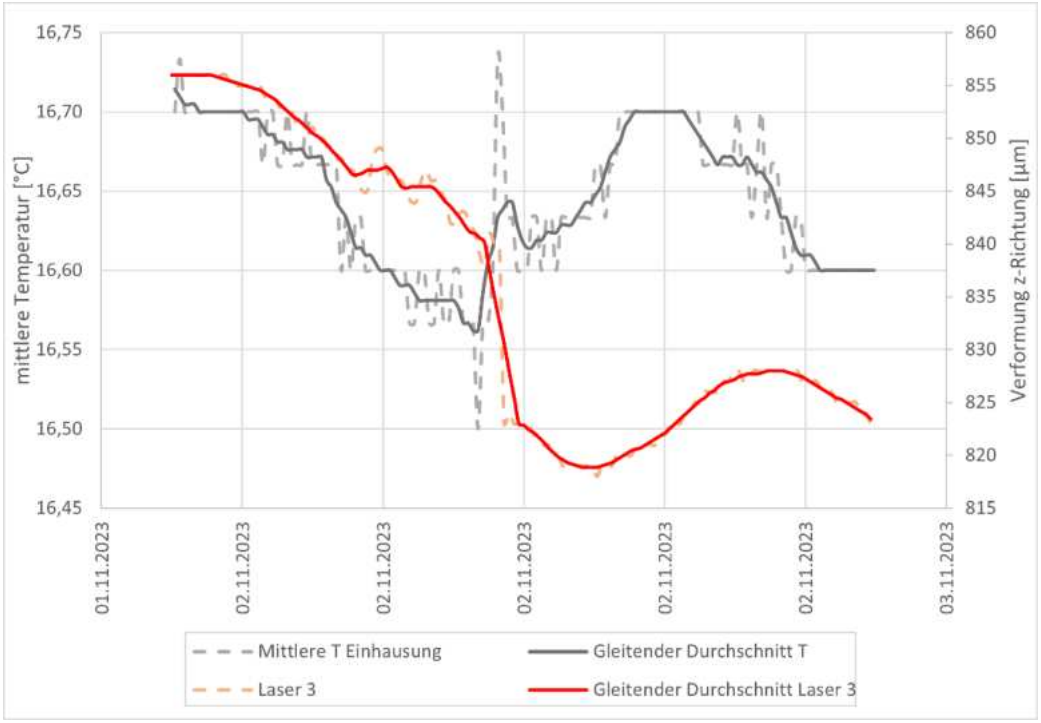

Abbildung 4-18: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel in der Tafelebene am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 2. (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Zusätzlich zu den sehr kurzfristigen Reaktionen erfolgen auch längerfristige Bewegungen der Tafel. Der in Abbildung 4-17 erkennbare, überlagernde langfristige Trend der Verformung folgt mit einer Verzögerung von ca. 180 min dem Trend der r.F. Dies ist zur Verdeutlichung in Abbildung 4-19, hier mit der aus den einzelnen Messwerten gemittelten r.F., gegenüber Abbildung 4-17 leicht verändert dargestellt. Wie in Abschnitt 4.1.4.1 erläutert wird, dauert es ca. 14 Tage, bis die Feuchte sich gleichmäßig über die gesamte Tafeldicke von durchschnittlich 20 mm den gesamten Querschnitt verteilt und die neue Gleichgewichtsfeuchte erreicht wird. Diese Beobachtungen decken sich mit denen von van Grevenstein et al. (2014, S. 29 - 30).

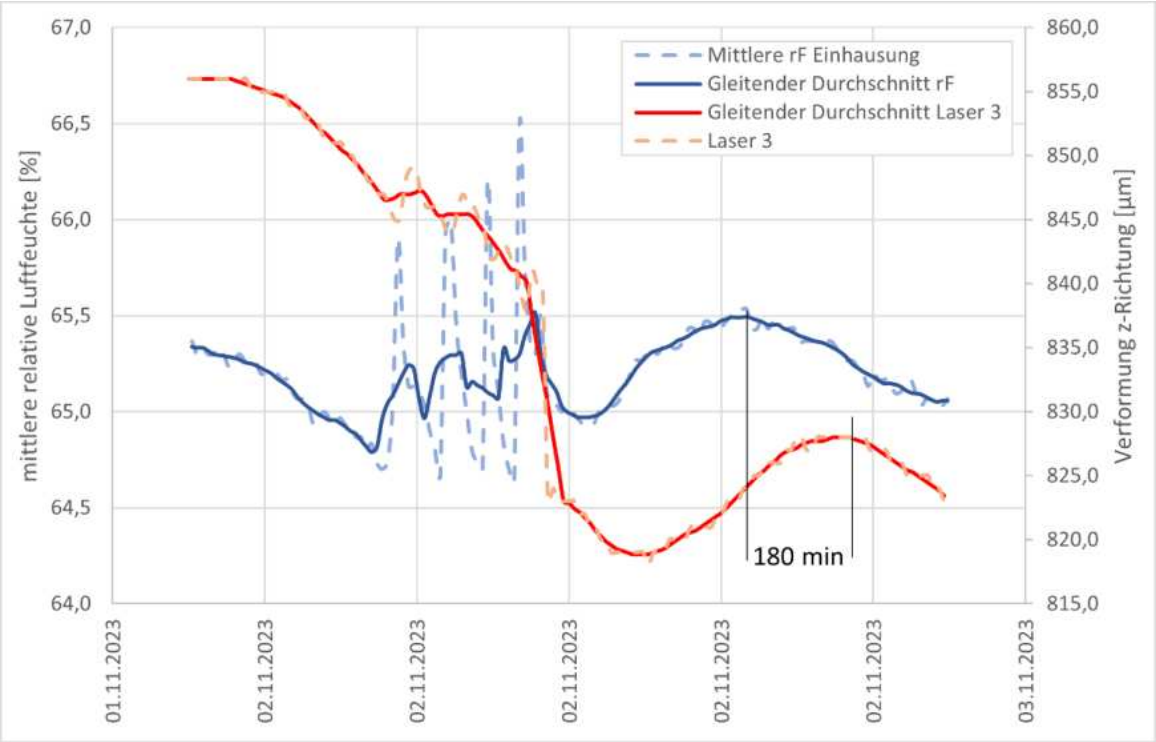

Abbildung 4-19: Mittlere relative Luftfeuchte in der Einhausung und Verformung der Tafel aus der Tafelebene heraus am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 3. Die r.F. hat ihren Hochpunkt um 17:36 Uhr, die Verformung ihr Plateau zwischen 20:00 und 21:20 Uhr. Zur Verdeutlichung ist jeweils der gleitende Durchschnitt (Breite 1 h) hervorgehoben. (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Auch bei den Temperaturen treten teils kurzfristige Schwankungen auf. Da deren Einfluss jedoch sehr gering sind, scheint es, dass die Verformungen der Holztafel dem Verlauf der r.F. und nicht der Temperatur folgen.

4.1.4.5 Holzfeuchtemessung

In Abbildung 4-20 sind die seit Installation der Datenlogger aufgezeichneten elektrischen Widerstände des Tafelbilds (ab 22.12.2022) und der Probekörper (ab 30.05.2023) zusammengefasst. In beiden Fällen kam es ab dem 30.05.2023 zu starken Störungen der Messung durch elektromagnetische Felder in der Einhausung. Die Störungen treten auf, da die Kabel wie Antennen funktionieren. Da die Messströme aufgrund der sehr hohen Widerstände sehr gering sind, lassen sie sich sehr leicht beeinflussen. Bei den Probekörpern konnten diese Störungen am 04.10.2023 behoben werden, am Tafelbild konnte nur durch Abschaltung sämtlicher Messtechnik in der Einhausung eine Verbesserung erzielt werden. Um hier zumindest einige Messpunkte zu erhalten, wurde periodisch die Messtechnik abgeschaltet und eine Messung des elektrischen Widerstands durchgeführt. Dies sind die vereinzelten Datenpunkte oben rechts im Diagramm. Die entsprechenden Daten finden sich in Tabelle 4-5.

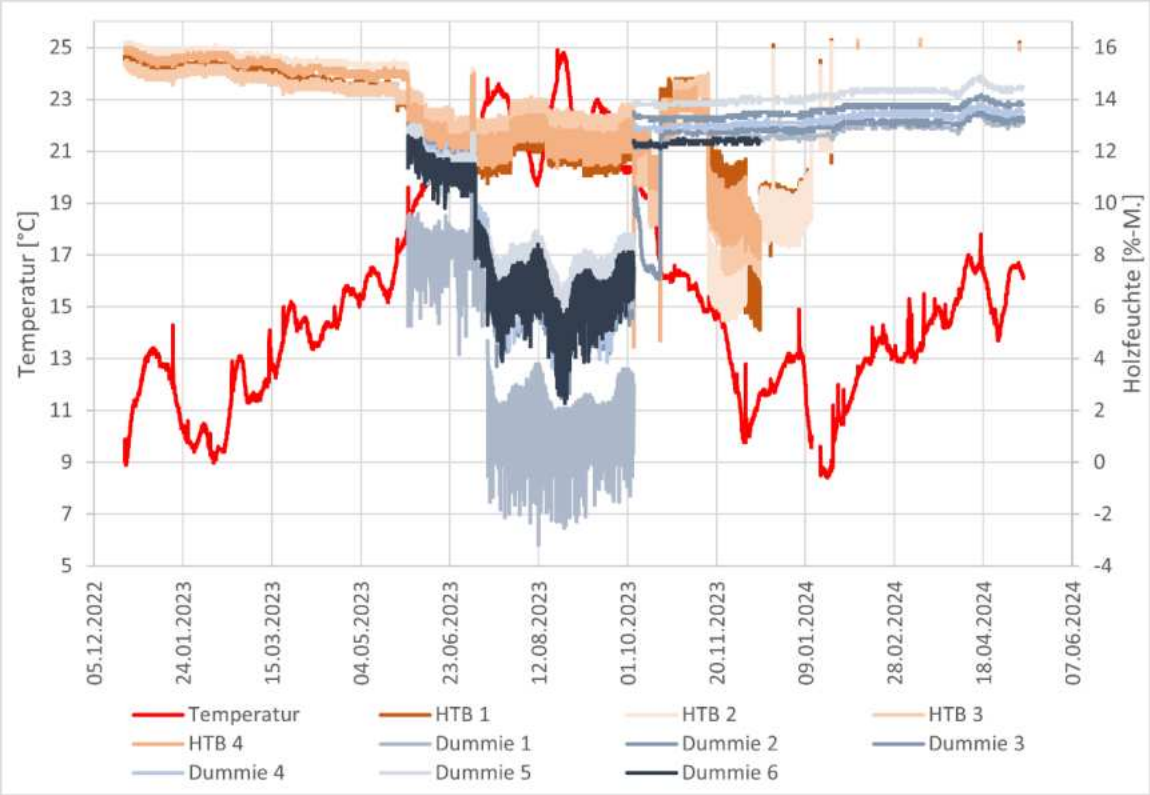

Abbildung 4-20: Relative Luftfeuchte und Messdaten der Holzfeuchte der Probekörper („Dummies“) und des Holztafelgemäldes (Grafik: A. Fröhlich, TUM).

Die starke Störung der elektrischen Widerstandsmessungen an den Probekörpern in der Einhausung haben ein Eingreifen erforderlich gemacht. Als mögliche Störquellen kommen aufgrund der geringen Messströme auch kleinere elektromagnetische Felder, wie sie beispielweise von Kabeln, Netzgeräten oder Gleichrichtern erzeugt werden, in Frage. Aufgrund der Vielzahl an strombetriebenen Komponenten gestaltete sich die Fehlersuche als sehr zeitintensiv. Das Auftreten der Störungen fiel mit dem Umbau des Messsystems am 30.05.2023 zusammen, sodass besonders die neuen Geräte überprüft werden mussten. Aber auch die Baumaßnahmen im Umfeld der Sakristei konnten nicht als Ursache ausgeschlossen werden. Das Abfallen der Störung während eines baustellenbedingten Stromausfalls am 05. und 06.07.2023 deutete auf ein ans Stromnetz angeschlossenes Gerät als Störquelle hin. Daraufhin wurden in den folgenden Wochen die Probekörper repositioniert (14.07.23), verschiedene Geräte vorübergehend abgeschaltet und schließlich die Waage zur gravimetrischen Feuchtemessung mitsamt zugehörigem Mess-PC (bzw. deren Netzteile) als Störquellen erkannt. Diese wurde umgehend entfernt und außerhalb der Einhausung in der Sakristei aufgestellt.

Tabelle 4-5: Messwerte der Holzfeuchtemessung am Holztafelbild bei ausgeschalteter Elektronik in der Einhausung (Angaben in %).

Datum	Elektrode 1	Elektrode 2	Elektrode 3	Elektrode 4
30.01.2024 15:00	15,9	15,9	15,6	15,7
07.02.2024 12:00	16,1	16,3	16,3	16,0
15.02.2024 15:00	14,9	15,2	14,4	14,4
16.02.2024 11:00	16,2	16,1	15,8	16,0
21.02.2024 11:00	16,3	16,2	15,9	16,1
28.02.2024 11:00	16,2	16,3	15,9	16,0
13.03.2024 13:00	16,3	16,1	16,2	16,1
21.03.2024 16:00	16,2	16,1	15,7	15,9
27.03.2024 11:00	16,0	16,0	15,7	16,0
04.04.2024 11:00	16,1	16,0	15,7	16,0
08.05.2024 12:00	16,2	15,9	16,1	15,9

Beim Vergleich der Holzfeuchtemessungen in Abbildung 4-20 fällt auf, dass sowohl die Messwerte an den Probekörpern untereinander eng beieinander liegen als auch die der Holztafel. Zwischen den beiden Gruppen liegt jedoch ein Unterschied von ca. 2 %-Punkten, wobei die Holztafel die höheren Werte aufweist. Zieht man die Erkenntnisse aus Abschnitt 4.1.3.2 hinzu, sollten eigentlich die Probekörper die höhere Holzfeuchte aufweisen, da sie am Boden stehend einer höheren r.F. ausgesetzt waren. Hinzu kommt, dass sich die Ausgleichsfeuchte durch die Holzalterung tendenziell verringert (van Grevenstein et al., 2014, S. 31). Andererseits kann Insektenfraß zu einer verstärkten Wasseraufnahme führen (Sandu et al., 2003, S. 88).

Vor und nach dem ersten Auffeuchtungsschritt von 65 – 70 % r.F. wurden in der Nähe der jeweiligen Elektroden (aus Tabelle 4-5) zusätzlich mit dem *testo*-Handgerät Messungen durchgeführt (s. Tabelle 4-6). Das Gerät zeigte zwischen beiden Messungen nur eine sehr geringe Veränderung der Feuchtigkeit an; an Messstelle 2 sogar einen niedrigeren Wert. Verglichen mit den Werten der Einschraubelektroden vom selben Tag, zeigt sich, dass aufgrund der oberflächlichen Messung wesentlich niedrigere Werte angezeigt werden. Darüber hinaus wurden am 17.01.2024 die Messungen an den 34 Messstellen aus der Vorprojektphase wiederholt und mit den alten Werten verglichen. Hier zeigte sich, dass die Werte in allen Bereichen anstiegen. Hierbei muss jedoch erwähnt werden, dass die Messungen von einer anderen Person als in der Vorprojektphase durchgeführt wurden. Neben den bereits eingangs genannten Schwierigkeiten bei der korrekten Ermittlung der Holzfeuchte mit dieser Methode, kommt hinzu, dass hier auch der Einstichwinkel und der ausgeübte Druck Auswirkungen auf die Messung haben und diese personenabhängig sind. Diese Methode kann daher für die genaue Überprüfung des Feuchtegehalts des Holzes nicht empfohlen werden. Erste Hinweise hingegen können bei größeren Schwankungen wahrgenommen werden.

Tabelle 4-6: Referenzmessungen im Bereich der Einschraubelektroden mittels Holzfeuchte-Handmessgerät (Angaben in %).

Datum	Messstelle 1	Messstelle 2	Messstelle 3	Messstelle 4
23.01.2024 14:30	11,4	11,3	11,6	11,6
21.02.2024 10:00	11,8	11,2	12,1	11,6

4.1.4.6 Opto-technisches Monitoring

Da die bemalte Vorderseite stark reflektierte und Messstörungen am *Faro Focus S 350* der Firma *FARO* induzierte, wurde für die Auswertung nur die Rückseite des Tafelgemäldes herangezogen. Anhand der Punktwolkenvergleiches konnten die Bereiche mit den größten Bewegungen identifiziert werden. Diese lagen bei annähernd 10 mm und wurden auf der rechten Seite detektiert (s. Abbildung 4-21).

Im Projektverlauf wurde die Rückseite des Tafelgemäldes mit Sensorik für das Monitoring bestückt. Die Installationen erschwerten das laserscanbasierte Verformungsmonitoring über die gesamte Tafel während des Projekts (das in der Falschfarbendarstellung rot erscheinende Sensorequipment ist von der Auswertung ausgenommen).

Anhand der Vergleiche der Scans der Vorder- und der Rückseite konnte der Effekt der Auffeuchtungsversuche an beiden Seiten des Tafelgemäldes eindeutig nachgewiesen werden, wie auch an der Spitze in der Mitte festgestellt werden (s. Abbildung 4-22). Die Verkabelung der Rückseite zur Vermessung des Tafelgemäldes führt zu einem starken Rauschen in den Daten. Damit ist die Interpretation nur bedingt möglich. Im Rahmen der Messgenauigkeit ist in den entsprechenden Bereichen von einer Bewegung von ca. 2 mm auszugehen. Diese Auswertung ist jedoch lediglich als Ergänzung zu den Ergebnissen der Streifenlichtscans an den Referenzpunkten zu sehen (s. Abschnitt 4.1.6.1).

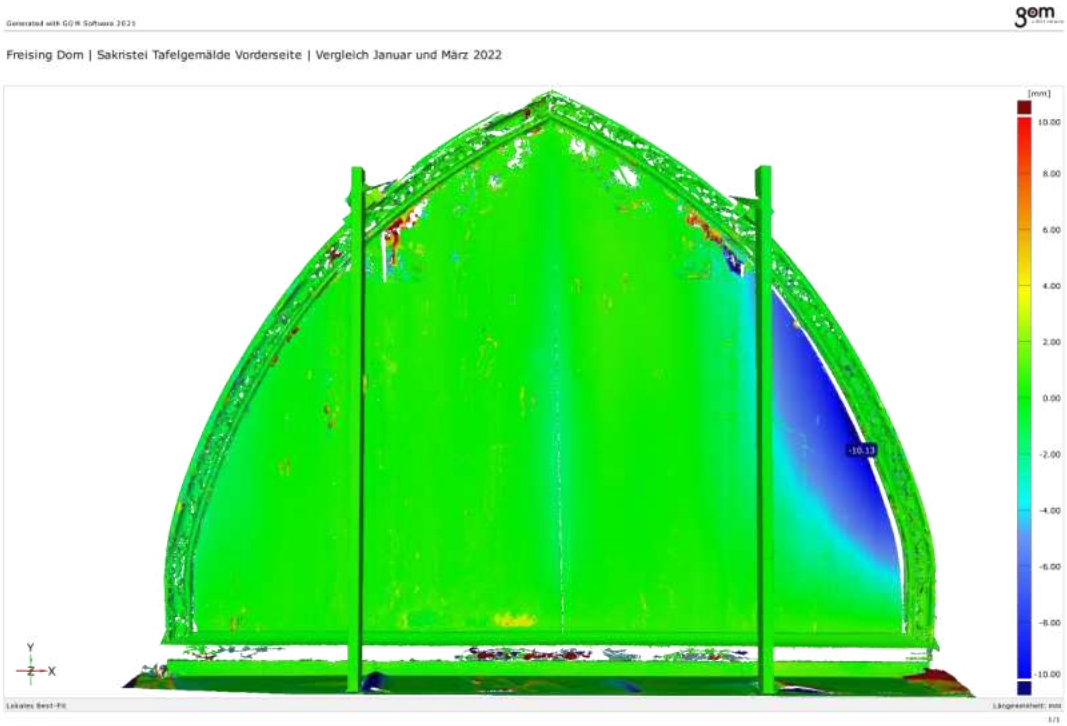

Abbildung 4-21: Vergleich der Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes (27.01.2022 mit 24.03.2022). Klimatisch bedingt kommt es in diesem Zeitraum zu einer maximalen Bewegung von 10 mm (Foto: L. Pallas, KDWT).

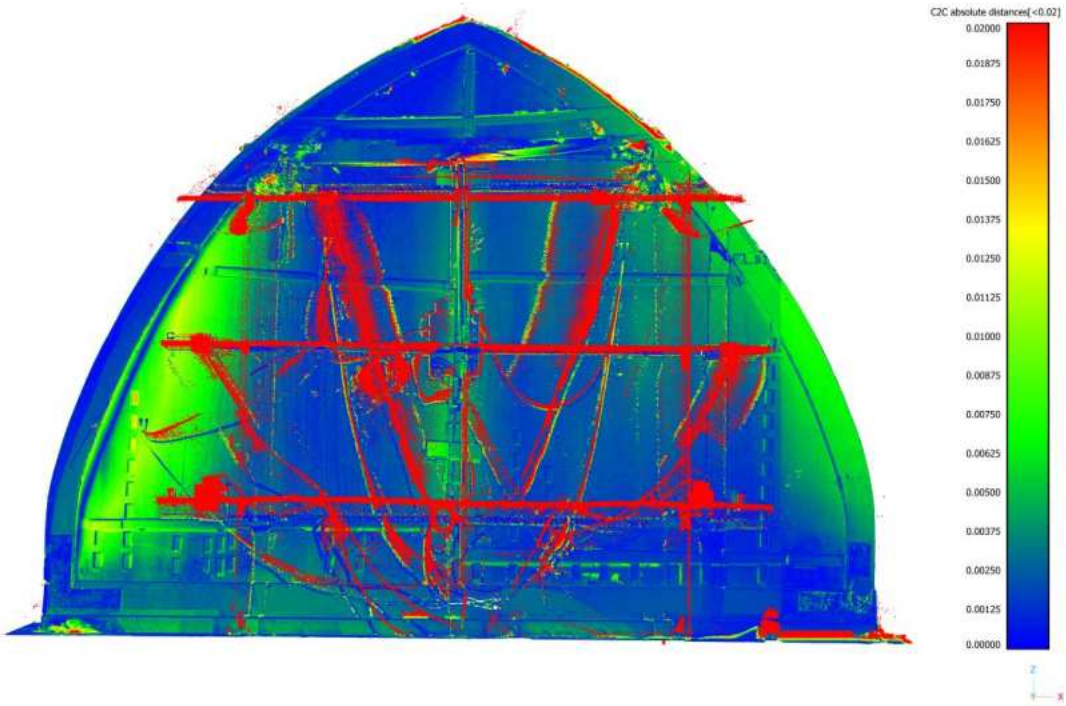

Abbildung 4-22: Vergleich der Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes im Vorzustand am 27.01.2022 mit Zustand zum Ende des Projektes am 24.11.2023 (ohne Auffeuchtungsversuch); (Foto: L. Pallas, KDWT).

4.1.5 Datenmanagement

Die Erfassung, Bearbeitung und Auswertung der Messdaten wurde von Anfang an dadurch erschwert, dass Messplattformen verschiedener Hersteller (*Ahlborn, Keyence, Scanntronik* u.v.m.) kombiniert werden mussten. Dies war dem Umstand geschuldet, dass Teile der Messtechnik schon vorhanden waren und teilweise mit anderen Methoden verglichen werden sollten. Herausforderungen äußerten sich zum einen in inkompatiblen Messintervallen, welche eine manuelle Nachbearbeitung großer Datenmengen nach sich zogen. Zum anderen erschwerten die unterschiedlichen Kommunikationsprotokolle und Dateiformate die Automatisierung der Datenspeicherung in einer Cloud. Durch den externen Dienstleister *Florian Lindner Design* konnte eine funktionierende Lösung entwickelt werden, die eine Echtzeit-Fernüberwachung ermöglicht und auch über das Projektende für das reduzierte Messsystem (Weiterführung nach Projektende s. 7.1.1) verwendet werden kann. Für zukünftige Projekte sollte jedoch dringend darauf geachtet werden, nur einen zentralen Datenlogger oder zumindest nur Systeme derselben (Software-) Plattform und abgestimmte Intervalle zu verwenden.

4.1.6 Malschichtmonitoring

Das Malschichtmonitoring diente insbesondere der frühzeitigen Erkennung neuer Schäden und der Beurteilung der Konservierbarkeit.

4.1.6.1 Streifenlichtscans

Tabelle 4-7 listet die Streifenlichtscans auf, die im Vorfeld und im Rahmen des Projektes durch das KDWT durchgeführt wurden. Mit dem Streifenlichtscanner wird eine hochauflö-

sende 3D-Punktwolke des definierten Bereichs generiert. Die Vergleiche von zwei Scans zeigen, wie sich die Oberflächen während des gewählten Zeitraums verändert haben. Üblicherweise wurden zwei aufeinanderfolgende Messungen miteinander verglichen, um den Effekt des kurzfristig zurückliegenden Klimas auf das Kunstwerk zu untersuchen. Die entsprechende Kurzbezeichnung ist in Spalte zwei abgebildet.

Tabelle 4-7: Übersicht der Messungen, die mit dem Streifenlichscanner durchgeführt wurden. Die Nummerierung der Vergleiche bezieht sich auf die Untersuchungen mit dem Streifenlichtscanner am Tafelgemälde. © KDWT

Nr.	Nr. Vergleich	Datum	Scans
1		14.07.2020	Referenzfläche 1 und 2
2	1	13.10.2020	Referenzfläche 1 und 2
3	2	10.12.2020	Referenzfläche 1 und 2
4	3	25.03.2021	Referenzfläche 1 und 2
5	4	08.07.2021	Referenzfläche 1 und 2
6	5	24.09.2021	Referenzfläche 1 und 2
Projektstart			
7	6	27.01.2022	Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Streifenlichtscanner
8	7	28.02.2022	Referenzfläche 1 und 2
9	8	24.03.2022	Referenzfläche 1 und 2 Gesamtscan des Tafelgemäldes mit Streifenlichtscanner
10	9	19./20. 05.2022	Referenzfläche 1, 2 und 3
11	10	13.06.2022	Referenzfläche 1, 2 und 3, Thermografie
12	11	24.08.2022	Referenzfläche 1, 2 und 3
13	12	12.12.2022	Referenzfläche 1, 2 und 3
14	13	20.02.2023	Referenzfläche 1, 2 und 3
15	14	13.03.2023	Referenzfläche 1, 2 und 3
16	15	30.05.2023	Referenzfläche 1, 2 und 3
17	16	20.06.2023	Referenzfläche 1, 2 und 3
18		03.-21.07.2023	Streifenlichtscans Untersuchung Probekörper im Klimaschrank (Set 3 unbehandelt)
19		24.07.-11.08.2023	Streifenlichtscans Untersuchung Probekörper im Klimaschrank (Set 2 behandelt)
20	17	22.08.2023	Referenzfläche 1, 2 und 3
21		07.-17.12.2023	Streifenlichtscans Untersuchung Probekörper im Klimaschrank (Set 3 unbehandelt) (Masterarbeit Koserog)
22	18	24.01.2024	Referenzfläche 1, 2 und 3, Probeplatten in der Einhausung (Set 1 unbehandelt)
23		30.01.2024	Referenzfläche 1, 2 und 3, Probeplatten in der Einhausung (Set 1 unbehandelt)
24	V1	15.02.204	Referenzfläche 1, 2 und 3, Probeplatten in der Einhausung (Set 1 unbehandelt)
25		20.-26.02.2024	Streifenlichtscans Untersuchung Probekörper im Klimaschrank (Set 3 unbehandelt) (Masterarbeit Koserog)
26	V2	16.04.2024	Referenzfläche 1, 2 und 3, Probeplatten in der Einhausung (Set 1 unbehandelt) Gesamtscan der Tafel mit FARO

Die Auswertung der Scans umfasst für die Flächen 1 und 2 jeweils 21 Reportseiten, für Fläche 3 15 Seiten und für die Auswertung der Versuche im Klimaschrank 130 Seiten (s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse). Dargestellt sind die Vergleiche der Scans im zeitlichen Verlauf. Damit konnte der Zeitraum mit der größten Bewegung eingegrenzt werden und mit den klimatischen Bedingungen in Bezug gesetzt werden. Die Bewegungen des Tafelgemäldes sind abhängig vom Raumklima. Die äußeren Schichten, also Vorder- und Rückseite, reagieren unmittelbar, die mittleren Schichten, also der Holzträger, reagieren mit zeitlichem Verzug. Im Materialverbund ist eine gewisse Trägheit zu erwarten, sodass die alleinige Analyse des Raumklimas immer nur Anhaltspunkte geben kann. Gleichzeitig wird mit den Streifenlichtmessungen immer nur der tagesaktuelle Zustand erfasst und die Reaktion auf das Raumklima kann somit

nur im Nachgang ausgewertet werden. Umso spannender ist es, anhand der Vergleiche die tatsächliche Änderung innerhalb des Tafelgemäldes dokumentieren zu können. Hinsichtlich der Taktung hat sich ein engmaschiges Monitoring im monatlichen Turnus als nützlich erwiesen. Denn damit lässt sich die Auswirkung einzelner klimatischer Ereignisse vom saisonalen Gleiten unterscheiden. Die Auswertung ist unterteilt in drei Abschnitte: die Untersuchung der Reaktion des Tafelgemäldes auf das in der Sakristei und in der Einhausung vorliegende Klima. Der Auffeuchtungsversuch, der Anfang 2024 durchgeführt wurde, wird separat ausgewertet. In Tabelle 4-8 sind die maximalen Bewegungen, die im zeitlichen Verlauf an den drei Referenzflächen aufgetreten sind, aufgelistet. Basierend auf den maximalen Bewegungen an den drei Referenzpositionen, erfolgte in einem ersten Schritt eine Bewertung der Zeiträume nach dem Ampelprinzip in gut (grün), mittel (gelb) und schlecht (rot). Hier zeigen sich bereits innerhalb des Tafelgemäldes unterschiedlich starke Reaktionen. So weist insbesondere Position 2 die größten Bewegungen auf, während in der Mitte des Tafelgemäldes die geringsten Änderungen auftreten (Position 1). Dies lässt sich auch anhand des konservatorischen Monitorings nachvollziehen.

Tabelle 4-8: Vergleichende Auswertung der maximalen Veränderung der Streifenlichtscans an den drei Referenzpositionen

Vergleichszeitraum gut mittel schlecht	Maximale Bewegung [mm]		
	Position 1	Position 2	Position 3
14.07.2020 – 13.10.2020	0,2	0,2	-
13.10.2020 – 10.12.2020	0,7	-1,2	-
10.12.2020 – 25.03.2021	-0,6	-1,4	-
25.03.2021 – 08.07.2021	1,4	6	-
08.07.2021 – 24.09.2021	-0,4	-1,4	-
24.09.2021 – 27.01.2022	-4,5	-15	-
27.01.2022 – 16.02.2022	-0,6 – 0,8	-3	-
16.02.2022 – 24.03.2022	-1,6 – 0,9	-5,2	-
24.03.2022 – 19.05.2022	3,5	15	-
19.05.2022 – 13.06.2022	1,0	5	-6,2
13.06.2022 – 24.08.2022	-0,6	2,1	-3
24.08.2022 – 12.12.2022	-1,0	2,1	-3
12.12.2022 – 20.02.2023	0,2	-0,4	0,8
20.02.2023 – 13.03.2023	0,2	-0,3	0,8
13.03.2023 – 30.05.2023	0,6	-0,2 – 0,2 Δ 0,4	0,5
30.05.2023 – 20.06.2023	-0,5	-0,7	1,1
20.06.2023 – 22.08.2023	- 0,5 – 0,5	2,5	-3
22.08.2023 – 24.01.2024	-0,6 – 0,5	1,4	-2
24.01.2024 – 30.01.2024	-0,6 – 0,5	1,8	-2
30.01.2024 – 15.02.2024	-0,4 – 0,2	0,2	0,8
15.02.2024 – 16.04.2024	0,5	2	-2
30.01.2024 – 16.04.2024	Δ 0,9	2,2	Δ 2,8
Zeiträume mit größter Bewegung			
24.03.2022 – 12.12.2022	6	25	-
19.05.2022 – 12.12.2022	-	-	-15

Die Zeit der Projektanbahnung wurde genutzt, um Voruntersuchungen hinsichtlich der Auswirkung des Raumklimas der Sakristei auf das Tafelgemälde zu machen (s. auch 4.1.3 Klimamonitoring). Dazu wurden neben der Erfassung des Mikroklimas auf der Vorder- und

Rückseite in regelmäßigen Abständen die Referenzflächen (Position 1 und 2) gescannt. Diese wurden mit den Erkenntnissen aus dem Projekt in der Rückschau hinsichtlich konservatorischer Aspekte analysiert. Aus den Scanvergleichen geht hervor, dass insbesondere die durch die Heizung in den Wintermonaten bedingte geringe r.F. in der Sakristei zu Veränderungen im Materialverbund führt. Zwischen März und Juli 2021 traten an Position 2 Abweichungen von bis zu 6 mm (Position 1: 1,4 mm) auf. Diese sind mit der Gegenbewegung aus dem trockenen Winter zu begründen. Im Zeitraum zwischen Juli 2020 und März 2021 traten an beiden Positionen nur geringe Abweichungen zum Vorzustand in beide Richtungen auf (absolute Bewegung Position 1: 1,5 mm; Position 2; 2,8 mm). Dementsprechend kann das Raumklima in diesem Zeitraum aus konservatorischer Sicht als geeignet beurteilt werden. In den Wintermonaten 2021 wurde das Raumklima jedoch mit einem Luftbefeuchter konditioniert. In der Winterperiode 2021/22 fand keine zusätzliche Befeuchtung statt. Dies hatte zu Folge, dass sich das Tafelgemälde aufgrund der geringen relativen Luftfeuchte unter 40 % r.F. stark verformte (s. Abbildung 2-6).

In der Winterperiode 2023/24 wurde eine der Referenzplatten aus der klimatisch konditionierten Einhausung in die beheizte Sakristei verlagert, um u. a. deren Verformungsreaktion unter den veränderten Klimabedingungen mittels Streifenlichtscans zu erfassen. Allein zwischen Februar und April wies diese eine Änderung von 0,34 mm auf (s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse, 00-Auswertung Streifenlichtscans, S. 73). Die direkte Reaktion auf die Auslagerung von Einhausungs- zu Sakristeiklima konnte aus technischen Gründen (Defekt des Scanners) leider nicht erfasst werden, da die Scans erst einige Wochen nach der Veränderung des Standorts durchgeführt wurden.

Mit der Fertigstellung der Einhausung und dem damit verbundenen konstanten Raumklima (Feuchtekorridor bei 65 % r.F.) stabilisiert sich das Raumklima ine einem höheren r.F. Bereich und somit startet die Auffeuchtung des Tafelgemäldes unmittelbar. Diese dauert von März bis Dezember 2022 an. Insgesamt finden über diesen Zeitraum Bewegungen von ca. 25 mm (Position 2) (Position 1: 6 mm) in der z-Richtung statt (s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse, 00-Auswertung Streifenlichtscans, S. 39, bzw. S. 62).

Basierend auf den Ergebnissen des Laserscanvergleichs wurde die Position 3 hinzugenommen (Start Mai 2022). Hier konnte ebenfalls dokumentiert werden, wie sich das Tafelgemälde durch das stabile Raumklima sukzessive entspannte und wieder in Richtung Ursprungsgröße ausdehnte. An Position 3 wurde mit -15 mm die größte Bewegung aus der Ebene heraus im Zeitraum von 19.05. – 12.12.2022 erfasst (s. Abbildung 3-14, s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse, 00-Auswertung Streifenlichtscans, S. 16, Tabelle 3.2).

Ähnlich wie in der Simulation und im Klimaschrank zu beobachten (s. Abschnitte 4.2.4 und 4.2.5), erfolgte an allen Referenzflächen die größte Reaktion auf das Auffeuchten unmittelbar nach Änderung der Klimabedingungen und ließ sukzessive nach. Dies zeigt der Vergleich

zwischen März und Mai 2022 (Position 1: 3,5 mm; Position 2: 15 mm) bzw. zwischen Mai und Juni 2022: -6,2 mm, Position 3). Die Auswertung der Vergleiche von Oktober 2022 mit Dezember 2022 wies mit max. 3 mm Abweichung die höchsten Änderungen auf. Im Zeitraum zwischen Februar und März 2023 wies das Tafelgemälde an den Messstellen nur noch geringe Veränderungen (Position 1: 0,2 mm, Position 2: -0,3 mm Position 3: 0,8 mm) auf, die auf ein Annähern an die Ausgleichsfeuchte hindeuten.

Im Jahr 2023 ist die r.F. weitgehend konstant, die Temperatur entspricht dem Jahresgang; wobei sich saisonal bedingte Einflüsse auch in der Einhausung auswirken. Zudem führte das Abstellen der Heizung Anfang Mai automatisch zu einer Erhöhung der relativen Feuchte, sodass die Scanvergleiche Ergebnisse aus einem dynamischen Prozess darstellen, der nicht immer exakt beeinflussbar und vorhersehbar ist. Hier sind maximale Bewegungen von ca. 2 – 3 mm festzustellen. Auffallend sind Bewegungen, die an allen drei Positionen zwischen Juni und August 2023 festgestellt werden können (Position 1: 0,5 mm in beide Richtungen, Position 2: +2,2 mm, Position 3: -2,5 mm). Ergebnisse zum Auffeuchtungsversuch s. 4.4.

4.1.6.2 Langzeit-Fotografie

Aufgrund der nur sehr geringen Bewegungen des Tafelgemäldes in konstantem Klima (nach dem Bau der Einhausung), konnten an den fotografisch erfassten Referenzflächen keine augenscheinlichen Veränderungen der Malschichtschollen erfasst werden. Hinzu kommt, dass es aufgrund der örtlichen Begebenheiten nicht möglich war, die Kamera von den Erschütterungen im Raum abzukoppeln, weshalb sich der Bildausschnitt unabhängig von den klimatischen Bedingungen immer wieder leicht veränderte. Außerdem kam es mehrfach zu Technikausfällen, weshalb die Aufnahmen neu gestartet werden mussten und ebenfalls leichte Änderungen des Bildausschnitts zur Folge hatten. Eine pixelbasierte Auswertung der Aufnahmen konnte daher nicht durchgeführt werden.

4.1.6.3 Konservatorisches Monitoring

Im Rahmen der konservatorischen Überprüfung zeigte sich, dass seit Einbau der Einhausung keine neuen Schäden und Verluste an der Malschicht aufgetreten sind. Weitere Ergebnisse s. 6.3.

4.1.7 Korrosivitäts- und Luftqualitätsmonitoring

In Innenräumen wird die Korrosivität von Metallen hauptsächlich durch das Vorhandensein gasförmiger Schadstoffe und die Temperatur/relative Luftfeuchtigkeit bestimmt. Diese kann basierend auf der Korrosionsrate, d. h. dem Metallverlust pro Zeiteinheit kategorisiert werden. Für die Anwendung im Innenraum stellt die Norm ISO 11844-1[76] die Korrosionsrate und die IC-Korrosivitätsklassen bereit, die von IC1 (sehr geringe Korrosivität) bis IC5 (sehr hohe Korrosivität) reichen (s. Tabelle 4-9).[77] Im vorliegenden Anwendungsfall misst und registriert der

[76] ISO 11844-1: Corrosion of metals and alloys – classification of low corrosivity of indoor atmospheres – Part 1: determination and estimation of indoor corrosivity, International Organization of Standardization, Genève, Suisse, 2006.
[77] Die korrosionsbeschleunigenden Schadstoffe können unterschiedlicher Natur sein (u.a. organische Säuren, H2S, NH 3) und hängen von der betrachteten Anwendung und/oder Lokalisierung ab.

iAIR-Sensor die zeitliche Veränderung des elektrischen Widerstands einer dünnen Leiterbahn (Kupfer-Foliensensor), die auf einem isolierenden Untergrund aufgebracht ist. Aus der korrosionsbedingten Geometrieänderung dieses metallischen Elements (d. h. Verdünnung) lässt sich der Metalldickenverlust und damit die Korrosivitätsklasse IC berechnen.

Tabelle 4-9: Klassifizierung der Korrosivität von Innenraumatmosphären auf der Basis von Messungen der Korrosionsgeschwindigkeit (ISO 11844-1).

Korrosivitätsklasse in Räumen		**Korrosionsgeschwindigkeit r_{corr}** [mg/(m²*a)]
IC 1	Unbedeutende Korrosivität	$r_{corr} \leq 50$
IC 2	Geringe Korrosivität	$50 < r_{corr} \leq 200$
IC 3	Mäßige Korrosivität	$200 < r_{corr} \leq 900$
IC 4	Starke Korrosivität	$900 < r_{corr} \leq 2000$
IC 5	Sehr starke Korrosivität	$2000 < r_{corr} \leq 5000$

Die Bestimmung der Korrosivität der Innenraumatmosphäre am Fallbeispiel beruht auf Messungen der korrosiven Belastung des Kupfersensors über eine Dauer von 14 Monaten an drei Messstellen. Für alle Kupfersensoren wurde aus dem Massenverlust oder der Massenzunahme (s. Tabelle 4-9) nach Tabelle 4-10 die Korrosivitätsklasse in Räumen bestimmt. Im Mittel ergibt sich über den gemessenen Messzeitraum für alle Messpunkte (Einhausung (oben/unten), Sakristei) eine unbedeutende Korrosionsrate von weniger als 0,015 nm/Tag (s. Abbildung 4-23). Eine negative Entwicklung der Luftgüte in der Einhausung durch die bisherigen Maßnahmen der Klimatisierung des gefassten Tafelbildes ist damit nicht gegeben. Dementsprechend bestand keine Notwendigkeit für emissionsmindernde Maßnahmen oder ergänzende feinanalytische Labormessungen korrosionsrelevanter Schadstoffe (u. a. Essigsäure, Ameisensäure, Acetaldehyd und Formaldehyd).

Tabelle 4-10: Ermittlung der Korrosivitätsklasse anhand des Metalldickenverlusts pro Jahr (a) und Tag (d).

Bezug zur Korrosivitätsklasse	**Korrosions-geschwindigkeit**	**Metalldickenverlust (Cu)**	
	mg/(m²*a)	nm/a	nm/d
IC1	50	5,6	0,015
IC2	200	22,3	0,061
IC3	900	100,4	0,275
IC4	2000	223,2	0,612
IC5	5000	558,0	1,529

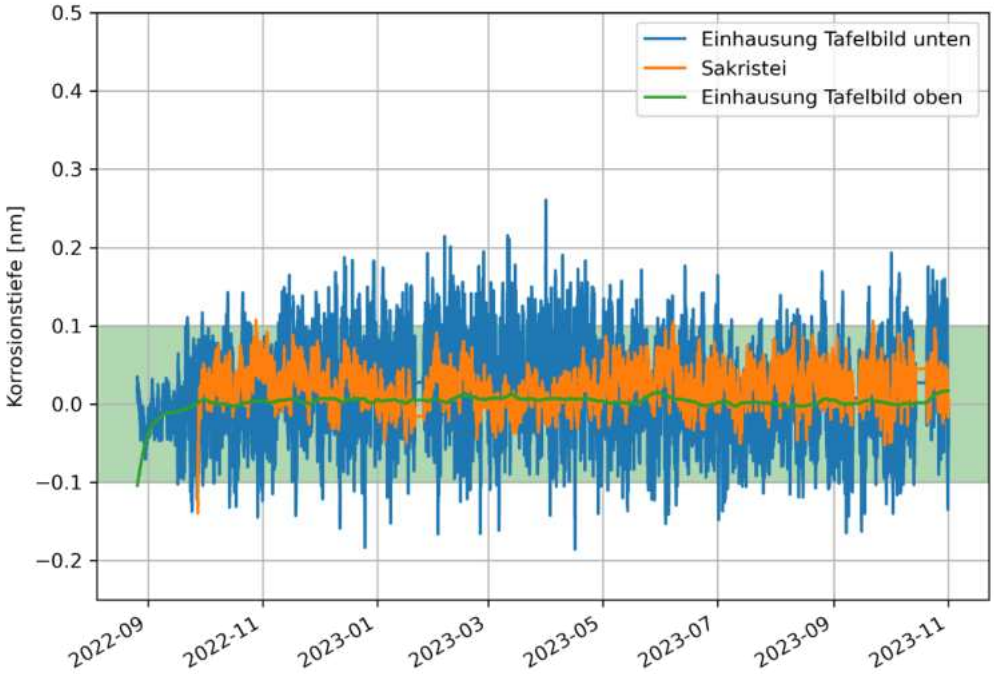

Abbildung 4-23: Bestimmung der Korrosionsrate in der Testumgebung über einen Zeitraum von 14 Monaten (Einhausung)/13 Monaten (Sakristei). Im Mittel ergibt sich eine unbedeutende Korrosionsrate von weniger als 0,015 nm/Tag. Der grün hinterleget Bereich zeigt die Obergrenze der Korrosionsklasse IC1/Woche. (Grafik: E. Spiegel, CFA).

Der hier eingesetzte Korrosionssensor kann durch empfindlich dünne Kupferschichten und die Kompensation von Temperaturschwankungen sehr geringe Metallverluste im Nanometerbereich erkennen (typisch weniger als 0,1 nm). Der Nachweis einer sehr niedrigen Korrosionsrate, typischerweise 0,015 nm/Tag über einen Zeitraum von 10 Tagen, berechtigt zur Einordnung der Korrosion in die sehr niedrige Korrosivitätsklasse IC1 (s. Tabelle 4-10).

4.2 Ergebnisse der hygrothermischen Simulation und Klimaschrankversuche

Die nachfolgend vorgestellten Ergebnisse flossen in die Planung der Auffeuchtungsschritte am Tafelbild ein und waren maßgeblich für die Beurteilung der zu erwartenden Risiken.

4.2.1 Herstellung von Probekörpern

Insgesamt konnte die Herstellung und Beschichtung der hölzernen Probekörper und Glasfritten planmäßig durchgeführt werden. Generell ist beim Zuschnitt und der Herstellung darauf zu achten, dass möglichst genau und in stabilem Umgebungsklima gearbeitet wird, um ein Verziehen der Zuschnitte zu vermeiden. Die Verleimung mit proteinischen Klebstoffen bedarf einer gründlichen Vorbereitung der Verleimutensilien (z. B. Pinsel, Schwämmchen zur Abnahme potenziellen Überschusses, Hostaphanfolie, Zulagen, Zwingen oder Verleim-Apparat); eine trockene Probeleimung (ohne Leimauftrag) und personelle Unterstützung im Handling ist sinnvoll. Warme Umgebungstemperaturen oder das Anwärmen der Leimflächen können die Offenzeit zusätzlich erhöhen. Beim Auftrag der Leimlösche, Grundierungs-, Farb- und Firnisschichten ist ein möglichst standardisierter Ablauf mit vergleichbaren Auftragsmengen

und -techniken empfohlen. Es kann sich für eine gleichmäßige Schichtdicke bewähren, eine größere Musterplatte zu beschichten und diese nach ihrer Trocknung in Einzelplatten aufzuschneiden. Weiterhin sind ausreichende Trocknungszeiten einzuplanen und einzuhalten; insbesondere bei Ölfarbschichten.
Die Vorschädigung der hölzernen Probekörper für die Klimaschrankversuche verlief nach anfänglichen Wartezeiten bis zum Wachstum ebenfalls erfolgreich. Zu beachten ist die permanente Verfärbung der getesteten Oberflächen durch die Sporensuspension. Weiterhin der Abbau der Stabilität und die leichte Craqueléebildung mit einer Ablösung der Malschicht in den Randbereichen. Die Reinigung des mikrobiellen Befalls funktionierte gut; auch bei der späteren Lagerung keimte dieser nicht erneut aus. Die Lagerung und Archivierung erfolgt unter regelmäßigen Kontrollen in dichten Kunststoffboxen. Die Beschichtung der Glasfritten verlief ebenfalls gut; anfängliche Bedenken einer schlechten Benetzung durch die historischen Grundierungs- und Malmaterialien bewahrheiteten sich nicht.

4.2.2 Baukonstruktives/bauphysikalisches Modell

Wie oben beschrieben, sollte als eine mögliche Lösungsstrategie für die dauerhafte Stabilisierung des Tafelgemäldes der feucht-kühle Luftspalt der ursprünglichen Einbausituation nachgebildet werden. Die Versuche zu der auf dem bauphysikalischen Modell basierenden Rückseitenbefeuchtung (Kocan, 2024) haben besonders die Eignung gesättigter Salzlösungen hervorgehoben. Die eingesetzte NaCl-Lösung konnte sehr zuverlässig die gewünschte r.F. aufrechterhalten, obwohl zeitweise versehentlich zu viel Wasser zugeführt wurde. Die in den Kleinversuchen eingesetzte Wasserzufuhr mittels handelsüblicher Infusionsbeutel und Präzisionstropfenregler ließ sich nicht gering genug einstellen und führte zu viel Wasser zu. Daher wurde eine elektronische, automatisierte Wasserzufuhr auf Basis der Arduino-Plattform entwickelt. Infolgedessen stieg bei den Versuchsaufbauten mit der Lehmbauplatte und dem Textil die r.F. auf 100 %. Die Salzlösung konnte diesen Überschuss gut aufnehmen, während beim Textil flüssiges Wasser im Behälter stand. Die Lehmbauplatte konnte aufgrund ihrer höheren Puffermasse zwar den Großteil des Wassers aufnehmen, doch auch hier kam es zu Tauwasserausfall. Sowohl beim Textil als auch bei der Lehmbauplatte kam es in der Folge zu Schimmelwachstum, bevor die r.F. langsam wieder absank (Kocan 2024). In einem geeigneten Aufbau wird der Lehmbauplatte ein gutes Potential zur Pufferung zugesprochen – ebenso wie anderen mineralischen, hygroskopischen Materialien wie Kalkputz. Textilien werden als eher ungeeignet eingestuft. Durch ein geeignetes hydrophobes Material (PE oder PP) für den Salzlösungsbehälter kann zudem das Kriechen des Salzes verhindert werden. Auch die Wahl des Salzes hat einen Einfluss auf die Kriechneigung. In diesem Projekt wurden einfache Lebensmittelbehälter aus durchsichtigem Kunststoff (PE) und NaCl für die Salzlösung verwendet. Auf eine mechanische Luftumwälzung wurde aufgrund des sehr kleinen Luftvolumens verzichtet.

4.2.3 Bestimmung Materialkenndaten

Die Proben *der Glasfritten* wurden in den Laboren des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Holzkirchen vermessen, um nach (s. DIN EN ISO 7783, 2012) die Wasserdampfdurchlässigkeit zu bestimmen. Die Ergebnisse der Messungen finden sich in Tabelle 3.2.1. Zugehörigen Messprotokolle s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse.

Tabelle 4-11: Auflistung der in der Sammlung befindlichen Materialien und Materialkombinationen und Anforderungen an das Raumklima nach unterschiedlichen Literaturangaben.

Probe Nr.	Probenbezeichnung	Prüfklima	Diffusionsäquivalente Luftschichtdicke s_d [m]	
			Einzelwerte*	Mittelwert
F562_A1 **F562_A2** **F562_A3**	„Aufbau Vorderseite VS“	23 °C 0 - 50 % r.F.	1,15 1,09 1,18	1,14
F562_A4 **F562_A5** **F562_A6**		23 °C 50 - 93 % r.F.	0,69 0,65 0,62	0,65
F562_B1 **F562_B2** **F562_B3**	„Aufbau Rückseite RS“	23 °C 0 - 50 % r.F.	0,29 0,25 0,26	0,27
F562_B4 **F562_B5** **F562_B6**		23 °C 50 - 93 % r.F.	0,11 0,06 0,19	0,12
F562_C1 **F562_C2** **F562_C3**	**„Aufbau Firnis SD“**	23 °C 0 - 50 % r.F.	1,99 1,99 1,88	1,95
F562_C1 **F562_C2** **F562_C3**		23 °C 50 - 93 % r.F.	0,57 0,56 0,53	0,55

*) Ergebnisse nach Abzug des S_d-Wertes der Nullprobe (Glasfritte)

4.2.4 Hygrothermische Simulation mit *WUFI®*

Aus der Klimaanalyse wird bereits der klimastabilisierende Effekt, den die Einhausung mit sich bringt, deutlich. Inwieweit sich das stabile Raumklima im Vergleich zum bisher in der Sakristei vorliegenden Klima auf das Tafelgemälde auswirkt, kann mit der hygrothermischen Simulation gezeigt werden. Um belastbare Ergebnisse zu erhalten, war die Ermittlung der Materialkenndaten des Tafelgemäldes notwendig.

4.2.4.1 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde

Um die Auswirkungen des bestehenden Raumklimas in der Sakristei auf das Tafelgemälde zu untersuchen, wurden die dort gemessenen Klimadaten als Eingabedaten für das Modell verwendet.

Abbildung 4-24 zeigt die berechneten Feuchteverläufe innerhalb des Materialverbunds an sechs Positionen:

- Firnis – pink
- Malschicht (inklusive Grundierung) – lila
- Fichte innen am Übergang zur Bildschicht – violett
- Fichte in der Mitte des Holzträgers – hellblau
- Fichte außen, am Übergang zum Leinölfirnis – blau
- Leinölfirnis (Holzüberzug) – dunkelblau

Abbildung 4-24 bildet die Reaktion des Materialverbunds über den gesamten Zeitraum hinsichtlich der relativen Feuchte ab. Die Temperatur ist in allen Schichten gleich und ist deshalb nicht mit dargestellt. Die relative Feuchte zeigt innerhalb der einzelnen Schichten nur geringe Abweichungen auf. Zwischen Leinölfirnis und Firnis der Bildvorderseite liegt im Mittel ein Gradient von 1,7 % r.F. vor (Maximum: 10,0 % r.F. am 01.04.2022). Die kurzfristigen Schwankungen des Raumklimas sind auch in der Malschicht klar erkennbar. Insgesamt stellen sich jedoch nur geringe Abweichungen der relativen Feuchte in der Malschicht ein.

Die geringen Gradienten innerhalb des Materialverbunds deuten darauf hin, dass insbesondere die langanhaltenden Trockenzeiten unterhalb von 60-65 % r.F. verantwortlich für die Schäden am Objekt sind. Von Mitte Oktober bis Mitte April 2022 liegen die Werte mit einer kurzen Ausnahme unter 60 % r.F.

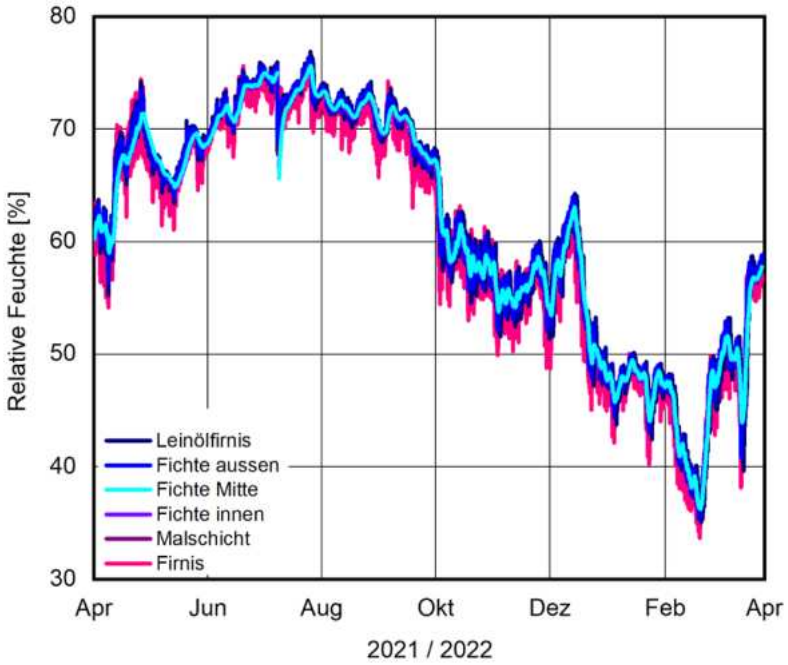

Abbildung 4-24: Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemälde als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 15.4. 2021 – 14.4.2022 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP).

4.2.4.2 Simulation der Auswirkungen des Raumklimas in der Einhausung auf das Tafelgemälde

Die Ergebnisse der Simulation sind in Abbildung 4-25 zu sehen. Wie bereits bei der Simulation des Raumklimas der Sakristei (Abbildung 4-24), liegen auch mit Einhausung innerhalb des Materialverbunds zu vernachlässigende Schwankungen der Temperatur, sowie geringe Schwankungen der relativen Feuchte vor. Zwischen Leinölfirnis und Firnis der Bildvorderseite liegt hier im Mittel ein Gradient von 1,9 % r.F. vor, wobei die maximalen Werte nur bei 3,8 % r.F. sind. Die Werte liegen in der Holzschicht im Mittel bei 65,9 % r.F.

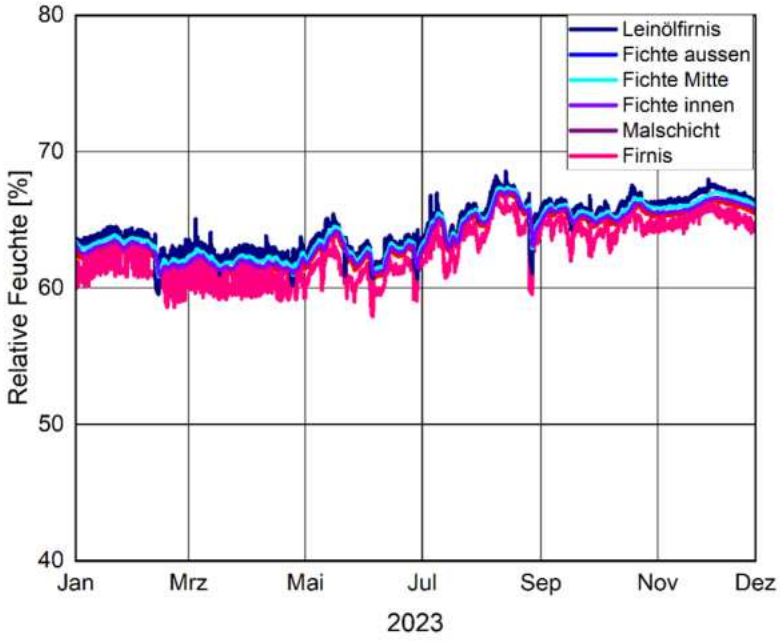

Abbildung 4-25: Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Einhausung vorliegende Raumklima vom 1.1 .– 1.12.2023 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP).

4.2.4.3 Simulation der Klimaschrankversuche

Abbildung 4-26 zeigt die Reaktion in den einzelnen Schichten auf die Luftfeuchteänderung von 80 % auf 34 % r.F. Hier wird die unterschiedliche Reaktion der einzelnen Schichten auf die neuen klimatischen Bedingungen sichtbar. Die beiden äußeren Schichten reagieren unmittelbar auf die Änderung der relativen Feuchte. Da aufgrund des Diffusionswiderstandes der Malschicht aus den unteren Schichten weniger Feuchte nachtransportiert wird, sinkt die relative Feuchte im Firnis auf der Malschicht schneller ab als im Leinölfirnis (Rückseite des Tafelgemäldes). Der an der Malschicht angrenzende Teil des Holzes („Fichte innen“) und Holztafelmitte („Fichte Mitte“) zeigt die stärkste Pufferung, d.h. langsamste Anpassung an den Feuchtesprung im Materialverbund. Innerhalb eines Tages sinkt die relative Feuchte dort nur um rund 20 % r.F. ab. Dadurch treten insbesondere innerhalb des Trägers Feuchtedifferenzen von über 25 % r.F. auf. Ein Angleichen der Feuchteverhältnisse ist nach ca. sechs Tagen erreicht. Diese Beobachtung entspricht den Auswertungen der Streifenlichtscans, bei denen in den ersten fünf Tagen die größte Verformung stattfindet.

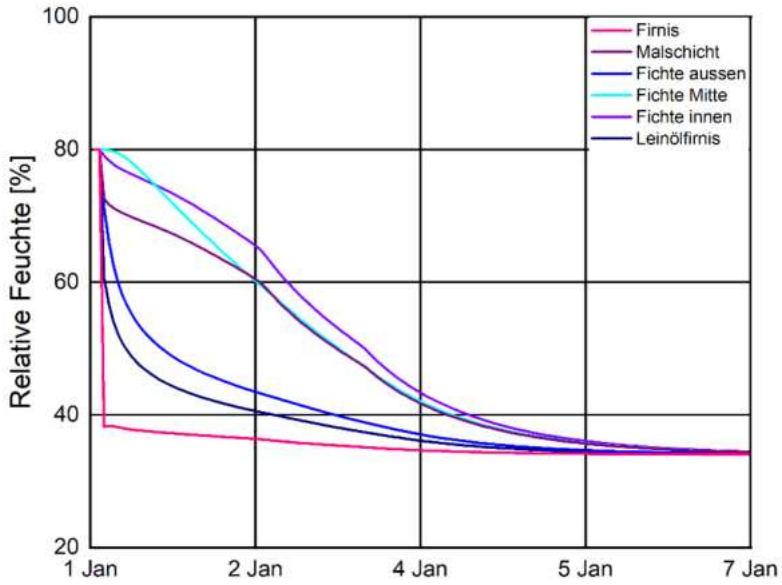

Abbildung 4-26: Simulierte Feuchteverteilung im Materialverbund der Probetafel beim Klimaschrankversuch bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. (bei konstanter Temperatur von 19 °C); (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP).

4.2.4.4 Simulation der passiven Auffeuchtung

In Abbildung 4-27 werden die Ergebnisse dargestellt. Es wird deutlich, dass einerseits das Feuchteniveau im Materialverbund weniger stark absinkt. Gleichzeitig ist aber der Gradient innerhalb des Materialverbunds hoch, da insbesondere die Bildschicht auf das Umgebungsklima reagiert. Um dies zu vermeiden, müsste entweder das Tafelgemälde verglast oder das Umgebungsklima zusätzlich konditioniert werden.

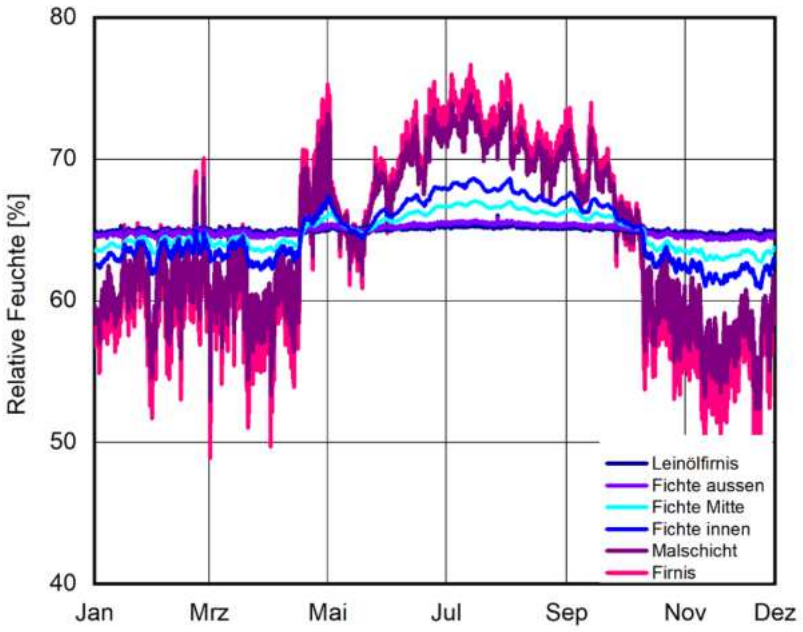

Abbildung 4-27: Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes mit gemessenem Raumklima in der Sakristei an der Vorderseite und konstanter relativer Feuchte von 65 % r.F. auf der Rückseite, Zeitraum vom 15.01 – 31.12.2021 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP).

4.2.4.5 Zusammenfassung der Ergebnisse

Für den Vergleich der Auswirkungen des Raumklimas der Sakristei und der Einhausung auf das Tafelgemälde wurde in den Simulationen an den einzelnen Positionen des simulierten Malschichtaufbaus eine statistische Auswertung der relativen Feuchte vorgenommen, s. Tabelle 4-12: Statistische Auswertung der relativen Feuchte in den simulierten Positionen für die Szenarien Sakristei und Einhausung. Hieraus wird ersichtlich, dass bei konstanter relativer Feuchte, wie sie in der Einhausung vorlag, innerhalb einer Schicht Unterschiede der relativen Feuchte zwischen und 7,8 % r.F. (Malschicht) und 12 % r.F. (Firnisschicht) vorliegen können. Im Vergleich dazu liegt der Gradient der relativen Feuchte mit dem in der Sakristei gemessenen Raumklima zwischen 39,2 % r.F. (Holz Mitte) und 42,5 % r.F. (Firnis). Innerhalb des Materialverbunds liegt ein maximaler Gradient von 3,8 % r.F. (Einhausung) bzw. 10 % r.F. (Sakristei) vor. Da nicht alleine der Gradient ausschlaggebend für eine Schädigung ist, sondern Trockenheit im Allgemeinen den Verbund schädigen kann (Holl 2016) führt das stabile Raumklima dazu, dass im Tafelgemälde geringere Adsorptions- und Desorptionsvorgänge ablaufen. Dadurch entstehen geringere Spannungen, die sich durch die unterschiedliche Reaktion der einzelnen Schichten ergeben können. Dies trägt maßgeblich zur langfristigen Erhaltung bei.

Tabelle 4-12: Statistische Auswertung der relativen Feuchte in den simulierten Positionen für die Szenarien Sakristei und Einhausung.

Position	**Simulation Raumklima Sakristei**				**Simulation Raumklima Einhausung**			
	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ	Minimum	Mittelwert	Maximum	Δ
Leinölfirnis	35,0	61,5	76,9	41,9	59,5	64,5	68,6	9,1
Fichte außen	35,4	61,5	76,4	41,0	59,8	64,5	68,2	8,4
Fichte Mitte	36,2	61,2	75,6	39,4	60,8	64,2	70,0	9,2
Fichte innen	36,2	61,1	75,4	39,2	60,9	63,9	69,8	8,9
Malschicht	34,4	60,7	75,8	41,4	60,5	63,7	68,3	7,8
Firnis	33,6	60,5	76,1	42,5	55,8	62,6	67,9	12,1

Wie sich die Änderung der relativen Feuchte auf den Materialverbund auswirkt, und wie lange es dauert, bis sich das Tafelgemälde auf die neuen Klimawerte einstellt, wurde anhand eines Experiments an Probeplatten im Klimaschrank am KDWT untersucht (s. Abschnitt 3.2.4 und Auswertung Streifenlichtscans). Ergänzend dazu wurde die Reaktion innerhalb der einzelnen Schichten mit *WUFI®Pro* simuliert. Es wurde deutlich, dass große Änderungen der relativen Feuchte innerhalb des Materialverbunds zu einem sehr hohen Gradienten führen und erst nach einer knappen Woche die relative Feuchte in allen Schichten wieder ausgeglichen ist (s. Abbildung 4-26).

Hinsichtlich der künftigen Lagerung des Tafelgemäldes wurde in Absprache mit den Forschungsprojektbeteiligten die Reaktion des Tafelgemäldes bei passiver Auffeuchtung simuliert. Hier zeigte sich, dass innerhalb des Materialverbunds ein hoher Gradient vorliegen kann, wenn die Rückseite passiv konstant befeuchtet wird und das vorliegende Raumklima nicht konditioniert wird. Dennoch birgt die Methode einer rückseitigen Konditionierung bzw. Befeuchtung Potential, das mit einer sensorgestützten Ansteuerung der Befeuchtung optimiert werden kann.

4.2.5 Klimaschrankversuche an Probekörpern

Für die Auswertungen der Streifenlichtscans wurden Vergleiche der täglichen Änderung erstellt (s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse). Ziel war herauszufinden, wie die Platten im zeitlichen Verlauf reagieren und wann die größte Verformung auftritt.

Die Verformung der einzelnen Probeplatten von Set 2 und Set 3 über die Zeit zeigt, dass die Reaktion der Materialverbünde ist bei den einzelnen Platten innerhalb des Versuchs sehr ähnlich ist. Die größte Reaktion war in der Platte S-M-2 festzustellen: hier löste sich nach vier Tagen die Stoßfuge (s. Abbildung 4-28). Die verstärkte Reaktion ist mit der Vorbehandlung durch Schimmel zu begründen. Bei allen Platten traten die größten Reaktionen innerhalb der ersten drei Tage ein. Insgesamt wurden Verformungen von 2 bis 3,5 mm gemessen (s. Abbildung 4-29).

Die Gegenbewegung in Set 3 nach Tag 4 steht im Zusammenhang mit dem Ausfall des Klimaschranks und der damit verbundenen Befeuchtung. Letztere hat zu einer temporären Entspannung des Materialverbunds geführt, bevor der Versuch an Tag 7 wieder fortgesetzt wurde. Bei den vorbehandelten Platten hat der Feuchtesprung bei S-M-2 dazu geführt, dass sich die Stoßfuge am vierten Tag gelöst hat.

Ein Vergleich der maximalen Verformung bei beiden Chargen (Set 2 und Set 3) zeigt, dass die unbehandelten Probeplatten (Set 3) geringere Verformungen aufzeigen, als die mit Schimmelpilzen behandelten (s. Tabelle 4-13).

Tabelle 4-13: Vergleich der maximalen Verformung der einzelnen Platten während der Klimakammerversuche

Bezeichnung	**Maximale Verformung während des Klimakammerversuchs [mm]**	
	Set 2 (mit Schimmel)	**Set 3 (unbehandelt)**
B-M- (ohne Fuge)	3,0 - 3,6	2,8
V-M- (verblattet)	3,6	3,2
VGM- (Schwalbenschwanz)	2,6	2,15
S-M- (stumpf gestoßen)	2,6	3,0

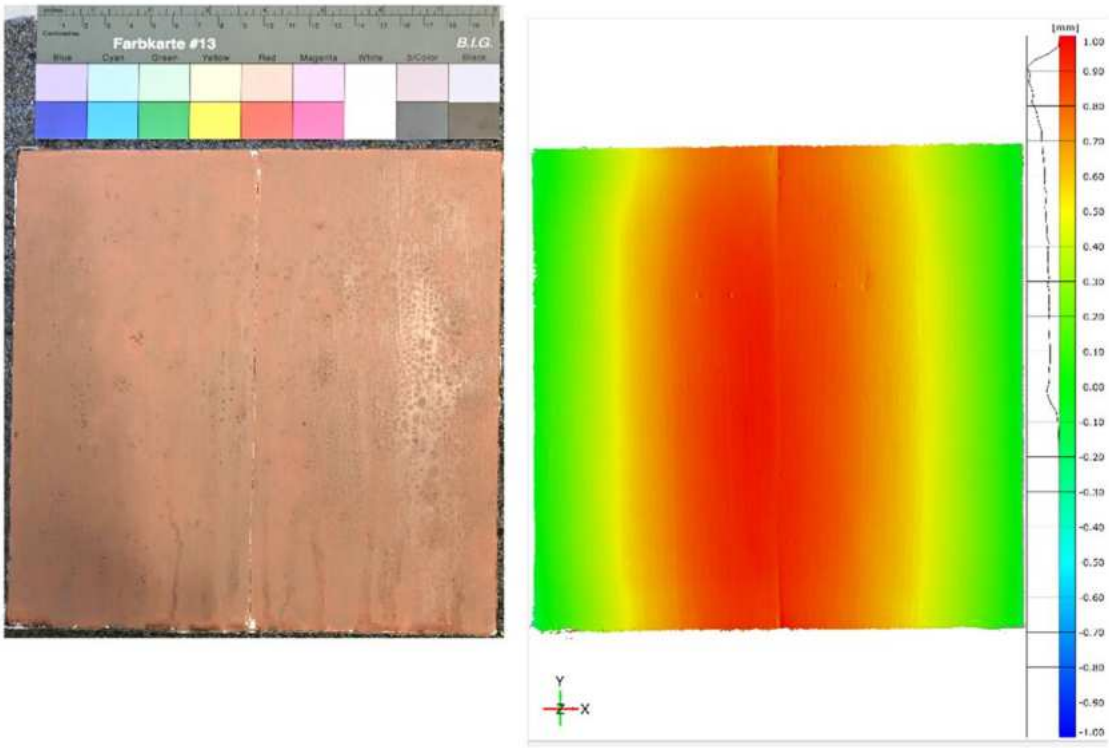

Abbildung 4-28: Links: Probeplatte S-M-2 nach dem Klimakammerversuch. Die Stoßfuge hat sich bereits nach vier Tagen im Klimaschrank gelöst. Rechts: Der Vergleich der Streifenlichtscans für S-M-2 zwischen Tag 1 und Tag 2 zeigt mit 0,9 mm die höchste Verformung am Stück an (Grafik: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).

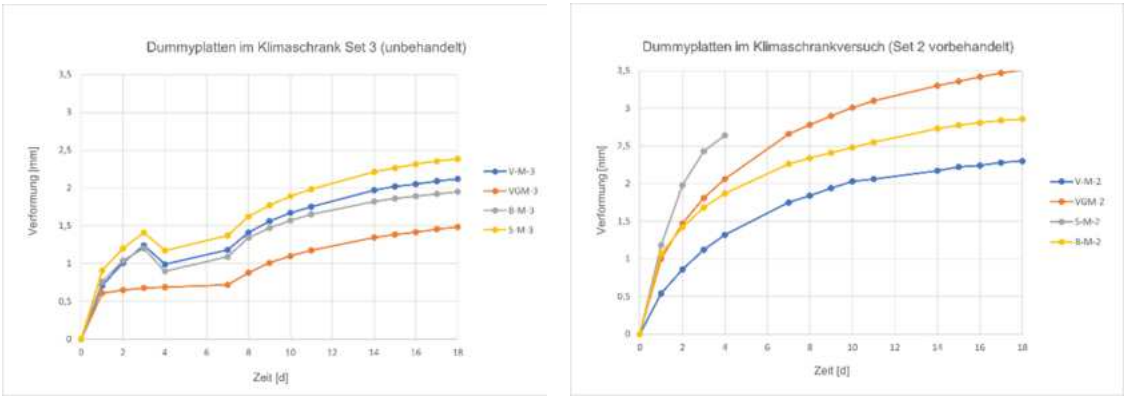

Abbildung 4-29: Vergleich der Reaktionen der Probetafeln auf den Feuchtesprung von 80 % auf 34 % r.F. bei 19 °C. Links: Set 3 unbehandelt; rechts: Set 2 mit Schimmel vorbehandelt (Grafik: K. Holl, KDWT).

4.3 Ergebnisse der weiteren Untersuchungen

Die folgenden Ergebnisse waren maßgeblich für die Bewertung des Schimmelrisikos und der Bestimmung von Feuchtepotentialen im Raum.

4.3.1 Luftströmungsmessung

Die Ergebnisse der erfolgten Nebelversuche innerhalb der temporären Einhausung können in Korrelation mit den Thermografieaufnahmen der TUM vom 21.03.2023 wie folgt dargestellt werden:

Im mittleren Raumbereich der Einhausung waren keine auffälligen Luftbewegungen erkennbar. Im Fensterbereich waren deutliche Luftströmungen im Fugenbereich der Fensterflügel sichtbar. Hier ist ein Luftaustausch mit der Außenluft spürbar. Dieser kann auch zu negativen Luftmengen (zu trocken, zu feucht) in der Einhausung führen. Unterhalb des Fensters kam es am Untersuchungstag zu einer Kaltluftbewegung nach unten. Diese Kaltluftströmung streicht dann leicht über das angrenzende Podest Richtung Tafelbild. Unterhalb des Podestes waren im Randbereich deutliche Luftbewegungen erkennbar. Hier strömt Kaltluft im offenen Randbereich zwischen Außenwand und Podestfläche nach unten. Die einsetzende Luftströmung unter dem Podest trifft dann auf die Stütz-konstruktion des unteren Podestbereiches. Dies könnte auch für das Schimmelpilzwachstum förderlich sein. Untersuchungsbericht und Thermografieaufnahmen s. Anhang E: Weitere Untersuchungen.

4.3.2 Luftwechselrate

Die ermittelte Luftwechselrate von 0,08 (Untersuchungsbericht s. 01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse) kann als sehr gering bezeichnet werden. Für die Raumgröße der Einhausung von ca. 95 m³ bedeutet die ermittelte Luftwechselrade einen Luftaustausch von ca. 7 – 8 m³/h. Bei vergleichbaren Messungen in anderen Objekten mit geschlossenen historischen Fenstern konnten Luftwechselraten von ca. 0,22 m³/h ermittelt werden. Bei Auslegungen von Heizungsanlagen werden z. B. Luftwechselraten von 0,5 m³/h für die Berechnung genutzt.

Als Quelle für die zugeführte Luft kann das undichte Fenster in der Einhausung angesehen werden. Hier sind bei den bereits erfolgten Nebelversuchen eindringende Luftströme visualisiert worden, die im Bereich der Fensterfugen zu lokalisieren waren. In der Sakristei konnte keine Zunahme von CO_2 gemessen werden. Hier nahm die Konzentration sogar leicht ab. Eine Verbindung zwischen diesen beiden Raumbereichen scheint nicht oder nur sehr minimal vorhanden zu sein.

4.3.3 Thermografie

Wie Abbildung 4-30 zeigt, weist das Tafelbild eine sehr gleichmäßige Temperatur auf. Zwänge durch lokale Temperaturdifferenzen können daher ausgeschlossen werden. Auch die installierte Messtechnik führt offenbar zu keiner schädlichen kleinräumigen Erhitzung des Gemäldes. Zudem sind durch das zum Messzeitpunkt vorherrschenden Raumklima und der Temperatur der Tafel von ca. 16 °C keine Taupunktunterschreitungen und Kondensation zu erwarten. Das Gewölbe und die Rückwand im Hintergrund sind zwar etwas kühler als das Tafelgemälde, jedoch ist auch hier keine Kondensation zu verzeichnen. Dies belegen die bisherigen Messwerte der Oberflächentemperatur- und Klimasensoren (s. Abschnitt 4.1.3).

Die Thermografie-Aufnahmen zeigen auch, dass die erdverbundenen tragenden Bauteile als Wärmesenken fungieren (s. Abbildung 4-31).

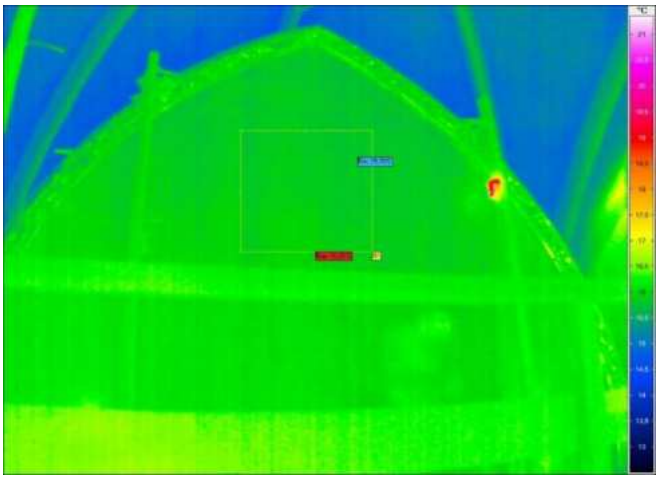

Abbildung 4-30: Thermografie der Vorderseite des Tafelbilds. Die sehr einheitliche Temperatur ist klar ersichtlich. Bei der Wärmequelle im rechten Viertel der Abbildung handelt es sich um einen der iAir-Sensoren. (Foto: A. Fröhlich, TUM)

Abbildung 4-31: Thermographie einer Säule in der Einhausung. Der kältere Säulenfuß deutet auf die Wärmebrücke zum Untergrund hin (Foto: A. Fröhlich, TUM)

4.3.4 Untersuchung der Raumschale

Zur Beschreibung der Raum- und Aufbewahrungssituation (s. 3.2.2). Im Folgenden sind die Ergebnisse der Untersuchungen an der Raumschale von Dr. Menath und Dr. Bittner (beide BLfD) zusammengefasst:

- Perkussionstest: Gemäß der optischen Beurteilung sowie einem Perkussionstest ist das Mauerwerk trocken und insgesamt in gutem Zustand. Es gibt leichte Lockerungen im Putz (insbesondere im unteren Bereich der Tribünenrückwand hinter dem aufgestellten Tafelbild). Es sind aktuell keine Folgemaßnahmen notwendig. Ein Riss im Mauerwerk, der sich an der Rückwand hinter dem Tafelbild versetzt ins Gewölbe fortzieht, wird nicht als statische Beeinträchtigung oder anderweitig problematisch eingestuft.
- Porositätstest: Das Gemäuer ist in Bezug auf Wasser eher hydrophil; der Putz und Anstrich eher hydrophob.
- Salzanalyse: Es sind keine gravierenden Feuchte-, Algen- oder Salzschäden an den Wänden innerhalb der Einhausung und der Sakristei erkenntlich. Nur in einer Ecke, unterhalb der Tribüne am Pfeiler wurde kristallisiertes Salz entdeckt und eine Probe zur Analyse entnommen, welche neben den zu erwartenden Putzbestandteilen Gips, Quarz, Magnesiumsulfate und diversen Carbonaten auch Kaliumnitrat zeigte.[78] Die genannten Stoffe sind laut Einschätzung von Hr. Dr. Menath in Hinblick auf die geplante Erhöhung der Luftfeuchtigkeit in der Einhausung als unbedenklich einzustufen.

[78] Auskunft durch das BLfD Zentrallabor (Dr. Markus Roos) vom 21.06.23.

Gemäß der Einschätzung des Fachbereichs für Wandmalerei und Architekturoberfläche wird das Potenzial der Wände für eine Klimastabilisierung als marginal beurteilt. Zur weiteren Ergründung der Raumschale wird eine Befunduntersuchung vorgeschlagen. Weiter könnte eine Raster-Porositätsmessung zur Definition der Wasseraufnahmefähigkeit an allen Architekturoberflächen (Stichwort hydrophobe Beschichtung) Aufschlüsse bieten. Die Fragestellung, ob eine Überarbeitung der Rückwand mit feuchtepuffernden Materialien denkbar wäre, um das Tafelbild von der Rückseite her zu befeuchten oder zu kühlen wird positiv beurteilt. Mögliche Maßnahmen zur Be-/Auffeuchtung, Pufferung oder allgemeinen Klimastabilisierung werden unter näher 4.2.2 und 6 Lösungsstrategien erläutert.

4.3.5 Schimmeluntersuchung und –monitoring

Die Gefahr mikrobiellen Befalls stellt ein Risiko insbesondre für Malschicht und Bindemittel dar. Vor allem bei erhöhten Temperaturen und erhöhter relativer Feuchte ist die Untersuchung und das Monitoring des Befalls ein wichtiger Bestandteil der Risikomanagements.

4.3.5.1 Schimmelpilzidentifikation

Die Sequenzierungsergebnisse weisen an sechs der acht mit sterilen Tupfern beprobten Flächen (Einbauschrank innen und außen, OSB-Platte) sehr wahrscheinlich auf *Aspergillus vitricola* hin, eine weitere auf *Penicillium brevicompactum*. Abklatschproben mit Tesafilm von den OSB-Platten ergaben, zusätzlich zum hier ebenfalls vertretenen *Aspergillus vitricola*, noch Hinweise auf folgende Schimmel: *Penicillium sp., Cladosporium (pseudo-)cladosporioides* und *Aspergillus fumigatus*, ebenfalls typische Vertreter im Innenraumstaub. Allerdings kann hier nicht völlig ausgeschlossen werden, dass sich die Sporen nicht bereits auf den Objektträgern befanden.

Aspergillus vitricola ist als xerophile Art bekannt, kommt häufig im Hausstaub vor und konnte bereits mehrfach an Kulturgütern identifiziert werden (Zalar et al., 2023). Untersuchungen im Rahmen eines DBU-Projektes zeigten, dass dessen optimale Wachstumstemperatur bei 20 °C liegt (Sterflinger et al., 2018, S. 12). Sein Schädigungspotential für Kulturgüter geht von dessen β-Glucosidase- und DNase-Aktivität sowie der Ausscheidung von Säuren aus (Kujovic et al. 2024, S. 18). Zu den gesundheitlichen Risiken sind keine spezifischen Informationen bekannt. Für *Penicillium Brevicompactum* sind relativ genaue Wachstumsbedingungen gegeben. Laut Sedlbauer (2001) kommt es zu einer Sporenkeimung im Bereich von 5 – 32 °C (optimal 25 °C) und mindestens 78 % r.F. Das Myzelwachstum ist zwischen -2 – 30 °C (optimal 25 °C) und 75 – 96 % r.F. gegeben (Sedlbauer, 2001, S. 24). Durch Lipolyse- (Spaltung von Fetten) und Lecithinaseaktivität des Pilzes können Malschichten angegriffen werden. Zudem können dessen Esteraseaktivität und Potential zur Schädigung von Kohlenwasserstoffen ein Problem für Wachse darstellen, die z. B. als Restaurierungsmaterialien zum Einsatz kommen (Kujuvic et al., 2024, S. 16). Die Spezies wird bei längerer Exposition als potentiell gesundheitsgefährdend oder allergen eingestuft (Sedlbauer, 2001, S. 24, S. 53).

4.3.5.2 Schimmelreinigung und -monitoring

In Tabelle 4-14 ist die Übersicht aller Monitoringtermine der wichtigsten Messstellen dargestellt. Es wurde zunächst an einem augenscheinlich befallenen Bereich des Sakristeischrankes gemessen, welcher erwartungsgemäß einen sehr hohen Wert von 23.641 RLU/10 cm² aufwies. Früher gereinigte Bereiche ohne sichtbaren Befall lagen unter 500 RLU/10 cm². Ein zu diesem Zeitpunkt nicht gereinigter Bereich des Sakristeischrankes dagegen zeigte einen Wert von 647 RLU/10 cm². Untersuchungen an der Vorder- und Rückseite des Holztafelgemäldes lieferten unauffällige Werte von 67 bzw. 68 RLU/10 cm². Nach der Reinigung des Sakristeischrankes konnten auch dort Werte von deutlich unter 500 RLU/10 cm² erzielt werden.

Im Rahmen des Monitorings wurden über den gesamten Projektzeitraum immer wieder Schimmelpilzherde in kleinerem Umfang festgestellt, die umgehend abgereinigt wurden. Im Spätsommer 2023 kam es zu einem verstärkten Schimmelwachstum, auch auf bisher nicht befallenen Flächen. Besonders ausgeprägt zeigte sich dieser auf dem hölzernen Antritt vor dem Sakristeischrank. Das Pilzmyzel bildete sich hier großflächig entlang der Holzmaserung aus (Abbildung 4-32). Ursachen waren vermutlich die leicht erhöhte r.F. nach einem Befeuchtungsschritt und die hohen Temperaturen, welche das Schimmelwachstum begünstigen. Da der Schimmelbefall erst einige Wochen nach dem Befeuchtungsschritt und dann innerhalb sehr kurzer Zeit sichtbar wurde, sind primär die hohen Temperaturen als entscheidender Wachstumsfaktor anzusehen. Zudem ist aufgrund der Temperaturschichtung die r.F. unterhalb der Tribüne höher als am Gemälde. Am 01.12.2023 wurde zusätzlich eine ATP-Messung am Bereich des Antritts, der im September einen starken Befall aufgewiesen hatte, durchgeführt. Obwohl optisch unauffällig, wies dieser mit 2784 RLU/10cm² einen vergleichsweise hohen Wert auf. Neben einer gründlichen Trockenreinigung (Absaugen) wurde hier nochmals eine Behandlung mit 70 %igem Ethanol-Wasser-Gemisch durchgeführt. Bis zum Ende des Projektes trat kein erneuter Befall an diesem Bereich mehr auf.

Mit Anhebung der Luftfeuchtigkeit im Januar 2024 (70 % r.F.) und April 2024 (75 % r.F.) in den für Schimmelpilzwachstum kritischeren Bereich wurde auch das Monitoringintervall verkürzt. Durch regelmäßige Reinigung und Kontrolle im Zusammenspiel mit Luftreinigung und forcierter Luftbewegung mittels Ventilator konnte ein Befall in der Einhausung verhindert werden. Am Tafelgemälde selbst zeigten sich bis zur letzten Messung keine besorgniserregende Werte.

Die durch das Luftfiltergerät AtemX gemessenen PM2,5- und PM10-Werte[79] in der Einhausung lagen über den gesamten Messzeitraum laut geräteinternem Sensor überwiegend im Bereich unter 1 µg/m³, was einer sehr guten Luftqualität entspricht.[80] Der Filter musste nach Messbeginn im Mai 2023 erst Ende November 2024 gewechselt werden.

[79] Feinstaub mit einem aerodynamischen Durchmesser kleiner als 2,5 bzw. 10 Mikrometer.
[80] Für die Langzeitexposition werden Werte bis 5 µg/m³ (für PM2,5) und 15 µg/m³ (für PM10) von der WHO als unbedenklich eingestuft, weshalb diese als Höchstwerte für das Jahresmittel vorgeschlagen werden, s.: WHO global air quality guidelines. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Genf 2021, S. 135 (online verfügbar unter: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228 zuletzt am 31.05.2024 aufgerufen).

Tabelle 4-14: Übersicht der Schimmelmonitoring-Termine (ATP-Messungen, Fotografische Dokumentation, Schimmelreinigung)

Datum	**Schranktür (vor/nach Reinigung)** [RLU/10 cm²]	**Gemälde (Vorderseite)** [RLU/10 cm²]	**Gemälde (Rückseite)** [RLU/10 cm²]	**Beobachtung/ Auffälligkeiten**
03.05.2023	23.641/ 120	68	67	Leicht sichtbarer Schimmelpilzbefall im unteren Türbereich des Sakristei-schrankes
07.07.2023	490/ 86	182	113	-
06.09.2023[81]	-	-	-	Ausbildung eines stark sichtbaren Befalls zw. 28.08. – 06.9.23 (Klima in Einhausung zeitweise bei ca. 25.5 °C / 70 % r.F.)
20.09.2023	293	133	92	Leicht sichtbarer Schimmelpilzbefall unten an der rechten Seitenwand des Sakristeischrankes
27.10.2023	-	-	-	Leichter Schimmelbefall an mittlerer Sakristeischranktür u. einzelnen OSB-Platten
01.12.2023	133/ 110	44 u. 101*	72 u. 250*	* Anm.: Am Gemälde jeweils 2. Probefläche (bislang ungereinigt) als Referenz gemessen
12.01.2024	51	21	54	Anm.: Umfangreiche Oberflächenreinigung an Gemälde u. Einhausung am 05.01. durchgeführt
30.01.2024	71	26	48	-
21.02.2024	124	27 u. 54*	57 u. 303*	* Anm.: Am Gemälde jeweils 2. Probefläche als Referenz gemessen
24.04.2024	130/ 75	23	61	Geringfügiger Schimmelbefall an einer OSB-Platte

Nach der aktiven Projektphase traten ab Anfang Juni 2024 außergewöhnliche Witterungsverhältnisse auf. Bayernweit auftretende langanhaltende Regenfälle (z. T. mit Hochwasser) im Wechsel mit sehr warmen Tagen führten im Verlauf des Monats zu einem feuchtwarmen Außenklima. Dieses wirkte sich in Freising auch auf Sakristei bzw. die Einhausung aus. Statt der geplanten r.F.-Absenkung durch Abschaltung des Luftbefeuchters, stieg die Luftfeuchte bis zum Maximalwert des Klimakorridors (69 % r.F.) an. Trotz regelmäßigen Betriebs des Luftentfeuchters befand sich die r.F. dauerhaft auf dem Maximum. Gleichzeitig stieg die Temperatur von 18 °C auf ca. 22 °C an. Dies hatte zur Folge, dass sich innerhalb kürzester Zeit vereinzelt Schimmelpilzkolonien an der Rückseite des Holztafelgemälde zeigten. Ausschließlich Bereiche, in denen kaum Luftbewegung stattfinden kann (Rahmenfalz und Außenkannte Gemälde, Spalt zwischen Tafelhälften) oder die Reinigung aufgrund der Oberflächenbeschaffenheit erschwert ist (Rahmenornamente und Klötzcehn auf der Tafelrückseite), waren hiervon betroffen (s. Abbildung 4-33/Abbildung 4-34).

Nach Bekanntwerden des Befalls wurde umgehend der Klimakorridor nach unten korrigiert (58 – 66 % r.F.), um das Wachstum möglichst einzudämmen. Im Rahmen einer zeitnah durchgeführten Grundreinigung (09.07.24) fand eine umfassende Abnahme des sichtbaren Schimmels statt. Mittels HEPA-/ULPA-gefiltertem Sauger wurde der Staub inkl. aufsitzendem

[81] An diesem Termin konnte lediglich der Befall fotografisch dokumentiert und (trocken) gereinigt werden. Die ATP-Messungen mussten leider entfallen, da die Teststäbchen defekt waren.

Schimmel abgenommen. Die Gemälde- und Rahmenrückseite wurden mittels Zellstofftüchern und Watte, die mit 70 %iger Ethanol/Wasser-Lösung getränkt waren, gereinigt. Die Methode konnte für die Rahmenornamente nur bedingt angewendet werden, da die Vergoldungen einen ethanollöslichen Überzug aufweisen. Die Reinigung des Rahmens und der Ornamentik erfolgte mit Sangajol, die Reinigung der Gemäldeoberfläche mit PU-Schwämmchen und die Reinigung der Seitenwand des Sakristeischrankes und partiell der Rückseite mit 70 %iger Ethanol/Wasser-Lösung.[82] Nach Beendigung der Reinigung wurde der Standort des Luftfiltergeräts auf die Tribüne hinter das Tafelgemälde verlegt, um einerseits für zusätzliche Luftzirkulation zu sorgen und andererseits Schimmelpilzsporen aus dem Umfeld des Gemäldes herauszufiltern. Im Folgenden wurden einwöchige Wartungsintervalle eingeführt, um zu beobachten, ob die durchgeführten Maßnahmen ausreichend sind und den Luftentfeuchter zu entleeren. Bis Projektende (31.08.2024) und danach (Stand 31.10.2024) trat kein erneutes Schimmelwachstum auf. Das Ereignis zeigte eindrucksvoll, wie wichtig die regelmäßige Pflege, Wartung und Hygiene solche Kunst- und Kulturgüter ist.

Abbildung 4-32: Schimmelbefall am Antritt vor dem Sakristeischrank vom 06.09.2023, Detailaufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

[82] Zum aktuellen Stand [November 2024] würde die Schimmelabnahme und Oberflächenreinigung nicht mehr mit Ethanol, sondern bevorzugt als Trockenreingung ausgeführt werden. Weitere Erkenntnisse zum Schimmelmonitoring und dessen Abnahme folgen in der Publikation des Projektes (2025/26 – in print).

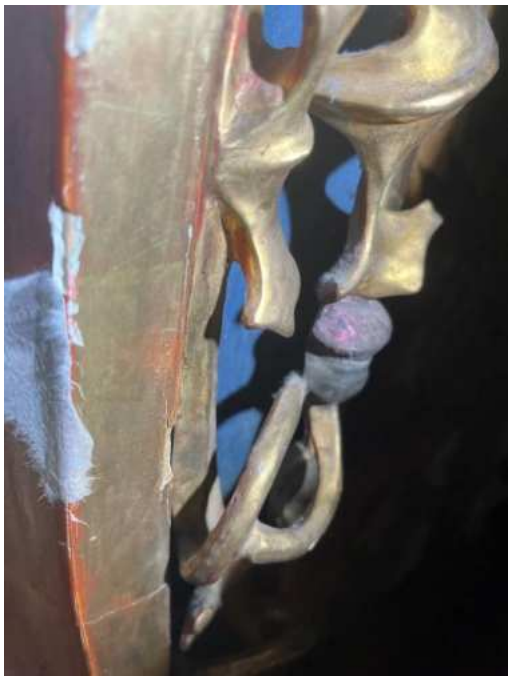

Abbildung 4-33: Schimmelbefall an Ornamenten des Gemälderahmens vom 09.07.2024 (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 4-34: Schimmelbefall vom 09.07.2024 an Gemäldekante, rechte Tafelseite angrenzend an den Rahmen (Foto: M. Hörmann, BLfD).

4.3.6 Stromverbrauch

Ein weiterer wichtiger und nicht zu vernachlässigender Punkt war der Stromverbrauch der Messtechnik, s. siehe Tabelle 4-6 und 4-7.

Tabelle 4-15: Stromverbrauch in der Einhausung im Zuge des Aufbaus der Messtechnik und weiteren Verlauf

Jahr	**2022**	**2023**	**28.11.2024**
Stromverbrauch in KWh	240	760	734
Ungefähre Kosten in €	145,00€	604,00€	444,00€
Spez. Strompreis in ct/kWh[83]	36,28	36,28	36,28

Die Auswertung des Stromverbrauches zeigt die nachvollziehbare kontinuierliche Zunahme im Verlauf des Aufbaus der Messtechnik. Der Stromverbrauch für 2023 liegt mit etwa 760 kWh ungefähr im Bereich eines sparsamen Ein-Personen-Haushalts in Deutschland (Stromspiegel 2022/23). Die Messtechnik erscheint vergleichsweise sparsam. Ein Großteil des Verbrauchs wird gemäß den smarten Steckdosen (*Shelly Plug S*) trotz der Vorschaltgeräte durch den Be- und den Entfeuchter verursacht: Das Intervall der Befeuchtung ist abhängig von den durch das Außen- und Sakristeiklima verursachten r.F.-Fluktuationen und dem in der Einhausung angestrebten r.F.-Wert. Bei großen Luftfeuchteunterschieden sind entsprechend häufige Laufzeiten, insbesondere zu Beginn der durchgeführten Auffeuchtungsschritte notwendig. So lief der Befeuchter zu Beginn der letzten Luftfeuchteerhöhung (+ 5 % r.F.) am

[83] Schätzung gemäß Preisblatt Strom Grundversorgung der Freisinger Stadtwerke. URL: https://www.freisinger-stadtwerke.de/de/Energie-Wasser/Strom/Unsere-Tarife/Unsere-Tarife/GV-Preisblatt-StromJuli-2023-mit-PB-2023-2024.pdf [Stand 23.08.2024].

04.04.2024 zunächst 3 Std. durchgängig. Sobald der eingestellte Klimawert erzielt war, dauerte es weitere 4,5 Std. bis sich ein regelmäßiges Intervall von 10 – 15 min. Laufzeit pro Stunde eingependelt eingependelt hatte. Über den einen exemplarischen Zeitraum [30.05.23 – 07.06.24] lief das Gerät insgesamt ca. 590 Stunden und verbrauchte dabei 39 kWh. Zwischen Mai und Oktober 2023 war, abgesehen von wenigen Ausnahmen (u. A. Fehleinstellung des Vorschaltgerätes), aufgrund der sehr geringen Unterschiede der r.F. zwischen Einhausung und Sakristei keine zusätzliche Befeuchtung nötig. In diesem Zeitraum war kein Auffüllen von Wasser notwendig, weshalb das Gerät lediglich aus präventiven Gründen (Vermeidung von mikrobiellem Befall) regelmäßig gereinigt wurde. Während der Heizperiode (Oktober – April) ist das Auffüllen mit jeweils 10 – 28 l ca. alle 1 – 2 Wochen erforderlich (in Abhängigkeit vom Außenklima).

Der Einsatz des Entfeuchters war im exemplarischen Zeitraum [30.05.23 – 07.06.24] und dank der klimastabilisierenden Wirkung der Einhausung kaum notwendig. Dieser lief lediglich ca. 0,6 Stunden mit einem Stromverbrauch von insgesamt ca. 6 kWh.

Im Hinblick auf das geringe Raumvolumen der Einhausung unterstreicht der Verbrauch, wie energieintensiv, wenig nachhaltig und wartungsintensiv der Betrieb von Be- und Entfeuchtern ist. Ein Umdenken und Umstieg auf ressourcenschonendere Alternativen oder passive Puffermethoden wäre äußerst wünschenswert. Auch der Ausfall derartiger Technik kann massive Schwankungen oder plötzliche starke Abfälle und somit Schäden verursachen.

4.4 Auffeuchtungsversuch

Als am 06. Dezember 2023 bei einem Mittelwert von 66,7 % r.F. keine Verformungen mehr anhand des Monitorings festgestellt wurden, konnte anhand der bisherigen Auswertungen der Risikoabschätzung und in enger Abstimmung mit den vielfältigen Messverfahren der Versuch zur Auffeuchtung festgelegt und durchgeführt werden. Diese sollte in zwei Schritten erreicht werden und wurde von einer Beobachtungs- und Evaluationsphase unterbrochen.

Die kühlere Jahreszeit (Winter 2023 bis Frühjahr 2024) erschien in Bezug auf das Risiko mikrobiellen Befalls bei erhöhter Feuchtigkeit am denkmalverträglichsten für die Umsetzung. Die TUM schätzte anhand einer Überschlagsrechnung (s. a. Niemz & Sonderegger, 2021b) ab, dass in der Theorie eine ca. 10 % höhere r.F. zum Erreichen der Ursprungsgeometrie nötig sei. Um das Schimmelrisiko und Materialversagen der Bindemittel zu begrenzen, wurde eine maximale r.F. von 75 % festgelegt. Die Befeuchtung sollte zu Gunsten der Verträglichkeit langsam durchgeführt werden. Die erhöhte r.F. wurde durch den bereits vorhandenen Luftbefeuchter gesteuert.

Anzusetzende Zeiträume für die Befeuchtung wurden zunächst über die hygrothermische Simulation ermittelt und dann in den Klimaschrankversuchen evaluiert. Der Zeitraum wurde auf dieser Grundlage auf ca. 5 Monate festgelegt. Das Erreichen der Ausgleichsfeuchte sollte über das Abklingen der Verformung bestätigt werden. Gemäß den begleitenden Streifenlichtscans in den Klimaschrankversuchen (s. 3.2.5) reichten 10 Tage noch nicht ganz aus, weshalb von ca. 14 Tagen ausgegangen wurde. Dies bestätigten auch die bisherigen Messungen der Triagulationslaser. Die Reaktion des Tafelgemäldes auf die erhöhte relative

Feuchte aus der Gleichgewichtsfeuchte heraus wurde am Original zusätzlich mit dem Streifenlichtscanner festgehalten[84]. Zur Prüfung der Gängigkeit der Gratleisten wurden Millimeterpapier (s. 3.1.4.3) daran angebracht.

Der Versuch begann zu Jahresbeginn (Startzeitpunkt 24.01.2024) mit einer Erhöhung in zwei Schritten. Zuerst von ca. 65 % auf 70 % r. F. und nach Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte und konservatorischen sowie messtechnischen Kontrollen vor Ort um weitere 5 % auf ca. 75 % r. F. Da nach dem ersten Schritt kein erhöhter Schimmelbefall, Verformungen oder andere Schäden und Veränderungen verzeichnet wurden, war dies am 04.04.2024 möglich. Die Veränderung der r.F. und die Reaktion der der Tafel sind in Abbildung 4-12 bis Abbildung 4-15 dargestellt.

Abbildung 4-35 veranschaulicht den Zeitraum der Auffeuchtungsschritte. In der oberen Hälfte zeigen die r.F.-Werte der Vorder- und Rückseite des Tafelbildes die Stufen der Feuchtigkeitserhöhung in 5 % Schritten; die roten Linien (24.01.2024 und 04.04.2024) markieren dabei das Datum der Umstellung. Die r.F. der Tafelrückseite ist dabei etwas höher als jene der Vorderseite. In der unteren Diagrammhälfe zeigen die Laser 1 und 2[85] die Veränderungen in der Tafelebene an; Laser 3 jene aus der Ebene heraus. Wie unter 4.1.4 beschrieben sind die Verformungen am Tafelbild innerhalb kürzester Zeit (25 – 30 Minuten, s. 4.1.4.4) zu erkennen. Gemäß Laser 1 erfolgte beim ersten Auffeuchtungsschritt von 65 auf 70 % r.F. nach ca. 9 Tagen keine größeren Änderungen mehr; inklusive Laser 2 dauerte es ca. 14 Tage bis die Verformungen abgeklungen waren. Das Feuchteaufnahmeverhalten des historischen Bildträgers entspricht, trotz ausbleibender Verformungen, dem von rezentem Holz. Etwa 14 Tage nach einem Feuchtesprung stellt sich eine neue Gleichgewichtsfeuchte ein und auch die Verformungen weisen dabei den am Tafelbild beobachteten asymptotischen Verlauf auf. Während die Holzfeuchte im Juli 2023 noch mit ca. 13,7 ± 0,5 % angeben wurde, konnte sie im Rahmen der Versuche auf ca. 15,6 bis 16,2 % gesteigert werden (s. 4.1.4.5).

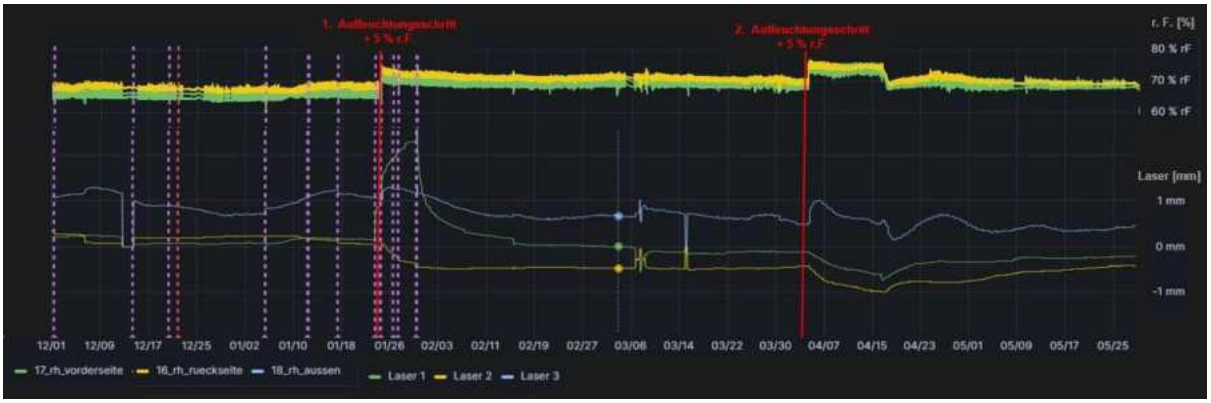

Abbildung 4-35: Veranschaulichung des Auffeuchtungsversuchs
(Erstellung aus Grafana Dashborad: T. Hilger, BLfD).

[84] Auch die Referenzplatten, die für die Klimaschrankversuche angefertigt wurden, wurden damit untersucht. Hier waren jedoch keinerlei Änderungen festzustellen (s. 4.1.6.1 Streifenlichtscans und Anhang F: Ergebnisse, S. 63 ff.).
[85] Laser 2 muss aufgrund eines Messfehlers in der Anfangszeit des 1. Auffeuchtungsschrittes vernachlässigt werden.

Am vorliegenden Fallbeispiel trat anhand der Laser eine maximale Verformung von 2 mm bei einer Änderung der r.F. von 65 auf 75 % auf. Wie unter 4.1.4.2 beschrieben konnte das Quellen der Tafel auch minimal mittels Extensometer erfasst werden. Hier ergaben sich in Abhängigkeit der Positionierung Unterschiede. Die unterschiedlich starke Reaktionen innerhalb des Tafelgemäldes zeigten sich auch über die Streifenlichtscans (s. 4.1.6.1). Diese erfassten die mit den Lasern vergleichbare Änderung von 2 mm bei 65 – 70 % r.F. Im Vergleich von 65% r.F. mit den Scans vor dem Bau der Einhausung bei ca. 40 % r.F. ergaben sich Bewegungen von ca. 25 mm in z-Ebene (Verwölbung).

Die Messung maximal sichtbarer Breite (innerhalb der Rahmung von Rand zu Rand) des Tafelbildes anhand der Punktwolken der Scans (Punktabstand von 6,1mm) lag nach der Auffeuchtung am 24.04.2024 bei 3.810 m. Im Vergleich mit einem der ersten Scans zu Projektanfang (sehr niedrige r.F.) ergaben drei Wiederholungen über die gesamte Länge vergleichbare Differenzen von ca. 1 cm, 1,35 cm, 1,37 cm. Unter Berücksichtigung der Messgenauigkeit über den Punktabstand werden diese Werte nur als Tendenz gesehen.

Die Ausdehnung bleibt wie unter 4.1.4 und 4.2.4 beschrieben dennoch hinter den Prognosen zurück. Mögliche Gründe dafür sind plastische Verformungen aus vergangenen Belastungen oder eine Behinderung des Quellens und Schwindens durch äußere Zwänge (z. B. Zierrahmen, Gewicht und schlechte Gleitfähigkeit). Anhand der beiden Befeuchtungsversuche nähert sich das Tafelbild bei einer maximalen Feuchtigkeit von 75 % r.F. nicht vollständig an seine Ursprungsmaße (hier: jene Maße zum Zeitpunkt der letzten Festigung und Niederlegung der Malschicht 2007) an. Dennoch wurde gezeigt, dass durch die Klimastabiliserung das Fortschreiten der Schädigungen der letzten Jahrzehnte verhindert oder zumindest stark verlangsamt werden kann.

Gleichwohl wurden im Projektteam die Risiken und Nachhaltigkeit einer Langzeit-Lagerung bei derart hohen Feuchtigkeit besprochen. In Abwägung eines verträglichen Klimabereichs mit den konservatorischen, ökologischen, wirtschaftlichen und finanziellen Faktoren der Nachhaltigkeit erfolgte ab 16.04.2024 eine schrittweise Absenkung der r.F. (ca. 2 % pro Woche) auf den Korridor von ca. ± 65 % r.F. Zum weiteren Vorgehen s. 7.1. Auch hierbei wurden keine ungewünschten Verformungen oder Schäden beobachtet und die Werte der Laser pendelten sich auf die Werte von vor den Auffeuchtungsschritten ein.

Die Verlagerung der Befeuchtungsversuche in die Wintermonate war eine notwendige aber auch effektive Maßnahme, um das Risiko eines Schimmelbefalls zu reduzieren. Der im Sommer 2023 auftretende Schimmelbefall am Sakristeischrank unter dem Podest entwickelte sich bei ausreichend hohen Temperaturen (> 25 °C) schon bei einer vergleichsweise geringen r.F. von 60 – 65 %, wohingegen im kühleren Winter während des zweiten Befeuchtungsversuchs selbst bei 75 % r.F. kein neuer Schimmelbefall auftrat. Dies verdeutlicht zum einen die Effektivität dieser Hemmung, hebt aber auch die Bedeutung einer sorgfältigen Risikoabschätzung und vorausschauende Planung einer Auffeuchtung hervor.

5 Diskussion der Ergebnisse

Mithilfe der Grundlagenermittlung, Voruntersuchungen, Monitoringkonzept, hygrothermischen Simulationen, Klimaschrankversuchen und weiteren Untersuchungen (Kapitel 2-3) zur Risikoabschätzung konnte das Verhalten des Tafelgemäldes bei klimatischen Schwankungen evaluiert und messtechnisch begleitet werden.

Die **Klimamessungen** in der Einhausung in Verbindung mit dem Monitoring des Holzträgers und der Malschicht ermöglichten Rückschlüsse auf das hygroskopische Verhalten des historischen Tafelgemäldes. Die größten Verformungen erfolgten demnach im ungeregelten Sakristeiklima. Hier waren vor allem die niedrige r.F. in der Heizperiode problematisch und maßgeblich für die Schäden. Der Bau der Einhausung stabilisierte das Klima mit sofortiger Wirkung deutlich und führte zu einer gepufferten Angleichung an das Außenklima. Anstiege der r.F. von 5 % brauchten im Mittel 14 Tage bis sich die Materialfeuchte über den gesamten Querschnitt angeglichen hatte. Die größten Bewegungen erfolgten in den ersten fünf Tagen. Kurzfristige Schwankungen wirkten sich vor allem auf die äußeren Schichten aus und führte z. T. innerhalb von ca. 20 – 30 Minuten zu minimalen Verformungen. Das Klima variierte innerhalb der Einhausung nur geringfügig. Lediglich unter der Tribüne bildetet sich begünstigt durch das undichte Fenster ein Kaltluftsee, der in diesem Bereich Schimmelwachstum förderte. Mikrobieller Befall wurden bei Temperaturen von über 20° C bei gleichzeitiger hoher r.F, also in feuchten Sommermonaten, beobachtet. Durch regelmäßiges Reinigen, Luftbewegung, Luftfilter und Monitoring konnte der Schimmel reduziert und gehemmt werden. Neben der Gesundheitsgefährdung birgt der Schimmel auch Gefahren für die Malschicht und die Leimfugen des Tafelgemäldes. Dies wurde durch die Schäden an vorbehandelten Probekörper im Klimaschrank deutlich. Im Projekt konnte gezeigt werden, dass ein an den historischen Mittelwert der relativen Feuchte angelehntes Umgebungsklima zu einer Beruhigung der Bewegungen führt und weitere Schäden am Tafelgemälde verhindert. Dieses Ergebnis zeigt, dass der Klima- und Bearbeitungshistorie eines Kunstwerkes besondere Bedeutung zukommt, wenn das Ausmaß plastischer, also irreversibler Verformungen abgeschätzt werden soll.

Das installierte **Monitoringsystem** erwies sich als zielführend, um die Bewegungen der Tafel zu beobachten und zu dokumentieren. Die Laser hatten dabei eine deutlich höhere Auflösung als die Extensometer. Die von den Lasern aufgezeichneten kurzfristigen Bewegungen im stabilen Umgebungsklima stellten sich dabei als unkritisch heraus. Ob diese hohe Auflösung für eine Beurteilung von Schadenspotentialen notwendig ist, hängt vom vorliegenden Fall ab. Für stabil konditioniertes Klima mit geringen Schwankungen ist eine derartige Genauigkeit erforderlich. Für instabiles Klima mit starken Schwankungen kann auch eine Erfassung mit Extensometern oder Dehnungsmessstreifen in Frage kommen (s. Schmidt, 2017a und b; Achhammer et al., 2021), um Tendenzen abzusehen. Die Messung des elektrischen Widerstands erwies sich sowohl an der Tafel als auch an den Probekörper als extrem störanfällig für elektrische Felder und ist daher nicht mit anderen Messungen kompatibel. Dass es sich bei der Messung mit Schraubelektroden nicht um eine zerstörungsfreie Methode handelt, ist ein weiteres Ausschlusskriterium gemäß restauratorischer Ethik. Auch die Verwendung von

Handmessgeräten mit Einschlagelektroden für eine absolute Bestimmung der Holzfeuchte an Kunstwerken ist eher ungeeignet. Es ist maximal möglich vorsichtige Aussagen zu Tendenzen zu machen. Allerdings sind die Messergebnisse sehr abhängig vom individuellen Anpressdruck und Winkel. Alternative Methoden zur zerstörungsfreien Ermittlung können Simulationen (s. Bratasz et al., 2005 oder Fragiacomo et al., 2011) oder Kernspinresonanztomographie (NMR, s. Dvinskikh et al., 2011) darstellen. Die im Rahmen des Projektes entwickelte objektschonende Methode zur Anbringung der OF-T-Sensoren hat sich über den gesamten Monitoringzeitraum bewährt und kann daher für ähnliche Anwendungsfälle empfohlen werden. Sie wird für das Langzeitmonitoring des Gemäldes über das Projektende hinaus weiterverwendet. Die hochauflösenden Streifenlichtscans, mit nachgeschalteten Soll-Ist-Vergleichen, zusammen mit dem konservatorischen Monitoring, ermöglichten eine zuverlässige Überwachung der Malschicht über die Projektlaufzeit. Im Vergleich mit den Lasern bieten sie zuverlässige Aussagen über die Verformungen.

Bezüglich des Monitorings mittels Laser ist es empfohlen im Vorfeld die Stellen mit den potentiell größten Bewegungen abzuschätzen oder entsprechende im Messverlauf zu ergänzen. Die Untersuchungen mit dem terrestrischen Laserscan waren trotz der Einschränkung aufgrund der geringeren Auflösung durch den größeren Punktabstand hilfreich für die Gesamteinschätzung. Einfachere und komplexe Methoden des Monitorings werden in der Publikation dieses Projektes (2025/26 – in print) veröffentlicht. Die messtechnischen Einflussparameter werden für den vorliegenden Fall folgendermaßen gewichtet:

- Raumklima (Relative Luftfeuchtigkeit, Lufttemperatur)
- Verformungen/Gewicht/Materialfeuchte und bildgebende Verfahren
- Oberflächentemperatur (stichprobenartige Messung Taupunkt oder ggf. Strahlung)
- Weitere Messungen zur Risikoabschätzung und in Abhängigkeit finanzieller und personeller Möglichkeiten/je nach spezifischer Anforderungen z. B: Luftwechsel- und Luftgeschwindigkeitsmessungen; Simulationen, ggf. Schadstoffe[86]

Die **hygrothermische Simulation** lieferte in Verbindung mit **Klimaschrankversuchen** valide Prognosen für das Verhalten der Tafel und ermöglichte eine Bewertung verschiedener Befeuchtungsmethoden.

Die hygrothermische Simulation ermöglicht eine Beurteilung der Auswirkungen des vorliegenden Raumklimas, wie auch zur Ermittlung eines Klimazielkorridors zur Konservierung und langfristigen Lagerung. In Kombination mit optischen Verfahren kann eine verlässliche, individuelle Risikoabschätzung für Kunstwerke in kritischen klimatischen Situationen erfolgen. Die Ermittlung von entsprechenden Materialkenndaten ist jedoch erforderlich, um das Verhalten des Materialverbunds im Simulationsmodell abzubilden und dadurch aussagekräftige Ergebnisse aus der hygrothermischen Simulation zu erhalten. Hinsichtlich des Risikos für Schimmelbildung wurden alle Varianten mit *WUFI®Bio*[87] berechnet. Hieraus ergab sich kein

[86] Diese werden für die Risikoabschätzung vorab zwar als sehr wichtig priorisiert; für die Reaktion messtechnischen Einflussparameter der Tafel spielen sie an dieser Stelle eine untergeordnete Rolle.
[87] Simulationsprogramm für das Risiko der Schimmelbildung.

Schimmelpilzrisiko. Da jedoch bei der in situ Beurteilung Schimmelsporen festgestellt wurden, sind hier die Grenzen der Simulation deutlich erreicht.

Der Vergleich des Klimas in der Sakristei und der Einhausung zeigte in der Simulation, dass das Raumklima in beiden Fällen zu geringen Unterschieden in Temperatur und relativer Feuchte im Materialverbund führt. Der Abgleich mit den konservatorischen Untersuchungen und den Streifenlichtscans bestätigt, dass das stabile Klima in der Einhausung zur Entspannung/Auffeuchtung des gesamten Tafelgemäldes führt.

Weiter hat die Untersuchung mit den Streifenlichtscans gezeigt, wie schnell das Tafelgemälde auf klimatische Schwankungen reagiert. Die Untersuchungen, die in der Einhausung stattgefunden haben, waren sehr informativ hinsichtlich des Verhaltens des Gemäldes. Es bestätigte sich, dass unmittelbar mit der Fertigstellung der Einhausung der Auffeuchtungsprozess begann. Speziell in den ersten Monaten war hier die größte Volumenzunahme festzustellen. Diese dauerte bis zum Erreichen der Ausgleichsfeuchte bei 65 % bis zum Jahresende an.

Der Vergleich der drei Referenzflächen und der Laserscans ergab eine inhomogene Volumenänderung im Tafelgemälde. Speziell die äußeren Ränder sind stärker von Volumenschwund und -zunahme betroffen, als etwa die Mitte des Gemäldes. Erkennbar ist das an den Vergleichen, die mittels Terrestrischen Laserscans gemacht wurden (Abbildung 4-20). In den Ranbereichen sind Unterschiede von ca. 1 cm in z-Richtung ersichtlich. Dies könnte auch mit den unterschiedlichen Fixierungen (Gratleisten, Klötzchen, Rahmung, s. Abbildung 2-6 und Abbildung 2-10) zusammenhängen.

Auch bei stabilen klimatischen Verhältnissen, wie sie in der Einhausung vorlagen, reagiert das Tafelgemälde unmittelbar auf geringe Schwankungen der relativen Feuchte. Die Auswertung aller Scanvergleiche über einen Zeitraum von 3,5 Jahren ergab, dass eine Bewegung von bis zu 3 mm (in z-Richtung/Verwölbung; an den Stellen, an denen die größten Bewegungen auftreten) aus konservatorischer Sicht für das Tafelgemälde vertretbar ist.

Anders als erwartet, lagen in den Simulationen sowohl im Klima der Sakristei also auch in der Einhausung geringe Gradienten innerhalb des Materialverbunds vor. Es zeigte sich jedoch die unmittelbare Reaktion des gesamten Verbunds auf klimatische Änderungen, die auch mit den Streifenlichtscans gezeigt werden konnte (s. Abschnitt 4.1.6.1). Hinsichtlich der Beurteilung der Sensibilität des Tafelgemäldes auf klimatische Änderungen bestätigten und ergänzten sich die beiden Methoden. Die Ergebnisse wurden für die Konzipierung des Klimaschrankversuchs verwendet. Mithilfe optischer Untersuchungen an Probeplatten durch Streifenlichtscans konnte die Reaktion des Tafelgemäldes auf einen Feuchtesprung genauso nachvollzogen werden, wie in der Simulation dargelegt wurde. Die größte Änderung in den Probeplatten fand innerhalb von einer Woche statt. Allerdings dauerte es bei den Messungen im Klimaschrank bis zu zehn Tage, bis die neue Ausgleichsfeuchte vorlag.

Es kann davon ausgegangen werden, dass das Tafelbild in seiner bisherigen Geschichte auch längerfristig Luftfeuchten von über 75 % ausgesetzt war. Dies deuten auch die Schäden durch Anobienbefall im unteren Teil der Tafel an. In enger Abstimmung mit dem Projektteam wurde basierend auf den Ergebnissen aus Recherche, Klimaschrankversuchen, Simulation

und in situ Monitoring ein **Auffeuchtungsversuch** in zwei Stufen (von 65 % auf 70 % auf 75 % r.F.) in der Einhausung durchgeführt. Dieser fand unter Berücksichtigung der konservatorischen Einschätzung, u. a. hinsichtlich des Schimmelrisikos und potenzieller Bildschichtschäden, statt und wurde explizit in den Wintermonaten durchgeführt, um das Schadensrisiko zu minimieren. Das Tafelgemälde reagierte, wie anhand der Simulationen erwartet, noch mit einer Längenänderung von ca. 2 mm. Es zeigte sich außerdem, dass sich diese trotz oder wegen der Begrenzungen in alle Richtungen (x- und z-Achse) vollzog. Speziell die Position, die mit dem Laser untersucht wurde, zeigte im Vergleich mit den Gesamtscans des optotechnischen Monitorings geringe Änderungen.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die messtechnisch erfasste **Ausdehnung der Tafel** von 2 mm (bei 65 bis 75 r.F.) hinter den Erwartungen zurückblieb. Die Gründe hierfür werden weiter unten im Text diskutiert. Theoretische Hochrechnung (ohne Einbeziehung konvexer Verformungen und anderer kritischer Parameter) ließen die Annahme zu, dass es auf die gesamte Länge des Tafelbildes zu einer deutlich größeren Ausdehnung gekommen ist. Da der Zeitraum extremer Trockenheit nicht über die Triagulationslaser oder Extensometer belegt werden konnte, ist die maximale Ausdehnung vom Startpunkt bei 40 % r.F. bis max. 75 % r.F (Auffeuchtungsversuch) leider nicht in Gänze messtechnisch erfasst. Dem liegen die extreme Trockenheit zu Projektbeginn (40 % r. F.) und Lieferengpässen in Folge der globalen Situation (Corona und Ukrainekrieg) zugrunde. Die zügige Einhausung mit Einstellung einer Gleichgewichtsfeuchte in Abhängigkeit zum Außenklima (im Sommer 2022 ca. 60 % r.F.) schien zu diesem Zeitpunkt der einzig konservatorisch vertretbare Schritt zu sein. Dennoch wurde gezeigt, dass durch die Klimastabilisierung das Fortschreiten der Schädigungen der letzten Jahrzehnte stark verlangsamt und schließlich sogar verhindert werden kann.

Habaru et al. (2015) zeigten an einem Holztafelgemälde (1. H. 17. Jh.) eine Ausdehnung mit ausreichend großer Fläche zum Niederlegen der Malerei, durch bis zu 83% r.F. innerhalb von 14 Monaten. Auch wenn eine weitere Auffeuchtung in Annäherung an diese r.F. zu Forschungszwecken wünschenswert gewesen wäre, wurde zum Projektende vorerst darauf verzichtet. Diese weitere Befeuchtung wurde aufgrund des Schimmelrisikos, Bindemittelabbau/-erweichung und der Gefahr der Rissbildung bei der Rücktrocknung aus konservatorischer Sicht und bei aktuellem Wissensstand als nicht vertretbar eingeschätzt. Auch dass das fortschreitende plastische Schwinden des Holzes infolge zyklischer Feuchteschwankungen generell zu einem irreversiblen Flächenverlust führt (van Grevenstein et al., 2014, S. 38; Bratasz, 2013, S. 13–14), war ein entgegenstehendes Argument. Zudem erschien eine solche konstante und langfristige Klimatisierung aus Sicht der Nachhaltigkeit, Wirtschaftlichkeit und finanziell nicht gerechtfertigt, was eine vollständige Rückkehr der Tafel zu ihren Ursprungsmaßen (hier: Stand 2007 zur letzten Festigungsmaßnahme) zum jetzigen Stand nicht möglich machte.

Ziel in Freising war es, das Gemälde in einen konservierungsfähigen Zustand zu bringen und mit ressourcenschonenden Methoden eine langfristige Erhaltung zu erreichen. Die dafür notwendige Volumenzunahme des Bildträgers konnte aus konservatorischen Gründen nur durch die Erhöhung der relativen Feuchte erfolgen. Derartige Maßnahmen birgen immer die Gefahr

des Verlusts von originaler Substanz und sind nur sinnvoll, wenn eine nachhaltige Stabilisierung erfolgt, da sonst, wie am Fallbeispiel gezeigt, immer neue Substanzverluste und Konservierungsmaßnahmen drohen. Am Beginn einer langfristigen Erhaltungsstrategie wie in Freising steht daher die Suche nach den Schadursachen. Hinsichtlich der größten Risiken für Kunst- und Kulturgut sei generell auf die „10 agents of deterioration“ verwiesen (CCI, 2017). Zur ganzheitlichen Risikoabschätzung ist auf den Seiten des Sicherheitsleitfadens Kulturgut SiLK (www.silk-tool.de) eine umfangreiche Auflistung zur Herangehensweise, wie auch weiterführende Literatur genannt. Alle zehn Punkte werden dort hinsichtlich ihres wahrscheinlichen Eintritts, wie auch ihres Schadensausmaßes untersucht und aufgelistet. Eine allgemeine Herangehensweise an die Risikoabschätzung, anhand derer für jede Fragestellung ein individuelles Maßnahmenkonzept erarbeitet werden kann, basiert auf den folgenden sechs Fragen:

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

Nach der Umsetzung erfolgt eine Rückschau:

5. Risikoüberprüfung
   Hat die Herangehensweise funktioniert?
6. Aktualisierung der Risikobewertung
   Was hat sich verändert seit dem letzten Mal?
   Gewonnene Erkenntnisse nach Schadenseintritt?

Zur ausführlichen Diskussion der Risiken und Risikomanagement s. 8.1 Handlungsleitfaden.

Das grundsätzliche Ziel ist das kulturelle Erbe so lange wie möglich für die 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. Ist ein ungeeignetes Klima als Schadensursache identifiziert, kann ein Ziel die Ermittlung eines geeigneten Klimakorridors zur bestmöglichen Erhaltung sein. Da organische Materialverbünde 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 Auffeuchtung und späteren Langzeitstabilisierung mit entsprechender Expertise durchgeführt werden und zuweilen auch kritisch hinterfragt werden (s. DIN EN 15757, 2010). Zunächst kann das „historische“ Klima, also das bisher vorliegenden Raumklima (am besten über mind. 13 Monate) analysiert werden. Anhand des Jahresmittelwerts der relativen Feuchte und im Zusammenspiel mit der Norm (DIN EN 15757, 2010) lässt sich

abschätzen, wo die Gleichgewichtsfeuchte liegt. Ausgehend davon kann die Erhöhung der relativen Feuchte unter konservatorischer und messtechnischer Begleitung sowie unter Beachtung der Grenzen und Risiken eine Volumenzunahme bewirken. Dabei sind natürlich die materialspezifischen Verträglichkeiten mit dem angestrebten Korridor zu hinterfragen (s. weiter unten im Text). Sind aufgrund des vorliegenden Klimas nachweisbar Schäden aufgetreten, sollten diese Werte vermieden werden. Auch die Höhe kurzfristiger klimatischer Schwankungen (täglich bis 3-tägig) gilt es zu reduzieren. Am Beispiel des Freisinger Tafelbildes konnte gezeigt werden, dass keine weiteren Schäden an der Malschicht entstehen, wenn der aus dem historischen Klima errechnete Mittelwert von z. B. 60-65 % r.F. nicht unterschritten wird.

Insgesamt wird die Möglichkeit, die sich durch das Eingreifen in die Umgebungsbedingungen ergibt, positiv bewertet. Diese können maßgeblich zur Entspannung und langfristigen Stabilisierung des Kulturguts beitragen und neue Schäden verhindern. Im Projekt zeigte sich, dass die natürliche Quellung und Schrumpfung der hygroskopischen Materialien eines – aufgrund anthropogener Klimaeinflüsse – bedrohten oder bereits geschädigten Holztafelbildes beeinflusst werden kann, um eine Stabilisierung der Materialien und den langfristigen Erhalt zu gewährleisten. Das liegt vor allem daran, dass das Schwinden maßgeblich von der umgebenden relativen Luftfeuchte abhängt. Allerdings ist zu beachten, dass gealtertes Holz häufig ein verändertes Feuchteaufnahmevermögen aufweist (s. Kránitz et al., 2015) und die zu erwartenden Ergebnisse nicht exakt vorhersagbar sind oder nur in Annäherung erreicht werden. Weiterhin kann sich durch die jeweilige Vorschädigung das Verformungsverhalten ändern. Reichenwald (2005, S. 55) berichtet von Sicherungsarbeiten nach einem Konzert in St. Dionys in Esslingen (1998 kurzzeitige Aufheizung von 14 auf 35 °C) und dass das Materialgefüge seit dieser Zeit geschädigt ist und es immer wieder zu gelösten Farbschollen kommt. Eine Klimastabilisierung sollte wie oben beschrieben immer unter Berücksichtigung des historischen Klimas erfolgen, da dies Rückschlüsse auf den verträglichen Korridor und die individuelle Ausgleichsfeuchte zulässt. Die Simulationen und Klimaschrankversuche im vorliegenden Projekt zeigten, dass Umfang und Geschwindigkeit der Be-/Auffeuchtung abhängig ist vom – aus der Veränderung resultierenden – Feuchtegradienten im Material. Ist dieser zu groß, können die auftretenden Spannungen die Festigkeit des Materials überschreiten und es kommt zu Rissen oder anderen plastischen Verformungen.

Die Hypothese, dass bei gealtertem Holz ‚Ermüdungserscheinungen' bestehen, sodass zum heutigen Zeitpunkt keine Quellung mehr möglich ist, bewahrheitet sich zum Teil. Je nach den oben beschriebenen Voraussetzungen (u. a. Zustand und Objektgeschichte, Grad der Vorschädigung, plastische Verformungen, äußere Zwänge, etc.) reagieren Kunstwerke unterschiedlich auf eine Befeuchtung. Ohne Kenntnis der genauen Klimahistorie ist eine Vorhersage über das Ausmaß plastischer Verformung und damit über das Ausdehnungspotenzial des Holzträgers nur begrenzt möglich. Die Vorhersagen (s. 2.1.) decken sich weitgehend mit den Beobachtungen am Freisinger Fallbeispiel und unterstützen die These, dass die schnellen Abfälle in der r.F. durch die Nutzung der Heizung zu plastischen Verformungen geführt haben können. Obwohl in Freising teils erhebliche Verformungen am Tafelbild aufgetreten sind, konnte auch mit einer Erhöhung der r.F. auf 75 % keine vollständige Rückkehr zu den

Ursprungsmaßen von 2007 für eine Niederlegung der Malschichtschollen erzielt werden. Eine weitere Anhebung um 5 % oder die längerfristige Befeuchtung bei 75% erschien nach den in der Literatur formulierten Risiken (Abschnitt 2.1) und dem aktiven Schimmelbefall unter der Tribüne zum jetzigen Zeitpunkt nicht ratsam. Ursächlich für die geringe Ausdehnung sind höchstwahrscheinlich plastische Verformungen im Materialverbund, eine alterungsbedingte Veränderung der Feuchteaufnahme und eine noch zu geringe r.F. im Verhältnis zur früheren, im „historischen Klima“ wohl sehr hohen Feuchtigkeit in der Sakristei. Ob Einschränkung durch blockierende Gratleisten bestehen, wurde über die unter 3.1.2 und 4.1.2 beschriebenen Millimeterpapiere evaluiert. Demnach zeigten die Gratleisten nur geringe Bewegungen; jedoch immerhin in beide Richtungen. Zu bemerken ist hierbei, dass sich die Tafelhälften in beide Richtungen entlang der Gratleisten ausdehnen, wobei bei den unteren Gratleisten die Verschiebung hauptsächlich nach außen (also Richtung Rahmen) stattfindet. Dies könnte mehrere Ursachen haben, u. a. werden die Gratleisten zur Mittelfuge hin vermutlich durch die gegenüberliegende Tafelhälfte blockiert. Allein anhand der Beobachtungen lässt sich allerdings nicht feststellen, ob der geringe Volumenzuwachs der Tafel bei der Auffeuchtung darauf zurückzuführen ist, dass die Tafelbewegung durch die Gratleisten blockiert wird, oder ob im Laufe der Historie des Gemäldes bereits ein derart großer Anteil an plastischer Verformung stattgefunden hat, dass eine Rückkehr zu den Ursprungsmaßen nicht mehr möglich ist. Um Gewissheit zu erlangen, ob die Gratleisten noch gängig sind, müsste das Gemälde jedoch aus dem Rahmen genommen und beide Tafelhälften voneinander gelöst werden, da die Leisten von der Mitte ausgehend in die beiden Tafelhälften eingeschoben sind. Eine Begutachtung der Fügetechniken wäre in diesem Zusammenhang ebenfalls wünschenswert.

Da ein Schimmelpilzbefall in der Vergangenheit bereits bekannt war, wurde in regelmäßigen Abständen der Zustand – auch an schlecht zugänglichen Bereichen (z. B. Spalten) – kontrolliert. Darüber hinaus wurde eine regelmäßige Reinigung aller Oberflächen durchgeführt, um möglichst wenig Nährboden für einen Befall zu bieten. Außerdem wurde ein Luftfiltergerät aufgestellt. In Freising konnte der mikrobielle Befall trotz hoher Luftfeuchten insgesamt gut gehemmt werden.

Eine Untersuchung der durch die Befeuchtung angestoßenen, tiefer reichenden Bewegungen der Feuchte im Tafelbild analog den Arbeiten von Melin und Bjurman (2017) war im Rahmen dieses Forschungsprojekts nicht möglich und muss Gegenstand zukünftiger Forschungsarbeit sein. Dies gilt ebenso für die Überlegung einer weiteren Ausdehnung in höheren r.F. Bereichen zur Festigung und anschließenden langsamen Absenkung auf verträgliche Feuchtigkeitsbereiche für die Langzeiterhaltung bei konstantem Klima. Ob dabei die Malschicht ohne weiter Schäden erhalten bliebe oder es erneut zu Spannungen und Abhebungen kommen würde, ist momentan nicht abzusehen.

Die Untersuchungen zeigten, dass die Schäden anthropogener Trockenheit jenen des Klimawandels ähneln. Eine Beruhigung war im vorliegenden Projekt durch eine Abkopplung von der geheizten Sakristei, nicht aber vom Außenklima, möglich. Dennoch hatte das warme, feuchte Klima, v. a. im Sommer 2024, direkte Auswirkungen auf das Tafelgemälde. Zu trockenes Außenklima würde demnach auch weiterhin eine Befeuchtung in der Einhausung notwendig machen. Deshalb sollten Lösungsstrategien darauf abzielen, die Gebäudehülle zu

untersuchen und je nach Bedarf zu ertüchtigen, um das Nahfeldklima des Gemäldes zu stabilisieren. Es besteht weiterhin dringender Forschungsbedarf an der Prüfung nachhaltiger Stabilisierungsstrategien und -Materialien.

6 Lösungsansätze

Allgemein üben Witterung, (regionale) Klimabedingungen (Temperatur und Feuchte), Bewuchs, Standort, Exposition, Sonneneinstrahlung aus dem Außenbereich, aber auch Bautypus und –materialien, Dämmung, Strömungen, Transmissionen, Belüftung, Speicherfähigkeiten, Wärmeleitung, (fehlende) Nutzung (z. B. als öffentlichen oder privates Gebäude; ggf. auch Tourismus) und viele weitere Dinge einen Einfluss auf das Raum- und Nahfeldklima aus. Zu Beginn einer Maßnahme gilt es dann häufig den Status quo zu erfassen, wobei neben Bestand v. a. auch Zustand der Bausubstanz und Ausstattung, Schwachstellen und potenzielle Schadursachen bzw. -prozesse erfasst werden sollten. Die Messdatenhistorie des Gebäudes kann dabei, falls vorhanden, eine wichtige Rolle spielen. Sie kann z. B. Aufschlüsse über Schimmel, mobilisierte, bauschädliche Salze, aufsteigende Feuchte, sorptionsabhängige/hygrothermische Formänderungen, Kondensations-, Staub-, Kälte-/Hitzeprobleme geben. Zur Vermeidung derartiger Schädigungen oder ausgemachter Gefahrenbereiche für Bausubtanz oder Ausstattung haben sich sogenannte Zielkorridore für Temperatur, (relative) Luftfeuchte und deren Schwankungen etabliert. So z. B. das BIZOT Green Protocol[88] (16 – 25 °C / 40 – 60 % r.F.) oder die Vorgaben von ASHRAE (unter 25 – 30°C / 30 – 70 % r.F.), AICCM[89] und AIC[90] (15 – 25 °C / 40 – 60 % r.F.); (Deutscher Museumsbund e. V., 2023). Je nachdem an welchen Standards sich die Entscheidungstragenden orientieren, können andere Bereiche als kunstwerkverträglich definiert werden. Diese zuvor genannten Klima-Standards entstammen weitgehend dem musealen Umfeld und sind daher nur bedingt für die Vielzahl der Denkmäler mit historischer Bausubstanz und deren spezifischen Verhalten, häufig hohen relativen Luftfeuchtigkeiten und Nutzung, umsetzbar. Schulze (2013) beschreibt u. a. die Risiken und Schäden, die aufgrund einer unbedachten Übernahme entsprechender Standards auf historische Raumsituationen entstehen können. Denn gerade die Berücksichtigung regionaler Unterschiede im Außen- und Innenklima sowie die bereits eingestellte Gleichgewichtsfeuchte der Ausstattung in historischen Gebäuden sind von Bedeutung. Dass einige Kunstwerke damals in oder extra für diese Bedingungen geschaffen wurden und sich mittlerweile lange daran gewöhnen konnten, ist sicherlich ein Faktor, warum sich viele in einem guten Zustand erhalten haben. Häufig sind es Änderungen der Raumsituation, Nutzung, bauliche sowie restauratorische Maßnahmen oder langfristig auch der Klimawandel, die es erfordern, dass sich Denkmäler und ihre Ausstattung auf neue Bedingungen einstellen. Die Denkmalpflege ist bemüht ein gleitendes Klima, abhängig von den Jahreszeiten und der Nutzung, umzusetzen; s. a. Eibl & Burmester (2013). Dabei werden unbeheizte Kirchen – z. T. trotz hoher Feuchtigkeit – als weniger geschädigt empfunden, was auch Brunskog (2012), Bylund Melin & Legnér (2013) und Holl (2013) zeigen. Wie Holl (2016) beschreibt, reagieren unterschiedliche Materialien in Abhängigkeit ihrer Zusammensetzung, Vorgeschichte und Zustand mehr oder weniger stark auf Klimaschwankungen. Dabei kann dieselbe Schwankung – je nach Empfindlichkeit der Materialien – unterschiedlich starke Schäden hervorrufen. Es

[88] Anerkannt von von zahlreichen Institutionen/Organisationen; darunter: National Museums Directors Council (NMDC), ICOM-CC (The International Council of Museums Conservation Committee) und das International Committee for Museums and Collections of Modern Art (CIMAM).
[89] Australisches Institut für die Erhaltung von Kulturgütern.
[90] Amerikanische Institut für Denkmalpflege.

wird daher empfohlen, die vorliegenden Materialgruppen und ihre Empfindlichkeit oder Sensibilität bei Klimavorgaben stärker zu beachten. Es kann notwendig sein, vom sensibelsten Materialverbund der Ausstattung auszugehen oder dieses ggf. gesondert zu schützen.

Die Nutzung der Denkmäler mit ihren spezifischen Herausforderungen (z. B. undichte Raumhülle, klimatische Probleme, (fehlende) Nutzung) und der hohe Wartungsaufwand erschweren häufig die konventionelle Klimatisierung des Raumes wie in einem Museum. Da Extremwetterereignisse wie u. a. feuchtwarme oder Trockenperioden, klimawandelbedingt stark zunehmen und eine Vielzahl an Denkmälern bedrohen, ist dies ohnehin nicht als oberstes Ziel anzusehen und aus Nachhaltigkeitsgründen zu vermeiden. Weiterhin sorgt der Rückgang an Kirchenmitgliedern vielerorts für finanzielle Engpässe und die Frage, wie die Denkmäler und ihre Ausstattung möglichst langfristig erhalten werden können. Das heißt, es müssen weiterhin Faktoren wie die Behaglichkeit, Arbeitsstättenrichtlinien, Energieeffizienz und Kosten berücksichtigt werden. Laut Burmester & Eibl (2014) führen beispielsweise auch Klimaanlagen und die Änderung ihrer Werte nicht zwangsläufig zur Energieeinsparung.

Sind die Schadursachen und Risiken ermittelt und auf ein ungeeignetes, zu trockenes Klima zurückzuführen, besteht die am einfachsten umsetzbare und häufig kostengünstigste Stabilisierung des Raumklimas aus einer **Änderung der Nutzung**. Streudiagramme, welche die Zonen der Trockenheit, Feuchte, Gefahren für Frost, mikrobiellem Befall sowie Behaglichkeit anzeigen, können eine wertvolle Hilfestellung dabei bieten. S. a. Software für chemische, biologische und mechanische Prozesse an Kunstwerken (anhand eigener Klimadaten für 365 Tage), Martens (2012); Software zur quantitativen Bewertung des Risikos physischer Schäden an Objekten, die anfällig für Klimaschwankungen sind, Kupczak et al. (2015). Simulationen zu Gebäuden, deren Klima und Risiken s. z. B. Lankester, et al. (2013) oder Leijonhufvud, et al. (2013).

In Bezug auf **Heizung und (adaptive) Lüftung** gibt es bereits diverse Handlungsempfehlungen[91]. Diese nehmen seit der Energiekrise z. T. auch Bezug auf Nachhaltigkeit und Energieverbrauch. Das interdisziplinäres Projekt *Climate4wood* der Technischen Universität Eindhoven, dem Rijksmuseum Amsterdam, der Cultural Heritage Agency of the Netherlands und der Technischen Universität Delft (Ekelund et al., 2012) identifizierte u. a. die verträglichen Schwankungen für Holztafeln (primär aus Eiche) und entwickelt rationale Guidelines für Klimabedingungen. Statt einer Bedienung nach Gefühl sollte dabei generell auf Klimamessgeräte oder Lüftungsampeln zurückgegriffen werden, um einen vorab festgelegten Klimakorridor zu erreichen. Dennoch ist die (adaptive) Lüftung nur in begrenztem Umfang möglich; nämlich nur sofern die Außenbedingungen und erforderliche Luftwechselraten zum Zielkorridor passen. Auch die Koordination großer Besuchergruppen und deren eingebrachter Feuchtigkeit oder Wärme ist sinnvoll. So kann u. a. über die Steuerung der Besucherzeiten und -Anzahl oder organisatorische Maßnahmen (u. a. Ablegen feuchter Jacken und Schirme an

[91] s. z. B. VDL, 2016; Erzdiözese München und Freising, k. A.; Erzdiözese München und Freising mit fachlicher Unterstützung von Energie&Kirche, 2023 sowie Padfield, 2007; Olstadt et al., 2007, und Bratasz et al., 2007b, DIN EN 15759-(1 und 2; 2011 und 2018), DIN EN 16853 (2017), DIN EN 16893 (2011); Broström & Nilsen (2012). Lemke, 2019, Eckermann, 2019.

Regentagen, Teppiche zum Reduzieren der Restfeuchte an Schuhen, Begrenzung von Öffnungszeiten und Gruppengröße, Besucherlenkung durch Führungen, regelmäßige Reinigung) Abhilfe geschaffen und eine Stabilisierung des Klimas begünstigt werden. Auch sog. Winterkirchen, d. h. Räume in Gemeindehäusern o. ä., die in der kalten Jahreszeit ersatzweise genutzt werden, können mancherorts organisatorische Alternativen sein.

Abhängig von den physiologischen Bedingungen (z. B. körperliche Verfassung, Alter, Geschlecht) und auch Tätigkeit, Kleidung oder Jahreszeit reagieren Menschen unterschiedlich auf die physikalischen Bedingungen (z. B. Luftbewegung und -Zusammensetzung, Feuchtigkeit, Raum- und Wandflächentemperatur). Baustoffe, Staubbelastung und sogar optische und akustische Reize können eine Rolle spielen. Insbesondere Zugluft gilt als Störung des Wohlbefindens (laut DIN EN ISO 7730 (2005) werden 10 – 20 cm/s bei sitzender Tätigkeit bereits als störend empfunden). Auch wenn eine Verbreitung von Schimmelsporen durch Luftbewegung nicht ausgeschlossen ist, kann deren entsprechende Geschwindigkeit laut Hennen et al. (2018) und Plaschkies et al (2019) auch zu einer Abtrocknung und somit geringem Feuchtigkeitsangebot sowie Kühlung der Oberfläche führen. Dies wiederrum sind Stressfaktoren für das Wachstum von Schimmel und können helfen, Zeiten der Auffeuchtung und Abtrocknung zu Gunsten der Schimmelprävention zu regulieren (s. 2.1 und 3.3.6). DIN EN ISO 7730 (2005) gibt für sitzende Menschen ohne körperliche Arbeit im Winter eine Temperatur von ca. 22 °C vor. Müssen Arbeitsschutzrichtlinien erfüllt werden, kann die Ergänzung körpernaher Wärme (z. B. über beheizte Sitzkissen, Decken, Wärmepodeste, Infrarot-Folien[92], etc.) oder eine Einhausung bzw. Abschirmung des Arbeitsplatzes (z. B. Glas-Cubus, Windfänge, IR-Paravans, etc.) für die Behaglichkeit von Beschäftigten hilfreich sein. Gemäß der Norm liegt der optimale Bereich der r.F. bei 20 – 22 °C zwischen 35 – 65 %. Neben der verstärkten Staubbildung bei zu geringer Luftfeuchtigkeit kann die elektrische Aufladung der Luft und Austrocknung von Schleimhäuten als Gesundheitsaspekte ein förderliches Argument für die zusätzliche Befeuchtung der Raumluft sein. Davon profitiert auch die Ausstattung.

Nicht immer sind diese Maßnahmen ausreichend. Wie z. B. das Projekt „Kleiner 40“[93] zeigte. Ist das Außenklima regional bereits sehr trocken und warm, müssen **objektnahe Veränderungen** zur Verbesserung des Klimas in Betracht kommen. So zum Beispiel Be- und Entfeuchtungsgeräte[94]. Diese erfordern allerdings Strom und eine regelmäßige Wartung (u. a. Befüllung, Entleerung, Reinigung zum Schutz vor Algen- oder Schimmelbildung) und erzeugt somit Kosten; s. 4.3.6. Für einen Einsatz empfiehlt es sich eine ausreichend große Überlaufwanne (z. B. aus Plastik) unterzustellen, um im Falle einer Leckage keine Schäden auf historischen Böden o. ä. zu verursachen. Der Anschluss an das Wasserssystem kann den Wartungsaufwand minimieren, ist jedoch nicht in jedem Denkmal möglich und sollte engmaschig überprüft werden, um im Falle eines technischen- oder Leitungsdefektes keine Überflutung

[92] S. Fritz, 2019: IR-Foliencarbonheizsystem HeatPlus mit Heizungsfolie der Firma Iliostherm, Bad Aibling.
[93] Holl, Kristina & Bellendorf, Paul. (2022). Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern. Analyse und Empfehlungen zum Umgang hinsichtlich der Auswirkungen der globalen, anthropogenen Klimaerwärmung. DBU-Projekt AZ 35598-01/02-45 des Kompetenzzentrums für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT), Professur für Restaurierungswissenschaft, Otto-Friedrich-Universität Bamberg.
[94] S. auch: Fraunhofer Institut für Bauphysik, Klimabrunnen. Ein Flächenkühlsystem, das Strahlungstemperaturen ausgleicht, die Luft auf natürliche Weise kühlt und entfeuchtet und dabei auch Staub und Pollen bindet. https://www.ibp.fraunhofer.de/de/geschaeftsfelder-produkte/produktentwicklungen/klimabrunnen.html [Stand 26.07.2024].

zu riskieren. Auch hier ist Pflege und Wartung verpflichtend. Die Installation von sensorgesteuerten Vorschaltgeräten kann den Energieverbrauch der Geräte reduzieren, da sie somit nicht dauerhaft in Betrieb sind, sondern je nach Bedarf vom Steuerungsmodul an- und abgeschaltet werden. Zu berücksichtigen ist hierbei die Einstellung eines sinnvollen Korridors (um ein „Gegeneinanderarbeiten“ von Be- und Entfeuchter zu vermeiden) und dass die Geräte sich eher auf einen Feuchtigkeitsbereich von ca. ± 5% r.F. einpendeln. In einem Denkmal liegt das historischen Raumklima[95] schnell zwischen 40 bis 70 % r.F. (s. DIN EN 15757, 2010). Bezüglich der Verträglichen Schwankungen sollte laut Holl (2016) der Verlauf innerhalb von 72 Stunden berücksichtigt werden, da in dieser Zeit die größten oberflächlichen Bewegungen ablaufen. Schwankungen von ± 2,5 % r.F. liegen meistens innerhalb der Messtoleranz. Holl (2016) ermittelte anhand von Versuchen, dass sich stündliche Schwankungen von ± 5 % r.F. nur geringfügig auswirkten.

6.1 Einhausungen, Klimavitrinen und Puffermaterialien

Energiesparende und ressourcenschonende Alternativen zur Befeuchtung können **Einhausungen als Klimaboxen** oder die Einbringung von **Puffermaterialien, u. a. als Rückseitenschutz** sein:

Als erste Hilfe-Maßnahme für ein fragiles Kunstwerk im Denkmal kann es sich eignen, das zu kontrollierende Raumvolumen zu verkleinern und das zu klimatisierende Objekt vom Umgebungsklima abzukoppeln. Dies kann zum Beispiel der Bau einer einfachen *Klimabox* oder in größerem Umfang auch *Einhausung* sein. Literatur hierzu s. Wadum (1998a); Buck (1998); Monfardini (2009); Sozzani (2009); Kozlowski et al. (2009); Gurgul (2015); Habaru et al. (2015); Meyer-Buhr & Dix (2016); Dix & Raquet (2016). Wichtig ist eine möglichst langsame Änderung des Klimas und auch die Langzeitlagerung und ihre Grenzen (s. 2.1) sollten vorab bedacht und konzeptioniert werden. So kann beispielsweise der Übergang von einer offenen Klimakiste oder Einhausung zu einer geschlossenen einen langsamen Übergang schaffen. Obligat ist ein Klima- sowie regelmäßiges konservatorisches Monitoring innerhalb des abgegrenzten Bereichs. Anhand des Fallbeispiels Freising konnte gezeigt werden, dass eine Einhausung eine adäquate Sofortmaßnahme sein kann, um ein Kunstwerk von einem schädlichen Klima abzukoppeln und den Aufwand für eine Klimatisierung zu verringern. Sie stellte allerdings einen Eingriff in das Raumgefüge dar. Dies bringt ästhetische, aber auch logistische Probleme mit sich. In Freising wären verschiedene Modifikationen der Einhausung, wie z. B. ein Sichtfenster oder eine Glasfront, ein Bedrucken der Gipswände mit Projektinformationen und Abbildungen des Tafelbildes, oder technische Hilfsmittel, wie z. B. Beleuchtung im Inneren, eine Live-Kamera zur online Einsicht wünschenswert gewesen. Dies wurde jedoch aus finanziellen, zeitlichen und wirtschaftlichen Gründen und zugunsten einer möglichst einfachen, reproduzierbaren Variante zurückgestellt. Für derartige Modifikationen sollten Themen wie Dichtigkeit, Lichteinfall, Isolierung im Fall der Verwendung von Glas bedacht und ggf. vorab untersucht werden. Weiterhin müssen sich durch die neue Raumbildung ggf. ver-

[95] Klima, in welchem sich ein Kunstwerk schon seit langer Zeit (mindestens seit einem Jahr) befindet.

ändernde Brandschutzanforderungen mit entsprechenden Verantwortlichen abgeklärt werden. Positiv bewährt haben sich das Begehungsprotokoll sowie die Verschließbarkeit der Tür. So konnten v. a. Klimaänderungen bei der Begehung durch größere Gruppen oder die erneute Einstellung der konstanten Klimawerte in Abhängigkeit zur notwendigen Zeit zugeordnet und unnötige Begehungen oder ein versehentliches Offenlassen der Einhausung vermieden werden. Die Begehungen wurden weiterhin auf das notwendige Minimum begrenzt, um die Be-/Entfeuchtung nicht unnötig zu strapazieren. Regelmäßige Kontrollen vor Ort erweisen sich aus Brandschutz-, Sicherheits- und Wartungsgründen als sehr sinnvoll. Ein regelmäßiger Luftaustausch zur Vermeidung mikrobiellen Befalls ebenso. Eine Einhausung bedarf in jedem Fall einer geregelten und regelmäßigen Wartung.

Buck (1998), Monfardini (2009), Schölzel (2015), Rudolph & Žvinyte (2015) und Eisbein (2016) zeigen umfangreich, wie sich *offene Klimakammern* für verschiedene Fälle, darunter Tafelbilder, Altäre, Skulpturen oder Textilien, eignen. Von Vorteil ist hierbei der Wegfall einer dichten Klimavitrine, welche sich im Denkmal bzw. denkmalpflegerischen und religiösen Kontext nur bedingt oder nur für besonders gefährdete Kunstwerke anbietet (s. weiter unten im Text). Bei offenen Klimavitrinen wird häufig auf einen Luftpuffer zurückgegriffen, der mittels einer moderaten Abschirmung der Kunstwerke durch Glasfronten oder rückseitig angebrachte Holzlamellen oder Paneele (vgl. Rückseitenschutz, häufig aus Balsaholz gefertigt), erzeugt wird. Es werden dabei bewusst Öffnungen und Undichtigkeiten eingeplant, um eine Luftbewegung zum Schutz vor mikrobiellem Befall, Kondensation und ungünstigen Änderungen des Mikroklimas bei z. B. Temperaturwechsel, zu vermeiden.

Im Szenario der passiven Klimatisierung des Freisinger Tafelgemäldes zeigte sich in der hygrothermischen Simulation ein großer Gradient im Materialverbund. Dieser resultiert vornehmlich aus der großen Differenz zwischen der Feuchte hinter dem Tafelbild und dem trockenen Raumklima. Eine Verlangsamung der Diffusion bei niedrigen Temperaturen wird angenommen (s. Lukomski, 2010 und 2011). Bylund Melin (2012) beschreibt, dass das Gefälle der r.F und Temperatur von der Vorder -zur Rückseite einer Holztafel in einem entfeuchteten Raum stärker ausgeprägt ist. Holl (2016) beschreibt nach der Auswertung von Fallbeispiel-Simulation, dass für bemaltes Holz (ab 5 mm Dicke) ist mit einer Differenz der r.F. von 5 % ein Schadenspotential gegeben ist. Das Schadenspotential erhöht sich demnach weiter, wenn der Feuchteunterschied im Gefüge länger als fünf Stunden andauert. Simulationen von Duivenvoorden et al. (2023) deuten darauf hin, dass eine höhere r.F. hinter statt vor einer bemalten Leinwand zu einer höheren Wasserkonzentration in der unteren Farbschicht führt. Die genauen Schadprozesse langfristiger und zyklischer Diffusion auf das Materialgefüge sind bisher nicht genauer erforscht und sollten präventiv bedacht werden.

Zu prüfen wäre, wie sich die offenen Vitrinen oder Rückseitenschutzmaßnahmen im Zuge des Klimawandels erweisen. Es ist zu erwarten, dass es je nach Region mit z. T. steigender Temperaturen und niedriger Feuchte (s. Holl & Bellendorf, 2022), aber auch Regionen mit

steigenden Temperaturen und steigender Feuchte[96] neue Herausforderungen in deren Planung geben wird. Die Ergänzung um ein feuchteadaptives Puffermaterial (s. auch Monfardini, 2009) könnte dabei weitere Potenziale schaffen.

Die Reihe hygroskopischer Materialien, die als **Puffer** eingesetzt werden können, ist lang und vielfältig. Je nach Objektanforderungen und Zielkorridor eignen sich manche mehr und andere weniger. Ziel eines Puffermaterials ist häufig die Stabilisierung eines Klimabereichs über Feuchtigkeitsaufnahme (Adsorption) und -abgabe (Desorption). Kurzfristige Schwankungen der r.F. aufgrund von Temperaturänderungen oder langfristige, saisonal bedingte Schwankungen der Außenluft sollen dadurch ausgeglichen werden. Klimaspitzen sollen reduziert werden, um stabilere Klimakorridore zu ermöglichen. (S. auch Isetti, et al., 1996). Zu beachten sind neben den Materialeigenschaften des Puffers (z. B. Pufferkapazität und -bereich (je nach verfügbarem Wasser in der Umgebung und Materialdicke), Inhaltsstoffe, potenzielle Emissionen, Anfälligkeit für Mikroorganismen, Wartungsaufwand, etc.) auch die Kunstwerk- und Umgebungsanforderungen. Dabei sollten die Ausführenden sich neben Themen wie Brandschutz, Gesundheitsschutz, Anwendbarkeit in der jeweiligen Raum- oder Vitrinensituation (z. B. Montage- oder Einbringungsmöglichkeiten, Auswirkungen auf das Kunstwerk (VOCs, Mikroorganismen, Wechselwirkungen, etc.) auch mit Luftaustausch, verfügbarer Feuchtigkeit und der Einstellung eines geeigneten Ziel-Klimakorridors beschäftigen. Ein begleitendes Klimamonitoring und regelmäßige konservatorische vor Ort Kontrollen/Wartung im Nachgang und ggf. eine Anpassung zur Optimierung ist dringend empfohlen.

Generell eignen sich verschiedene natürliche Materialien als Puffer. Nach Padfield (1999) zählen Ton > Porenbeton > Wolle zu den Materialien mit der höchsten Pufferkapazität; grobporige Mineralien (z. B. Kalkmörtel, Gipsputz, Ziegel) und mineralische Isolatoren (u. a. Perlit, Glaswolle und Steinwolle) oder Holz eignen sich laut ihm nur bedingt. Weiterhin beschreiben Padfield (1999), Padfield & Jensen (2009 sowie 2011) sowie Röhlen (2022) umfassend die Eignung von Lehmziegeln und -wänden als ressourchenschonenden Feuchtepuffer. Im musealen Umfeld und Vitrinen werden häufig Materialien wie z. B. *Silikagel* (=Kieselgel) oder *Trockenton* (=Tonerde) verwendet. So gemäß Waller (2017) beispielsweise die Produkte Silikagel E (99 % SiO_2) / PRO SORB® (97 % SiO_2, 3 % Al_2O_3), ohne Lithiumchlorid, für ca. 30 – 60 % r.F. / ART SORB® (90 % SiO_2, 10 % LiCl) für ca. 65 – 75 % r.F verwendet. Silikagel kann wiederverwendet werden; das Material kann dafür laut Weintraub (2002, S. 181) bis max. 120 °C erhitzt werden. Über dieser Temperatur können die Farbindikatoren, die bei der richtigen Einschätzung der Pufferkapazität bis zum Austausch helfen, Schaden nehmen. Weiterhin benötigt Silikagel weniger Platz als organische Puffermaterialien mit gleicher Pufferleistung (Weintraub, 2002, S. 172). Mit Vorsicht zu betrachten sind die korrosive Wirkung auf Eisen und Zink (Waller, 2017) sowie Temperaturabhängigkeit des r.F.-Wertes (Konditionierungswert PRO SORB® ca. 20 °C; s. Waller, 2024a). Im schlimmsten Fall kann sich somit – je nach Verhältnis Holz zu Vitrinenvolumen – bei instabilen oder sehr hohen Temperaturen

[96] Karten und Visualisierungen des Klimas („Risk maps“) s. GERICS Climate Service Center (2024); URL: https://www.gerics.de/products_and_publications/maps_visualisation/index.php.en. [Stand September 2024].

ein Feuchtetransfer zwischen Holz-Kunstwerk und Puffermaterial einstellen, der zur Trocknung des Kunstwerkes führen kann[97] (s. auch Wadum et al., 1994; Wadum, 1998a). Sollten sich die Temperatur und Feuchtigkeit erhöhen, kann dies sehr schnell zu mikrobiellem Befall führen. ART SORB® unterliegt darüber hinaus einer langsamen Zersetzung, wobei sich der Konditionierungswert allmählich nach oben verschiebt (Waller, 2024a). s. auch: Mervin (2007); Padfield & Jensen (2011); Tétreault & Bégin (2018); Arenstein (2019).

Wie im Projekt gezeigt (s. Abschnitt 4.2.2) sind Salzlösungen ein weiteres geeignetes Puffermaterial. Diese können je nach Salzlösungsart unterschiedliche r.F.-Bereiche adressieren (s. Waller, 2024b zu 2.4 Salzlösungen, Entfeuchterbeutel mit Salzlösungen sowie Eggert, 2022). In einem aktuellen DBU-Projekt (AZ 38338/01) wird der „*Schutz national wertvoller Kulturgüter durch Einsatz gesättigter Salzlösungen in Vitrinen zur Absorption anthropogener Luftschadstoffe*“ untersucht. Laut dem Projektkoordinator Prof. Dr. Gerhard Eggert[98] ermöglichen Salzlösungen eine sehr konstante r.F. bei 75,5%, die zwischen 0 und 20 °C, die nahezu unabhängig von der Außentemperatur ist[99]. Nach dem Henry‘schen Gesetz ist laut ihm weiterhin zu erwarten, dass die Lösung Luftschadstoffe aufnimmt. Nachteile der Salzlösungen können der – je nach Oberflächengröße – langsame Luftaustausch sowie das begrenzte Raumvolumen (laut DIN EN ISO 9972 (2018) nur Lufträume bis 10 Liter bzw. 30 Liter mit Ventilator); die Temperaturabhängigkeit des r.F.-Wertes von Umgebungsluft und Salzlösung; potenzieller Salznebel durch Luftbewegungen sein (Waller, 2024b zu 2.4 Salzlösungen, Entfeuchterbeutel mit Salzlösungen). Deshalb gilt ein weiterer wertvoller Hinweis Prof. Dr. Eggerts der Abdeckung der Lösungsbehälter (mit wasserdampfdurchlässigen Membranen wie z. B. GoreTex®-Folie) bei der Verwendung eines Ventilators zur Luftumwälzung, um die Aerosoltröpfchen aus der Lösung auf Kunstwerkoberflächen zu vermeiden. Mit der sogenannten „*Tandem-Klimatisierung*“ kann über eine Salzlösung mit Zugabe eines Silikagels ein Ausgleich geschaffen werden[100]. Auch variiert für die passive Klimatisierung über Salzlösungen – je nach Raumvolumen – die Größe des Lösungsbehältnisses. Es bleibt zu klären, ob eine Aufstellung nahe dem Kunstwerk überhaupt möglich wäre sowie ob und wie es gewartet werden kann.

Ein seit über 50 Jahren mit Natriumchloridlösung auf 76 % klimatisiertes Gemälde, Tizians ‚Der Zinsgroschen‘ in der Dresdner Gemäldegalerie Alter Meister (Schölzel, 2006, S. 77 – 88), bestätigt die generelle Möglichkeit der Befeuchtungstechnik mit Salzlösungen für den

[97] PRO SORB® ist laut Waller, 2024a aufgrund seines Konditionierungswert bei 30°C um + 1 - 1,5% r.F. weniger anfällig für diese Komplikation.
[98] Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart.
[99] Freundliche Mitteilung von Prof. Dr. Gerhard Eggert [Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart, Projektkoordinator AZ 38338/01]: bei 0 °C 75,51%, bei 30 °C 75,09%. Auch eine Trocknung wäre mit Salzen denkbar, erfordert jedoch eine höhere Wartung.
[100] Freundliche mündliche Mitteilung Dipl.Rest. Heiner Grieb [Veste Coburg].

dortigen Fall. Zugesetzt wird der Vitrine ein Schälchen mit Tymol, welches durch seine Sublimation die Schimmelbildung hemmt.[101] Die Erforschung und Anwendung biologischer Inhaltsstoffe/ätherische Öle als Ersatz von Fungiziden[102] ist ein erstrebenswertes und umweltfreundliches Ziel.

Gerade in den letzten Jahren versuchen viele Denkmaleigentümerinnen und -eigentümer den Rückgang der Kirchenmitglieder über die Umgestaltung der Nutzung zu kompensieren, wodurch die Räume auch als Konzertraum oder Sakristeien als Büro der Mesnerinnen und Mesner genutzt werden. Arbeitsstättenregelungen (v. a. im Winter) und steigender Bedarf und Nutzung moderner Technik (z. B. Beleuchtung, Heizung, Alarmanlagen, Leutanlagen, etc.) können überdies zu sich ändernden Bedingungen, Einflüssen und anthropogenen Schäden führen. In besonders gefährdeten Fällen (z. B. klimatisch, aber auch materialtechnisch oder bei hohem Geldwert) kann auch im Denkmal eine **(Mikro-)Klimavitrine**[103] notwendig oder gewünscht sein. Aus denkmalpflegerischer Sicht stehen dieser Entscheidung häufig die Nutzung als Andachts- und religiösem Ort, Kunstgegenstand sowie ästhetische oder historische Aspekte entgegen. Häufig ist es zudem nicht gewünscht sakrale Räume durch eine Musealisierung zu stören. Hinzukommend zählt die (Be-)Nutzung der Räumlichkeiten und ihrer Kunstwerke teilweise zum immateriellen Kulturerbe, das ebenfalls erhaltungswürdig ist. Weitere Gründe die gegen eine Klimavitrine im Denkmal sprechen sind die z. T. nicht finanzierbare regelmäßige Wartung durch Restauratorinnen oder Restauratoren und bei ungünstigen Bedingungen oder Fehlfunktionen auch Sekundärschäden an den Objekten. Gerade das instabile Umgebungsklima in Kirchen macht die richtige Einstellung einer Klimavitrine zu einer großen Herausforderung. Geringe Luftzirkulation, Kondensations-, Schimmel oder Schädlingsbefall sowie Ausblühungen können leicht entstehen (s. auch Sozzani, 2009). Für eine gute Konzeptionierung sind u. a. die Dichtigkeit, eingebrachte Materialien mit potenziell kunstwerkschädigenden Emissionen, Platzierung und Fächeraufteilung (Wartung von außen möglich oder nicht), Luftzirkulation (s. Waller, 2017) sowie ggf. Beleuchtung, Glas(Isolierung), Erscheinungsbild und Wartung zu berücksichtigen. Es ist empfohlen hierbei mit Fachfirmen zusammenzuarbeiten.

Ein weiteres Beispiel ist eine Luftschleieranlage (Staschull, 2023). Diese kann eine Zonierung der r.F. innerhalb eines Raumes über eine optisch nicht sichtbare Trennung durch konstanten Luftstrom erzeugen. Zu bedenken sind hierbei v. a. der Energie-, Wartungs- und Kostenaufwand, die Aufwirbelung von Staub/Schmutz, der sich auf Kunstwerk absetzen kann und dass es sich um einen größeren (auch hygrothermischen) Eingriff in die Raumstruktur handelt. Aus Sicht der Behaglichkeit kann der Luftstrom störend wahrgenommen werden und die Objektsicherheit (Schutz vor „Anblasen“) sollte gesichert sein. Laut Staschull (2023) ist noch fraglich, ob dieses Verfahren auch bei hohen r.F.-Unterschieden funktioniert, da bisher noch keine Referenzbeispiele[104] bekannt sind.

---

[101] Freundliche Mitteilung von Prof. Dr. Gerhard Eggert [Institut für Konservierungswissenschaften Stuttgart, Projektkoordinator AZ 38338/01].
[102] Pei-Chi & Chia-Ling (2018); Fidanza & Caneva (2019); Antonelli et al. (2020); D'Agostino et al. (2023).
[103] S. auch DIN EN 15999-1 (2014) und DIN EN 15999-2 (In Arbeit).
[104] Projektbeispiel am 16. Konservierungswissenschaftliches Kolloquium am 17.11.23: Ratskeller Wismar; Durchführung: Ing.-Büro Niehsen-Baumann.

Grundsätzlich kommen für die Konditionierung von Raumluft verschiedene Wirkungsprinzipien in Frage. Darunter die Erwärmung oder Absenkung der Temperatur sowie die Beeinflussung des Feuchtegehaltes über Be- und Entfeuchtung oder feuchtegesteuerte Lüftung. Weiterhin kann die Erwärmung der Bauteilkonstruktion (z. B. Wärmebrücken, lokaler oder übergreifender Bauteile) oder Einfluss auf das Mikroklima (z. B. über Heizflächen oder Luftströmung) erfolgen. Aus ressourcen- und umweltschonender, denkmalpflegerischer sowie wirtschaftlicher / finanzieller Sicht werden derartige bauliche Änderungen wie oder der Einbau einer Lüftungs- oder Vollklimaanlage erst als letzter Ausweg in Betracht gezogen. Aufgrund der umfangreichen und notwendigen Voruntersuchungen, kostenintensiven Umbauarbeiten und hohen Betriebskosten sowie der Gefahr einer klimatischen Verschlechterung bei mangelnder Expertise, defekter Technik oder fehlender Wartung, werden diese Systeme an dieser Stelle nicht weiter erläutert. Interessante Ansätze zur Nutzung von Solarenergie oder passiv konditionieren Systemen bieten Ryhl-Svendsen et al. (2013) oder Klemm (2013).

Aus denkmalpflegerischer Sicht wird das Herausnehmen eines Ausstattungsstückes aus seiner ursprünglichen Umgebung und Verbringung in andere Räumlichkeiten (z. B. Pfarrhaus, Museum, Depot) als das ungünstigste Szenario empfunden. Die so entstehende Dekontextualisierung wird auch in der präventiven Konservierung als große Gefahr für ein Kunstwerk betrachtet. In seltenen Einzelfällen kann dieser Schritt dennoch notwendig werden und so aus konservatorischer oder Eigentümer-Sicht der einzige Weg für eine Erhaltung sein. Im folgenden Kapitel wird eine Entscheidungshilfe vorgestellt, welche die unterschiedlichen Sichtweisen, Varianten und Anforderungen gegenüberstellt und eine Unterstützung in der individuellen, aber möglichst objektiven Betrachtung bieten soll.

6.2 Bewertungsmatrix für (anthropogen) geschädigte Tafelbilder

Im Rahmen des Projektes wurden verschiedene Sichtweisen, Varianten und Anforderungen zur Erhaltung derart geschädigter Holztafelbilder diskutiert. Auch die Auseinandersetzung mit verschiedenen Holztafelbildern als Vergleichsbeispiele floss in die Überlegungen ein.

Darunter z. B. konkret das „*Aschaffenburger Tafelbild*“[105] (k. A., 1240/50; Museen der Stadt Aschaffenburg); das „*Martyrium des hl. Potentinus*“[106] (k. A., 1. H. 16. Jh., Klosterkirche Steinfeld, Lkr. Schleiden), „*Der Zinsgroschen*“ (Tizian, 1488/90 - 1576, Gemäldegalerie Alte Meister, Dresden), „*Der Hochmut der Hl. Katharina*“[107] (Meister des Leitmeritzer Altars, gegen 1470 - nach 1515, Kemenate der Veste Coburg) und weitere. Generell können in fast allen Kirchen Holztafelbilder oder Altarretabel gefunden werden bzw. könnten auch gefasste Altar-Holzkonstruktionen weitestgehend als Transferbeispiele angesehen werden. Zahlreiche Beispiele deutscher Tafelmalerei des Spätmittelalters finden sich auch in Museen, darunter z. B. die Pinakotheken in München oder das Germanische Nationalmuseum in Nürnberg (s. Hess

[105] Austausch mit Fr. Cornelia Hagn, Dipl.-Restauratorin, ehemals BLfD, Fr. Sabine Denecke, Dipl. Restauratorin Museen der Stadt Aschaffenburg und Hr. Prof. Dr. Klaus Dreiner, Professur für Holzbe- und Verarbeitung, HNE Eberswalde sowie s. Emmerling & Ringer, 1996.
[106] Freundliche Mitteilung von Hr. Marc Peez, Leitung Restaurierung organischer Materialien, LVR-Amt für Denkmalpflege im Rheinland sowie Wesenberg, 1962, S. 278-279.
[107] Freundliche Mitteilungen u. a. von Hr. Heiner Grieb, Dipl.-Restaurator, Kunstsammlungen der Veste Coburg.

et al., 2019; Baumbauer et al., 2023). Letztere stellen u. a. eine umfassende online Datenbank zum Projekt kunsthistorische und kunsttechnologische Erforschung der Gemälde im Germanischen Nationalmuseum (in drei Phasen) zur Verfügung[108].

Welche Alterungsspuren werden in welchem Umfang zugelassen oder eben nicht? Gilt eine Patina als störend und weicht vom ursprünglich gewünschten Eindruck des Künstlers ab oder gilt sie als bedeutungsvolle Spur der langjährigen Geschichte und somit Zeitzeugnis eines gewachsenen, erhaltungswürdigen Zustandes? Maltechnische Schäden führen zum Beispiel häufig zu einer Überarbeitung oder Abnahme gefährdeter Mal- oder gefährdender Bindemittel. In Freising wurde diese Problematik besonders deutlich, da die Schollen im jetzigen Zustand nur durch Stauchungen oder Beschneidungen plan gelegt werden könnten, was einen Subtanzverlust bedeuten würde. Gleichzeitig muss festgestellt werden, dass die Gesamtkonstruktion – trotz oder gerade wegen – der Gratleisten, aber auch grundsätzlich hohen Fertigungsqualität, insgesamt sehr plan und wenig verformt ist. Ob eine Änderung einer starren Konstruktion zugunsten der Materialentspannung dienlich sein kann und die Folgeerscheinungen (potenzielle Verformung und Wölbungen) hingenommen werden können, bleibt stets zu diskutieren. Die Einschätzung variiert demnach von Kunstwerk zu Kunstwerk und erfordert individuelle Betrachtungen.

Eine Erörterung der Lebensspanne zeitgenössischer Kunst anhand der Sammlung der National Galleries of Scotland (dort u. a. bezogen auf die Alterung durch Lichteinfluss) bieten z. B. Griffin et al. (2024). Sie arbeiten beispielsweise verschiedene Erhaltungsmodelle durch „*Kontrolle*“ (z. B. Lagerungsbedingungen und präventive Maßnahmen), „*wiederholte Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen*“, „*Ersetzen des Originals*“, „*Akzeptanz des Originals*“ (mit den entstehenden Veränderungen oder Schäden) und „*Akzeptanz einer kürzeren Lebensspanne*“ heraus. Beim Ersatz kann es sich sowohl um eine identische Kopie handeln, als auch gedruckte Versionen / Ausstellungskopien (z. B. Druck eines Fotos der originalen Fotografie) oder physisch ähnliche, aber nicht identische Kopien (z. B. Gipsabdruck einer Steinskulptur). Dabei sind laut ihnen sowohl Status, Vermittlung als auch Kontext des Stellvertreters wichtig, um Verwirrungen in der Zukunft oder Enttäuschungen für Besuchende zu vermeiden. Die Akzeptanz des Originals und Akzeptanz kürzerer Lebensspannen führen allerdings unweigerlich zu Veränderungen am Kunstwerk und unter Umständen zu einer schnellen bis hin zur vollständigen Zerstörung. Trotzdem sollte die Variante, das Kunstwerk in seinem aktuellen, wenn auch schädlichen Klima, zu belassen – genauso wie die Herausnahme aus einem solchen – jeweils als Alternative für eine objektive Bewertung mitgedacht werden. S. auch Henderson & Waller (2024).

Die verschiedenen Sichtweisen, Varianten und Anforderungen zur Erhaltung derart geschädigter Holztafelbilder wurden aufgrund der Komplexität der Fragestellung und zu berücksichtigenden Faktoren in eine Bewertungsmatrix überführt. Dabei werden verschiedene Veränderungsszenarien (Varianten) sowie Anforderungen in der Beurteilung (Kriterien) gegenüber-

[108] URL: https://tafelmalerei.gnm.de/ [Stand August 2024].

gestellt. Je nach Sichtweise ergeben sich zudem unterschiedliche Gewichtungen (z. B. konservatorische-, denkmalpflegerische- oder Eigentümer-/Nutzendenansicht). Als Referenz zur diskutierenden Veränderung wird der Ist-Zustand (Status quo) vor Beginn des jeweiligen Projektes gesehen. Die Varianten erheben keinen Anspruch auf Vollständigkeit, können in anderen Projekten ggf. anders lauten oder zum Teil auch kombiniert zur Anwendung kommen. Für das Projektteam ergaben sich die folgenden Varianten:

1. Status quo
2. Nutzungsänderung
3. Änderungen am Tafelbild
4. Änderungen der Raumsituation
5. Dekontextualisierung / Entfernung aus dem Denkmal

6.2.1 Status quo

Als Status quo wird die Ausgangssituation vor Beginn des jeweiligen Projektes gesehen. Hierbei erfolgt keine Änderung der gefährdenden Parameter. Aus konservatorischer Sicht wäre es dann zumindest notwendig Notmaßnahmen zum Substanzerhalt (z. B. eine Notsicherung/Festigung besonders gefährdeter Bereiche und Reinigung) durchzuführen.

6.2.2 Nutzungsänderung

Wie unter 6 und 6.1 beschrieben, kann eine Änderung der Nutzung über organisatorische oder logistische Maßnahmen (z. B. Heizung, Lüftung, Umgang mit Besuchsgruppen und Steuerung der Besucherzeiten und –anzahl) eine Klimastabilisierung schaffen. Müssen Arbeitsschutzrichtlinien erfüllt werden, kann eine Gegenüberstellung der Anforderungen der Personengruppen mit jenen der Kunstwerke Schlüsselpunkte aufzeigen. Körpernahe Wärmequellen, Abschirmung oder Einhausung (der Personen oder der Kunstwerke) können v. a. im Winter sinnvoll sein. Ist die Nutzungsänderung nicht ausreichend, kommen objektnahe Veränderungen wie z. B. *Be- und Entfeuchtungsgeräte* in Betracht. Auch wenn Vorschaltgeräten bereits den Energieverbrauch der Geräte reduzieren, bedeutet dies jedoch einen Energie- und Wartungsaufwand. Es wäre daher wünschenswert möglichst ressourcenschonende und umweltfreundliche Systeme anzuwenden.

6.2.3 Änderungen am Tafelbild

Dazu gehören die (präventive) Konservierung und Restaurierung. Die präventive Konservierung beschäftigt sich dabei mit der Verminderung schädigender Einflüsse wie Licht, Klima, Schadstoffe/Materialemissionen und materialzerstörende Organismen. Unterstützend werden dafür Messtechniken und Monitoring, Risiko- und Katastrophenplanung sowie regelmäßige Pflege und Wartung angewendet. Im Falle der Konservierung beiziehen sich die Maßnahmen in der Matrix vor allem auf den ggf. notwendigen Substanzerhalt, d. h. u. a. Reinigung, Festigung, Verbesserungen der Konstruktion und Stabilität und zugehöriges. Die Restaurierung bezieht sich dann auf größere (ggf. früher erfolgte) Eingriffe in die Konstruktion (z. B. im Fall von Rückseitensystemen wie Parkettierung, Stützrahmen, Einschnitten, Dünnungen, etc.) oder ästhetische Maßnahmen wie z. B. Änderungen am maltechnischen Aufbau (z.

B. Firnisreduktion oder –abnahme). Zu diskutierende Maßnahmen können wie oben beschrieben (offene) Klimakammern und Rückseitenschutzmaßnahmen, Vitrinen oder passive Klimatisierung/Puffermaterialien sein.

6.2.4 Änderung der Raumsituation

Dieser Punkt bezieht sich auf bauliche Änderungen der Raumsituation, so z. B. über den Umbau an Böden, Wänden oder Gemäuer (z. B. Dämmung, Isolierung) sowie den Einbau von Drainagen, Temperierungen, Lüftungs- oder Klimaanlagen sowie Verglasungen oder Windfängen. Da diese häufig einen massiven Eingriff in originale Substanz bedeuten und bauphysikalische sowie finanzielle Fragestellungen aufwerfen, sind hier tiefergehende Untersuchungen durch entsprechende Fachleute und Planungsbüros sowie die im Genehmigungsverfahren beteiligten Instanzen unabdingbar. Es empfiehlt sich eine umfassende Projektplanung vorzusetzen. Unter diese Variante wurden darüber hinaus auch (offene oder geschlossene) Klimavitrinen gezählt. Auch hier ist eine genaue Planung durch entsprechende Fachpersonen erforderlich.

6.2.5 Dekontextualisierung / Entfernung aus dem Denkmal

Eine weitere Variante kann die Verbringung an einen anderen, geeigneteren Ort sein. Wie zuvor beschrieben, gilt es auch hier verschiedene Sichtweisen zu berücksichtigen. Die fast schon philosophische Frage, ob ein Kunstwerk besser in seinem Kontext, dem Denkmal oder in einem – in Anbetracht zeitlichen Wandels – mittlerweile vielleicht besser geeigneten, musealen Raum, erhalten werden kann, ist intensiv zu diskutieren und mit allen Beteiligten abzustimmen. Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass Ausstattungsstücke häufig eine Art „Gewohnheitsverträglichkeit“[109] für ihren jeweiligen Aufbewahrungsort entwickelt haben und durch einen Transport in ungewohntes oder anderes Klima zu Schäden neigen. Neue Räumlichkeiten bieten neue Schadenspotenziale (z. B. durch eine andere Nutzung oder Exposition wie z. B. Heizung oder Lichteinfall). Auch die Überfüllung von Museen und Aspekte der Nachhaltigkeit (z. B. Ressourcen- und Kostenaufwände für ggf. notwendige Klimavitrinen am neuen Aufstellungsort; s. Chelazzi et al. (2024)) sind von Bedeutung.

[109] Ob umgekehrt auch eine Gewöhnung an immer trockener werdende Umgebungsbeidnungen möglich ist, bleibt abzusehen.

Anhand dieser Varianten wurden in der Matrix verschiedene Kriterien – s. Tabelle 6-1 – gegenübergestellt.

Tabelle 6-1: Auswahl einiger Kriterien zur Beurteilung verschiedener Erhaltungsvarianten (*alphabetische Auflistung; beliebig und je nach Fallbeispiel erweiterbar*)

AUFWAND UND UMSETZBARKEIT
Wie hoch ist der Aufwand für die Umsetzung der Variante und ist dies (langfristig) leistbar?
Stichworte: baulich; bauphysikalisch; denkmal- und kunstwerkverträglich; finanziell; personell, technisch; räumliche und Nutzungsvoraussetzungen / Anforderungen; von allen Beteiligten genehmigungsfähig und gewünscht? Einplanung von Voruntersuchungen, technischen und konservatorisch-restauratorischen Wartungsarbeiten; Hinzuziehung von Planungsbüros, Fachleuten, Genehmigungsbehörden; u. v. m.
ÄSTHETIK
Ist die Ästhetik und Lesbarkeit (weiterhin) gewährleistet?
Stichworte: Raum-, Gemälde-, Betrachteransicht; z. B. optische Störung durch Vitrinen möglich; u. v. m.
ERFOLGSCHANCEN (konservatorische Nachhaltigkeit)
Wie nachhaltig ist die Variante? Wie hoch sind die Erfolgschancen für den Erhalt einer Änderung?
Stichworte: Konservatorische Nachhaltigkeit einer Maßnahme; mögliche Vergrößerung notwendiger Restaurierungszyklen; Kunstwerkschutz; u. v. m.
HISTORISCHER KONTEXT UND NUTZBARKEIT
(Wie) ist der historische Kontext und die Nutzbarkeit (je nach Variante) weiterhin gewährleistet?
Stichworte: Erhaltung und Übermittlung künstlerisch, geschichtlich, wissenschaftlich oder baulich bedeutender Denkmäler, deren Ausstattung sowie Bedeutung; Einbindung in Orts-, Raum-, oder gesellschaftliche und soziale Strukturen sowie religiöse Nutzung; Teil historischer Zusammenhänge, die für die Zukunft überliefert werden sollen; Funktion des Wissenstransfers historischer Zeugnisse für die Gesellschaft und Zukunft; u. v. m.
LANGFRISTIGE ERHALTUNG UND VERLUSTRISIKEN
(Wie) ist die langfristige Erhaltung (je nach Variante) weiterhin gewährleistet? Wie hoch ist das Verlustrisiko? Wird / bleibt durch die jeweilige Erhaltungsvariante eine Konservierung möglich?
Stichworte: Verlust des Kunstwerkes oder immateriellen Erbes (Informationsverlust) durch Unwissenheit über die Zugehörigkeit, Herkunft oder historische Nutzung eines Kunstwerkes / Ausstattungsstückes (z. B. bei Dekontextualisierung mit Personalwechsel oder im Laufe von Jahren / Jahrzeiten häufig der Fall). Aber auch hinsichtlich der Eignung der Variante für konservatorisch-restauratorische Erhaltung der Substanz bzw. Verlustrisiko ohne Eingriffe; Vorzustand und Vorschädigung des betrachtetet Kunstwerkes, Restaurierungsethiken (z. B. Transport, Eingriffe); frühere Restaurierungsmaßnahmen; u. v. m.
NACHHALTIGKEIT
Wie nachhaltig ist die Variante?
Stichworte: Ressourcenverbrauch /-schonung, CO_2-Emissionen, Umweltauswirkungen, Energieverbrauch und –effizienz; ethische Fragen; u. v. m.
ÖFFENTLICHE ZUGÄNGLICHKEIT
Ergibt sich durch die Variante eine andere Zugänglichkeit - mit neuen Vor- und Nachteilen?
Stichworte: Nutzungs- und folglich Klimaänderungen; veränderte Exposition und neue Schadensrisiken (s. u.); Zugänglichkeit; Monitoringmöglichkeiten; etc. Aber auch als Chance: öffentliche/mediale Aufmerksamkeit (z. B. finanzielle Beteiligung am Erhalt über Spenden), bessere Vermittlung/Überlieferung von Informationen; u. v. .m
SCHADENSRISIKEN
Ergeben sich durch die Variante andere Schadensrisiken?
Stichworte: Brand, Flut, Diebstahl, Vandalismus, Havarien, Unfälle, Technikausfall, Abnutzung, Verschleiß Klima, Licht, Schädlinge, Schimmel, Schadstoffe, Unwetter, Erdbeben, Gewalttaten (SILK-Leitfaden: s. SILK, 2024) sowie Transport, Lagerung, Klimaänderungen, u. v. m. (siehe Risikomanagement); potenzielle Veränderung der Schadensrisiken durch Änderung des Standortes oder der Raumsituation; Einplanung entsprechender Schutz-, Monitoring- oder Notfallmaßnahmen; u. v. m.

Für die bessere Verständlichkeit werden die Kriterien im vorliegenden Bericht in der Matrix (s. Abbildung 6-1) stark reduziert und vereinfacht dargestellt. Sie können auf das jeweilige Projekt abgestimmt beliebig ergänzt und erweitert werden. Je nach Gewichtung der jeweiligen Kriterien im Gespräch mit allen Beteiligten schneiden die Varianten unterschiedlich ab.

Die Einteilung kann beispielsweise anhand eines Zeichen-, Ampel- oder Farbsystems (z. B. ++ / + / o / - / - - oder + / o / - oder ◆ = sehr gut / ◆ = mittel / ◆ = schlecht) sowie über Zahlenwerte (z. B. 1 - 5 oder 1 - 10) erfolgen. Die Zahlenwerte eignen sich für eine möglichst einfache Berechnung inklusive ihrer Gewichtung (z. B. in Microsoft Excel) sehr gut. Je nach konkreter Situation werden die einzelnen Kriterien unterschiedlich gewichtet, um die Varianten bewerten. Das Ergebnis zeigt die Variante auf, die unter Berücksichtigung aller Kriterien am besten abschneidet.

Die Matrix kann dementsprechend als Tool oder Denkanstoß zur möglichst objektiven Einordnung gesehen werden (s. a. Martens & Schellen, 2013). Wie die endgültige Entscheidung ausfällt, hängt häufig noch von weiteren Kriterien ab. So können politische Entscheidungen oder finanzielle Möglichkeiten eine überproportional große Rolle spielen.

		KRITERIEN								
	VARIANTEN	AUFWAND / UMSETZBARKEIT	ÄSTHETIK	ERFOLGSCHANCEN	HISOTIRSCHER KONTEXT / NUTZBARKEIT	LANGFRISTIGE ERHALTUNG / VERLUSTRISIKEN	NACHHALTIGKEIT	(ÖFENTLICHE) ZUGÄNGLICHKEIT	SCHADENSRISIKEN	Σ
	GEWICHTUNG	0,20	0,05	0,10	0,20	0,20	0,10	0,10	0,05	1,00
1	STATUS QUO	3	3	5	3	4	2	3	2	3,25
2	NUTZUNGSÄNDERUNG									0
3	ÄNDERUNGEN AM TAFELBILD									0
4	ÄNDERUNGEN AN DER RAUMSITUATION									0
5	DEKONTEXTUALISIERUNG	5	1	5	1	1	1	5	1	2,6

Abbildung 6-1: Exemplarische Matrix als Entscheidungshilfe (Grafik: Projektteam).

6.3 Fallbeispiel Freising

Hinsichtlich der zukünftigen Lagerung des Tafelgemäldes konnten gemeinsam mit den Projektbeteiligten Strategien überlegt und diskutiert werden. So zeigte sich in der Simulation, dass die passive Be-/Auffeuchtung von der Rückseite ohne Einbeziehung des an der Vorderseite anliegenden Raumklimas nicht nur ideal ist, da sie im Materialverbund Gradienten erzeugt, die nicht zuträglich für die Erhaltung des Tafelgemäldes sein könnten. Daher sollte im Fall einer passiven Be-/Auffeuchtung eine dynamische, auf das vorne anliegende Raumklima reagierende Methode oder eine zusätzliche Klimapufferung auf der Vorderseite vorgesehen werden. Dies könnte beispielsweise durch eine Verglasung im Sinne einer (offenen) Klimavitrine konzeptioniert werden. Im Folgenden werden die umgesetzten Maßnahmen am Fallbeispiel veranschaulicht.

6.3.1 Konservierungsziel

Bereits vor Projektbeginn wurde als Ziel für das Tafelbild in Freising eine „Konservierbarkeit“ angestrebt. Diese soll per Definition die Substanz erhalten und (weiteren) Materialverlust verhindern. D. h. sie umfasst stabilisierende Arbeitsschritte (u. a. Festigung und Reinigung; s. 7.1.4) und die Minimierung von Schadensursachen und -prozessen über präventive Maßnahmen (z. B. Sicherstellung geeigneter Umgebungsbedingungen sowie Wartung und Pflege; s. 6.3.2, 6.3.3 und 7.1).

Bedingt durch die Schrumpfung des Holzträgers war kein ausreichender Platz mehr für die Niederlegung der Dachschollen vorhanden, ohne diese Beschneiden, Stauchen oder Übereinanderlegen zu müssen. Es wurde daher rückgeschlossen, dass durch eine Befeuchtung und hoffentlich Ausdehnung des Trägers eine Konservierbarkeit der Malerei erreicht werden

könnte. In der Theorie müsste sich die Ausdehnung zumindest an die ursprüngliche Ausdehnung zum Zeitpunkt der letzten Festigungsmaßnahme (2007) annähern, da die Malschicht zu diesem Zeitpunkt plan auflag und die Wahrscheinlichkeit gravierender plastischer Deformationen zwischen 2007 und 2021 verhältnismäßig gering erschien.

Anhand vorliegender Restaurierungsberichte wird angenommen, dass bereits früher moderate Stauchungen der Malerei stattgefunden haben, da ein Flexibilisieren der Malschicht über Wärme, Feuchtigkeit oder Bindemittel gängige Praxis bei der Festigung ist. Zum Teil ist auch die Verwendung von Wärme dafür dokumentiert (Hess & Thieme, 2006/07).

Der Frage, ab wann die Dachschollen konservierbar sind, sollte über das Malschichtmonitoring (s. 3.1.6 und 4.1.6) geklärt werden. Die exemplarische Messung einer kontrolliert abgenommenen Malschichtblase in Korrelation mit der Fehlstellenfläche ergab, dass die Scholle zum Zeitraum der Messung (r.F. bei ca. 65%) wieder in die Fehlstelle passt. Die Beurteilung wurde allerdings z. T. durch leichte Messungenauigkeiten in notgesicherten Bereichen mit Japanpapier erschwert. Weiterhin bestand die Scholle aus mehreren Einzelteilen, welche so genau wie möglich mit Japanpapier zusammengefügt wurden. Dennoch konnten veränderte Lücken oder Spalten in Bereichen der Bruchkanten nicht ausgeschlossen werden. Ein Vergleich der Fehlstellenflächen nach Auffeuchtung (von 65 % auf 70 % r.F. in 6 Tagen) zeigte, dass die Farbscholle in beiden Feuchtigkeitsbereichen zu passen scheint, bei 70 % r.F. allerdings noch minimal mehr Platz (Mikrobereich) zur Verfügung steht.

Die Untersuchung der weiteren Bereiche über makroskopische Sichtung und einfach Längenmessungen zeigte, dass bei einer r.F. von 65% große Teile der Malschicht in einen konservierbaren Zustand gebracht werden können und auch, dass im Projektverlauf in diesem Feuchtigkeitsbereich keine weiteren Malschichtlockerungen und -verluste auftraten. Kartierung, Beurteilung und Umgang mit den restlichen Bereichen s. 7.1.4.

Bezüglich der Erreichbarkeit zeigten die Untersuchungen und Messungen der generellen Ausdehnung durch die Befeuchtung, dass die maximale Ausdehnung hinter den Prognosen zurückbleibt. Dies liegt zum einen daran, dass die Installation der Messtechnik für die geometrische Verformung (Triangulationslaser November 2022; Extensometer Dezember 2022) erst lange nach dem Aufbau der Einhausung (April 2022; kurz nach der beheizten Winterperiode mit starken Bewegungen der Tafel) erfolgte. Nach der Installation war das Klima innerhalb der Einhausung bereits so gut stabilisiert, dass die stattfindende Ausdehnung mit nicht (mehr) messtechnisch erfasst werden konnte. Das Ausmaß der Verformung bei ungünstigen klimatischen Situation konnte aber vor Fertigstellung der Einhausung mittels Laserscanvergleichen festgestellt werden. Aus konservatorischer Sicht aber war der Aufbau der Einhausung von vor Erhalt der Messtechnik dringend notwendig und ein späteres rücktrocknen auf niedrigere r.F. Bereiche ausgeschlossen. Weitere Gründe für die ausbleibende Ausdehnung auf niedrigere r.F.-Bereiche sind höchstwahrscheinlich plastische Verformungen, Behinderungen des Quellens und Schwindens durch äußere Zwänge (z. B. Zierrahmen, Gewicht, schlechte Gleitfähigkeit; eine Beeinträchtigung durch die Gratleisten wurde über Messungen mit mm-Papierchen, s. 3.1.4.3 und 4.1.4.3, eher ausgeschlossen).

In den folgenden Abschnitten wird genauer auf die Klimatisierung und Erhaltungsvarianten eingegangen. Weitere Informationen zur Weiterführung nach Projektende (Konservierungskonzept und Empfehlungen zum weiteren Vorgehen) s. 7.1.

6.3.2 Vorüberlegungen zur Klimastabilisierung

Bei der Durchführung einer Klimastabilisierung über gezielte Be- und Entfeuchtungsmaßnahmen sind weitere individuelle Einschränkungen relevant. Diese können u. a. sein:

- Finanzielle, personelle und technische Umsetzbarkeit
- Anforderungen aus der Umgebung und vorherrschenden Raumsituation (andere Kulturgüter/Materialien, räumliche und technische Einschränkungen, öffentliche Zugänglichkeit, Nutzung, Schimmelrisiko etc.).
- Aufbau und Geschichte des Kunstwerks selbst (irreversible Veränderungen/Überarbeitungen oder Vorschädigungen; Konstruktion; inkompatible Materialien, etc.)
- Ethische und wirtschaftliche Fragen zur Nachhaltigkeit, Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch

Es ist daher nicht immer möglich, den gewünschten Klimakorridor in situ umzusetzen. Weitere *Grenzen und Gefahren* für das Kunstwerk *durch das Eingreifen in die Umgebungsbedingungen* geht stets mit der Gefahr einer potentiellen Schädigung einher (Schimmel, Insektenfraß, Klebkraftverlust von Bindemitteln, chemische Reaktionen und Wechselwirkungen, etc.). Bei aktiver Klimatisierung besteht zudem die Gefahr von Schäden durch Ausfall der Regelungstechnik und in Folge plötzliche Änderungen des Klimas. Generell sollte sich nach einer erfolgreich durchgeführten Maßnahme dringend eine Wartung bzw. ein Monitoring anschließen, um Veränderungen von Klima oder Kunstwerk frühzeitig zu bemerken und größere Schäden zu vermeiden.

1. Vorbedingungen am Fallbeispiel

Bezüglich der Umgebung und vorherrschenden Raumsituation ergeben sich besondere Anforderungen aufgrund des historischen Gebäudes (z. B. fehlende Steckdosen und Internet für die Installation der Messtechnik, Lichteinfall), der übrigen Ausstattung (Sakristeischrank, zum Tafelbild zugehörige Mensa, Arbeitstribüne – die vor Projektbeginn erbaut wurde und den maximalen Arbeitsplatz vorgibt), der Einschränkung der Nutzung und Nutzenden sowie gleichzeitig eine Abhängigkeit der Nutzung und Nutzenden für die Arbeitszeiten. Auch die Nutzung und folglich Notwendigkeit zur Befolgung von Arbeitsstättenregelungen sollten thematisiert werden.

Konservatorische Herausforderungen ergaben sich aus dem hygroskopischen Materialverhalten bei Be-/Auffeuchtung bzw. Rücktrocknung sowie die Gewährleistung von langfristig stabilen Klimakonditionen – insbesondere bei aktiver Klimatisierung. Weiterhin war die Einschätzung des Aufbaus und der Geschichte des Kunstwerks ein aufwendiger Prozess, bei welchem u. a. irreversible Veränderungen/Überarbeitungen, Vorschädigungen (Schädlingsbefall, Festigungsmittel, neuer Überzug); komplexe Konstruktionen (Gratleisten, Rahmung, aneinandergefügten Einzelbretter, etc.); unterschiedliche Materialien (Holzträger, Grundie-

rung, Mal- und Bindemittelschichten, Kaschierungen, Rückseitenanstriche, etc.) bedacht werden mussten. Neben der Sorge vor weiteren Schäden oder einer Zerstörung ist auch die Entwicklung und Durchführung eines geeigneten Klimakorridors sowie Konservierungskonzeptes herausfordernd. Mögliche Schäden sind Risse, Fugenöffnungen, Verformungen, Malschichtverluste oder Schimmel. Letzterer ist nicht nur unmittelbar am Tafelgemälde, sondern auch an angrenzenden Stellen zu berücksichtigen. Messtechnische Schwierigkeiten spiegelten sich zum einen in der technischen Ausstattung des Denkmals, aber auch in der Kompatibilität der Messtechnik unterschiedlicher Hersteller, Konzeption des umfassenden Monitorings sowie dem Datenmanagement, aber auch der Störungsanfälligkeit vor Orts wider.

Ethische Fragen bildeten sich bezüglich den unterschiedlichen Projektbeteiligten (Eigentümer, Nutzende, beratende Fachbehörden, Fachpersonen der unterschiedlichen Disziplinen, etc.). Auch die Vertretbarkeit des Projektes und der für das Messkonzept notwendigen Eingriffe in das Original konnten als Risiken herausgestellt werden. Wirtschaftlich ergaben sich vor allem Fragen zur Nachhaltigkeit der Maßnahmen sowie über die Energieeffizienz und Ressourcenverbrauch. Aus energetischen, wie auch aus bauphysikalischen Gründen sollte eine Einhausung zur Klimastabilisierung diskutiert werden, um das zu befeuchtende Raumvolumen (und somit den Energieaufwand dafür) sowie kurzfristige klimatische Schwankungen zu reduzieren.

Finanzielle und personelle Risiken ergaben sich vor dem Projekt durch die Unklarheit zum weiteren Umgang mit dem wertvollen Tafelbild, seinen Schadensursachen und dem komplexen Schadensbild. Für freiberuflich tätige Restauratorinnen und Restauratoren sowie einen einzelnen Eigentümer sind die entstehenden Kosten und personellen Aufwendungen für die Betreuung, Wartung und Bearbeitung der Fragestellung nur bedingt leistbar. Weiterhin war die interdisziplinäre Expertise dringend für die sichere Durchführung des Projektes notwendig. Weitere Überlegungen galten der Bearbeitung des Tafelbildes in situ (z. B. Fahrzeiten, Materialtransporte), der z. T. öffentlichen Zugänglichkeit der Räumlichkeiten und Kosten für notwendige Materialien, Untersuchungen sowie Messtechnik. Auch für die Weiterführung und Wartung sollte eine Lösung gefunden werden.

2. Risikomanagementplan: wie wurde mit den wichtigsten Risiken verfahren?

Finanzielle und personelle Risiken sowie die interdisziplinäre Expertise konnte durch die Bildung eines Projektteams und Bewilligung durch die DBU abgesichert werden. Über die Publikation und Vermittlung der Ergebnisse sollen gerade freiberuflich tätige Restauratorinnen und Restauratoren sowie Planungsbüros einbezogen werden und von den ermittelten Ergebnissen profitieren können. Das Gemälde war zu Projektbeginn nicht transportfähig und auch aus klimatischen Gründen war eine in situ Bearbeitung bevorzugt. Über den Bau der Einhausung mit einer verschließbaren Tür wurde die Zugänglichkeit auf das notwendige Minimum reduziert. Dies führte auch dazu, dass es weniger ästhetische Anforderungen an die Messtechnik sowie keine Notwendigkeit der Diebstahlsicherung o. ä. gab. Eine Brandschutzanlage war im Gebäude vorhanden.

Dank eines Sponsorings an den Domberg durch Firma Adldinger wurde der Bau einer Einhausung möglich. Durch Firma Gerlach[110] konnten so weitere Steckdosen geschaffen werden; auch eine Verbindung mit dem WLAN der Erzdiözese München Freising war im Projektverlauf möglich. Der Lichteinfall wurde über die Anbringung eines temporären Lichtschutzes verhindert. Die Mensa wurde aus der Einhausung entfernt; der Sakristeischrank regelmäßig vor Ort auf seinen Zustand kontrolliert und bei Bedarf gereinigt. Die Abstimmung für Ortstermine verlief dank einer guten Kommunikation hervorragend. Durch den Bau der Einhausung wurden die Nutzenden darüber hinaus nicht maßgeblich gestört.

Mithilfe der Grundlagenermittlung, Voruntersuchungen, Monitoringkonzept, hygrothermischen Simulationen, Klimaschrankversuchen und weiteren Untersuchungen (Kapitel 2-3) konnte abgeschätzt werden, wie sich das Tafelgemälde bei klimatischen Schwankungen verhält. Potenzielle Risiken konnten so über die Projektlaufzeit ausgeschlossen werden; der Holzträger schrumpfte nicht weiter und es entstanden keine neuen Schäden an der Malerei. Lediglich die bauliche Situation der Tribüne – mit einem Sakristeischrank der sich nicht mehr öffnen ließ – sorgte für Bedenken. Der sich noch vor der Projektzeit gebildete Schimmel im inneren des Schrankes sorgte wiederholt für mikrobiellen Bewuchs. Über eine Grundhygiene innerhalb der Einhausung und regelmäßiges konservatorisches Monitoring wurde der Befall kontrolliert. Die Schwierigkeiten der Messtechnik wurden über die Hinzuziehung eines IT-Experten gelöst. Über etwaige Stromausfälle wurde das Projektteam meistens vom Eigentümer informiert oder durch die Alarmfunktion der Software aufmerksam gemacht. So konnte stets eine möglichst schnelle Wartung erfolgen. Für die Ermittlung des Klimazielwerts anhand des „historischen“ Klimas (s. 2.3.1 und 3.1.3) sowie der Jahresmittelwerte der relativen Feuchte wurde die Gleichgewichtsfeuchte abgeschätzt. Ausgehend davon wurde die relative Feuchte erhöht, um eine Volumenzunahme zu bewirken. Bei der untersuchten Fallstudie ist für die langfristige Lagerung eine relative Feuchte über 60 % r.F. notwendig, die Temperatur kann dabei jahreszeitlich gleiten (vgl. a. Schmidt, 2017a und b). Zu niedrige r.F., bei denen vor Projektbeginn Schäden beobachtet werden konnten, wurden vermieden. Ziel ist es weiterhin, langfristig stabile Klimakonditionen über eine passive Klimatisierung zu erreichen.

Die ethischen Fragen wurden im Kern- und Projektteam, mit dem projektbegleitenden Ausschuss sowie externen Fachpersonen (u. a. Expertentreffen, Tagungen und Abschlussveranstaltung) diskutiert und umfassend beleuchtet. Der Bau einer Einhausung erwies sich aus energetischen, wie auch aus bauphysikalischen Gründen als sehr sinnvoll; so wurde das zu befeuchtende Raumvolumen (und somit den Energieaufwand dafür) verringert und gleichzeitig die kurzfristigen Klimaschwankungen reduziert.

6.3.3 Klimastabilisierung

Während des Projektes wurde auf klassische Methoden zurückgegriffen; wie in Punkt 3.1.3. und 4.1.3 Klimamonitoring beschrieben kamen ein Be- und ein Entfeuchter mit Vorschaltgeräten zum Einsatz, um einen breiten Klimakorridor (zunächst 50 - 74 % r.F., später 60 - 70 %

[110] Gerlach Elektrotechnik GmbH & Co.KG, Christian Gerlach, Wilpertingerstr. 12, 85375 Neufahrn.

r.F.) zum Schutz vor Extremwerten einzustellen. Da es im vorliegenden Projekt diverse Wärmequellen und –senken und auch eine nicht unerhebliche Stratifikation innerhalb der Einhausung gab, war zusätzlich eine mechanische Luftumwälzung nötig, um Kälteinseln mit lokal überhöhter r.F. zu verhindern. Aufbauend auf den bisherigen Erkenntnissen (Kapitel 2-3) konnten Auffeuchtungsversuche am realen Kunstwerk in der Einhausung durchgeführt werden. Dieser erfolgte mit besagtem Befeuchter in zwei Schritten von 65 % r.F. auf 70 % r.F. und anschließend auf 75 % r.F. Die Dauer einer Auffeuchtung wurde vorab auf ca. 7 - 10 Tage geschätzt. Es zeigte sich, dass diese erst nach 14 Tagen abgeschlossen waren. Trotzdem ergaben die Voruntersuchungen und Vorüberlegungen eine gute Näherung. Sie haben außerdem zum Verständnis verholfen, wie schnell die Tafel trotz der Größe auf klimatische Schwankungen reagiert.

Fazit ist, dass die langfristige Erhaltung am besten durch ein Auffeuchten des Tafelgemäldes und ein langfristiges Konditionieren auf mind. 60 % r.F. gewährleistet ist. Langfristig ist mit den Geräten ein Wartungsaufwand und Stromverbrauch verbunden, wodurch ressourcenschonendere Methoden, wie z. B. feuchteadaptive Puffermaterialien gewünscht waren. Hinsichtlich der Erzielung der erforderlichen Klimabedingungen, bestehen unterschiedliche aktive und passive Lösungen.

Die vielfältigen Möglichkeiten zur Stabilisierung des Objektzustandes ohne energie- und kostenintensive Klimavitrinen wurden im Rahmen des Projektes evaluiert, gesammelt und diskutiert. Unter Zuhilfenahme des bauphysikalischen Modells wurde vor Projektbeginn eine in situ Rückseitenbefeuchtung des Tafelgemäldes angestrebt. Hierbei wird nur der Luftraum hinter der Rückseite des Holztafelgemäldes konditioniert. Als besonders vielversprechend zeigte sich aufbauend darauf die rückseitige Befeuchtung mit Puffermaterialien. Kocan (2024) untersuchte dies praktisch im Rahmen einer Masterarbeit und stellte die Befeuchtung mit gesättigter Salzlösung (und elektronischer Steuerung) heraus. In Kleinversuchen konnte die Funktionstauglichkeit, speziell von gesättigten Salzlösungen für die Konditionierung bestätigt werden. Durch die Wahl des richtigen Salzes konnte gezielt die gewünschte r.F. erzeugt werden (s. Young, 1967, S. 242 und Eggert, 2022). Diese Variante verspricht im vorliegenden Fall eine wartungsärmere und ressourcenschonendere Klimatisierung des Tafelgemäldes ohne große bauliche Maßnahmen. Eine Untersuchung des Langzeitbetriebs unter Realbedingungen steht noch aus. Das DBU Projekt AZ 38338/01[111] führt aktuell entsprechende Versuche durch und könnte wertvolle Ergebnisse für eine spätere Umsetzung in Freising bieten. Mithilfe einer automatischen elektronischen Feuchtezufuhr nach Kocan (2024) könnten Verluste durch Diffusion oder Undichtigkeiten dann zuverlässig ausgeglichen werden. Im Betrieb fallen sehr geringe Kosten für das Nachfüllen des Wasserreservoirs und für restauratorische Erfolgskontrollen an.

[111] DBU AZ 38338/01: Schutz national wertvoller Kulturgüter durch Einsatz gesättigter Salzlösungen in Vitrinen zur Absorption anthropogener Luftschadstoffe. Projektleitung: Universität des Saarlandes Lehrstuhl für Messtechnik Fachrichtung 7.4 Mechatronik [Campus A5 1, 66123 Saarbrücken]; Förderzeitraum 01.01.2023 - 31.12.2024.

Zu beachten sind jedoch die Ergebnisse der hygrothermischen Simulationen, welche zeigten, dass bei einer reinen Rückseitenbefeuchtung ein großer Feuchtgradient innerhalb des Materialverbunds entstehen kann, der aus konservatorischer Sicht kritisch zu sehen ist.

Für den konkreten Fall des Freisinger Tafelbildes ist daher festzuhalten, dass langfristig eine Form von Abschottung vom ungeeigneten Sakristeiklima notwendig sein wird, da das Klima zeitweise zu stark von dem für das Gemälde verträglichen Klima abweicht (hohe Schwankungen). Dabei müssen die verschiedenen Risiken, wie z. B. Brand, Ausfall der Technik, Wartung sowie regelmäßiges Klima- und Oberflächenmonitoring bedacht werden. Zusätzlich sollte ein dauerhafter, denkmalverträglicher Lichtschutz am Fenster installiert werden, da die partielle direkte Bestrahlung mit Sonnenlicht ein nicht zu unterschätzendes Schadensrisiko-darstellt.

6.3.4 Anwendung der Bewertungsmatrix für das Tafelbild Freising

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. Es zeigte sich schon lange vor Projektbeginn und im Einvernehmen aller Beteiligten, dass der Status quo keine geeignete Erhaltungsstrategie ist (s. 2.2.2). Das Holztafelgemälde erfordert für die langfristige Erhaltung in der Sakristei andere klimatische Bedingungen, als sie durch die derzeitige Nutzung des Raumes als Schaltzentrale und Arbeitsplatz gegeben ist. Dennoch ist die Änderung der Nutzung einer Sakristei, als Teil des immateriellen Kulturerbes, nur bedingt möglich. Zur objektiven Beurteilung und Diskussion möglicher Lösungsansätze wurde die im Projekt entwickelte Bewertungsmatrix (s. 6.2) verwendet. Aus den Gesprächen mit allen Beteiligten (u. a. Nutzer, Eigentümer, Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege, Hochbauamt, Diözesanmuseum) haben sich im Verlauf mehrere Varianten herauskristallisiert; Abbildung 6-1 zeigt diese beispielhaft auf. Grundsätzlich standen zuletzt folgende Möglichkeiten anhand der zuvor beschrieben Anforderungen im Fokus:

A) Das Gemälde bleibt an seinem ursprünglichen und für die liturgische Nutzung vorgesehenen Ort.
B) Es wird ausgelagert, z. B. in ein Museum, um stabilere und für die langfristige Erhaltung potenziell förderliche klimatischen Bedingungen zu erzielen.

Für Fall **A** ergaben sich ergänzend unterschiedliche Überlegungen 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 oder das Gemälde konserviert / restauriert wird. Ziel wäre es hierbei, zukünftig so wenig, wie für die Erfüllung der Arbeitsstättenrichtlinien nötig, zu heizen und für die Behaglichkeit auf körpernahe Wärme (z. B. Sitzkissen, IR-Paravans etc.) zu setzen.

- Die Änderung der Raumsituation im Sinne einer “Raum in Raum“-Lösung, jedoch mit der Option das Tafelgemälde einzusehen oder eine offene Klimavitrine zu installieren.
- Das Raumklima der Sakristei durch das Einhausen der Nutzenden zu stabilisieren. Im kleinen Raum könnten die Behaglichkeitsansprüche energieeffizient umgesetzt werden.

Zum aktuellen Stand [nach Projektende] ist es gewünscht, das Gemälde an seinem ursprünglichen und für die liturgische Nutzung vorgesehenen Ort zu erhalten und eine (räumliche) Trennung der liturgischen und organisatorischen Abläufe in der Sakristei anzustreben. Eine Auslagerung (beispielsweise in ein Museum oder Restaurierungsatelier) ist momentan nur im Falle eines größeren Umbaus der Sakristei oder für eine fachgerechte Konservierung angedacht. Die konkreten Änderungen und Planungen der Raumsituation ergeben sich erst in einem der nächsten Bauabschnitte. Hier ist eine frühzeitige Einbindung aller Parteien für die Entscheidungsfindung geplant. Je nach notwendigen Maßnahmen und Platzangebot kann das Tafelbild vor Ort bleiben und es können ggf. Synergieeffekte genutzt werden, um nach Möglichkeit weitere Maßnahmen für eine stabilere Klimatisierung umzusetzen. Im Falle größerer baulicher Eingriffe, die nicht mehr kunstwerkverträglich sind, wird eine zeitweise Evakuierung von den Beteiligten diskutiert und restauratorisch begleitet ausgeführt. Dabei werden v. a. der fragile Zustand und die Größe Herausforderungen für einen verträglichen Transport darstellen. Während der Bearbeitung sind neben dem komplexen Schadensbild dann v. a. die Klimabedingungen zu beachten; s. 7.1.4 Konservierungskonzept.

Sollte eine dauerhafte Dekontextualisierung unumgänglich werden, müssten die Anforderungen, Bedingungen und Voraussetzungen dafür klar definiert werden. Neben der Sicherstellung des überlieferten Kontextes (sowohl in der Sakristei, als auch am späteren Aufbewahrungsort) müssten auch für die Neuaufstellung Klimavorgaben sowie eine regelmäßige konservatorisch-restauratorische Wartung und Pflege beachtet werden.

7 Fazit und Ausblick

Es ist hinreichend bekannt, dass trockenes Raumklima für den dauerhaften Erhalt von organischem Kunst- und Kulturgut nicht gut geeignet ist. Dies wird auch im Projektverlauf erneut deutlich, wo das Fallbeispiel, ein Holztafelbild, besonders in der trockenen Winterperiode starken Schaden nimmt. Auch klassische Klimakorridore aus dem musealen Umfeld von aktuell ca. 15 - 26 °C und einer r.F. von 40 % - 60 % (Deutscher Museumsbund, 2023) reichen im vorliegenden Fall nicht aus, um das Tafelbild an seinem ursprünglichen Ort zu erhalten (vgl. a. Schmidt 2017a und b). Gleichzeitig besteht in der Anwendung eines höheren Feuchtigkeitsbereichs eine Gefahr für übrige Ausstattungsstücke und feuchtigkeitsempfindliche Materialien (z. B. Schimmel, Mobilisierung von Salzen, Materialversagen, etc.) und die technischen und finanziellen Aufwendungen für die konstante Einhaltung eines solchen Korridors steigen. Auch aus Nachhaltigkeitsgründen wurde in den letzten Jahren vermehrt darauf geachtet, bestehende Klimakorridore aufzulockern und an Kosten, Ressourcen und wartungsintensiven Technikeinbauten zu sparen. Gerade beim Versagen moderner Techniken und einer plötzlichen und starken Änderung können unbeobachtet noch größere Schäden an fragilen Kunstwerken entstehen.

Die Nutzung der Denkmäler mit ihren spezifischen Herausforderungen (z. B. undichte Raumhülle, klimatische Probleme, Nutzung und fehlende Nutzung) und der hohe Wartungsaufwand erschweren häufig die konventionelle Klimatisierung des Raumes wie in einem Museum. Da Extremwetterereignisse wie u. a. feuchtwarme oder Trockenperioden, klimawandelbedingt stark zunehmen und eine Vielzahl an Denkmälern bedrohen, ist dies ohnehin nicht als oberstes Ziel anzusehen und aus Nachhaltigkeitsgründen eher zu vermeiden. Weiterhin sorgt der Rückgang an Kirchenmitgliedern vielerorts für finanzielle Engpässe und die Frage, wie denkmalgeschützte Kirchen und ihre Ausstattung möglichst langfristig erhalten werden können.

All dies unterstreicht die Wichtigkeit ressourcenschonender Maßnahmen zur Klimastabilisierung. Weiterhin zeigt es, wie stark die Entwicklung und Umsetzung einer geeigneten Erhaltungsstrategie von den örtlichen Begebenheiten, finanziellen, technischen und personellen Möglichkeiten aber auch der Nachsorge, Pflege und Wartung abhängt.

Das Projektteam bearbeitete zwischen Januar 2022 und August 2024 die vier Arbeitspakete Vorarbeiten und bisherige Aktivitäten, Mess- und Monitoringkonzept (AP1), Materialanalysen, hygrothermische Simulation und Klimaschrankversuche (AP 2), Aktive Klimatisierung am Beispiel des Tafelbildes in Freising (AP 3) und Entwicklung eines Handlungsleitfaden, Vermittlung und Publikation (AP 4).

Tabelle 7-1: Aufgabenbereiche zur Risikoabschätzung aus den Arbeitspaketen 1 bis 4.

RECHERCHE	MONITORING		SIMULATIONEN	LABOR-/ KLIMASCHRANK-VERSUCHE	
Literatur[112]	Klima	Holzträger	Rechnerisch	Klimaschrank-versuche	Sensorbe-festigung
Objektge-schichte	Malschicht	Schadstoffe	WUFI®	Auffeuchtungs-versuche	Holzfeuch-teversuche

[112] Die Literaturrecherche, u. a. zum Stand des Wissens uns der Techniken wurde bereits vor Projektbeginn durchgeführt sowie nach Projektende für die Publikation ergänzt.

Aufbauend auf der Risikoabschätzung einer Befeuchtung zur Ausdehnung (Recherche, Monitoring, Simulationen, Labor- und Klimaschrankversuche) konnte am Fallbeispiel Freising eine aktive Auffeuchtung bzw. Klimastabilisierung schadensfrei durchgeführt werden.

Wie vermutet, stellt das in situ Monitoring eine besondere Herausforderung dar (Internetanbindung, Stromausfälle, Eigentümerabhängigkeit, etc.). Die Tatsache, dass für den dargestellten Anwendungsfall (Klima-/Verformungs-/Holzfeuchtemonitoring) bislang kein umfassendes Datenloggersystem auf dem Markt verfügbar ist, stellte sich als nachteilig heraus. Um alle mit den verschiedenen Systemen erfassten Messdaten zu vereinen und auswerten zu können, ist daher mitunter mit hohem zeitlichen Aufwand verbunden. Künftig könnte die Verwendung von Komponenten, deren Messwertübertragung z. B. mittels LoRaWAN-Technologie erfolgt, eine vielversprechende anwenderfreundliche Alternative zu den herkömmlichen stationären Geräten darstellen. Stromausfälle und andere Unwägbarkeiten führten zu häufigen Messausfällen und Störungen. In Zukunft sollte über eine autarke Stromversorgung nachgedacht werden. Wenn sich das untersuchte Objekt in einem öffentlich zugänglichen Raum befindet, müssen zudem Sicherheitsaspekte (Schutz des Kunstwerkes und etwaiger Messtechnik und Gerätschaften vor Diebstahl, Vandalismus, o. ä. weiterhin Verkehrssicherheit wie z. B. Beachtung von Stolperfallen, Elektrik, Hinweisschilder, etc.) sowie ästhetische Gesichtspunkte (Ordnung der Messtechnik, Kabelführung, Elektrik, und ggf. auch Vermittlungsarbeit („Hinweisschilder im Falle von Videoüberwachung oder „Achtung, laufende Messung – bitte nichts bewegen oder verändern / Türen geschlossen halten“, etc.) beachtet werden. Der im Projekt erarbeitete Handlungsleitfaden (Abschnitt 8.1) liefert für vergleichbare Fälle wichtige Planungsgrundlagen, Hinweise und Empfehlungen.

Am gewählten Fallbeispiel wurde deutlich, dass eine nachhaltige, ressourcenschonende Lösung an das Objekt angepasst werden muss. Ohne eine Einbeziehung des Gesamtraums und der individuellen Umgebungsbedingungen ist eine definitive Lösung nicht möglich. Die im Projekt erprobten und simulierten Be-/Auffeuchtungsmethoden konnten auf Grund der angedachten Änderung der örtlichen Begebenheiten (Baumaßnahmen der Sakristei) noch nicht in situ umgesetzt werden. Dabei soll die Einbeziehung der Projektergebnisse in die Planung und Umsetzung baulicher, klimastbailisierender sowie konservatorischer Maßnahmen erfolgen.

7.1 Ausblick Fallbeispiel

Der Bau der Einhausung brachte zwar eine deutliche Stabilisierung des Klimas, um den Feuchtkorridor zu halten musste in den Wintermonaten trotzdem zusätzlich befeuchtet werden. Ob das konservierte Tafelgemälde die natürlichen Schwankungen im Jahresverlauf ohne weitere Klimatisierung verträgt, kann erst nach einer Konservierung und Optimierung der Nutzung festgestellt werden. Die Einhausung bleibt vorerst bestehen und wird weiter durch Be- und Entfeuchter klimatisiert. Die Umstellung auf eine nachhaltigere Lösung soll nach der Festlegung der zukünftigen Nutzung und möglichen baulichen Ertüchtigungen erfolgen.

Nach dem Projektende wird das Fallbeispiel in Freising weiterhin konservatorisch-restauratorisch durch das BLFD betreut. Dies erfolgt dann wieder im Rahmen der üblichen Fachbetreuung und nicht mehr in der Intensität eines drittmittelfinanzierten Forschungsprojektes.

7.1.1 Weiterführung des Monitorings

Das messtechnische Monitoring des Gemäldes wird über das Projektende hinaus mit reduziertem Umfang fortgeführt. So wird weiterhin das Raumklima an der Vorder- und Rückseite der Tafel und in der Sakristei aufgezeichnet. Auch die Oberflächentemperatur (Vorder- und Rückseite), die Holzfeuchte (bisherige vier Positionen), und die Verformung (vier Extensometer und drei Triangulationslaser) der Tafel werden weiterhin erfasst. Dafür bleibt auch die entwickelte Datenerfassung und Speicherung in einer Cloud aktiv. Der Echtzeitzugriff ist weiterhin möglich. Auch die Alarmierung bei Grenzwertüberschreitungen via E-Mail ist weiterhin aktiv. Parallel bleiben drei USB-Klimadatenlogger des BLfD vor Ort[113]. Zum Projektende wurden Markierungen mit einem Kreppklebeband auf der Tafelrückseite gesetzt. Diese sollen eine einfache spätere Messung (z. B. mit einem Meterstab oder Lasermessgerät) ermöglichen. Zum Messzeitpunkt am 02.07.24 ergaben sich für die linke Seite 180 cm und für die rechte Seit 189 cm innerhalb der jeweiligen Kreppmarkierung (Gesamt = 369 cm). Es ist angedacht, die im Rahmen des weitergeführten Monitorings ermittelten Messdaten drei Jahre nach Projektende auszuwerten und gemeinsam mit den Projektpartnern zu diskutieren. Es ist ebenso angedacht, ggf. weitere Streifenlichtscans durchzuführen.

7.1.2 Pflege & Wartung

Die Erfahrungen aus dem Projekt haben gezeigt, dass neben der Fernüberwachung der Messungen regelmäßige Wartungstermine vor Ort notwendig sind. Aufgrund der hohen relativen Luftfeuchtigkeit und den örtlichen Begebenheiten ist vor allem in den klimatisch kritischen Monaten (Spätsommer/Herbst) mit Schimmelwachstum zu rechnen. Dies sollte weiterhin beobachtet bzw. eingedämmt werden. Ebenso erfordern die eingestellten Geräte eine regelmäßige Pflege- und Wartung.

Die verwendeten Materialien (u. a. Probeplatten für den Klimaschrank, Glasfritten für WUFI®) werden am BLFD beschriftet und archiviert. Sie können dann jederzeit für Versuche weiterverwendet werden. Gleiches gilt für sämtliche Projektunterlagen.

7.1.3 Weitere wissenschaftliche Untersuchungen

Im Verlauf setzte sich das Projektteam vorrangig mit dem essentiellen Substanzerhalt und den Arbeitspaketen zur Klärung der Forschungsfrage auseinander. Auch wenn einige maltechnische Fragen mittlerweile geklärt werden konnten, sind andere noch unbeantwortet. Darunter z. B. die Fügetechnik, potenzielle Blockade der Gratleisten, Ausmaß der Fraßschäden und etwaiger Festigungsmittel, Hintergründe der rückseitigen Ritzungen sowie Details zur Maltechnik des Künstlers.

[113] 1x vor dem Tafelgemälde; 1x dahinter; 1x unterhalb der Tribüne.

Anhand erster Infrarot-Aufnahmen kamen beispielsweise bereits Untermalungen zum Vorschein, deren weitere Erforschung sehr erstrebenswert scheint. Auch ein Vergleich mit anderen Werken des Künstlers könnte weitere Aufschlüsse über sein Schaffen bieten. Ein weiteres Themenfeld, das vor Ort beschäftigt ist die Zugehörigkeit der Mensa.

Abbildung 7-1: Infrarot-Aufnahme (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).

Darüberhinaus wäre eine weitere Untersuchung der durch die Befeuchtung angestoßenen, tiefer reichenden Bewegungen der Feuchte im Tafelbild analog den Arbeiten von Melin und Bjurman (2017) wünschenswert. Dies gilt ebenso für die Überlegung einer weiteren Ausdehnung in höheren r.F. Bereichen zur Festigung und anschließenden langsamen Absenkung auf verträgliche Feuchtigkeitsbereiche für die Langzeiterhaltung bei konstantem Klima. Ob dabei die Malschicht ohne weiter Schäden erhalten bliebe oder es erneut zu Spannungen und Abhebungen kommen würde, ist momentan nicht abzusehen. Dringender Forschungsbedarf besteht außerdem in der Entwicklung und Anwendung langfrisitg nachhaltiger und ggf. passiver Klimastabilisierungsstrategien und –Materialien. Ferner könnten die genauen Schadprozesse langfristiger und zyklischer Diffusion auf das Materialgefüge genauer erforscht werden.

7.1.4 Konservierungskonzept

Obwohl das Konservierungskonzept nur bedingt in Zusammenhang mit der Forschungsfrage dieses Projektes steht, konnten anhand der Projektergebnisse und dem intensiven Monitoring erste Überlegungen dafür abgeleitet werden. Diese werden im Folgenden kurz dargestellt.

7.1.4.1 Bewertung der Notsicherungsmethoden

Wie bereits in Abschnitt 2.3.4 beschrieben, wurden unterschiedliche Methoden der Anbringung von Japanpapieren getestet und über den Projektverlauf beobachtet. Im Folgenden werden die Vor- und Nachteile der Varianten erläutert und deren Eignung evaluiert.

7.1.4.2 Variante 1 – flächige Sicherung:

Diese Methode bietet den Vorteil, dass alle Schollen an ihrer Ursprungsposition gesichert werden. Außerdem werden Veränderungen des Zustands leicht sichtbar, z. B. indem das

Papier reißt, wenn sich Schollen stärker aufrichten (s. Abbildung 2-23). Auch bietet sie einen guten Ausgangspunkt für die anschließende Konservierung. So könnte ggf. das Konsolidierungsmittel durch das Japanpapier eingebracht werden, ohne den Verlust von Malerei zu riskieren. Bei der Durchführung von Konsolidierungstests (s. Abschnitt 7.1.4.6) zeigte sich der Nachteil, dass hierbei der Blick auf die darunterliegende Malerei während der Konsolidierung versperrt wird. So kann auf Oberflächenveränderungen nicht rechtzeitig reagiert werden. Bei der Befeuchtung des Tafelgemäldes zur Ausdehnung kann die flächige Sicherung Bewegungen der Malerei behindern und zu unerwünschten Spannungen führen.

7.1.4.3 Variante 2 – berührungsfreie Überspannung der Dachschollen:

Der wesentliche Vorteil dieser Methode ist die verhältnismäßig kleine Klebefläche, die bei der Befeuchtung und Ausdehnung des Gemäldes keine Behinderung darstellt. Der große Nachteil dagegen ist, dass kein optisches Monitoring der darunterliegenden Bildschicht möglich ist, ohne jedes Mal die Sicherung zu lösen und erneuern (Abbildung 2-24). Zwar bleiben abfallende Schollen in der Nähe der Fehlstelle erhalten, doch kann dies u. U. einen großen Aufwand bei der Konsolidierung nach sich ziehen, wenn mehrere – teils auch kleinere – Schollen abfallen und dann mühsam wieder der richtigen Stelle zugeordnet werden müssen.

7.1.4.4 Variante 3 – Absicherung entlang der Schollenränder:

Veränderungen der Malschichtschollen bleiben bei dieser Methode überwiegend sichtbar. Durch die kleinere Klebefläche als bei Variante 1 wird die Ausdehnung nur geringfügig behindert (Abbildung 2-25). Allerdings ist festzustellen, dass sich mit dieser Methode die Malschichtschollen auch nicht selbständig niederlegen, sondern weiterhin ein gewisser Zug durch das Papier bestehen bleibt. Die anschließende Konsolidierung ist einfach umsetzbar, da das Konsolidierungsmittel problemlos unter die Schollen bzw. über die Fuge eingebracht werden kann. Einschränkend ist jedoch zu sagen, dass diese Methode nur für größere Malschichtschollen geeignet ist. Kleinere, fragile Schollen können so nicht gesichert werden, da diese bei weiterer Bewegung abplatzen können.

7.1.4.5 Ergebnis

Aufgrund der nur geringen Ausdehnung der Tafel bei den Auffeuchtungsversuchen wurden bei keiner der untersuchten Varianten Probleme bzgl. Haltbarkeit und Verträglichkeit der Notsicherungen festgestellt. Varianten 1 und 3 sind am besten zur regelmäßigen Zustandsbeurteilung der darunterliegenden Malschicht geeignet. Wo einsetzbar, kann die Verwendung von Variante 3 empfohlen werden, da diese insgesamt die größten Vorteile bietet.

Sowohl die alten Sicherungspapiere von 2016, die mit *Klucel EF* (in dest. Wasser) befestigt wurden, als auch jene aus der Kampagne von 2022, welche mit *Tylose MH300* (in demin. Wasser) aufgeklebt wurden, hafteten auch bei höheren relativen Luftfeuchtigkeit ausreichend stark an der Oberfläche. Erfreulicherweise konnte im Rahmen des Projektes kein Schimmel-

pilzbefall an den Notsicherungspapieren beobachtet werden, wenngleich die Gefahr bei erhöhten r.F.-Werten nicht gänzlich zu vernachlässigen ist.[114] Laut Thuer (2011, S. 29 f., S. 118) werden Celluloseether jedoch im Vergleich zu anderen gängigen Bindemitteln für Facings als weniger anfällig gegenüber mikrobiellem Befall eingeschätzt.

Generell ist bekannt, dass die Reversibilität solcher Notsicherungsmaßnahmen über die Jahre und Jahrzehnte häufig abnimmt. Sie lassen sich dann häufig schlecht von der Oberfläche lösen oder hinterlassen (je nach Standort und Exposition) sichtbare Unterschiede auf der Oberfläche (z. B. im Fall eines Ausbleichens der umgebenden Bereiche durch Lichteinstrahlung). Umso wichtiger ist die Auswahl geeigneter Klebstoffe im Folgenden.

7.1.4.6 Konsolidierung der Malschicht

Die innerhalb des Projektes durchgeführten Untersuchungen und Auffeuchtungsversuche haben zwar gezeigt, dass noch eine Ausdehnung des Holzbildträgers möglich ist; diese jedoch für die problemlose Niederlegung aller dachförmig aufstehenden Malschichtbereiche nicht ganz ausreicht. Eine weitere Erhöhung der relativen Luftfeuchtigkeit auf über 75 % r.F. erscheint zum jetzigen Zeitpunkt nicht aussichtsreich genug, um die negativen Effekte (Klebkraftverlust der Bindemittel, Schimmelgefahr) in Kauf zu nehmen. Aufgrund dessen wurde eine weitere Auffeuchtung zum jetzigen Stand nicht in Betracht gezogen wird.

Das konservatorisch-restauratorische Monitoring zeigte, dass allein durch die Stabilisierung des Klimas und die Befeuchtung auf 65 % r.F. große Teile der Malschicht bereits in einen konservierbaren Zustand gebracht werden konnten und keine weiteren Malschichtverluste auftraten. Abbildung 7-2 zeigt in Grün den Anteil der Malschichtlockerungen, die nach jetzigem Stand gefestigt werden könnten. Von den insgesamt etwa 25 % gelockerter Malschicht, ließen sich derzeit schätzungsweise ca. 65 % festigen.[115] In Bereichen mit Dachschollen wird dies – ohne Materialverlust – weiterhin nicht möglich sein. Für den Umgang mit den Dachschollen ergeben sich mehrere Möglichkeiten zur Niederlegung bzw. der Sicherung. In Tabelle 7-2 werden die Vor- und Nachteile der jeweiligen Methoden gegenübergestellt.

[114] Im Rahmen einer Bachelorarbeit konnte bereits gezeigt werden, dass keiner der darin untersuchten Celluloseether (u. a. *Klucel E* und *Tylose MH300 P2*) als mikrobiell resistent einzustufen ist, s. Gerling, Christine: Celluloseether für die Festigung von Mal- und Fassungsschichten auf Gemälden und gefassten Holzobjekten. Untersuchungen zur mikrobiellen Resistenz und Wasseraufnahmefähigkeit bei hoher Luftfeuchtigkeit, Bachelorarbeit, Hildesheim 2012, S. 53f.

[115] Flächenberechnung erfolgte mit *Adobe Photoshop CS6* anhand der Kartierung (Pixelanzahl Malschichtlockerungen/Gemäldegröße).

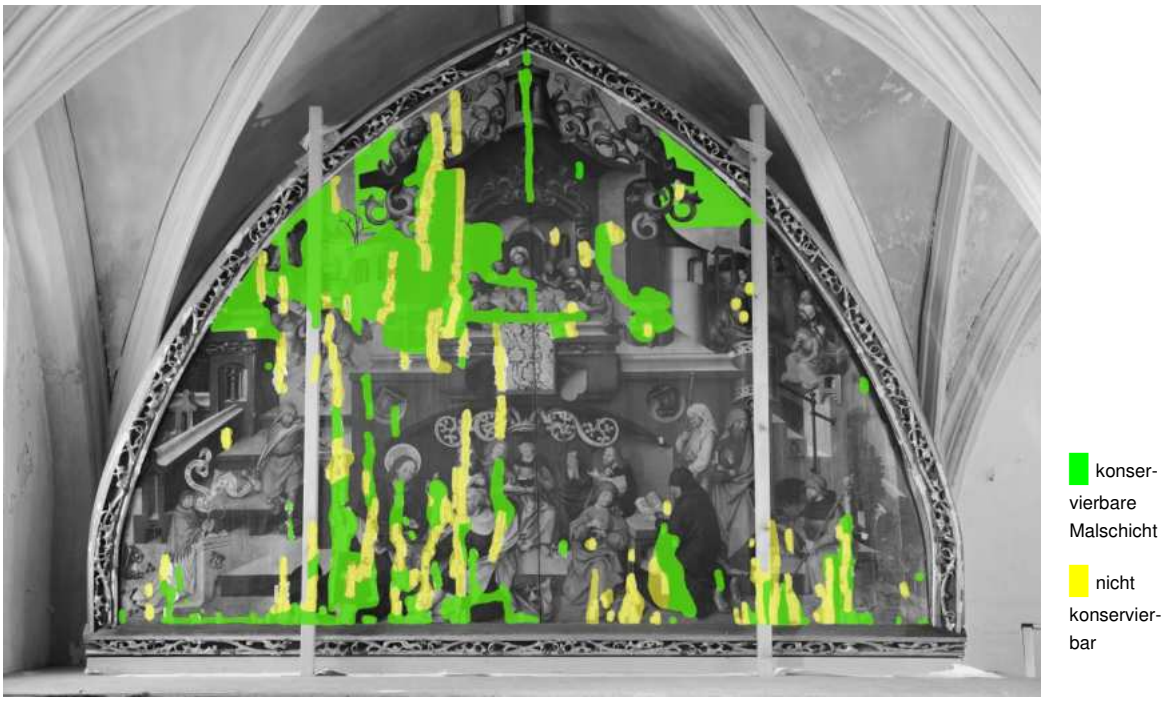

Abbildung 7-2: Kartierung der Konservierbarkeit der derzeitigen Malschichtlockerungen (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD).

Tabelle 7-2: Methodenübersicht zum möglichen Umgang mit den Dachschollen.

	Methoden	Vorteile	Nachteile
Niederlegung	Überlappen der Malschicht	+ In der Theorie „Erhalt" der originalen Substanz	- Ästhetische Beeinträchtigung und Informationsverlust in Bereichen kleinteiliger Malerei
	Stauchen der Malschicht	+ In der Theorie „Erhalt" der originalen Substanz + Überwiegend glatte Oberfläche	- Ästhetische Beeinträchtigung und Informationsverlust in Bereichen kleinteiliger Malerei - Irreversibler Störung des originalen Malschichtgefüges - Zusätzliche Spannungen in Mal- und Grundierschicht
	Beschneiden der Malschicht	+ Glatte Oberfläche	- Irreversibler Informationsverlust in Bereichen kleinteiliger Malerei - Verlust originaler Substanz
Sicherung	Belassen der derzeitigen Notsicherungen	+ Erhalt der originalen Substanz + keine Einschränkung der Konservierbarkeit	- Ästhetische Beeinträchtigung - Eingeschränkte Lesbarkeit - Im Zuge der Alterung erwartungsgemäß Probleme bei der Abnahme der Sicherungspapier und ggf. optische Unterschiede abgeklebter und nicht abgeklebter Bereiche
	Sicherung mittels Papierbrücken (z. B. optisch unauffällig von hinten, an Schollenunterseite, angebracht)	+ Erhalt der originalen Substanz + Nicht/Kaum sichtbar + kaum Einschränkung künftiger Konservierbarkeit	- Ästhetische Beeinträchtigung durch bleibende Abhebung - Nicht an kleinteiligen Ablösungen anwendbar
	Hinterfüllen der Schollen (z. B. mit Klebekitt oder Celluloseschäumen[116] möglich)	+ Erhalt der originalen Substanz	- Ästhetische Beeinträchtigung - Niederlegen zu einem späteren Zeitpunkt nicht mehr möglich

[116] S. MC-Foams: Soppa et al. (2022), Bründler et al. (2023a), Bründler et al. (2023b).

U .a. aufgrund der vielen fragilen und kleinteiligen Malschichtlockerungen kommt derzeit die Konsolidierung des Gemäldes im liegenden Zustand nicht infrage. Hierfür müsste das Gemälde zunächst vollflächig mit einem Facing versehen werden. Weiterhin ist fraglich, wie sich das großformatige Gemälde hinlegen lässt und ob – nach einer erwartungsgemäß beträchtlichen Zeit für die Festigung – eine erneute Aufstellung ohne Materialschäden möglich ist. Wünschenswert wäre daher eine stehende Konservierung, idealerweise in situ. Bei einer Festigung im stehenden Zustand wird empfohlen, von unten nach oben vorzugehen. Dies soll potenzielle Schäden durch ggf. herabfließende Klebmittelüberschüsse an fragilen Malschichtbereichen verhindern.

Bisher wurden am Tafelbild, soweit bekannt, überwiegend wässrige Klebstoffe anwendeten. Darunter historische proteinische Klebstoffe bei der Herstellung sowie Gelatine (1989, Festigung Diözesanmuseum), Störleim (2006/07, Vornetzen mit 0,5 % Surfinol in Wasser und Festigung mit 4%igem Störleim, Hess&Thieme) sowie Klucel EF (2016, nach Tests im Vergleich mit 4%igem Störleim, Landskron). Für die Auswahl eines Festigungsmittels sind folgende Eigenschaften zu berücksichtigen:

- Eignung bei höherer r.F. (Klebkraft, Trocknung, ggf. auch Schimmelresistenz)
- geeignete Viskosität (Einbringen unter Malschicht und gleichzeitig gute laterale Ausbreitung, moderate Eindringtiefe zur Ausbildung einer Klebschicht)
- ausreichende Klebkraft bei geringem Anpressdruck und voraussichtlich ohne Wärme (Heizspachtel)[117]
- gute Material- und Alterungseigenschaften
- Wiederbearbeitbarkeit
- Kompatibilität mit vorliegenden Materialien u. früheren Konservierungsmitteln

Angelehnt an die Methoden der Maßnahmen von 2006/07, 2010/11 und 2016 wurden am Gemälde zwei kleine Versuchsflächen angelegt (Abbildung 7-3, Abbildung 7-4), um die Möglichkeiten und Grenzen der Konsolidierung im derzeitigen Zustand zu testen. In Tabelle 7-3 sind die Durchführung und Auswertung der Versuche dargestellt.

[117] Bzw. Alternativ Entwicklung einer Methode zum Anpressen in vertikaler Richtung (z. B. durch Bau einer geeigneten Konstruktion).

Abbildung 7-3: Versuchsfläche A vor Konsolidierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 7-4: Versuchsfläche B vor Konsolidierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 7-5: Versuchsfläche A nach Konsolisdierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Abbildung 7-6: Versuchsfläche B nach Konsolisdierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD).

Tabelle 7-3: Testflächen zur Konsolidierung der Bildschicht

	Testfläche A	Testfläche B
Bildbereich	- Fuß von Christus - Überarbeitete Malerei	- Bein von Christus - Originale Malerei
Vorbereitung	- Anfeuchtung mit demin. Wasser - Belassen des Japanpapiers - Ca. 5 min. Bestrahlung mit IR-Lampe (ca. 30 cm Abstand), bis sich Bildschicht flexibel anfühlt	- Abnahme der Notsicherung durch Anfeuchten - Anfeuchten des Bereichs mit demin. Wasser
Konsolidierungs-mittel	- Hausenblasenleim 4 % in demin. Wasser - Auftrag mit Pinsel/Spritze	- Hausenblasenleim 4 % in demin. Wasser + Methocel A4C 1 % in demin. Wasser - Mischung 1:1 - Auftrag mit Pinsel/Spritze
Niederlegung	- Abnahme von überschüssigem Bindemittel mit feuchtem Blitzfix-Schwamm - Malschicht mit „Colour Shaper“ (Silikon) andrücken - Abnahme des Japanpapiers	- Abnahme von überschüssigem Bindemittel mit feuchtem Blitzfix-Schwamm/Wattestäbchen - Niederlegen mittels Heizspachtel (ca. 55 °C) + Silikonfolie
Auswertung	- Leim ließ sich nicht gut unter die Schollen einbringen - Holz unter der Malerei sehr degradiert (teilweise vermutlich Fraßgänge der Anobien), daher schlechte Haftung zum Untergrund - Keine Einsicht unter die Notsicherung (einzelne Papierfasern verklebten mit Malschichtschollen entlang der Risse) - Ergänzte Malerei reagiert nicht gut auf Feuchtigkeit + Wärme (Oberflächenglanz verändert sich leicht; leicht entstehende Risse)	- Niederlegen funktioniert in Bereichen mit nur schwach ausgeprägten Dachschollen sehr gut (oberer Bereich) - Bei unterer Dachscholle war die Stauchung zu groß (entlang der Fuge entstanden kleine Malschichtverluste, da kleinteilige Schollen abbrachen) - Auch hier partiell der Eindruck von darunterliegenden Hohlräumen

Es zeigte sich, dass die Malerei in den ergänzten Partien von 1904 sensibler auf die Behandlung mit Feuchtigkeit und Wärme reagiert (zumindest in der untersuchten Testfläche), was für die gewählte Festigungsmethode berücksichtigt werden muss. Im Konservierungsbericht von Hess & Thieme (2006/07, S. 6) ist zudem vermerkt, dass der Überzug empfindlich auf Wärme reagiert und nicht mit dem Heizspachtel gearbeitet werden konnte. Die Schollen wurden z. T. auch nur mit Handwärme angedrückt. Zudem ist im unteren Bildbereich die darunterliegende Holzsubstanz stark geschwächt und teilweise von Fraßgängen durchzogen. Hier wäre eine nähere Bestimmung des Ausmaßes mittels Röntgenuntersuchung wünschenswert. Dies konnte im Rahmen des Projektes aufgrund des eingeschränkten Bewegungsradius auf der Arbeitstribüne und der verbauten nicht geleistet werden. In Bereichen mit hohlliegender Malerei müsste dementsprechend zunächst bzw. im Rahmen der Festigung eine Hinterfüllung der Schollen erfolgen, sodass ausreichend Haftung beim Niederlegen erzielt werden kann. Auch dafür könnten sich Klebkitte oder Celluloseetherschäume[118] eignen.

[118] S. Soppa et al. (2022), Bründler et al. (2023a), Bründler et al. (2023b).

Weiterhin ist eine Flexibilisierung der Malschichtschollen zum Schutz vor Brüchen empfohlen. Dies konnte laut Hess & Thieme (2006/07) mit Wasser und einem Zusatz von 0,5 % Surfinol sowie flächigen Erwärmung mittels Infrarotlicht erzielt werden. Statt Surfinol als Zusatz sollte zuerst Wasser (ggf. modifiziert über Erwärmung) getestet werden; Ethanol als Zusatz eignet sich ggf. nicht, wenn der der Überzug gehalten werden soll.

7.1.4.7 Umgang mit dem Bildträger und der Konstruktion

Zillich beschreibt in ihrer Diplomarbeit von 1991 die historischen und modernen Verfahren zur Begradigung von Holztafeln mittels direkter und indirekter Feuchtigkeit, Wärme, Druck, Einschnitten und Stabilisierungssystemen verschiedenster Art. Die meisten dieser Eingriffe in die Substanz haben sich später als problematisch und als Quelle für weitere Schäden erwiesen. (S. a. Anhang G: Lösungsansätze). Durch Umgang mit den Sekundärfolgen (z. B. Dünnungen und Abnahme einer starren Parkettierung als Rückrestaurierung) gab es vor allem im deutschsprachigen Raum eine starke Tendenz zu weniger invasiven Verfahren und hin zu präventiven Maßnahmen. Eine Rückformung erfolgt dann z. B. eher durch Behandlung in Klimazelten und anschließende Aufbewahrung in Klimavitrinen. Im internationalen Vergleich – z. B. in Italien, den Niederlanden und Amerika sind flexible Stütz- und Rahmensysteme und größere Restaurierungseingriffe weiterhin üblich und werden technisch stetig weiter verfeinert (s. z. B. Panel Painting Initiative, Wood Science and Technology, etc unter 2.1; Schmidt, 2017a und b; Prast, 2022).

Im vorliegenden Projekt wurde der Fokus zuerst auf die Untersuchung von präventiven Maßnahmen und Schadensursachen - ohne Eingriff in die Konstruktion – gelegt. Weiterhin sind künftige Änderungen der Bausubstanz in der Sakristei (Umbaumaßnahmen) geplant, jedoch im Laufe der Projektentwicklung und –durchführung noch nicht bekannt. Aufbauend auf den Projektergebnissen wurden im Projektteam und mit den Projektbeteiligten verschiedene Strategien zum weiteren Vorgehen entwickelt und diskutiert.

Im Rahmen der Gemäldeuntersuchung konnte festgestellt werden, dass einige Leimfugen der Holztafel geöffnet sind (s. Kartierung Abbildung 2-4). Fotos der Dokumentation Landskron (2016) ist zu entnehmen, dass dies bereits zum damaligen Zeitpunkt der Fall war. Die Überprüfung der Spalttiefe mittels Fühlerlehre zeigte, dass sich an mehreren Bereichen die Fuge auf der kompletten Tiefe gelöst hat. Nach Taube (2005, S. 240) stellen geöffnete Fugen u. a. ein durch verklemmte Gratleisten verursachtes Schadensbild dar. Dies resultiert häufig in dachförmig aufstehende Schollen und Blasenbildung auf der bemalten Vorderseite (Taube, 2005, S. 241). Am vorliegenden Fallbeispiel wurde dies durch das Übereinanderlegen verschiedener Kartierungen nicht als einzige Schadursache evaluiert. Dafür wurde verschiedene Kartierungen konstruktiver Merkmale (z. B. Gratleisten, aufgeleimte Klötzchen, Fugen, Astlöcher, etc.) der Rückseite mit Kartierungen der Malschichtschäden auf der Vorderseite verglichen. s. auch 2.2.2.

Neben Unregelmäßigkeiten im Holz sind Leimfugen die schwächste Stelle im Gefüge, weshalb die durch wiederholte starke Klimaschwankungen verursachte mechanische Belastung und Degradation des Materials zum Öffnen der Fugen führen kann.

Es stellte sich daher die Frage, ob die Bewegung der Tafel durch verklemmte Gratleisten blockiert wird. Dies sollte durch die Anbringung der mm-Papier (s. 3.1.4.3 und 4.1.4.3) vor den beiden Auffeuchtungsschritten von 65 % auf 70 % bzw. 75 % r.F. (s. 3.1.3 > Klimatisierung und 4.1.3) überprüft werden. Es zeigten sich nur geringe Verschiebungen in beide Richtungen (unteren Gratleisten hauptsächlich nach außen, Richtung Rahmen). Es wird daher eine Blockade zur Mittelfuge durch die gegenüberliegende Tafelhälfte vermutet. Auch zu starke plastische Verformungen sind als Ursache möglich. Aufgrund der oben genannten Auswirkungen von Gratleisten, werden diese häufig modifiziert, entfernt oder durch alternative Stabilisierungssysteme ersetzt (Taube 2005, S. 243 - 249). Vor allem im musealen Bereich und auf internationaler Ebene findet die Stabilisierung durch flexible Rückseitensystem breite Anwendung.[119] Ein häufiges Argument hierfür ist, dass die Tafel so wieder eine „natürliche“ Wölbung annehmen kann und Spannungen in der Malschicht abgebaut werden. Das kann ggf. auch zu einer Vergrößerung der Bildoberfläche führen und damit mehr Platz für die Festigung der Malschicht schaffen. Diese Argumentation bezieht sich aber meist auf nachträglich hinzugefügte Stützkonstruktionen. Im Falle des Freisinger Gemäldes sind die Gratleisten höchstwahrscheinlich Teil einer ursprünglichen Konstruktion oder zweitverwendete historische Hölzer. Zusammen mit dem Rahmen halten sie die zahlreichen Einzelbretter zusammen und in der Ebene. In Freising sind zum jetzigen Zeitpunkt keine Verwölbungen der einzelnen Bretter sichtbar. Die Entfernung der Gratleisten stellt ein zum jetzigen Zeitpunkt nicht kalkulierbares Risiko dar. Dennoch sollte die Gängigkeit der Gratleisten nach Möglichkeit überprüft und gegebenenfalls verbessert werden. Alternative Rückseitensysteme könnten ebenfalls fachlich diskutiert und abgewogen werden.

Um die Bewegung des Trägers weiter zu unterstützen, kann die Veränderung der auf das Gemälde wirkenden Kräfte sinnvoll sein (vgl. Abschnitt 3.2.2). Zum einen sollte das Gemälde langfristig wieder aufgehängt werden, zum anderen könnte ggf. das Gleiten der Tafel in der Rahmennut verbessert werden, in dem z. B. ein Teflonband eingebracht wird. Eine Verbesserung der Rahmung, zur Verbesserung der Stabilität im rechten Tafelbereich ist wünschenswert.

7.1.5 Empfehlung zum weiteren Vorgehen

Die durchzuführenden Konservierungsmaßnahmen sind an den angestrebten Lösungsansatz zur dauerhaften Stabilisierung des Gemäldes und die Anforderungen an das ästhetische Erscheinungsbild gekoppelt. Es wird empfohlen offene Fragen wie die abschließende Klärung des konstruktiven Aufbaus (Ausrichtung der Bretter, Fugenformen, Dübel) und des Zustands des Bildträgers (Ausmaß der Insektenfraßgänge, Gängigkeit der Gratleisten) mithilfe von bildgebenden Verfahren bzw. durch Ausbau aus dem Rahmen zu klären. Dies war zum einen aufgrund der beengten Platzverhältnisse innerhalb der Einhausung und des installierten Monitoringsystems im Rahmen des Projektes nicht möglich. Zum anderen sollte im Rahmen des

[119] S. hierzu Phenix, Alan; Chui, Sue Ann (Hrsg.): Proceedings from the symposium Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training, May 17-18 2009, Los Angeles 2009. Auch in jüngster Zeit werden neue Methoden entwickelt und vorgestellt, wie etwa auf dem SRAL-Symposium „Wood Science and Technology III, 19-21 October 2023, Maastricht“ (der entsprechende Tagungsband befindet sich derzeit noch in Arbeit).

Projektes primär das Feuchte-/Klimaverhalten des Gemäldes untersucht werden, ohne dabei in die bestehende Konstruktion und Aufstellung vor Ort einzugreifen.

Sobald hier Klarheit besteht, kann eine größere Testfläche des Gemäldes gefestigt werden und deren Langzeitstabilität im natürliche schwankenden Jahresverlauf evaluiert werden. im Projekt wurde eine minimale r.F. von 60-65% ermittelt. Diese ist nach jetzigem Stand im Winter nur mit zusätzlicher Befeuchtung zu gewährleisten. Zu evaluieren wäre ob langsamere Änderungen von dem Gemälde auch bei Unterschreiten dieser Untergrenze toleriert werden können. In Bereichen mit stark aufstehenden Dachschollen kann es notwendig sein, diese zu Beschneiden oder über eine Hinterfüllung zu sichern. Dieser Schritt sollte allerdings erst erfolgen, sobald gewährleistet werden kann, dass keine größeren Bewegungen des Bildträgers mehr stattfinden werden – sei es durch ungeeignete Klimabedingungen, Transporte oder Modifizierung der Konstruktion.

Auch wenn Spannungen durch die Gratleisten oder andere Zwänge zum jetzigen Stand nicht vollständig ausgeschlossen werden können, zeigt das Projekt, dass potenzielle innere Spannungen bei einem möglichst konstanten und gleichmäßigen Klima im entsprechenden Korridor so kontrolliert werden können, dass sich keine neuen Schäden über die Projektlaufzeit bildeten. Die Ertüchtigung des Rahmens (s. oben, z. B. bessere Gleitfähigkeit, Anpassung des Spaltes am rechten Rand, etc.) sollte dennoch diskutiert werden. Langfristig ist die Wiederaufhängung an der Wand empfohlen, dies reduziert u. a. das Umspülen des Gemäldes mit Luft.

Ein weiterer für das Konservierungskonzept noch zu prüfender Punkt bezieht sich auf den transparenten Überzug. Diese wurde bisher aus ästhetischen Gründen („*speckig glänzend, dick*“) sowie aus konservatorischer Sicht (potenzielle Spannungen, die auf fragilere Malerei wirken könnten?) kritisch hinterfragt. Ggf. eignet sich auch hier eine Versuchsreihe zur Firnisreduzierung und Monitoring über einen längeren Zeitraum, um den Überzug als Schadensförderer auszuschließen. Zu bedenken ist dabei generell, dass es sich bei einer Firnisreduktion um einen großen Eingriff in die Substanz und Oberfläche handelt. Auch die zahlreichen Überarbeitungsphasen und ob eine materialverträgliche Reduzierung überhaupt möglich und gewünscht ist, bleibt zu prüfen.

8 Publikationen und Öffentlichkeitsarbeit

Im Laufe der Projektzeit wurde das Forschungsthema verstärkt in der Öffentlichkeit präsentiert. Ein medial begleitetes Kick-off-Treffen (Kolloquium) mit allen Beteiligten zum Projektbeginn legte den gemeinsamen Status quo fest, stellte das Projekt vor und diente der Vermittlung an Fachexterne sowie der breiten Öffentlichkeit. Derartige Vermittlung erfolgte auch über die Projektlaufzeit in diversen Pressemitteilungen, Zeitungsberichten, Artikeln und Projektinformationen über die Homepages der Projektpartner. Der Domberg in Freising sensibilisierte seine Mitarbeitenden (u. a. Mesnerinnen, Mesner, Domaufsichten, Ministrantinnen und Ministranten) in der Sakristei und stellte das Tafelbild mit seinen Herausforderungen, z. T. in Zusammenarbeit mit dem Projektteam, im Rahmen von Führungen der Öffentlichkeit vor. Darunter beispielsweise jährlich zum Tag des offenen Denkmals, Tag der Restaurierung sowie den Montagsvorträgen[120] am BLfD. Weiterhin wurde das Projekt für den Imagefilm des BLfD ausgewählt und thematisiert darin die Herausforderungen der Kulturguterhaltung sowie Gefahr durch anthropogene Schädigung an wertvoller Ausstattung. Dank der Vermittlung erfolgte eine generelle Sensibilisierung für das Projektthema mit seinen Möglichkeiten, Grenzen und Herausforderungen.

Die Vorstellung und Präsentationen sowie der Austausch mit Fachpersonen erfolgte an mehreren nationalen und internationalen Tagungen, in Expertenrunden, einer VDR-Exkursion sowie über die 2-tägige Abschlusstagung in Freising. Den meisten Tagungen folgte eine Publikation, wodurch eine regelmäßige Veröffentlichung verschiedener Projektfortschritte möglich war. Insbesondere der internationale Austausch zeigte die unterschiedlichen Restaurierungsethiken und wie komplex das Thema und der Umgang mit dem ausgewählten Fallbeispiel für führende Expertinnen und Experten ist. Weiterhin war im Austausch mit ähnlich Betroffenen sowie den jeweiligen Fachpersonen verschiedener Disziplinen eine kritische Betrachtung des Arbeitsplans und der Methodik sowie der Transfer auf ähnliche Situationen und Vergleichsbeispiele möglich. Die Veröffentlichung des Handlungsleitfadens, des Abschlussberichtes und der Publikation (in print) kann für die angesprochenen Zielgruppen hoffentlich eine hilfreiche Grundlage für ähnlich gelagerte Projekte darstellen. Neben der Evaluierung des aktuellen Standes des Wissens und der Techniken auf dem Gebiet sollen insbesondere die ausführliche Darstellung der Projektergebnisse und Lösungsansätze einen Mehrwert bieten.

Dank des Projektes, seiner Ergebnisse und der Vermittlung ist die Weiterführung nach Projektende gewährleistet. Es wurden konkrete Empfehlungen für das Falleispiel in Freising sowie für Transferbeispiele (Handlungsleitfaden) gegeben; weiterhin ist eine Sensibilisierung der Öffentlichkeit für die Gefährdung von Kulturgut durch den Klimawandel und anthropogene Schädigung eingetreten. Während das BLfD weiterhin über seine Betreuungstätigkeit am Fallbeispiel in Freising eingebunden bleibt, möchte sich das Projektteam in den kommenden

[120] An sechs Montagen im Zeitraum von Februar bis März geben die jährlichen Vorträge (online und analog am BLfD) Einblicke in die reiche Themenvielfalt der Denkmalpflege und die aktuellen Projekte des Landesamtes. Die Vortragsreihe ist eine Kooperation des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege mit der Gesellschaft für Archäologie in Bayern e.V. und der Münchner Volkshochschule (MVHS).

Jahren erneut treffen und die Ergebnisse des Langzeit-Monitorings auswerten. Dafür wäre eine Publikation des künftigen Standes und der Entwicklungen ebenfalls wünschenswert.

Veröffentlichungen

- **Publikation:** Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.). (2025/2026 – in print). Das Gründonnerstagsretabel in Freising. In situ Befeuchtung und Monitoring eines großformatigen Holztafelgemäldes. [Publikation]. *Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege*. München.
- **Abschlussbericht:** Hilger, T., Brandt, J., Hörmann, M., Holl, K., Fröhlich, A., Bellendorf, P., Pallas, L. & Löther, T. (2024). Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes. [DBU-Abschlussbericht]. AZ 37502/01 unter www.dbu.de und bei Freigabe durch die DBU zeitnah auch unter https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html.
- **Handlungsleitfaden:** Hörmann, M., Hilger, T., Brandt, J., Holl, K. & Fröhlich, A. (2024). Handlungsempfehlung zur in situ Befeuchtung und Monitoring an anthropogen geschädigten Holztafelbildern. [Handlungsleitfaden]. https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html [Stand Oktober 2024].
- Jahrestagung des Amerikanischen Restauratorenverbandes | Florida | 10.05.2023
- Brandt, Julia, Fröhlich, Alex, Hilger, Theresa, Holl, Kristina, Hörmann, Manuela, Pallas, Leander. (2023). A Heated Situation: In situ Monitoring of a Wooden Altarpiece, in: AIC Annual Meeting General Session Postprints. Presentations from the American Institute for Conservations's 51st Annual Meeting in Jacksonville, Florida. General and Concurrent Sessions, Mai 18-20, 2023, Volume 2, 2023, p. 171-179. URL: https://www.culturalheritage.org/docs/default-source/publications/periodicals/annual-meeting/general-session-postprints/aic-general-session-postprints-volume-2-2023.pdf?Status=Master&sfvrsn=64111120_3 [Stand August 2024].
- Wood Science and Technology | Maastricht | 19.-21.10.2023
- Holl, Kristina, Hörmann, Manuela, Hilger, Theresa, Fröhlich, Alex, Pallas, Leander, Brandt, Julia. (2023 – in print). Monitoring and hygrothermal simulation for the development of a concept to re-humidify a large-sized damaged wooden panel painting, in: Wood Science and Technology III. Methods to examine panel paintings and their preventive and remedial conservation, October 19-21, 2023, Maastricht.
- VDR-Exkursion, Fachgruppe polychrome Bildwerke | Freising | 27.01.2024
- Brandt, Julia. (2023). Exkursionsbericht. URL: https://www.restauratoren.de/fachgruppe-polychrome-bildwerke-auf-exkursion-in-freising/ [Stand Juni 2024].
- Hörmann, Manuela, Brandt, Julia, Hilger, Theresa, Holl, Kristina, Fröhlich, Alex. (2024). Fit für die Zukunft. Forschung zur Bewahrung klimageschädigter Kunst- und Kulturgüter. *Denkmalpflege Informationen* (182/2024), S. 8-15. URL: https://www.blfd.bayern.de/mam/information_und_service/publikationen/denkmal_information_182.pdf [Stand Juni 2024]

- Miersch, Martin. (2024). Wenn Trockenheit Kulturgüter gefährdet. *Restauro* (01/2024), S. 20-25.
- Kreativ Instinkt (Regie), Klee, V., Petta, G. (Konzept) (2024): Imagefilm BLfD. https://www.youtube.com/watch?v=9MkzEyMc22A [Stand November 2024].
- Pallas, Leander, Holl, Kristina, Bellendorf, Paul. (2022). Visualising complex dimensional changes of a wooden Panel Painting in Freising Cathedral. In: CHNT Editorial board. Proceedings of the 27th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, November 2022. Heidelberg: Propylaeum, held in Vienna and online, November 2022 (in print).
- Pressemitteilungen, s. unten.

Projektpräsentationen

- CULTWOOD I Dresden I 24.06.2022
- Kick-off-Treffen I Freising I 22.07.2022
- Tag des offenen Denkmals I Freising I 11.09.2022
- CHCC Conference on Cultural Heritage and climate change I Bamberg I 28.02.2023
- Expertentreffen I Freising I 14.03.2023
- Jahrestagung des Amerikanischen Restauratorenverbandes I Florida I 10.05.2023 Literaturverweis s. unter Veröffentlichungen
- DMB Tagung I Wien I 21.09.2023
- Wood Science and Technology I Maastricht I 19.-21.10.2023
- VDR-Exkursion, Fachgruppe polychrome Bildwerke I Freising I 27.01.2024
- Montagsvortrag BLfD I München I 19.02.2024
- Abschlussveranstaltung I Freising I 14.-15.03.2024

Pressemitteilungen, Zeitungsberichte und Artikel

- Schnirch, P. (22.07.2022). Die Bilderretter vom Freisinger Domberg. Online, unter: https://www.sueddeutsche.de/muenchen/freising/domberg-freising-denkmalschutz-holztafelbild-dom-sakristei-forschungsprojekt-1.5626474 [Pressemitteilung Süddeutsche Zeitung, online. Stand Juni 2024] und Süddeutsche Zeitung Freising. (23.07.2022). [Pressemitteilung, analog, Seite 70]
- Münchner Merkur. (25.07.2022). Geschädigten Kulturgütern das Leben retten: Holzaltarbild aus Freising wird zu einzigartigem Forschungsprojekt. Online, unter: https://www.merkur.de/lokales/freising/freising-ort28692/freising-geschaedigten-kulturguetern-das-leben-retten-holzaltarbild-aus-freising-wird-zu-einzigartigem-forschungsprojekt-91685303.html [Pressemitteilung Münchner Merkur, online und analog, Seite 11]
- Freisinger Tagblatt (25.07.2022). [Pressemitteilung, analog, Seite 31]
- Hintermeier, H. (05.02.2023). Schrumpfende Fußwaschung. Online, unter: https://www.faz.net/aktuell/feuilleton/kunst-und-architektur/schrumpfende-fusswaschung-18652404.html [Pressemitteilung Frankfurter Allgemeine, Online. Stand Juni 2024]

- Deutsche Bundesstiftung Umwelt. (01.03.2023). Kulturerbe auf der Kippe/Parlamentarischer Abend der DBU: Folgen der Klimakrise. Online, unter: https://www.presseportal.de/pm/6908/5452662 [Pressemitteilung, online. Stand Juni 2024]

Anderes

- Homepages der Projektpartner I BLfD, KDWT, TUM, CFA I seit 2022
  - BLfD: https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html [Stand November 2024]
  - KDWT: https://www.uni-bamberg.de/restaurierungswissenschaft/forschung/forschungsprojekte/dbu-freising/ [Stand November 2024]
  - TUM HB: https://www.cee.ed.tum.de/hbb/forschung/laufende-forschungsprojekte/ [Stand November 2024]
  -

8.1 Handlungsleitfaden

Im Rahmen des DBU-Projekts entstand ein Handlungsleitfaden. Dieser fasst die wichtigsten Erfahrungen aus dem Projekt zusammen. 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 Be- bzw. Auffeuchtung von Holztafelgemälden.

S. Anhang H: Publikation und Öffentlichkeitsarbeit sowie Veröffentlichung auf der Homepage des BLfD; unter: https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html [Stand November 2024] abrufbar.

9 Mittel- und Zeitplanung

Die bewilligten finanziellen Mittel wurden gemäß den jeweiligen Kostenplänen angewendet. Es erfolgten zwei Umwidmungen innerhalb des Projektverlaufs, wobei Personalkosten in Sachkosten umgewandelt werden konnten. Die Erhöhung der Sachkosten war eine Folge der globalen Situation (u. a. Corona, Ukrainekrieg und Energiekrise). Der Zeitplan konnte dank der Zusammenarbeit im Projektteam sowie durch weitere personelle Unterstützung am BLfD sowie KDWT Großteils gehalten werden. Mit Zustimmung der DBU konnte das Projekt kostenneutral bis zum 31.08.2024 verlängert werden. Dieser Zeitraum wurde zur Erstellung des Abschlussberichtes und Vorbereitung der Publikation genutzt. Weiterhin wurde in Rücksprache mit dem Eigentümer und den Beteiligten Institutionen vor Ort das Konzept zur Weiterführung nach Projektende entwickelt.

Dank

Das Modellprojekt wurde durch die **Deutsche Bundesstiftung Umwelt, im Förderschwerpunkt 12: Bewahrung und Sicherung national wertvoller Kulturgüter vor schädlichen Umwelteinflüssen,** gefördert. Die Projektleitung und die Beteiligten danken dem Kuratorium der DBU für das Vertrauen und die Bewilligung der Fördermittel sowie dem Fachreferat „Umwelt und Kulturgüterschutz“ für die fachliche und administrative Unterstützung, namentlich in Person der Referatsleiterin Frau Constanze Fuhrmann sowie der Teamassistenz Frau Heike Hemmer. Unser Dank gilt weiterhin dem finanziellen Projektcontrolling der DBU, Fr. Strelow, die mit viel Geduld für einen reibungslosen Ablauf der Prüfung der Verwendungsnachweise und Bereitstellung der Mittel gesorgt hat.

Besonderen und herzlichen Dank möchten wir dem Eigentümer des Fallbeispiels „Gründonnerstagsretabel“ Prof. Dr. Marc-Aeilko Aris (Domrektor, Dom St. Maria und Korbinian) und der Domkirchenstiftung (Verwaltungsleiter Elmar Hobelsberger) für das entgegengebrachte Vertrauen und die Bereitschaft dieses Projekt gemeinsam in situ durchzuführen, aussprechen. Der interdisziplinäre Einsatz zum Erhalt des Gründonnerstagsaltars, als wichtiger Teil des kulturellen Erbes, bietet die Möglichkeit, die Kunst und Geschichte der Region weiterhin zu erleben.

Im Projektverlauf gab es darüber hinaus freundliche Angebote zum Sponsoring an den Domberg in Freising; darunter die Einhausung der Firma Adldinger Bauunternehmen e.K. (Andreas Adldinger, Ringstraße 56, 85402 Kranzberg), die Stromversorgung darin und Abnahme durch die Firma Gerlach Elektrotechnik GmbH & Co.KG (Christian Gerlach, Wilpertingerstr. 12, 85375 Neufahrn), das Luftfiltergerät Atem X der Firma INCEN AG (IQAir International, Jens Hammes, 9422 Staad, Schweiz) sowie den technischen Support durch Florian Lindner Design (Design & IT Consulting / UX/UI Design, Sonnenweg 71, 85579 Neubiberg). Danke, für das großzügige Entgegenkommen und die Unterstützung des Vorhabens.

Weiterer Dank gilt der Projektgruppe für die ausgezeichnete Zusammenarbeit sowie allen Personen und Institutionen, die das Projekt unterstützt und begleitet haben. Auch allen Restauratorinnen und Restauratoren möchten wir für den regen Austausch über das Projekt, seine Herausforderungen und ähnlich gelagerte Fallbeispiele danken. Die Gespräche haben

uns sehr bereichert und inspiriert. Ferner freuen wir uns über die Unterstützung durch die Teilnehmenden des Kolloquiums, des Expertentreffens, den projektbegleitenden Ausschuss, der Beratung zu mikrobiellen Organismen durch die Pilzbiotechnologie in der Holzwissenschaft (TUM) sowie Simulationen und Klimaschrankversuchen (Fraunhofer IBP).

Den vielen Kolleginnen und Kollegen des BLfD, dem Referat AV mit seiner Referatsleiterin Katharina von Miller möchten wir ebenfalls herzlich für die andauernde fachliche und mentale Unterstützung danken. Cornelia Hagn und Hildegard Sahler danken wir für die Initiative dieses wertvollen Projektes.

EIGENTÜMER
Prof. Dr. Marc-Aeilko Aris | Domrektor, Dom St. Maria und Korbinian
Elmar Hobelsberger | Verwaltungsleiter Domkirchenstiftung
Ursula Bayer | Assistentin des Domrektors
Stefan Maier | Mesner
Renate Süßmaier und Maria Wildgruber | Domaufsichten
FÖRDERMITTELGEBER
Constanze Fuhrmann |DBU, Referatsleiterin
Heike Hemmer | DBU, Referat Umwelt und Kulturgüterschutz
Sandra Strelow | DBU, Referat Finanzielles Projektcontrolling
PROJEKTBEGLEITENDER AUSSCHUSS
Dr. Norbert Jocher | EOM, Hauptabteilung Kunst, ehem. Abteilungsleiter
Dr. Anja Schmidt | EOM, HA Kunst, Abteilungsleiterin
Dr. Hans Rohrmann | EOM, HA Kunst, Fachreferent für kirchl. Kunstpflege
Dr. Christoph Kürzeder | Diözesanmuseum Freising, Direktor
Dr. Carmen Roll | Diözesanmuseum Freising, Stv. Direktorin u. Kuratorin
Dipl.-Ing. Christoph Spieß | Stadt Freising, Bauaufsicht u. Denkmalschutz
Dr. Hildegard Sahler, Dr. Nikolaus Könner, Dr. Michael Schmidt | BLfD GebietsreferentIn
KOLLOQUIUM
Rest. Gabi Landskron | Restaurierungswerkstatt Landskron, Restauratorin
Rest. Andreas Landskron | Restaurierungswerkstatt Landskron, Restaurator
Dipl.-Rest. Georg Prast | Kunsthistorisches Museum Wien, Restaurator Gemäldegalerie
Rest. Barbara Staudacher | Münchner Werkstätten, Restauratorin
EXPERTENTREFFEN
Prof. Dr. Klaus Dreiner | HNE Eberswalde, Professur für Holzbe- und Verarbeitung
Dipl.-Rest. Manfried Eisbein | Landesamt Sachsen und IDK Sachsen u. Sachsen-Anhalt
Dipl. Rest. (FH) Christoph Fiebiger | NLD Niedersachsen, Referats- und Werkstattleiter
Hon.-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer | NLD Niedersachsen, ehem. Abteilungsleiter
Dr. Nanke Schellmann | Schellmann Conservation, Restauratorin
BERATUNG MIKROBIELLER BEFALL
Prof. Dr. J. Philipp Benz | TUM, Pilzbiotechnologie in der Holzwissenschaft
Sabrina Klasen | TUM, Technical Assistant Holzforschung M., Fungal Biotechnology in Wood Science
SIMULATION & KLIMASCHRANKVERSUCHE
Stefan Bichlmair | Fraunhofer IBP
Martin Grau, Armin Lachmann, Bernhard Harböck | TUM MPA

AUSTAUSCH UND FALLBEISPIELE

Prof. Dr. Lukasz Bratasz | Polish Academy of Sciences, Jerzy Haber Institute of Catalysis a. Surface Chemistry

Dipl.-Rest Sabine Denecke | Museen der Stadt Aschaffenburg

Dipl. Rest. Helena Dick | LWL-Denkmalpflege, Restaurierung und Dokumentation

Prof. Dr. Gerhard Eggert | ABK Stuttgart, Institut für Konservierungswissenschaften

Dipl.-Rest Heiner Grieb | Kunstsammlungen der Veste Coburg

Dipl.-Rest. Martin Hess | Hess & Thieme, Restaurator

Prof. Dr. Peter Klein | Dendro&Art, Dendrochronologe

Dr. Michał Łukomski | Head of Research Group at The J. Paul Getty Trust

Rest. Gabi Landskron | Restaurierungswerkstatt Landskron, Restauratorin

Rest. Andreas Landskron | Restaurierungswerkstatt Landskron, Restauratorin

Dipl.-Rest Marc Peez | LVR- im Rheinland, Leiter Restaurierungswerkstatt für organ. Materialien

M. A. Kate Seymour | SRAL, Head of Education & Paintings Conservator

M. A. Katja Siebel | Kunstsammlungen der Veste Coburg

Dr. Thomas Schmidt | Technische Beratung, Eckersdorf

Dipl.-Rest. Isabella Thieme | Hess & Thieme, Restaurator

Univ.-Prof.dr.ir. Jan-Willem G. van de Kuilen | TUM, Professur für Wood technology

UNTERSTÜTZERINNEN UND UNTERSTÜTZER AM BLFD

Prof. Dipl.-Ing. Architekt Mathias Pfeil | Generalkonservator

Dr. Susanne Fischer | 2. Stellvertreterin des Generalkonservators und Abteilungsleiterin

Dr. Jörg Schindler-Friedrich | Abteilungsleiter Zentr. Verwaltungsaufgaben

Christian Beyer | Referatsleiter Personal

Monika Lienerth-Schieb und Linda Wendl | Haushalt

Nicole Obermaier | Vergabe

Dr. Katharina von Miller | Referatsleiterin Restaurierung

Dipl.-Rest. Cornelia Hagn, Dipl.-Rest. Andreas Müller, Dipl.-Rest. Doris Zeidler, M.A. Lara Lunau, M.A. Vanessa Klee, M.Sc. Jana Hungerecker, Aneka Nowack, M.A. Josephine Opitz, Dipl.-Rest. Judith Regensburger, M.Sc. Anna Schwenzer | Gemälde u. Skulptur

M.A. Charlotte Höpker, M.A. Julian Schmid, M.A. Veronika Lauber, M.A. Anne Bergmann | Holzsichtige und gefasste Raumausstattung

Dr. Jan Menath, Dipl.-Rest. Ivonne Tschoepe | Wandmalerei und Architekturoberfläche

Dipl.-Rest. Judith Schekulin, Dipl.-Rest. Christoph Sabatzki, M.A. Julia Zeulner | Stein

Kerstin Brendel, Dipl.-Rest. Jens Wagner | Metall

Dipl.-Rest. Angelina Klassen, Giorgia Petta, Anna Dohnal, Johanna Gerling | Textil

Alexandra Lotter, Ferdinand Kainzhuber | Vorzimmer

Dr. Sven Bittner | Referatsleiter Zentrallabor und Geoerkundung

Dr. Markus Roos, Dipl.-Rest- Simon Mindermann, Björn Seewald | ZI, Analytik/Materialuntersuchung

Pressestelle | Kommunikation

Literaturverzeichnis

Achhammer, C., Fiebiger, C., Püttmann, K. & Stadlbauer, E. (2021). *Beseitigung und Vermeidung nutzungsbedingter anthropogener Umweltschäden am Beispiel der national bedeutenden Schlosskapelle in Celle*. Abschlussbericht DBU Projekt AZ 33881/01-45. Online unter www.dbu.de [Stand: 15.08.2024].

Allegretti, O., Raffaelli, F. (2008). Barrier effect to water vapour of early European painting materials on wood panels, *Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam*, Studies in conservation 53 (3), 187-197, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020. Teil der Panel Painting Initiative, AC The Hague.

Altinkaya, S. A., Topcuoglu, O.; Yurekli, Y. & Balkose, D. (2010). The influence of binder content on the water transport properties of waterborne acrylic paints. *Progress in Organic Coatings* 69 (4), 417–425. DOI: 10.1016/j.porgcoat.2010.08.005.

Alviz-Meza, A., Rodríguez-Reyes, J. C. F. & Chacaliaza, J. A. (2021). Thermodynamic stability of gilded copper and pigments at high relative humidity and at environmental conditions of Lima, Perú. *Journal of Physics Conference Series*, 1938(1), 012003. https://doi.org/10.1088/1742-6596/1938/1/012003.

Antropov, S. & Bratasz, Ł. (2023). Hierarchical craquelure patterns in paintings on Panels. *Heritage Science*, https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-3705990/v1.

Antropov, S. & Bratasz, Ł. (2024). Development of craquelure patterns in paintings on panels. *Heritage Science*, 12(89), https://doi.org/10.1186/s40494-024-01189-2.

Antonelli F, Bartolini, M., Plissonnier M.-L., Esposito, A., Galotta, G., Ricci, S., Petriaggi, B. D., Pedone, C., Di Giovanni, A., Piazza, S., Guerrieri, F., Romagnoli, M. (2020). Essential Oils as Alternative Biocides for the Preservation of Waterlogged Archaeological Wood. Microorganisms.

Arenstein, R.P. (2019). Demystifying silica gel for effective microclimates. In *C2C Care Webinar, Demystifying Silica Gel for Effective Microclimates*

ARGUK-Umweltlabor GmbH (2013). *Schimmelpilz Glossar*. https://www.arguk.de/informationen/schimmelglossar.html [Stand 23.08.2024].

Ashley-Smith, J. (1982). The ethics of conservation. *The Conservator*, 6(1), 1–5. https://doi.org/10.1080/01410096.1982.9994957.

Ashley-Smith, J. (1999). Risk Assessment for Object Conservation (1. Aufl.?). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780080938523

Auber—Le Saux, J., Tornari, V., Bai, X., Wilkie-Chancellier, N., Andrianakis, M. & Detalle, V. (2023). *Quantitative Evaluation of Deformation and Wood Mass Alterations due to Relative Humidity Fluctuations: A preliminary study on spruce sample*s. doi: 10.20944/preprints202311.0731.v1.

Baier, U. (2020). *Neue Forschung über die Ursachen der Ultramarinkrankheit*. Restauro. https://www.restauro.de/neue-forschungen-ueber-die-ursachen-der-ultramarin-krankheit/ [Stand September 2024].

Backer, L., Laverge, J., Janssens, A., Paepe, M., (2017). A Strategy for Modelling Typical Indoor Climates in Historic Buildings: Moisture Buffering of Massive Walls and Stratification by Heating. In *Proceedings of Building Simulation 2017: 15th Conference of IBPSA. 2017*, 2242–2251. https://doi.org/10.26868/25222708.2017.610 [Stand: 15.06.2024].

Baumbauer, B., Hess, D., Hirschfelder, D. & Von Baum, K. (2023). *Die Gemälde des Spätmittelalters im Germanischen Nationalmuseum. Band II: Köln, Niederlande, Westfalen, die Rhein- und Bodenseegebiete* (1.Aufl.). Schnell & Steiner.

Bichlmair, S., Holl, K., Kilian, R. (2013). The moving fluctuation range – a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Billerbeck, G. de, Roques, C., Fonvieille, J.-L. (2004). Prevention of Microbiological Infestations Using Essential Oils. In Rauch, Angelika (Hrsg.). *Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen* (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, 168 – 172.

Birkenbeul, I. & Lohse, C. (2019). Klima messen in Kirchen. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20)*

Bjurman, J. & Must, A. (2012). Mould Problems in Swedish Churches as Influenced by Construction and Microclimate. In: Broström, T. & Nilsen, L. (Hrsg.). *Energy efficiency in historic buildings. Postprints from the Conference, Visby, February 9-11, 2011*.

Brandt, J., Fröhlich, A., Hilger, T., Holl, K., Hörmann, M. & Pallas, L. (2023). A Heated Situation: In situ monitoring of a Wooden Altarpiece, in: AIC Annual Meeting General Session Postprints. Presentations from the American Institute for Conservations's 51st Annual Meeting in Jacksonville, Florida. General and Concurrent Sessions, Mai 18-20, 2023, Volume 2, 2023, 171 – 179. https://www.culturalheritage.org/docs/default-source/publications/periodicals/annual-meeting/general-session-postprints/aic-general-session-postprints-volume-2-2023.pdf?Status=Master&sfvrsn=64111120_3 [Stand August 2024].

Bratasz, L. & Kozlowski, R. (2005). Laser sensors for continuous in-situ monitoring of the di-mensional response of wooden objects. *Studies in Conservation*, 50, 307–315.

Bratasz, L., Jakiela, S. & Kozlowski, R. (2005). Allowable Thresholds in Dynamic Changes of Microclimate for Wooden Cultural Objects: Monitoring In-Situ and Modelling, *ICOM Committee for Conservation 14th Triennial Meeting, The Hague, 2,* 582-589.

Bratasz L., Camuffo D. & Kozlowski R. (2007a). Impact of Indoor Heating on Painted Wood – Monitoring the Altarpiece in the Church of Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore, Italy. *Studies in Conservation*, *52(3)*, 199-210. DOI:10.2307/20619502.

Bratasz L., Camuffo D. & Kozlowski R. (2007b). Target microclimate for preservation de-rived from past indoor conditions. Contributions to the Copenhagen Conference, 19 – 23 November 2007. National Museum of Denkmark, Copenhagen, Denmark, 129 – 134. Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020.* Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Bratasz L., Koslowski R., Kozlowska A. & Rachwal B. (2008). Sorption of moisture and dimensional change of wood species used in historic objects. Conference Proceedings. Wood Science for the Conservation of Cultural Heritage. 5-7 November, Braga 2008. Firenze: University Press, 11-16. In Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020.* Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Bratasz, Ł., Kozlowska, A. & Kozłowski, R. (2012a). Analysis of water adsorption by wood using the Guggenheim-Anderson-de Boer equation. *Holz Roh Werkst, 70(4)*, 445 –451. DOI: 10.1007/s00107-011-0571-x.

Bratasz, Ł., Harrisb, I., Lasyka, Ł., Łukomskia, M. & Kozłowskia, R. (2012c). Future climate-induced pressures on painted wood. In *Journal of Cultural Heritage*. DOI: 10.1016/j.culher.2012.01.013.

Bratasz, Ł. (2013). Allowable microclimatic variations in museums and historic buildings: reviewing the guidelines. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for collections. Standards and uncertainties: Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November, 2012. London, Munich: Archetype Publications; Doerner Institut,* 11 – 19.

Bratasz, Ł., Akoğlu, K.G. & Kékicheff, P. (2020). Fracture saturation in paintings makes them less vulnerable to environmental variations in museums. *Heritage Science* 8(11). https://doi.org/10.1186/s40494-020-0352-0.

Brewer, J. A. (1991). Effect of selected coatings on moisture sorption of selected wood test panels with regard to common panel painting supports. *Studies in Conservation*, 36(1), 9 – 23. DOI: 10.1179/sic.1991.36.1.9.

Brewer, A. (2000). Effects of batten reinforcements on paintings on wood panel. Introductions and results of research on unreinforced panels. Hamilton Kerr Institute bulletin number 3, Massing, Ann (Hrsg.). University of Cambridge. Hamilton Kerr Institute, Cambridge, 41 – 59. In Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Bridarolli, A. S., Łukomski, M. & Freeman, A. (2022). Mechanical properties of mammalian and fish glues over range of temperature and humidity. *Journal of Cultural Heritage, 53, 226 – 235*. DOI: 10.1016/j.culher.2021.12.005.

Broström, T. & Nilsen, L. (Hrsg.). (2012). Energy efficiency in historic buildings. *Postprints from the Conference*, Visby, February 9 – 11, 2011.

Broström, T., Vyhlídal, T., Simeunovic, G., Klenz Larsen, P. & Zítek, P. (2013). Evaluation of different approaches of microclimate control in cultural heritage buildings. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.), *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012*.

Brunskog, M. (2012). Paint Failure as Potential Indicator of Cool Indoor Temperature. In Broström, T. & Nilsen, L. (Hrsg.), *Energy efficiency in historic buildings. Postprints from the Conference, Visby, February 9 – 11, 2011.*

Bründler, S., Bunz, S., Ritler, M., Soppa, K. & Nadim C. (2023a). Dry methylcellulose foams: Investigation of simple foaming and drying methods for applications in the field of conservation and restoration (Conference Paper). *Conference: ICOM CC - 20th Trienniale Conference, in València, Spain*. https://www.researchgate.net/publication/382360399_Dry_methylcellulose_foams_Investigation_of_simple_foaming_and_drying_methods_for_applications_in_the_field_of_conservation_and_restoration [27.07.2024].

Bründler, S., Bunz, S., Ritler, M. & Soppa, K. (2023b). METHYLCELLULOSE FOAMS Different Foaming and Drying Methods and Possible Applications. In The Field of Conservation-Restoration. (Poster). *Conference: Future Talks 2023 Materials Matter Cold and Current Cases in the Conservation of the Modern, in der Neuen Sammlung, München*. https://www.researchgate.net/publication/376134235_METHYLCELLULOSE_FOAMS_Different_Foaming_and_Drying_Methods_and_Possible_Applications_In_the_Field_of_Conservation-Restoration [Stand 27.07.2024].

Buck, R. (1998). The Development and Use of the Balsa Backing for Panel Paintings. In Dardes, K. and Rothe A. (Hrsg.), *The structural conservation of panel paintings: proceedings of a symposium at the J. P. Getty Museum, 24 – 28 April 1995,* The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 26.

Bujok, S., Bridarolli, A., Łukomski, M. & Bratasz, Ł. (2024). Reconsidering Museums' Climate and Seasonal Adjustment for Vulnerable Artifacts. *Studies in Conservation, 69*, 18 – 24. DOI: 10.1080/00393630.2024.2375162.

Bundesministerium für Bildung und Forschung (Hrsg.). Homepage, Validierungsprojekte Climate for Wood, Technische Universität Dresden; Laufzeit: 06/2019 - 05/2022. URL: https://www.validierungsfoerderung.de/validierungsprojekte/cultwood [Stand 26.07.2024].

Bundesrepublik Deutschland, vertreten durch das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV; Hrsg.). Homepage Umwelt Bundesamt zu „Weltweite Temperaturen und Extremwetterereignisse seit 2010". https://www.umweltbundesamt.de/themen/klima-energie/klimawandel/weltweite-temperaturen-extremwetterereignisse-seit#Chronik [Stand September 2024].

Burmester, A. & Eibl, M. (2014). Stable is Safe. Die Münchner Positionen zu Klima und Kulturgut. *Doerner Institut München*. https://s3.eu-central-1.amazonaws.com/thenetexperts-pinakothek-cms/03/stellungnahme-doerner-bizot-de.pdf [Stand September 2024].

Bylund Melin, C. (2012). Studying Organic Hygroscopic Art Objects Housed in Historic Buildings – A Valuable Source for Re-evaluating Climate Criteria and Saving Energy? In Broström, Tor, Nilsen, Lisa (Hrsg.), *Energy efficiency in historic buildings. Postprints from the Conference, Visby, February 9-11, 2011.*

Bylund Melin, C. & Legnér, M. (2013). Quantification, the link to relate climate-induced damage to indoor environments in historic buildings. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012*.

Bylund Melin, C. & Bjurman, J. (2017). Moisture gradients in wood subjected to relative humidity and temperatures simulating indoor climate variations as found in museums and historic buildings. *Journal of Cultural Heritage, 25*, 157–162. DOI: 10.1016/j.culher.2016.12.006.

Bylund Melin Charlotta, Hagentoft, Carl-Eric, Holl, Kristina, Nik, Vahid M., Kilian, Ralf. (2018). Simulations of Moisture Gradients in Wood Subjected to Changes in Relative Humidity and Temperature Due to Climate Change. In: Geosciences, 8, S. 378; doi:10.3390/geosciences8100378.

Camuffo, D., Pagan, E., Schellen, H. (2007). *Church heating and preservation of the cultural heritage: a practical guide to the pros and cons of various heating systems* (1.Aufl.). Electa Mondadori.

Canadian Conservation Institute (CCI). (2017). Agents of deterioration, URL: https://www.canada.ca/en/conservation-institute/services/agents-deterioration.html [Stand 19.2.2024].

Chelazzi, D., Poggi, G., Baglioni, P. (2024). The GREENART Project: Environmentally Friendly and Low Impact Materials for the Conservation of Cultural Heritage, *Studies in Conservation, 69*, 25 – 34. DOI: 10.1080/00393630.2024.2342656.

Child, R. (2013). The influence of the museum environment in controlling insect pests. In Ashley-Smith J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.), *Climate for collections. Standards and uncertainties: Postprints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November, 2012.* London, Munich: Archetype Publications, Doerner Institut, 419 – 424.

Cennini, C. (1871). *Das Buch von der Kunst oder Tractat der Malerei*, Band 1. Wien.

Coccato, A., Moens, L. & Vandenabeele, P. (2017). On the stability of mediaeval inorganic pigments: a literature review of the effect of climate, material selection, biological activity, analysis and conservation treatments. *Heritage Science*, 5(1). https://doi.org/10.1186/s40494-017-0125-6.

Colmars, J., Marcon, B., Maurin, E., Remond, R., Morestin, F., Mazzanti, Paola; Gril, J. (2009). Hygromechanical response of a panel painting in a church: monitoring and computer modeling. In Uwe Noldt (Hrsg.), *International conference on wooden cultural heritage. Evaluation of deterioration and management of change. COST Action IE0601 Conference. Hamburg, 07.-10.10.2009*. Online verfügbar unter https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00795990/document, [Stand 11.08.2022].

D'Agostino, G., Merra, R., Sottile, F., Lazzara, G., Bruno, M. (2023). Almonds By-Product Microcrystalline Cellulose as Stucco for Wooden Artifacts. Sustainability, 15, 7800. https://doi.org/10.3390/su15107800.

Dahlin, E. E. (2014). EU project MEMORI, Measurement, effect assessment and mitigation of pollutant impact on movable cultural assets. – Innovative research for market transfer, Project Final Report, NILU OR 15/2024. http://www.memori-project.eu/714.html [Stand 13.05.2019].

Derksen, K. (2021). Schimmelpilzbefall in Sammlungen – Behandlung und Prävention am Beispiel der Gemäldesammlung des Museum Krems in Niederösterreich. Effizienz trockener Reinigungsmethoden und Einflüsse des Klimawandels (Diplomarbeit, Universität für angewandte Kunst, Wien. Institut für Konservierung und Restaurierung)

URL: https://fedora.phaidra.bibliothek.uni-ak.ac.at/fedora/objects/o:37785/methods/bdef:Content/get [Stand: 02.11.2022].

Deutscher Museumsbund e. V. (David Vuillaume, Geschäftsführer). (2023, März 14). Neue Standards für die Museumsklimatisierung angesichts der Klimakrise. URL: https://www.museumsbund.de/museumsklimatisierung/ [Stand September 2024].

DIN EN ISO 12571: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften (ISO 12571:2021); Deutsche Fassung EN ISO 12571:2021.

DIN EN ISO 12572: Wärme- und feuchtetechnisches Verhalten von Baustoffen und Bauprodukten - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Verfahren mit einem Prüfgefäß (ISO 12572: 2016); Deutsche Fassung EN ISO 12572:2016.

DIN EN ISO 7783: Beschichtungsstoffe - Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit - Schalenverfahren (ISO 7783:2018); Deutsche Fassung EN ISO 7783:2018.

DIN EN 1927: Ungeformte (monolithische) feuerfeste Erzeugnisse - Teil 1: Einführung und Klassifizierung (ISO 1927-1:2012); Deutsche Fassung EN ISO 1927-1:2012.

DIN EN ISO 9972: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden - Bestimmung der Luftdurchlässigkeit von Gebäuden – Differenzdruckverfahren (ISO 9972:2018-12).

DIN EN ISO 12569: Wärmetechnisches Verhalten von Gebäuden und Werkstoffen - Bestimmung des spezifischen Luftvolumenstroms in Gebäuden - Indikatorgasverfahren (ISO 12569:2017); Deutsche Fassung EN ISO 12569:2017.

DIN EN 15757 Erhaltung des kulturellen Erbes - Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien; Deutsche Fassung EN 15757:2010

DIN EN 15758 Erhaltung des kulturellen Erbes - Verfahren und Geräte zur Messung der Temperatur der Luft und der Oberflächen von Objekten; Deutsche Fassung EN 15758:2010

DIN EN 15759-1 Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 1: Leitfäden für die Beheizung von Andachtsstätten; Deutsche Fassung EN 15759-1:2011

DIN EN 15759-2 Erhaltung des kulturellen Erbes - Raumklima - Teil 2: Lüftung für den Schutz von Gebäuden und Sammlungen des kulturellen Erbes; Deutsche Fassung EN 15759-2:2018

DIN EN 15999-1 Erhaltung des kulturellen Erbes - Leitfaden für die Konstruktion von Schauvitrinen zur Ausstellung und Erhaltung von Objekten - Teil 1: Allgemeine Anforderungen; Deutsche Fassung EN 15999-1:2014.

DIN EN 15999-2 Erhaltung des kulturellen Erbes - Leitfaden für die Konstruktion von Schauvitrinen zur Ausstellung und Erhaltung von Objekten - Teil 2: Technische Aspekte (In Arbeit).

DIN EN 16242 Erhaltung des kulturellen Erbes – Verfahren und Geräte zur Messung der Luftfeuchte und des Austausches von Feuchtigkeit zwischen Luft und Kulturgut; Deutsche Fassung EN 16242:2012

DIN EN 16853 Erhaltung des kulturellen Erbes – Erhaltungsprozess – Entscheidungsprozesse, Planung und Umsetzung; Deutsche Fassung EN 16853:2017.

DIN EN 16893 Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Standort, Errichtung und Änderung von Gebäuden oder Räumlichkeiten für die Lagerung oder Nutzung von Sammlungen des kulturellen Erbes; Deutsche Fassung EN 16893:2018.

DIN EN ISO 7730 Ergonomie der thermischen Umgebung – Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und Kriterien der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO 7730:2005); Deutsche Fassung EN ISO 7730:2005.

DIN 52184:1979-05 Prüfung von Holz; Bestimmung der Quellung und Schwindung.

DIN 1052:2004-08 Entwurf, Berechnung und Bemessung von Holzbauwerken – Allgemeine Bemessungsregeln und Bemessungsregeln für den Hochbau.

Dionisi Vici, P., Mazzanti, P. & Uzielli, L. (2006). Mechanical response of wooden boards subjected to humidity step variations: climatic chamber measurements and fitted mathematical models. *Journal of Cultural Heritage*, 7(1), 37 – 48. DOI: 10.1016/j.culher.2005.10.005.

Dionisi-Vici, P., Allegretti, O., Braovac, S., Hjulstad, G., Jensen, M. & Storbekk, E. (2013). The Oseberg ship. Long-term physical-mechanical monitoring in an uncontrolled relative humidity exhibition environment. Analytical results and Hygromechanical modelling. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.), *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Dix, A. & Raquet, M. (2016). Schadstoffvermeidung in Vitrinen im Germanischen Nationalmuseum. Erfolge und Kompromisse. Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut. *VDR-Beiträge Heft*, 2/2016, 79-88.

Dreiner, K., Klein, P. & Zillich, I. (1994). *Untersuchungen zur Verwölbung an Tafelbildern*. Abschlussbericht DFG-Projekt KI900/1-3. (Unveröffentlicht).

Duivenvoorden, J. R., Kramer, R. P., Van Eikema Hommes, M. H., Iedema, P. D., Hermans, J. J. & Keune, K. (2023). The distribution and transport of water in oil paintings: A numerical moisture diffusion model. *International Journal Of Heat And Mass Transfer*, 202, 123682. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2022.123682.

Dvinskikh, H.S.V., Mendicino, M., Fortino, A.L. & Toratti, T. (2011). NMR Imaging Study and Multi-Fickian Simulation of Moisture Transfer in Norway Spruce Samples. *Engineering Structures*, 33, 3079-3086.

Eckermann, W. (2019). Kirchen heizen. Grundsätze, Empfehlungen und deren Anwendung am Beispiel der Friedenskirche in Potsdam-Sanssouci. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20)*.

Eggert, G. (2022). Saturated salt solutions in showcases: humidity control and pollutant absorption. *Heritage Science, 10(54)*. https://doi.org/10.1186/s40494-022-00689-3.

Eibl, M. & Burmester, A. (2013). Learning from history. Historic indoor climate conditions and climate control strategies. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Eibner, A. (1928). Tafelmalerei, Verl. B. Heller, München, S. 190.

Eisbein, M. (2016). Die offene Klimakammer. Fünf Praxisbeispiele. *Interdisziplinäre Forschung in der Denkmalpflege*, 107 – 116.

Eisbein, M. (2019). Der Cranachaltar in der Schlosskapelle Augustusburg – seit 200 Jahren und auch zukünftig ein Pflegefall. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20)*.

Ekelund, S., van Duin, P., Ankersmit, B., Groves, R., Jorissen, A., Schellen, H. & Suiker, A. (2012). The Museum Study of the Climate4Wood research project. *Conference: ICOM Heritage Wood: Research & Conservation in the 21st Century, Warsaw*.

Ekelund, S., Van Duin, P., Jorissen, J., Ankersmit, B. & Groves, R. M. (2017a). A Method for Studying Climate-related Changes in the Condition of Decorated Wooden Panels. *Studies in Conservation*, 63 (2), 62 – 71. DOI: 10.1080/00393630.2017.1325553.

Ekelund, Stina, Luimes, R. A., Gauvin, C. A. F., Van Duin, Paul, Jorissen, J., Ankersmit, B., Suiker, A. S. J., Groves, R. M. & Schellen, H. L. (2017b). The development of a methodology to understand climate-induced damage in decorated oak wood panels. *ICOM-CC 18th Triennial Conference, 2017, Copenhagen.*

Elliott, V. & Ray, A. D. (2024, August 7). *White Pigments*. Traditional Oil Painting. https://traditionaloilpainting.com/white-pigments/#:~:text=Some%20manufacturers%20call%20their%20white,calcium%20carbonate%20or%20something%20else. [Stand 2024].

Emmerling, E., Ringer (später Hagn), C. (1996). Das Aschaffenburger Tafelbild. Studien zur Tafelmalerei des 13. Jh. *Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 89*, 614 – 616.

Empfehlungen der Bundeskonferenz der Kommunalarchive (2010). Arbeitshilfe Umgang mit Schimmel in Archiven. Verabschiedung: Beschluss der BKK von 2010-09-28/29 in Dresden. Unterausschuss Bestandserhaltung.

Engelund Thybring, E. & Fredriksson, M. (2023). Wood and Moisture. In Niemz et al. (Hrsg.). *Springer Handbook of Wood Science and Technology* (355 – 397). https://doi.org/10.1007/978-3-030-81315-4_7 [Stand September 2024].

Erhardt D., Mecklenburg M., Tumosa C. & Olstadt T. (1996). New versus Old Woods; Differences and Similarities in Physical, Mechanical and Chemical Properties. ICOM Committee for Conservation 11th Triennial meeting, Edinburg Scotland, 903 – 910. In *Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014).* Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Erzdiözese München und Freising (k. A.). URL: file:///I:/Literatur/heizen%20l%C3%BCften/Lu_ften%20Webansicht%20Klein.pdf [Stand 22.07.2024].

Erzdiözese München und Freising (Individualisierte Fassung) mit fachlicher Unterstützung von Energie&Kirche. (2023). Verantwortungsbewusstes Temperieren von Kirchen im Winter 2022/2023 Handlungsempfehlungen URL: file:///I:/Literatur/heizen%20l%C3%BCften/Handlungsempfehlungen%20Verantwortungsbewusstes%20Temperieren%20von%20Kirchen%20-%20Mu%CC%88nchen%20Freising%2020221024.pdf [Stand 22.07.2024].

Fidanza, M.R. & Caneva, G. (2019). Natural biocides for the conservation of stone cultural heritage: A review. Journal of Cultural Heritage 38, 271–286.

Flade, S. (2012). *Zisterzienserinnenstift St. Marienthal / Ostritz KLOSTERKIRCHE* [Dokumentation, unveröffentlicht].

Flade, S. (2012). *Prüfbericht zum Auftrag 122016 am Institut für Holztechnologie Dresden gemeinnützige GmbH*. [Unveröffentlicht].

Fragiacomo, M., Fortino, S., Tononi, D., Usardi, I. &Toratti, T. (2011). Moisture-Induced Stresses Perpendicular to Grain in Cross-Sections of Timber Members Exposed to Different Climates. *Engineering Structures, 33*, 3071-3078.

Fritz, E. (2019). Infrarot-Folien-Heizungssystem im denkmalgeschützten Objektum-feld – Ein Fallbeispiel aus der Praxis. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20)*.

Fuesers, O., Krieg, V., Kühnen, R. (2005). Studie zum hygroskopischen Verhalten von Holz. Dehnungsmesstrefien zur Dokumentation von Materialeigenschaften. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung*, 2005(1). 129 – 136.

Gereke, T., Anheuser, K., Lehmann, E., Kránitz, K. & Niemz, P. (2011). Moisture behaviour of recent and naturally aged wood. *Wood research* 56 (1), 33 – 42. http://www.woodresearch.sk/wr/201101/04.pdf, [Stand 11.08.2022].

GERICS Climate Service Center. (2024). Karten und Visualisierungen des Klimas („Risk maps“), URL: https://www.gerics.de/products_and_publications/maps_visualisation/index.php.en. [Stand September 2024].

Gerling, C. (2012). *Celluloseether für die Festigung von Mal- und Fassungsschichten auf Gemälden und gefassten Holzobjekten. Untersuchungen zur mikrobiellen Resistenz und Wasseraufnahmefähigkeit bei hoher Luftfeuchtigkeit* (Bachelorarbeit, Hildesheim (unveröffentlicht)).

Greenspan L. (1977). Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. *Journal of Research of the National Bureau of Standards- A. Physics and Chemistry*, 81(1),January- February 1977. 89 – 96. https://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/jres/81a/jresv81an1p89_a1b.pdf. [Stand 26.07.2024].

Griffin, I., Maule, L. & Ridge, J. (2024). Nothing Lasts Forever? Considering Lifespans in a Contemporary Collection. *Studies in Conservation*, 69, 127 – 134. https://doi.org/10.1080/00393630.2024.2336787. [Stand 30.07.2024].

Grøntoft, T., Marchiori, E. & Odlyha, M. (2019). Response of lead deposited on glass to acetic acid exposure with potential for its application as an acetic acid dosimeter/sensor, 9 – 16. Http://www.Morana-Rtd.com/E-Preservationscience/2018/e-PS_2018_A2_Grøntoft.Pdf [Stand: 29.05.2019].

Gurgul, G. (2015). Temporäre Klimatisierung zur Unterstützung restauratorischer Maßnahmen. In Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden.* 140-149.

Habaru, S., Prieur, M. & Glatigny, J. (2015). Sturmlandschaft mit Klimaschock. In: Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*. 204 – 213

Hartl, L. (1996). Verwölbung von Gemäldetafeln. Orientierende Untersuchungen zu Ursachen und Mechanismen. (Diplomarbeit. Universität Hamburg, Fachbereich Biologie. (Unveröffentlicht)).

Hähner, U., Petersen, K., Schultz, J. & Becker, Et. (2013). *Weiterentwicklung und modellhafte Anwendung einer innovativen, massentauglichen Reinigungsmethode zur Dekontamination von mikrobiell belastetem Archivgut und Textilien am Beispiel des Niedersächsischen Landesarchivs Hannover und Objekten der Von Veltheim Stiftung Helmstedt*. DBU-Abschlussbericht [AZ 29643-45]. URL: https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-29643.pdf [Stand August 2024].

Hebing, C. (1909). *Oelfarbe und Oelfarbanstriche*, München, Georg D. W. Callwey.

Henderson, J. & Waller, R. (2024). Dissociation and Loss: a Challenge for Sustainable and Inclusive Conservation, *Studies in Conservation*, 69, 169 – 175. DOI: 10.1080/00393630.2024.2339768.

Hennen, I. C., Kalisch, U., Kersten, H., Klocke, J., Löther, T., Petersen, K. & Zimmermann, C. (2018). *Ursachen des Schimmelbefalls an Orgeln*. DBU Abschlussbericht.

Henry, F., Lopes, I., Bendjilali, C., Morteau, S. (2004). Encapsulation of Antifungal Essential Oils for the Protection of Wirks of Art. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, 173 – 178.

Hess, D., Hirschfelder, D., von Baum, K. (Hrsg.). (2019). Die Gemälde des Spätmittelalters im Germanischen Nationalmuseum. Band I: Franken, Teil 1 und 2.

Hess, M., Thieme, I. (2006/07). *Freising. Dom Mariä Geburt. Abendmalgemälde in der unteren Sakristei. Bericht über die Notsicherung*, München [Unveröffentlichter Arbeitsbericht].

Hilger, T., Hörmann, M., Brandt, J., Holl, K. & Fröhlich, A. (2023): *Entwicklung und modellhafte Anwendung einer in situ Befeuchtungsmethode mit Monitoringkonzept am Beispiel eines anthropogen geschädigten großformatigen Holztafelbildes*, 4. Zwischenbericht, DBU-Projekt (AZ 37502/01), 31.12.2023 [Unveröffentlicht].

Holl, K. (2013). Comparison of indoor climate analysis according to current climate guidelines with the conservational investigation using the example of Linderhof Palace. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (2013). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Holl, K. (2016). *Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation* (Dissertation München).

Holl, K. & Krus, M. (2019). Möglichkeiten und Grenzen der hygrothermischen Simulation am Fallbeispiel des Franziskusaltars in der Renatuskapelle von Schloss Lustheim sowie des Hochaltars von St. Margaretha in Roggersdorf. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20).*

Holl, K. & Bellendorf, P. (2022). *Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern. Analyse und Empfehlungen zum Umgang hinsichtlich der Auswirkungen der globalen, anthropogenen Klimaerwärmung.* DBU-Abschlussbericht AZ 35598-01/02-45.

Horie, V. C. (2010). Material for Conservation. Organic Consolidants, Adhesives and Coatings. Routledge.

Heyn, C., Petersen, K., Krumbein, W. E. (2004). Mikrobieller Angriff auf synthetische Polymere. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, S. 208 – 214.

Inagaki, T., Yonenobu, H. & Tsuchikawa, S. (2010). Near-Infrared Spectroscopic Monitoring of the Water Adsorption/Desorption Process in Modern and Archaeological Wood. Conference Proceedings. Wood Science for the conservation of Cultural Heritage. 5 – 7 November, Braga 2008. Firenze University Press, 199 – 200. In *Netherlands Orga- nisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation.* (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

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), 229–40. https://doi.org/10.1179/sic.1996.41.4.229.

ISO 11844-1: Corrosion of metals and alloys – classification of low corrosivity of indoor atmospheres – Part 1: de-termination and estimation of indoor corrosivity, International Organization of Standardization, Genève, Suisse, 2006.

Jakobs, Dörthe, Garrecht, Harald (Hrsg.). (2017). UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau. Die Wandmalereien in der Kirche St. Georg. Interdisziplinarität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Denkmalpflege, Tagungsband des DBU-Abschlusskolloquiums 22.– 24. März 2017, Fraunhofer IRB Verlag.

Jakieła, S., Bratasz, Ł., Kozłowski, R. (2008). Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions. *Wood Science and Technology*, 42, 21-37. doi:10.1007/s00226-007-0138-5.

Jamalabadi, M. Y. A., Zabari, N., Bratasz, Ł. (2021). Three-dimensional numerical and experimental study of fracture saturation in panel paintings. *Wood Science and Technology*, 55, 1555–1576. https://doi.org/10.1007/s00226-021-01328-z.

Janas, A., Mecklenburg, M. F., Fuster-López, L., Kozłowski, R., Kékicheff, P., Favier, D., Krarup Andersen, C., Scharff, M. & Bratasz, Ł. (2022). Shrinkage and mechanical properties of drying oil paints. *Heritage Science*, 10(181). https://doi.org/10.1186/s40494-022-00814-2.

Janas, A., Avgerou, N., Charalambides, Maria N., Fuster-López, Laura, Bratasz, Łukasz. (2024b). Fracture toughness of aged oil paints. *Heritage Science,* 12 (103). https://doi.org/10.1186/s40494-024-01224-2.

Janis, K. (2005). *Restaurierungsethik im Kontext von Wissenschaft und Praxis*. Peter Lang Gmbh, Internationaler Verlag Der Wissenschaften.

Jaskierny, D. & Young, C. (2018). The classification and categorisation of crack patterns and delamination found on the Brown Gallery Portrait Set “Knole House”. *The Conservator.*

Kawai, S., Yokoyama M., Matuso, M. & Sugiyama, J. (2010). Research on the aging of Wood in RISH. Conference Proceedings. Wood Science for the conservation of Cultural Heritage. 5 – 7 November, Braga 2008. Firenze University Press, 52 – 56. In *Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam*, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Keck, S. (1969). Mechanical Alteration of the Paint Film. *Studies in Conservation*, 14(1), 9 – 30.

Kilian, R., Bichlmair, S. & Brandl, H. (2019). Raumklima und Klimawirkungen in Kirchen – Bewertung des Schadenspotenzials. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20).*

Klemm, L. (2013). Passively conditioned zero-energy storage for cultural properties and archival material. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Kocan, O. (WS23/24): *Experimentelle Untersuchung ressourcenschonender in-situ Befeuchtungsmethoden für historische Holztafelgemälde* (Masterarbeit, Technische Universität München, München. Lehrstuhl für Holzbau und Baukonstruktion. [Unveröffentlicht].

Koserog, N. (WS23/24). *Bewertung der Auswirkungen von Temperatur- und Feuchteveränderungen auf gefasste Holzoberflächen anhand von Klimaschrankversuchen* (Masterarbeit, Otto-Friedrich-Universität Bamberg [Unveröffentlicht].

Kozlowski, R., Bratasz, Ł, Lasyk, L. & Lukomski, M. (2009). Allowable Microclimativ Variations for Painted Wood: Direct Tracing of Damage Development. In The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.), *Panel Painting Initiative: Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training*.

Köneke, M. (2013). Schimmel im Haus erkennen – vermeiden – bekämpfen. Stuttgart, Fraunhofer IRB Verlag, 4., überarb. und erw. Aufl.

Kránitz, K., Sonderegger, W., Bues, C. & Niemz, P. (2015). Effects of aging on wood: a literature review. *Wood Science And Technology*, 50(1), 7 – 22. https://doi.org/10.1007/s00226-015-0766-0.

Kroiss, S. & Bauer-Empl, R. (1989). *Konservierungsbericht – Tafelbild aus der Domsakristei Freising*, (Diözesanmuseum Freising [Unveröffentlicht].

Krzemień, L., Łukomski, M., Bratasz, Ł., Kozłowski, R. & Mecklenburg, M. F. (2016). Mechanism of craquelure pattern formation on panel paintings. *Studies in Conservation*, 61(6), 324 – 330. https://doi.org/10.1080/00393630.2016.1140428.

Kunze, B. (2018). VDA Workshop „Notfall – Wasser“ im Archivzentrum Hubertusburg am 25.04.2018. URL: https://www.vda.archiv.net/fileadmin/user_upload/2-5_VDA_Workshop_Fragebogen_UEbung_5_Knz.pdf [Stand August 2024].

Kupczak, A., Lasyk, Ł., Bratasz, Ł., Kozłowski, R. & Łukomski, M. (2015). Risk index calculator – a software tool for a quantitative assessment of risk of physical damage to objects vulnerable to climate variations. In *Conference: 1st International Conference Science and Engineering in Arts Heritage and Archeology - SEAHAAt: University College London, United Kingdom.*

Reclam, P. (1984 und 1997). *Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken 1. Farbmittel – Buchmalerei – Tafel- und Leinwandmalerei*, Stuttgart.

Künzel, H. (1994). *Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten* (Dissertation, Universität Stuttgart).

Kujovic, A., Gostinčar, C., Kavkler, K., Govedić, N., Gunde-Cimerman, N. & Zalar, P. (2024). Degradation Potential of Xerophilic and Xerotolerant Fungi Contaminating Historic Canvas Paintings. *Journal of Fungi*, 10, 76. https://doi.org/10.3390/jof10010076.

Kupczak, A., Bratasz, Ł., Krys´ciak-Czerwenka, J., Kozłowski, R. (2018). Moisture sorption and diffusion in historical cellulose-based materials. *Cellulose*, 25(5), 1-12. https://doi.org/10.1007/s10570-018-1772-9.

Landskron, G. & A. (2016). *Freising, Dom Mariä Geburt Holztafelgemälde in der Domsakristei. Zwischenbericht zur Untersuchung*. Archiviert im Dokumentationsarchiv am BLfD.

Landskron, G. & A. (2020). *Klimadaten Domsakristei Freising*. Archiviert im Dokumentationsarchiv am BLfD.

Lankester, P., Brimblecombe, P. & Thickett, D. (2013). The application of damage functions to future indoor climate predictions. In: Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012*.

Lee, D. S.-H., Kim, N.-S., Scharff, M., Nielsen, A. V., Mecklenburg, M., Fuster-López, L., Bratasz, L. & Andersen, C. K. (2022). Numerical modelling of mechanical degradation of canvas paintings under desiccation. *Heritage Science*, 10 (130). https://doi.org/10.1186/s40494-022-00763-w

Leijonhufvud, G., Kjellström, E., Broström, T., Ashley-Smith, J. & Camuffo, D. (2013). Uncertainties in damage assessments of future indoor climates. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012*.

Legrum, J. (1992). *Untersuchung über das Temperatur- und Feuchteverhalten von Holztafelbildern.* Institut für Steinkonservierung in Hessen, Rheinland-Pfalz und im Saarland e. V.

Lemke, W. (2019). Energiesparendes und nachhaltiges Heizen in Kirchen. Herausforderungen und Lösungsansätze. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20).*

Linke, F. & Adam, E. (1925). Die Malerfarben, *Mal- und Bindemittel und ihre Verwendung in der Maltechnik*. München, B. Heller.

Luhmann, T. (2018). Nahbereichsphotogrammetrie. Grundlagen - Methoden - Beispiele. (4. neu bearbeitete und erweiterte Auflage). Berlin, Offenbach: Wichmann. URL: https://www.content-select.com/index.php?id=bib_view&ean=9783879076413 [Stand 26.07.2024].

Lukomski, M. 2010. *Fatigue fracture of paint layers from repeated cycles of humidity fluctuations. Lecture at the international workshop*, 18 – 19 February, Allowable microclimatic variations for polychrome wood, Norwegian Institute for Cultural Heritage Research – NIKU, Oslo. Unveröffentlicht.

Lukomski, M. 2011. *Researcher at the Institute of Catalysis and Surface Chemistry*, Polish Academy of Sciences, Krakow, Poland, personal correspondence with Mecklenburg, unpubl. 2011-02-26.

Luxford, N., Thickett, D. (2013). Monitoring complex objects in real display environments – how helpful is it? In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.

Martens, Marco H. J. (2012). Climate risk assessment in museums. Degradation risks determined from temperature and relative humidity data (Dissertation, TU Eindhoven)

Martens, M., Schellen, H. (2013). Climate risk assessment in museums. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg). *Climate for Collections: Standards and Uncertainties. Postprints of the Munich Climate Conference 7 to 9 November 2012.*

Meyer-Buhr, U. & Dix, A. (2016). Im Schneewittchensarg – eine Großvitrine für den Heiltumsschrein. *Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut*. VDR-Beiträge, 2/2016, 70 –78.

Mecklenburg, M. F. & Tumosa, C. S. (1991). Mechanical Behavior of Paintings Subjected to Changes in Temperature and Relative Humidity. In Mecklenburg, M. F. (Hrsg.). *Art in Transit: Studies in the Transport of Paintings* (173 – 216). Washington, DC: National Gallery of Art.

Mecklenburg, M. F. (1991). Some Mechanical and Physical Properties of Gilding Gesso. In Bigelow, D., Cornu, E., Landrey, G. J., & van Horne, C. (Hrsg.). *Gilded Wood Conservation and History* (163–170). Madison, CT: Sound View Press.

Mecklenburg, M. F., Tumosa, C. S. & Erhardt, D. (1994). Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In *Painted Wood: History and Conservation. Proceedings of a symposium organized by the Wooden Artifacts Group of the AIC,* 11.-14. November 1994, Williamsburg, Virginia. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Mecklenburg, M. F., Tumosa, Charles S. & Erhardt, W. D. (1998). Structural Response of Painted Wood Surfaces to Changes in Ambient Relative Humidity. In Dorge, V. and Howlett, F. C (Hrsg.). *Painted Wood: History and Conservation*, 464 – 483. Los Angeles, CA: The Getty Conservation Institute.

Mecklenburg, M. F. (2007). *Determining the Acceptable Ranges of Relative Humidity And Temperature in Museums and Galleries*. Part 1, Structural Response to Relative Humidity. URL: https://www.researchgate.net/publication/237333098_Determining_the_Acceptable_Ranges_of_Relative_Humidity_And_Temperature_in_Museums_and_Galleries.

Mervin, R. (2007). *The benefits and disadvantages of adding silica gel to microclimate packages for panel paintings*. In: Museum Microclimates, The National Museum of Denmark, Copenhagen, 237 - 243.

Michalski, S. (1991). Crack Mechanisms in Gilding. In *Gilded Wood: Conservation and History*. https://www.academia.edu/741952/1991_Crack_mechanisms_in_gilding [Stand 26.07.2024].

Mohen J. P., Menu M. & Mottin B. (2006). Mona Lisa Inside the Painting, Abrams, New York. In Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Monfardini, P. (2009). Structural and Climate Control Systems for Thinned Panel Paintings. In The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.). *Panel Painting Initiative: Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training.*

Müller, A. & Brandt, J. (2022). Kunst im Fokus. Fachliche Aspekte bei der Vorbereitung von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der künstlerischen Ausstattung. *Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege (Hrsg.). (2022). Von der Planung zur Ausführung. Denkmalpflegerische Restaurierungsprojekte an Kirchen in Bayern* (Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege; 27). Kunstverlag Josef Fink, 55.

Nadler, S., Hildebrandt, Maria. (2004). Freising. Domkirche Mariä Geburt und St. Korbinian. Dokumentation zur Bau- Ausstattungs- und Restaurierungsgeschichte. Archiviert im Dokumentationsarchiv des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege.

New B. & Marchant R. (2011). The Repair and Support of Thinned Panel Paintings: A Case Study in Modifying Established Techniques. *In Facing the Challenges of Panel Painting Conservation: Trends, Treatments and Training*. Proceedings of a symposium at the Getty Centre, 17 – 18 May 2009. Phenix, A. & Chui S.

A. (Hrsg.). The Getty Conservation Institute, Los Angeles, California, 48 – 58. In Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Nicolaus, K. (1998). Handbuch der Gemälderestaurierung. Könemann.

Nicolaus, K. (2003). DuMonts Handbuch der Gemäldekunde – Gemälde Erkennen und Bestimmen, In zusammenarbeit mit dem Herzog Anton Ulrich-Museum Braunschweig, Kunstmuseum des Landes Niedersachsen, DuMont Literatur und Kunst Verlag, Köln.

Niemz, P. & Sonderegger, W. U. (2021b). Holzphysik: Eigenschaften, Prüfung und Kennwerte (2. Aufl.). Hanser.

NWO (2014) = Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative, AC The Hague.

Odlyha, M., Wade, N., Wang, Wang, Q., Ormsby, B., Padfield, Tim et al. (2005). *Microclimate indoor monitoring: Damage assessment for cultural heritage preservation*. Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/284267704_Microclimate_indoor_monitoring_Damage_assessment_for_cultural_heritage_preservation [Stand 26.07.2024].

Ojanen, T., Peuhkuri, R., Viitanen, H., Lähdesmäki, K., Vinha, J., & Salminen, K. (2011). Classification of material sensitivity-New approach for mould growth modeling. *Proceedings of the 9th Nordic Symposium on Builing Physics*, 2, 867-874.

Olstadt T. M. & Haugen A. (2007). Warm feet and cold art: is this the solution? Polychrome wooden ecclesiastical art: climate and dimensional changes. In Museum microclimates contributions to the Copenhagen conference, 19 – 23 November 2007. National Museum of Denmark, Copenhagen, Denmark, 43 – 49. In *Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam*, mit Unterstützung der The Getty Foundation. (2014). Van Duin, Paul & Kos, Nico (Hrsg.). *The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020*. Teil der Panel Painting Initiative. AC The Hague: NWO.

Padfield, T. (1998). *The Role of Absorbent Building Materials in Moderating Changes of Relative Humidity. Department of Structural Engineering and Materials*. (Dissertation. Technical University of Denmark) Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/267223789_The_Role_of_Absorbent_Building_Materials_in_Moderating_Changes_of_Relative_Humidity [Stand 26.07.2024].

Padfield, T. (1999). On the usefulness of water absorbent materials in museum walls. Research. https://www.researchgate.net/publication/242236460_On_the_usefulness_of_water_absorbent_materials_in_museum_walls [Stand 26.07.2024].

Padfield, Tim. (2002). *The window in context: the interplay between building components. Research* Gate: https://www.researchgate.net/publication/238669212_THE_WINDOW_IN_CONTEXT_THE_INTERPLAY_BETWEEN_BUILDING_COMPONENTS [Stand 26.07.2024].

Padfield, T. & Klenz Larsen, P. (2006). Low energy air-conditioning of archives. *Journal of the Society of Archivists,* 27(2), 213-226. DOI: 10.1080/00379810601101293. Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/232941103_Low_energy_air-conditioning_of_archives [Stand 26.07.2024].

Padfield, T., Klenz Larsen, P., Aasbjerg Jensen, L. & Ryhl-Svendsen, M. (2007). The potential and limits for passive air conditioning of museums, stores and archives. Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/279656680_The_potential_and_limits_for_passive_air_conditioning_of_museums_stores_and_archives [Stand 26.07.2024].

Padfield, T. (2008). *Exploring the limits for passive indoor climate control.* Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/265480865_Exploring_the_limits_for_passive_indoor_climate_control [Stand 26.07.2024].

Padfield, T & Aasbjerg Jensen, L. (2009*). Humidity buffer capacity of some building materials.* Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/265037978_Humidity_buffer_capacity_of_some_building_materials [Stand 26.07.2024].

Padfield, T. & Aasbjerg Jensen, L. (2011). *Humidity buffering of building interiors by absorbent materials*. Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/265262245_Humidity_buffering_of_building_interiors_by_absorbent_materials [Stand 26.07.2024].

Pallas, L., Holl, K. & Bellendorf, P. (2022). Visualising complex dimensional changes of a wooden Panel Painting in Freising Cathedra', in CHNT Editorial board. *Proceedings of the 27th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, November 2022*. Heidelberg: Propylaeum, held in Vienna and online, November 2022 (in print).

Pei-Chi W. & Chia-Ling, C. (2018). Utilisation of essential oils for wooden sculpture conservation at Juming Museum, Journal of the Institute of Conservation, 41:3, 235-245, DOI: 10.1080/19455224.2018.1510424.

Pelagotti, A., Uccheddu, F., Massa, E. & Carfagni, M. (2018). Comparing two 3D measurement techniques for documenting painted wooden panels surface deformations on a real test case: "leftMystical Marriage of Saint Catherine"right by Renaissance artist Piero di Cosimo. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 364, 1–8. DOI: 10.1088/1757-899x/364/1/012090.

Pelludat, I. (2004). Schimmel oder nicht, das ist die Frage. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, S. 19-24.

Petersen, K. & Toepfer, I. (2001). Biomonitoring an Kunstobjekten. *Restauro. Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen*, 107(5), 364-372.

Petersen, K. (2004). Nachweis mikrobieller Besiedelung an Kunst- und Kulturgut – Möglichkeiten und Grenzen. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, 30 – 38.

Phenix, A., Chui, S. A. (Hrsg.). (2009). Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training. In *Proceedings from the symposium, May 17-18 2009, Los Angeles.*

Plaschkies, K., Henzler, T. & Löther, T. (2019). *Entwicklung technischer Verfahren zur Vermeidung der biogenen Schadstoffbelastung in Kirchenorgeln*. Schlussbericht IGF-Vorhaben Nr. 18891 BG/1. Dresden.

Poznańska, K., Hola, A., Kozłowski, R., Strojecki, M. & Bratasz, Ł. (2024). Mechanical and moisture-related properties of selected dried tempera paints. *Heritage Science,* 12(25). https://doi.org/10.1186/s40494-024-01147-y.

Prast, Georg. (2022). Powerpointpräsentation zum Kick-off-Treffen am 22.07.2022 in Freising. [Unveröffentlicht] sowie freundlicher mündlicher Austausch.

Rachwał, B., Bratasz, Ł., Krzemień, L., Łukomski, M. & Kozłowski, R. (2012b). Response of Wood Supports in Panel Paintings Subjected to Changing Climate Conditions. *Strain*, 48(5). DOI: 10.1111/j.1475-1305.2011.00832.x.

Rachwał, B., Bratasz, Ł., Krzemień, L., Łukomski, M. & Kozłowski, R. (2012d). *Fatigue Damage of the Gesso Layer in Panel Paintings Subjected to Changing Climate Conditions*. Strain, 48(6), 474 – 481. https://doi.org/10.1111/j.1475-1305.2012.00844.x.

Raffler, S., Bichlmair, S., Ralf, K. (2015). Mounting of Sensors on Surfaces in Historic Buildings. *Energy and Buildings*, Vol 95, 92 – 97.

Rahrig, M. & Street, R. E. (2020). 'Rethinking Uniformity: Analysis of Rosso's Serial Casts of the Bambino ebreo through Digital Surface Comparison' Finding Lost Wax. The Disappearance and Recovery of an Ancient Casting Technique and the Experiments of Medardo Rosso. *Studies in Art & Materiality*, Vol 3, 275–302, https://doi.org/10.1163/9789004439931_016 [Stand 22.07.2024].

Ranacher, M. (2004). Ursachen und die erfolgreiche Prävention von Schimmelbefall an Kulturgut und Architektur. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, S. 70 – 84.

Reeb, S. & Garrecht, H. (2019). Was ist Klima-Monitoring? In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20).*

Reeb, S. (2023). Merkblatt „Monitoring“ AG 10.4 „Klima und Messen“. In *WTA Tagung - Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken II: Klimazielwerte 10-3-22/D.*

Reichenwald, H. F. (2005). Klimabedingte Schäden an Raum und Ausstattung. Fallbeispiele aus Baden-Württemberg. In Exner, Matthias, Jakobs, Dörthe (Hrsg.). *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes*. ICOMOS-Hefte des deutschen Nationalkomitees XLII.

Research Agenda. (2014) siehe Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam, mit Unterstützung der The Getty Foundation.

Reuber, L. (2010). Klebstoffe für die Rissverklebung an Leinengeweben. In *Kölner Beiträge zur Restaurierung und Konservierung von Kunst- und Kulturgut*, Digitale Edition Band 1. CICS (Institut für Restaurierungs- und Konservierungswissenschaft), Köln.

Rode, C., Holm, A. & Padfield, T. (2004). A Review of Humidity Buffering in the Interior Spaces. *Journal of Building Physics,* 27(3), 221-226. DOI: 10.1177/1097196304040543. Research Gate: https://www.researchgate.net/publication/245382402_A_Review_of_Humidity_Buffering_in_the_Interior_Spaces [Stand 22.07.2024].

Röhlen, U. (2022). Funktionale Aspekte von Lehmbaustoffen bei der Innendämmung. *Restaurator im Handwerk*, 3/2022, ab S. 28.

Rudolph, B. & Žvinyte, D. (2015). Ein Ausgleichsparkett aus Balsaholz – ein Fallbeispiel. In Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*.

Ryhl-Svendsen, M., Aasbjerg Jensen, L., Klenz Larsen, P., Bøhm, B. & Padfield, T. (2013). A museum storage facility controlled by solar energy. In 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, Munich: Archetype Publications; Doerner Institut, 11 – 19.

Sandu, I. C. A., Brebu, M., Luca, C., Sandu, I. & Vasile, C. (2003). Thermogravimetric study on the ageing of lime wood supports of old paintings. *Polymer Degradation and Stability,* 80 (1), 83 – 91. DOI: 10.1016/S0141-3910(02)00386-5.

Saunders, D. & Kirby, J. (2004). The Effect of Relative Humidity on Artists’ Pigments. *National Gallery Technical Bulletin*, Vol 25, 62 – 72.

Schädler-Saub, U. (2019). Conservation Ethics Today. In Conservation Ethics Today: our conservation-restoration theories and practice ready for the 21st century? Schädler-Saub, U. & Szmygin, B. (Hrsg.). *Florence, Lublin: International Scientific Committee for Theory and Philosophy of Conservation and Restoration ICOMOS*

Schellen, H.L. & van Schijndel, A. W. M. (2011). Setpoint control for air heating in a church to minimize moisture related mechanical stress in wooden interior parts. *Build. Simul.* 4 (1), 79 – 86. DOI: 10.1007/s12273-011-0026-7.

Schellmann, N. (2007). Animal glues: a review of their key properties relevant to conservation. Studies in Conservation, 52(1), 55 – 66. DOI: 10.1179/sic.2007.52.Supplement-1.55.

Schellmann, N. (2009). Animal Glues – their adhesive properties, longevity and suggested use for repairing taxidermy specimens. *NatSCA News*, 16, 36 – 40. URL: http://www.natsca.org/article/158 [Stand 29.07.024].

Schellmann, N. (2012). Consolidation of Stressed and Lifting Decorative Coatings on Wood. The effect of consolidant choice on the structural integrity of multi-layered East Asian lacquer coatings with gesso-type foundation layers (Dissertation, Dresden).

Schellmann, N., Taylor, C. & Ambrose, C. (2015). Establishing the fracture properties of delaminating multi-layered decorative coatings on wood and their changes after consolidation with polymer formulations. *Journal of Materials Science*, 50(7). DOI: 10.1007/s10853-015-8843-1.

Schießl, U. (1998). History of Structural Panel Painting Conservation in Austria, Germany, and Switzerland, *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum, April 1995*, 200 – 236.

Schieweck, A. S. & Salthammer, T. (2014). *Schadstoffe in Museen, Bibliotheken und Archiven: Raumluft – Baustoffe – Exponate.* (2. Aufl.). Fraunhofer Wilhelm-Klauditz-Inst.

Schlüter, F. (2005). Modellhafte Entwicklung von Schutzkonzepten und passiven Anlagen zum Raumklimaausgleich am Beispiel der national wertvollen umweltgeschädigten Wandmalereien in Schloss Rossewitz. DBU-Abschlussbericht AZ 14964/01. URL: https://www.yumpu.com/de/document/read/10389152/pdf-amtliche-materialprufungsanstalt/7 [Stand November 2024].

Schmidt, T. (2017a). Abschlussbericht des Rissbreiten-Monitorings am Tucheraltar in der Frauenkirche, Nürnberg. Stand 17.01.2017. Dokumentationsarchiv BLfD.

Schmidt, T. (2017b). Voruntersuchung zur Justierung der Rahmenhalterung am Tucheraltar in der Frauenkirche, Nürnberg. Stand: 29.11.2017. Dokumentationsarchiv BLfD.

Schölzel, C. (2006). *Der Zinsgroschen von Tizian: ein Kapitel Restaurierungsgeschichte in Dresden. Beiträge zur Erhaltung von Kunst- und Kulturgut*, 2/2006, 77 – 88.

Schölzel, C. (2015). Die Bewahrung und Restaurierung von Holztafelgemälden in der Geschichte der Gemäldegalerie Dresden. In Tagungsband VDR (Hrsg.), *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden*. (Masterarbeit, Bauhaus-Universität Weimar, Fakultät Bauingenieurwesen, Professur Bauphysik).

Schulze, A. (2013). How the usual museum climate recommendations endanger our cultural heritage. In Ashley-Smith, J., Burmester, A. & Eibl, M. (Hrsg.). *Climate for collections. Standards and uncertainties: Post-prints of the Munich Climate Conference, 7 to 9 November, 2012*. London, Munich: Archetype Publications, Doerner Institut, 81 – 92.

Schuster, S. (2011). *Hygrothermische Gebäudesimulation – Experimentelle Bestimmung der Randparameter und Sorptionseigenschaften von historischen Räumen.*

Sedlbauer, Klaus. (2001). *Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen*. (Dissertation, Fraunhofer Institut für Bauphysik).

Sedlbauer, K., Zillig, W. & Krus, M. (2001). IBP-Mitteilung 28(2001). URL: file://blfd-m-sv-1/Gruppen/Abteilung%20A/A%20V/A%20V%20-%20Oberbayern/Freising%20Stadt/Domkirche%20D-1-78-124-44/Domsakristei/Allgemein/Literatur/Schimmel/2001_388_IBPmitteilung.pdf [Stand 26.07.2024].

Sedlbauer, K. & Kießl, K. (2002). *Neue Erkenntnisse zur Beurteilung von Schimmelpilzen und Stand der Normenbearbeitung*. Fraunhofer-Institut für Bauphysik. Online verfügbar unter http://neomail.kph.de/Infos/Schimmel-pub1_34.pdf [Stand 26.04.2022].

Sedlbauer, K. & Krus, M. (2003). *Schimmelpilz aus bauphysikalischer Sicht Beurteilung durch aw-Werte oder Isoplethensysteme?* Fraunhofer-Institut für Bauphysik.

Sereshk, M.R.V., Bratasz, Ł. (2018). Crack Saturation as a Mechanism of Acclimatization of Panel Paintings to Unstable Environments. In Studies in Conservation, 63, 2 – 27. DOI: 10.1080/00393630.2018.1504433.

Sing, K.S.W., Everett D.H., Haul R.A.W., Moscou, L., Pierotti, R.A., Rouquerol, J. & Siemieniewska, T. (1985). Reporting physisorption data for gas solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity. *Pure Appl Chem* ,57, 603 – 619.

SILK (©2024 Almut Siegel, Katrin Schöne, Alke Dohrmann – SiLK GbR). URL: https://www.silk-tool.de/de/ [Stand 29.07.2024].

Skaug, E. (2008). Not just panel and ground. In Townsend et al (Hrsg.): *Preparation for painting. The artists's choice and its consequences, London*, 22 – 29.

Sklenář, F., Ž. Jurjević, P. Zalar, Frisvad, J.C., Meyer, Visagie, C., Kolařík, M., Houbraken, J. et al. (2017). Phylogeny of xerophilic aspergilli (subgenus Aspergillus) and taxonomic revision of section Restricti. *Studies in mycology*, 88, 161 – 236.

Soboń, M. & Bratasz, Ł. (2024). Risk of fracture in massive cultural objects made of lime wood: a case study of Veit Stoss' altarpiece. *Heritage Science,* 12 (214). https://doi.org/10.1186/s40494-024-01325-y.

Soboń, M. & Bratasz, Ł. (2022). A method for risk of fracture analysis in massive wooden cultural heritage objects due to dynamic environmental variations. *European Journal of Wood and Wood Products*, 80, 1201–1213. https://doi.org/10.1007/s00107-022-01841-3.

Soppa, K. (2018). Die Klebung von Malschicht und textilem Bildträgerm (Doktorarbeit, Staatliche Akademie der Bildenden Künste Stuttgart)

Soppa, K., Ritler, M. & Scherrer, N. C. (2022). Adhesive Foams – A First Insight (Poster). In *Conference: inArt 2022 – 5th International Conference on Innovation in Art Research and Technology*. DOI: 10.13140/RG.2.2.25842.17601. https://www.researchgate.net/publication/361775796_Adhesive_Foams_-_A_First_Insight [Stand 27.07.2024].

Soppa, K. & Zumbühl, S. (2023). *Stress-strain behavior of gelatin, sturgeon glue, and methylcellulose at fluctuating relative humidity.* Preprints. https://www.researchgate.net/publication/375426458_Stress-strain_behavior_of_gelatin_sturgeon_glue_and_methylcellulose_at_fluctuating_relative_humidity [Stand September 2024].

Soppa, K., Zumbühl, S. & Hügli, T. (2023). Mammalian and Fish Gelatins: Gelling Temperature and Behavior at Fluctuating Relative Humidity introduction. In *51st Annual Meeting American Institute for Conservation (AIC) 2023, Conference at: Jacksonville, Florida.*

Sozzani, L. (2009). Microclimate Vitrines for Panel Paintings: An Update. In The Getty Conservation Institute, Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.). *Panel Painting Initiative: Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training.*

Stadtmuseum München (Hrsg.). (1960). *Bayerische Frömmigkeit. 1400 Jahre Christliches Bayern. Ausstellung anlässlich des Eucharistischen Weltkongresses 1960 Juni bis September*, München.

Staschull, M. (2023). Mittelalterliche Wandmalerei im Ratskeller von Wismar: konservatorische Überlegungen und Aspekte zur Energiebilanz verschiedener baulicher Konzepte, in Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (Hrsg.). *Energiebedarf und Kulturguterhalt. Beiträge des 16. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg am 17. November 2023 im Paulikloster in Brandenburg an der Havel*, 2023, 78 – 87.

Steger, S., Eggert, G., Horn, W. & Krekel, C. (2022). Are cellulose ethers safe for the conservation of artwork? New insights in their VOC activity by means of Oddy testing. *Heritage Science*, 10 (53). DOI: https://doi.org/10.1186/s40494-022-00688-4.

Sterflinge, K. (2010). Fungi. Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biol. Rev, 24,* 47 – 55.

Sterflinger K. (2012). Pilze als Zerstörer – eine Bedrohung für Kunst- und Kulturgut. *STAPFIA*, 96, 34, 7– 362.

Sterflinger K., Voitl, C., Lopandic, K., Piñar, G. & Tafer, H. (2018). Big Sound and Extreme Fungi - Xerophilic, Halotolerant Aspergilli and Penicillia with Low Optimal Temperature as Invaders of Historic Pipe Organs. *Life*, 8(2), Basel.

Stöcklein, J., Konopk, 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(141). https://doi.org/10.1186/s40494-022-00768-5.

Straub, R. E. (1963). Über die Erhaltung von Holztafelbildern. In Straub, R. E. (Hrsg.). *Über die Erhaltung von Gemälden und Skulpturen*. Zürich, 107–114.

Straub, R. (1968). Das Problem des verwölbten Holztafelbildes, Nachrichtenblatt der Denkmalpflege in Baden-Württemberg 11, 71 – 77.

Taube, E. (2005). Querleisten an Holztafelbildern. *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung (ZKK)*, 19(2), Wernersche Verlagsgesellschaft, 231 – 252.

Taubert, J. (2003). Zur kunstwissenschaftlichen Auswertung von naturwissenschaftlichen Gemäldeuntersuchungen, (Fakultät für Architektur, München.

Tétreault, J. & Bégin, P. (2018). Silica Gel: Passive Control of Relative Humidity. *CCI Technical Bulletin, 33.*

The J. Paul Getty Trust. (1998). Dardes, K. & Rothe, A. (Hrsg.). *The Structural Conservation of Panel Paintings*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

The J. Paul Getty Trust. (2011). Phenix, A. & Chui, S. A. (Hrsg.). *Facing the Challenges of Panel Paintings Conservation: Trends, Treatments, and Training*. Los Angeles: The Getty Conservation Institute.

Thuer, C. (2011). Scottisch Renaissance Interiors. Facings and adhesives for size-tempera painted wood, *Historic Scotland Technical Paper*, 11.

TRBA 240 *Schutzmaßnahmen bei Tätigkeiten mit mikrobiell kontaminiertem Archivgut.* (2010). Technische Regel für Biologische Arbeitsstoffe.

Umweltbundesamt (Hrsg.) (2002). *Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen*, Berlin.

Unger, A. (1990). *Holzkonservierung: Schutz und Festigung von Holzobjekten*, Callway. München.

Uzielli, L., Fioravanti, M., Casazza, O. & Perucca, G. (1992). A technique for double-sided monitoring of the deformations of the wooden supports of panel paintings: the experience of Giotto's" Maestà di Ognissanti. In *3rd International Conference on Nondestructive Testing, Microanalytical Methods and Environment Evaluation for Study and Conservation of Works of Art - Viterbo*, 4 – 9 October 1992, 499 – 514.

Uzielli, L. (1998). Historical Overview of Panel-Making Techniques in Central Italy, in *The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings of a Symposium at the J. Paul Getty Museum*, April 1995, Los Angeles. 110 – 135.

Uzielli, L., Cocchi, L., Mazzanti, P., Togni, M., Jullien, D. & Dionisi-Vici, P. (2012). The Deformometric Kit: A method and an apparatus for monitoring the deformation of wooden panels. *Journal of Cultural Heritage,* 13 (3), 94 – 101. DOI: 10.1016/j.culher.2012.03.001.

Van Grevenstein, A., New, B., Young, C., Seymour, K., Groves, R. & Horie, V. (2014). The Conservation of panel paintings and related objects. Research Agenda 2014 – 2020. In *Netherlands Organisation for Scientific Research und Rijksmuseum Amsterdam*, mit Unterstützung der The Getty Foundation. Van Duin, P. & Kos, N. (Hrsg.). AC The Hague: NWO. https://directory.doabooks.org/handle/20.500.12854/34527 [Stand 2024].

Verband der Restauratoren. (Hrsg.). (2019). *Konservierung und Restaurierung von Holztafelgemälden. Erfahrungen aus der Praxis.* Beiträge zur gleichnamigen Fachtagung vom 8. Bis 10. Mai 2015 in Dresden.

Vereinigung der Landesdenkmalpfleger (2016). *Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmälern und ihrer Ausstattung*, https://www.vdl-denkmalpflege.de/fileadmin/dateien/Ver%C3%B6ffentlichungen/Arbeitsheft_10_Vorsorge_Pflege_Wartung_WEB.pdf [Stand 22.07.2024].

Véliz, Z. (1998). Wooden Panels and Their Preparation for Painting from the Middle Ages to the Seventeenth Century in Spain. In Dardes, K. & Rothe, A. (Hrsg.*). The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings at the J. Paul Getty Museum*, 24 – 28 April 1995, Los Angeles 1998, 136 – 148.

Wadum, J., Hummelen, I. J., Kragt, W., Jütte, B.A.H.G. & Sozzani, L. (1994). Research Programme Microclimates: Paintings on Panel and Canvas. *Studies in Conservation*, 39(1), 34 – 34, DOI: 10.1179/sic.1994.034.

Wadum, J. (1998a). Historical Overview of Panel Making Techniques in the Northern Countries. In Dardes, K. & Rothe, A. (Hrsg.*). The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings at the J. Paul Getty Museum*, 24 – 28 April 1995, Los Angeles 1998, 26.

Wadum, J. (1998b). Microclimate Boxes for Panel Paintings. In Dardes, K. & Rothe, A. (Hrsg.*). The Structural Conservation of Panel Paintings: Proceedings at the J. Paul Getty Museum*, 24 – 28 April 1995, Los Angeles 1998, 26.

Waller, Christoph. (2017). Long Life For Art, Produktinformation PRO SORB. https://llfa.de/mwdownloads/download/link/id/23/ [Stand 26.07.2024].

Waller, Christoph. (2024a). Long Life For Art, Shop. URL: https://llfa.de/art-sorb-granulat.html und https://llfa.de/prosorb-granulat.html [Stand 26.07.2024].

Waller, Christoph. (2024b). Long Life For Art, Didaktikseiten. http://www.cwaller.de/deutsch.htm?teil2_2.htm~information [Stand 26.07.2024].

Weidenbörner, M. (2004). Identifizierung und Kontrolle kulturgüter-relevanter Schimmelpilze. In: Rauch, Angelika (Hrsg.): Schimmel - Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen (VDR-Schriftenreihe zur Restaurierung; Stuttgart 2004, 25-29.

Weintraub, S. (2002). Demystifying silica gel. *Objects Specialty Group Postprints,* Vol. 9, The American Institute for Conservation of Historic & Artistic Works, 169 – 194.

Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). (2019). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung.* Tagungsband der interdisziplinären Tagung der HAWK Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst vom 16. Bis 18. Januar 2019 in Hildesheim.

Weyer, A. (2019). Die Kirchenausstattung im Fokus. Einführung in die Publikation der interdisziplinären Tagung. In Weyer, A. & Birkenbeul, I. (Hrsg.). *Klimazone Kirche: Präventive Konservierung der Ausstattung, (20)*.

White, T. J., Bruns, T., Lee, S. J. W. T. & Taylor, J. (1990). Amplification and direct sequencing of fungal ribosomal RNA genes for phylogenetics. *PCR protocols: a guide to methods and applications*, 18(1), 315 – 322.

Wood, J. D., Gauvin, C., Young, C. R. T., Taylor, A. C., Balint, D. S. & Charalambides, M. N. (2018). Cracking in paintings due to relative humidity cycles. *Science Direct. Procedia Structural Integrity*, 13, 379 – 384.

World Health Organization (Hrsg.). (2021). *WHO global air quality guidelines*. Particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide, Genf.

Wülfert, S. (1999). *Der Blick ins Bild. Lichtmikroskopische Methoden zur Untersuchung von Bildaufbau, Fasern und Pigmenten*, Ravensburger Buchverlag.

Young, J. F. (1967). Humidity control in the laboratory using salt solutions-a review. *J. Appl. Chem.,* 17 (9), 241 – 245. DOI: 10.1002/jctb.5010170901.

Zalar, P., Hribersek, D., Gostincar, C., Breskvar, M., Dzeroski, S. & Matul, M. (2023). Xerophilic fungi contaminating historically valuable easel paintings from Slovenia, *Frontiers in Microbiology.*

Zillich, I. (1991). *Über das Begradigen von Holztafelgemälden* (Diplomarbeit, Institut für Technologie und Malerei der Staatlichen Akademie der Bildenden Künste Stuttgart).

Archivalien

BLfD Archiv

BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1886-1922

BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1962-1969

BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 1970-1988

BLfD, Ortsakt Freising, Domberg 32/34, D-1-78-124-44, 2005

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Gründonnerstagsretabel von Hans Mair von Landshut (1495), Domkirchenstiftung Freising © Diözesanmuseum Freising, Foto: Walter Bayer. 34

Abbildung 2-2: Aufstehende Malschichtschollen im Streiflicht (Foto: T. Hilger, BLfD). 35

Abbildung 2-3: Geöffnete Fuge auf Gemälderückseite (Foto: M. Hörmann, BLfD). 35

Abbildung 2-4: Kartierung der geöffneten Fugen (blau) auf der Gemälderückseite mit Angabe der Längenausdehnung in schwarz (Grafik: M. Hörmann, BLfD). 36

Abbildung 2-5: Rechter Gemäldebereich mit Spalt zum Rahmen – Beginn rot markiert (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD). 37

Abbildung 2-6: Seitlich von rechts sichtbare Verwölbung der Tafel (Foto: K. Holl, KDWT) 37

Abbildung 2-7: Kartierung der Überarbeitungen auf der Rückseite im Zuge der Restaurierungsmaßnahme 1903/04 (Grafik: M. Hörmann, BLfD). 38

Abbildung 2-8: Montage des Gemäldes auf der Arbeitstribüne von 2016 (Foto: T. Hilger, BLfD). 40

Abbildung 2-9: Kartierung konstruktiver Merkmale auf eine Gesamtaufnahme der Vorderseite gespiegelt (Foto: Ortohaufnahme, generiert aus Laserscan L. Pallas, KDWT; Bearbeitung in Photoshop Josephine Opitz, BLfD). 42

Abbildung 2-10: Orthofoto der Gemälderückseite, generiert aus Laserscan (Foto: L. Pallas, KDWT). 44

Abbildung 2-11: Kartierung der Brettbreiten (Grafik: Fa. Landskron, 2016) 44

Abbildung 2-12: Detailfoto der diagonalen Brettritzungen, horizontalen Wergabklebungen und Rückseitenbeschichtung. Im unteren Bereich abgehobelt mit freiliegenden Fraßgängen (Foto: M. Hörmann, BLfD). 45

Abbildung 2-13: Querschliff der Holzprobe der Gemälderückseite (Probenr. PB 8), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD). 46

Abbildung 2-14: Querschliff der Probe aus der braun-grünen Architekturdarstellung (Probenr. PF2), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Pristl, KDWT, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD). 48

Abbildung 2-15: Querschliff der Probe aus der rosa Architekturdarstellung (Probenr. PF3), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD). 48

Abbildung 2-16: Querschliff der Probe aus dem vergoldeten Hintergrund (Probenr. PF1), links VIS-, rechts UV-Aufnahme (Foto: M. Hörmann, BLfD) 48

Abbildung 2-17: Skizze zum Niederlegen der Malschichtschollen (Foto: L. Lunau) 50

Abbildung 2-18: Probekörper und Holzfeuchtemonitoringsystem, bestehend aus Einschlagelektroden, Verbindungskabeln, Gigamodul (Sensor) und Thermofox (Datenlogger). Der Rahmen um den rechten Probekörper presst die Leitgummielektroden auf die Holzoberfläche. (Foto: Yuxin Jiang, TUM) 52

Abbildung 2-19: Ergebnisse der gravimetrischen Messungen (Daten: Yuxin Jiang, TUM) 53

Abbildung 2-20: Messdaten der Klima- und Holzfeuchtesensoren. Die Daten der Leitgummielektroden sind jeweils Mittelwerte der sieben Teilflächen. (Daten: Yuxin Jiang, TUM) 54

Abbildung 2-21: Messdaten Leitgummielektrode auf unterschiedlichen Beschichtungen. Daten: Yuxin Jiang, TUM) 55

Abbildung 2-22: Kartierung der Notsicherungen zwischen 2011 – 2022 (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann). 56

Abbildung 2-23: Flächige Kaschierung gelockerter Malschichtbereiche von 2016 (Foto: T. Hilger, BLfD). 57

Abbildung 2-24: Überspannung der gelockerten Malschichtbereiche von 2022 (Foto: T. Hilger, BLfD).....57

Abbildung 2-25: Sicherung entlang der Schollenränder von 2022 (Foto: T. Hilger, BLfD). 57

Abbildung 2-26: Außenansicht temporäre Einhausung Richtung Südwesten (Foto: T. Hilger, BLfD). 59

Abbildung 2-27: Innenansicht temporäre Einhausung Richtung Süden (Foto: T. Hilger, BLfD). 59

Abbildung 2-28: Erste Variante Lichtschutz mit Autofrontscheibenabdeckung (Foto: J. Regensburger, BLfD). ..60

Abbildung 2-29: Zweite Variante Lichtschutz zur flächigen Abdunkelung (Foto: T. Hilger, BLfD). 60

Abbildung 3-1: Schema Messsystem.....63

Abbildung 3-2: Verortung Messsensoren auf Gemäldevorderseite (Foto: G. Petta; Bearbeitung: M. Hörmann (BLfD). 64

Abbildung 3-3: Verortung der Messsensoren auf der Gemälderückseite (Foto: L. Pallas, KDWT; Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD). 64

Abbildung 3-4: Messgerüst mit der angeschlossenen Messtechnik. (Foto: A. Fröhlich, TUM) 66

Abbildung 3-5: Aufgeklebtes Milliemeterpapier. (Foto: M. Hörmann, BLfD).....70

Abbildung 3-6: Klimasensor an der Tafelrückseite. (Foto: A. Fröhlich, TUM) 72

Abbildung 3-7: Erläuterung zur Messung der Triangulationslaser (Foto: L. Pallas, KDWT; Bearbeitung T. Hilger , BLfD).....75

Abbildung 3-8: Triangulationslaser (rechts) und angebrachtes Endmaß auf der Rückseite der Tafel (links). Deutlich sind auch die Ritzungen und Wergabklebungen erkennbar. (Foto: A. Fröhlich, TUM) 75

Abbildung 3-9: Extensometer. An der Tafelrückseite befestigt und mit Messgerüst verschraubt. (Foto: A. Fröhlich, TUM).....76

Abbildung 3-10: Orthogonale Gesamtaufnahme des Tafelgemäldes, erstellt mit einem Laserscanner (FARO) (Foto: L. Pallas, KDWT). 80

Abbildung 3-11: Schematische Darstellung des neuen Systemaufbaus (Grafik: Florian Lindner, Lindner Design) 82

Abbildung 3-12: Orthofoto des Tafelgemäldes mit Kennzeichnung der Referenzscanflächen (Foto: L. Pallas, KDWT). 83

Abbildung 3-13: Messung mit dem Streifenlichtscanner zu Projektbeginn (Foto: K. Holl, KDWT). 85

Abbildung 3-14: Auswertung der Streifenlichtscans an Position 2; 20.05.2020 mit 20.12.2022. (Foto: L. Pallas, KDWT). 85

Abbildung 3-15: Referenzfläche 1 unter Angabe der ausgewählten Fläche für das Best -Fit (rot gestrichelte Linie) (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).....87

Abbildung 3-16: Referenzfläche 2 (links) und 3 (rechts) unter Angabe der ausgewählten Fläche für das Best -Fit (rot gestrichelte Linie) (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT). 87

Abbildung 3-17: Vergleich der Laserscans im Januar und März 2022. Grün gefärbte Flächen weisen keine Veränderungen auf, hell- bis dunkelblaue Flächen haben sich nach hinten gewölbt, rechts über 10 mm Verformung (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT).....89

Abbildung 3-18: Kamera-Setup ab 07.06.23 (Foto: M. Hörmann, BLfD).....89

Abbildung 3-19: Bildausschnitt für die Zeitrafferaufnahmen ab 07.06.23 (Foto: M. Hörmann, BLfD).....89

Abbildung 3-20: Generation iAIR(wired) mit Basisstation (Foto: E. Spiegel, CFA).....92

Abbildung 3-21: Unbeschichtete Holzprobekörper mit Darstellung der unterschiedlichen Fügearten (Foto: M. Hörmann, BLfD).....95

Abbildung 3-22: Vorderseitiger Schichtaufbau der Probeplatten: 0: Bildträger - 1: Isolierung - 2: Grundierung (7x) - 3: Sperrschicht (2x) - 4: Malschicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). 95

Abbildung 3-23: Probeplatte nach Abklebung mit Aluminiumklebeband (Foto: M. Hörmann, BLfD). 97

Abbildung 3-24: Vorderseite der von Schimmel befallenen Probeplatte S_M_2 (Foto: M. Hörmann, BLfD). 98

Abbildung 3-25: Rückseite der von Schimmel befallenen Probeplatte S_M_2 (Foto: M. Hörmann, BLfD). 98

Abbildung 3-26: Beschichtete Glasfritten für wet- und dry-cup Messungen (Foto: M. Hörmann, BLfD). 99

Abbildung 3-27: Bauphysikalisches Modell der historischen Einbausituation 100

Abbildung 3-28: Versuchsaufbau der drei Auffeuchtungsmethoden (Foto: A. Fröhlich, TUM) 102

Abbildung 3-29: Sorptionsisotherme der Bildschicht gemessen mit DVS, © MPA Stuttgart. 104

Abbildung 3-30: Bildschirmaufnahme aus dem Simulationsprogramm WUFI® Pro zeigt den Querschnitt des Holztafelgemäldes unter Berücksichtigung der gemessenen Materialproben (Überzug, Bildschicht, Firnis). Aufbau von links nach rechts: Leinölfirnis (0,1 mm) | Fichtenholz longitudinal (20 mm) | Mal- und Fassungsschicht (0,6 mm) | Firnis (0,06 mm). Die Videokamera kennzeichnet eine „Monitorposition“, an der die Temperatur- und Feuchtewerte berechnet werden, ©: Fraunhofer IBP. 106

Abbildung 3-31: Klimaschrankversuch am KDWT in Bamberg. Durch die eingestellte Glasscheibe ist es möglich, während des Versuchs, die Türe zu öffnen, ohne dass das darin befindliche Klima gestört wird, © KDWT, L. Pallas. 108

Abbildung 3-32: Nebelhandgerät „FlowMarker“ im Einsatz (Foto: T. Löther, IDK) 109

Abbildung 3-33: Isoplethendiagramme zur Schimmelbildung nach Sedlbauer und Kießl (2002) 110

Abbildung 3-34: Von Arbeitstribüne überbauter Teil des Sakristeischrankes (Foto: M. Hörmann, BLfD). 114

Abbildung 3-35: ATP-Messung am Sakristeischrank (Foto: M. Hörmann, BLfD). 114

Abbildung 4-1: Klimadaten Landskron an der Vorderseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 20.06.2018 – 19.06.2019. (Quelle: Landskron, 2020). 117

Abbildung 4-2: Klimadaten Landskron an der Rückseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 20.06.2018 – 19.06.2019. (Quelle: Landskron, 2020). 117

Abbildung 4-3: Klimadaten BLfD an Vorder- und Rückseite des Holztafelbildes im Zeitraum von 28.05.2020 – 08.09.2022. Im Zeitraum von 06.10. – 14.12.2020 fehlen die Daten für die Vorderseite und von 24.06. – 14.07.2020 für beide Seiten (Quelle: BLfD; Diagramm: A. Fröhlich, TUM). 119

Abbildung 4-4: Temperatur und r.F. am Tafelbild und unter dem Podest. Die Werte oben sind jeweils Durchschnittswerte der Klimasensoren am Tafelbild. (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 121

Abbildung 4-5: Verlauf der Temperatur in der Einhausung, in der Sakristei und an der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Quelle: Deutscher Wetterdienst; Grafik: A. Fröhlich, TUM). 122

Abbildung 4-6: Verlauf der relativen Luftfeuchte in der Einhausung, in der Sakristei und an der nächstgelegenen Wetterstation des DWD (Quelle: Deutscher Wetterdienst; Grafik: A. Fröhlich, TUM). 123

Abbildung 4-7: Relative Luftfeuchte an drei Positionen in der Einhausung und an einer Position in der Sakristei im Zeitraum von 16.09.2022 bis 06.11.2023 (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 124

Abbildung 4-8: Histogramm der mittleren r.F. in der Einhausung (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 125

Abbildung 4-9: Histogramm der r.F. in der Sakristei (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 125

Abbildung 4-10: Oberflächentemperaturen der zehn Sensoren an der Tafel und den Außenwänden (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 126

Abbildung 4-11: Ausschnitt der Messwerte der Lufttemperatur in der Einhausung und der Oberflächentemperaturen (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 126

Abbildung 4-12: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und daraus resultierende Verformung der Tafel an den drei Triangulationslasern. Laser 1 und 2 sind in Tafelebene ausgerichtet, Laser 3 senkrecht dazu (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 128

Abbildung 4-13: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und daraus resultierende Verformung der Laser 1 und 2 sind zusammengefasst, um die absolute Verformung hervorzuheben (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 129

Abbildung 4-14: Relative Luftfeuchte in der Einhausung und mittels Extensometern aufgenommene Verformungen des Holztafelbildes. Die Werte geben die absolute Position der Wegaufnehmer an (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 130

Abbildung 4-15: Relative Luftfeuchte und daraus resultierende Messwerte der Extensometer infolge Quellen und Schwinden der Holztafel (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 131

Abbildung 4-16: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel aus der Tafelebene heraus am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 3. Die rF hat ihren ersten Hochpunkt um 6:36 Uhr, die Verformung zwischen 7:00 und 7:10 Uhr 132

Abbildung 4-17: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel in der Tafelebene am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 2. (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 133

Abbildung 4-18: Relative Luftfeuchten und Verformung der Tafel in der Tafelebene am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 2. (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 134

Abbildung 4-19: Mittlere relative Luftfeuchte in der Einhausung und Verformung der Tafel aus der Tafelebene heraus am 02.11.2023; gemessen mit Almemo Kombi-Sensoren und Triangulationslaser Nr. 3. Die r.F. hat ihren Hochpunkt um 17:36 Uhr, die Verformung ihr Plateau zwischen 20:00 und 21:20 Uhr. Zur Verdeutlichung ist jeweils der gleitende Durchschnitt (Breite 1 h) hervorgehoben. (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 135

Abbildung 4-20: Relative Luftfeuchte und Messdaten der Holzfeuchte der Probekörper („Dummies“) und des Holztafelgemäldes (Grafik: A. Fröhlich, TUM). 136

Abbildung 4-21: Vergleich der Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes (27.01.2022 mit 24.03.2022). Klimatisch bedingt kommt es in diesem Zeitraum zu einer maximalen Bewegung von 10 mm (Foto: L. Pallas, KDWT). ... 138

Abbildung 4-22: Vergleich der Gesamtaufnahmen des Tafelgemäldes im Vorzustand am 27.01.2022 mit Zustand zum Ende des Projektes am 24.11.2023 (ohne Auffeuchtungsversuch); (Foto: L. Pallas, KDWT). 139

Abbildung 4-23: Bestimmung der Korrosionsrate in der Testumgebung über einen Zeitraum von 14 Monaten (Einhausung)/13 Monaten (Sakristei). Im Mittel ergibt sich eine unbedeutende Korrosionsrate von weniger als 0,015 nm/Tag. Der grün hinterleget Bereich zeigt die Obergrenze der Korrosionsklasse IC1/Woche. (Grafik: E. Spiegel, CFA) 145

Abbildung 4-24: Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemälde als Reaktion auf das in der Sakristei vorliegende Raumklima vom 15.4. 2021 – 14.4.2022 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP). 148

Abbildung 4-25: Simulation der relativen Feuchte im Materialverbund des Tafelgemäldes als Reaktion auf das in der Einhausung vorliegende Raumklima vom 1.1 .– 1.12.2023 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP). 149

Abbildung 4-26: Simulierte Feuchteverteilung im Materialverbund der Probetafel beim Klimaschrankversuch bei einem Feuchtesprung von 80 % r.F. auf 34 % r.F. (bei konstanter Temperatur von 19 °C); (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP). 150

Abbildung 4-27: Feuchteverteilung im Materialverbund des Tafelgemäldes mit gemessenem Raumklima in der Sakristei an der Vorderseite und konstanter relativer Feuchte von 65 % r.F. auf der Rückseite, Zeitraum vom 15.01 – 31.12.2021 (Simulation: K. Holl, Fraunhofer IBP). 150

Abbildung 4-28: Links: Probeplatte S-M-2 nach dem Klimakammerversuch. Die Stoßfuge hat sich bereits nach vier Tagen im Klimaschrank gelöst. Rechts: Der Vergleich der Streifenlichtscans für S-M-2 zwischen Tag 1 und Tag 2 zeigt mit 0,9 mm die höchste Verformung am Stück an (Grafik: L. Pallas u. K. Holl, KDWT). 153

Abbildung 4-29: Vergleich der Reaktionen der Probetafeln auf den Feuchtesprung von 80 % auf 34 % r.F. bei 19 °C. Links: Set 3 unbehandelt; rechts: Set 2 mit Schimmel vorbehandelt (Grafik: K. Holl, KDWT). 153

Abbildung 4-30: Thermografie der Vorderseite des Tafelbilds. Die sehr einheitliche Temperatur ist klar ersichtlich. Bei der Wärmequelle im rechten Viertel der Abbildung handelt es sich um einen der iAir-Sensoren. (Foto: A. Fröhlich, TUM) 155

Abbildung 4-31: Thermographie einer Säule in der Einhausung. Der kältere Säulenfuß deutet auf die Wärmebrücke zum Untergrund hin (Foto: A. Fröhlich, TUM) 155

Abbildung 4-32: Schimmelbefall am Antritt vor dem Sakristeischrank vom 06.09.2023, Detailaufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). 159

Abbildung 4-33: Schimmelbefall an Ornamenten des Gemälderahmens vom 09.07.2024 (Foto: M. Hörmann, BLfD). 160

Abbildung 4-34: Schimmelbefall vom 09.07.2024 an Gemäldekante, rechte Tafelseite angrenzend an den Rahmen (Foto: M. Hörmann, BLfD). 160

Abbildung 4-35: Veranschaulichung des Auffeuchtungsversuchs (Erstellung aus Grafana Dashborad: T. Hilger, BLfD). 162

Abbildung 6-1: Exemplarische Matrix als Entscheidungshilfe (Grafik: Projektteam). 185

Abbildung 7-1: Infrarot-Aufnahme (Foto: L. Pallas u. K. Holl, KDWT). 196

Abbildung 7-2: Kartierung der Konservierbarkeit der derzeitigen Malschichtlockerungen (Foto: G. Petta, Bearbeitung: M. Hörmann, BLfD). 199

Abbildung 7-3: Versuchsfläche A vor Konsolidierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). 201

Abbildung 7-4: Versuchsfläche B vor Konsolidierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). 201

Abbildung 7-5: Versuchsfläche A nach Konsolisdierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). .. 201

Abbildung 7-6: Versuchsfläche B nach Konsolisdierung, Aufnahme im Streiflicht (Foto: M. Hörmann, BLfD). .. 201

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Bezeichnung der Anstriche und Zuordnung zu den Teilflächen 53

Tabelle 3-1: Auflistung der Zeiträume der Laserscannings des Tafelgemäldes. durchgeführt wurden, © KDWT. 79

Tabelle 3-2: Varianten der hölzernen Probekörper 94

Tabelle 4-1: Vergleich der Klimadaten von 2006, 2015, 2019 und 2020 anhand des Beispielmonats Februar. 118

Tabelle 4-2: Statistische Auswertung der gemessenen Klimadaten an der Vorder- und Rückseite des Tafelgemäldes für den Zeitraum vom 01.01.2021 bis 31.07.2022. 119

Tabelle 4-3: Mittelwert, Maximum, Minimum in der Einhausung, der Sakristei und in der Umgebung Zeitraum von 16.09.2022 bis 30.04.2024 123

Tabelle 4-4: Mittelwert, Maximum, Minimum und Amplitude der r.F. an den vier Sensorpositionen Zeitraum von 16.09.2022 bis 30.04.2024 124

Tabelle 4-5: Messwerte der Holzfeuchtemessung am Holztafelbild bei ausgeschalteter Elektronik in der Einhausung (Angaben in %). 137

Tabelle 4-6: Referenzmessungen im Bereich der Einschraubelektroden mittels Holzfeuchte-Handmessgerät (Angaben in %). 137

Tabelle 4-7: Übersicht der Messungen, die mit dem Streifenlichscanner durchgeführt wurden. Die Nummerierung der Vergleiche bezieht sich auf die Untersuchungen mit dem Streifenlichtscanner am Tafelgemälde. © KDWT 140

Tabelle 4-8: Vergleichende Auswertung der maximalen Veränderung der Streifenlichtscans an den drei Referenzpositionen 141

Tabelle 4-9: Klassifizierung der Korrosivität von Innenraumatmosphären auf der Basis von Messungen der Korrosionsgeschwindigkeit (ISO 11844-1). 144

Tabelle 4-10: Ermittlung der Korrosivitätsklasse anhand des Metalldickenverlusts pro Jahr (a) und Tag (d). ... 144

Tabelle 4-11: Auflistung der in der Sammlung befindlichen Materialien und Materialkombinationen und Anforderungen an das Raumklima nach unterschiedlichen Literaturangaben. 147

Tabelle 4-12: Statistische Auswertung der relativen Feuchte in den simulierten Positionen für die Szenarien Sakristei und Einhausung. 151

Tabelle 4-13: Vergleich der maximalen Verformung der einzelnen Platten während der Klimakammerversuche 152

Tabelle 4-14: Übersicht der Schimmelmonitoring-Termine (ATP-Messungen, Fotografische Dokumentation, Schimmelreinigung) 158

Tabelle 4-15: Stromverbrauch in der Einhausung im Zuge des Aufbaus der Messtechnik und weiteren Verlauf 160

Tabelle 6-1: Auswahl einiger Kriterien zur Beurteilung verschiedener Erhaltungsvarianten (*alphabetische Auflistung; beliebig und je nach Fallbeispiel erweiterbar*) 184

Tabelle 7-1: Aufgabenbereiche zur Risikoabschätzung aus den Arbeitspaketen 1 bis 4. 193

Tabelle 7-2: Methodenübersicht zum möglichen Umgang mit den Dachschollen. 199

Tabelle 7-3: Testflächen zur Konsolidierung der Bildschicht 202

Anhang

Anhang A: Kunsttechnologischer Aufbau / Untersuchungsberichte

00-Einordnung von Holztafelbildern

01-Untersuchungsbericht Holzartenbestimmung P1 bis 13

02-Untersuchungsbericht Holzartenbestimmung P12

03-Untersuchungsbericht C14-Datierung Untersuchungsbericht

04-Untersuchungsbericht Werg

05-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF1

06-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF2

07-Untersuchungsbericht Malschichtproben QS-PF3

08-Untersuchungsbericht Malschichtproben FTIR-ATR

09-Untersuchungsbericht Malschichtproben REM-EDX

10-Untersuchungsbericht Bindemittel GC-MX

Anhang B: Voruntersuchungen

00-Testreihe Notsicherungen

01-Anforderungen für den Bau einer Einhausung

02-Checklisten für die Begehung und Wartung

03- Prüfbericht ARGUK 2022-7913-2

Anhang C: Konzeptentwicklung und Monitoring

00-Verortung Sensoren

01-Sensoranbringung, Versuche an Probekörpern

02-Auswahl der Methoden für das Verformungsmonitoring

03-Orthofoto der Vorder- und Rückseite

Anhang D: Hygrothermische Simulation

00-Herstellung von Probekörpern und verwendete Materialien

01-Untersuchungsbericht Hygrothermische Simulation Fraunhofer IBP

Anhang E: Weitere Untersuchungen

00-Untersuchungsbericht Luftwechselmessung

01-Luftströmungsmessung, Nebel(fluid) und Risikobetrachtung

Anhang F: Ergebnisse

00-Auswertung Streifenlichtscans

Tafelgemälde Rückseite S. 1 – 16
Tafelgemälde Rechts unten S. 17 – 39
Tafelgemälde Mitte S. 40 – 62
Freising verschiedene Probekörper S. 63 - 85
Klimakammertests S 86 – 217

01-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 070]

02-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 071]

03-Hygrothermische Simulation [Wasserdampfdurchlässigkeit HoFM 072]

04-Untersuchungsbericht Luftströmungsmessung und Thermografie

05-Untersuchungsbericht Luftwechselmessung Einhausung

Anhang G: Lösungsansätze

00-Stand des Wissens und der Technik

Anhang H: Publikation und Öffentlichkeitsarbeit

00-Handlungsleitfaden

Sowie online, unter: https://www.blfd.bayern.de/information-service/projekte/forschungsprojekt-geschaedigte-kulturgueter/index.html [Stand Oktober 2024].

Anhang I: Material- und Geräteliste

00-Material- und Geräteliste