



Technische Universität München

Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft

Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext

Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer
Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation

Kristina Katrin Holl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Architektur der Technischen Universität München zur
Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Philosophie genehmigten Dissertation

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr. Alain Thierstein
Prüfer der Dissertation: 1. apl. Prof. Dr. Andreas Burmester
2. Univ.-Prof. Erwin Emmerling

Die Dissertation wurde am 04.02.2016 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die
Fakultät für Architektur am 02.06.2016 angenommen.

Vorwort

Zunächst möchte ich Apl. Prof. Dr. Andreas Burmester für die Betreuung meiner Arbeit und die hilfreichen Diskussionen danken. Prof. Erwin Emmerling brachte die Arbeit auf den Weg, indem er meinen Antrag auf finanzielle Unterstützung bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt unterstützte.

Ohne die Unterstützung durch die Arbeitsgruppe Präventive Konservierung und Denkmalpflege wäre die Arbeit nicht möglich gewesen. Dr. Ralf Kilian begeisterte mich, das Thema der Auswirkungen von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke anzugehen und gab immer wieder neue Anstöße für die Herangehensweisen. Carina Herrig, Meike Jockusch, Laura Lun, Veronika Disl und Maximilian Benter, die als wissenschaftliche Hilfskräfte am Fraunhofer-Institut für Bauphysik tätig waren und diese Arbeit unterstützten, sei herzlich gedankt. Carina Herrig fertigte die Aufstriche für die Materialkenndatenbestimmung und die Gemäledummes für die Klimaschrankversuche an und führte die dry- und wet-cup Messungen zur Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstands durch. Meike Jockusch stellte die Testgemälde für die Validierung der Simulation her und ermittelte deren Materialkennwerte. Laura Lun und Veronika Disl führten die Versuche zur Validierung der Simulation im Versuchshaus in Holzkirchen durch (Versuchsaufbau, Montage der Sensorik, Änderung der Abstände der Leinwandgemälde zur Außenwand nach jeweils drei Tagen). Maximilian Benter und Werner Conrad halfen bei der Betreuung des Klimaschranks in Holzkirchen.

Für die hilfreichen Tipps zur Kenndatenermittlung, zu Fragen, die hygrothermische Simulation betreffend sowie die Durchsicht der Simulationskapitel danke ich Prof. Dr. Martin Krus. Stefan Bichlmair danke ich für die Bereitstellung der Klimadaten für die Simulationen von Schloss Linderhof. Für die Unterstützung bei der Bedienung der Klimaschränke sei Gabriele Maas-Diegeler vom Fraunhofer-Institut für Silikatforschung in Bronnbach gedankt.

Dem Climate for Culture-Team, vor allem Dr. Jonathan Ashley-Smith, Melanie Eibl, Charlotta Bylund Melin und Andreas Weiß aus der Arbeitsgruppe „damage assessment“ danke ich für Denkanstöße und Diskussionen während der regelmäßigen Treffen zwischen 2009 und 2014. Weiter danke ich dem Team der Universität Ljubljana, Violeta Bokan Bosilkjov, Petra Stukovnik und Franci Cepon für die Bereitstellung und die Durchführung der Messungen mit dem 3D-Mikroskop. Dr. Marion Mecklenburg danke ich für zahlreiche Diskussionen die wir während und nach einer Summer-School 2011 in München führten.

Weiter danke ich der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen, insbesondere der Restaurierungsabteilung, Dr. Katrin Janis, Tina Naumovic, Klaus Häfner und Bettina Schwabe sowie der SGV Linderhof Christian Misniks, Vanessa Voit und Sigrid Stache für die Unterstützung bei den Untersuchungen der historischen Ausstattung von Schloss Linderhof und dem Königshaus am Schachen. Für die Hilfe vor Ort bei der sechsmonatigen Untersuchung der historischen Ausstattung von Schloss Linderhof danke ich Susanne Raffler.

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt unterstützte meine Arbeit finanziell in Form eines dreijährigen Promotionsstipendiums.

Für die Durchsicht des Manuskripts danke ich Melanie Eibl, Dr. Ralf Kilian, Ronnie Seidl, Susan Bauer und Edeltraud Holl.

Besonders herzlich danke ich meinem Partner Ronnie Seidl für die Anregungen zur Wissenschaftlichkeit und den Beistand während des gesamten Zeitraums wie auch meiner Familie, die mich immer unterstützt hat.

Kristina Holl
Pullach im Januar 2016

Inhalt

Vorwort	3
Kurzfassung	7
1 Einführung	9
1.1 Motivation und Zielsetzung	11
1.2 Herangehensweise.	12
2 Theoretische Grundlagen zu klimatisch bedingten Schadensphänomenen an polychrom gefassten Kunstwerken und Leinwandgemälden	15
2.1 Wechselwirkungen zwischen Klima und Kunstwerk	15
2.1.1 Das Raumklima.	15
2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Kunstwerken mit organischen Bestandteilen.	16
2.1.3 Allgemeine Klimaempfehlungen für Kunstwerke	22
2.1.4 20 °C 50 % RF 100 lux – sind „historische“ Klimavorgaben noch heute gültig?	28
2.2 Klimatisch bedingte Schäden / Veränderungen im Materialverbund	30
2.3 Messung und Auswertung des Raumklimas	32
2.3.1 Messung als Ausgangspunkt für Klimadatenanalyse	32
2.3.2 Definitionen	32
2.3.3 Aus- und Bewertung von Klimadaten.	33
3 Untersuchung der Auswirkung von Kurzzeitschwankungen auf Kunstwerke unter Laborbedingungen 37	
3.1 Mikroskopische Untersuchung von klimatisch bedingten Veränderungen an Kunstwerken	38
3.1.1 Beschreibung der mikroskopischen Untersuchung	38
3.1.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung	39
3.1.3 Diskussion der Ergebnisse aus der mikroskopischen Untersuchung	40
3.2 Untersuchung der Gewichtsänderung an Kunstwerken bei klimatischen Schwankungen	41
3.2.1 Materialauswahl	41
3.2.2 Beschreibung des Versuchs.	42
3.2.3 Auswertung der Versuche	43
3.3 Abgleich von Sorptionsversuchen mit mikroskopischer Untersuchung	54
3.4 Zusammenfassung	55
4 Erkenntnisse zu klimatisch bedingten Schäden an historischer Ausstattung anhand von restauratorischen Zustandsuntersuchungen und Klimadatenauswertung	59
4.1 Historische Ausstattung der Prunkräume in Schloss Linderhof	62
4.1.1 Raumklima und Risikoanalyse.	63
4.1.2 Erhaltung der Ausstattung	69
4.1.3 Zusammenfassung	74
4.2 Der Türkische Saal im Königshaus auf dem Schachen	75
4.2.1 Raumklima und Risikoanalyse.	76
4.2.2 Erhaltung der Ausstattung	78
4.2.3 Zusammenfassung	79
4.3 Hochaltar St. Margaretha in Roggersdorf	83
4.3.1 Raumklima und Risikoanalyse	85
4.3.2 Erhaltung des Hochaltars	86
4.3.3 Zusammenfassung	89

4.4 Seitenaltar St. Franziskus in der Renatuskapelle in Lustheim	90
4.4.1 Raumklima und Risikoanalyse.	90
4.4.2 Erhaltung des Seitenaltars	91
4.4.3 Zusammenfassung	94
4.5 Erkenntnisse aus den vier Fallstudien.	94
5 Hygrothermische Simulation der Feuchteverteilung im Materialverbund von Kunstwerken	99
5.1 Grundlagen des hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI®Pro	99
5.1.1 Die Softwarefamilie WUFI®	99
5.1.2 Die Software WUFI®Pro	102
5.2 Adaption eines bauphysikalischen Simulationsprogramms für die Berechnung von Wärme- und Feuchtetransport in Kunstwerken	103
5.3 Messtechnische Bestimmung von Stoffkennwerten	104
5.4 Validierung der Simulation von Kunstwerken	107
6 Kopplung der Erkenntnisse aus Laborexperimenten und restauratorischen Zustandsuntersuchungen mit der Simulation.	111
6.1 Wirkung klimatischer Schwankungen auf unterschiedliche Materialkombinationen	111
6.1.1 Malerei auf Leinwand	112
6.1.2 Malerei auf Pappe	119
6.1.3 Gefasste Holzoberfläche	121
6.1.4 Vergoldete Holzoberflächen	126
6.2 Kopplung der Laborversuche mit der hygrothermischen Simulation	130
6.3 Simulationsszenarien.	132
6.3.1 Szenario Kunstwerke an der Außenwand.	133
6.3.2 Szenario Kunstwerk an der Innenwand	142
6.3.3 Szenario Kunstwerk frei im Raum stehend	145
6.3.4 Szenario Seitenaltar vor temperierter Wand	148
6.4 Ergebnisse	152
7 Beurteilung der angewandten Methoden hinsichtlich der Erkenntnis zur klimatisch bedingten Schädigung von Kunstwerken.	157
7.1 Ergebnisse und Bewertung der Laborversuche	157
7.2 Ergebnisse und Bewertung der restauratorischen Zustandsuntersuchungen	158
7.3 Ergebnisse und Bewertung der Simulation	159
7.4 Bewertung der entwickelten Vorgehensweise	161
8 Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke	163
Literaturverzeichnis	167
Abbildungsverzeichnis	181
Anhang A Ermittelte Materialkennndaten	183
Anhang B Protokoll Klimakammerversuche	185
Anhang C Klimadatenauswertung	188
Anhang D Simulation	199

Kurzfassung

Zur Beurteilung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext wurden drei Methoden miteinander kombiniert: Restauratorische Zustandsuntersuchungen, Laborversuche und hygrothermische Simulation.

Leinwandgemälde und gefasste Holzoberflächen wurden an vier Fallstudien hinsichtlich klimatisch bedingten Schäden untersucht und deren Erhaltung über einen Zeitraum von ca. drei Jahren überprüft. Um die gefundenen Schäden mit klimatischen Schwankungen korrelieren zu können, wurden möglichst originale Ausstattungen in historischem Umfeld gesucht, wo die Klimabedingungen bisher nicht grundlegend geändert wurden (Schloss Linderhof und Königshaus am Schachen). Der Hochaltar von St. Margaretha in Roggersdorf und die Seitenaltäre der Renatuskapelle in Schleißheim sind weitere Fallstudien, bei denen die Klimageschichte seit der letzten Restaurierung/Sanierung bekannt ist, so dass auch hier die Reaktion auf klimatische Schwankungen abzulesen ist. Das Raumklima der Fallbeispiele wurde gemessen und analysiert. Risikoprognosen aus den Klimadaten, die anhand von Schadfunktionen für die jeweilige Ausstattung gegeben werden, wurden mit dem tatsächlichen Erhaltungszustand abgeglichen.

Vorgaben aus der Literatur sowie bei den Fallstudien vorgefundene klimatische Schwankungen wurden modifiziert im Klimaschrank nachgestellt, um deren Wirkung auf Kunstwerke anhand von Dummies und vorgealterten Kunstwerken zu ermitteln. Neben der Untersuchung von mikroskopisch sichtbaren Schäden wurde v.a. die Änderung des Gewichts aufgrund von klimatischen Schwankungen untersucht, um so das Schadenspotential von unterschiedlichen Materialverbänden einordnen zu können.

Erkenntnisse aus beiden Methoden flossen in die Wahl von Szenarien ein, die anhand der hygrothermischen Simulation mit dem Programm WUFI® Pro nachgestellt wurden. Letzteres wurde erstmals eingesetzt um die Temperatur- und Feuchteverteilung, die sich in den einzelnen Schichten von Kunstwerken einstellt, zu untersuchen. Dazu wurden die Kenndaten von Materialien, die für die Herstellung von Leinwandgemälden und gefassten Holzoberflächen erforderlich sind (Träger, Grundierung, Malschicht, Überzug), ermittelt. Der Abgleich von gemessenen und simulierten Daten erfolgte durch die erhobenen Messdaten vor und hinter einem Leinwandgemälde, das in unterschiedlichen Abständen zu einer ungedämmten Außenwand montiert wurde. Mit Hilfe der Simulation konnten Feuchtedifferenzen, die sich bei klimatischen Schwankungen in den einzelnen Schichten des Materialverbands einstellen, analysiert und daraus potentielle Schadensrisiken abgeleitet werden. Untersucht wurde zum einen, wie sich der Temperatur- und Feuchteverlauf der einzelnen Schichten im Materialverbund von Leinwandgemälden und gefassten Holzoberflächen an der Außen- bzw. Innenwand hängend, auswirkt. Zum Anderen wurden Fragen, die sich aus den Zustandsuntersuchungen ergaben, etwa die Auswirkung des Raumklimas auf die historische Ausstattung in Schloss Linderhof mit und ohne Lüftungsanlage, mit Hilfe der hygrothermischen Simulation analysiert.

Gerade durch die Kombination der restauratorischen Untersuchungen mit Laborversuchen und der hygrothermischen Simulation konnte die Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke vielschichtig bearbeitet und aktuelle Klimavorgaben aus der Literatur und daran abgeleitete Auswertetools kritisch beurteilt werden.

Abstract

For the assessment of the impact of climatic fluctuations on artworks, three methods have been combined: in-situ investigation, laboratory experiments and hygrothermal simulation.

Climate induced damages on canvas paintings and painted and gilded wooden surfaces were examined by a conservational investigation on four case studies for three years. In order to be able to correlate the found damages to climatic fluctuations only case studies still housing its original furnishing without changing the historic climate have been chosen (Linderhof Palace, the King's house on Schachen). The high altar in St. Margaretha in Roggersdorf and the side altar in the Renatus chapel in Schleißheim were used as case studies because the climate history since the last conservation treatment is known. So, new damages can be related to the climate as well. The indoor climate of the case studies was evaluated, and the risk predictions based on damage functions were compared with the found state of preservation of the historic furnishing.

Short term fluctuations, stated in literature and discovered on site were taken for the examination of token objects and aged artworks in the climate chamber. Microscopically visible changes as well as the change in weight due to changes in the climate were examined in order to investigate the vulnerability of different types of artworks. The findings of both methods were incorporated in the choice of scenarios, which have been adjusted with the hygrothermal simulation program WUFI® Pro. This tool was used for the first time to examine the distribution of temperature and moisture in the single layers of an artwork. Therefore the characteristics of materials, used for artworks such as canvas paintings and painted wooden surfaces were determined in the laboratory. The validation of the hygrothermal simulation was done by an experiment, where a canvas painting was hung with different distances on an external wall. The temperature und relative humidity before and behind the picture as well as the temperature on the wall were measured and compared to the results from the simulation model. With the simulation programm differences in temperature and relative humidity in the different layers of an artwork were analyzed and out of that potential damages risks were deduced.

By the combination of the three methods, questions and assumptions from the conservational investigations could be pursued by the laboratory experiments and hygrothermal simulation. Thereby a better knowledge on the influence of climatic fluctuations on different types of artworks was received and current guidelines and damage functions gained from literature could be evaluated.

1 Einführung

„Das Einzelne hat, so entlegen es ist, doch allezeit Bezug auf das Ganze.“
Leopold von Ranke (1795–1886)

Kunst ist die höchste Ausdrucksform des menschlichen Lebens. Doch sie ist vergänglich. Bereits Vitruv (1. Jh. v. Chr.) wußte, dass Dinge nicht für die Ewigkeit gemacht sind und einem kontinuierlichen Verfallsprozess unterliegen.¹ Verheerende Folgen haben Naturkatastrophen – Erdbeben, Brände oder Hochwasser – aber auch Kriege und Vandalismus. Das tägliche Reagieren der Kunstwerke auf die unmittelbare klimatische Umgebung führt auf den ersten Blick zu wenig augenfälligen Veränderungen. Doch dieser kumulative Prozess führt langfristig zum Verschwinden unseres kulturellen Erbes.

Kunstwerke bestehen oft aus einem komplexen vielschichtigen Materialverbund, der empfindlich auf seine Umwelt reagiert. Aus der Kombination diverser Materialien verschiedener Schichtdicke und Durchlässigkeit ergeben sich unterschiedliche chemische und physikalische Eigenschaften, die durch Faktoren wie Licht, Schadstoffe und klimatische Größen beeinflusst werden. Oft ist es gerade das Zusammenspiel der äußeren Komponenten, das zur Schädigung führt. Der Diversität an Materialkombinationen ist kein Ende gesetzt. Deshalb ist es schwierig, klimatische Vorgaben zu machen, die jederzeit und für alle Materialgruppen gültig sind.

„Denn jeder Verfall wird wesentlich durch die Faktoren Zeitdauer und Umwelt, gutes Material und richtige Ausführung bzw. spätere Behandlung bestimmt.“²

Um den Verfall möglichst lange hinaus zu zögern, gibt es zwei Möglichkeiten: Die Umgebung, in der sich das Kunstwerk befindet zu optimieren, oder das Kunstwerk selbst möglichst beständig zu machen. Bereits beim Schaffensprozess kann – etwa durch spezielle Bearbeitungstechniken – die langfristige Erhaltung positiv beeinflusst werden. Seit dem Mittelalter existieren Vorgaben, wie beispielsweise das Holz, aus dem Kunstwerke entstehen sollen, gelagert und bearbeitet werden soll, um es weniger empfindlich gegenüber klimatischen Einflüssen zu machen.³ Diese Techniken haben sich bis heute u. a. in der Fassmalerei und Vergoldung erhalten. Besonders lichtechte Farbmittel oder ein ölhaltiger Anstrich als Witterungsschutz sind weitere frühe Ansätze, um ein Kunstwerk für die „Ewigkeit“ herzustellen.⁴

Zum anderen kann die Umgebung so gestaltet werden, dass sie weitgehend frei von den schädlichen Einflüssen

1 Vitruv 1981, II, 8.

2 Koller 1995, S. 27.

3 Huth 1923, S. 54 ff.

4 Vgl. Doerner 1938; Wehlte 1967.

sen wie Schadstoffen, Licht und ungünstigen klimatischen Bedingungen ist. Die meisten Kunstwerke waren ursprünglich keinem Museumsklima im heutigen Sinn ausgesetzt, sondern befanden sich in Kirchen, Klöstern, Burgen, Schlössern und Herrschaftssitzen. Das Gebäude selbst war nach dem damaligen Stand des Wissens so gebaut, dass es seiner Funktion entspricht und den best möglichen Schutz für seine Bewohner bietet. Klimatisch bedenkliche Standorte für Kunstwerke, wie Außenwände, waren früh bekannt. Erste Rückseitenschutzsysteme gehen auf die Antike zurück:

„Die oft bis heute noch wirksamen Methoden reichen von der Unterspannung mit grundierter Zweitleinwand über einfache oder doppelte Hinterlegung mit ungehoebelten Nadelholzbrettern, Holzkohlefüllungen zwischen Bildrückseite und Altarwand bis zu Belüftungssystemen der rückseitigen Altarnischen (Abbildung 1.1, 1.2).“⁵

Für Gemälde, die an Außenwänden hingen, sind Klappvorrichtungen belegt, die ermöglichten, diese vor den starken klimatischen Einflüssen zu schützen. Eine solche Konstruktion ist beispielsweise im Alten Schloss in Schleißheim belegt.⁶

Im 19. Jahrhundert, bei den ersten Museumsbauten, legten die Architekten den Schwerpunkt auf die Funktion des Gebäudes als Ausstellungsort, rein ästhetische Elemente blieben untergeordnet. Gleichzeitig geriet auch das Kunstwerk selbst immer mehr in den Fokus für den direkten klimatischen Schutz, etwa durch das Applizieren von Firnis⁷, Rückseitenschutz, Verglasung aber auch durch restauratorische Eingriffe wie Doublierung, Kaschierung oder Parkettierung.⁸

Mit zunehmender Möglichkeit das Raumklima durch technische Anlagen zu stabilisieren, wurden die Ansprüche an die Klimakonstanz immer größer. Heute beruhen die Vorgaben mehr auf der maximalen Machbarkeit der Anlagentechnik als auf tatsächlichem Wissen über die Wir-

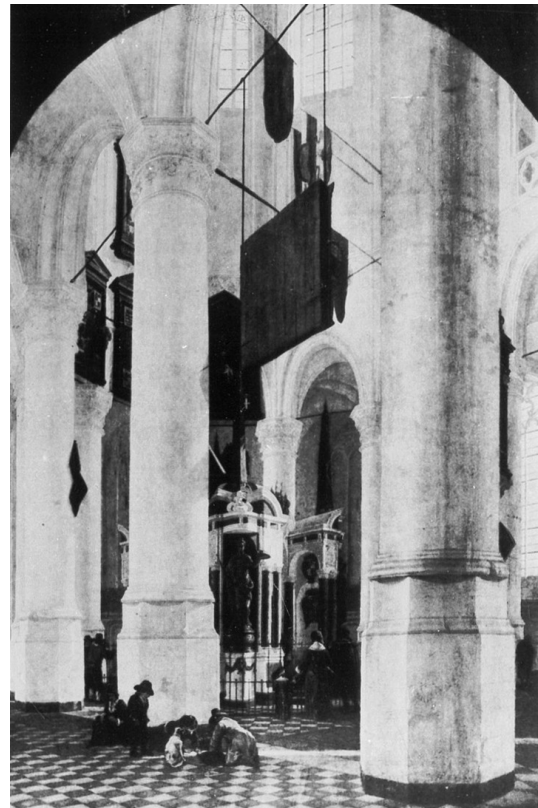


Abbildung 1.1:
Gerhard Houckgeest, Innenansicht der neuen Kerk zu Delft, mit historischer Hängung von Tafelgemälden in Raummitte, 1650.



Abbildung 1.2:
Rückseitenschutz eines Leinwandgemäldes aus Holz (Koller 1981).

⁵ Koller, 1981, S. 112.

⁶ Pettenkofer 1870, S.11.

⁷ „Das gewöhnlichste und beste Sicherungsmittel ist ein guter Firnis, weil Glastafeln nur bei kleineren Gemälden angebracht werden können und zur Erlangung einer vollkommenen Klarheit und einer hinlänglichen harmonischen Wirkung nicht völlig ausreichen. Sie schützen aber Bild und Firnis so sicher gegen Verunreinigungen und atmosphärische Einwirkung, daß oft kaum nach 200 Jahren eine Erneuerung der Firnisse nöthig zu werden pflegt ...“, Lucanus 1881, S. 15.

⁸ Keeley et al., p. 195.

kung kurzfristiger klimatischer Schwankungen auf ein Kunstwerk. Gleichzeitig gibt es Beobachtungen, dass insbesondere in Museen ein hoher Anteil an klimatisch bedingten Schäden durch Anlagenausfälle o. ä. und den daraus resultierenden Klimaschwankungen bedingt ist:

„Ohne Übertreibung kann behauptet werden, daß die in den letzten Jahrzehnten an Sammlungsgut entstandenen Schäden fast ausschließlich Klimaschäden sind.“⁹

Durch die Energiepolitik und die Auswirkungen des Klimawandels sind wir heute mehr denn je gezwungen, uns bewusst zu machen, welche klimatischen Vorgaben notwendig sind, um unser Kulturgut nachhaltig für die nächsten Jahrhunderte bewahren zu können.

Zudem kommt vermehrt die Frage nach den Auswirkungen des Klimawandels für nichtklimatisierte Gebäude auf. Mit welchen Konsequenzen ist zu rechnen – erhöht sich etwa das Risiko der Schimmelbildung? Prognosen über künftige klimatische Veränderungen – außen wie im Innenraum – sind notwendig, um rechtzeitig präventive Maßnahmen einleiten und unser Kulturgut ausreichend schützen zu können.

Diese Arbeit beschäftigt sich mit den Auswirkungen von klimatisch bedingten kurzfristigen Schwankungen auf Kunstwerke unterschiedlicher Materialkombinationen. Da bei der historischen Ausstattung der vier gewählten Fallstudien insbesondere Leinwandgemälde und polychrom gefasste Holzoberflächen vorzufinden waren, und diese sehr empfindlich gegenüber klimatischen Schwankungen sind, liegt der Fokus auf diesen Materialverbindungen.

1.1 Motivation und Zielsetzung

Während des Vorpraktikums der Autorin stand im Restaurierungsatelier eine mittelalterliche Hochaltartafel – Malerei auf Holz. Den Veröffentlichungen der polnischen Forschungsgruppe um Roman Kozłowski zu Folge ist dieser Verbund recht stabil gegenüber kurzfristigen klimatischen Schwankungen. Sobald die Türen jedoch für eine Weile zum Lüften offen standen, knackste und krachte es in der Tafel. Augenscheinlich konnten keine Schäden festgestellt werden, doch entstand schon damals ein Gefühl der Unsicherheit, inwieweit sich diese kurzfristigen klimatischen Schwankungen negativ auf Kunstwerke auswirken würden. Diese Erfahrung war rückblickend die erste Berührung mit den klimatischen Auswirkungen auf ein Kunstwerk.

Welche (kurzfristigen) klimatischen Schwankungen sind zulässig für Kunstwerke, ohne dass diese Schaden nehmen? Und können überhaupt klimatische Vorgaben festgelegt werden, die für alle Gattungen gültig sind? Neu sind diese Fragen nicht – sie beschäftigen Restauratoren, Ingenieure und Anlagentechniker bereits seit Anfang des 19. Jahrhunderts. Auf die viel zitierten, lediglich auf Zahlen reduzierten engen Klimavorgaben von Thomson¹⁰ folgten in den letzten Jahren Ansätze zur Aufweitung von Mecklenburg, Bratasz u. a. (vgl. 2.1.4). Doch diese sind umstritten, da sie auf Labormessungen und Simulationen an ungeschädigten Materialkombinationen wie auf Messungen an einzelnen realen Objekten beruhen, die nun auf ganze Kunstgattungen übertragen werden. Alter, klimatische Vorgeschichte oder Erhaltungszustand – Eigenschaften die jedes einzelne Objekt beeinflussen – finden dort keine Berücksichtigung. Der Untersuchungsschwerpunkt aller den Vorgaben zugrunde liegenden Arbeiten basiert auf mechanischen Bewegungen im Materialverbund. Bisher wenig berücksichtigt ist die Quelle der Bewegung selbst: Die materialspezifischen hygrothermi-

⁹ Huber 1992, S. 125 f.

¹⁰ 20 °C und 50 % relative Luftfeuchte ist das Destillat aus Garry Thomsons „The Museum Environment“ (1994). Tatsächlich sind die Aussagen, die Thomson zu klimatischen Vorgaben macht, präziser, differenzierter und ausführlicher.

schen Eigenschaften, die verantwortlich sind, wie stark Materialien quellen und schrumpfen.

Zum anderen ist die Vorstellung eines vollkommen homogenen Raumklimas naiv: Beeinflusst durch angrenzende Flächen und Luftströmungen bildet sich insbesondere an Wandflächen ein anderes (Mikro)Klima als in Raummitte. Folglich können die Klimavorgaben auf vielfältige Weise ausgelegt und teilweise über die Position der Klimamessgeräte manipuliert werden.

Die Motivation dieser Arbeit besteht darin, klimatische Schwankungen und ihre Auswirkungen auf den Materialverbund von Kunstwerken ganzheitlich zu betrachten. Das einzelne Objekt soll in Bezug zum gesamten Raum gesehen werden. Durch die Kombination mehrerer Untersuchungsmethoden wird die Thematik von unterschiedlichen Blickwinkeln aus untersucht. Daraus soll ein größeres allgemeines Verständnis über die Schadensprozesse in Kunstwerken abgeleitet und der Frage, welche klimatischen Schwankungen schädigend sind, ein Schritt näher gekommen werden.

Bisherige Monitoringversuche, Laboruntersuchungen und Simulationen zum mechanischen Verhalten von Kunstwerken sind begrenzt auf einzelne Objekte bzw. Materialien. Häufig werden Vereinfachungen getroffen, die das Ergebnis verfälschen können. Selten finden die Erkenntnisse aus Untersuchungen und Laborversuchen Rückkopplung zu den Beobachtungen, die direkt vor Ort an historischer Ausstattung gewonnen wurden. Bisher wurden die hygrothermischen Reaktionen innerhalb eines Kunstwerks und deren Interaktion mit dem Raumklima kaum beachtet. Daher soll hier die Frage nach der Wirkung klimatischer Schwankungen auf Kunstwerke durch die Kombination von Zustandsuntersuchungen, Laborversuchen und hygrothermischen Simulationen beantwortet werden. Erstmals wird dazu ein Gebäudesimulationsprogramm eingesetzt. Am Beispiel von farbig gefasster und vergoldeter Holzoberflächen sowie Leinwandgemälden werden die Temperatur- und Feuchteverläufe im Materialverbund aufgezeigt.

1.2 Herangehensweise

Um zu Aussagen über Materialveränderungen in Folge klimatischer Schwankungen zu gelangen, wurden drei verschiedene Methoden kombiniert: Restauratorische Zustandsuntersuchungen an vier Fallbeispielen, physikalische Versuche an Dummies und gealterten Kunstwerken im Klimaschrank sowie hygrothermische Simulation. Die Erkenntnisse aus den Zustandsuntersuchungen flossen in die Laborversuche und Simulationen ein. Abbildung 1.3 zeigt schematisch die Zusammenhänge der einzelnen Elemente.

Zunächst wurden mittels einer Literaturstudie die theoretischen Grundlagen zu klimatisch bedingten Schäden an Kunstwerken, Vorgaben zu deren Vermeidung sowie ein Abriss zur Aus- und Bewertung von Klimadaten zusammengestellt. Zur Beantwortung der Frage, wie schnell sich klimatische Schwankungen auf Kunstwerke auswirken, wurden schematische und reale Schwankungen der relativen Luftfeuchte (rF) in der Klimakammer nachgestellt und die Gewichtsänderung an Dummies mit unterschiedlichen Materialien und Materialkombinationen untersucht.

Die Erkenntnisse aus den Zustandsuntersuchungen wurden mit denen aus den Laborversuchen abgeglichen. Weiter erfolgte eine Analyse des Raumklimas der vier Fallstudien. Die Risikoprognosen für die jeweilige Ausstattung aus Analyseprogrammen wurden mit den vor Ort gewonnenen Erkenntnissen auf Plausibilität überprüft. Das Bindeglied zwischen den restauratorischen Untersuchungen und der hygrothermischen Simulation bilden Laborversuche, wo einzelne Schwankungszyklen mit unterschiedlichen Materialverbänden getestet und deren Reaktionen miteinander verglichen wurden. Welcher Temperatur- und Feuchteverlauf sich

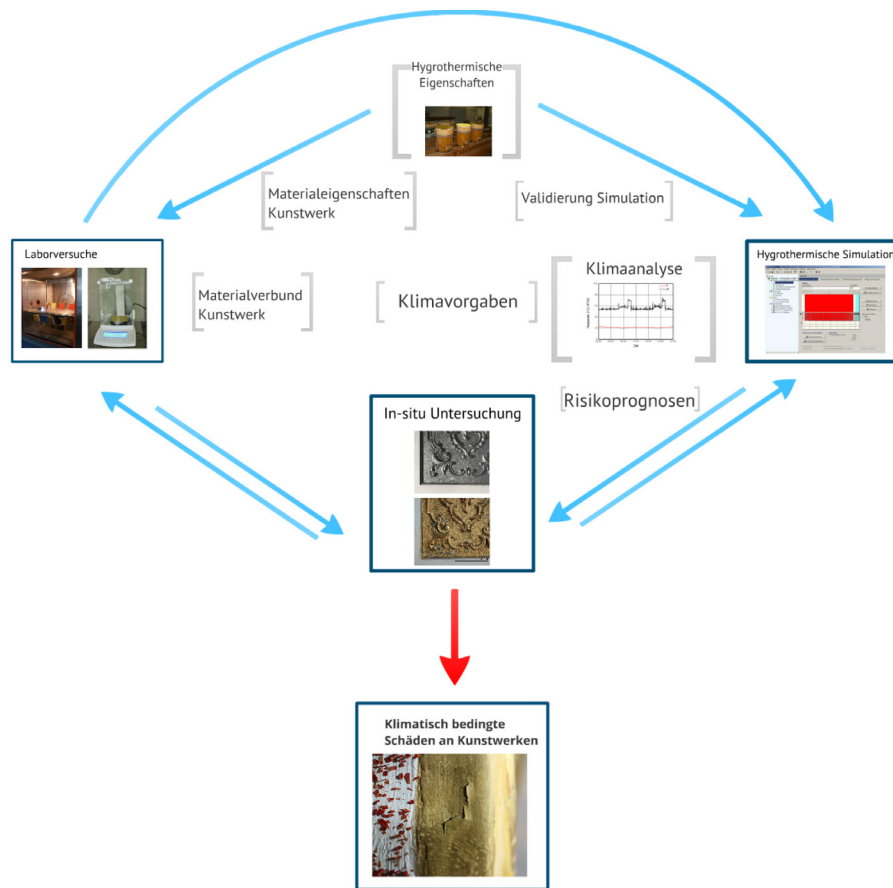


Abbildung 1.3:
Schematische Darstellung der Zusammenhänge zur Untersuchung von klimatisch bedingten Schäden an Kunstwerken.

bei klimatischen Schwankungen in den unterschiedlichen Schichtenverbänden einstellt, wurde mit Hilfe der hygrothermischen Simulation erarbeitet. Szenarien untersuchen, welches Mikroklima sich bei typischen Situationen – Leinwandgemälde an der ungedämmten Außenwand; Seitenaltar in unmittelbarer Nähe zur Wandheizung – im Materialverbund einstellt.

Das Kapitel 2 gibt einen Abriss über den Stand des Wissens zu klimatisch bedingten Schäden und zur Entstehung unterschiedlicher klimatischer Vorgaben. Weiter wird die Erhebung von Klimadaten und deren Auswertung diskutiert. Die Laborversuche mit Dummies und vorgealterten Kunstwerken zur Feststellung, ob bzw. wann klimatisch bedingte Schäden sichtbar gemacht werden können, sind in Kapitel 3 beschrieben. Wägeversuche als sensibles Verfahren zur Beurteilung der Empfindlichkeit von Kunstwerksgattungen hinsichtlich klimatischer Schwankungen werden vorgestellt. Im folgenden Abschnitt werden die Rückschlüsse dargestellt, die aus den Untersuchungen von klimatisch bedingten Schäden vor Ort gezogen wurden. Die Fallstudien Linderhof und Königshaus am Schachen unterliegen beide einem „natürlichen“ Raumklima und bergen historische Ausstattungen, die nie den Ort gewechselt haben. Daher ist hier die Chance groß, tatsächlich „rein“ klimatisch bedingte Schäden zu finden.

Mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm wurden unterschiedliche Szenarien nachgestellt, um über die Temperatur- und Feuchteverteilungen im Materialverbund auf Schäden zu schließen. Kapitel 5 beschreibt zunächst die theoretischen Grundlagen und die Bestimmung der notwendigen Materialkennwerte. In Kapitel 6 erfolgt die Untersuchung der Auswirkung eines Feuchtesprungs auf unterschiedliche Materialverbände. Durch die Kopplung der Laborversuche mit der hygrothermischen Simulation wurden Schadensrisiken durch

Feuchtedifferenzen zwischen den einzelnen Schichten festgelegt und diese an Szenarien aus den Fallstudien getestet.

Die Ergebnisse sowie eine Bewertung der drei Herangehensweisen sind in Kapitel 7 dargelegt. Kapitel 8 schließt mit einer Zusammenfassung über die Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf den Materialverbund von Kunstwerken und einem Ausblick.

2 Theoretische Grundlagen zu klimatisch bedingten Schadensphänomenen an polychrom gefassten Kunstwerken und Leinwandgemälden

In diesem Kapitel wird der Stand der Wissenschaft zu den physikalischen Zusammenhängen von Kunstwerken und den Wechselwirkungen mit ihrer Umgebung dargelegt. Im Anschluss folgen Erläuterungen zur Entstehung der Klimasollwerte sowie zur Definition von klimatischen Schwankungen.

2.1 Wechselwirkungen zwischen Klima und Kunstwerk

2.1.1 Das Raumklima

Kunstwerke befinden sich in unmittelbarem Austausch mit dem Klima das sie umgibt. Das Raumklima umfasst allgemein alle Einflüsse, die auf einen Raum wirken. Die Hauptkomponenten sind Temperatur, relative Luftfeuchte, Luftgeschwindigkeit sowie die Umschließungsflächentemperatur. Die Bauwerksfeuchte, Undichtigkeit des Gebäudes, Klimatisierungsstrategien und Besucher wirken sich ebenfalls aus, sind jedoch Bedingungen der Hauptkomponenten. Abbildung 2.1 zeigt schematisch die Einflussfaktoren auf das Raumklima.

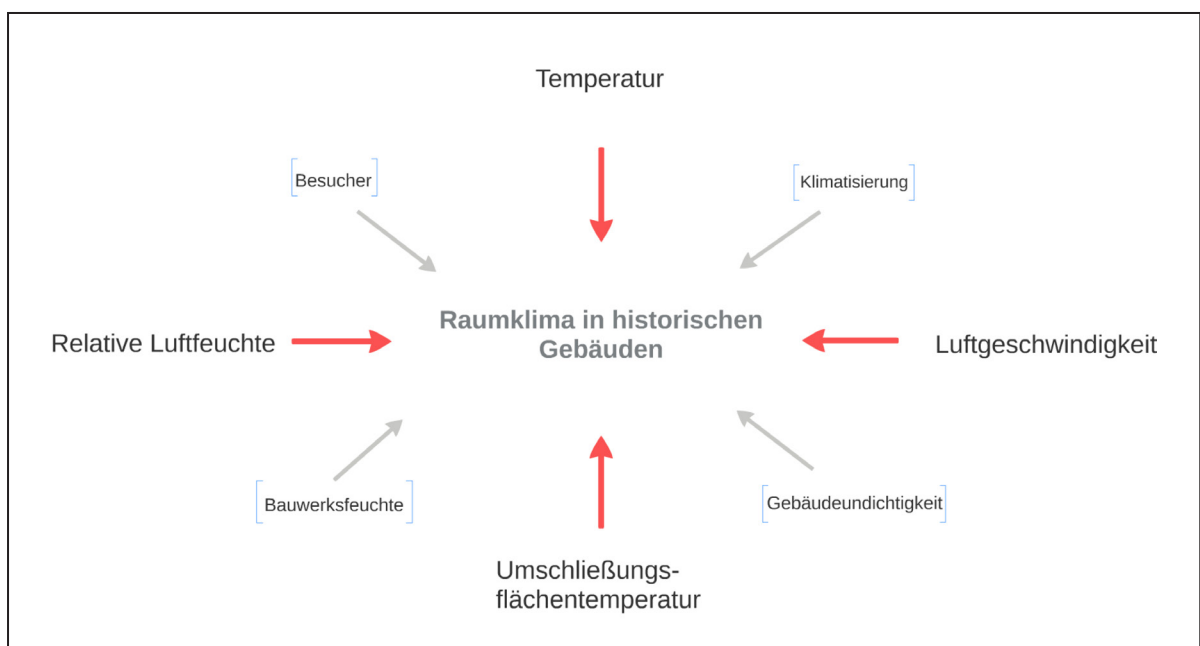


Abbildung 2.1:
Darstellung der Einflussfaktoren auf das Raumklima in historischen Gebäuden nach Pfeil 1975.

Luft besitzt abhängig von der Temperatur eine unterschiedliche Sättigungsfeuchte. Mit steigender Temperatur erhöht sich die Aufnahmefähigkeit für Wasserdampf. Bei gleich bleibender absoluter Luftfeuchte sinkt die relative Luftfeuchte im Raum. Kühlt die Raumluft ab, setzt ein gegenläufiger Prozess ein: Wasserdampf wird von Bauteilen oder hygroskopischer Raumausrüstung absorbiert und kondensiert bei Taupunktunterschreitung aus.¹¹ Der allgemeine Zusammenhang von Temperatur, absoluter und relativer Luftfeuchte wird anhand des Mollier-hx-Diagramms deutlich. Detaillierte Erläuterungen hierzu geben u. a. Thomson und Hilbert.¹²

Temperaturdifferenzen zwischen Innenraum und umschließenden Flächen führen zu Dichteunterschieden in der Raumluft, so dass Bewegung durch thermischen Auftrieb entsteht. Wie hoch die Bewegungsgeschwindigkeit ist hängt von der jeweiligen Temperaturdifferenz ab.¹³ Die Bewegung kann aber auch baulich bedingt sein. Durch Undichtigkeiten, v. a. an Fenstern und Türen (Fugenlüftung), sowie Winddruck ist in historischen Gebäuden meist ein natürlicher Luftaustausch gegeben. Die Luftwechselrate ist außerdem abhängig von der Witterung.¹⁴ Generell sind Luftwechsel und Luftströmungen erwünscht, da sich sonst lokale Mikroklimata bilden und vermehrt Schimmel wachsen kann. Eine hohe Luftbewegung kann jedoch starke Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte verursachen. Der Standort eines Kunstwerks trägt also wesentlich zu seiner Erhaltung bei. So ist der Zustand von Gemälden, die an einer Außenwand ohne ausreichenden Rückseitenschutz oder Abstand zur Wand hängen nachweislich schlechter, als der von Kunstwerken die an einer Innenwand hängen.¹⁵ Ein Glossar zu raumklimatischen Fachbegriffen ist in „Raumklima in Museen“ zu finden.¹⁶

2.1.2 Physikalische Eigenschaften von Kunstwerken mit organischen Bestandteilen

Die charakteristischen Materialeigenschaften von Kunstwerken lassen sich anhand der physikalischen Eigenschaften ableiten. Neben mechanischen können sich thermische, optische, elektrochemische und chemische Reaktionen auf Kunstwerke auswirken.¹⁷

Thermische und hygrothermische Eigenschaften

Kunstwerke wie Leinwandgemälde oder Holzobjekte bestehen überwiegend aus organischen hygroskopischen Materialien. Das Porengefüge dieser Materialien enthält Strukturwasser. Deshalb stehen diese Kunstwerke in kontinuierlichem Austausch mit ihrer klimatischen Umgebung. Sie streben stets einen Gleichgewichtszustand mit der Umgebung an, indem sie Feuchtigkeit aufnehmen bzw. abgeben. Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte wirken sich unmittelbar auf Kunstwerke mit organischen Bestandteilen aus. Bei hoher relativer Luftfeuchte adsorbieren diese Materialien, sie nehmen Feuchte auf und quellen; bei geringer relativer Luftfeuchte desorbieren sie – sie geben Feuchte ab und schrumpfen. Sorption alleine ist für einzelne Materialien nicht grundsätzlich schädlich. Lehm beispielsweise, als hygroskopisches, pufferndes Ma-

11 Künzel 2000, S. 71 f.

12 Thomson 1994, p. 208 ff.; Hilbert 2002, S.130 ff.

13 Pfeil 1975, S. 21.

14 Hilbert 2002, S. 139, 264.

15 Ranacher 1995.

16 Fachinstitut für Gebäude-Klima e. V. 2000, S. 5 f.

17 Bauer-Bolton 1933, S. 101.

terial wird in Wohnräumen aber auch Depots und Archiven eingesetzt, um das Raumklima zu stabilisieren.¹⁸ Aufgrund der anisotropen Struktur organischer Materialien ist das Maß an Ausdehnung bzw. Schrumpfung abhängig von der jeweiligen Raumachse. Im Materialverbund führt die unterschiedliche Reaktion der einzelnen Schichten auf klimatische Schwankungen zu Spannungen, die mit der Zeit Schäden ausbilden können. Speziell Gemälde und gefasste Holzoberflächen bestehen aus einer Vielzahl komplexer Schichten – vom Bildträger über Vorleimung und diverse Grundierungsschichten zur Malschicht, die wiederum mehrschichtig aufgebaut sein kann, oder auch mit vergoldeten Flächen kombiniert auftritt, bis hin zu Firnis und Überzügen (Abbildung 4.10 unten).

Wie ein Kunstwerk auf klimatische Schwankungen reagiert, hängt stark von den spezifischen Eigenschaften der verwendeten Materialien ab. So reagiert eine Malschicht mit ölhaltigem Bindemittel langsamer als mit wässrigem:

„Ungefirniste Leim- oder temperagebundene Malereien zeigen demgegenüber fast kein Farbreief und kaum Sprungrisse, dafür aber eine frische, ungetrübte Farbigekeit, während bei Ölmalereien die Alterung des Bindemittels, Lichteinflüsse und Reaktionen von bestimmten Pigmenten (z. B. Smalteblau) mit dem öligen Medium zu Nachdunkelungen, Aufhellungen oder Farbverschiebungen führen.“¹⁹

Die Charakterisierung des Materialverbunds durch die Bestimmung der Materialkennndaten wie der Sorptionsisotherme oder der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl dient einerseits dem Verständnis für spezifische Reaktionen eines Materials auf klimatische Veränderungen. Andererseits sind diese notwendig, um mit Hilfe der hygrothermischen Simulation Feuchteverläufe im Gefüge simulieren zu können (vgl. Kapitel 5). Das Vermögen, Feuchtigkeit aufzunehmen, ist je nach Material unterschiedlich ausgeprägt, wie anhand von *Sorptionsisothermen* deutlich wird (Abbildung 2.2). Die beiden Kurven in Abbildung 2.2 zeigen den typisch S-förmigen Verlauf von Adsorption und Desorption für organische hygroskopische Stoffe. Die Sorptionsisothermen der meisten Materialien haben zwischen 30 und 50 % rF eine geringe Steigung, während ab 50 % rF ein progressives Ansteigen aufgrund von Kapillarkondensation sichtbar wird. Im überhygroskopischen

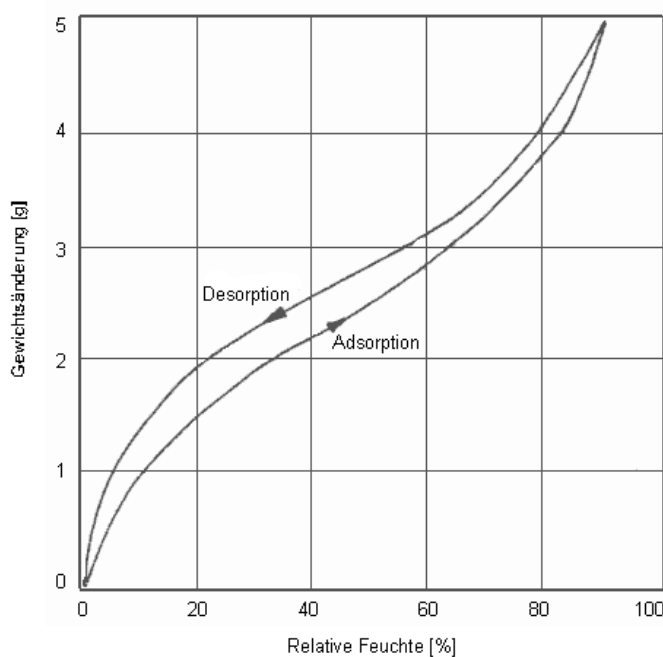


Abbildung 2.2:
Schematische Darstellung von Sorptionsisothermen. Gewichtszu- bzw. Abnahme in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte. Aufgrund der Hysterese-Effekte ist die Feuchteabgabe (Desorption) langsamer als die Aufnahme (Adsorption).

¹⁸ Ryhl-Svendsen et al. 2012.

¹⁹ Koller 1978, S. 200.

oder *Kapillarwasserbereich* ab 95 % rF ist der Anstieg am stärksten.²⁰ Der Unterschied beider Kurven liegt in der Hysterese: Die Feuchtaufnahme (Adsorption) verläuft schneller als die Feuchteabgabe (Desorption). *Hysterese* ist ein Phänomen, das abhängig von der Porenraumgeometrie aufgrund von unterschiedlichen Benetzungseigenschaften durch Adsorption und Desorption auftritt. Bei der Adsorption wird die Dampfdiffusion von der Oberflächendiffusion überlagert; es bildet sich ein Sorbatfilm an den Porenwänden, weshalb mehr Wasser aufgenommen werden kann.

Die *Diffusion* bzw. die *Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl* gibt an, wie viel Wasserdampf durch eine Schicht diffundiert. Nach DIN 4108-3 werden diffusionsoffene (s_d -Wert $\leq 0,5$ m), diffusionshemmende ($0,5 \text{ m} \leq s_d \leq 1500 \text{ m}$) und diffusionsdichte Schichten (s_d -Wert ≥ 1500 m) unterschieden.²¹ Der s_d -Wert ist die daraus abgeleitete äquivalente Luftschichtdicke in Metern (vgl. Kapitel 5.3).

Unterschiedliche Farb- und Bindemittel haben spezifische physikalische Merkmale, die das Verhalten eines Kunstwerks bezüglich klimatischer Schwankungen beeinflussen können. Manche Erdpigmente quellen wegen ihrer Struktur aus Schichtsilikaten sehr stark bei hoher relativer Luftfeuchte und bilden ein charakteristisches Craquelée aus, während z. B. Bleiweiß weniger empfindlich gegenüber Feuchtigkeit ist.²²

Die *Wärmekapazität* und der *Temperaturgradient* sind weitere Materialeigenschaften denen Kunstwerke unterliegen. Die Wärmekapazität besagt, wie viel thermische Energie ein Stoff bei einer Temperaturänderung aufnimmt oder abgibt. Der Temperaturgradient beschreibt, wie stark die Temperatur vom Ort abhängt und in welcher Richtung sie am stärksten steigt.

Mechanische Eigenschaften und ihre Aussagefähigkeit für Schadensprognosen an Kunstwerken

Um zu ermitteln, wie plastisch oder spröde ein Material ist, wird die Spannungs-Dehnungs-Messung eingesetzt. Dazu wird der Prüfstoff üblicherweise unter konstanten Klimabedingungen einer definierten Zugkraft ausgesetzt, die langsam erhöht wird. Die daraus resultierende Längenänderung des Materials wird in Abhängigkeit der Zugkraft in Form eines Spannungs-Dehnungs-Diagramms dargestellt (Abbildung 2.3). Die Elastizitätsgrenze (yield point) gibt den Übergang von elastischer in plastische Verformung an und ermittelt so die „zulässige Beanspruchung“ eines Materials.²³ Unterhalb dieses Punktes kann sich das Material reversibel zurückformen, oberhalb kommt es zur irreversiblen Strukturveränderung bis hin zum Bruch. Abhängig von den Umgebungsbedingungen weisen Stoffe unterschiedliche Eigenschaften auf. Mecklenburg führte systematische Untersuchungen an Materialien durch, die Bestandteile von Tafel- und Leinwandgemälden sind. Ziel war, die Dehnungsgrenzen für die jeweiligen Materialien zu bestimmen, um daraus Vorgaben für maximale klimatische Schwankungen abzuleiten. Neben neuen wurden auch gealterte Materialien getestet (Abbildung 2.4).²⁴ Mecklenburg unterscheidet, ob sich das Material frei in alle Richtungen bewegen kann (unrestrained) oder ob es aufgrund der Position in einem dreidimensionalen Gefüge, etwa bei einem Kabinettsschrank, nur eingeschränkt bewegungsfähig (restrained) ist. Den Zusammenhang zwischen den Werten der Spannungs-Dehnungs-Messung (E-Modul), die bei konstanten Klimabedingungen erfolgt, und der Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte stellt er anhand einer dreidimensionalen Grafik dar (Abbildung 2.5). Basierend auf

²⁰ Krus 1995, S. 7 f.

²¹ DIN 4108-3.

²² Mecklenburg 2010a, p. 51 f.

²³ Bauer-Bolton 1933, S. 97.

²⁴ Mecklenburg et al. 1991a; Mecklenburg et al. 1991b; Mecklenburg et al. 1998; Mecklenburg 2005; Mecklenburg 2007; Mecklenburg 2010a; Mecklenburg 2010b.

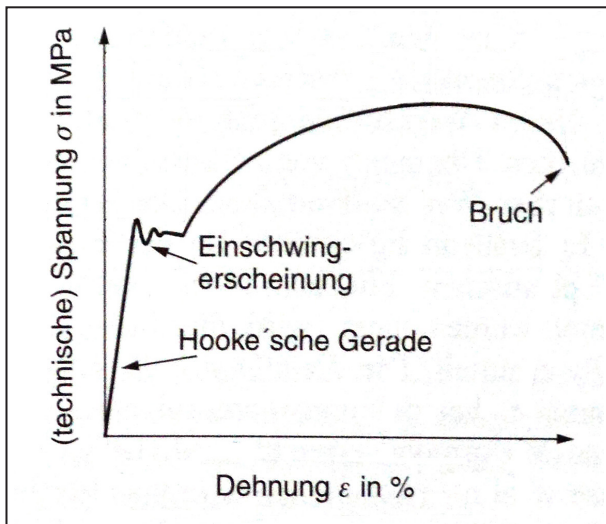


Abbildung 2.3: Spannungs-Dehnungs-Diagramm – Schematische Darstellung der Spannungsänderung in Abhängigkeit der Dehnung unter Angabe der Elastizitätsgrenze (yield point) nach Seidel 2012.

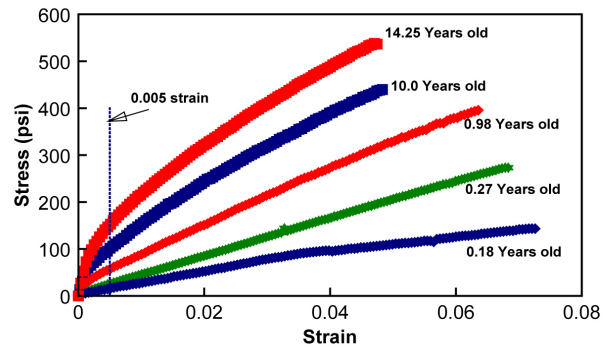


Abbildung 2.4: Spannungs-Dehnungs-Messung mit Proben unterschiedlichen Alters. Diese belegen die altersbedingte Sprödigkeit von Materialien (Mecklenburg 2010a).

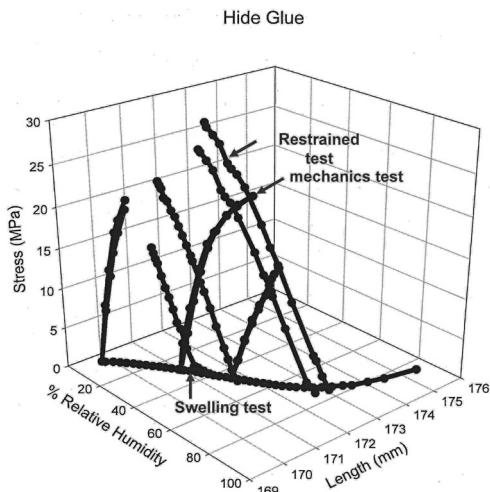


Abbildung 2.5: Darstellung des Zusammenhangs von Spannungs-Dehnung-Messungen und der relativen Luftfeuchte am Beispiel von Glutinleim (Mecklenburg et al. 1996).

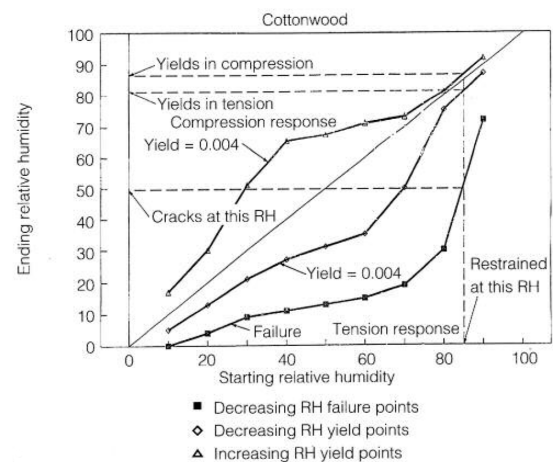


Abbildung 2.6: Berechneter Bereich für zulässige Feuchteschwankungen am Beispiel von Pappelholz in tangentialer Schnittrichtung mit begrenzter Verformungsmöglichkeit (fully restrained), nach Mecklenburg et al. 1998.

seinen Ergebnissen aus den Messungen legt er fest, dass Spannungen unterhalb von 0,004 keine Schäden hervorrufen. Aufgrund der Annahme, dass kein Schaden entsteht, wenn die klimatischen Schwankungen so gering sind, dass das Material unterhalb der Dehnungsgrenze, also des definierten „yield value“ bleibt, entstand für Holztafelgemälde eine Grafik, aus der abzulesen ist, ob eine Feuchteschwankung reversibel ist, oder Schäden verursacht (Abbildung 2.6). Am Beispiel eines Feuchtesprungs von 85 auf 50 % wird gezeigt, dass generell bei relativen Luftfeuchten unter 40 und über 70 % bereits geringere Feuchteschwankungen Schäden verursachen können. Aus den gesammelten Erkenntnissen leitete Mecklenburg Klimavorgaben ab, die für alle Smithsonian Museen (Washington, USA) übernommen wurden (siehe auch 2.2.4).

Was bei keiner dieser Untersuchungen berücksichtigt wird, ist der Fakt, dass Materialien, die einem konstanten Wechsel des Raumklimas unterliegen anders reagieren, als dies bei der einmaligen Beanspruchung einer Messung

der physikalischen Eigenschaft der Fall ist. Auch die Einwirkzeit und Häufigkeit der Belastung wirken sich auf das Messergebnis aus.²⁵

Für realistische Aussagen hinsichtlich des Schadensrisikos aufgrund von klimatischen Schwankungen sind Untersuchungen an realen Objekten notwendig. Da diese reversibel sein müssen, scheiden mechanische Messungen oft aus. Untersuchungen vor Ort, also im historischen Umfeld, sind nicht immer einfach, da sich die Objekte häufig an schwer zugänglichen Orten befinden. Auch die Messinstrumente sind empfindlich z. B. gegenüber Schwingungen, so dass die Messungen ohne Besucher, also nach der Schließzeit durchgeführt werden müssen. Aufgrund von individuellen Messungen an einzelnen Objekten allgemeine Schlüsse zu ziehen, ist ebenfalls kritisch. Nach Berger können Ergebnisse aus Laborversuchen und einzelnen Messungen nicht auf Kunstwerkgruppen extrapoliert werden:

*"The behavior of composite materials cannot be extrapolated from the reactions of one of their components alone. Tests on isolated materials, such as glue, or paint, are useful in determining their stiffness, capacity and sensitivity to environmental conditions. However, due to the complexity and non-linearity of the behavior, any such model made by combining the results of tests on isolated materials would always have to be checked against the behavior of actual paintings."*²⁶

Die Forschergruppe um Roman Kozłowski kombinierte optische und akustische Untersuchungen an Tafelgemälden, Möbeln und gefassten Holzskulpturen mit mechanischen Messungen und Simulationen, um daraus ebenfalls Klimavorgaben abzuleiten.²⁷

Nach dem Ansatz von Mecklenburg (Abbildung 2.5) übersetzten sie die Beanspruchung, die ein Materialverbund durch mechanische Spannungs-Dehnungs-Prozesse erfährt, in Belastungen durch klimatische Schwankungen. Um die Rissbildung in der Grundierung zu beobachten, setzten sie frisch grundierte Hölzer (diffusionsoffen) von 10 mm Dicke mechanischen Belastungen in Form von Dehnung und Kompression aus. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass neue Objekte mindestens 36 500 Zyklen aushalten, bevor Risse im Gefüge entstehen.²⁸ Insbesondere das Trägermaterial Holz ist – abhängig von der Schichtstärke – Ausschlag gebend für große Bewegungen, die zur Rissbildung im Gefüge führen können. Aus den Untersuchungen und Simulationen von Bratasz et al. 2011 geht hervor, dass sich bei Holz mit einer Stärke über 10 mm klimatische Schwankungen (Zeitraum zwischen einem bis 14 Tagen) von $\pm 15\%$ nicht auswirken (Abbildung 2.7). Erstaunlicherweise ist die Reaktion eines 5 mm dicken Holzes, einseitig und beidseitig grundiert geringer als die des 10 mm starken Bretts.²⁹ Dies widerspricht auch den Erkenntnissen aus Bratasz 2005, wo am Altar in der Kirche Santa Maria Maddalena in Rocca Pietore (Italien), am Kopf der Madonna und am Finger des Christuskindes Messungen mit Laser-Wegsensoren durchgeführt wurden.³⁰ Am Finger waren aufgrund der geringen Dicke des Holzes höhere Bewegungen durch klimatische Schwankungen festzustellen als am Kopf. In Bratasz et al. 2011 werden die 10 mm als „worst case Szenario“ angenommen und daraus die Klimavorgabe abgeleitet, dass für Kunstwerke mit Holz als Trägermaterial eine Schwankung von $\pm 15\%$

25 Lipinski 2010, S. 27.

26 Berger et al. 2000, p. 280.

27 Jakiela et al. 2007; Jakiela et al. 2008; Bratasz et al. 2008; Bratasz et al. 2005.

28 Bratasz et al. 2011, p. 5.

29 „Therefore, the 5 mm panel free to exchange moisture through both faces can tolerate a slightly higher amplitude of $\pm 16\%$ RH at the duration of 14 days than that of $\pm 14\%$ RH determined for the 10 mm panel at the same duration. Consequently, the 10 mm panel with two faces permeable to the water vapour flux subjected to fluctuation cycles lasting 14 days represents the ‘absolute’ worst case of the study performed.“ Bratasz et al. 2011, p. 4.

30 Bratasz et al. 2005.

nicht schädlich sei. Hier wird jedoch lediglich das Risiko der Rissbildung betrachtet. Phänomene, wie die Craqueléebildung in Firnis oder Malschicht sind nicht berücksichtigt. Die Ausgangsfeuchte, die für die Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Schwankungen eine wichtige Rolle spielt (Jakiela et al. 2008, Abbildung 2.8), fließt in die Betrachtungen der Veröffentlichung von Bratasz et al. 2011 nicht ein.

Die Schichtstärke alleine ist jedoch kein Kriterium für den Transport von Wasserdampf. Wie schnell Feuchtigkeit ins Gefüge transportiert wird, ist abhängig vom Wasserdampfdiffusionswiderstand (vgl. thermische und hygrothermische Eigenschaften). Die Unterschiede, die sich etwa durch unterschiedliche Bindemittelsysteme in den Malschichten ergeben, werden hier nicht berücksichtigt.

Wie bei den Messungen von Mecklenburg erfolgten auch hier die mechanischen Messungen der grundierten Hölzer bei konstanter Temperatur und relativer Luftfeuchte.³¹ Die hygrothermischen Reaktionen bleiben unberücksichtigt. Die Methode, aus mechanischen Eigenschaften zulässige klimatische Schwankungen abzuleiten bedeutet eine zu starke Vereinfachung und ist mit einem hohen Fehler behaftet.

Bisher ebenso wenig berücksichtigt wurde die spezifische Restaurierungsgeschichte, die nahezu jedes

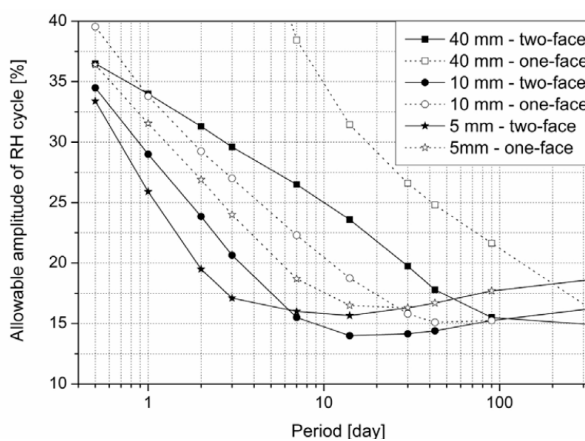


Abbildung 2.7: Reaktion von Holztafeln in verschiedenen Stärken, ein- oder beidseitig grundiert auf klimatische Schwankungen von unterschiedlicher Amplitude (Bratasz et al. 2011).

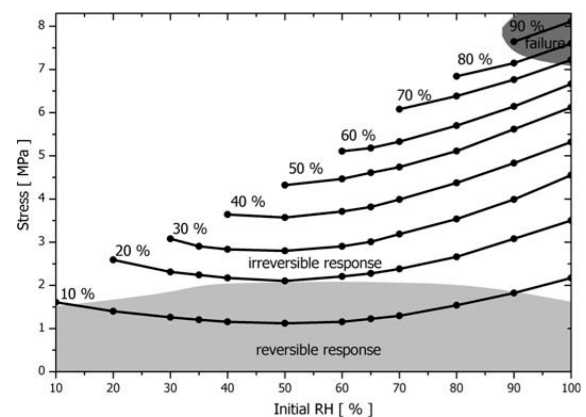


Abbildung 2.8: Abhängigkeit der Empfindlichkeit gegenüber Feuchteschwankungen von der Ausgangsfeuchte (Jakiela et al. 2008).

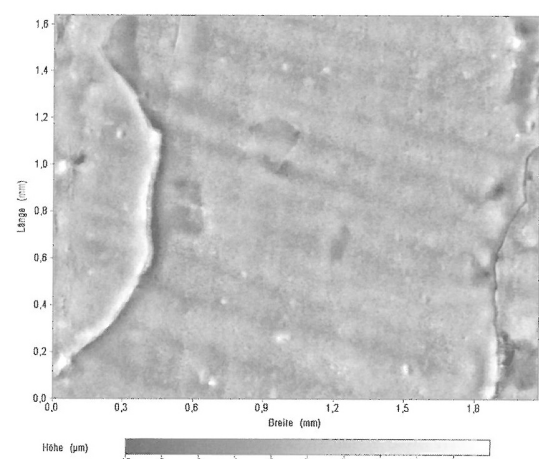
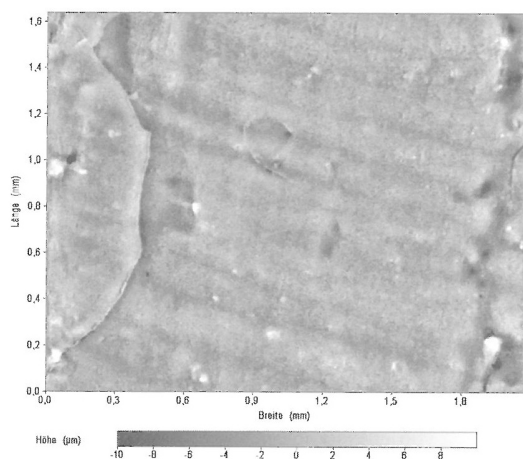


Abb. 151 Belassene, unbelagte Probe Abb. 152 Wie vorhergehende Probe, aber Schwammreinigung mit Natriumdodecylsulfat (SDS) in Methylcellulose mit Nachreinigung mit demineralisiertem Wasser. Im Gegensatz zu allen vorhergegangenen, auch nachgereinigten Proben wirkt diese Oberfläche am angegriffensten. Das Craquelée ist extrem stark geweitet.

Abbildung 2.9: Vergleich der Oberfläche eines Ölgemäldes vor und nach einer Tensidreinigung im Streifenlichtscan. Nach der Reinigung ist das Craquelée stärker geweitet als zuvor (Eipper et al. 2004).

31 Siehe auch Burmester et al. 2014a.

Kunstwerk aufweist. Wird ein Leinwandgemälde für die Festigung sehr stark befeuchtet, so ist es in diesem Moment extremen Schwankungen ausgesetzt (Abbildung 2.9).³² Dies kann sich auf das Erscheinungsbild wie auch auf das künftige Verhalten des Materialverbunds gegenüber klimatischen Schwankungen auswirken.

Michalski geht bei restaurierten Kunstwerken jedoch von einer Stunde Null aus, also dass alle bisherigen Einwirkungen aufgrund von klimatischen Schwankungen keinen Einfluss mehr haben.³³

Die Schwierigkeit besteht darin, die Vorgaben aus Labortests und Simulationen mit der Realität abzugleichen. Dies gelingt in der Praxis, indem der Zustand von Kunstwerken und das Raumklima über einen langen Zeitraum überwacht werden. Im Zuge der vermehrten Verwendung von Simulationen jeglicher Art und deren Interpretationen ist dies die einzige Möglichkeit, die aus den Modellen abgeleiteten Thesen zu überprüfen.

2.1.3 Allgemeine Klimaempfehlungen für Kunstwerke

Im Folgenden sind die in der Literatur empfohlenen Angaben für Temperatur und relative Luftfeuchte und deren Schwankungen zusammengefasst.

Temperatur

Die wichtigste Empfehlung ist, hohe Temperaturen über 25 °C zu vermeiden, da diese generell chemische Reaktionen beschleunigen (Arrhenius Gleichung, vgl. 2.3.3). Besonders temperaturempfindliche Materialien, wie Fotografien oder Filme in Depots werden deshalb nach aktuellen Empfehlungen bei 5-8 °C gelagert, Color-Filmmaterial und -Fotopapiere zwischen -18 und 8 °C.³⁴

Starke Abweichungen gibt es zwischen den Vorgaben für Museen und für Sammlungen in denkmalgeschützten Gebäuden. Während in Museen, die häufig mit Vollklimaanlagen ausgestattet sind, nach wie vor Temperaturvorgaben von ca. 20 °C angegeben werden, lassen Denkmalämter in Richtlinien für denkmalgeschützte Gebäude oder Museen ohne ausreichende technische Ausrüstung Temperaturen bis 5 °C im Winter und rund 25 °C im Sommer zu. Die Vorgabe in Museen ist eng mit der Behaglichkeit von Personal und Besuchern verknüpft. In der Vergangenheit wurden Werte von 16 °C als ausreichend angesehen.³⁵ Insbesondere Transport und Handling stellen während der kalten Jahreszeit ein Risiko dar:

„Bei Restaurierungen von Bildern aus Kirchen- und Schloßeinrichtungen, die im Winter ungeheizt sind, ist ferner die Wahl des Zeitpunkts für den Ab- und Rücktransport gut zu überlegen. Dabei ist für Räume in Altbauten mit ihren dicken Mauern stets ein erheblicher Verzögerungsfaktor wirksam, der gegenüber dem jahreszeitlichen Normalklima eintritt. Aus diesem Grund halten z. B. die Amtswerkstätten in Wien zwischen November und April eine grundsätzliche Transport- und Übernahmepause von Objekten dieser Herkunft ein, damit ein Klimaschock mit seinen möglichen Auswirkungen vermieden werden kann.“³⁶

Die Grenze für zu niedrige Temperaturen ist wiederum materialabhängig. Kunstharzhaltige Bindemittel werden aufgrund ihrer spezifischen Glasübergangstemperatur bei niedrigen Temperaturen spröde.³⁷ Daher wird

32 Nicolaus 2008.

33 Michalski 2007, p. 15.

34 Fachinstitut für Gebäude-Klima e.V. 2000, S. 10.

35 „As to the temperature, visitors in most countries of northern Europe are satisfied with 16 °C and will even accept lower temperatures since coats are usually kept on in art galleries.“ ICOM International Council of Museums 1997, p. 59.

36 Koller 1978, S. 211.

37 Horie 1987, p. 17 ff.

für diese Materialgruppe eine Temperatur über 5 °C empfohlen.³⁸ Dies gilt es auch bei der Verwendung von kunstharzhaltigen Bindemitteln in der Restaurierung zu beachten.³⁹ In Skokloster wurde nachgewiesen, dass Ölgemälde bei geringen Temperaturen verspröden.⁴⁰ Eigene Untersuchungen am Königshaus am Schachen, in dem im Winter im Innenraum Temperaturen von -10 °C häufig auftreten, zeigen keinerlei solcher Schäden (Abbildung 4.20).⁴¹ Diese Gemälde sind jedoch im Winter keinen mechanischen Belastungen durch Handling ausgesetzt, da das Königshaus im Winter geschlossen ist. Außerdem sind sie an Innenwänden montiert. Insgesamt ist die Temperatur für organische Materialien als weniger schädlich einzuschätzen als die relative Luftfeuchte.

Der von Michalski beschriebene lifetime multiplier wird derzeit als eine der Funktionen für Schadensprognosen anhand von Klimadaten verwendet. Er ist definiert als die Anzahl an Zeitspannen, die ein Objekt länger erhalten geblieben wäre, wenn es nicht bei 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte gelagert worden wäre. Demnach würde bei den meisten Objekten, die derzeit bei 20 °C gelagert sind, eine um 5 °C reduzierte Temperatur deren Lebenszeit verdoppeln.⁴²

Relative Luftfeuchte

Maßnahmen zur Verhinderung von Schäden aufgrund von zu hoher relativer Luftfeuchte sind historisch belegt. Künstler geben Anweisungen zur Montage und langfristigen schadensfreien Lagerung ihrer Kunstwerke wie am Beispiel eines Leinwandgemäldes, das für einen Altar gefertigt wurde, beschrieben wird:

„Für den Neubau der Schwechater Kirche schickt er [Johann Martin Schmidt (1718–1801)] die drei fertigen Bilder bereits im November 1764 an den Bestimmungsort, wo sie auf ihren Spannrahmen an trockener Stelle bis zum Einbau in die Marmoraltäre im Juli 1766 bleiben sollten. Die leeren Altäre wurden im Abstand von eineinhalb Fuß zur Bildrückseite mit Nadelholzbrettern verschalt. Zur ständigen Ventilation war auch eine Distanz zwischen Bild und Außenrahmen einzuhalten und wurden im Hochaltarscheitel drei Lüftungslöcher angebracht.“⁴³

Mit Zunahme der Heiztätigkeit sind vermehrte Schäden belegt, die auf eine daraus resultierende zu geringe relative Luftfeuchte zurückzuführen sind. Für die meisten organischen Materialien gibt es also einen Korridor, etwa zwischen 40 und 55 % relativer Luftfeuchte, in dem diese keinen Schaden nehmen.⁴⁴ Das bedeutet im Umkehrschluss, dass ein Bereich existiert, in dem es zu trocken bzw. zu feucht für Kunstwerke ist. Abhängig vom Material kann dies unterschiedliche Prozesse hervorrufen.⁴⁵ Unterhalb von 35 % relativer Luftfeuchte besteht das Risiko der Trocknung und Materialversprödung von cellulose- und proteinhaltigen Materialien, wie z. B. Glutinleim.⁴⁶ Objekte wie Knochen oder Zähne können ebenfalls brüchig werden. Die starke Desorption kann bei hölzernen Verbindungen durch Stauchung der Zellwände Verwerfungen und Rissbildung

38 Mecklenburg 2010 b, p. 51 f.

39 Siehe auch Kölsch 1987.

40 Freundliche Mitteilung von Charlotta Bylund Melin, siehe auch Mecklenburg 2005.

41 Holl 2008.

42 Michalski 2002.

43 Koller 1995, S. 36.

44 Erhardt et al. 1994.

45 Die Vorgaben, die hier für die relative Luftfeuchte gemacht werden, sind an das europäische Klima angepasst. An Orten mit extremerem Klima müssen die Vorgaben für die relative Luftfeuchte angepasst werden. Siehe Thomson 1994, S. 87 ff.

46 Erhardt et al. 1994, p. 34.

hervorrufen.⁴⁷ In porösen Stoffen können Salze auskristallisieren.⁴⁸

Liegt die relative Luftfeuchte über einen längeren Zeitraum über 70 %, besteht allgemein ein hohes Risiko für mikrobiologischen Befall.⁴⁹ Zu den ersten historischen Beschreibungen zur Auswirkung von ungünstigem Klima gehört die Beobachtung von Schimmelbildung.

„Der Schimmel wird oft wenig beachtet, und eben deshalb wird er späterhin so verderblich in seinen Folgen. Derselbe bildet sich, wenn Gemälde an einem feuchten dumpfen Orte hängen. Er macht die Farben mürbe, so daß sie sich von Grunde lösen und abfallen; er bewirkt auch, daß die Leinwand verstockt und dem Holze den Keim zur Fäulniß. Der Schimmel entsteht auch bei Gemälden, die im Winter oder bei anhaltend feuchter Witterung mit neuer Leinwand unterzogen sind. Er zeigt sich weißlich, und hauptsächlich an solchen Stellen, wo früher Risse waren.“⁵⁰

Bei hoher relativer Luftfeuchte bzw. bei Feuchtedifferenzen wie sie sich z. B. bei Gemälden, die an Außenwänden hängen, ausbilden können, verstärken sich die Diffusionsströme. Hygroskopische Materialien quellen, Glutinleim verliert beispielsweise bei einer relativen Luftfeuchte über 80 % seine Klebekraft. Außerdem erhöht sich die Wahrscheinlichkeit der hydrolytischen Spaltung bei Cellulosen.⁵¹ Nicht nur hygroskopische Materialien sind betroffen: Metalle können bereits ab einer relativen Feuchte von 40 % korrodieren. Abbildung 2.10 zeigt, dass auch das Verblässen von Farbmitteln nicht alleine durch Licht beschleunigt wird, sondern insbesondere bei hoher relativer Luftfeuchte zunimmt.⁵²

Besonders starke Schäden entstehen, sobald es am Kunstwerk zur Kondensation kommt.⁵³ Ein typischer Schaden an Gemälden ist das Krepieren des Firnisses durch die Anlagerung von Wassermolekülen, was zu einem trüb werden des Überzugs führt (vgl. Abbildung 4.14).

Stolow listet als erster in einer Tabelle die Konsequenzen für diverse Materialgruppen bei ungünstigen klimatischen Bedingungen auf.⁵⁴ Danach folgen zahlreiche Auflistungen von Klimavorgaben für Materialgruppen, die Holmberg in einer ausführlichen Literaturstudie zusammenfasst.⁵⁵ Die aktuellste Angabe stammt von Michalski 2011, der alle Formen von Schädigungen aufgrund von ungünstigen klimatischen Bedingungen auflistet, Materialien in Empfindlichkeitsstufen gruppiert und Zeitangaben bis zur Veränderung macht.⁵⁶

47 Vgl. Hoadley 1998.

48 Stolow 1987, p. 15.

49 Das Risiko der Schimmelbildung auf Kunstwerken ist abhängig von Temperatur, Luftfeuchtigkeit, Substratqualität und Koinzidenzdauer, Sedlbauer 2001.

50 Welsch 1834, S. 25.

51 Erhardt et al. 1994, p. 155.

52 Michalski 1993, p. 626. Siehe auch Thomson 1994, p. 85.

53 Staniforth 2007.

54 Stolow 1987, S. 15 f. Dieser zitiert Dudley, D.H. et al.: *Museum Registration Methods*, 1979, pp. 73–87 und Leisher, W.: *„Humidity – Temperature Requirements for Museum Collections“*, A.A.M Energy Workshop Resource Booklet, American Association of Museums, Washington D.C., 1977, pp. 1–5. Bezüglich Schäden an Metallen verweist er auf Plenderleith et al. 1971, pp. 246–255.

55 Holmberg 2001.

56 Michalski 2011, p. 4 ff.

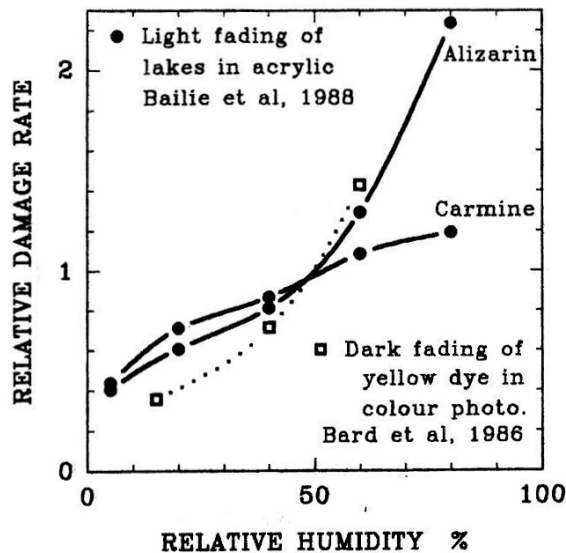


Abbildung 2.10: Darstellung der Lichtschädigung in Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte (Michalski 1993).

Temperatur- und Feuchteschwankungen

*"It may be observed that a picture, as a whole, is always sensitive to hygrometric variations."*⁵⁷

Es sind vor allem die Extreme, die für Kunstwerke schlecht verträglich sind, egal ob Temperatur oder relative Luftfeuchte. Die ständigen Quell- und Schrumpfprozesse hygroskopischer Materialien erzeugen Spannungen im Materialverbund und schädigen diesen langfristig. Um den Feuchtigkeitsgehalt möglichst im Gleichgewicht zu halten, ist konsequenterweise jegliche Schwankung von Temperatur und relativer Luftfeuchte auszuschließen. Dies ist heute technisch möglich – die Frage ist nur, mit welchem Aufwand und zu welchem Preis. In Depots, die selten betreten werden, ist ein stabiles Raumklima schon bautechnisch relativ leicht zu erreichen, da dort beispielsweise keine Fenster eingebaut werden müssen und auch die Luftwechselrate geringer sein darf. Für Kunstwerke im Museum oder in originaler Umgebung stellt das Raumklima immer eine Konfliktsituation zwischen Kulturgut und Besucher dar. Insbesondere Behaglichkeitsargumente wie höhere Temperaturen und ausreichende Frischluftzufuhr erfordern hohen technischen und damit ökologischen und ökonomischen Aufwand, um das Klima konstant zu halten.

Es besteht derzeit keine Einigkeit darüber, welche Schwankungen von relativer Luftfeuchte und Temperatur ein Kunstwerk erfahren kann, ohne Schaden zu nehmen. Argumente liegen für beide Standpunkte vor, also dass sowohl kurzfristige wie auch langfristige Schwankungen Einfluss auf Kunstwerke haben (vgl. 2.1.4). Insbesondere Vorgaben, wie Kirchen im Winter beheizt werden sollen, klaffen kontrovers auseinander. Befürworter des langsamen Erwärmens mit ca. 1 K pro Stunde argumentieren, dass die kurzfristige Schwankungsamplitude dadurch gering gehalten wird.⁵⁸ Künzel vertritt jedoch den Ansatz, dass ein zügiges Aufheizen weniger schädlich für die Ausstattung ist, da diese träge und zeitverzögert reagiert und sich somit eine kurzfristige Temperaturänderung nicht auswirkt (vgl. Kapitel 8).⁵⁹ Unabhängig davon wie geheizt wird, führt der Wechsel von Aufwärm- und Abkühlphasen immer zu Schwankungen der Temperatur und damit der relativen Luftfeuchte. Daher ist von Nachtabsenkungen abzuraten.

Bei klimatischen Vorgaben handelt es sich immer um Idealbedingungen, die bestenfalls im klimatisierten Mu-

⁵⁷ ICOM International Council of Museums 1997, p. 71.

⁵⁸ Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2002.

⁵⁹ Künzel 2000.

seum erfüllt werden können. Sind Kunstwerke in Kirchen, Schlössern oder anderen historischen Gebäuden ohne oder mit geringer unterstützender Klimatechnik untergebracht, sind höhere klimatische Schwankungen kaum zu vermeiden. Allerdings wirken sich diese nicht in jedem Fall negativ auf die darin befindlichen Kunstwerke aus. Beispielsweise ist die Ausstattung im Türkischen Saal im Königshaus am Schachen, die zum größten Teil aus gefassten und vergoldeten Holzoberflächen sowie Textilien besteht stabil, obwohl das Gebäude in den Alpen alljährlich der rauen Witterung ausgesetzt ist (Kapitel 4.2).⁶⁰ Einige Autoren⁶¹ beschreiben den Einsatz von Heizsystemen als den Grund allen Übels. Klimatisch bedingte Schäden sind jedoch gerade auch in unbeheizten Gebäude anzutreffen, so dass dies teilweise der Grund für den Einsatz von Heizsystemen wie z. B. des „conservation heating“ oder der Temperierung ist (vgl. Kapitel 4.4).⁶²

Hinzu kommt, dass Kunstobjekte bereits eine lange (Klima)Geschichte aufweisen. Ist ein Objekt über Jahrzehnte in einem historischen Gebäude untergebracht, wird es eine andere Gleichgewichtsfeuchte aufweisen als ein Objekt in einer Galerie. Dies fand in der Vergangenheit – aber auch heute noch – insbesondere bei Wechsellausstellungen wenig Berücksichtigung und führte zu Schäden.⁶³ Eindringliche Beschreibungen über klimatisch bedingte Schäden an Holzskulpturen aufgrund einer zu geringen Beachtung der klimatischen Verhältnisse bei Wechsellausstellungen liefert Koller:

„Thomas Schwanthalers herrliche Scholastikfiguren vom St. Wolfgang Doppelaltar, 1675, „ziert“ seit ihrer Rückkehr im Jahre 1950 von der Linzer Ausstellung – über 1000 Jahre kirchliche Kunst – durch das ganze Gesicht ein klaffender Holzschwundriß infolge eines Klimaschocks.“⁶⁴

Bei der Ausstellung von Kunstwerken ist also auch die individuelle Klimageschichte zu betrachten.⁶⁵ Bereits erfahrene Schwankungen und möglichenfalls entstandene Schäden, wie Fugenöffnungen oder Rissbildung im Holz, führen zu einer größeren Toleranz gegenüber Schwankungen, da der aufgetretene Riss den Materialverbund entspannt, so Michalski.⁶⁶

Die Reaktion, die im Kunstwerk Schäden hervorruft ist, abhängig von der Dehnungsgrenze, also dem Übergang zwischen plastischer und elastischer Dehnung (Abbildung 2.3). Je nach Material und klimatischer Situation können Reaktionen sehr schnell ablaufen. So können beispielsweise die Malschicht oder der Firnis eines Gemäldes bei raschem Wechsel der klimatischen Bedingungen in kurzer Zeit krepieren (vgl. Kapitel 3.1). Bei der Übergabe eines restaurierten Leinwandgemäldes aus dem 18. Jahrhundert an seinen Eigentümer, also vom Atelier an den ursprünglichen Platz in einem Schloss in Niederösterreich passierte folgendes:

„Binnen weniger Stunden war fast die ganze Bildfläche wie von weißlichen Kristallen überzogen und die Malerei unkenntlich. Die Klimaspannungen hatten vom Firnis bis zur rückseitigen Doubliermasse unzählige Haarrisse erzeugt, die sich durch vorsichtige Abreibung mit Terpentinöl zum größten Teil rasch wieder verschwinden ließen. Die Rekonstruktion des Klimaweges ergab die beachtliche Differenz von etwa 20 °C bei 50 % rel. Luftfeuchte in Restaurierungsatelier bzw. Eigentümerwohnung zu 5 °C bei 80 % rel. Luftfeuchte im ungeheizten Schloss.“⁶⁷

60 Weniger robuste Materialien, wie beispielsweise Grafiken weisen Veränderungen wie Stockflecken oder mikrobiologischen Befall auf, Holl 2008.

61 U. a. Martens 2012; Huber 2012.

62 Künzel et al. 1991.

63 Vgl. Koller 1981, Schulze 2012.

64 Koller 1981, S. 112.

65 Schulze 2012.

66 Michalski 2007.

67 Koller 1978, S. 212.

Andere Reaktionen treten erst über einen längeren Zeitraum auf, etwa beim Transport von Kunstwerken.⁶⁸ Michalski vertritt die These, dass insbesondere Kunstwerke mit großem Volumen träge reagieren und hier langfristige Schwankungen stärkeren Einfluss haben.⁶⁹ Materialien unterliegen dem ständigen Spannungs-Dehnungsprozess da sie sich, ob durch Spannrahmen oder unflexiblen Bildträger, nur geringfügig bewegen können. Die Alterung bewirkt, dass Materialien an Flexibilität verlieren und langfristig den Elastizitätspunkt überschreiten.⁷⁰ Aber auch die maltechnische Qualität spielt eine große Rolle hinsichtlich der Erhaltung. Besonders im 19. Jahrhundert gefertigte Kunst ist, so Althöfer, insgesamt schlecht erhalten. Zum einen seien es Experimente mit Materialien wie Asphalt, die zu vermehrten Schäden führen, zum anderen nehme die Empfindlichkeit der Bildoberfläche zu: Die Adhäsion der Schichten sei verringert und Farbschichten blättern ab.⁷¹ Auch die Kunst des 20. Jahrhunderts stuft er als sehr empfindlich ein. Das heißt also, dass es bei der Beurteilung des Schädigungspotentials von klimatischen Schwankungen entscheidend darauf ankommt, welches Kunstwerk betrachtet wird und in welchem Zustand es sich befindet. Daher müssen klimatische Schwankungen, egal ob kurz- oder langfristig, immer in Bezug zum Objekt (Gattung, Dimension, Alter, Erhaltung) und dessen maltechnischer und klimatischer Vorgeschichte, dem Aufstellungsort (Außenwand) und der regionalen Umgebung gesetzt werden. Trotzdem gibt es allgemeine Empfehlungen, die klimatisch bedingte Schäden eindämmen können.

Allgemeine klimatische Empfehlungen

Das Raumklima ist komplexen physikalischen Zusammenhängen unterworfen. Es gibt im Raum nie ein einzig vorliegendes Klima. Dies gilt es für alle Betrachtungen das Raumklima betreffend zu berücksichtigen. Costain unterscheidet zwischen Empfehlungen zur Lagerung im Museum, im Depot und während des Transports.⁷² Im Depot gilt beispielsweise, dass Regale an Außenwänden mit ausreichendem Abstand gestellt werden sollen. Weitere Empfehlungen zur Lagerung und Pflege von Objekten, nach Materialien unterschieden, gibt Dudley.⁷³

Mit der „Kalten-Wand“-Problematik hat sich u. a. Ranacher ausgiebig beschäftigt. Sie empfiehlt bei der Hängung von Leinwandgemälden an Außenwänden einen Abstand von mindestens 10 cm bei kleinen Formaten und 15 cm bei großen Formaten einzuhalten.⁷⁴ Petzold beschreibt die Abhängigkeit des Formats des Kunstwerks auf den Abstand zur Wand genauer und hat zur Bestimmung des schadfreien Abstands zur Wand eine Formel entwickelt.⁷⁵

Zudem gilt: Je geringer der Luftwechsel umso geringer sind auch die klimatischen Schwankungen im Raum.⁷⁶

68 Bauer-Bolton 1933, S. 30.

69 Michalski 2007.

70 Vgl. Bauer-Bolton 1933, S. 102.

71 Althöfer 1987.

72 Costain 1994.

73 Dudley 1979.

74 Ranacher 1995.

75 Petzold 1980, siehe auch: Leimer et al. 2002.

76 Kilian 2013, S. 159 f; Luciani et al. 2013.

2.1.4 20 °C | 50 % RF | 100 lux – sind „historische“ Klimavorgaben noch heute gültig? Der aktuelle Forschungsstand

Seit mehr als 50 Jahren ist die Diskussion um die schädigende Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke ein Dauerbrenner. In regelmäßigen Abständen finden internationale Tagungen⁷⁷ wie auch COST-meetings⁷⁸ zu Klimavorgaben, Schadfunktionen und daran gekoppelte Forschungsthemen statt. Dies geschieht zum einen, um den aktuellen Stand der Wissenschaft aufzuzeigen, zum anderen, um neue Herangehensweisen – insbesondere den Einsatz von Messequipment und Software zur Simulation von mechanischen Prozessen von Kulturgut zu demonstrieren und Forschungsdefizite zu identifizieren. Gerade in den letzten Jahren erfährt die Diskussion um Klimavorgaben aufgrund von ökologischen, ökonomischen und politischen Entscheidungen eine erneute Intensität und war Thema von mehreren europäischen Projekten.⁷⁹ Warum überhaupt Klimavorgaben? Grundlegend war die Suche nach der Kenntnis, welches Klima für die langfristige Erhaltung unseres Kulturguts sicher ist. Historisch überliefert sind Beschreibungen von Schäden, wie Lockerungen und Substanzverluste an Gemälden, die aufgrund von ungünstigen klimatischen Verhältnissen entstanden sind.

„Aus diesen Thatsachen muss man die Lehre ziehen, dass, wenn sich die hygroskopische Eigenschaft der Gemälde auch nie ganz unterdrücken lässt, so doch in jeder Gallerie die Temperaturverhältnisse so zu regulieren sind, dass es nie zur Thaubildung oder feuchten Niederschlägen kommt. Diese sind auch die wesentliche Ursache, warum Oelgemälde in Kirchen meist so schlecht conservieren, in denen sich sowohl die Wasserausdünstungen der andächtigen Menge während des Winters, als auch im Frühlinge das Wasser der warmen Märzluft an den noch kalten Wänden und Altären niederschlägt, dass sie oft förmlich schwitzen.“⁸⁰

Die Untersuchung des historischen Klimas in der Alten Pinakothek München von Eibl 2011 hat ergeben, dass die Kunstwerke bei der Eröffnung 1836 beachtlichen Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte ausgesetzt waren. In der ersten Bauphase mit Luftheizsystem lag die jährliche Schwankung bei ca. 40 % relative Luftfeuchte und ca. 9 K. Die täglichen Schwankungen waren im Winter unter 10 % rF und ca. 5 K, im Sommer bei ca. 5 % rF und 1 K.⁸¹

Der Wunsch nach Empfehlungen für ein allgemein gültiges unschädliches Klima lag auf der Hand.

1933 betont Ahrens, dass das lokale Klima einen bedeutenden Einfluss auf die Kunstwerke hat und dieses berücksichtigt werden sollte.⁸² Bis zur Auslagerung von Kunstwerken im 2. Weltkrieg in Bergstollen mit konstantem Klima (17 °C, 58 % rF) überwog die Vorstellung, dass vor allem die Temperaturschwankungen Schäden hervorrufen.⁸³ Die Erfahrung aus der Kriegszeit, dass bei konstanter relativer Luftfeuchte nur geringe Schäden auftreten, änderte diese Ansicht, so dass sich in den Museen die Priorität auf die relative Luftfeuchte verlagerte. Den aktuellsten Überblick über historische Sollwertvorgaben und deren Entwicklung für Museen geben Eibl, Luciani, Atkinson und Bickersteth.⁸⁴

77 Ashok et al. 1994; Padfield et al. 2007; Ashley-Smith et al. 2012.

78 COST (European Cooperation in Science and Technology) organisierte u. a. das Projekt IE0601 "Wood Science for Conservation of Cultural Heritage", http://www.cost.eu/domains_actions/mpns/Actions/IE0601, Stand 30. Oktober 2015.

79 Noah's Ark (2004 – 2007), <http://cordis.europa.eu/documents/documentlibrary/124722791EN6.pdf>, Stand 26. September 2015. Climate for Culture (2009 – 2014), <http://www.climateforculture.eu>, Stand 26. September 2015.

80 Pettenkofer 1870, S. 42.

81 Eibl et al. 2012, p. 229.

82 Ahrens 1933, S. 5 ff.

83 Wolters 1975, S. 25.

84 Eibl 2011; Luciani 2013; Atkinson 2014; Bickersteth 2014.

Um den Wunsch, Vorgaben in Zahlen zu fassen, greifbar zu machen, wurden von Thomson 1986 für ein Museum der Klasse 1 folgende Zahlen vorgegeben: 20 (°C), 50 (% rF) und 100 (lux). Für Museen der Klasse 2 liegt der Klimakorridor zwischen 40 und 70 % rF.⁸⁵ Seitdem sind diese Zahlen „in Stein gemeißelt“ und gelten für jede Region auf der Welt. Sie basieren auf empirischen Erfahrungen und weniger auf tatsächlich gemessenen Werten.

Kurzzeitige Schwankungen verursachen im Materialverbund von Kunstwerken mechanische Spannungen, die zu Schäden am Objekt führen können. Daher herrschte allseits Einigkeit darüber, dass Kunstwerke am längsten erhalten bleiben, je stabiler das Klima ist. Mit zunehmender Technisierung konnte ein immer stabileres Raumklima generiert werden, so dass heute selbst bei hohem Besucheraufkommen annähernd konstante Temperaturen und relative Luftfeuchten möglich sind. Daraus entstanden weitere Klimavorgaben mit sehr engen Klimakorridoren, jedoch ohne exakte Definition einer kurzzeitigen oder langfristigen Schwankung (vgl. 2.3.1).

Burmester listete 2000 die vorliegenden Aussagen zur Klimakontrolle nach Prioritäten geordnet auf: Für Objekte in Museen ist die Vermeidung von Schwankungen der relative Luftfeuchte unter 2,5 % pro Stunde am wichtigsten. Danach folgen Tages-, Wochen- und saisonale Schwankungen der relativen Luftfeuchte (< 5 %, materialabhängig \pm 5 % rF) sowie Schwankungen der Temperatur von 1 K pro Stunde und ein saisonales Gleiten.⁸⁶

Auch heute noch werden die Klimavorgaben zum Teil strikt auf Gebäude angewendet, egal, welcher energetische Aufwand dafür notwendig ist und nicht bedenkend, dass die Bausubstanz dadurch eventuell geschädigt werden kann. Dies hat bis heute fatale Folgen sowohl für Bauwerk als auch die darin gelagerten Kunstwerke.⁸⁷ Zum einen benötigen die technischen Anlagen regelmäßige Wartungen, ohne die Schäden durch Ausfälle vorprogrammiert sind, zum anderen kann die strikte Einhaltung der Vorgaben für die relative Luftfeuchte speziell im Winter zu Taupunktunterschreitung an den Außenwänden führen und starke Bauschäden verursachen. Dies wurde bereits vor mehr als 30 Jahren angeprangert.⁸⁸

Heute, im Zuge der Nachhaltigkeitsforderung nach Einsparung von Energie müssen sich auch Museen immer mehr der Frage stellen, ob ihr energetisches Konzept für die kommenden Jahrzehnte noch tragbar ist und welche Konsequenzen daraus entstehen.

Historische Bauten wie Kirchen oder Schlösser, die wertvolle historische Ausstattung beherbergen, sind häufig nicht klimatisiert. Für die Beurteilung der dortigen klimatischen Verhältnisse wird meist die Unterteilung von Michalski für ASHRAE (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning) verwendet. Dort wird das Raumklima in unterschiedliche Kategorien von hervorragend bis ausreichend (AA bis D) unterteilt und dafür konservatorisch vertretbare Klimakorridore definiert. Zusätzlich gibt Michalski für die jeweiligen Kategorien Risikoprognosen für unterschiedliche Materialgruppen an.⁸⁹

Die Frage, welche klimatischen Schwankungen ein Kunstwerk aushalten kann, ohne Schaden zu nehmen, besteht allerdings weiterhin. Um das fehlende Wissen zu füllen, starteten Ingenieure physikalische Materialversuche – meist an neu gefertigten Dummie-Kunstwerken oder detaillierte Messungen an einzelnen Objekten (z. B. akustische Emission) – und koppelten diese mit Simulationsprogrammen, um Schäden berechenbar

⁸⁵ Thomson 1986.

⁸⁶ Burmester 2000.

⁸⁷ Koller 1994.

⁸⁸ Wolters 1975; Koller 1981.

⁸⁹ ASHRAE 2007.

zu machen.⁹⁰ Als Ergebnis stellten Mecklenburg, Michalski und Bratasz fest, dass erst Schwankungen, die über einen längeren Zeitraum wirken, Schadenspotential haben.⁹¹ Daraus entstanden neue Klimaempfehlungen⁹², die von der Bizot-Gruppe (Vereinigung der Direktoren der größten Museen) aufgegriffen wurden und die Basis für die Aufweitung der Klimavorgaben in Museen für alle Kunstgattungen (40–60 % rF, 16–25 °C; zulässige Schwankungen sollen ± 10 % in 24 h nicht überschreiten) bildeten.⁹³

Martens entwickelte aus den Forschungsergebnissen Algorithmen, die ermöglichten, anhand von Klimadaten Prognosen über das Risiko von Kunstwerken zu treffen (2.3.3).⁹⁴ Diese können zwar Tendenzen aufzeigen, sind jedoch derzeit noch nicht ausgereift genug, um reale restauratorische Untersuchungen am Objekt zu ersetzen (vgl. Kapitel 4).

Die Diskussion um die „richtigen“ Klimawerte (Bizot-Gruppe) unterliegt mitunter politischen Entscheidungen. Jeberien, Boersma, Atkinson und Bickersteth geben dazu die aktuellsten Zusammenfassungen.⁹⁵ Da diese Arbeit versucht, eine Datengrundlage zu schaffen, bleiben politische Aspekte ausgeklammert.

2.2 Klimatisch bedingte Schäden / Veränderungen im Materialverbund

„... zwei bestimmte Gruppen von Bilderschäden, von denen die eine mit den Firnisüberzügen, die andere hauptsächlich mit den Untergründen der Gemälde in Zusammenhang steht. Wenn es gelänge, diese beiden häufigsten und gefährlichsten Ursachen für den Verfall der Gemälde zu beseitigen, so würde damit der weitaus wichtigste Teil der Arbeit durchgeführt sein.“⁹⁶

Firniskrepiierungen und Lockerungen der Farbfassung bzw. der Malschichten sind laut Bauer-Bolton die häufigsten Schäden an Gemälden. Diese sind eindeutig auf klimatische Schwankungen zurückzuführen. Bauer-Bolton beobachtete 1933, dass Ölgemälde im Alter von 50 bis 100 Jahren erstmals Craquelée ausbildeten. Letzteres ist als beginnender Schadensprozess an Kunstwerken zu betrachten.

„Die Krakelüren entstehen im Laufe eines längeren Zeitabschnittes. Es sind insoweit typische Alterserscheinungen, als ihre Charakteristika bei neuen Malereien nicht willkürlich erzeugt werden können. So willkommen der diagnostische Wert der Krakelüren auch sein mag, sie bedeuten tatsächlich eine schwere Gefährdung, die beginnende Zerstörung des Bildes. Handelt es sich doch um nichts anderes als die Zertrümmerung der Bildschicht in unzählige kleine und aller kleinste Bruchstücke. Zwar haften die einzelnen Stücke vorläufig noch am Untergrunde. Es ist aber nur eine Frage der Zeit, daß auch dieser Zusammenhang sich lockert und die einzelnen Stückchen eben allmählich abzufallen beginnen.“⁹⁷

Die Kombination mehrerer Einflüsse wie Licht, Schadstoffe oder klimatische Schwankungen kann die Ausbildung von Schäden hervorrufen. Wie in 2.1.3 erläutert, fördert hohe relative Luftfeuchte, dass Farbmittel ver-

90 Bratasz et al. 2011; Bratasz 2013; Mecklenburg 2007.

91 Bratasz 2010; Mecklenburg et al. 1998; Michalski 2007; Michalski 2010.

92 Erhardt et al. 2007, p. 15; Bratasz et al. 2011, p. 4.

93 2014 erkannte ICOM die „interim guidelines“ der Bizot-Gruppe als offizielle Richtlinie an, ICOM 2014, www.icom-cc.org/332/-icom-cc-documents/declaration-on-environmental-guidelines/#.V6L0TEZ8PK0, Stand 4.8.2016.

94 Martens 2012.

95 Jeberien 2014; Boersma et al. 2014; Atkinson 2014; Bickersteth 2014.

96 Bauer-Bolton 1933, S. 100.

97 Ebd., S. 101.

blassen (Abbildung 2.10). Diese Reaktion wird oft lediglich starkem Tages- oder UV-Lichteintrag zugeschrieben. Wandert Sonnenlicht über ein Kunstwerk, erhöht sich dort die Oberflächentemperatur bei gleichzeitiger Verringerung der relativen Luftfeuchte. Dadurch können lokal vermehrte Schäden auftreten (vgl. Abbildung 4.16 und 4.36).

Neben der Schwierigkeit festzustellen was genau den Schaden verursachte, stellt sich die Frage, was als Schaden zu definieren ist. Berger und Russel bezeichnen ihn als irreversible, negative Auswirkung eines vorübergehenden, auf ein Kunstwerk einwirkendes Ereignisses.⁹⁸ Der Britische Standard BSI definiert Schaden als quantitativen Ausdruck der Ursache-Wirkungs-Gleichung zwischen Faktoren aus der Umgebung und der daraus resultierenden Materialveränderung.⁹⁹ Beide Definitionen heben die physikalisch messbare Komponente hervor, vernachlässigen jedoch Folgen, die weniger greifbar zu beschreiben sind.¹⁰⁰ Die optischen Veränderungen, denen Objekte aufgrund ihrer Alterung über einen langen Zeitraum unterliegen, können auch zu einem ästhetischen Gewinn führen (Alterswert).¹⁰¹ Mit der Definition der Erhaltung eines Kunstwerks beschäftigte sich u.a. Buck eingehend.¹⁰²

Ashley-Smith stellt einen klimatisch bedingten Schaden als zweistufigen Prozess dar. Zunächst muss eine irreversible chemische oder physikalische Veränderung am Objekt vorliegen, die anschließend erst von Fachspezialisten als Veränderung oder Schaden bewertet wird.¹⁰³

Klimatische Schwankungen können unterschiedliche Schäden hervorrufen. Im EU-Projekt „Climate for Culture“ wurde ein Katalog erarbeitet, in dem nach Materialgruppen unterteilt Schadenstypen beschrieben sind. Die unterschiedliche Ausprägung von Schäden wird mit Beispielaufnahmen verdeutlicht.¹⁰⁴ Die in dieser Arbeit bei den vier Fallstudien vorgefundenen klimatisch bedingten Schäden sind exemplarisch für Leinwandgemälde und gefasste bzw. vergoldete Holzoberflächen dargelegt (Kapitel 4).

Die Schadensdefinition erläutert, welche Schäden wir vermeiden wollen, aber nicht, wie sie genau entstehen. Dazu ist es notwendig sich mit dem Raumklima zu befassen. Dieses wird seit Jahrzehnten standardmäßig aufgezeichnet. Was die Auswertung der Klimadaten betrifft, gibt es jedoch keine einheitliche Vorgehensweise.

98 Berger et al. 1994.

99 PAS 198:2012 – Specifications for Managing Environmental Conditions for Cultural Heritage, British Standards Institute, London 2012.

100 Ashley-Smith 2014, p. 8

101 Bacher 1995.

102 Buck 1971, pp. 63–67.

103 Ashley-Smith 2014, p. 8.

104 Weiß et al. 2014.

2.3 Messung und Auswertung des Raumklimas

2.3.1 Messung als Ausgangspunkt für Klimadatenanalyse

Um über die klimatischen Verhältnisse, denen ein Kunstwerk ausgesetzt ist Angaben machen zu können, sind Messungen des Raumklimas notwendig. Hierbei sind mehrere Faktoren relevant, damit die spätere Datenauswertung zu einem aussagekräftigen Ergebnis führt. Zunächst muss formuliert werden, was anhand der erhobenen Daten ermittelt werden soll, beispielsweise die allgemeine Analyse des Raumklimas oder das Mikroklima am Kunstwerk selbst. Danach richtet sich die Positionierung der Messtechnik.

Es ist sinnvoll, über einen längeren Zeitraum, mindestens aber einen Jahreszyklus zu messen.

DIN EN ISO 15927-5 empfiehlt, die Messung über 13 Monate laufen zu lassen, um das gleitende Monatsmittel ermitteln zu können.¹⁰⁵ Je nach Fragestellung wird die Taktung festgelegt. So ist für die Untersuchung von kurzfristigen klimatischen Ereignissen ein kürzeres Intervall (z. B. minütlich) einzustellen, für einen generellen Überblick über die klimatische Situation eines Raumes sind längere Abstände (10 – 15-minütig) zwischen den einzelnen Messungen möglich. Die Zeiträume der Messwerterfassung sollten jedoch unter einer Stunde liegen.¹⁰⁶

2.3.2 Definitionen

Die in der Literatur übliche Unterteilung von Schwankungen richtet sich nach den gemessenen Werten. Die zeitliche Einteilung erfolgt in Stunden, Tage, Wochen, Monate, saisonal und jährlich. In vielen Klimavorgaben für Kunstwerke findet sich außerdem die Angabe, Kurzzeitschwankungen zu vermeiden. Doch was ist eine Kurzzeitschwankung und wo ist die Grenze zur langfristigen Schwankung?

Nach DIN EN ISO 15757 ist eine kurzfristige klimatische Schwankung definiert als die Differenz der momentanen relativen Luftfeuchte vom 30-tägigen, gleitenden Mittelwert.¹⁰⁷ Auf kürzere Intervalle, wie stündliche, tägliche oder wöchentliche Schwankungen wird hier nicht eingegangen. Weiter beziehen sich die so definierten Zeiträume nicht auf das Kunstwerk selbst, da je nach Materialverbund unterschiedliche Entspannungszeiten vorliegen. Hier wären verschiedene Zeiträume anzugeben. Michalski berücksichtigt die Individualität des Objektes, stellt sie jedoch stark vereinfacht dar. Nach seiner Definition rufen jene Schwankungen die größte Spannung hervor, die länger andauern als die Reaktionszeit, jedoch kürzer als die Entspannungszeit des Objektes.¹⁰⁸ Er stellt die Auswirkung von unterschiedlichen klimatischen Schwankungen schematisch dar (Abbildung 2.11). Die Kunstwerke werden nach ihrem Volumen in „dünn“ („thin“) und „dick“ („thick“) unterteilt. „Dünne“ Objekte haben eine schnelle, „dicke“ eine langsame Reaktionszeit. Der kritischste Schwankungszeitraum für „dünne“ Objekte liegt zwischen mehreren Stunden und wenigen Tagen (rote Linie). „Dicke“ Objekte mit diffusionshemmendem Überzug reagieren insgesamt kaum auf klimatische Schwankungen (blaue Linie). Das Maximum der Kurve liegt hier im Zeitraum von Monaten. Die hellblaue Markierung zeigt den typischen Zeitraum in dem sich Objekte von einer Stresssituation, die durch eine klimatische Schwan-

¹⁰⁵ Das gleitende Mittel verringert die in der Datenmenge vorhandene Variation. DIN EN ISO 15757:2010 – Conservation of Cultural Property – Specifications for Temperature and Relative Humidity to Limit Climate-induced Mechanical Damage in Organic Hygroscopic Materials, European Committee for Standardization (CEN), Brüssel 2010.

¹⁰⁶ Im Rahmen des EU-Projektes „Climate for Culture“ wurde ein Leitfaden zur Klimadatenerhebung verfasst. Dieser basiert auf einem Kurs zu „Microclimate Monitoring“, der von Dario Camuffo, Chiara Bertolin, Claudio Cocheo und Vito Fericola vom 18. – 22. Oktober 2010 in Padua abgehalten wurde. www.climateforculture.eu, Stand 26. September 2015.

¹⁰⁷ DIN EN ISO 15757:2010, S. 12.

¹⁰⁸ „The most stressful fluctuations are longer than the response time, but shorter than the stress relaxation time.“, Michalski 1993, p. 626.

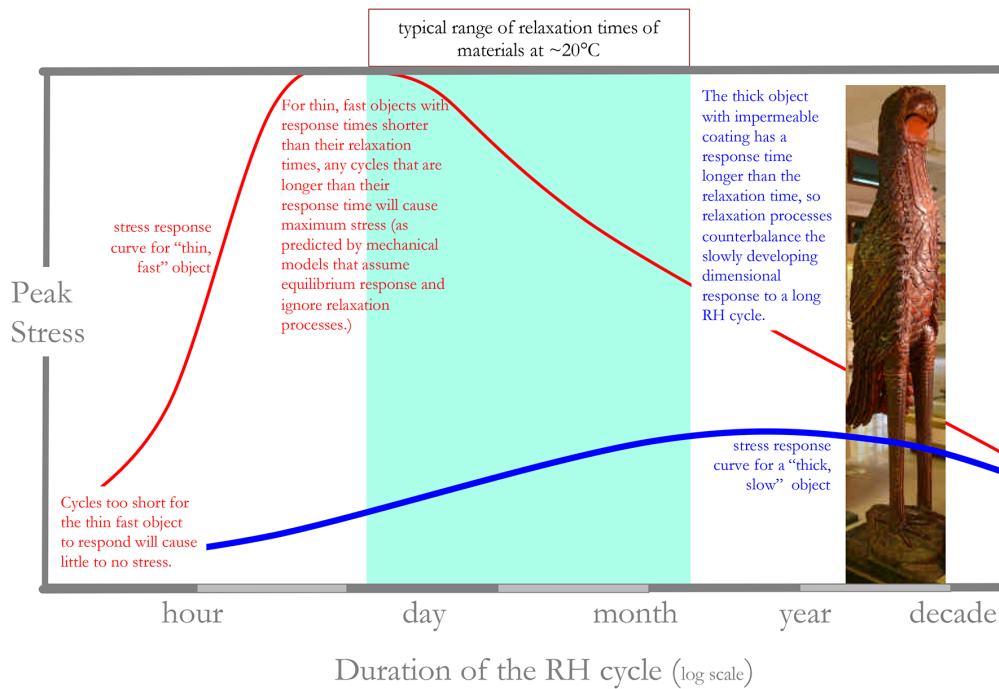


Abbildung 2.11: Darstellung der Auswirkung von kurz- und langfristigen Schwankungen auf Kulturgut (Michalski 2010).

kung ausgelöst wurde, wieder entspannen. Dieser liegt bei „dünnen“ Objekten zwischen Tagen und Wochen. Es stellt sich die Frage, ob sich nach diesem Ansatz bei einem „dünnen“ Kunstwerk, das einem täglich schwankendem Raumklima unterliegt, noch eine Entspannung einstellen kann.

Häufig wird bei Klimavorgaben der zulässige Korridor mit einer Zahl und deren Abweichung nach oben und unten angegeben. So bedeutet beispielsweise die Vorgabe von $50 \pm 5\%$, dass sich die relative Luftfeuchte zwischen 45 und 55 % bewegen darf, also eine maximale Schankung von insgesamt 10 % möglich ist. Dies wird jedoch unterschiedlich interpretiert. Burmester führte 2013 dazu im Rahmen der Klimadebatte eine Diskussion mit Ashely-Smith.¹⁰⁹

2.3.3 Aus- und Bewertung von Klimadaten

Die statistische Auswertung (Maximum, Minimum, Mittelwert, Median P25, P75, P99) der Messdaten gibt einen ersten Überblick über die Verteilung der Daten (vgl. Kapitel 4). Unterschiedliche grafische Darstellungsformen, etwa Linien- oder Streudiagramme erleichtern die Beurteilung der Daten hinsichtlich kritischer Bereiche. So kann eine hinterlegte Maske im Streudiagramm das Risiko von mikrobiologischem Befall schnell grafisch verdeutlichen (vgl. Abbildung 4.3, Kapitel 4). Pretzel wendet bei seiner Klimadatenanalyse zum Vergleich unterschiedlicher Räume miteinander eine farbige Kodierung der Datendichte an, um daraus thermodynamische Effekte schnell sichtbar zu machen.¹¹⁰ Anhand dieser Auswertungen kann jedoch über kurzfristige, stündliche, tägliche oder wöchentliche Schwankungen noch keine Aussage getroffen werden. Gerade empfindliche Objekte reagieren sehr schnell auf kurzfristige Änderungen des Klimas, so dass es sinnvoll ist, diese Schwankungsbreiten zu ermitteln. Auch hier gibt es unterschiedliche Methoden. Bei der Auswertung der täglichen Schwankungen wird üblicherweise von Änderungen innerhalb von 24 h ausgegangen. Je nach Wetterlage kann es jedoch vorkommen, dass die höchsten Schwankungen nicht zwischen 00:00 und 23:59

¹⁰⁹ Burmester et al. 2013.

¹¹⁰ Pretzel 2011, p. 5.

auftreten, sondern zwischen 12:00 und 11:59. Bichlmair et al. beschreiben eine Methode, die den gleitenden Schwankungszyklus auswertet.¹¹¹ Auf diese Weise werden höhere, tatsächlich existierende Schwankungen sichtbar gemacht.

Die übliche Herangehensweise, einen Tageszyklus zu betrachten, ist mit unserer Zeitmessung zu begründen. Bei der Analyse über einen längeren Zeitraum ist jedoch zu erkennen, dass einige Schwankungszyklen 24 Stunden überdauern und mehrere Tage auf Objekte wirken können. Dies hat Einfluss auf Kunstwerke, die etwas träger, dafür mit größerer Bewegung reagieren, wie etwa Holzobjekte.

Schadfunktionen – damage functions

Die objektbezogene Klimadatenauswertung wird durch die Anwendung von Schadfunktionen (damage functions) ermöglicht. Als Beispiel einer fundierten Funktion sei hier die Arrhenius Gleichung genannt, welche die quantitative Abhängigkeit der Reaktionsgeschwindigkeit von der Temperatur beschreibt. Für die Vorhersage von biologischem Befall gibt Sedlbauer ein Modell vor.¹¹² Therme von Mecklenburg, Bratasz, Kozlowski und Jakiela hingegen beschreiben die Reaktion von polychrom gefassten Holzobjekten auf klimatische Schwankungen, basierend auf mechanischen Messungen.¹¹³ Eine allgemeine Beschreibung von Schadfunktionen für Kulturerbe geben Strlic et al.¹¹⁴ Ashley-Smith fasste den Stand des Wissens zu Schadfunktionen im Rahmen des EU-Projektes „*Climate for Culture*“ zusammen.¹¹⁵

Martens entwickelte, basierend auf den wichtigsten Schadfunktionen für chemische, biologische und mechanische Prozesse an Kunstwerken eine Software.¹¹⁶ Diese ermöglicht eigene Klimadaten (365 Tage Messdaten erforderlich) hinsichtlich des Schadensrisikos für vier Objektklassen – Papier, Tafelmalerei, Möbel und Skulpturen – auszuwerten.¹¹⁷ Anhand des Isoplethenmodells von Sedlbauer werden die Klimadaten hinsichtlich des Risikos für mikrobiologischen Befall analysiert. Der lifetime multiplier wird für die Vorhersage von chemischen Schäden eingesetzt. Für die Bewertung des Klimas hinsichtlich mechanischer Schädigung erfolgt ein zweistufiger Prozess. Zunächst wird die relative Luftfeuchte analysiert. Ist die Differenz zwischen dem Jahresmittelwert und dem Minimum oder dem Maximum kleiner oder gleich 15 %, liegt kein Risiko vor. Ist sie größer, werden die Klimadaten über die Schadfunktion von Bratasz (vgl. Abbildung 2. 7) nach Amplitude und periodischer Veränderung ausgewertet. Ist diese außerhalb der Rahmenbedingungen des „worst case scenarios“ von Gesso auf 10 mm dickem Holz, wird eine Schadensprognose ausgegeben (vgl. 2.1.3).¹¹⁸

Um die Ergebnisse der Prognose zu prüfen, wird das Raumklima der vier Fallbeispiele nach Martens analysiert und mit den Ergebnissen aus den Zustandsuntersuchungen verglichen (Kapitel 4).

111 Bichlmair et al. 2012.

112 Sedlbauer 2001.

113 Jakiela et al. 2008; Bratasz et al. 2008; Mecklenburg et al. 1996; Mecklenburg et al. 1991b.

114 Strlic et al. 2013.

115 Ashley-Smith 2014, www.climateforculture.eu, Stand 26. September 2015.

116 Martens 2012.

117 Datenbank der TU Eindhoven mit Auswertetools für Klimadaten unter <http://www.monumenten.bwk.tue.nl/CfC/default.aspx>, Stand 26. September 2015.

118 Martens 2011, p.17.

Michalskis „Proofed Fluctuation Concept“

1993 formulierte Michalski erstmals sein „Proofed Fluctuation Concept“. Es besagt, dass eine klimatische Schwankung von gleichem oder geringerem Umfang, wie jene, die ein Kunstwerk bereits erfahren hat, ohne Schaden zu nehmen, keine weiteren mechanischen Schäden bewirkt, vorausgesetzt, dass es nicht chemisch gealtert oder konserviert wurde.¹¹⁹ 2007 führte er seine These fort: Lange Zyklen der relativen Luftfeuchte bedeuten eine geringere, kürzere dagegen eine höhere Belastung für Kunstwerke. Sehr kurze Schwankungen sind zu kurz, um eine Reaktion im Objekt hervor zu rufen.¹²⁰ Eine genauere Angabe von sehr kurz, kurz und lange steht jedoch noch aus (vgl. Abbildung 2.11).

Die Aussage von ICOM 1997, dass wiederholte Schwankungen die Elastizität von Materialien herabsetzen, widerlegt seine These teilweise.¹²¹ Daraufhin erweiterte Michalski 2010 sein Konzept, indem er hinzufügt, dass Materialermüdung zu Schäden führen kann. Außerdem können sich kurzzeitige Schwankungen, die mikroskopische Veränderungen hervorrufen, akkumulieren und daraus sichtbare Schäden, wie z. B. ein Riss entstehen.¹²² 2014 veröffentlichte Michalski einen weiteren Artikel, in dem er noch einmal ausführlicher auf die „proofed fluctuation“-Theorie eingeht. Darin weist er erstmals darauf hin, dass Alterung und konservatorische Eingriffe seine These aufheben würden.¹²³ Abschließend empfiehlt er pragmatisch für die langfristige Erhaltung von Kunst- und Kulturgut, dass die klimatischen Bedingungen mindestens so wie in der Vergangenheit sein sollten, idealerweise etwas besser.

In dieser Arbeit wurde Michalskis anfängliche These untersucht und teilweise widerlegt (vgl. Kapitel 3 und 7).

119 *“Future fluctuations equal to, or smaller than, the proofed fluctuation will not cause further mechanical damage. (Assuming the objects have not significantly aged chemically, or been damaged, or consolidated.)”* Michalski 2010, Folie 6, basierend auf Michalski 1993, pp. 624–629.

120 Michalski 2007, p. 11.

121 *“All hygroscopic matter has a degree of elasticity enabling it, within limits, to follow the movements of expansion and contraction caused by variations in the hygrometric ratio (water-vapour content of the air measured against temperature). But it has been proved that these fluctuations, when repeated, appreciably decrease the coefficient of elasticity of the matter in question, even when they constitute only a small fraction of the strain the object can normally stand.”* ICOM International Council of Museums 1997, p. 57.

122 Michalski 2010.

123 *„aging and conservation treatment both nullify the rule“*, Michalski 2014a, p. 3.

3 Untersuchung der Auswirkung von Kurzzeitschwankungen auf Kunstwerke unter Laborbedingungen

Zahlreiche Autoren¹²⁴ stellen kurzfristige Schwankungen als nicht schädigend dar. Sie belegen dies anhand von Untersuchungen und Simulationen an Kunstwerken mit Holz als Trägermaterial. Aus Abbildung 2.7 geht hervor, dass sich letzteres – abhängig von der Stärke des Trägermaterials – auch bei hohen kurzfristigen Schwankungen nur gering verformt. Zu wenig berücksichtigt wird hier jedoch die Auswirkung auf die Malschicht, die bei klimatischen Schwankungen unmittelbar reagieren kann.

Abbildung 3.1 zeigt Aufnahmen eines Leinwandgemäldes mit dem Streifenlichtscanner bei unterschiedlichem Klima. Das Gemälde war zuerst einer relativen Luftfeuchte von 59,4 % (Bild links) ausgesetzt, anschließend verblieb es eine Stunde lang bei 98 % rF (Bild Mitte), so dass eine insgesamt Feuchteschwankung von 38 % vorlag. Das rechte Bild stellt im Falschfarbenmodus die Bewegungsänderung des Gemäldes durch die Feuchteänderung dar. Es verwölbt sich innerhalb der einen Stunde insgesamt um bis zu 3 mm. Dies veranschaulicht, dass sich kurzfristige Schwankungen – abhängig vom Materialverbund – auf Kunstwerke auswirken und auch optisch nachweisbar sind.

Die Diversität der hygrothermischen Eigenschaften von Malschichten, die das mechanische Verhalten eines Objektes in erheblichem Maße bestimmen, sind bisher wenig betrachtet worden. Die Auswirkung von kurzzeitigen Schwankungen auf Kunstwerke mit unterschiedlichen hygrothermischen Materialeigenschaften wurde mit Hilfe von Klimakammerversuchen untersucht. Der Vorteil der Laborumgebung ist, dass zusätzliche Einflussfaktoren wie Licht und Schadstoffe, die in normaler Umgebung unvermeidbar sind, entfallen.

Zunächst wurden Dummies und gealterte Kunstwerke (Leinwandgemälde, gefasste und vergoldete Holzoberflächen) klimatischen Schwankungen ausgesetzt und vor und nach dem Versuch mikroskopisch auf Veränderungen bzw. Schäden hin untersucht.

Optische Veränderungen, wie Verwölbungen, Lockerungen oder Substanzverluste in einzelnen Schichten oder auch in Kombination sind jedoch erst die Konsequenz aus der Bewegung, die durch Quellen und Schwinden hervorgerufen wird. Dieser Prozess ist durch die Gewichtsänderung des Kunstwerks gut nachvollziehbar. Da hygroskopische Materialien bei Änderung des Klimas unmittelbar Feuchte aufnehmen oder abgeben, ist die Untersuchung der Gewichtsänderung als Frühindikator für mögliche Schäden eine sensible Methode.

124 Bratasz 2010; Mecklenburg et al. 1998; Michalski 2007; Michalski 2010.

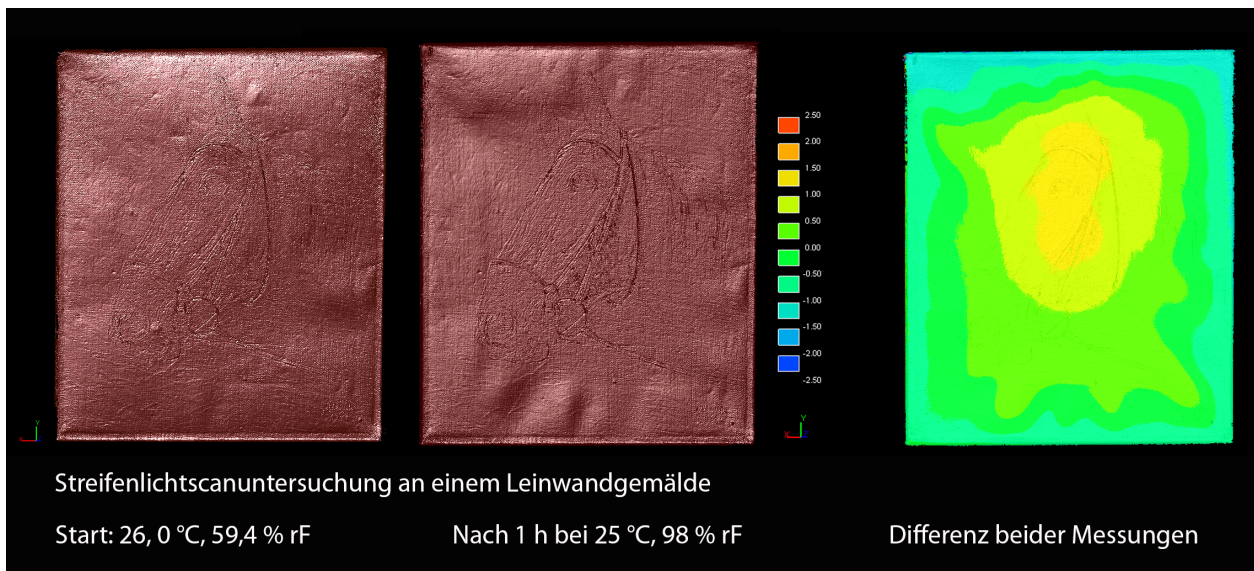


Abbildung 3.1:

Vergleichende Untersuchung mit Hilfe eines Streifenlichtscanners an einem Leinwandgemälde im Format 20 x 30 cm, das unterschiedlichen Klimata (links: 59,4 %; Mitte: 98 % rF) ausgesetzt ist. Die einstündige Änderung der relativen Luftfeuchte bewirkt eine Verformung von insgesamt 3 mm (rechts).

3.1 Mikroskopische Untersuchung von klimatisch bedingten Veränderungen an Kunstwerken

Schaible stellte 1989 in seinem Film „Vom Atmen der Bilder“ die Reaktion von Kunstwerken auf klimatische Schwankungen eindrucksvoll dar.¹²⁵ Es fehlen jedoch Angaben zu Amplitude und Frequenz der Feuchte-schwankungen. Zudem wurden die Reaktionen durch einen Zeitraffer dramatisiert. Es stellt sich daher die Frage, inwieweit es möglich ist, klimatisch bedingte Schäden an Kunstwerken in Echtzeit nachzuvollziehen. Mit Hilfe der optischen Vergrößerung werden Veränderungen an Kunstwerken, wie Mikrorisse sichtbar, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind. Für die Untersuchung von klimatischen Schwankungen an Kunstwerken im Labor ist daher der Einsatz der Mikroskopie unerlässlich.

3.1.1 Beschreibung der mikroskopischen Untersuchung

Für die mikroskopische Untersuchung wurden ausgewählte Dummies und vorgealterte Kunstwerke mehrtägigen klimatischen Schwankungszyklen ausgesetzt. Davor erfolgte eine Untersuchung mit Hilfe eines Stereomikroskopes im Hell- und Dunkelfeld. Markante Stellen, wie Sprünge in Firnis oder Malschicht, an denen Veränderungen eindeutig dokumentiert werden können, wurden festgelegt. Anhand einer durchsichtigen Folie mit aufgezeichnetem Raster, die auf das Probestück gelegt wurde, konnten die ausgewählten Referenzpunkte markiert und nach den Klimakammertests wieder gefunden werden (Anhang B).

Die Schwankungszyklen wurden so gewählt, dass sie einerseits realistisch sind, gleichzeitig die Wahrscheinlichkeit der optischen Veränderung hoch ist. Hierfür wurde ein Wechsel der relativen Luftfeuchte von insgesamt 40 % (von 40 auf 80 %), in sechsstündigem Zyklus, bei konstanter Temperatur von 24 °C gewählt (Abbildung 3.2).

Eine 40-prozentige Schwankung innerhalb eines Tages stellt ein seltenes Ereignis dar, bei dem mit hoher Wahrscheinlichkeit mit Schäden zu rechnen ist. Die Frequenz wurde so gewählt, dass das Kunstwerk ausreichend Zeit hat, auf Änderungen des Raumklimas zu reagieren. Gleichzeitig sollten über den Versuchszeitraum

¹²⁵ Schaible, Volker: „Vom Atmen der Bilder“, Bern 1989, online verfügbar unter: <http://www.restauratoren.de/ausbildung/studiumforschung/aktuelles.html>, Stand 26. September 2015.

so viele Schwankungen wie möglich erzeugt werden, um eine Reaktion zu forcieren. Basierend auf dem typischen Tagesgang eines öffentlich genutzten historischen Bauwerks wurde ein Schwankungszyklus von sechs Stunden angenommen.

Die Erfahrung mit unbeheizten Gebäuden im süddeutschen Raum zeigt, dass Schwankungen zwischen 40 und 80 % relativer Luftfeuchte häufiger vorkommen, als zwischen 30 und 70 % rF. Daher wurde in den Versuchen anstelle von 50 % als Mittelpunkt zwischen 0 und 100 %, die mittlere relative Luftfeuchte von 60 % als Ausgangspunkt gewählt. Durchgeführt wurden insgesamt drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher Dauer: 70, 140 und 378 Stunden (Protokoll im Anhang B).

3.1.2 Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung

Generell ist es möglich, durch Schwankungen der relativen Luftfeuchte zwischen 40 und 80 % im Wechsel von sechs Stunden Veränderungen der Materialien im Kunstwerk zu produzieren. An einem fünf Jahre alten Dummy aus Holz mit Farbfassung und Kunstharzfirnis hat sich während der Klimakammerzyklen über 140 Stunden im Firnis Craquelée gebildet. In Abbildung 3.3 sind die Gesamtansicht des Dummies mit mar-

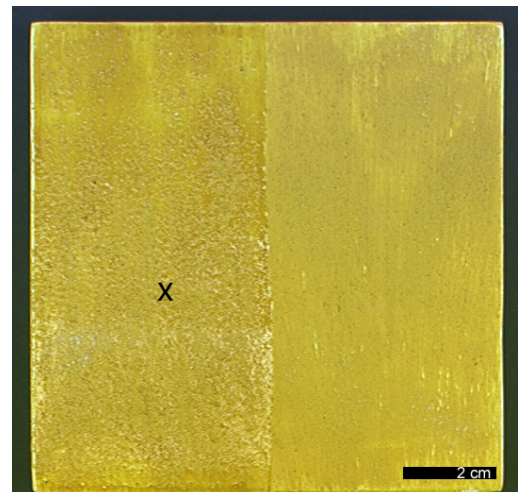
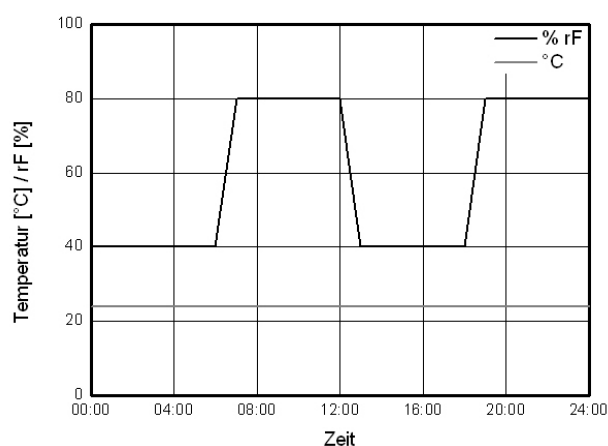


Abbildung 3.2:
Vorgabe für den Klimaschrank: Feuchtesprung von 40 auf 80 % rF in sechsstündigem Wechsel, bei 20 °C.

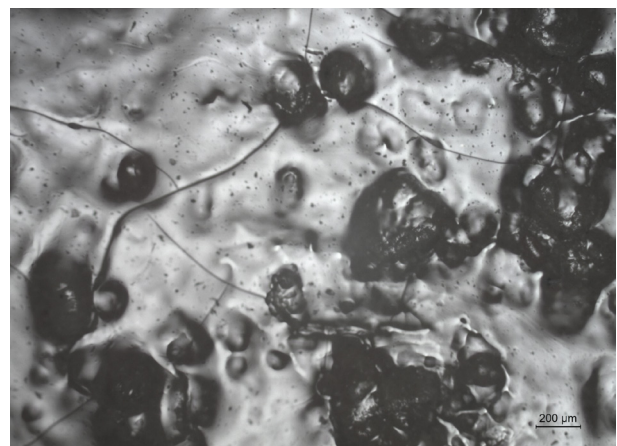
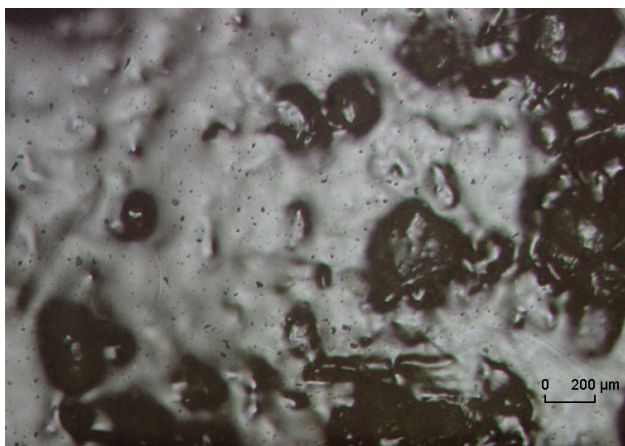


Abbildung 3.3:
Oben rechts: Dummy aus Holz mit Farbfassung, zur Hälfte gefirnist im Vorzustand. Das schwarze Kreuz markiert die Position B4 der Mikroskopaufnahmen.
Unten links: B4: Vorzustand im Hellfeld. Unten rechts: B4: Nach Versuch 2, (140 h) selber Ausschnitt im Hellfeld, Craqueléebildung im Firnis.

kierter Position B4 der Mikroskopieaufnahmen, sowie die Aufnahmen im Hellfeld im Vorzustand und nach Versuch 2, bei der die optische Veränderung auftrat, abgebildet.

Die vorgealterte Materialprobe „Malerei auf Pappe“ wies im Vorzustand einen kleinen Ausbruch in der braunen Farbfassung auf, die Malschicht um die Fehlstelle war intakt. Nach dem ersten Schwankungszyklus über 63 Stunden war keine Veränderung festzustellen, nach dem zweiten mit weiteren 140 Stunden war die Fassung am Ausbruch gelockert. Während der fotografischen Dokumentation brach diese Scholle ab. Nach dem dritten Versuch mit 400 Stunden vergrößerte sich die Fehlstelle noch (Anhang B).

3.1.3 Diskussion der Ergebnisse aus der mikroskopischen Untersuchung

Luxford führte im Projekt „Change or damage“ ähnliche Versuche an furniertem Holz im Klimaschrank durch, allerdings mit höheren Amplituden von 20 % auf 80 % relative Luftfeuchte in einstündigem Wechsel.¹²⁶ Sie stellte erst nach einigen Schwankungszyklen Schäden, wie das Ablösen des Furniers vom Trägermaterial fest. Es bestätigt sich, dass auch empfindliche Kunstwerke ungünstige klimatische Bedingungen eine gewisse Zeit lang überstehen können, ohne Schaden zu nehmen. Die Wiederholung derselben Schwankung führt jedoch dazu, dass die maximale Elastizität überschritten ist und Schäden entstehen. Dies widerspricht der ursprünglichen „proofed fluctuation“-Theorie nach Michalski. Demnach wäre ein Kunstwerk, das einmal hohen klimatischen Schwankungen ausgesetzt war in einem ähnlichem Klima resistent gegenüber neuen Schäden (vgl. Kapitel 2.3.3).¹²⁷

Im gealterten Probestück „Malerei auf Pappe“ beschränken sich die Ausbrüche auf die braune Malschicht im unteren Viertel des Portraits (Anhang B). Es könnte der variierende Bindemittelanteil sein, der eine stärkere Reaktion auf klimatische Schwankungen auslöst, aber auch der Bildträger, der im unteren Drittel stärker verwölbt ist. Gleichzeitig spielt es sicherlich eine Rolle, dass sich dort bereits zuvor eine Fehlstelle gebildet hatte. Diese bedeutet eine zusätzliche Inhomogenität in der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe und führt zu weiteren Spannungen im Materialverbund.

An zahlreichen Dummies, insbesondere bei neu angefertigten Aufstrichen, war über den Versuchszeitraum keine Änderung feststellbar. Umso mehr ist die Methode anzuzweifeln, Schadensmechanismen anhand von Versuchen an einzelnen Objekten oder ungealterten Dummies herzuleiten. Durch die mikroskopische Untersuchung vor und nach dem Klimaschrankversuch ist es weiter nicht möglich, auf die Schwankung zu schließen, die tatsächlich den Schaden bewirkt hat. Die ausschließliche optische Methode ist also nicht ausreichend, um allgemeine Rückschlüsse auf die schädigende Wirkung von bestimmten Feuchtschwankungen zu ziehen. Diese hängt wiederum stark von den Eigenschaften des jeweiligen Materialverbunds ab. Daher wurde – angelehnt an Holmberg 2001 – in einer weiteren Versuchsreihe die Gewichtsänderung von Kunstwerken mit unterschiedlicher Materialcharakteristik bei klimatischen Schwankungen getestet.

126 Luxford et al. 2012.

127 Michalski 2010.

3.2 Untersuchung der Gewichtsänderung von Kunstwerken bei klimatischen Schwankungen

Die alleinige, von der Temperatur entkoppelte Auswirkung der relativen Luftfeuchte auf Kunstwerke stand bei den Tests im Vordergrund. Folgende Fragen wurden untersucht:

- Haben Schwankungen der relativen Luftfeuchte von $\pm 5\%$ in kurzzeitigen Abständen eine messbare Auswirkung auf Kunstwerke?
- In welcher zeitlichen Abhängigkeit steht die Gleichgewichtsfeuchte?
- Sind feuchtetechnische Effekte wie Hysterese messbar?
- Inwieweit unterscheidet sich das Verhalten des Kunstwerks bei Schwankungen der relativen Luftfeuchte mit unterschiedlicher Amplitude und Frequenz?
- Welche Reaktion des Kunstwerks stammt alleine von der Vorderseite?
- Wie sind Gewichtsänderungen hinsichtlich des Schädigungspotentials zu bewerten?

3.2.1 Materialauswahl

Die Fähigkeit eines Materials, Feuchtigkeit aufzunehmen und abzugeben hängt von seiner Sorptionsfähigkeit ab (Kapitel 2.1.2). Daher wird für die Charakterisierung von Materialien deren Sorptionsisotherme nach DIN EN ISO 12571 bestimmt. Die Adsorptions- bzw. Desorptionskurve eines Materials ist allerdings wenig aufschlussreich, was die Reaktionsgeschwindigkeit eines Materials betrifft. Die Bestimmung erfolgt bei konstanter Temperatur, die relative Luftfeuchte wird stufenweise variiert und das Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte abgewartet. Wieviel Zeit das Material dafür benötigt, ist hier nicht relevant.

Die Reaktionsgeschwindigkeit von Kunstwerken ist abhängig von den individuellen Materialeigenschaften, wie Diffusion, Sorption oder Schichtdicke. Ein Ansatz zur Abschätzung des Schadensrisikos für Kunstwerke bei der Reaktion auf Schwankungen der relativen Luftfeuchte ist die Untersuchung des Sorptionsverhaltens in Abhängigkeit von der Zeit.

Diverse Materialien, die in historischen Ausstattungen verwendet wurden, wie Furnier, Bernstein, Perlmutter, Schildpatt etc., wurden hinsichtlich ihrer Gewichtsänderung bei Schwankungen der relativen Luftfeuchte untersucht. Durch den Wechsel der Materialien von einer Klimakammer in eine andere wurden Feuchtesprünge von 50 % auf 65 % sowie von 50 % auf 80 % relative Luftfeuchte erzeugt. Dieser Versuch veranschaulichte, wie unterschiedlich sich Materialien bei klimatischen Veränderungen verhalten. Im Gegensatz zu Perlmutter, das keine Gewichtsänderung zeigt, reagierte Pergament besonders stark auf die Feuchteschwankungen.

Neben den Gewichtsänderungen war hier auch eine deutliche Verformung erkennbar.¹²⁸ Für die weiteren Versuche wurde Pergament als stark hygroskopische Referenz aufgenommen.¹²⁹

Basierend auf den ersten Versuchen wurden für die Untersuchungen zur Gewichtsänderung in der Klimakammer verschiedene Einzelmaterialien und Materialkombinationen ausgewählt. Es kamen überwiegend eigens hergestellte Dummies zum Einsatz. Zum Vergleich wurden neben Pergament zwei vorgealterte Materialproben – „Malerei auf Pappe“ und „Malerei auf MDF-Platte“ mit erfasst.

¹²⁸ Vgl. Stalow 1987, p. 13.

¹²⁹ Die Sensibilität von Pergament gegenüber klimatischen Schwankungen wurde im EU-Projekt IDAP (Improved Damage Assessment of Parchment) untersucht, Larsen 2005. Eine weitere, sehr empfindliche Gattung ist die Malerei auf „Spinnweben“, vgl. Wiesend 2013, S. 12.

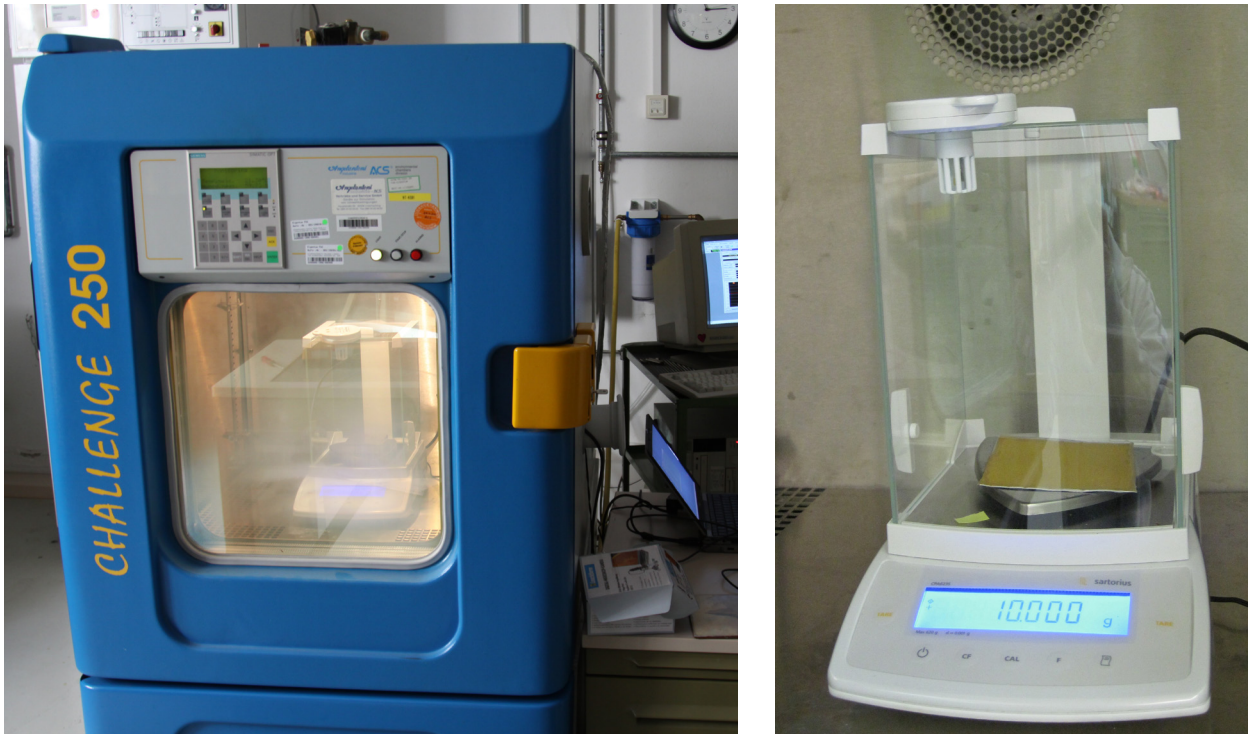


Abbildung 3.4:
Links: Versuchsaufbau mit Klimaschrank, PC und Software, rechts: Waage mit Dummy und Datenlogger.

Die Proben sind entsprechend ihrer Materialeigenschaften in folgende Kategorien eingeteilt: Stark hygroskopisch, diffusionsoffen und diffusionshemmend (Tabelle 3.1).

Tabelle 3.1:

Zuordnung der Materialien bzw. Materialverbünde für die Wägeversuche nach ihren hygroskopischen Eigenschaften.

Kategorie	Stark hygroskopisch	Diffusionsoffen	Diffusionshemmend
Material bzw. Material- verbund	Pergament	Leinwand (pur)	Holztafel grundiert
	Leinwand mit monochromer Malerei aus Ocker in Ei	Leinwand mit monochromer Malerei aus Ocker in Leinöl	Holztafel polimentvergoldet
		„Malerei auf Papper“	

3.2.2 Beschreibung des Versuchs

Die Versuche mit gesteuerter Feuchteschwankung wurden in einem Klimaschrank¹³⁰ durchgeführt, dessen Ansteuerung mit Hilfe der Software Winkratos® erfolgte. Eine Waage¹³¹ im Klimaschrank erfasste in minutlichen Abständen das Gewicht der jeweiligen Materialprobe (Abbildung 3.4). Damit war zum einen der zeitliche Abstand kurz genug, um Reaktionen auf klimatische Änderungen erfassen zu können, zum anderen schwankte das Gewicht der Probe wegen des Ventilators im Klimaschrank trotz des zusätzlichen Windschutzes so stark, dass kürzere Abtastraten zu Fehlaufzeichnungen geführt hätten. Da immer nur eine Probe gemessen werden konnte, wurden die Objekte nacheinander immer denselben 24-stündigen Schwankungszyklen ausgesetzt. Zur Vorkonditionierung wurden die Proben in den Klimakammern je nach Fragestellung bei 50, 65 oder 80 % rF gelagert. Um die relative Luftfeuchte und Temperatur in unmittelbarer Probennähe

130 Fa. Angelantoni, Type Challenge 250, Baujahr 1998; Messbereich 0 – 100 % relative Luftfeuchte, Genauigkeit relative Feuchte: 0 – 90 %: ± 2 % rF, 90 – 100 %: ± 3 % rF; Temperatur bei 20 °C: $\pm 0,2$ °C.

131 Analysewaage der Fa. Sartorius, CPA 623S, Baujahr 2011, Maximalgewicht 620 g, Genauigkeit 0,001 g. Die Waage kalibriert sich in regelmäßigen Abständen selbst.

dokumentieren zu können, wurde ein Datenlogger¹³² am Dach des Windschutzes befestigt. Dieser zeichnete die Werte ebenfalls minütlich auf, so dass Klimadaten und Gewichtsänderung direkt vergleichbar waren. Angelehnt an Vorgaben aus der Literatur wurden an den Dummies und vorgealterten Kunstwerken Versuche mit unterschiedlicher Frequenz und Amplitude durchgeführt. Um Bezug zur Realität herzustellen, wurde außerdem, basierend auf einem klimatisch charakteristischen Tag in Schloss Linderhof, ein 24-stündiges Klimafile entwickelt. Dieses wurde ebenfalls in der Klimakammer mit den Probematerialien gefahren und mit den Ergebnissen aus den ersten Versuchen abgeglichen. In Tabelle 3.2 sind die durchgeführten Schwankungsszenarien zusammengefasst.

Tabelle 3.2:

Auflistung der Schwankungsszenarien, die im Klimaschrank mit den Dummies und Materialproben durchgeführt wurden.

Schwankungsrate	Begründung für ausgewählten Schwanungszyklus	Materialien
50 – 60% rF, 19°C zehnmütiger Wechsel	Zulässige Schwankungsvorgaben für Museen erster Klasse nach Thomson	Pergament, Leinwand, „Malerei auf MDF-Platte“, „Malerei auf Pappe“, polimentvergoldetes Holz
50 – 60% rF, 19°C, zweistündiger Wechsel	Zulässige Schwankungsvorgaben für Museen erster Klasse nach Thomson	Pergament, Leinwand, „Malerei auf MDF-Platte“, „Malerei auf Pappe“, polimentvergoldetes Holz
40 – 70% rF, 19°C zehnmütiger Wechsel	„Zulässige“ Schwankungsvorgaben für Museen zweiter Klasse nach Thomson	Pergament, Leinwand, „Malerei auf MDF-Platte“, „Malerei auf Pappe“
40 – 70% rF, 19°C, zweistündiger Wechsel	„Zulässige“ Schwankungsvorgaben für Museen zweiter Klasse nach Thomson	Pergament, „Malerei auf MDF-Platte“, „Malerei auf Pappe“
Nachgestelltes Klimafile aus dem Paradeschlafzimmer in Schloss Linderhof am Beispiel vom 4. – 5. Juli 2010 mit Schwankungen der relativen Luftfeuchte von 53 – 71%.	Untersuchung der Auswirkung von realen klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke	Pergament, „Malerei auf Pappe“ mit unterschiedlichen Ausgangsfeuchten (50, 65 und 80 % rF) und mit und ohne isolierter Rückseite „Malerei auf MDF-Platte“, polimentvergoldetes Holz, grundiertes Holz, gealtertes Gemälde mit und ohne isolierter Rückseite, Malerei auf Leinwand (Ocker in Leinöl sowie mit Vollei) mit isolierter Rückseite, Grundierte Leinwand mit isolierter Rückseite, PE-Scheibe mit und ohne Auftrag

3.2.3 Auswertung der Versuche

Um die Gewichtsänderung der einzelnen Materialien miteinander vergleichen zu können, wurde diese auf das jeweilige Volumen bezogen und in die Einheit kg/m³ umgerechnet.

Grafische Auswertung

Die grafische Auswertung ist exemplarisch für eine unbemalte Leinwand in Abbildung 3.5 dargestellt. Im oberen Feld sind die in der Klimakammer gemessenen Werte für Temperatur und relative Luftfeuchte im zeitlichen Verlauf abgebildet. Die untere Grafik stellt auf der y-Achse die Gewichtsänderung der Materialprobe, bezogen auf das Anfangsgewicht bei Versuchsbeginn und über die Versuchsdauer dar. Im Feld rechts daneben findet sich die Spreizung der Gewichtsänderung in Form eines Box-Diagramms. Temperatur, relative

¹³² Zur Aufzeichnung der Temperatur und relativen Feuchte wurde der Datenlogger „Junior“ der Fa. Escort verwendet. Messbereich Temperatur: -20 bis +60 °C, relative Luftfeuchte 0 – 100 %; Messgenauigkeit Temperatur: ± 0,3 °C, relative Luftfeuchte: ± 3 % bei 25 °C.

Luftfeuchte, Gewichtsänderung und Box-Diagramm haben in einem Versuch jeweils die gleiche Farbe, so dass beim Vergleich der Materialien auch die klimatischen Bedingungen jedes einzelnen Versuchs nachvollziehbar sind. Da jede Probe separat im Klimaschrank gemessen wurde, können sich kleine klimatische Unterschiede ergeben, weshalb diese nicht immer exakt synchron verlaufen.

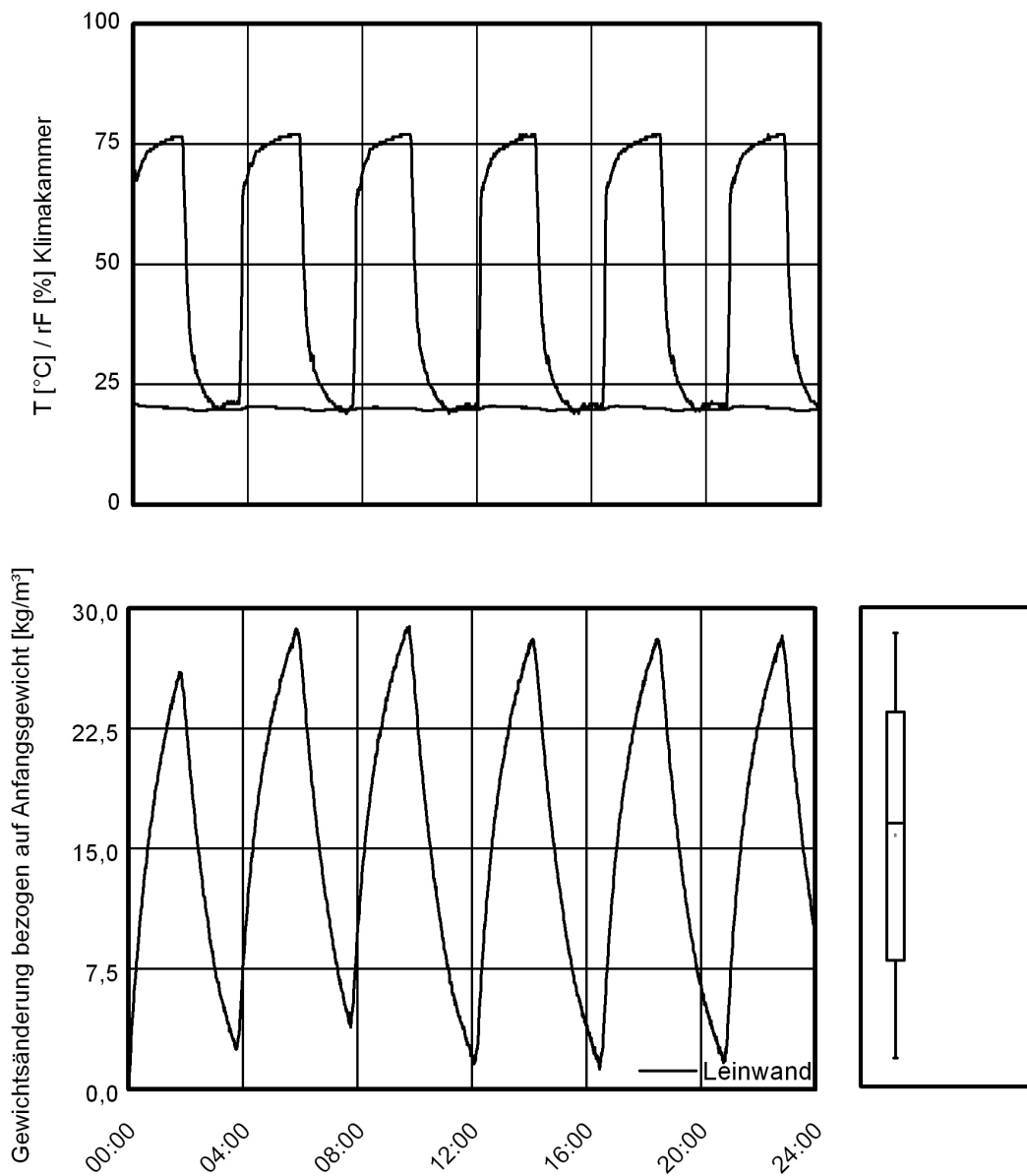


Abbildung 3.5:
Auswirkung der Schwankung von 80 auf 20 % relative Luftfeuchte im 24-stündigen Verlauf bzgl. der Gewichtsänderung am Beispiel von unbemalter Leinwand.

Unterschiedliche Auswirkung klimatischer Schwankungen abhängig von der Materialeigenschaft der Kunstwerke

Abhängig von den hygrothermischen Eigenschaften reagieren Materialien unterschiedlich stark, jedoch unmittelbar mit einer Gewichtsänderung auf die geänderte relative Luftfeuchte. In Abbildung 3.6 ist die Gewichtsänderung verschiedener Dummies für Schwankungen von 50 auf 60 % relative Luftfeuchte im zwei-stündigen Wechsel bei 19 °C aufgetragen. Die Unterschiede zwischen stark hygroskopischem Pergament, diffusionsoffener „Malerei auf Pappe“, der diffusionshemmenden „Malerei auf MDF-Platte“ und polimentvergoldetem Holz sind deutlich sichtbar: Pergament reagiert am stärksten, darauf folgen die „Malerei auf Pappe“ und „Malerei auf MDF-Platte“. Die Polimentvergoldung zeigt die geringsten Gewichtsänderungen.

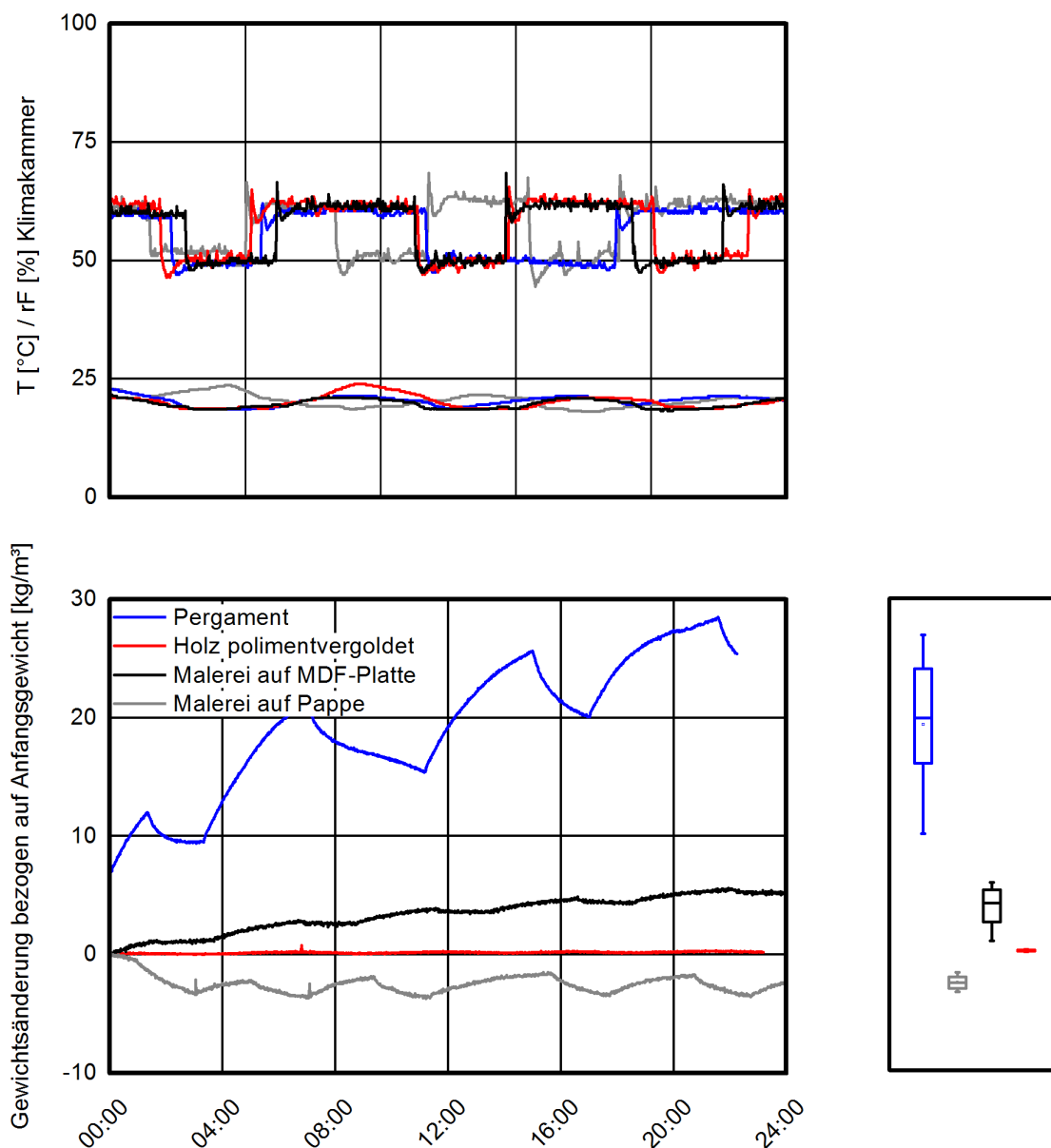


Abbildung 3.6:

Vergleich der Gewichtsänderung von Pergament, „Malerei auf Pappe“, „Malerei auf MDF-Platte“ und polimentvergoldetem Holz bei Schwankungen der relativen Luftfeuchte zwischen 50 und 60 % rF in zwei-stündigem Wechsel. Pergament als hygroskopischstes Material reagiert am stärksten, während bei vergoldetem Holz so gut wie keine Gewichtsänderung erfolgt.

Auswirkung von kurzfristigen Schwankungen und Einfluss der Ausgangsfeuchte

Da sich in den Materialien in jedem Klima bzw. bei jedem Temperatur-Feuchte-Verhältnis eine andere Gleichgewichtsfeuchte einstellt, sind die Materialien immer bestrebt, diese zu erreichen. Die Ausgangsfeuchte der Kunstwerke vor Beginn der Messung ist für den Kurvenverlauf entscheidend. Dies geht bereits aus Abbildung 3.6 bei Pergament und „Malerei auf MDF-Platte“ hervor. Die Probe „Malerei auf Pappe“ in Abbildung 3.7 lagerte vor dem Versuch bei 40 % relative Luftfeuchte. Das Feuchtgleichgewicht für die Untersuchung von 10-minütigen Schwankungen zwischen 50 auf 60 % relative Luftfeuchte liegt bei 55 % rF und schwankt um $\pm 5\%$ rF. In den ersten acht Stunden ist die Gewichtsaufnahme besonders ausgeprägt, danach flacht die Kurve ab. Nach 24 Stunden ist die Gleichgewichtsfeuchte beinahe erreicht. Damit wird deutlich, dass sich auch sehr kurzfristige Schwankungen von geringer Amplitude unmittelbar auf das Material auswirken. Das Bestreben, die Gleichgewichtsfeuchte zu erreichen, überwiegt jedoch.

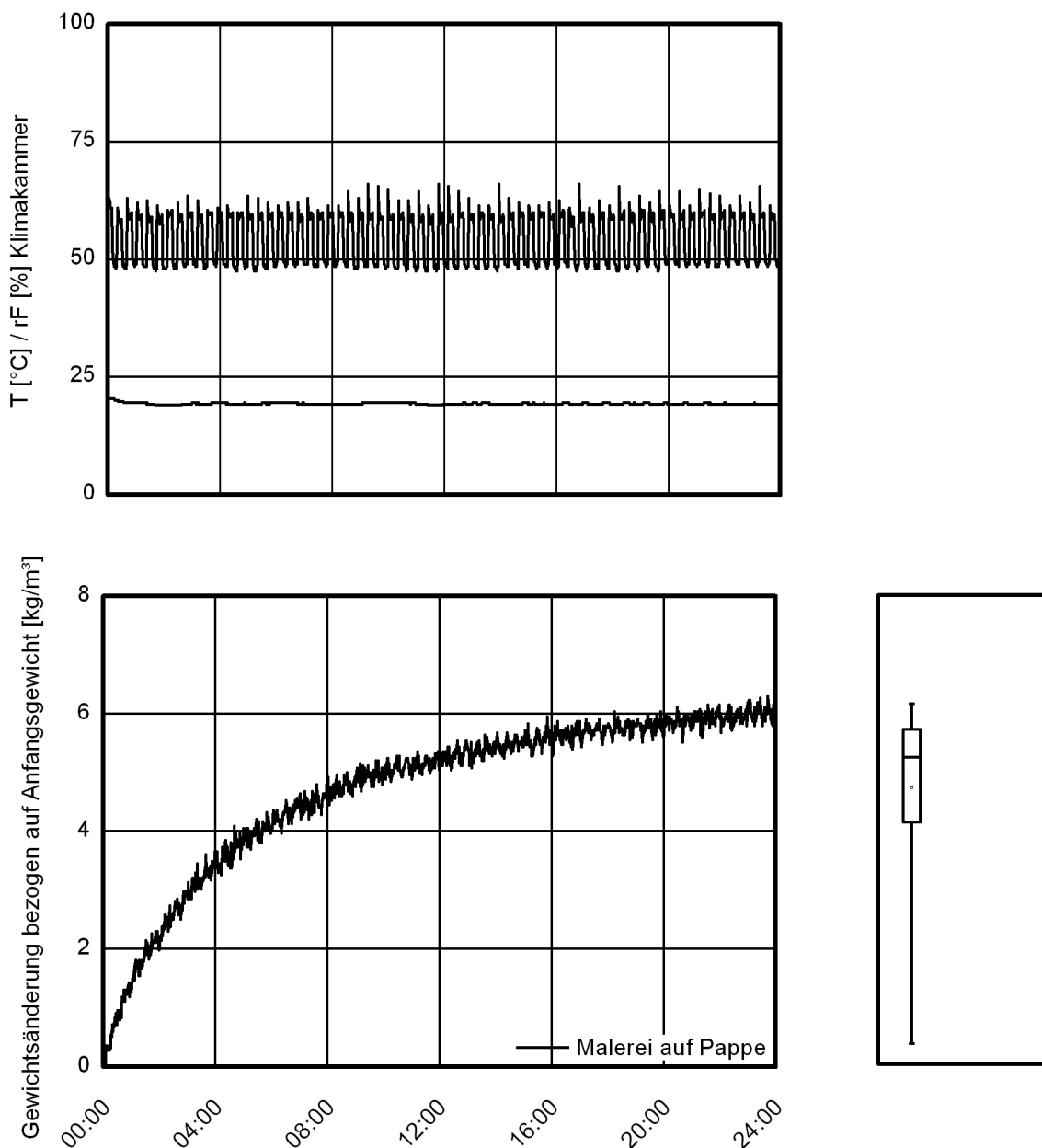


Abbildung 3.7: Gewichtsänderung von „Malerei auf Pappe“ mit Schwankungen der relativen Luftfeuchte von 50 auf 60 % in zehnmütigen Wechsel. Die Probe lagerte zuvor bei 40 % rF und strebt im Versuch ein neues Gleichgewicht (55 % rF) an.

Das Streben nach der Ausgleichsfeuchte ist bei länger andauernden Feuchteschwankungen noch deutlicher sichtbar. Die diffusionshemmende Probe „Malerei auf MDF-Platte“ lagerte vor dem Versuch bei 80 % relativer Luftfeuchte und einer Temperatur von 20 °C. Bei der zweistündigen Schwankung von 70 auf 40 % relative Luftfeuchte erfolgt in den ersten drei Stunden eine starke Gewichtsabnahme, obwohl die relative Luftfeuchte mit 70 % nur um 10 % von der Ausgangsfeuchte abweicht. Nach dem Absinken auf 40 % relative Luftfeuchte setzt sich die Gewichtsabnahme weiter fort. Auf den erneuten Anstieg auf 70 % rF folgt eine mäßige Gewichtszunahme. Beim nächsten Feuchteabfall verliert die Probe wieder stark an Gewicht. Der Gewichtsverlust setzt sich über den gesamten Versuch fort. Nach 24 Stunden ist der Gleichgewichtszustand, der in diesem Fall bei 55 % relative Luftfeuchte liegt und damit einer Änderung von 25 % entspricht, für diese Probe noch immer nicht erreicht (Abbildung 3.8). Im Vergleich dazu reagiert die „Malerei auf Pappe“ mit regelmäßiger Feuchtezunahme und -abgabe.

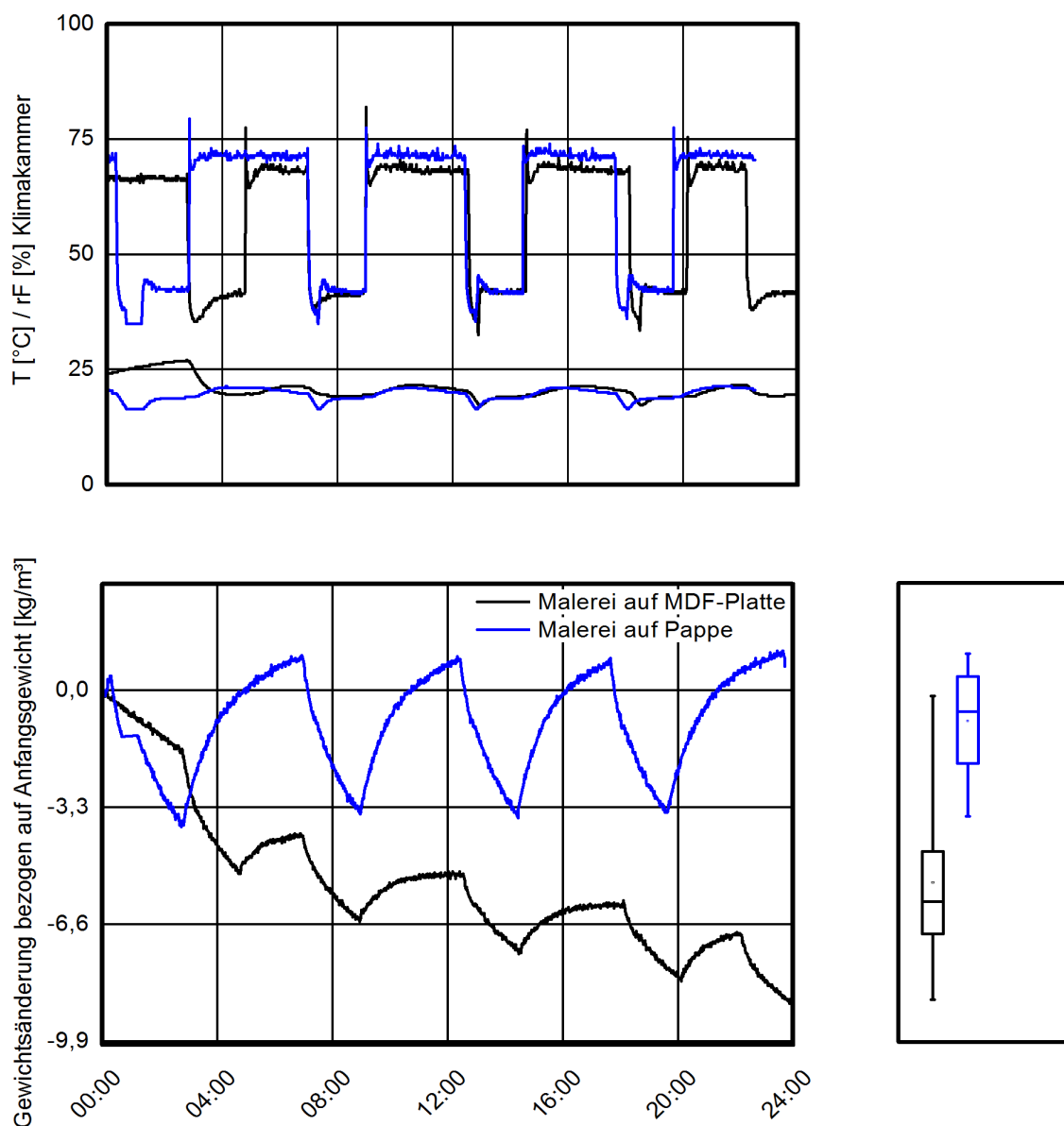


Abbildung 3.8: Gewichtsänderung von diffusionshemmender „Malerei auf MDF-Platte“ und diffusionsoffener „Malerei auf Pappe“ bei Schwankungen von 70 auf 40 % rF in zweistündigem Wechsel. Die Probe „Malerei auf MDF-Platte“ lagerte zuvor bei 80 % rF. Die kurzfristigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte wirken sich zwar auf die Materialprobe aus, das Streben nach der Ausgleichsfeuchte dominiert hier dennoch die Gewichtsänderung.

Einfluss der Hysterese

Bei sich wiederholenden Schwankungen ist bei stark hygroskopischen Materialien ein „Auffeuchten“ zu beobachten. Dies ist mit dem Phänomen der Hysterese zu erklären: Die Desorption – Abgabe der Feuchtigkeit – erfolgt langsamer als die Adsorption – Aufnahme der Feuchtigkeit (vgl. 2.1.2). In Abbildung 3.9 erfährt Pergament in zweistündigem Rhythmus wechselnde Feuchtesprünge von 70 auf 40 % relative Luftfeuchte und wieder zurück auf 70 %. Nach Abschluss eines Zyklus kehrt es nicht mehr zurück zum Ausgangszustand, sondern startet mit erhöhtem Gewicht, so dass bei der Wiederholung des Vorgangs ein leichtes „Auffeuchten“ sichtbar ist. Ohne die Ausgangssituation des Materials zu kennen, ist es jedoch schwer, die Hysterese vom Streben nach der Ausgleichsfeuchte zu unterscheiden.

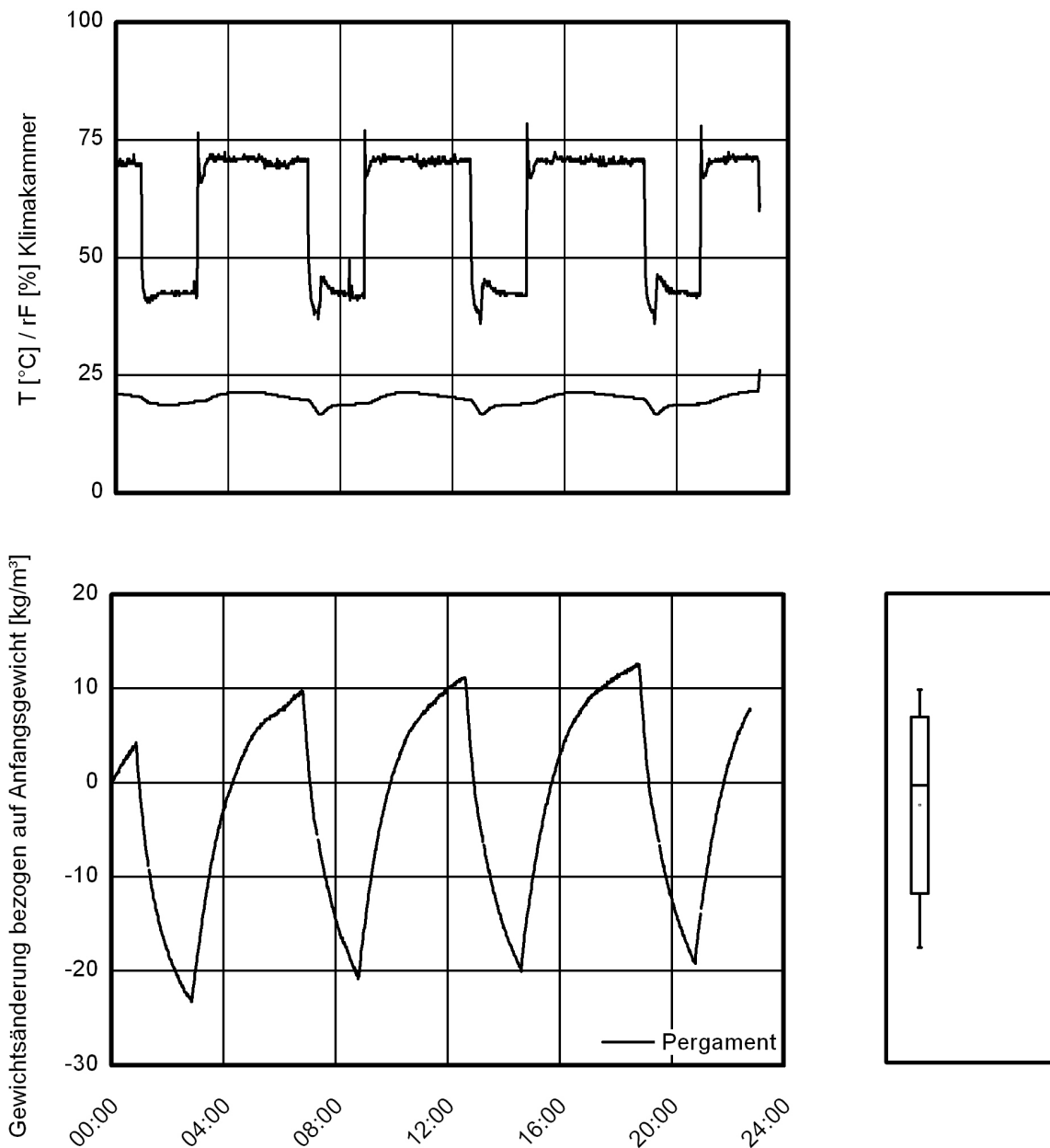


Abbildung 3.9:

Bei einer Schwankung von 70 auf 40% relative Luftfeuchte in zweistündigem Wechsel ist bei Pergament das Phänomen der Hysterese sichtbar: Die Aufnahme der Feuchte erfolgt schneller als die Abgabe.

Amplitude und Frequenz

Die Annahme, dass mit steigender Amplitude – wie auch mit abnehmender Frequenz – die Gewichtsänderung zunimmt, wurde im Klimaschrank durch die Wahl verschiedener Schwankungsspreizungen und unterschiedlicher Dauer der Schwankungen untersucht.

Je größer die klimatischen Schwankungen sind und je länger das Material Zeit hat auf die neue klimatische Situation zu reagieren, umso stärker wirkt sich dies auf die Gewichtsänderung aus.

Abbildung 3.10 zeigt anhand der Probe „Malerei auf Pappe“ über 12 Stunden den Vergleich von zweistündigen Schwankungsamplituden von $\pm 5\%$ (50–60 % rF) und $\pm 15\%$ (40–70 % rF).

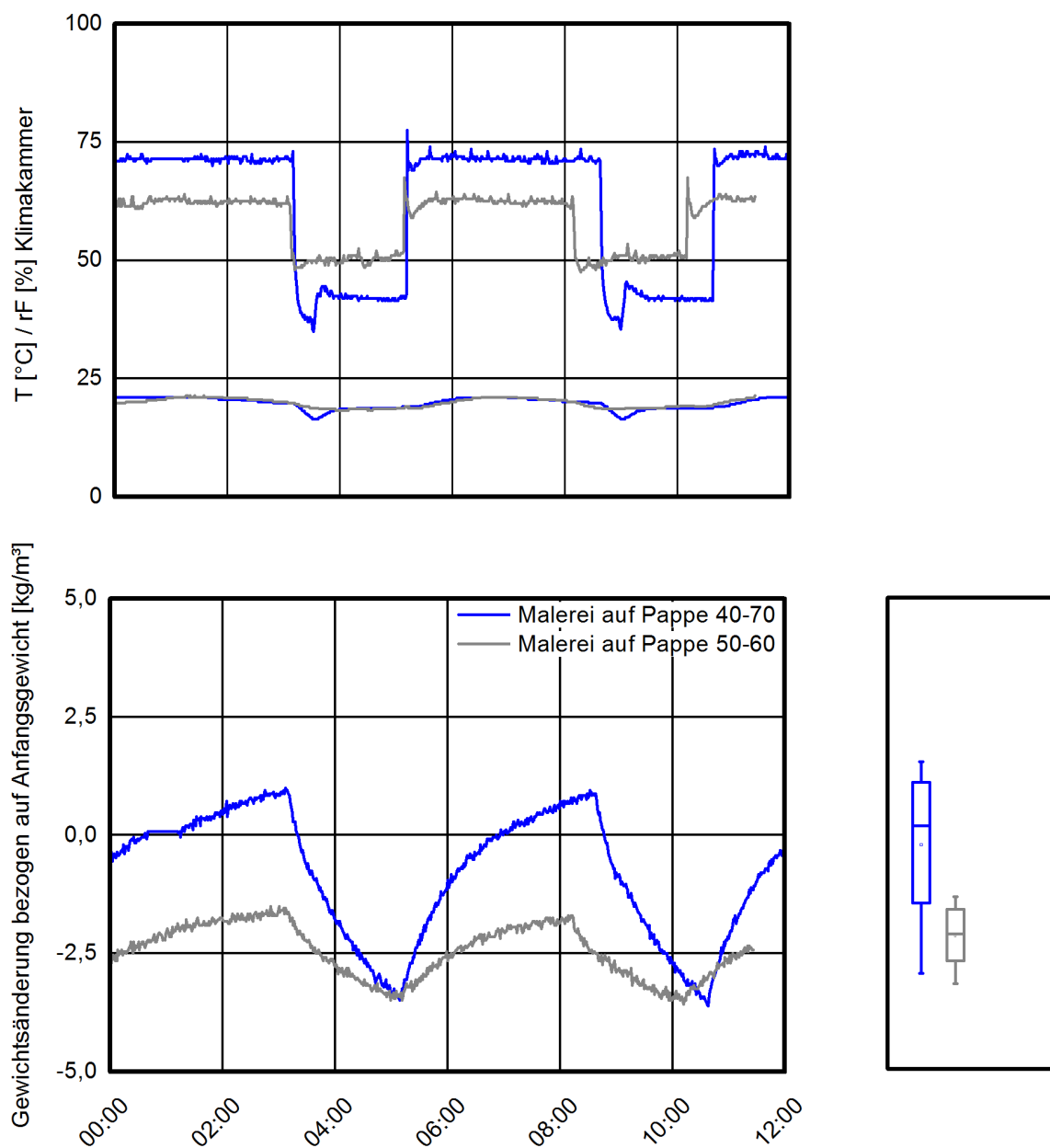


Abbildung 3.10:

Vergleich von zweistündigen Schwankungsamplituden von $\pm 5\%$ (50–60 % rF) und $\pm 15\%$ (40–70 % rF) am Beispiel von Malerei auf Pappe. Bei höherer Amplitude erfolgt eine größere Gewichtsänderung der Materialprobe.

In Abbildung 3.11 ist der Vergleich zwischen zehnmütigen und zweistündigen Schwankungen von 70 auf 40 % relative Luftfeuchte am Beispiel von Pergament dargestellt. Während bei den sehr kurzfristigen klimatischen Änderungen wenig Reaktion bzgl. der Gewichtsänderung auftritt, ist sie bei der zweistündigen Schwankung deutlich vorhanden. Demnach sind Schwankungen von weniger als 15 Minuten auch bei höheren Amplituden zu vernachlässigen. Damit ist belegt, dass kurzzeitiges Stoßlüften auch bei stark hygroskopischen Materialien nur geringe Reaktionen hervorruft, welche als unschädlich eingestuft werden können.

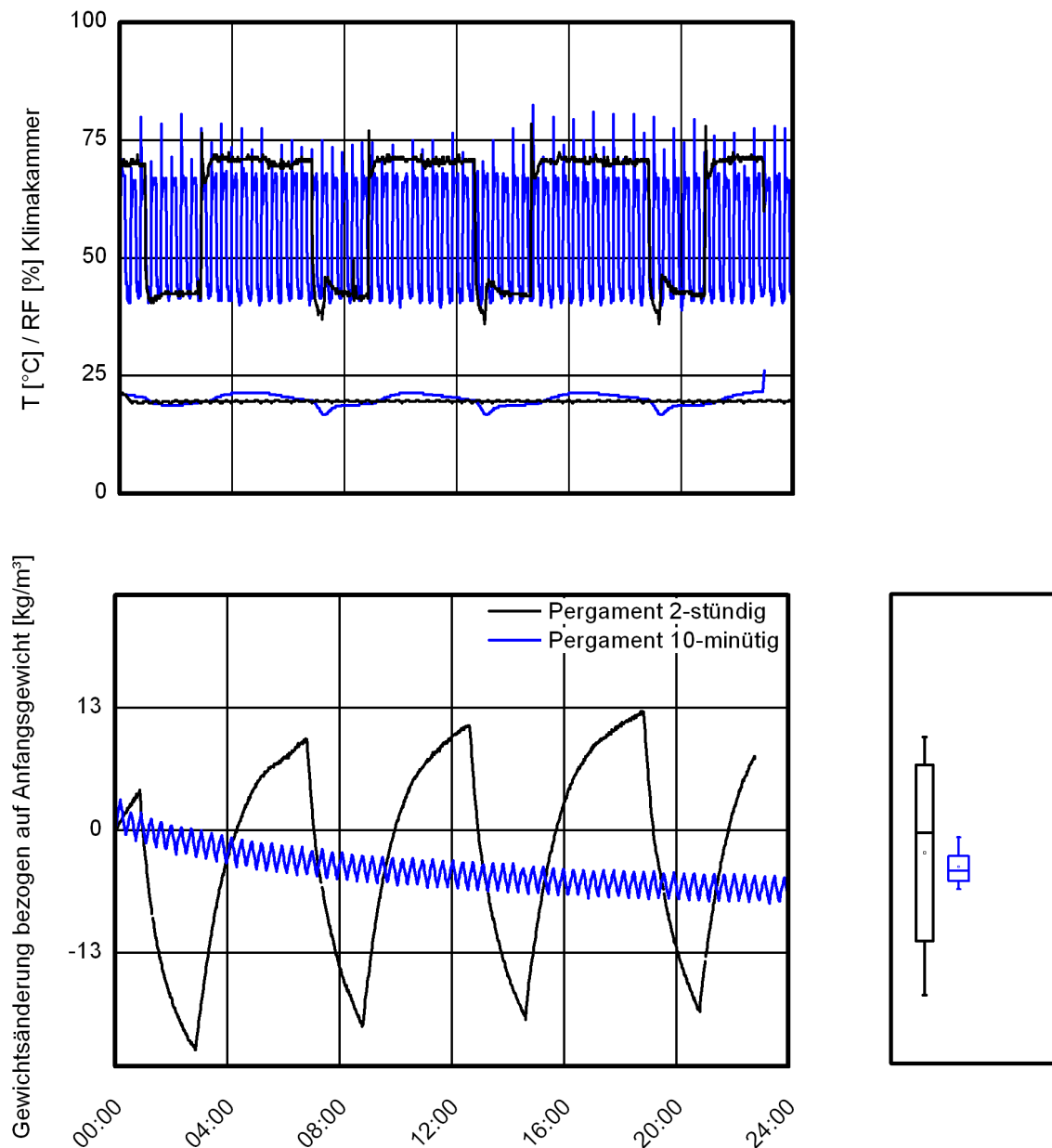


Abbildung 3.11: Vergleich der Gewichtsänderung bei 10-minütigen und zweistündigen Schwankungen zwischen 40 und 70 % relative Luftfeuchte am Beispiel von Pergament. Je länger eine Schwankung andauert, umso stärker ist die Gewichtsänderung.

Einfluss des Bildträgers und der Fassungsschicht auf die Gewichtsänderung

Welcher Anteil bei der Gewichtsänderung dem Bildträger zukommt, kann durch den Vergleich der Probe mit und ohne abgedichteter Rückseite gezeigt werden (Abbildung 3.12). Die Gewichtsaufnahme der „Malerei auf Pappe“ ist mit abgedichteter Rückseite deutlich reduziert. Ein geeigneter Rückseitenschutz erzielt einen ähnlichen Effekt. Trotzdem zeigt sich, dass sich klimatische Schwankungen, insbesondere bei diffusionsoffenen Materialien, nicht nur von der Rück- sondern auch von der Vorderseite her auswirken. Der Temperatur- und Feuchteverlauf innerhalb der einzelnen Schichten, wie auch der Einfluss einer abgedichteten Rückseite, wird im Kapitel 6 mit Hilfe der hygrothermischen Simulation näher untersucht.

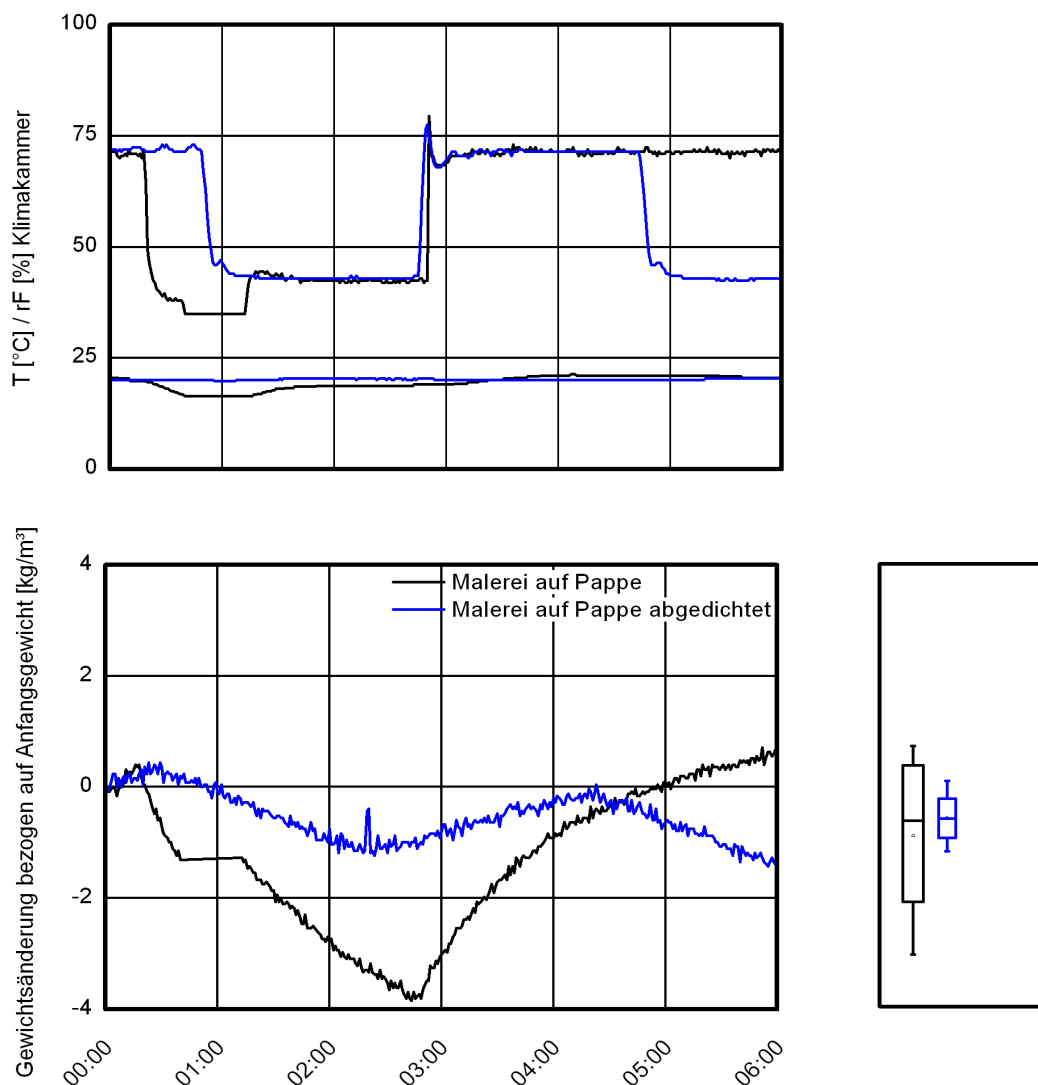


Abbildung 3.12:

Vergleichende Darstellung der Gewichtsänderung von „Malerei auf Pappe“ mit und ohne abgedichteter Rückseite bei einer Schwankung von 40 – 70 % relative Luftfeuchte in zweistündigem Wechsel über 6 Stunden. Die abgedichtete Rückseite dämpft die Gewichtsänderung, trotzdem ist der Einfluss der klimatischen Schwankung bei diffusionsoffenen Materialien von der Vorderseite her messbar.

Übertragung der Laborversuche auf reale Schwankungen anhand des Fallbeispiels Schloss Linderhof

Da die klimatischen Schwankungen in der Realität weniger regelmäßig auftreten, wurde am Beispiel von Schloss Linderhof ein Tag mit realen Schwankungen ausgewählt und für den Klimaschrank programmiert. Charakteristisch für Linderhof ist ein längerer Zeitraum mit stabilem Raumklima, wenn das verhältnismäßig luftdichte Schloss über Nacht geschlossen ist. Mit Beginn des Führungsbetriebs und den damit verbundenen geöffneten Fenstern ereignen sich Schwankungen von z. T. über 25 % relative Luftfeuchte. In dem – basierend auf den gemessenen Daten – umgesetzten Klimafile beträgt die maximale Schwankung der relativen Luftfeuchte 18 %. Ausgehend von sechsstündigem konstanten Klima bei 53 % steigt sie schnell auf 71 % rF an und kehrt nach zwei Stunden wieder auf 53 % rF zurück.

Abbildung 3.13 zeigt die Reaktion von Pergament, „Malerei auf Pappe“, „Malerei auf MDF-Platte“ sowie grundiertem und polimentvergoldetem Holz. Die Materialien verhalten sich im Grunde wie im ersten Versuch (vgl. Abbildung 3.6). Auch hier wird wieder die unmittelbare Reaktion der sorptiven Materialverbünde auf die geänderten klimatischen Verhältnisse in Form einer Gewichtsänderung sichtbar. Die größte Reaktion

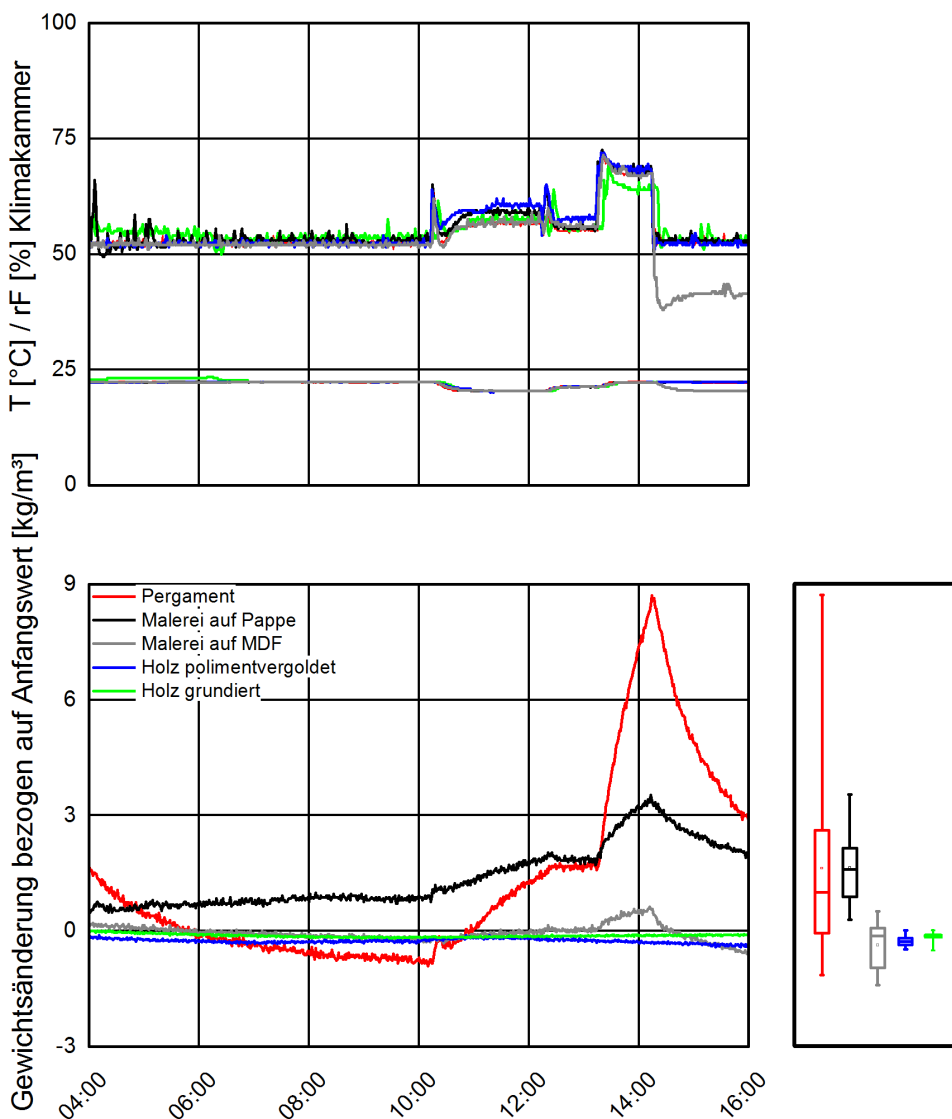


Abbildung 3.13:

Vergleich der Gewichtsänderung von Pergament, „Malerei auf Pappe“, „Malerei auf MDF-Platte“ sowie grundiertem und polimentvergoldetem Holz für die, basierend auf den Klimadaten von Schloss Linderhof entwickelten Schwankungen.

ist bei Pergament (rot) festzustellen. Auf den Anstieg der relativen Luftfeuchte um 13:00 Uhr reagiert das Material mit starker Gewichtszunahme, die bis zum erneuten Abfall der relativen Luftfeuchte andauert, um dann wieder stark an Gewicht zu verlieren. Die „Malerei auf Pappe“ (schwarz) zeigt ebenfalls eine sorptive Reaktion, jedoch geringer ausgeprägt als Pergament. Das grundierete und polimentvergoldete Holz sowie die „Malerei auf MDF-Platte“ reagieren dagegen kaum. Insbesondere bei den beiden Hölzern unterscheidet sich die Reaktion nur minimal. Die Blattgoldschicht wirkt sich somit nur in geringem Maße aus. Als Gründe für Lockerungen und Substanzverluste bei den polimentvergoldeten Holzoberflächen in Schloss Linderhof sind also nicht zwingend kurzfristige, sondern über einen längeren Zeitraum andauernde Feuchteänderungen zu nennen (vgl. Kapitel 4.1).

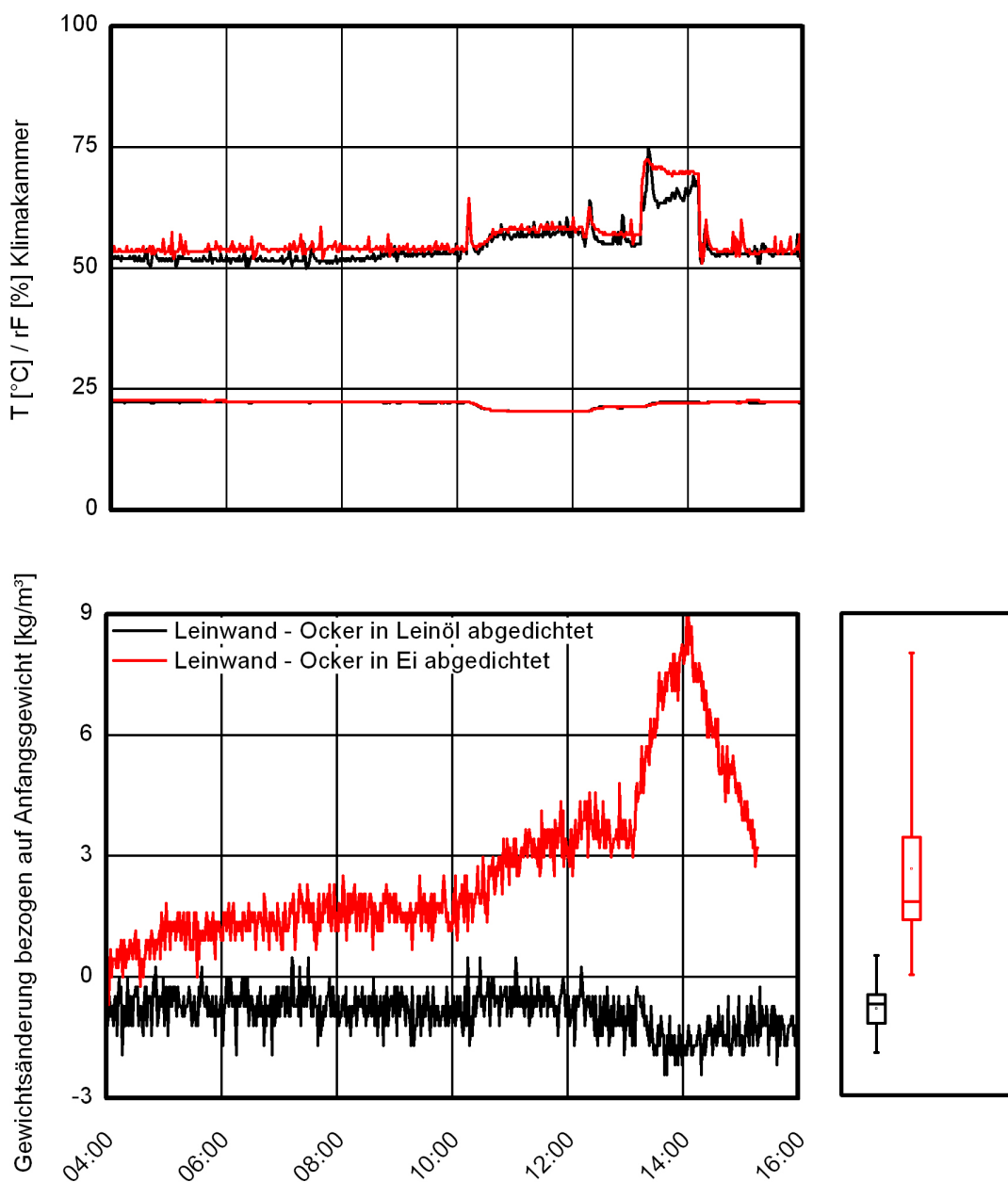


Abbildung 3.14:

Vergleich von Ocker in Leinöl und Ocker in Ei, beide auf Leinwand aufgetragen, mit versiegelter Rückseite. Die diffusionsoffene Malschicht reagiert stärker auf die klimatischen Schwankungen als die diffusionsdichte.

Einfluss von klimatischen Schwankungen auf einzelne Schichten

Der Einfluss von klimatischen Schwankungen auf die einzelnen Schichten ist schwer messbar, da immer ein Trägermedium erforderlich ist. Der Versuch, Aufstriche auf Polyethylen-Scheiben, die für die Bestimmung der Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl hergestellt worden sind, für die Bestimmung der Gewichtsänderung einzusetzen, schlug fehl, da die Scheiben selbst bereits so stark auf die Schwankungen reagierten, dass daraus keine Reaktion der Farbschicht oder der Grundierung abzuleiten war. Deshalb wurde für die Untersuchung des Einflusses des Bindemittels Ocker in Ei und in Leinöl auf Leinwand gestrichen, die Rückseite mit einer Metallfolie abgedeckt, zusätzlich seitlich mit Wachs abgedichtet und demselben Schwankungszyklus ausgesetzt.

In Abbildung 3.14 ist der Vergleich der Reaktion beider Malschichten auf die klimatischen Schwankungen aus Schloss Linderhof aufgezeigt. Die diffusionsoffenerere Malschicht Ocker in Ei reagiert ähnlich stark auf die klimatischen Schwankungen wie zuvor Pergament (Abbildung 3.11). Ocker in Leinöl zeigt so gut wie keine Reaktion. Die unterschiedliche Auswirkung individueller Materialeigenschaften wird hier erneut deutlich. Es zeigt sich, dass auch bei derselben Kunstgattung (Leinwandgemälde), durch verschiedene Farb- und Bindemittel unterschiedlich starke Reaktionen auf klimatische Schwankungen auftreten können. Später wird in Kapitel 6 der Feuchteverlauf von diversen Materialverbänden mit der hygrothermischen Simulation eingehend untersucht.

Die Untersuchung der Gewichtsänderung ist eine sensible Methode, um die unmittelbare Reaktion von Kunstwerken auf klimatische Änderungen zu untersuchen. Um von klimatischen Schwankungen auf Schäden zu schließen, reicht sie jedoch alleine nicht aus. Dazu muss der Versuch mit optischen Untersuchungen ergänzt werden. Anhand von zwei Beispielen wurden optische Veränderungen aufgrund von klimatischen Schwankungen mit Hilfe eines 3D-Mikroskops (Fa. Hirox, System KH 3000) in der Klimakammer untersucht.

3.3 Abgleich von Sorptionsversuchen mit mikroskopischer Untersuchung

Indem ein 3D-Mikroskop in einer Klimakammer platziert wurde, konnte die optische Veränderung, die durch einen Feuchtesprung hervorgerufen wird, an zwei Testobjekten – diffusionshemmende „Malerei auf Holz“ und diffusionsoffene „Malerei auf Pappe“ – dokumentiert werden. Vorteil des 3D-Mikroskops gegenüber herkömmlichen ist die verbesserte Tiefenschärfe, die durch das stufenweise Scannen vom tiefsten zum höchsten Punkt erreicht wird. Die Einzelaufnahmen werden mit einer Software zu einem tiefenscharfen Bild zusammengefügt. Weiter gibt diese eine topografische Darstellung in Falschfarben aus.

Beschreibung des Versuchs

Beide Objekte wurden über Nacht bei 70 % relative Luftfeuchte und 20 °C vorkonditioniert. Im Klimaschrank folgte dann ein Abfall auf 40 % rF (bei gleicher Temperatur), also angelehnt an den Zyklus, der bei den Versuchen zur Gewichtsänderung angewandt wurde (vgl. Abbildung 3.8). Für die Aufnahmen wurde eine charakteristische Stelle, wie die ausgebrochene Malschicht bei „Malerei auf Pappe“, ausgewählt. Um bei der Beobachtung der Reaktion der Bildschicht eine mögliche Verwölbung des gesamten Verbunds erfassen zu können, wurde die Auflagefläche des Objektes als Referenz mit hinzugenommen. Die Dokumentation der Reaktion erfolgte über drei („Malerei auf Holz“) bzw. fünf Stunden („Malerei auf Pappe“) in 60-minütigen Abständen. Für die Auswertung wurden die tiefenscharfen Mikroskopaufnahmen mit der topographischen

Auswertung kombiniert, so dass im zeitlichen Verlauf die Änderung der Oberfläche für den untersuchten Ausschnitt deutlich wird. Die Fotoreihen der beiden Testobjekte sind in Abbildung 3.15 und 3.16 dargestellt.

Ergebnis

Nach 60 Minuten sind bei beiden Testobjekten in der Falschfarbendarstellung lokale Änderungen sichtbar. Im zeitlichen Verlauf verringert sich bei der „Malerei auf Holz“ und der „Malerei auf Pappe“ stellenweise die Oberfläche um bis zu ca. 0,4 mm. Anders als bei einer lockeren Farbscholle (vgl. Kapitel 4.3.2), die sich bei Feuchtschwankungen stetig auf und ab bewegt, findet hier in der topographischen Darstellung jedoch keine gleichmäßige Veränderung statt.

Während bei der Untersuchung zu Gewichtsänderung die „Malerei auf Pappe“ etwas stärker reagierte (vgl. Abbildung 3.8), wichen die beiden Verbände in ihrer optischen Reaktion nicht sonderlich voneinander ab. Festzuhalten ist jedoch, dass innerhalb eines kurzen Zeitraums von drei bis fünf Stunden die Reaktion auf eine klimatische Schwankung sichtbar wird. Damit werden die Erkenntnisse aus den Wägeversuchen durch die optischen Versuche untermauert.

Der Zeitraum reichte jedoch nicht aus, um die Oberflächenbewegung bis zum Erreichen der neuen Gleichgewichtsfeuchte zu verfolgen. Eine längerfristige Untersuchung an einem Kunstwerk in historischem Klima würde ermöglichen, die Bewegungen, die in der Klimakammer künstlich erzeugt wurden, in situ nachzuvollziehen. So wären weitere Informationen über das tatsächliche Bewegungsverhalten bei klimatischen Schwankungen zu erhalten.

3.4 Zusammenfassung

Durch die Versuche konnte gezeigt werden, wie Kunstwerke mit unterschiedlichen Materialeigenschaften auf Schwankungen der relativen Luftfeuchte reagieren. Auch im Fall kurzer Intervalle ($\pm 5\%$) ist bei einigen Kunstwerken eine Reaktion messbar. So erfolgt die Gewichtsänderung auch bei diffusionshemmenden Kunstwerken auf die Änderungen der klimatischen Bedingungen nicht zeitverzögert, wie Michalski beschreibt (vgl. 2.3.2), sondern ebenfalls unmittelbar. Wie stark ein Materialverbund anspricht, hängt von den spezifischen Diffusionseigenschaften der einzelnen Schichten ab. Sehr dichte Verbände, am Beispiel von polimentvergoldetem Holz oder Ocker in Leinöl gezeigt, sind weniger beeinflusst von kurzfristigen klimatischen Schwankungen. Stark hygroskopische Materialien, wie Leinwand oder Pergament und die verwendete „Malerei auf Pappe“, nehmen schnell Feuchtigkeit auf und geben diese wieder ab. Das bedeutet für den gesamten Materialverbund ein u. U. sehr unterschiedliches Verhalten der einzelnen Schichten gegenüber klimatischen Schwankungen, das letztlich die Schäden verursacht.

Feuchtetechnische Effekte, wie das Auffeuchten eines Materialverbunds bei wiederholtem Anstieg der relativen Luftfeuchte (Hysterese) lassen sich über die Gewichtsänderung nachverfolgen (vgl. Abbildung 3.9). Weiter kommt es auf die Frequenz und Amplitude der Schwankung an, wie stark ein Kunstwerk reagiert. Je größer die Amplitude, desto stärker ist die Gewichtszu- bzw. -abnahme. Außerdem hat die Frequenz, also die Dauer der Schwankung, Einfluss auf die Gewichtsänderung und damit die Bewegung eines Objektes. Je länger eine Schwankung anhält, desto höher ist auch die Reaktion des Materials, die sich in Form von Gewichtsänderung oder Verformung zeigt. Somit haben Schwankungen, die innerhalb von einer Stunde auftreten, eine geringere Auswirkung als tägliche. Inwieweit ein Verbund auf kurzfristige Änderungen von $\pm 5\%$ rF reagiert, hängt

wiederum von der Durchlässigkeit der Materialien ab. Für mittelstark reagierende Verbände wie Leinwandgemälde (vgl. diffusionsoffene Verbände in Tabelle 3.1) sind durch kurzzeitige Schwankungen, wie sie für ein Regelsystem in Museen der Klasse 1 typisch sind, keine hohen Gewichtsänderungen zu erwarten. Der Korridor zwischen 50 und 60 % relative Luftfeuchte zeigt - Pergament ausgenommen - bei den Materialverbänden kaum Gewichtsänderungen. Auf die Feuchteschwankungen zwischen 40 und 70 % relative Luftfeuchte sind hingegen deutliche Reaktionen sichtbar.

Sehr kurzfristige Schwankungen (z. B. 10-minütig) mit einer Amplitude von ± 15 % rF bewirken auch bei sehr hygroskopischen Materialien nur eine geringe Reaktion (Abbildung 3.11). Dies spricht für ein Stoßbüfßen, sofern es bei der kurzen Zeitspanne bleibt. Liegen höhere Schwankungen über einen Zeitraum von über 60 Minuten vor, können bei sehr empfindlichen (diffusionsoffenen) Materialien bzw. vorgeschädigten Verbänden, Veränderungen entstehen (vgl. Abbildung 3.1).

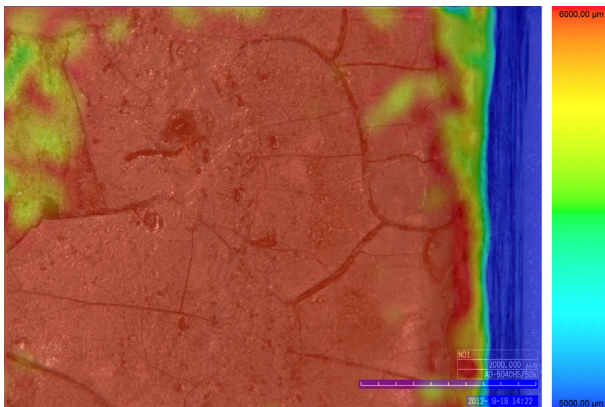
Festgestellt wurde weiter, dass die stärkste Gewichtsänderung innerhalb der ersten Stunden erfolgt, so dass in der grafischen Darstellung eine logarithmische Kurve entsteht (Abbildung 3.7). Abhängig vom Trägermaterial und Volumen kann es mehrere Tage oder Wochen dauern, bis ein erneuter Gleichgewichtszustand erreicht ist. Im Abgleich zur mikroskopischen Untersuchung war an diffusionsoffenem und -hemmendem Materialverbund nach ca. 60 Minuten eine erste optische Veränderung darstellbar (Abbildung 3.15, 3.16). So sehr sich die Materialverbände hinsichtlich der Gewichtsänderung unterschieden, so gering war der Unterschied bei der optischen Veränderung. Eine Untersuchung über einen längeren Zeitraum wäre hier aufschlussreich. Vergleichende Versuche mit und ohne abgedichteter Rückseite bestätigten, dass immer ein Teil der Gewichtsänderung durch Sorptionsprozesse von der Vorderseite her erfolgt (Abbildung 3.12). Die Höhe richtet sich danach, wie diffusionsoffen die Malschicht ist.

Ein Kunstwerk reagiert auf kurzfristige Schwankungen jedoch nur, wenn es sich zuvor im Gleichgewicht befand. Wird es von einem klimatischen Zustand in einen anderen versetzt, bzw. ist die Differenz zur Ausgleichsfeuchte zu groß ($\Delta 10$ % rF kann ausreichen), spielen kurzfristige Schwankungen auf dem Weg zur neuen Gleichgewichtsfeuchte nur eine untergeordnete Rolle (siehe Abbildung 3.7).

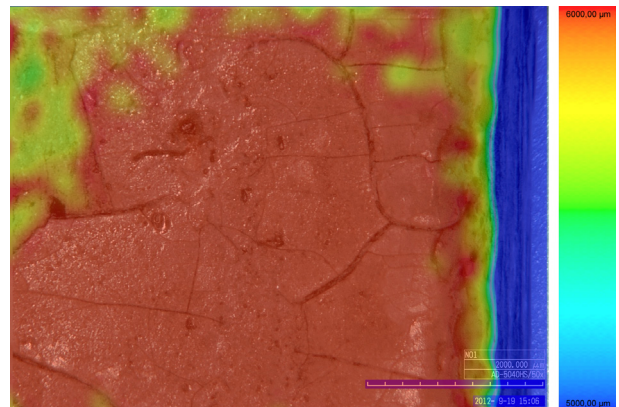
Anhand des Klimafiles von Schloss Linderhof konnte gezeigt werden, wie sich die Materialien, wie Polimentvergoldete Holzoberflächen, die im Schloss verbaut sind bei kurzfristigen Schwankungen verhalten. Das Probestück reagierte nur mit geringer Gewichtsänderung auf die Feuchteschwankungen. Derselbe Schichtenaufbau ohne Blattgold (grundiertes Holz) reagierte jedoch ebenfalls nur geringfügig (Abbildung 3.13). Hier fiel die im Verhältnis geringe Schicht der Grundierung gegenüber der Holzstärke (2 cm) wohl stärker ins Gewicht. Dauern klimatische Schwankungen über einen längeren Zeitraum an, wirkt sich dies auf die Gewichtsänderung von Kunstwerken und damit auch auf ihr Quell- und Schwindverhalten aus. Wie bzw. wie schnell der Feuchtetransport im Materialgefüge verläuft und welche Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den einzelnen Schichten vorliegen, wird im Folgenden mit Hilfe der hygrothermischen Simulation aufgezeigt (Kapitel 6).



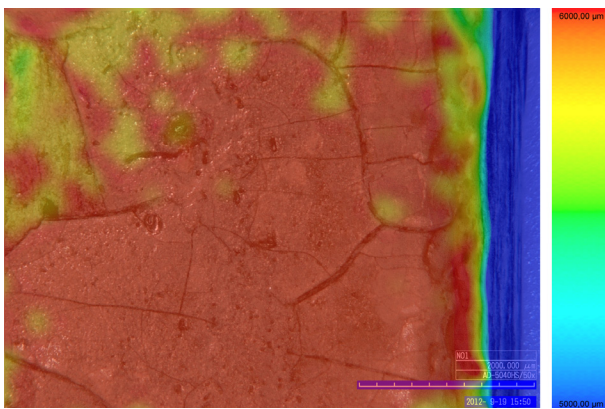
Links:
Gesamtaufnahme der Malerei auf Holz mit markiertem
Detailausschnitt.



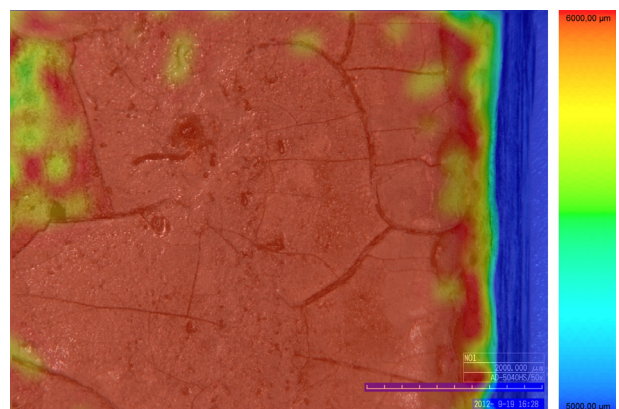
Start bei 20 °C, 70 % rF



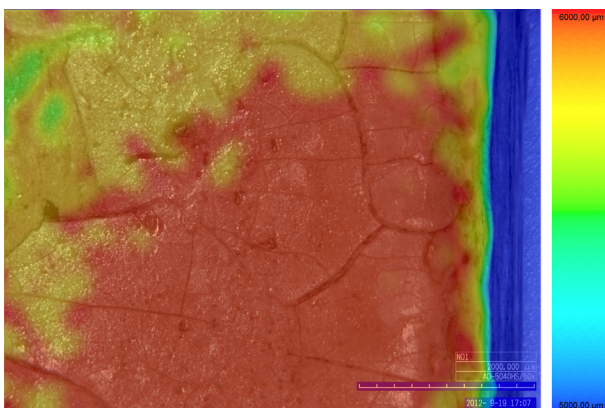
Nach 30 Minuten bei 20 °C, 40 % rF



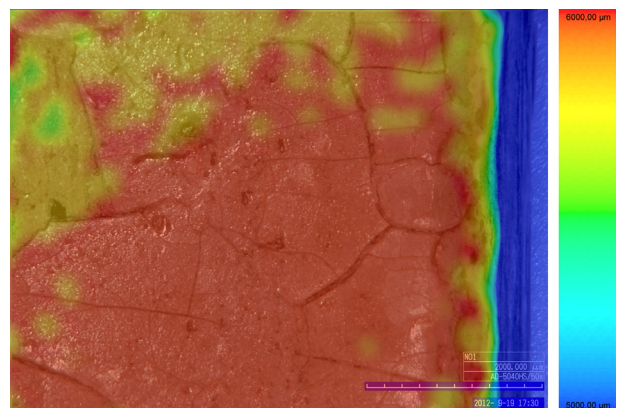
Nach 60 Minuten bei 40 % rF



Nach 90 Minuten bei 40 % rF



Nach 120 Minuten bei 40 % rF

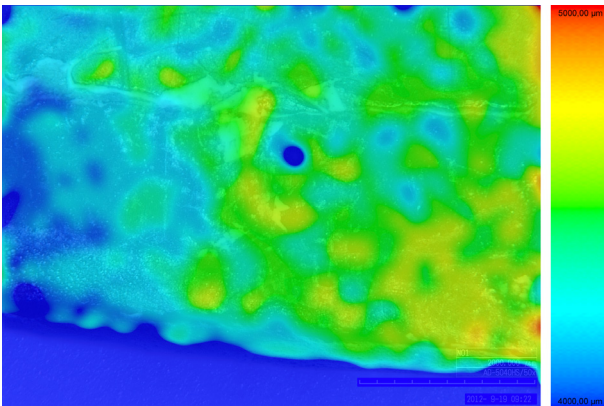


Nach 180 Minuten bei 40 % rF

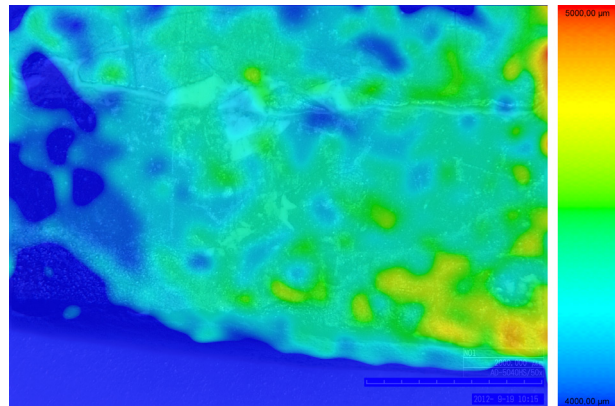
Abbildung 3.15:
Dokumentation eines Detailausschnitts von „Malerei auf Holz“ auf einen Feuchtesprung von 70 auf 40 % rF. Die Oberfläche bewegt sich leicht nach unten. Die Fotoaufnahmen sind kombiniert mit der topographischen Auswertung des 3D-Mikroskops.



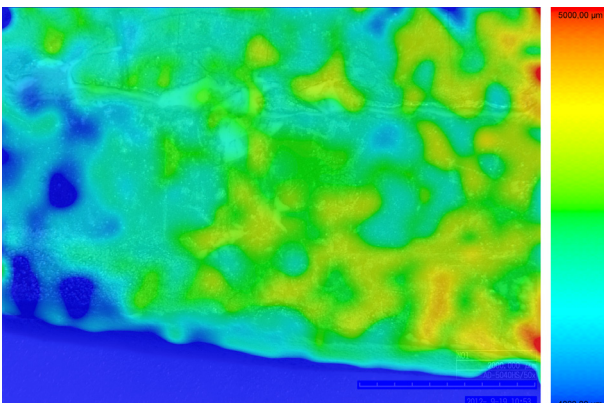
Links:
Gesamtaufnahme der Malerei auf Pappe mit markiertem
Detailausschnitt.



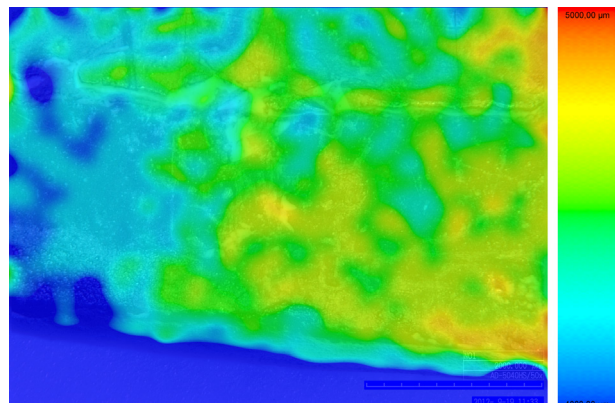
Start bei 20 °C, 70 % rF.



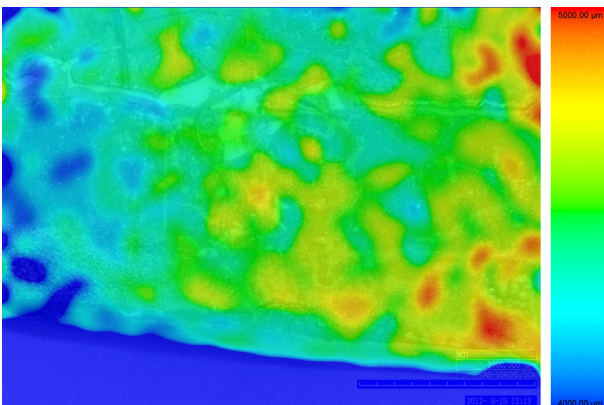
Nach 60 Minuten bei 20 °C, 40 % rF.



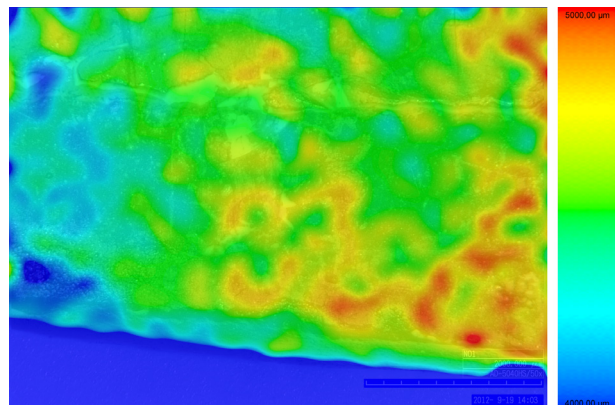
Nach 120 Minuten bei 40 % rF



Nach 180 Minuten bei 40 % rF



Nach 240 Minuten bei 40 % rF



Nach 320 Minuten bei 40 % rF

Abbildung 3.16:
Dokumentation eines Detailausschnitts von „Malerei auf Pappe“ auf einen Feuchtesprung von 70 auf 40 % rF. Die Fotoaufnahmen sind kombiniert mit der topographischen Auswertung des 3D-Mikroskops.

4 Erkenntnisse zu klimatisch bedingten Schäden an historischer Ausstattung anhand von restauratorischen Zustandsuntersuchungen und Klimadatenauswertung

Um den Zustand oder die Veränderung von Kunstwerken beurteilen zu können, nutzen Restauratoren üblicherweise optische Untersuchungsmethoden wie Fotografie, UV-, IR- oder Röntgenaufnahmen. Zustandsveränderungen an Kunstwerken in Abhängigkeit von klimatischen Bedingungen erfordern langfristig regelmäßige Überprüfungen. Aus zeitlichen wie aus finanziellen Gründen können Sammlungen häufig nicht ausreichend kontrolliert werden. Es fehlt oft neben der Abgrenzung, welche Schäden ausschließlich aufgrund von kumulativen, täglichen bis saisonalen, klimatischen Schwankungen entstanden sind, eine für einen späteren Vergleich nutzbare Zustandserfassung.¹³³ Neben den weitgehend fehlenden analytischen Grundlagen ist für eine quantitative Erfassung von Schäden die individuelle Beurteilung ein weiterer Unsicherheitsfaktor: Eine andere Person bewertet den Zustand eines Kunstwerks unter Umständen anders.

Um physikalische Phänomene bzw. klimatische Risiken für einzelne Materialgruppen ableiten zu können, werden in Laborversuchen oft zeitraffende Vereinfachungen¹³⁴ getroffen und Untersuchungen an singulären Objekten auf gesamte Materialgattungen übertragen (Kapitel 2.1.2). Analyse-Programme, in denen Schadfunktionen für Kunstwerke hinterlegt sind, geben mittlerweile das Risiko für Kunstwerke unterschiedlicher Gattung in einem individuellen Mikroklima aus (Kapitel 2.3.3). Diese Prognosen können Tendenzen aufzeigen wie sich Materialien verhalten, sie sind jedoch bisher wenig präzise und bilden keineswegs die Wirklichkeit ab. Dass diese Bewertungen aus restauratorischer Sicht noch nicht ausreichend sind, wird in diesem Kapitel verdeutlicht. Anhand von vier Fallbeispielen wurden historische Ausstattungen auf klimatisch bedingte Schäden hin untersucht, das jeweilige Raumklima analysiert und mit den Schadensprognosen der TU Eindhoven abgeglichen (vgl. Kapitel 2.3.3). Ziel war, die Möglichkeiten und momentanen Grenzen von Risikoanalysetools aufzuzeigen. Weiter bilden die Erkenntnisse aus den Fallstudien und die anhand der Untersuchungen entwickelten Fragen zu lokalen Besonderheiten die Basis für Untersuchungsszenarien, die mit dem hygrothermischen Simulationsprogramm WUFI® Pro näher betrachtet wurden (Kapitel 6).

¹³³ Für eine statistische Aussage zu klimatisch bedingten Schäden führt Andreas Weiß im Rahmen seiner Dissertation im Forschungsprojekt „Climate for Culture“ systematische Zustandsuntersuchungen u. a. an Sammlungsbeständen der Stiftung Preußischer Schlösser und Gärten durch. Vgl. auch Holmberg et al. 2011, pp. 73–81.

¹³⁴ Bratasz et al. 2011.

Auswahl der Fallstudien

Die restauratorische Zustandserfassung erfolgte um klimatisch bedingte Schäden an Leinwandgemälden sowie an gefassten und vergoldeten Holzoberflächen zu identifizieren und zu bewerten. Ausmaß und Fortschreiten der Schäden, abhängig von der klimatischen Situation, wurden untersucht. Die Fallstudien mussten folgende Aspekte erfüllen:

- Vergleichbare Materialgattungen: Gefasste / vergoldete Holzoberflächen oder Leinwandgemälde.
- Die Sammlung ist über einen längeren Zeitraum zugänglich oder eine ausreichende Zustandsdokumentation liegt bereits vor.
- Das Raumklima ist bekannt und eine unveränderte bauliche Situation besteht.

Basierend auf diesen Kriterien wurden ausgewählt:

- Die historische Ausstattung der Prunkräume in Schloss Linderhof.
- Die historische Ausstattung im Königshaus auf dem Schachen.
- Der Hochaltar der Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf.
- Der westliche Seitenaltar der Renatuskapelle in Lustheim/Schleißheim.

Das Mobiliar von Schloss Linderhof wurde sechs Monate lang restauratorisch untersucht, die Ausstattungen in Roggersdorf, der Renatuskapelle und dem Königshaus am Schachen wurden über einen Zeitraum von mehr als drei Jahren regelmäßig überprüft.¹³⁵ Hauptaugenmerk der restauratorischen Untersuchungen liegt auf den Fallstudien Schloss Linderhof und dem Königshaus auf dem Schachen. Beide beherbergen originale wandfeste Raumausstattungen aus dem 19. Jahrhundert, die immer am selben Ort geblieben sind. Jeglicher Einfluss durch Transport oder lokales Umstellen im Gebäude ist ausgeschlossen. Seit der Erbauung hat sich die klimatische Situation verändert. Die historischen Räume sind heute nicht mehr beheizt und die Anzahl der Besucher ist enorm gestiegen. Abgesehen vom Öffnen der Fenster zur Belüftung wurden jedoch keine weiteren Klimatisierungsstrategien verfolgt. Auf diese Weise sind klimatisch bedingte Schäden an der historischen Ausstattung eindeutig dem dort herrschenden Klima zuzuordnen. Herstellungstechnisch sind beide Ausstattungen wegen desselben Auftraggebers – König Ludwig II. – und des gleichen Fertigungszeitraums um 1870 sehr ähnlich. Somit ist ein Vergleich der Ausstattungen in Bezug auf ihren Erhaltungszustand möglich (vgl. 4.5). Im Unterschied zu Schloss Linderhof, das ganzjährig, jedoch besonders in den Sommermonaten eine extreme touristische Nutzung erfährt, hat das Königshaus am Schachen wegen seiner Lage in den Alpen weniger Besucher: Es ist nur zu Fuß und, witterungsbedingt, lediglich von Anfang Juni bis Ende September erreichbar. Die Gebäude führen wegen ihrer charakteristischen Bauweise zu unterschiedlichen Raumklimata, deren Auswirkungen auf die jeweilige Ausstattung verglichen werden können.

Der gefasste und vergoldete Hochaltar in der Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf steht im Unterschied zu den historischen Ausstattungen in Linderhof und dem Türkischen Saal, die überwiegend wandfest sind,

¹³⁵ Die Untersuchung der historischen Ausstattung von Schloss Linderhof, Königshaus am Schachen sowie der Renatuskapelle in Lustheim erfolgte mit freundlicher Unterstützung der Bayerischen Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen (BSV). Die Verwendung der Daten aus der Untersuchung von Schloss Linderhof wurde seitens der BSV genehmigt.

mit einigen Metern Abstand von den Außenwänden. Er wurde 2004 neu gefasst in der Kirche wieder aufgestellt. Dieser Zeitpunkt stellt nach Michalski einen „konservatorischen Nullpunkt“ dar.¹³⁶ Wegen der ungünstigen klimatischen Situation – insgesamt sehr hohe relative Luftfeuchte und starke klimatische Schwankungen – kam es bereits fünf Jahre nach dem Wiedereinbau zu ersten Schäden. Das Retabel von Roggersdorf ermöglichte, Untersuchungen, die sonst nur in einer Klimakammer machbar sind, am realen Objekt über einen längeren Zeitraum durchzuführen.

Der westliche Seitenaltar der Renatuskapelle in Lustheim ist die vierte Fallstudie. Die Kapelle wurde 2002 mit einer Temperierung ausgestattet und ist ein klimatischer Sonderfall dieser Betrachtung. Die Seitenaltäre, die für die Wiedereröffnung konserviert worden waren, befinden sich unmittelbar vor den in der Wand verlaufenden Heizrohren. Aufgrund des dort zu erwartenden Mikroklimas war die Untersuchung der Holzpaneele interessant. Dieses Beispiel zeigt, wie wichtig die ganzheitliche Sicht auf Raumschale und ausgestellte Objekte bei der Durchführung von restauratorischen Eingriffen ist.

Beschreibung der Untersuchung

Die Untersuchungen vor Ort wurden mit bloßem Auge sowie unterstützt durch Stirnlupe, USB-Mikroskop und zwei Tageslichtleuchten durchgeführt. Die Dokumentation der restauratorisch relevanten Details erfolgte fotografisch. Mit zeitlichem Abstand wurden die Oberflächendetails erneut fotografiert und Veränderungen mit Hilfe des Grafikprogramms Adobe Photoshop CS5® verglichen und ausgewertet.

Die parallel erfassten Klimadaten liefern Kenntnis über die Verteilung von Temperatur und relativer Luftfeuchte, sowie stündliche, tägliche und wöchentliche Schwankungen, denen die Ausstattung ausgesetzt ist. Für die vier Fallstudien liegen Raumklimamessungen über den Zeitraum von mindestens einem Jahr vor. Weiter wurde eine Analyse der Klimadaten hinsichtlich der Risiken für Schäden an Papier, Malerei auf Holz, Möbel, Skulpturen und allgemeinen mikrobiologischen Befall nach Martens durchgeführt und mit der restauratorischen Zustandsuntersuchung vor Ort abgeglichen.¹³⁷

136 Michalski 2007, p.15.

137 <http://www.monumenten.bwk.tue.nl>, Stand 23. September 2015.

4.1 Historische Ausstattung der Prunkräume in Schloss Linderhof

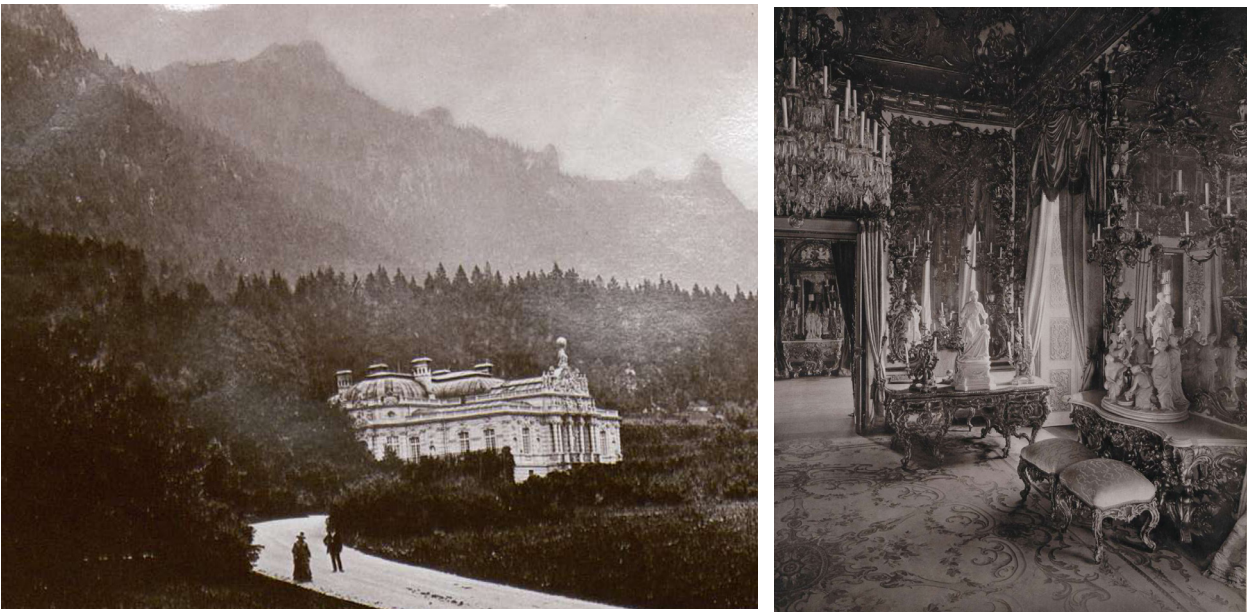


Abbildung 4.1:
 Schloss Linderhof, erbaut 1870–1886 von König Ludwig II, Architekt: Georg Dollmann.
 Durchschnittliche jährliche Besucherzahl: 500 000; starke Beanspruchung der Ausstattung.
 Links: Schloss Linderhof, Außenansicht (Ludwig Sailer, 1887); rechts: Fotografie des Spiegelsaals (Franz Hanfstaengl, ca. 1890).

Schloss Linderhof ist eine beliebte Touristenattraktion. Im Jahr 2011 besichtigten rund 450 000 Besucher das 1887 fertig gestellte Schloss von König Ludwig II. (1845–1886). Zur historischen Ausstattung gehören neben Deckengemälden Dekorationen aus vergoldetem Stuck und Schnitzarbeiten, Möbel, Gemälde, Spiegel, Keramik, Lüster und Textilien, wie bestickte Seidenbespannungen, Vorhänge und – bis 2008 – originale Fußbodenteppiche. Die neobarocke Ausstattung wurde bisher nur an einzelnen Stellen – z. B. wegen durch Wassereintrag entstandenen Schäden – überarbeitet und restauriert. Niemals wurde der Standort verändert. Vor dem Hintergrund einer sich über die Jahre kaum verändernden Klimasituation im Schloss kann die restauratorische Bestands- und Schadenserfassung eine Grundlage bilden, kausale Zusammenhänge zwischen Klimaschwankungen und Schadensphänomenen an unterschiedlichen Materialkombinationen zu klären. Ein 1992 erstelltes Raumbuch¹³⁸ bildete die Grundlage für die Erfassung der klimatisch bedingten Zustandsänderungen der Ausstattung.

Im Rahmen der Bestands- und Schadenserfassung wurden die Schauräume im Obergeschoss und im Erdgeschoss, das Äußere und Innere Vestibül, Treppenhaus, Dienerschaftszimmer sowie das Bad untersucht.¹³⁹

¹³⁸ Kriewitz et al. 1992/93. Das Raumbuch wurde von der BSV in Auftrag gegeben.

¹³⁹ Diese Untersuchungen wurden im Auftrag der BSV von November 2011 bis April 2012 von der Autorin, unterstützt durch Dipl. Restauratorin Susanne Raffler, durchgeführt.

4.1.1 Raumklima und Risikoanalyse

Die klimatischen Bedingungen sind in Schloss Linderhof ganzjährig extrem. Durch den Standort am Alpenrand ist das Außenklima geprägt von langen Schnee- und Frostzeiten im Winter sowie schnellen und starken Wetterwechseln im Sommer. Daraus resultieren große Temperaturspannen, von unter -15 bis über 30 °C.¹⁴⁰ Die relative Luftfeuchte ist das ganze Jahr über sehr hoch, 2010 lag sie im Mittel bei $90,8$ % rF.¹⁴¹ Das Klima im Innenraum folgt mit einer geringfügigen Dämpfung dem Außenklima. Daher sind Minusgrade in den Schauräumen nicht selten. Im Paradeschlafzimmer, dem kältesten Raum im Schloss, betrug die Temperatur im Winter 2012 bis -6 °C bei gleichzeitig hoher relativer Luftfeuchte von maximal 64 %. Die täglichen Schwankungen sind besonders im Sommer durch die geöffneten Fenster hoch. Innerhalb von 24 Stunden können Feuchteschwankungen von über 25 % rF auftreten.

Beeinflusst von der Gebäudehülle, der jeweiligen Lage der Räume, dem solarem Eintrag, Wind und auch der Nutzung, kann das Innenraumklima in verschiedenen Bereichen des Schlosses sehr unterschiedlich sein. Für die Betrachtung des Raumklimas in den Schauräumen des Schlosses wurden exemplarisch der Spiegelsaal im Süden (Abbildung 4.2, 4.3) und das Lila Kabinett, nordwestlich gelegen (Abbildung Anhang C1 – 3), ausgewählt. Die Messdaten wurden für den Zeitraum von Januar 2011 bis Januar 2012 ausgewertet.

Im Spiegelsaal ist die relative Luftfeuchte im Mittel bei 56 %; 5 % der Werte liegen unterhalb von 45 % rF, 95 % der Werte unter 67 % rF. Die mittlere Temperatur beträgt 14 °C, der niedrigste Wert 0 °C, der höchste 27 °C.

Die relative Luftfeuchte im Lila Kabinett liegt im Mittel bei 66 % rF; der geringste Wert ist 39 % rF, das Maximum liegt bei 89 % rF (Jahresspannweite: 40 % rF). Die Temperatur ist im Mittel bei 12 °C, das Minimum $-2,2$ °C, der höchste Wert $26,3$ °C (Jahresspannweite: $28,5$ °C).

Wie unterschiedlich das Raumklima in zwei verschiedenen Räumen eines Gebäudes sein kann, zeigen die Liniendiagramme der Temperatur, sowie der relativen und absoluten Luftfeuchte von Spiegelsaal und Lila Kabinett (Abbildung 4.4). Die graue Linie stellt die Abweichung zwischen Spiegelsaal und Lila Kabinett dar. Die relative Luftfeuchte ist im Lila Kabinett im Mittel um $9,7$ % rF höher, im Spiegelsaal ist die Temperatur im Mittel um 2 K wärmer.

Das Klima im Spiegelsaal entspricht weitgehend den Vorgaben von Thomson für ein Museum der Klasse 2, so dass hier von geringem Schadensrisiko auszugehen ist (Kapitel 2.1.4). Nach der Prognose von Martens besteht ebenfalls kein Risiko für klimatisch bedingte Schäden (Abbildung 4.5 oben). Das Lila Kabinett weicht, was die absoluten Werte betrifft, deutlich von den nach Thomson empfohlenen Werten ab. Nach ASHRAE ist dieser Raum der Kategorie D zuzuordnen.¹⁴²

Nach Martens besteht für die Messdaten aus der Raummitte ein Risiko für den Träger von Skulpturen und Holztafelgemälden (Abbildung 4.5 unten), für die Messdaten der Wandoberfläche schlägt der „lifetime multiplier“ (2.3.3) an, während die Bildschicht der Gemälde keinem Risiko ausgesetzt ist (Abbildung Anhang C 4). In Tabelle 4.1 sind die stündlich und täglich auftretenden Schwankungen der relativen Luftfeuchte im Spiegelsaal und dem Lila Kabinett für den Zeitraum vom 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012 aufgelistet. Die Auswertung basiert auf in der Raummitte gemessenen Daten. Kurzfristige Schwankungen weichen in bei-

¹⁴⁰ Bichlmair 2012, S. 38.

¹⁴¹ Ebd., S. 38.

¹⁴² ASHRAE 2007, 21.13; Holl 2013, pp. 289–300.

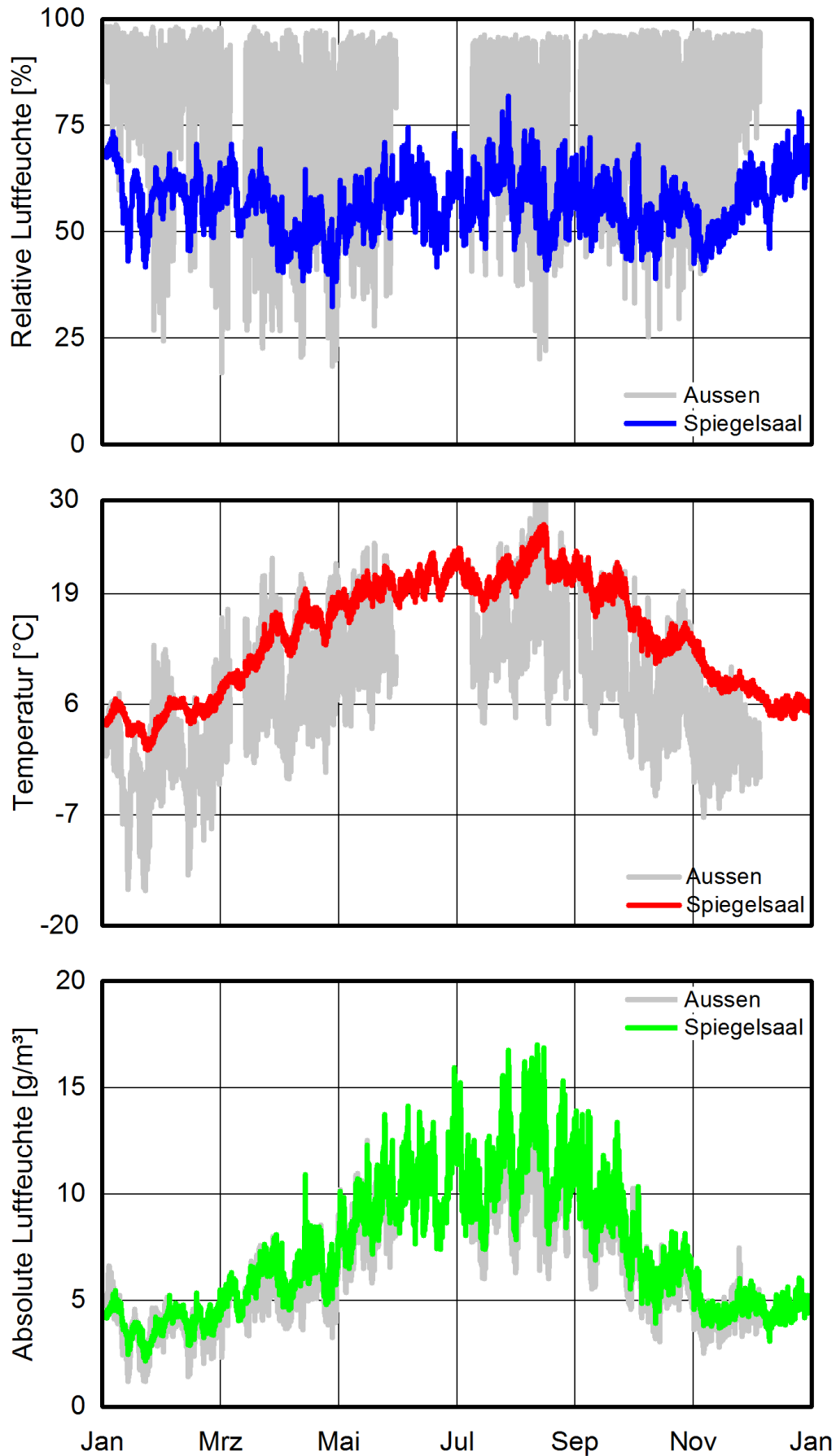


Abbildung 4.2:
Liniendiagramm für Temperatur, relative und absolute Luftfeuchte des Spiegelsaals verglichen mit den Außenklimadaten.
Zeitraum: 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012.

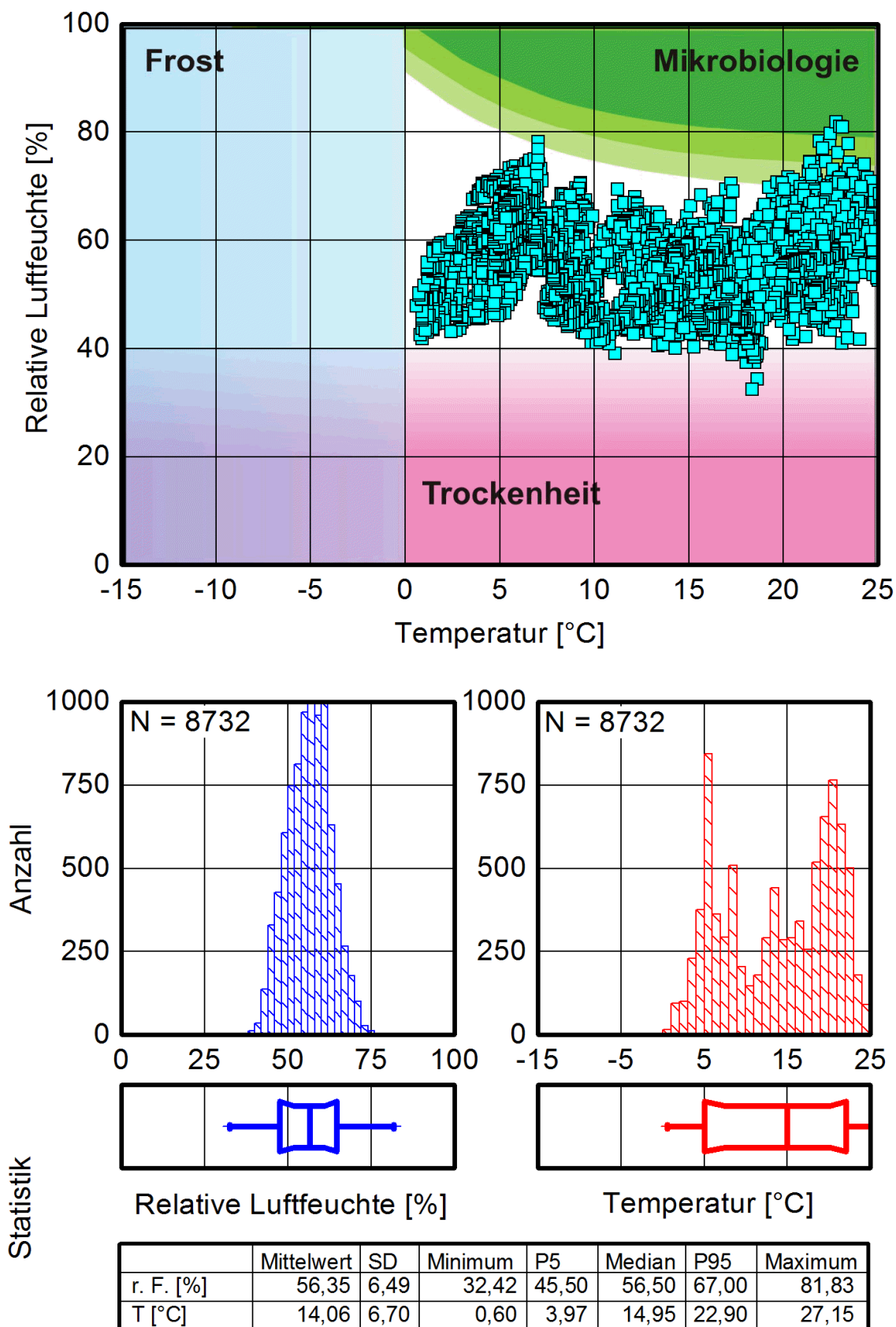


Abbildung 4.3: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte (unten) des Spiegelsaals. Zeitraum: 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012.

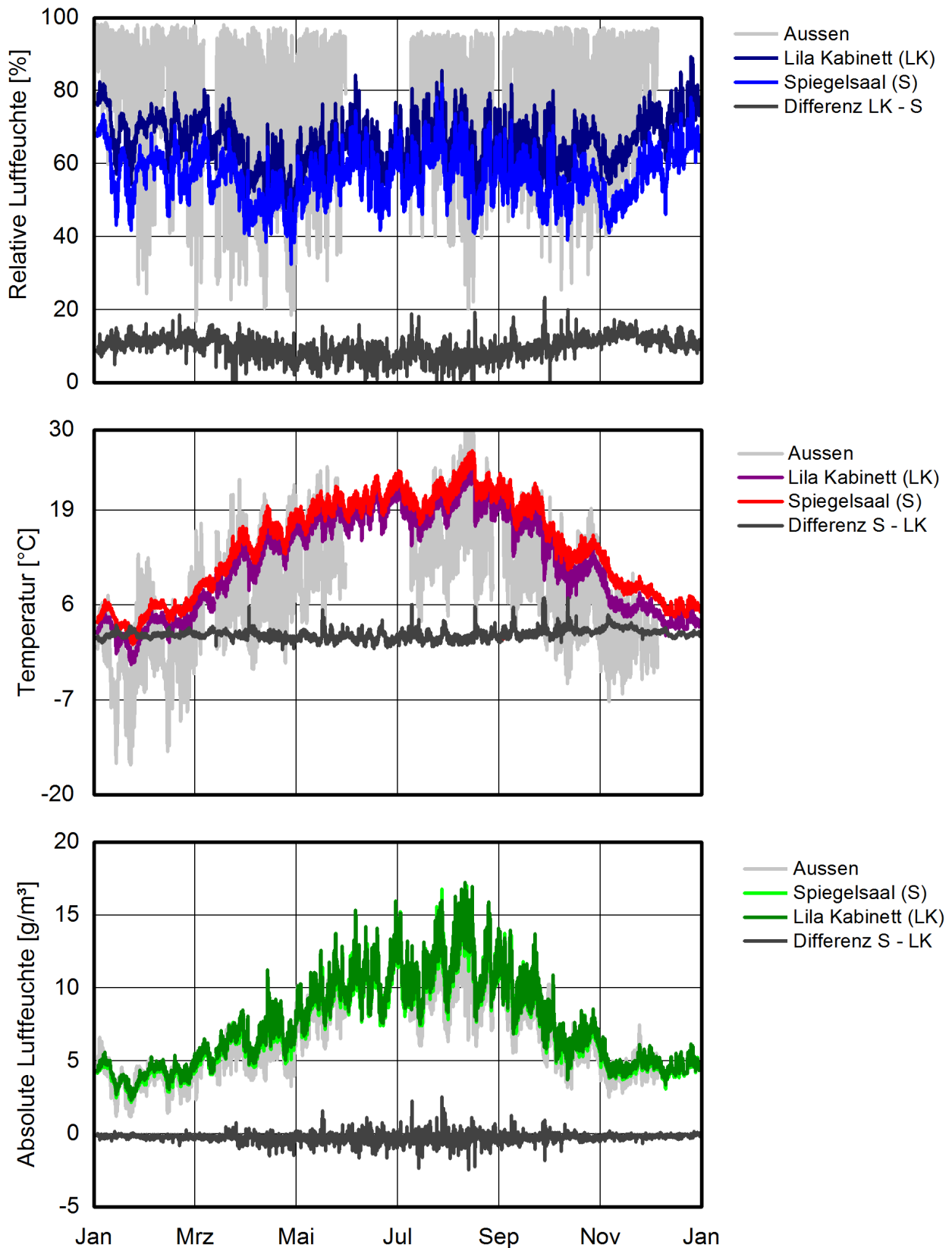


Abbildung 4.4:

Auswertung der relativen Luftfeuchte (oben), Temperatur (Mitte) und absoluten Luftfeuchte für den Spiegelsaal, das Lila Kabinett und das Außenklima. Die dunkelgraue Linie stellt die Abweichung der Messdaten beider Räume im Zeitraum von Januar bis Dezember 2011 dar.

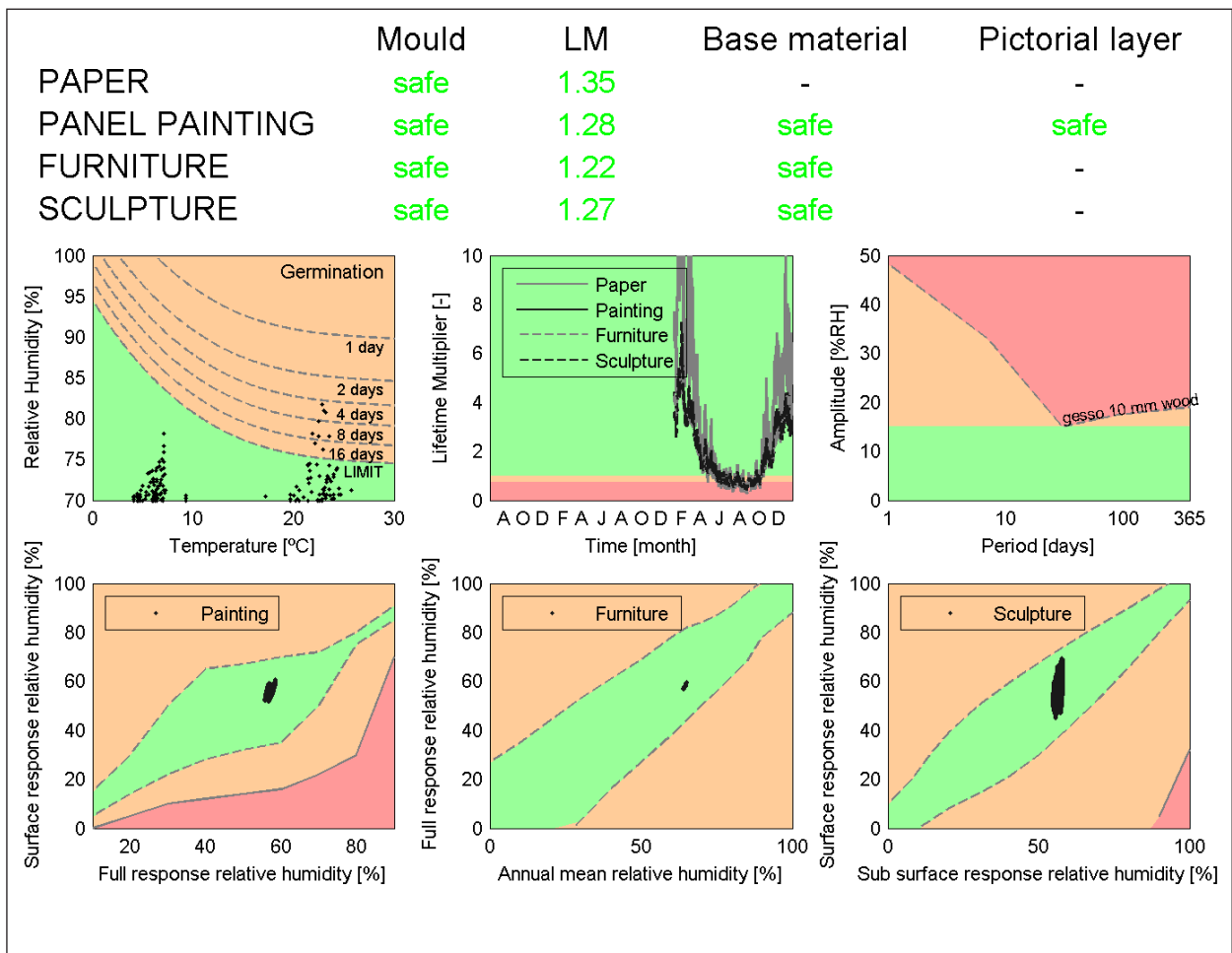
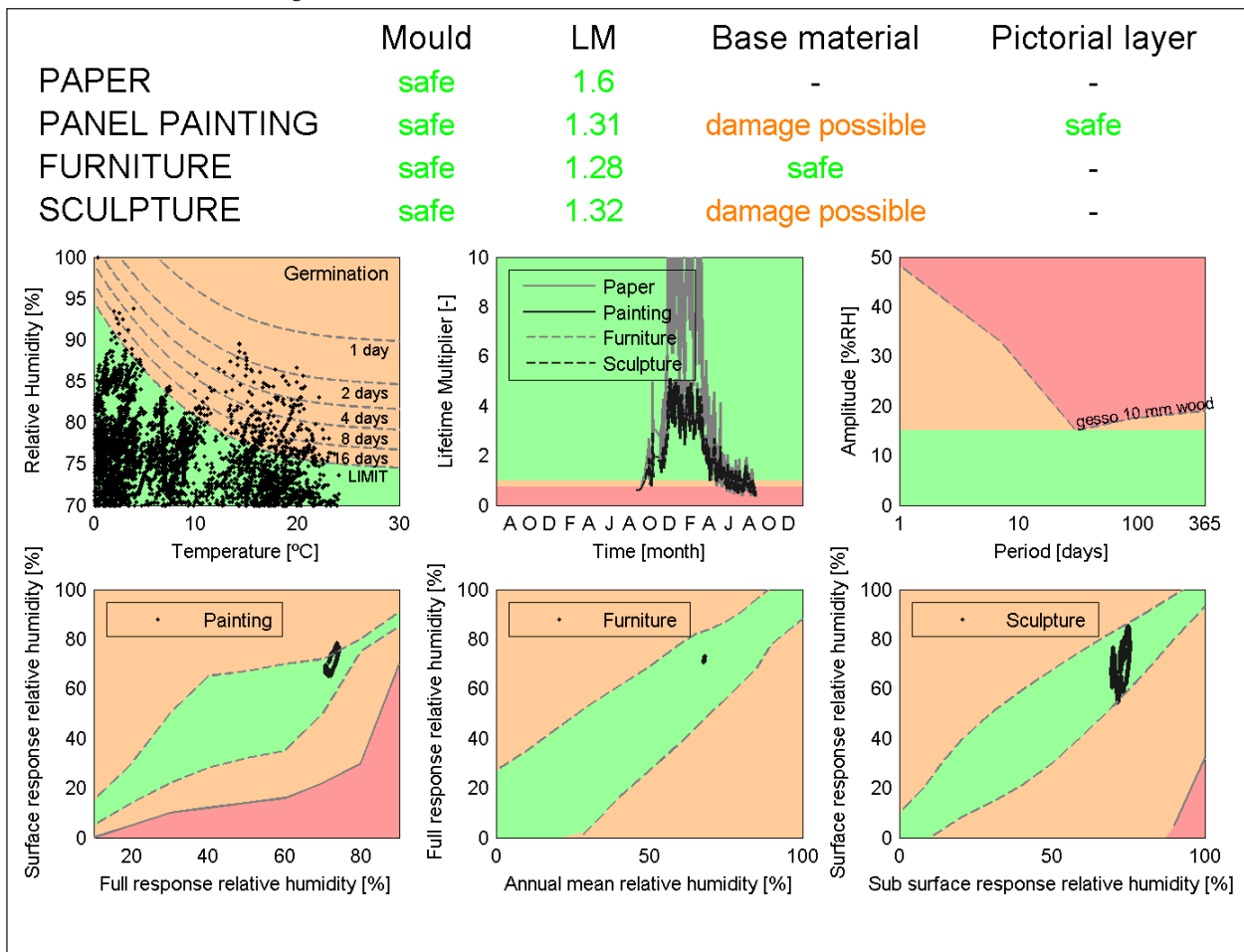


Abbildung 4.5:

Risikoprognosen nach Martens für den Spiegelsaal (oben) und das Lila Kabinett (unten) basierend auf den Klimadaten von Januar bis Dezember 2011, gemessen in Raummitte.



den Räumen kaum voneinander ab. Die stündlichen Schwankungen, im Mittel bei 1,5 % rF, sind als gering einzustufen, erreichen jedoch maximal 13,5 % rF im Spiegelsaal und 19 % rF im Lila Kabinett. Die täglichen Schwankungen liegen im Mittel bei 8,9 % rF und entsprechen damit den Vorgaben nach ASHRAE A von ± 5 % rF. Maximalwerte von über 27 % rF treten in beiden Räumen auf. In Abhängigkeit von den lokalen Wetterverhältnissen können Schwankungen über mehrere Tage andauern (Kapitel 2.3.3).¹⁴³ Die Auswertung des Oberflächensensors nahe der Außenwand weist höhere tägliche Schwankungen der relativen Luftfeuchte auf, wie Tabelle 4.2 zeigt. Allerdings liegt der Mittelwert der täglichen Schwankungen mit 9,1 % rF nach wie vor im Rahmen der Vorgaben von ± 5 % rF, was eine absolute Abweichung von 10 % rF bedeutet.

Tabelle 4.1:

Stündliche* und tägliche** Schwankungen der relativen Luftfeuchte für das Lila Kabinett und den Spiegelsaal im Zeitraum vom 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012.

	Minimum	P10	P25	Median	Mittelwert	P75	P90	P99	Maximum
Spiegelsaal Stündliche Schwankungen der rF [%] (N=5462)	0	0	0,5	0,5	1,5	2,5	4	8	13,5
Lila Kabinett, Stündliche Schwankungen der rF [%] (N=5462)	0	0	0,5	0,5	1,6	2	4,5	8,5	19
Spiegelsaal Tägliche Schwankungen der rF [%] (N=362)	1,6	4	6,0	8,5	8,9	11,25	14,67	19,67	27,75
Lila Kabinett Tägliche Schwankungen der rF [%] (N=362)	0,6	4,3	5,8	8,9	8,0	11,3	14,2	22,4	27,6

* Die stündlichen Schwankungen wurden aus Messdaten in 5-minütiger Taktung ermittelt.

** Die täglichen Schwankungen wurden aus Stundenmittelwerten analysiert.

Tabelle 4.2:

Auswertung der stündlichen und täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte für den Oberflächensensor im Lila Kabinett von 1. August 2010 bis 31. Juli 2011.

	Minimum	P10	P25	Mittelwert	Median	P75	P90	P99	Maximum
Lila Kabinett Oberflächenmessung Stündliche Schwankungen der rF [%] (N=5457)	0	0	0	1,05	0,2	0,9	3,3	11,9	24,9
Lila Kabinett Oberflächenmessung Tägliche Schwankungen der rF [%] (N=356)	0,9	3,8	5,2	9,1	8,4	12,0	15,6	23,4	25,7

Kilian stellt heraus, dass insbesondere geringe Luftwechselraten die Klimastabilität eines Raumes maßgeblich beeinflussen.¹⁴⁴ Die Luftwechselraten der einzelnen Räume im Obergeschoss variieren aufgrund der unterschiedlichen Lüftungssituation zwischen $0,26 \text{ h}^{-1}$ im Paradeschlafzimmer und $0,54 \text{ h}^{-1}$ im Spiegelsaal.¹⁴⁵ Nach Holmberg ist ein Luftwechsel unter 0,5 als exzellent, unter 1 als gut zu bewerten.¹⁴⁶

143 Bichlmair et al. 2013, pp. 429–440.

144 Kilian 2013, S. 159 f.

145 Die Luftwechselformung erfolgte zwischen dem 6. und 22. September 2010, Bichlmair 2010, S. 74 ff. Da im Paradeschlafzimmer die Fenster geschlossen bleiben, ist die Luftwechselrate im Nordtrakt geringer als im Süden.

146 Holmberg 1997.

4.1.2 Erhaltung der Ausstattung

Beschreibung der Untersuchung

Zur Beurteilung der Schäden und ihren Änderungen im zeitlichen Verlauf wurde in erster Linie die Methode des Vergleichs angewendet, wie von Michalski bereits 1996 empfohlen.¹⁴⁷ Die Erhaltung der historischen Ausstattung, beschrieben im 1992 gefertigten Raumbuch, wurde mit dem heutigen Zustand abgeglichen. Mikrobieller Befall als einer der Indikatoren für klimatisch bedingte Schäden wurde gezielt untersucht. Soweit es die Position des Ausschnitts zuließ, wurden die Fotodetails von 1992 erneut fotografiert. Mit Hilfe des Programms Adobe Photoshop® CS 5 wurden beide Aufnahmen übereinander gelegt, entzerrt und miteinander verglichen, um so den Fortgang der Schädigung sichtbar zu machen (Abbildungen 4.6, 4.7, 4.16).

Gefasste und vergoldete Holzoberflächen

Lockerungen und Substanzverluste von Grundierung und Vergoldung sowie Rissbildung und Fugenöffnungen im Holz sind besonders an den vergoldeten Holzoberflächen zu finden. Es handelt sich dabei eindeutig um klimatisch bedingte Schäden.

Starke Substanzverluste sind an der gesamten Fassung der Innen- und Außenseiten der Fensterläden (Abbildung 4.7), an den vergoldeten Holzornamenten des Baldachins im Audienzimmer, den Holzvertäfelungen im Speisezimmer, sowie dem Westlichen und Östlichen Gobelzimmer festzustellen. Einige Fehlstellen sind laienhaft mit Bronzefarbe eingetönt,¹⁴⁸ neuere Ausbrüche nicht mehr übermalt. Daran ist deutlich sichtbar, dass im Laufe der Zeit weitere Substanzverluste hinzugekommen sind (Abbildung 4.8). Die Substanzverluste an den Fensterläden sind wohl nicht allein aufgrund von klimatischen Schwankungen entstanden. Die mechanische Belastung durch das tägliche Öffnen und Schließen trägt dazu bei, dass sich lockere Fassung schneller ablöst. Dennoch sind überwiegend klimatische Schwankungen die Ursache des Ablösens der Fassung vom Untergrund. Weiter unterliegen besonders die Fensterläden hohen klimatischen Schwankungen, da das Außenklima unmittelbar wirkt (geringe Pufferung durch Einfachverglasung).

Gesandelte, vergoldete Oberflächen weisen besonders starke Substanzverluste auf (Abbildung 4.9). An lokalen Stellen der vergoldeten Holzoberflächen ist eine optische Veränderung, ähnlich der von Frühschwundrisen, festzustellen. Es ist zu vermuten, dass das Anlegemittel des Blattgoldes, etwa Schellack, bei hoher Feuchtigkeit (Kondensfeuchte?) angelöst wurde und sich das Blattgold durch die Oberflächenspannung inselartig zusammen gezogen hat (Abbildung 4.9, 4.10).¹⁴⁹

Geringere Ausbrüche und wenige Risse sind dagegen an der wandfesten Ausstattung im Paradeschlafzimmer zu finden (Abbildung 4.11). Die Ausstattung dort wurde erst nach dem Tod des Königs fertiggestellt und unterscheidet sich optisch und gestalterisch von den anderen Räumen. Die matt vergoldeten Ornamente wurden vermutlich mit ölhaltigem Bindemittel als Anlegemittel ausgeführt, welches unempfindlicher gegenüber klimatischen Schwankungen ist.

147 Michalski 1996, p. 29.

148 Bis in die 80er Jahre führten Schlossführer kleinere Ausbesserungen an der Ausstattung selbst aus.

149 Schramm 1995, S. 107.

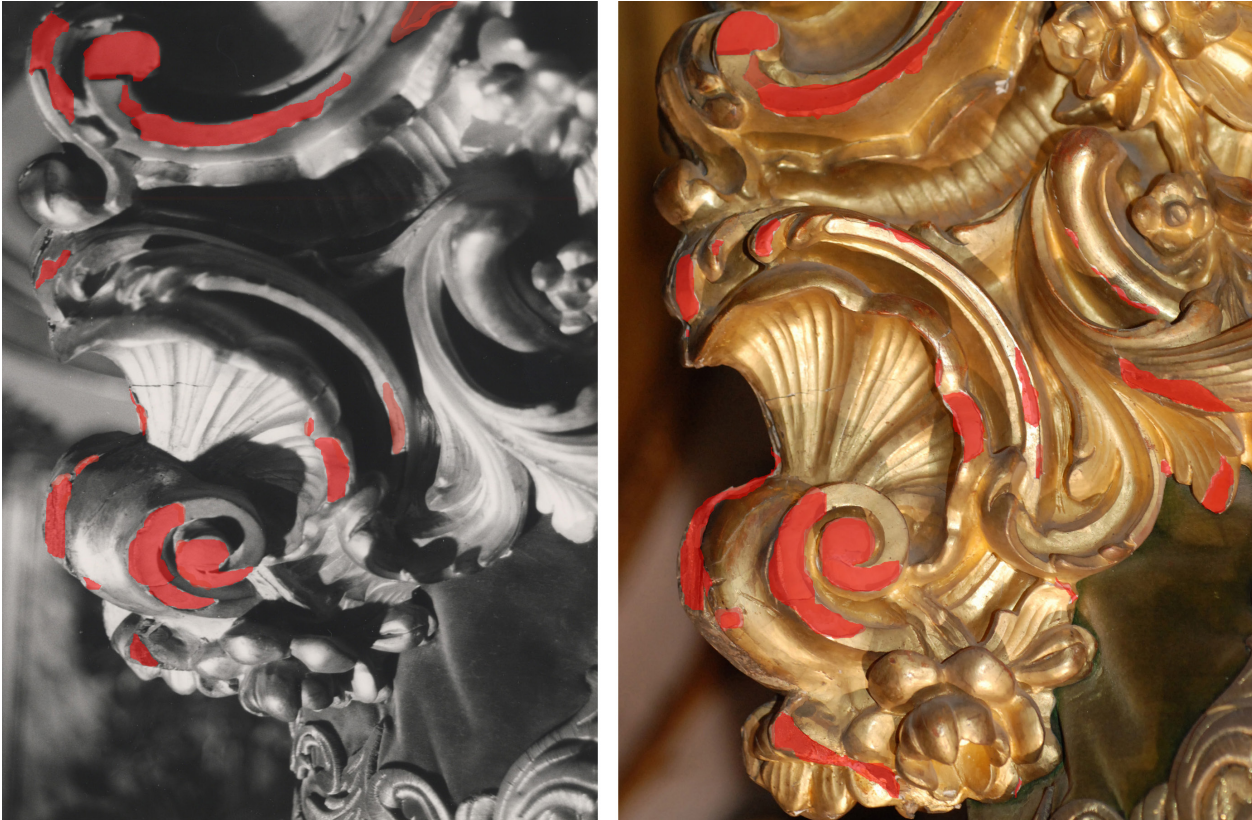


Abbildung 4.6:
Vergleich des Zustands der historischen Ausstattung in Linderhof am Beispiel eines vergoldeten Holzornaments im Audienzimmer, 1992 (links) und 2012 (rechts). Die Fehlstellen sind rot markiert.



Abbildung 4.7:
Vergleich der Zustandsänderung 1992 (links) und 2012 (rechts) an versilberten Holzornamenten des Fensterladens im Gelben Kabinett. Die Blattmetallaufgaben sind 2012 größtenteils verloren.



Abbildung 4.8:
Ausgebesserte und neue Ausbrüche in vergoldeten Holzornamenten.



Abbildung 4.9:
Insbesondere gesandelte Vergoldungen weisen starke Lockerungen und Substanzverluste auf. In den Glanzvergoldungen sind lokale Oberflächenveränderungen ähnlich Frühschwundrissen sichtbar (Westliches Gobelinzimmer).

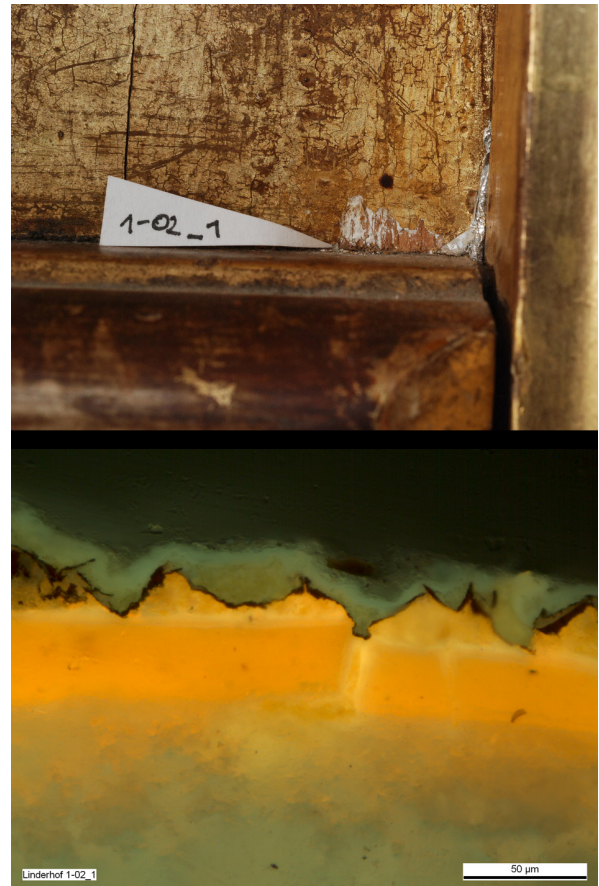


Abbildung 4.10:
Querschliffuntersuchung (unten) der „Frühschwundrisse“ mit Befundstelle (oben) im Spiegelsaal.



Abbildung 4.11:
Vergoldete Holzornamente der wandfesten Ausstattung im Paradeschlafzimmer haben geringe Lockerungen und Substanzverluste.



Abbildung 4.12:
Schimmelbildung auf dem Überzug (Leim?) an vergoldeten Pfosten des Paradebetts.



Abbildung 4.13:
An Außenwänden montierte Leinwandgemälde sind verwölbt (Audienzzimmer).



Abbildung 4.14:
Partielle Firniskrepiierungen an Leinwandgemälden durch direkten Kontakt mit Feuchtigkeit (Supraportengemälde, Rosa Kabinett).



Abbildung 4.15:
Senkrecht verlaufende Substanzverluste im Leinwandgemälde aufgrund von direkter Feuchteinwirkung (Supraportengemälde, Blaues Kabinett).



Abbildung 4.16:
Vergleich des Zustands 1992 (oben) und 2012 (unten) an vergoldeten Rücklagen der nördlichen Balkontür (Audienzzimmer, Westwand). Verstärkte Abplatzungen und Lockerungen der Sandelung durch ein Mikroklima, das sich bildet, wenn die Sonne über die Fläche wandert.

Leinwandgemälde

Der Zustand der Leinwandgemälde ist unterschiedlich: Die Gemälde, die an einer Außenwand hängen, sind stark verwölbt (Abbildung 4.13). Die Supraportengemälde hingegen zeigen geringere Verwölbungen. Diese, wie auch partielle Lockerungen und Substanzverluste an einigen Gemälden, sind nur indirekt klimatisch zu begründen. Sie entstanden durch den Eintrag von Feuchtigkeit aufgrund von Undichtigkeiten im Dach (z. B. im Rosa und Blauen Kabinett) und verursachen verstärkte Craqueléebildung, meist senkrecht verlaufende Fehlstellen in der Malerei (Abbildung 4.15), sowie Trübungen im Firnis (Abbildung 4.14).

Die Wassereinträge häuften sich nach der Erneuerung des Kupferdachs 2003 und 2004, sind jedoch nur dort dokumentiert, wo ein größerer Schaden auftrat und konservatorische Maßnahmen (Notsicherung) ergriffen wurden, etwa an der Westwand im Paradschlafzimmer, oder an der Südwestwand im Lila Kabinett.

Das *Risiko der Schimmelbildung* ist bei konstant hoher relativer Luftfeuchte groß. In den Schauräumen wurde an zahlreichen Stellen mikrobiologischer Befall festgestellt. Betroffen sind neben den verglasten Grafiken in den Kabinetten besonders die vom Besucherverkehr abgeschotteten, vergoldeten Oberflächen, wie das Paradebett hinter der Balustrade im Schlafzimmer (Abbildung 4.12) und die vergoldeten Ornamente der tagsüber eingeklappten Fensterläden. Außerdem sind die Wandflächen hinter bzw. neben Türen, z. B. zwischen Westlichem Gobelinzimmer und Gelbem Kabinett, befallen. Dort entsteht aufgrund der geringen Luftbewegung ein Mikroklima. Die Schimmelbildung wird bei den Beschreibungen 1992/93 von Mayrhofer/Kriewitz exemplarisch durch Fotos belegt, bei den Maßnahmenempfehlungen jedoch nicht explizit aufgeführt. Die aktuelle Untersuchung betrachtete verstärkt die Schimmelbildung als einen Schadensprozess, der aus lang anhaltender hoher relativer Luftfeuchte resultieren kann. Die biologische Untersuchung von drei Proben, entnommen im März 2012, ergab keinen aktiven mikrobiologischen Befall.¹⁵⁰

Das Risiko klimatisch bedingter Schäden ist aufgrund der anhaltend hohen Luftfeuchte vorhanden. Wie erwähnt, liegen klimatisch bedingte Schäden selten alleine vor, sondern gehen mit weiteren Faktoren einher. Auch Licht kann ein Mikroklima verursachen, das die Ausstattung lokal schädigt. Als Beispiel ist hier die räumlich begrenzte Ausbildung von Lockerungen und Substanzverlusten der gesandelten Rücklage eines Fensterladens im Audienzimmer zu nennen (Abbildung 4.16). Wie stark die Temperaturunterschiede sein können, wenn die Sonne über ein Kunstwerk wandert, ist in 4.3 am Beispiel eines Leinwandgemäldes beschrieben.

¹⁵⁰ Die Probenahme erfolgte, indem ein Stück Tesafilm auf die befallene Oberfläche aufgeklebt, abgezogen und auf einen Objektträger fixiert wurde. Biologin Anna Renzl, Fraunhofer-Institut für Bauphysik führte an diesen Proben eine mikroskopische Untersuchung durch. Auch inaktiver Schimmelfall hat eine allergene Wirkung, <http://www.binker.de/schimmelpilze.htm>, Stand 8. Oktober 2015.

4.1.3 Zusammenfassung

So unterschiedlich die gemessenen Klimadaten in den einzelnen Räumen sind, so wenig abweichend ist der Erhaltungszustand. Klimatisch bedingte Schäden sind in allen Räumen im Obergeschoss zu finden. Im Spiegelsaal sind in den Wandvertäfelungen vermehrt Risse festzustellen. Im Lila Kabinett sind Lockerungen und Ausbrüche in der vergoldeten Fassung zu finden, sowie Schimmelbefall an der unteren Leiste der Tür zum Audienzzimmer. Die Erneuerung der Seidenbespannung kann neben Lichteintrag auch auf die Auswirkung von ungünstigem Klima auf empfindliche Materialien, wie Textilien hindeuten.¹⁵¹

Eine individuell variierende Schädigung aufgrund von unterschiedlichen klimatischen Bedingungen wurde nicht festgestellt. Insbesondere die wandfeste Ausstattung im Paradeschlafzimmer und das Paradebett, die offensichtlich den schlechtesten klimatischen Bedingungen unterliegen, sind gut erhalten. Schäden im vergoldeten Stuck in den Hohlkehlen sind durch Wassereintrag entstanden. Für die vorgeschädigten Oberflächen sind die klimatischen Schwankungen nicht zuträglich. Immer wieder fallen gelockerte Stücke ab.

Insgesamt ist die Ausstattung seit der letzten Untersuchung vor 20 Jahren um 1 – 2 % stärker geschädigt. Dieser auf den ersten Blick geringe Prozentsatz ist in Hinblick auf die Erhaltung der Ausstattung auch für die nächsten Generationen sehr ernst. Die Teppiche wurden bereits wegen eines Schädlingsbefalls 2008 ausgebaut, Vorhänge und Seidenbespannungen teilweise repliziert bzw. im Speise- und Paradeschlafzimmer aufgrund von starker Beschädigung ausgelagert.

Um die klimatische Situation im Schloss zu verbessern, soll eine Lüftungsanlage eingebaut werden. Da lediglich das Feuchteniveau gesenkt und die kurzfristigen Schwankungen reduziert werden sollen, wird der Einsatz einer minimalinvasiven Anlage, die einen geringeren Eingriff in die Bausubstanz bedeutet, getestet. Im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes wird die Auswirkung des Einbaus einer Lüftungsanlage auf die Ausstattung von der Autorin untersucht (Laufzeit: März 2013 – November 2016).

Um die Erhaltung von Kunstwerken in unbeheizten historischen Gebäuden zu beurteilen, gibt es bisher keinen Klimastandard, der unter Berücksichtigung jeglicher Materialvielfalt eindeutig angewendet werden kann. Es stehen unterschiedliche Klimaempfehlungen zur Verfügung, die – abhängig davon, wie die Schadensmechanismen gewichtet sind – zu unterschiedlichen, oft sogar konträren Einschätzungen führen. Der Vergleich mehrerer Klimaempfehlungen führte bei der Analyse der Raumklimadaten von Schloss Linderhof zu keinem eindeutigen Ergebnis bezüglich der Risikobewertung.¹⁵²

151 Es ist nur die Erneuerung der Seidenbespannung im Lila Kabinett belegt, nicht die Gründe dafür. Holl et al. 2012.

152 Holl 2013, pp. 294 ff.

4.2 Der Türkische Saal im Königshaus auf dem Schachen



Abbildung 4.17:

Königshaus auf dem Schachen, erbaut 1869–1871 von König Ludwig II., Architekt: vermutlich Georg Dollmann.

Durchschnittliche Besucherzahl: ca. 15 000 in vier Monaten; historische Ausstattung trotz starkem klimatischen Einfluss in gutem Zustand. Links: Königshaus am Schachen, Außenansicht; rechts: Türkischer Saal im Obergeschoss.

Das Königshaus auf dem Schachen (Abbildung 4.17, links) liegt auf einem 1.876 Meter hohen Bergsporn vor dem Feldmassiv der Dreitorspitze im Wettersteingebirge (nahe Garmisch-Partenkirchen). Erreichbar ist es für Besucher ausschließlich zu Fuß über eine ca. dreistündige Wanderung. Durch die exponierte Lage ist das Gebäude zu allen Jahreszeiten der rauen Witterung ausgesetzt. Teilweise liegt bis in den Juni hinein Schnee und auch in den Sommermonaten schneit es gelegentlich, es kann jedoch auch sehr heiß werden. Der Standort ist geprägt vom schnellen Wechsel des Wetters. Umso bemerkenswerter ist die gute Erhaltung der Ausstattung des prunkvoll eingerichteten Türkischen Saales im Obergeschoss des Gebäudes, die aus unterschiedlichsten Materialien wie Textilien (Divane, Vorhänge, Teppiche), gefassten und vergoldeten Holzoberflächen, sowie Tapeten besteht. Für die Untersuchung der klimatisch bedingten Schäden wurden die Leinwandgemälde und Grafiken im Erdgeschoss sowie die gefassten und vergoldeten Holzoberflächen im Türkischen Saal untersucht.

Bereits in der Diplomarbeit (Holl 2008) wurde die Ausstattung des Türkischen Saales (Abbildung 4.17, rechts) auf ihre Erhaltung hin untersucht. Vorhandene Schäden wurden erfasst, in Materialgattungen aufgeteilt und nach ihrer wahrscheinlichen Entstehung kategorisiert. In den folgenden Jahren (2009 – 2012) wurde die Erhaltung der Ausstattung hinsichtlich klimatisch bedingter Veränderungen weiter kontrolliert.

Die Wandabwicklungen und Deckenfelder sind restauratorisch in Hinblick auf klimatisch bedingte Veränderungen am relevantesten, da diese seit ca. 130 Jahren nicht wesentlich verändert wurden und seit der Erbauung den klimatischen Bedingungen direkt ausgesetzt sind. Für die damalige Untersuchung wurden deshalb exemplarische Wandabwicklungen mit einem Gerüst kartiert. Da für die weiterführenden Untersuchungen kein Gerüst zur Verfügung stand, wurden leichter zugängliche Oberflächen begutachtet. Der Fokus lag auf den Wandvertäfelungen im Vorraum des Türkischen Saales, da er neben der leichteren Zugänglichkeit einige klimatisch bedingte Veränderungen aufzuweisen hat. Besonders die Kassettierungsfelder in Bodennähe zeigen Schäden.

4.2.1 Raumklima und Risikoanalyse

Die Auswertung der Klimadaten erfolgte hier für den Zeitraum vom 26. August 2010 bis 26. August 2011. Weitere Klimadatenauswertungen wurden durch Holl 2008 und Wehle 2010 und durchgeführt. Die Außenklimadaten sind aufgrund von Messdatenausfällen nicht für den gesamten Zeitraum vorhanden. Der Türkische Saal hat im Mittel eine relative Luftfeuchte von 65 %; das Minimum liegt bei 42,8 % rF, das Maximum bei 87,5 % rF. Damit wird eine Jahresspannweite von 44,8 % rF erreicht. Der Mittelwert der Temperatur beträgt 5,0 °C, der niedrigste Wert ist -13 °C, der höchste 24,1 °C (Jahresspannweite: 37,4 °C), (Abbildung 4.18, Anhang C 6). Damit entspricht das Raumklima im Türkischen Saal weitgehend den von Thomson für ein Museum der Klasse 2 geforderten Werten, mit Tendenz zu hoher Feuchtigkeit.

Im Erdgeschoss liegen die Werte für die relative Luftfeuchte im Mittel bei 70 % rF, der niedrigste Wert ist 50 % rF, der höchste 92,2 % rF (Jahresspannweite: 42,2 % rF). Die Temperatur beträgt im Mittel 4,6 °C, der Minimalwert -8,9 °C, der Maximalwert 19,3 °C (Jahresspannweite: 28,2 °C). Damit ist es im Erdgeschoss im Mittel um 5 % rF feuchter als im Türkischen Saal, jedoch tritt dort eine wesentlich geringere Temperaturspanne auf.

Nach dem Isoplethenmodell von Sedlbauer besteht in beiden Räumen ein geringes Risiko für Schimmelbildung (Abbildung Anhang C 5, C 7). Im Gegensatz dazu sind, laut der Prognose nach Martens, für die Klimadaten von Juni 2010 bis Juni 2011 für das Erdgeschoss und den Türkischen Saal keine Schadensrisiken vorhanden (Abbildung 4.19 oben und unten).

Das Raumklima im Königshaus wurde von September 2006 bis Juli 2013 messtechnisch untersucht. Im ersten Jahr war die relative Luftfeuchte im Mittel um 5 % rF niedriger als in den darauf folgenden Jahren und wurde damals wesentlich besser bewertet. Das veränderte Raumklima ist mit dem Außenklima zu begründen, das in den Jahren 2008 bis 2010 deutlich feuchter war als 2007.¹⁵³ Der direkte Einfluss des Außenklimas auf den unklimateisierten Innenraum ist deutlich sichtbar.

Die Auswertung der stündlichen, täglichen und wöchentlichen Schwankungen im Türkischen Saal für das Jahr 2006/2007 ist in Tabelle 4.3 zusammengefasst.¹⁵⁴

Tabelle 4.3:

Auswertung der stündlichen, täglichen und wöchentlichen Schwankung der relativen Luftfeuchte im Türkischen Saal von 1. Oktober 2006 bis 30. September 2007.

	Minimum	P10	P25	Median	P75	P90	P 99	Maximum
Stündliche Schwankung der rF [%] (N=8760)	0	0	0,1	0,3	0,7	1,2	3,2	21,2
Tägliche Schwankung der rF [%] (N=365)	0,9	2,1	3,5	4,9	7,5	11,2	18,6	21,2
Wöchentliche Schwankung der rF [%] (N=52)	5,6	9,6	11,5	16,4	20,4	24,1	38,1	38,1

Die stündlichen Schwankungen sind mit 0,3 % rF Medianwert sehr gering, die täglichen mit dem Median von ca. 5 % rF entsprechen ebenfalls den Vorgaben aus der Literatur. Für wöchentliche Schwankungen gibt es keine direkten Literaturempfehlungen. Da ein saisonales Gleiten nach ASHRAE A als nicht schädigend angesehen wird, sind diese Schwankungen ebenfalls als ungefährlich einzustufen.

Für den Vergleich der klimatischen Situation von Erdgeschoss und Türkischem Saal im Obergeschoss wurde der Zeitraum vom 26. August 2010 bis 26. August 2011 betrachtet (Tabelle 4.4). Die täglichen Schwankungen beider Räume unterscheiden sich deutlich: Im Erdgeschoss liegen sie im Mittel bei 6,2 % rF, im Türkischen Saal bei 2,5 % rF. Diese Auswertung bestätigt die Ergebnisse der Untersuchungen zum Luftwechsel.

¹⁵³ Wehle et al. 2011, S. 92 ff.

¹⁵⁴ Wehle 2010, S. 114 ff.

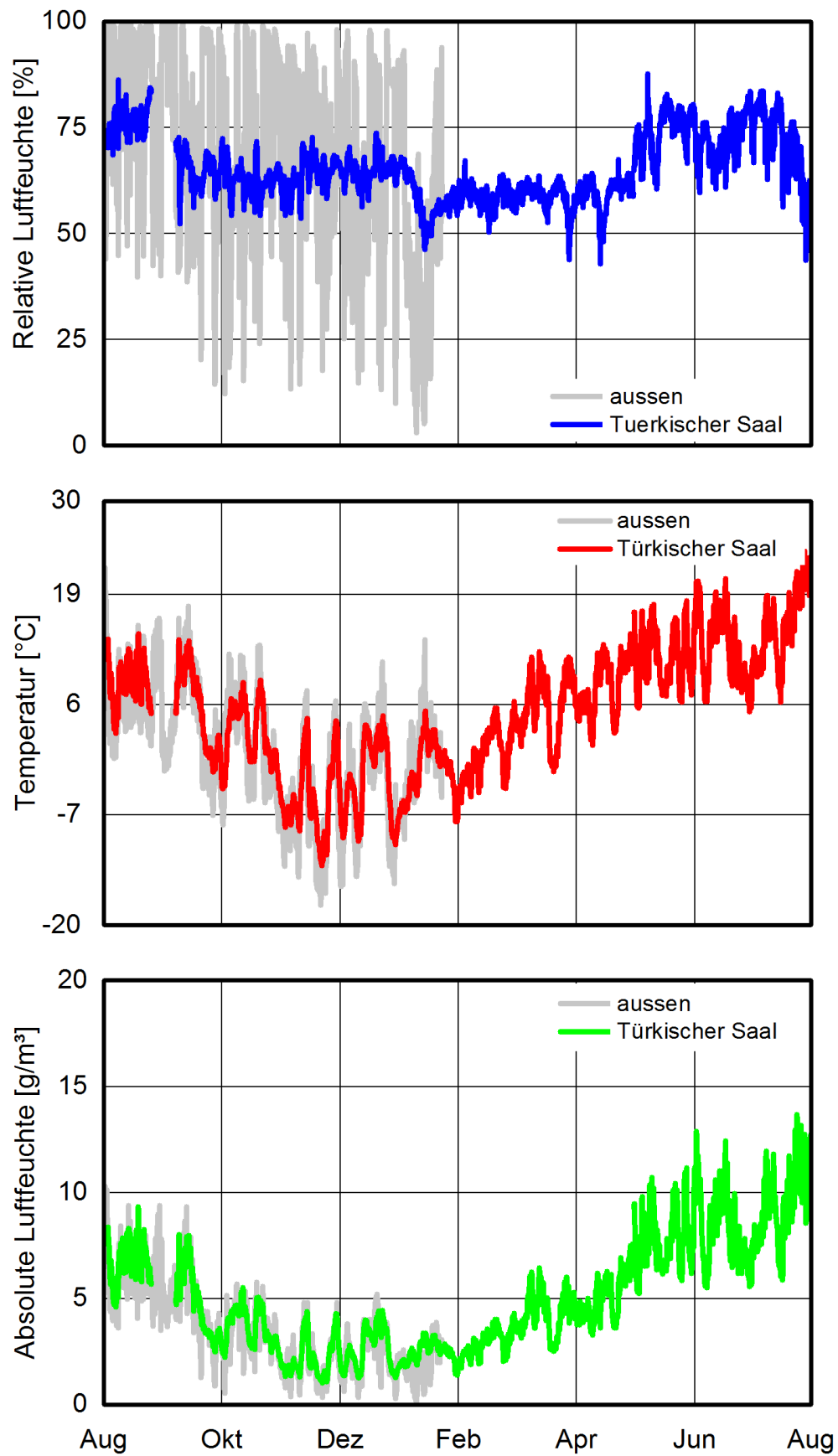


Abbildung 4.18:
Liniendiagramm für Temperatur (Mitte), relative (oben) und absolute (unten) Luftfeuchte des Türkischen Saals verglichen mit den Außenklimadaten. Zeitraum: 26. August 2010 bis 26. August 2011.

Tabelle 4.4:

Vergleich der täglichen Schwankung der relativen Luftfeuchte im Erdgeschoss und im Türkischen Saal von 26. August 2010 bis 26. August 2011.

	Minimum	P10	P25	Mittelwert	Median	P75	P90	P99	Maximum
Tägliche Schwankungen der rF [%] Erdgeschoss (N=8689)	0,53	1,89	3,3	6,2	5,4	8,2	10,8	21,3	30,7
Tägliche Schwankungen der rF [%] Türkischer Saal (N=8689)	0	0,5	1	2,5	2,2	3,3	5,0	10,7	16,3

Der Türkische Saal hat eine Luftwechselrate von $0,34 (\pm 0,03) /h$, der Salon im Erdgeschoss von $0,45 (\pm 0,04) /h$.¹⁵⁵ Diese Werte sind nach Holmberg als „gut“ bis „exzellent“ zu bewerten und tragen besonders im Obergeschoss wesentlich zu den geringen klimatischen Schwankungen bei.¹⁵⁶ Die Dichtigkeit des Gebäudes ist konstruktionsbedingt. Die Fugen der Holzverkleidung sind mit weiteren Holzleisten überblattet. Der Türkische Saal ist eine Haus-in-Haus-Konstruktion mit einem Luftspalt von ca. 30 cm zur Außenwand.¹⁵⁷ Die Luftströmung im Treppenhaus und Aufgang zum Türkischen Saal ist deutlich spürbar. Hier wurde die höchste Luftwechselrate von $0,99 (\pm 0,04) /h$ ermittelt. Dort sind auch in den Wandvertäfelungen vermehrt Schäden zu verzeichnen. Bisher wurde nicht systematisch untersucht, inwiefern Luftströmungen sich auf Kunstwerke auswirken. Sicherlich verursachen diese ebenfalls ein Mikroklima.

Ein weiterer klimastabilisierender Aspekt ist die Ausstattung selbst, die klimatische Schwankungen aufgrund ihrer hygroskopischen Eigenschaften dämpft. Besonders Textilien und Hölzer reagieren stark puffernd. Aus der Mengenermittlung geht hervor, dass etwa ein Drittel der Ausstattung aus Textilien (Teppiche, Vorhänge), ein weiteres Drittel aus farbig gefassten sowie vergoldeten Holzoberflächen besteht.¹⁵⁸ Die hygrothermische Simulation des Türkischen Saales mit und ohne puffernde Materialien bestätigt diese Einschätzung.¹⁵⁹

4.2.2 Erhaltung der Ausstattung

Die Ausstattung im Erdgeschoss und im Türkischen Saal unterscheidet sich materialtechnisch. Während die Räume im Erdgeschoss schlicht eingerichtet und mit Zirbenholz vertäfelt sind, dominieren im Obergeschoss die vergoldeten Holzornamente vor blau und rot gefassten Holzpaneelen.

Erdgeschoss

Die verglasten *Grafiken* im Kavalierzimmer weisen Stockflecken und vermutlich Schimmelpilzbefall auf (Abbildung 4.21) – ein möglicher Grund, warum die originalen Grafiken im Arbeitszimmer ausgebaut und 2008 durch Replikat ersetzt worden sind. An den Wand- und Deckenvertäfelungen aus Zirbenholz im Erdgeschoss sind wenige Risse festzustellen. Im Überzug hat sich ein gleichmäßiges Craquelée gebildet (Abbildung 4.22). Die drei *Leinwandgemälde* im Salon sind außergewöhnlich gut erhalten. Sie zeigen weder Verwölbung des Bildträgers, noch Lockerungen oder Substanzverluste in der Malschicht (Abbildung 4.20). Da die Gemälde an keiner Außenwand hängen, sind die Temperatur- und Feuchtedifferenzen zwischen Vorder- und Rückseite gering. Dies trägt entscheidend zur Erhaltung bei. Insbesondere tiefe Temperaturen im Winter bergen aufgrund

155 Wehle et al. 2011, S. 60.

156 Holmberg 1997.

157 Holl 2008, S. 62.

158 Ebd., S. 70 ff.

159 Kilian 2013.

der Glasübergangstemperatur von Ölen ein Risiko für Schäden durch Versprödung.¹⁶⁰ Hier sind trotz langer Perioden unter Null Grad keine Schäden erkennbar.

Türkischer Saal

Im Türkischen Saal befinden sich keine Leinwandgemälde. Die *Ziertapete* ist teilweise stark verwölbt (Abbildung 4.23). Da diese auf Leinwand geklebt ist, ähnelt das Schadensbild dem von Leinwandgemälden an Außenwänden (vgl. Abbildung 4.13).

An den vergoldeten Ornamenten sind Schäden, wie Lockerungen und Substanzverluste vorzufinden (Abbildung 4.24). An den farbig gefassten Wandvertäfelungen, den vergoldeten Holzornamenten im Vorraum und der mobilen Ausstattung, etwa an den vergoldeten Vasen, in denen sich Federfächer befinden, sind Risse im Holz vorhanden (Abbildung 4.25, 4.26). In den Fensterläden ist die Weißfassung stellenweise verschwärzt (Abbildung 4.28).¹⁶¹

Aus den Akten geht hervor, dass das große Südfenster im Vorraum bei Unwettern mehrmals beschädigt wurde.¹⁶² Craquelée, das aufgrund von hoher Feuchteeinwirkung entsteht, ist an den vor das Südfenster gestellten Säulen ausgeprägt (Abbildung 4.27). Die neu gefassten Wandpaneele unterhalb des Fensters weisen Lockerungen und Substanzverluste auf. Diese Flächen sind – ohne Haus-in-Haus-Pufferung – unmittelbar dem Außenklima ausgesetzt und vermutlich deshalb stärker beschädigt.

Schimmelbildung

Im Türkischen Saal ist an den Stellen, an denen in der Vergangenheit bei Unwettern direkter Wassereintrag statt fand, etwa in den Nischen der Rundfenster, ehemaliger mikrobiologischer Befall festzustellen. Untersuchungen ergaben, dass dieser nicht aktiv ist, so dass hier von einem geringem Risiko auszugehen ist.¹⁶³

Im Erdgeschoss weisen die Grafiken jedoch zahlreiche Stockflecken und Schimmelbefall auf. Grund hierfür ist die kältere Temperatur, gekoppelt mit höherer relativer Luftfeuchte. Einige der Grafiken hängen auch an Außenwänden und sind damit stärker dem Außenklima ausgesetzt. Generell sind Grafiken empfindlich gegenüber höheren relativen Luftfeuchten.

4.2.3 Zusammenfassung

Der Zeitraum von drei Jahren ist geeignet, um zu einer realistischen Einschätzung der klimatischen Verhältnisse zu gelangen. Messdaten aus einem Jahr sind in der Regel zwar ausreichend, können jedoch zu Fehleinschätzungen führen, wie am Beispiel Königshaus am Schachen sichtbar geworden ist. Durch Zustandsuntersuchung konnte in den drei Jahren keine wesentliche Veränderung der Ausstattung festgestellt werden. Jedes Jahr zur Wiedereröffnung nach der langen Winterpause sind im Türkischen Saal am Boden kleinere Fassungsschollen zu finden. Diese stammen wahrscheinlich von bereits gelockerten, nicht gefestigten vergoldeten Fassungen. Wegen der Größe und der Vielzahl der Ausstattung kann jedoch nicht restlos geklärt werden, ob es sich dabei um neue Schäden handelt. Die einsehbaren Flächen, die mit bloßem Auge untersucht worden sind, haben sich nicht verändert.

¹⁶⁰ Mecklenburg 2010, p. 20.

¹⁶¹ Holl 2008, S. 43.

¹⁶² Ebd., S. 24.

¹⁶³ Ebd., S. 43.

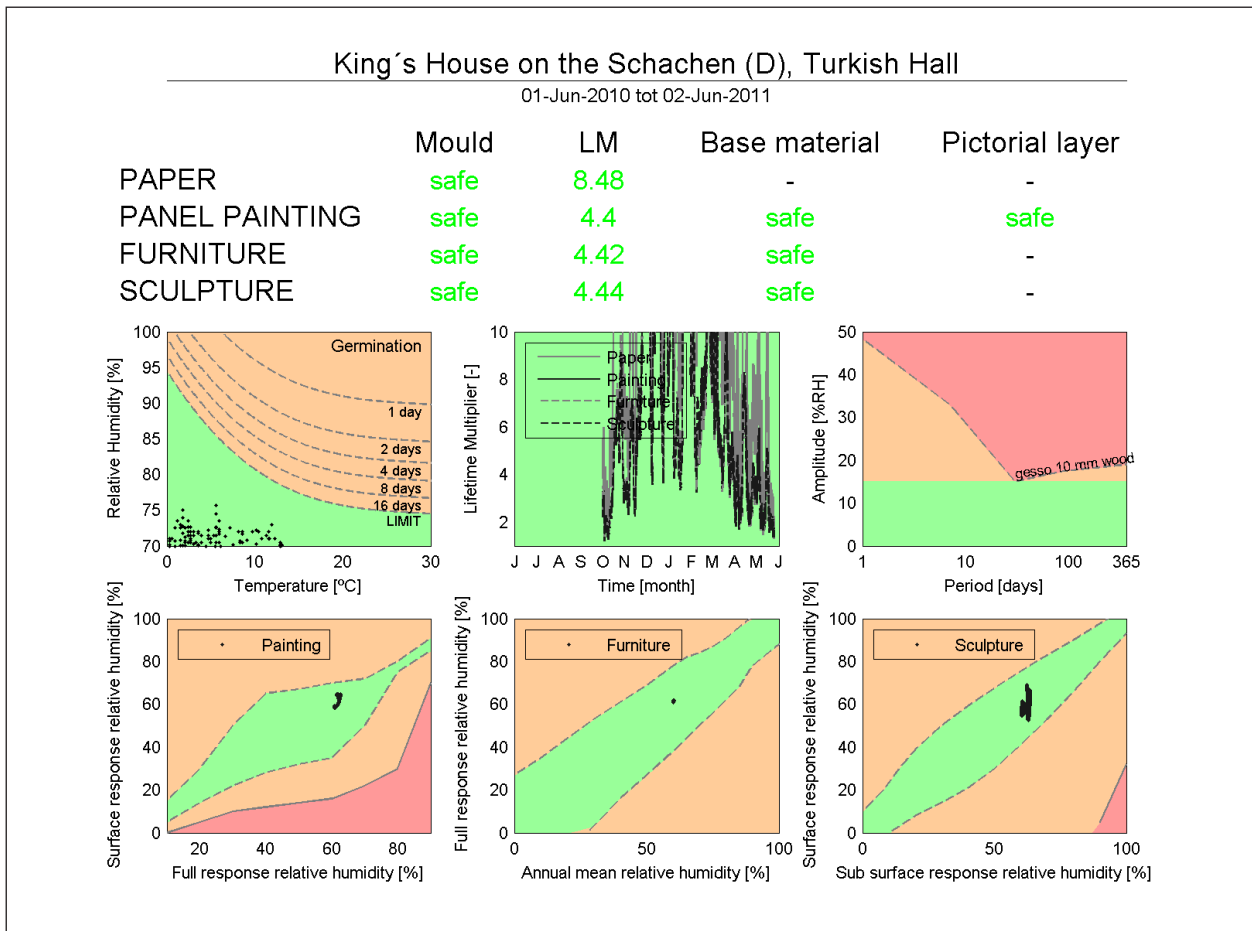


Abbildung 4.19: Risikoprognosen nach Martens für den Türkischen Saal (oben) und das Erdgeschoss (unten), basierend auf den Klimadaten von Juni 2010 bis 2011 (Raummitte).

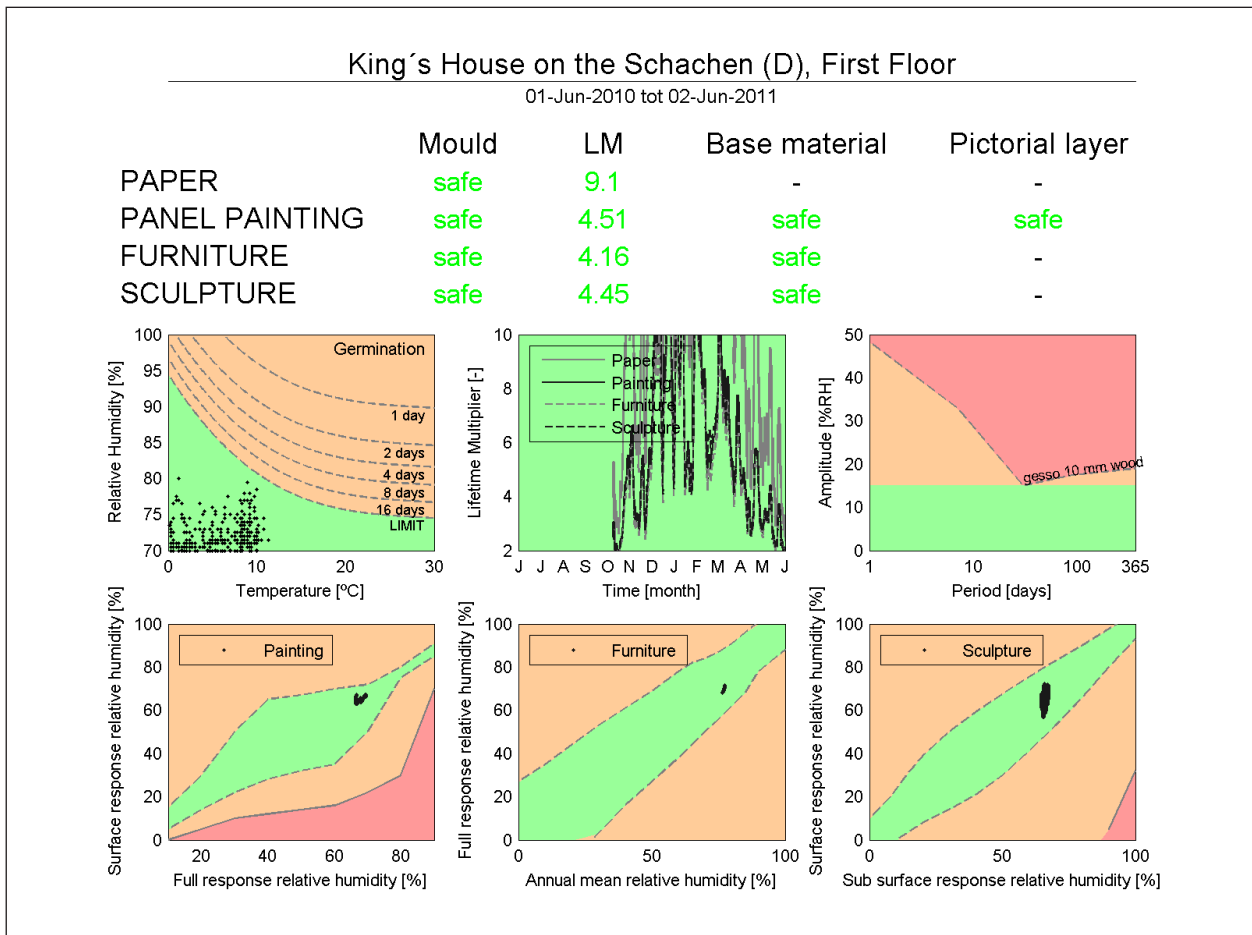




Abbildung 4.20:
Erdgeschoss, Salon, nördliche Supraporte: Leinwandgemälde „Kaschmirtal mit dem Himalayatal“ (1872) in gutem Erhaltungszustand.



Abbildung 4.21:
Erdgeschoss, Kavalierszimmer: Grafik mit Stockflecken auf dem Passepartout.



Abbildung 4.22:
Erdgeschoss, Salon: Craquelée an der Deckenvertäfelung aus Zirbenholz.

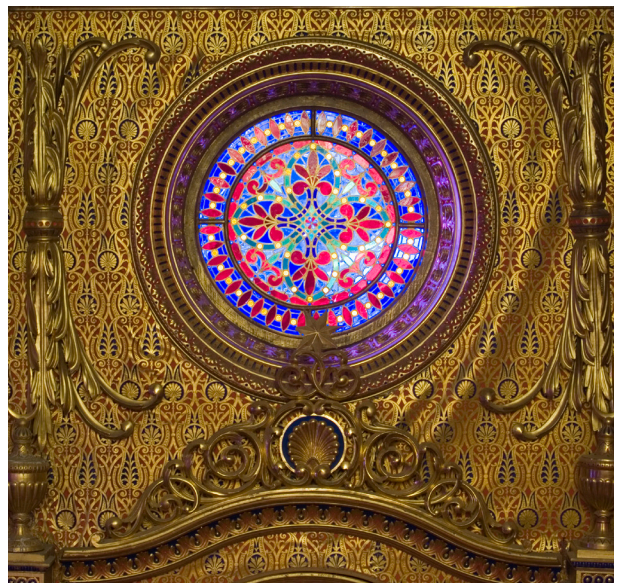


Abbildung 4.23:
Türkischer Saal, Ostwand: Verwölbte Tapete.

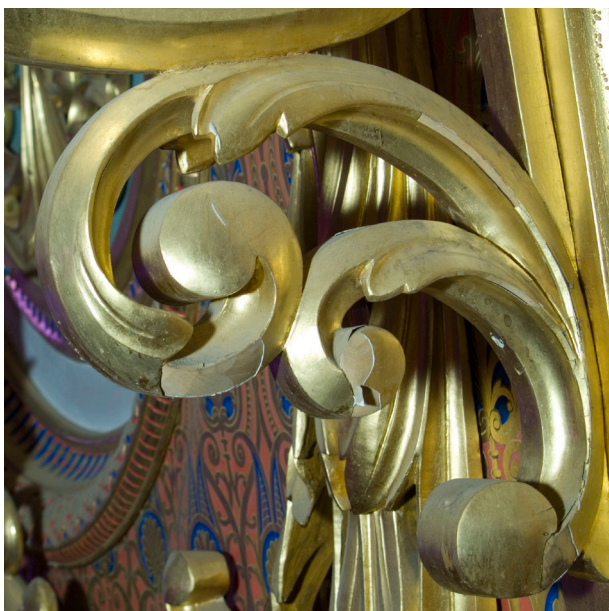


Abbildung 4.24:
Türkischer Saal, Lockerungen und Substanzverlust an vergoldetem Holzornament.



Abbildung 4.25:
Türkischer Saal, Riss in vergoldeter Vase aus Holz.

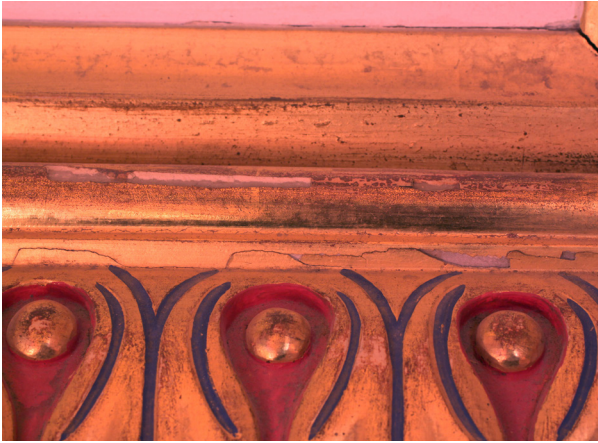


Abbildung 4.26:
Türkischer Saal, Vorraum Ostwand: Ausbrüche an vergoldeten Rahmenleisten der Kassettierungen.



Abbildung 4.27:
Türkischer Saal, Vorraum Südwand: Ausbrüche und verstärktes Craquelée durch starke Feuchteinwirkung an freistehender Säule.



Abbildung 4.28:
Türkischer Saal, nordwestlicher Fensterstock: Verschwärzung der Weißfassung.

4.3 Hochaltar St. Margaretha in Roggersdorf



Abbildung 4.29:

St. Margaretha in Roggersdorf, erbaut 1696 durch das Kloster Weyarn; 2004: Renovierung der Kirche und Restaurierung des Hochaltars, nach ca. fünf Jahren neue Schäden wegen ungünstiger klimatischer Situation.

Links: St. Margaretha in Roggersdorf Außenansicht; rechts: Hochaltar.

St. Margaretha in Roggersdorf ist eine Filialkirche der Gemeinde Holzkirchen, Lkr. Miesbach (Abbildung 4.29) und wurde 1696 durch das Kloster Weyarn erbaut.¹⁶⁴ Der Hochaltar wurde um 1630 gefertigt, das Antependium um 1700 hinzugefügt. Das Retabel wurde mehrfach¹⁶⁵ überfasst. 1997 fand eine Befunduntersuchung statt, nach der die heutige blau-weiß marmorierte Farbfassung mit applizierten roten und blauen Glassplittern sowie die Polimentvergoldung 2003 rekonstruiert wurde.¹⁶⁶

Die Fertigstellung der Restaurierungsarbeiten in der Kirche und am Retabel sowie der Wiedereinbau in die Kirche erfolgten am 25. September 2004.

Nach der Gesamtsanierung von St. Margaretha traten bereits 2006 erste Feuchtflecken am Mauerwerk auf, die durch Sommerkondensation und hygroskopische Salze entstanden.¹⁶⁷ Das damalige Konzept sah vor, die Feuchteproblematik mit einer über die absolute Luftfeuchte gesteuerten Lüftung zu lösen. Bis heute wurde der Einbau jedoch nicht umgesetzt. Untersucht wurde die Predella, da diese über den gesamten Zeitraum einsehbar war. Am Retabelaufsatz sind nur geringe Schäden aufgetreten.

¹⁶⁴ Lampl 2004.

¹⁶⁵ U. a. 1962 bei Renovierungsarbeiten. Georg Dehio Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler 2006, S. 1116.

¹⁶⁶ Wieglering 1997.

¹⁶⁷ Kilian et al. 2009.

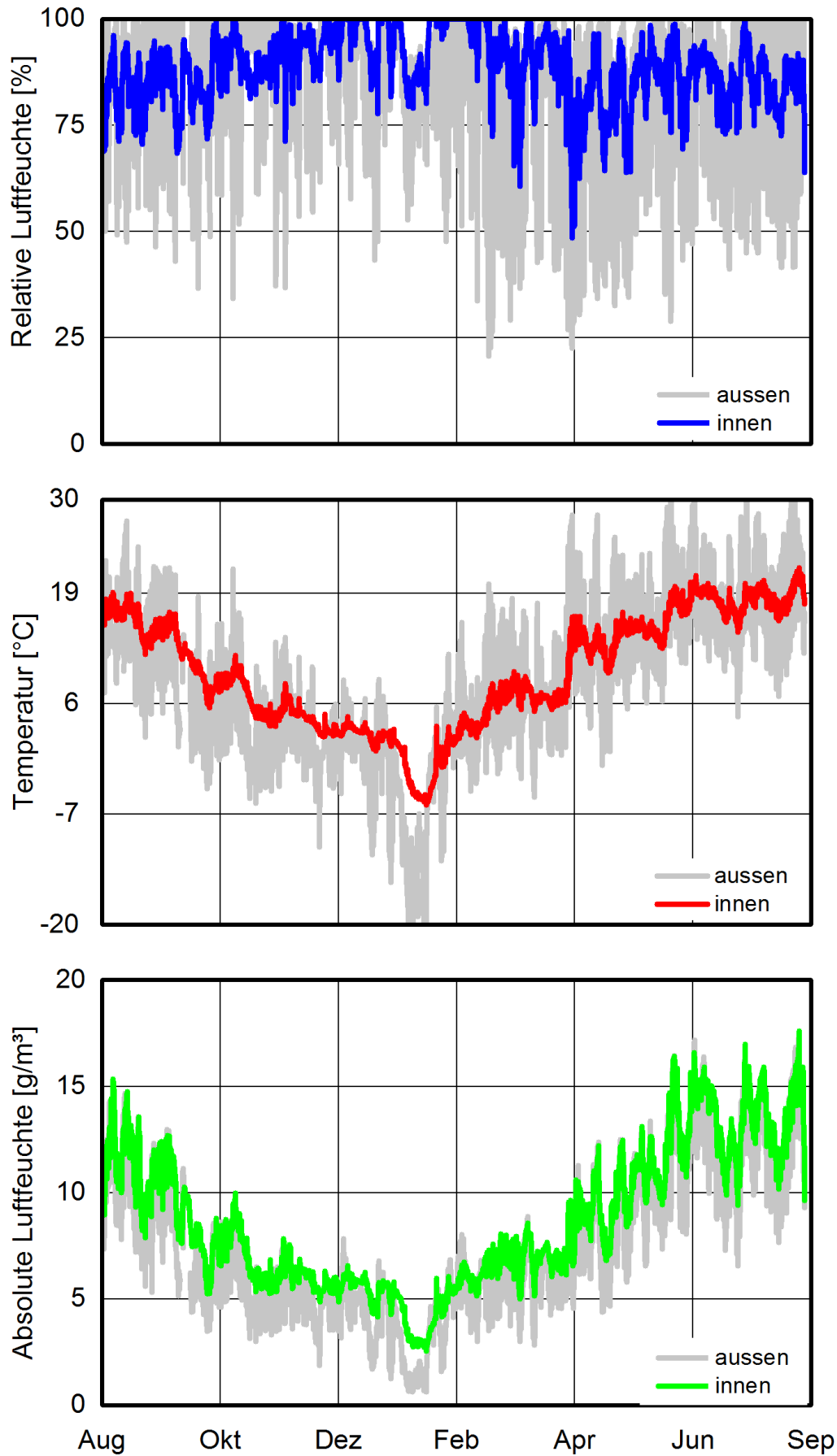


Abbildung 4.30:
Liniendiagramm für Temperatur (Mitte), relative (oben) und absolute (unten) Luftfeuchte in Raummitte von St. Margaretha in Roggersdorf verglichen mit den Außenklimadaten. Zeitraum: 30. August 2011 bis 30. August 2012.

4.3.1 Raumklima und Risikoanalyse

Für die Raumklimaanalyse wurden Messdaten von Temperatur und relativer Luftfeuchte am Hochaltar vom 30. August 2011 bis 30. August 2012 herangezogen (Abbildung 4.30 und Anhang C 8).

Die relative Luftfeuchte liegt im Mittel bei 89 %, das Maximum bei 100 % rF und das Minimum bei 46,7 % rF (Jahresspannweite: 53,3 % rF). Der Mittelwert der Temperatur ist 9,7 °C, das Minimum ist -5,9 °C, das Maximum beträgt 22 °C (Jahresspannweite: 27,9 °C). Die täglichen Schwankungen der relative Luftfeuchte betragen in den Sommermonaten im Mittel 7,4 % rF, maximal werden Schwankungen über 35 % rF erreicht (Tabelle 4.5).

Das Raumklima in Roggersdorf hat zum einen aufgrund der sehr hohen relativen Luftfeuchte, zum anderen wegen der starken kurzfristigen Schwankungen ungünstige Auswirkungen auf die Raumschale und die Kunstwerke. Nur etwa 5 % der Werte liegen unter 75 % rF (ASHRAE Standard D).¹⁶⁸ Der Auswertung nach Martens zufolge besteht ein Risiko für Schimmelbildung und ein Schadensrisiko für den Träger bei Holztafelgemälden sowie Skulpturen, für die Bildschicht und Möbel sind keine Schäden prognostiziert (Abbildung 4.31).

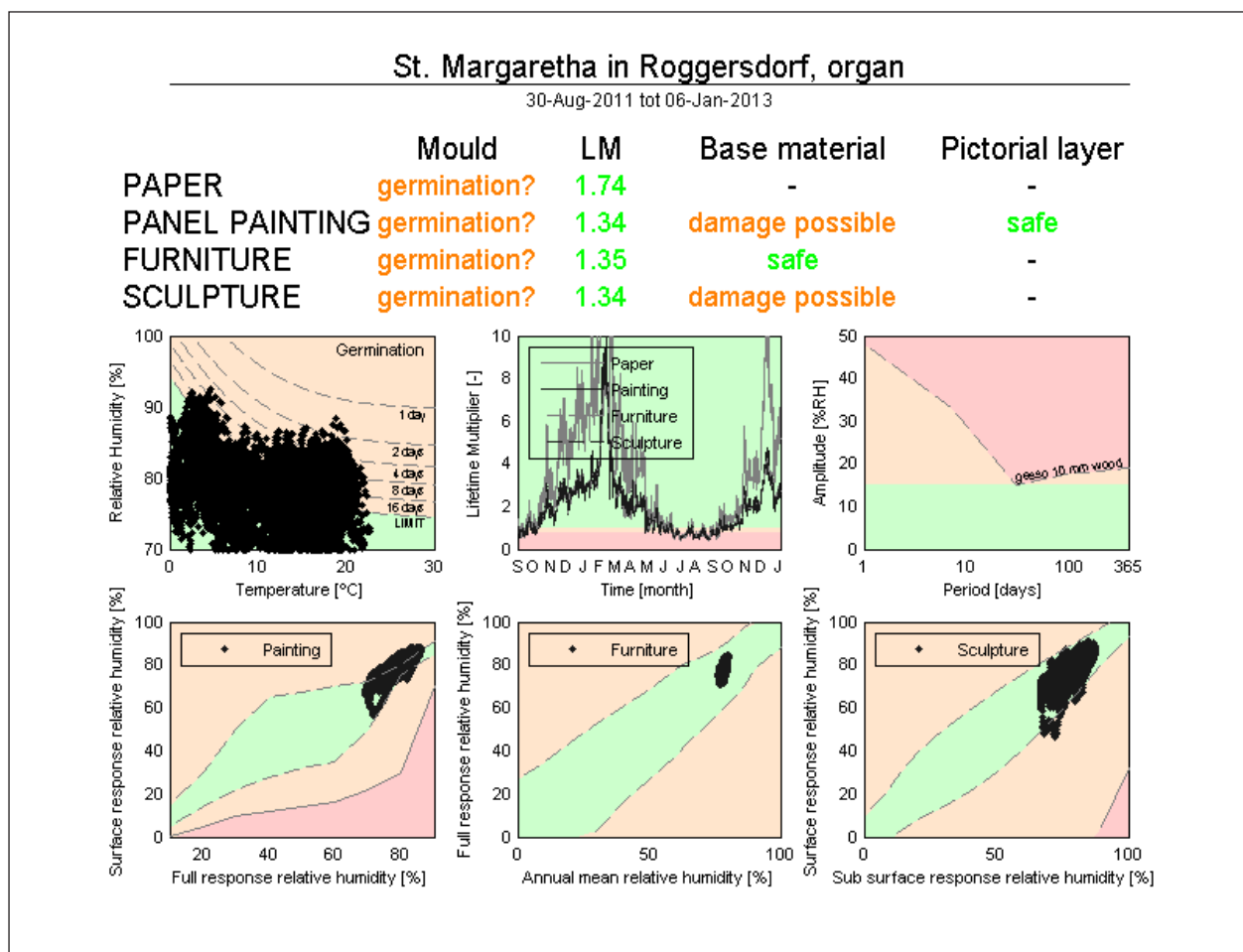


Abbildung 4.31: Risikoprognosen nach Martens für St. Margaretha in Roggersdorf, basierend auf den Klimadaten von September 2011 bis Januar 2013 (Raummitte).

168 ASHRAE 2007, 21.13.

Tabelle 4.5:

Auswertung der stündlichen und täglichen Schwankung der relativen Luftfeuchte am Hochaltar in Roggersdorf von 30. Januar 2011 bis 30. Januar 2012.

	Minimum	P10	P25	Mittelwert	Median	P75	P90	P99	Maximum
Stündliche Schwankungen der rF [%] Hochaltar (N=8689)	0	0	0,2	/	0,4	0,9	1,5	4,2	12
Tägliche Schwankungen der rF [%] Hochaltar (N=361)	0	1,48	4,0	7,4	6,4	10,1	13,0	27,9	36,4

4.3.2 Erhaltung des Hochaltars

Die erste Untersuchung des Hochaltars erfolgte im Dezember 2008. In der Predella waren Schäden wie Risse bzw. geöffnete Holzfügen, ausgeprägtes Craquelée, sowie Lockerungen in Farbfassung und Vergoldung festzustellen (Abbildung 4.32, 4.33).¹⁶⁹ Auch in den vergoldeten Rocailles setzten sich die Lockerungen fort, erste Substanzverluste resultierten. Im September 2011 erfolgte eine Konservierung durch die Fa. Wiegerling. Ein für die Maßnahme aufgestelltes Gerüst ermöglichte den Zustand über 2,5 m Höhe zu erfassen. Dort hat sich die Fassung bis auf wenige Öffnungen der Holzfügen gut erhalten. Bei der Überprüfung der Ausstattung 2012 wurden an einigen Stellen erneute Lockerungen in der Vergoldung festgestellt. Da sich bei einer relativen Luftfeuchte ab 80 % Glutinleim lösen kann, ist zu vermuten, dass dies der Auslöser für die Lockerungen an gefestigten Stellen war (Abbildungen 4.34).

Anders als von Martens prognostiziert ist an den Objekten in Roggersdorf keine Schimmelbildung festzustellen. Zwar riecht es in der Kirche modrig und am Innenputz sind aufgrund von Salzkristallisationen Ausbrüche sichtbar. Die Voraussage möglicher Schäden am Trägermaterial für Tafelgemälde und Skulpturen wurde auf das Retabel angewandt und bestätigt. Im Holz sind Fugenöffnungen und Risse festzustellen (Abbildung 4.33). Die Prognose, dass für die Bildschicht (Grundierung, Farbfassung, Überzug) kein Risiko besteht, stimmt allerdings nicht mit den Beobachtungen vor Ort überein. Ausgehend von der Farbfassung / Vergoldung als Bildschicht sind überwiegend in den polimentvergoldeten Elementen Craquelée und Lockerungen vorzufinden (Abbildungen 4.32).

3D-Mikroskopie

Wie die Fassung des Hochaltars auf kurzfristige Schwankungen reagiert, wurde im September 2012 mit einem 3D-Mikroskop dokumentiert. Dieselbe Position an einer gelockerten, vergoldeten Fassungsscholle wurde an zwei aufeinanderfolgenden Tagen bei unterschiedlichem Innenraumklima aufgenommen und vermessen. Über den Zeitraum von ca. 20 h änderte sich die relative Luftfeuchte um ca. 8 % (von 65 % auf 73,8 %) und resultierte an einer gelockerten Scholle in einer Längenänderung von ca. 11 µm (Abbildung 4.35).¹⁷⁰ Da eine derartige Schwankung der relativen Luftfeuchte in Roggersdorf häufig auftritt (vgl. Tabelle 4.5) – diese oft noch übertroffen wird – ist es nachvollziehbar, dass diese Schwankungen nach und nach zum Ablösen der Fassung führen. Sehr hohe relative Luftfeuchten mit starken täglichen Schwankungen, wie in Roggersdorf, sind der Grund für Schadensphänomene wie Riss- und Craqueléebildung.¹⁷¹

¹⁶⁹ Holl 2009.

¹⁷⁰ Mit freundlicher Unterstützung der Universität Ljubljana, Violeta Bokan Bosiljkov und ihrem Team, Partner im EU-Projekt „Climate for Culture“.

¹⁷¹ Arendt 2007, S. 7.



Abbildung 4.32:
Erste Ausbrüche und Lockerungen in der Vergoldung bei der ersten Untersuchung 2008.



Abbildung 4.33:
Rissbildung in der rechten Rocaille der Predella.

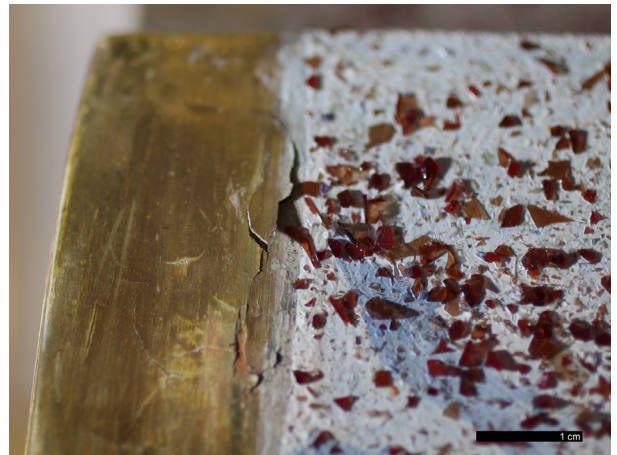


Abbildung 4.34:
Links: Lockerung der Vergoldung vor der Festigung, rechts: Selbe Position einige Monate nach der Festigung. In den unteren Ausbrüchen ist die Festigung noch erfolgreich, die obere Scholle steht erneut auf.



Abbildung 4.35:
Vergleichende Aufnahme mit dem 3D-Mikroskop. Links: Aufstehende Fassungsscholle am 20.09.2012, 14:00 Uhr bei 14 °C, 65 % rF. Rechts: Selber Ausschnitt am 21.09.2012, 09:00 Uhr bei 11,5 °C, 73,8 % rF. Von der Spitze der abstehenden Scholle bis zur angrenzenden Schicht wurde eine insgesamt Längenänderung von 11 µm gemessen (L1 links =1290 µm; L1 rechts =1301 µm).

Untersuchung des Mikroklimas mit Thermographie

Durch Sonneneinstrahlung kann an den Exponaten ebenfalls ein Mikroklima entstehen. Mit einer Thermographiekamera wurden lokale Temperaturunterschiede, die beim Wandern der Sonne über ein Leinwandgemälde entstehen, dokumentiert. Am 22. Juli 2013 war gegen 12:30 Uhr in Raummitte eine Temperatur von 8,7 °C und eine relative Luftfeuchte von 69,3 % zu verzeichnen. Auf dem Leinwandgemälde wurden Temperaturen von ca. 6,5 °C gemessen (Abbildung 4.36, links). Das entspricht hier einer relativen Luftfeuchte von ca. 78 %. Die wandernde Sonne erzeugt auf dem Gemälde kurzfristig eine Erwärmung auf maximal ca. 40 °C (Abbildung 4.36, rechts). Bei gleichbleibender absoluter Luftfeuchte verringert sich die relative Luftfeuchte auf unter 15 %, sodass innerhalb von 30 Minuten ein Unterschied von über 60 % vorliegt. Diese kurzfristigen, jedoch immer wiederkehrenden Ereignisse sind schädigend für das Leinwandgemälde. Es weist eine ausgeprägtes Craquelée mit Schüsselbildung auf.

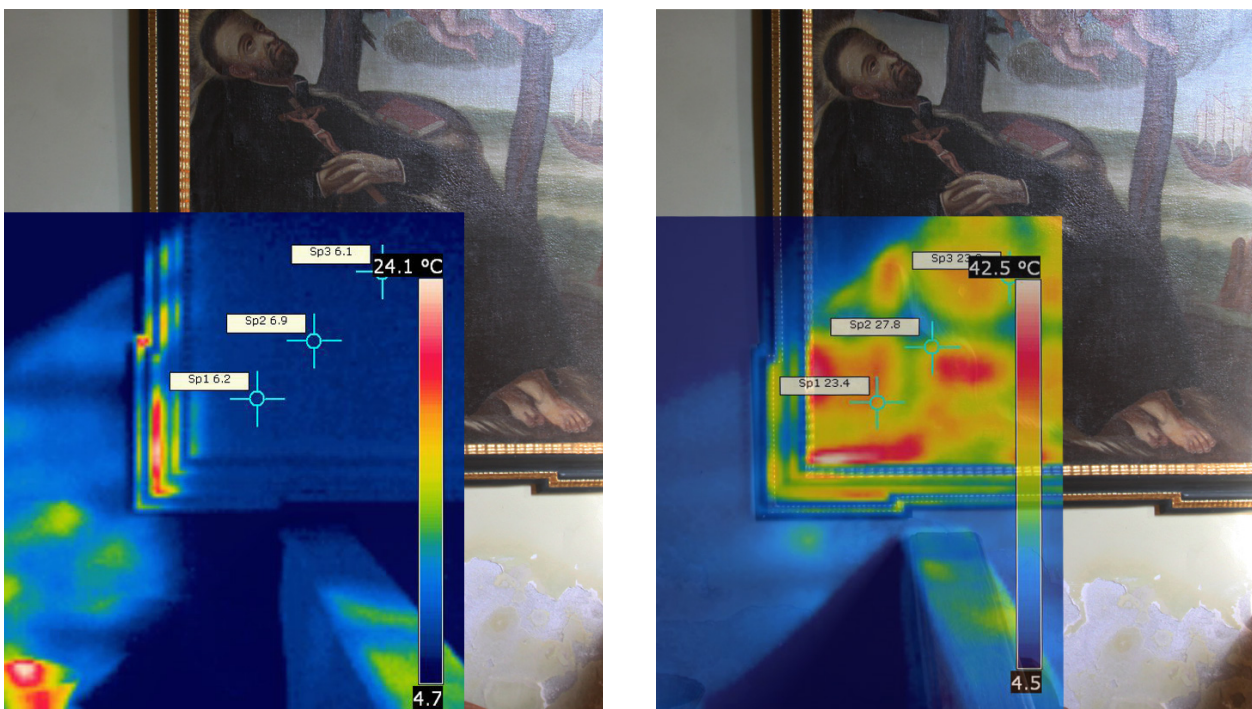


Abbildung 4.36:
Vergleichende Aufnahmen mit der Thermographiekamera, während die Sonne über ein Leinwandgemälde wandert.
Fotos: Schwaiger / Kilian, Bearbeitung: Holl.

4.3.3 Zusammenfassung

In St. Margaretha in Roggersdorf ist zu beobachten, wie sich ungünstiges Raumklima auf neu gefasste Holzoberflächen auswirkt. Die Temperatur schwankt zwar dem Jahreszyklus entsprechend, die relative Luftfeuchte bleibt jedoch durchwegs hoch (Mittelwert 89 % rF) mit täglichen Schwankungen von im Mittel 7,4 %. Aufgrund des hohen Feuchteniveaus ist die Ausstattung stark beansprucht, so dass sich kurzfristige klimatische Änderungen stärker auswirken (vgl. Abbildung 2.6).

Da der Hochaltar in einem Restaurierungsatelier neu gefasst wurde, ist davon auszugehen, dass das Raumklima dort, unter Berücksichtigung weiterer dort lagernder Kunstwerke, mit geringerer relativer Luftfeuchte konditioniert wurde, als sie in der Kirche vorliegt. Nach der Wiederaufstellung am originalen Ort reagierte das Holz auf die veränderte klimatische Situation mit einem Quellen, so dass an der Fassung, insbesondere an Stellen mit höherem Diffusionswiderstand, Craqueléebildung und Fassungslockerung auftraten. Mittlerweile sollte sich, nach acht Jahren in der Kirche, jedoch am Retabel eine neue Gleichgewichtsfeuchte eingestellt haben. Dass sich also nach der Festigung 2012 weitere Lockerungen in der Fassung zeigten, ist direkt mit dem Raumklima in Verbindung zu bringen.

4.4 Seitenaltar St. Franziskus in der Renatuskapelle in Lustheim



Abbildung 4.37:
Renatuskapelle in Lustheim, Schleißheim/München, erbaut 1684–1690 von Henrico Zucalli.
Links: Renatuskapelle in Lustheim (Foto: Kilian), Außenansicht; rechts: Westlicher Seitenaltar Hl. Franziskus.

Die Renatuskapelle (Abbildung 4.37, links), erbaut von Henrico Zucalli, befindet sich im südlichen Pavillon des Schlossparks von Schleißheim bei München. Zur historischen Ausstattung gehören neben dem zentralen Altar zwei Seitenaltäre, die alle drei je ein Leinwandgemälde beherbergen. Die Schmuckrahmen der Seitenretabel sind aus Holz gefertigt und mit polychromer ornamentaler Farbfassung versehen. Die originale Ausstattung wurde 1968 aufgrund des schlechten baulichen Zustands der Kapelle im Depot der Verwaltung der Bayerischen Schlösser, Gärten und Seen eingelagert und erst bei der Sanierung 2005 restauriert und wieder eingebaut.¹⁷²

Der westliche Seitenaltar St. Franziskus (Abbildung 4.37, rechts) wurde als Fallstudie ausgewählt, da sich dieser unmittelbar vor den Heizrohren der 2002 eingebauten Temperierung befindet (Abbildung 4.40). Kernfrage ist, ob diese Schäden an der Ausstattung hervorruft.

4.4.1 Raumklima und Risikoanalyse

Insgesamt hat sich das Raumklima in der Renatuskapelle seit dem Einbau der Temperierung verbessert.¹⁷³ Der Mittelwert der Temperatur liegt in der Messperiode vom 9. September 2010 bis 21. Oktober 2011 bei 14,9 °C, im Winter bleibt die Kapelle frostfrei. Der niedrigste Wert liegt im Winter 2010 bei 5,3 °C, der höchste bei ca. 28 °C, wobei 95 % der Werte unter 21,5 °C bleiben (Jahresspannweite: 22,7 °C), (Abbildung 4.38, Anhang C 9).

Die relative Luftfeuchte liegt im Mittel bei ca. 63 %; das Minimum ist bei 40 % rF. In den Sommermonaten sind hohe Feuchtwerte zu verzeichnen: Maximal 92 % rF; 95% der Werte liegen unter 80 % rF (Jahresspannweite: 52 % rF). Die hohen Temperaturen im Sommer heben die Funktion der Temperierung auf. Für diese Übergangszeit ist eine unterstützende Entfeuchtung empfehlenswert.

¹⁷² Kilian 2004, S. 7 ff.

¹⁷³ Kilian 2004.

Hinter den Retabeln ist die Temperatur mit 16,9 °C um 2 Kelvin höher als in Raummitte. Gleichzeitig ist die relative Luftfeuchte im Mittel um ca. 8 % geringer (Mittelwert: 54,6 % rF). Der Minimalwert beträgt 33 % rF; 5 % der Werte liegen unter 40 % rF (Abbildung 4.38, Anhang C 10). In Tabelle 4.6 sind die stündlichen und täglichen Schwankungen des in Raummitte und hinter dem Seitenaltar St. Franziskus gemessenen Klimas aufgeführt. Die beiden Positionen unterscheiden sich nicht sehr. Die stündlichen Schwankungen sind mit im Mittel 0,3 (hinter Seitenaltar) / 0,4 % (Raummitte) gering einzustufen. Auch die täglichen Schwankungen sind mit 3,4 % hinter dem Seitenaltar und 4,1 % rF in Raummitte (beides Mittelwerte) niedrig.

Tabelle 4.6:

Auswertung der stündlichen und täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte in Raummitte und hinter dem westlichen Seitenaltar von 9. September 2010 bis 22. Oktober 2011.

	Minimum	P10	P25	Mittelwert	Median	P75	P90	P99	Maximum
Stündliche Schwankungen der rF [%] hinter westl. Seitenaltar (N=9802)	0	0	0	0,3	0,2	0,5	0,8	1,6	12,3
Stündliche Schwankungen der rF [%] Raummitte (N=9802)	0	0	0	0,4	0,2	0,6	0,9	2,9	11,5
Tägliche Schwankungen der rF [%] hinter westl. Seitenaltar (N=410)	0	1,4	1,9	3,4	2,8	4,1	6,1	10,1	18,2
Tägliche Schwankungen der rF [%] Raummitte (N=410)	0,1	1,6	2,5	4,1	3,5	5,3	7,3	11,0	20,7

Die in Raummitte erhobene relative Luftfeuchte ist sehr hoch. Daraus ist ein Risiko für mikrobiologischen Befall abzuleiten. Nach der Analyse des Raumklimas nach Martens besteht für den Träger von Tafelgemälden und Skulpturen ein Schadensrisiko, nicht jedoch für die Bildschicht (Abbildung 4.39). Das Mikroklima hinter dem Altar prognostiziert ein Risiko für Schimmelbildung und Schäden am Trägermaterial von Skulpturen (Abbildung Anhang C 11). Für die Untersuchung des Seitenaltars eignet sich die Schadensprognose insofern nur bedingt, da beide Klimata am Objekt (Vorder- und Rückseite) anliegen. Eine kombinierte Auswertung beider Klimata ist nach Martens nicht möglich. Das Szenario, wie sich der Materialverbund verhalten würde, wenn der Seitenaltar in Raummitte stünde, wird in Kapitel 6.2.3 untersucht.

4.4.2 Erhaltung des Seitenaltars

Aktiver Schimmelbefall wurde in der Renatuskapelle nicht festgestellt. Einige geöffnete Fugen bestätigten die nach der Auswertung nach Martens prognostizierten Schäden am Träger, allerdings waren keine Risse festzustellen. Die Bildschicht zeigt jedoch Schäden: Die Fassung der Holzpaneele der Seitenaltäre war gelockert und wies Substanzverluste auf, insbesondere am westlichen Seitenaltar des Hl. Franziskus (Abbildung 4.41). Auf den ersten Blick ist der Zustand nach einem Jahr unverändert und die Substanzverluste sind gering. Allerdings zeugen herabgefallene Farbschollen von der andauernden Schädigung.

Aufgrund der Position der Seitenaltäre ohne ausreichenden Abstand (ca. 10 cm) zu den in diesem Fall erwärmten Außenwänden, stellt sich durch die Leitungen der Temperierung ein Mikroklima ein, das die Holzpaneele mit der Zeit austrocknet. Schichtenlockerung und – ohne konservatorischen Eingriff – Ablösung der Farbfassung sind die Folge. Der östliche Seitenaltar St. Antonius ist insgesamt weniger betroffen. Dies liegt vermutlich daran, dass der gesamte Seitenaltar mit größerem Abstand zur Wand steht, so dass die Luft zirkulieren kann. Zusätzlich nimmt die Temperatur der Heizrohre mit zunehmendem Abstand zur Quelle ab, so dass die Westseite stärker betroffen ist als die Ostseite. Die Leinwandgemälde sind aufgrund der höheren Position nicht unmittelbar betroffen (Abbildung 4.40). Sie weisen keine Lockerungen auf, jedoch Craquelée.

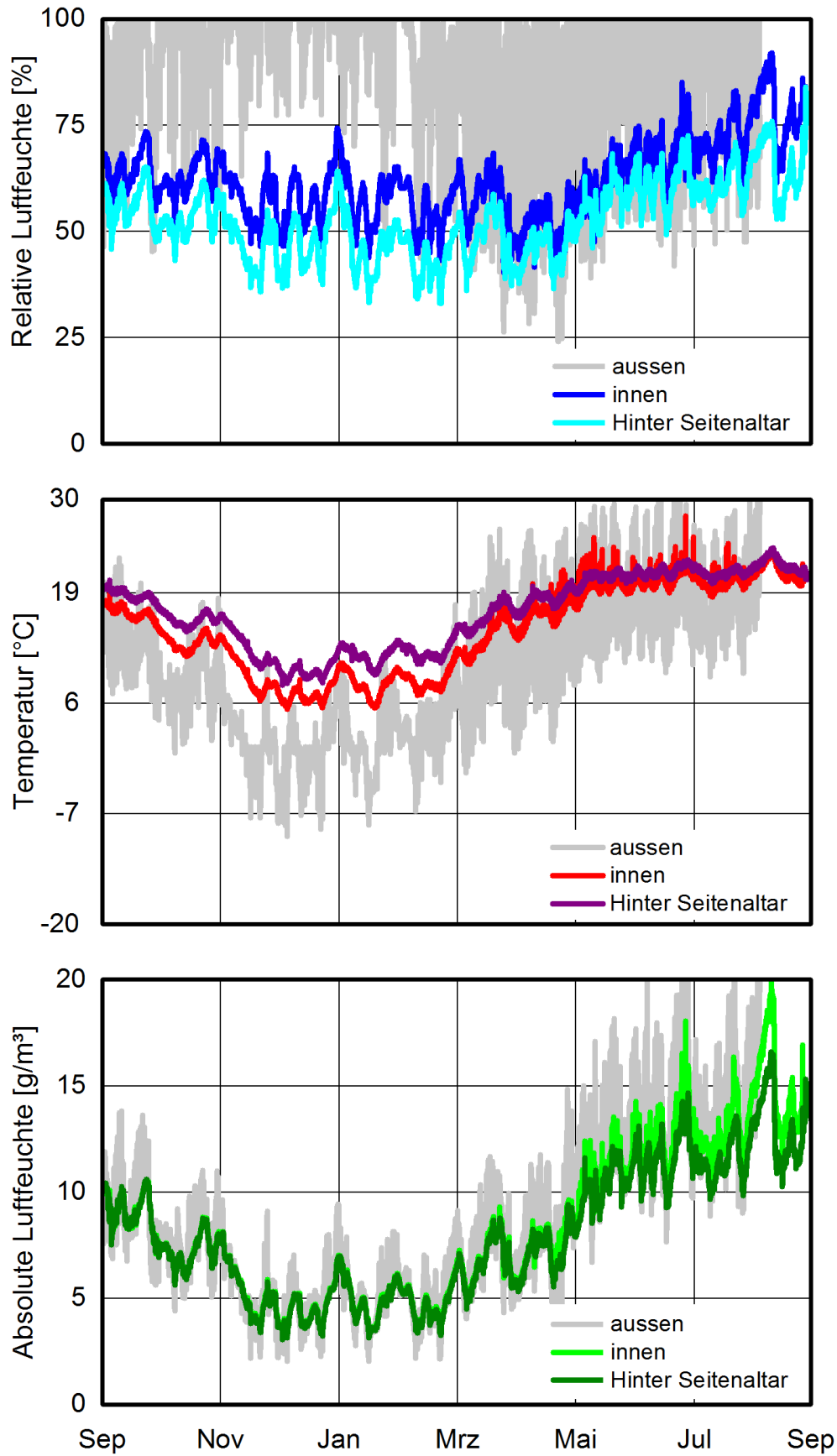


Abbildung 4.38:
Liniendiagramm für Temperatur (Mitte), relative (oben) und absolute (unten) Luftfeuchte in Raummitte und hinter dem westlichen Seitenaltar der Renatuskapelle verglichen mit den Außenklimadaten. Zeitraum: 15. September 2010 bis 15. September 2011.

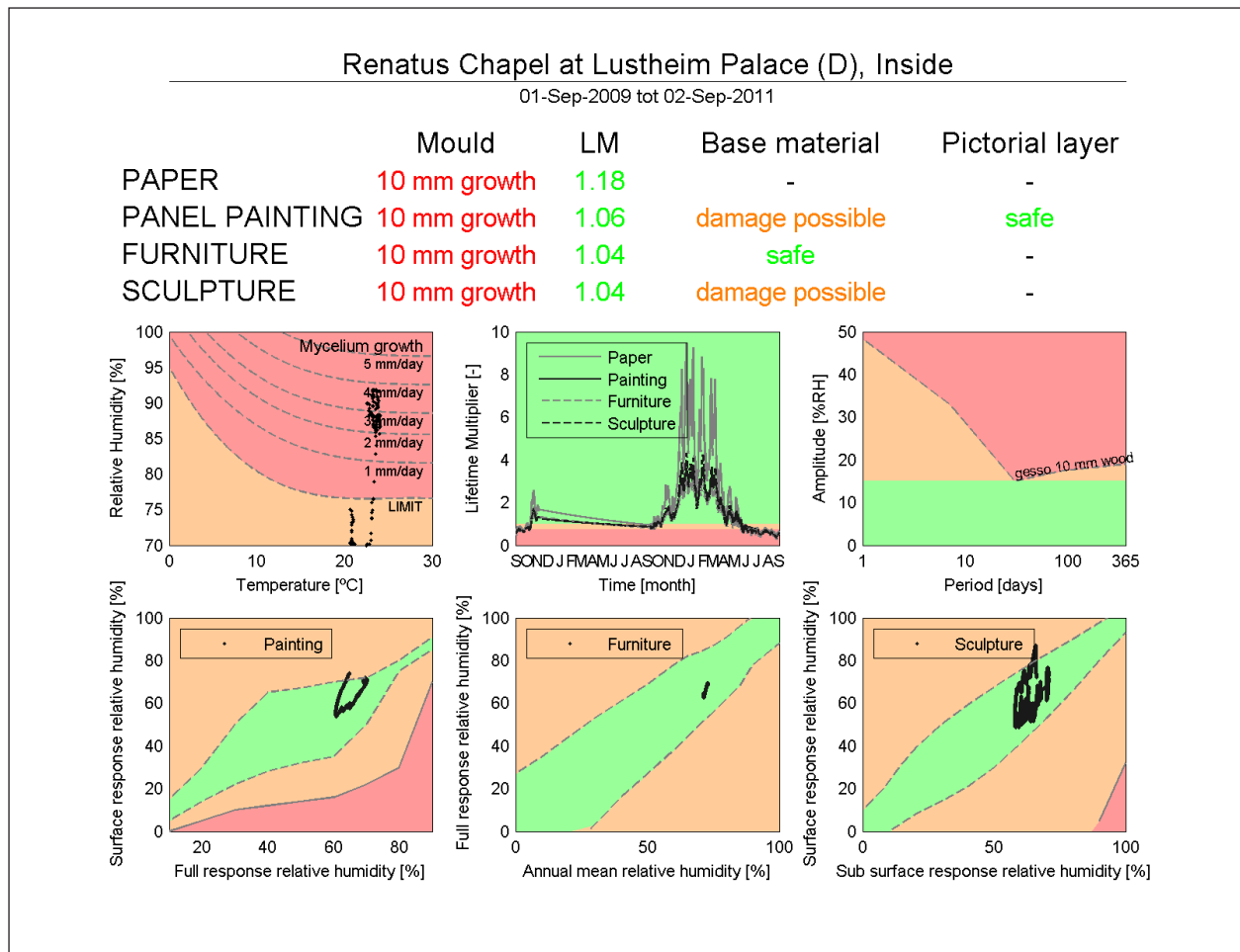


Abbildung 4.39: Risikoprognosen nach Martens für das Raumklima der Renatuskapelle basierend auf den Klimadaten von September 2009 bis 2011 (Raummitte).

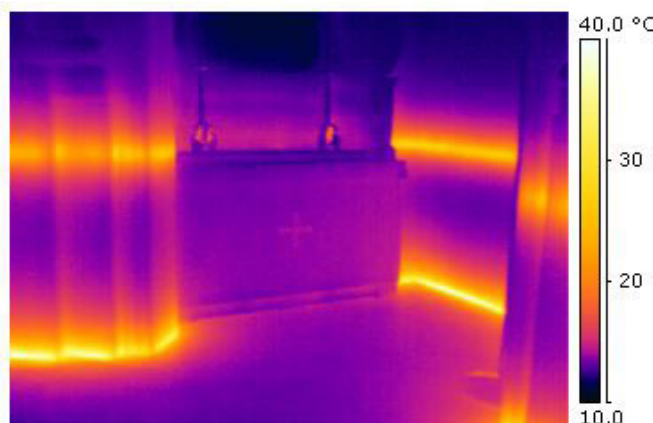


Abbildung 4.40: Thermographieaufnahme des Seitenaltars St. Franziskus. Die in der Wand verputzten Wasserleitungen der Temperierung sind deutlich zu erkennen. Foto: Kilian.



Abbildung 4.41: Detail des farbig gefassten Holzrahmens am Seitenaltar des Hl. Franziskus. Die Farbschicht ist gelockert und bildet Blasen.

4.4.3 Zusammenfassung

Die Renatuskapelle zeigt, dass sich mit dem Einbau der Temperierung als präventiver Eingriff das Raumklima verbessert hat und dieses auch für die Raumschale zuträglich ist. Der Erhaltung der Ausstattung ist dies wegen der ungünstig gewählten Position der Heizrohre in unmittelbarer Nähe der Seitenaltäre und des sich dadurch ausbildenden Mikroklimas nicht zuträglich.

Zum Thema Temperierung sind zahlreiche Veröffentlichungen erschienen, derzeit läuft auch ein Forschungsprojekt an der Landesstelle für die nichtstaatlichen Museen dazu.¹⁷⁴ Eine Erkenntnis aus der Untersuchung von in 18 Museen eingebauten Temperierungen ist, dass keine der Anlagen gleich konzipiert ist. Daraus folgt, dass die individuellen Gegebenheiten eines Gebäudes berücksichtigt werden. Es ist keine pauschale Aussage möglich, daher muss die Wirkung jeder Anlage einzeln untersucht werden. Eine Standardlösung wird es – obwohl häufig proklamiert – auch künftig nicht geben.

Trotz der Heizung als präventive Maßnahme besteht nach der Prognose der TU Eindhoven aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte ein Risiko für die Ausstattung. Das Mikroklima hinter dem Seitenaltar, das zum Teil sehr geringe relative Luftfeuchten unter 35 % aufweist, birgt hier ein geringeres Schadensrisiko als das in Raummitte.

Wie am Beispiel des Seitenaltars deutlich wurde, unterliegen Kunstwerke häufig keinem homogenen Raumklima. Mit dem Analyseprogramm ist es jedoch nicht möglich, zwei Klimata, die an einem Kunstwerk anliegen kombiniert auszuwerten. Damit ist die Aussage der Anwendung hier nur von begrenztem Nutzen.

4.5 Erkenntnisse aus den vier Fallstudien

Vergleich der Erhaltung der Ausstattung im Königshaus am Schachen und Schloss Linderhof

Die Ausstattungen im Königshaus am Schachen und Schloss Linderhof entstanden fast zeitgleich in derselben Region und bestehen aus den gleichen Materialverbänden. Die unterschiedliche klimatische Situation, die sich aus Standort und Nutzung ergibt, lohnt einen Vergleich der Erhaltungszustände.

Klimatisch gesehen sind der Spiegelsaal in Schloss Linderhof und der Türkische Saal im Königshaus am Schachen am ähnlichsten, allerdings sind die täglichen Schwankungen in letzterem niedriger. Die gefassten und vergoldeten Holzoberflächen weisen in beiden Häusern Rissbildungen, Lockerungen und Substanzverluste auf. Die Ausstattung in Schloss Linderhof ist jedoch schlechter erhalten als die im Königshaus am Schachen. Dies ist zu großen Teilen auf die hohe Besucherzahl im Schloss zurückzuführen. Die Touristen bringen zusätzliche Feuchtigkeit ein und es erfordert einen höheren Frischluftanteil, der durch die geöffneten Fenster realisiert wird und damit zu höheren Schwankungen führt. Insbesondere im Türkischen Saal befindet sich zudem eine große Menge an puffernden Materialien, die zusätzlich das Raumklima stabilisieren.

Im Abgleich zu den Wägeversuchen im Klimaschrank zeigten gefasste und vergoldete Holzoberflächen eine eher geringe Reaktion auf kurzfristige klimatische Schwankungen (vgl. Abbildung 3.13). Dies stimmt auch mit den Untersuchungen vor Ort überein. Die gefassten und vergoldeten Holzoberflächen sind überwiegend gut erhalten, obwohl zum Teil hohe tägliche Schwankungen (Spiegelsaal: Mittelwert 8,5 % rF, Türkischer Saal: Mittelwert 4,9 %) vorliegen (vgl. 4.1.1, 4.2.1). Die aufgelisteten Schäden sind daher auf längerfristige Schwankungen (mehr als drei Tage) zurückzuführen.

¹⁷⁴ www.forschungsprojekt-temperierung.byuseum.de, Stand 8. September 2015.

Vergleich der Erhaltungszustände und Fazit

Alle vier Fallstudien haben eine Gemeinsamkeit: Risse bzw. Fugenöffnungen sind an allen Holzobjekten und an jedem Standort zu finden. Neuere Risse konnten in Roggersdorf nachgewiesen werden. Entscheidend ist hier nicht, in welchem Mikroklima sich das Kunstwerk befindet, da die Schäden in Raummitte ebenso wie an den Wandflächen auftreten. Mecklenburg bezeichnet Rissbildungen im Holz als Entspannung für das Gefüge und bewertet diese als einmalige, abgeschlossene Reaktion des Kunstwerks auf seine Umgebung. Auf diesen Annahmen basiert auch der „proofed fluctuation“ Ansatz von Michalski (Kapitel 2.3.3). Aus den Sollwerten nach Stolorow¹⁷⁵ geht hervor, dass gefasste Holzoberflächen im Band zwischen 40 und 60 % relativer Luftfeuchte als sicher gelten. Für Rissbildung gilt eine zu geringe relative Luftfeuchte unterhalb von 40 % als ausschlaggebend. Die Klimaanalyse der untersuchten Fallstudien zeigt, dass bei allen unbeheizten Gebäuden in unserer Klimazone Werte unter 40 % rF äußerst selten sind. Auch wenn das Raumklima der vier Fallstudien nicht für die letzten Jahrzehnte bekannt ist, ist davon auszugehen, dass es sich nicht vollkommen geändert hat. Warum tritt also gerade dieses Schadensphänomen überall auf? Nach Bratasz ist die Rissbildung im Holz abhängig von der Schichtdicke des Holzes sowie der Höhe der Schwankung und des Zeitraums, in dem sie passiert.¹⁷⁶ In Roggersdorf ist eine Spannweite der relativen Luftfeuchte von über 50 % zu verzeichnen. Aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte der Fallstudien mit einem Mittelwert von über 60 % stellt sich eine entsprechende Gleichgewichtsfeuchte im Holz ein. Bei länger andauernden Feuchtwerten von etwa 50 % reagieren die Materialien auch hier bereits mit einem Desorptionsverhalten, so dass es wahrscheinlich ist, dass bereits Feuchtwerte, die über 40 % rF liegen, zu Schäden führen können. Rissbildungen im Bildträger sind demnach die Auswirkung von langfristigen Klimaereignissen und treten bei einem entsprechend vergleichbarem Klima nicht erst ab einer relativen Luftfeuchte unterhalb von 40 % auf (vgl. Abbildung 2.6).

Im Gegensatz dazu ist die Oberfläche eines Kunstwerks stark beeinflusst von kurzfristigen, klimatischen Schwankungen, da diese an der Grenzfläche zuerst wirksam werden. Die theoretischen Annahmen und Erkenntnisse aus den Laborversuchen (Kapitel 3), dass die Diffusionseigenschaften der Oberfläche ausschlaggebend für die Klimaanfälligkeit eines Objektes sind, wurden durch die durchgeführten Untersuchungen bestätigt. Demnach ist eine Vergoldung mit ölhaltigem Bindemittel dichter und damit stabiler gegenüber klimatischen Schwankungen als Polimentvergoldungen mit tierischem Leim als Bindemittel. Polimentvergoldete Oberflächen erwiesen sich dennoch in den Wägeversuchen als stabil gegenüber kurzfristigen Schwankungen und zeigten kaum Gewichtsänderungen. Allerdings ist dies nicht zwingend auf die diffusionshemmende Blattgoldoberfläche, sondern auf die im Verhältnis zur dünnen Bildschicht starke Trägerschicht (2 cm) zurückzuführen. Wegen der geringen Schichtdicke des Blattgoldes ist der μ -Wert kleiner als beispielsweise der einer Farbschicht mit Öl als Bindemittel (Anhang A).¹⁷⁷ In den Fallstudien zeigten sich an vergoldeten Holzoberflächen Lockerungen und Substanzverluste. Diese sind damit auf Schwankungen, die über einen längeren Zeitraum wirkten, zurückzuführen. Vorgeschädigte, vergoldete Oberflächen reagieren jedoch auf kurzfristige Schwankungen, wie am Beispiel Roggersdorf zu zeigen war.

Die Erhaltung der Oberfläche eines Kunstwerks ist jedoch nicht alleine von den kurzfristigen Schwankungen im Raum abhängig, sondern vielmehr von den klimatischen Wechselwirkungen mit dem gesamten Raum. Ebenso ist die Position eines Kunstwerkes im Raum ein wesentlicher Einflussfaktor für dessen Erhaltungszu-

175 Stolorow 1987, S. 16 f.

176 Bratasz et al. 2011.

177 Vgl. Wehle 2010 S. 78 ff.; Allegretti 2008, p. 196.

stand. Hängt ein Gemälde an einer Außenwand, entstehen aufgrund der Temperatur- und Feuchtedifferenz zwischen Vorder- und Rückseite Diffusionsströme, die den Verfall begünstigen können.

Häufig wird mit Beobachtungen argumentiert, dass es Kunstwerke mit guter Erhaltung in schlechtem Klima und umgekehrt gibt. Zu Beginn der Untersuchungen im Königshaus auf dem Schachen stellte sich ebenfalls die Frage, warum die Ausstattung dort, trotz der ungünstigen klimatischen Bedingungen aufgrund seines Standorts in den Alpen, so gut erhalten ist. Die Analyse des Raumklimas zeigte, dass dieses sehr stabil ist und somit eine Voraussetzung für die gute Erhaltung erfüllt. Zudem verhalten sich die hygroskopischen Materialien symbiotisch, da sie puffernd auf das Raumklima einwirken. So lange dieser Prozess innerhalb der elastischen Bewegung bleibt, sind keine oder nur geringe Schäden zu erwarten. Damit soll verdeutlicht werden, dass die individuelle Erhaltung eines Objektes immer von seiner Herstellung und seiner Geschichte, aber auch von den klimatischen Bedingungen der langfristigen Lagerung abhängt. Wenn genaue Angaben hierzu fehlen, ist über die Gründe der Erhaltung nur zu spekulieren.

Der Ansatz, historische Ausstattungen hinsichtlich ihrer klimatisch bedingten Schäden zu untersuchen, um daraus klimatische Risiken abzuleiten, ist sinnvoll. Das Forschungsprojekt „Climate4Wood“, das vom Rijksmuseum in Amsterdam koordiniert wird und die Erhaltung der Sammlungsbestände aus Holz (Möbel und Tafelgemälde) restauratorisch und simulatorisch untersucht, verfolgt einen ähnlichen Ansatz.¹⁷⁸

Es sollte aber auch die Ausstattung berücksichtigt werden, die einmal in historischer Umgebung war, dort aber aufgrund der klimatischen Bedingungen nicht mehr bleiben konnte. Gerade in Schloss Linderhof sind in den letzten Jahren vermehrt Textilien ausgebaut worden. Trotz des verbesserten Lichtschutzes ist der Erhaltungszustand einiger Textilien (z. B. der Hermelinmantel, der im Baldachin des Audienzimmers hing) so schlecht, dass sie nicht mehr sicher in der ursprünglichen Umgebung aufbewahrt werden können.

In realer Umgebung sind klimatische Schwankungen immer nur einer von vielen Faktoren, die auf ein Objekt wirken. Aufgrund von baulichen Gegebenheiten bzw. in Kombination mit weiteren Einflüssen, bilden sich Mikroklimata aus, die unter Laborbedingungen kaum berücksichtigt werden können. Umgekehrt sind Laborversuche, etwa im Klimaschrank hilfreich, um speziellen Fragen nachzugehen, die sich aus Untersuchungen vor Ort ergeben, da hier andere Einflüsse ausgeschlossen werden können.

Die Untersuchungen haben außerdem noch einmal bestätigt, dass klimatische Vorgaben, die lediglich auf kurzfristige Schwankungen reduziert sind, nicht zielführend sein können, sondern dass eine ganzheitliche Bewertung des Klimas und der jeweiligen räumlichen Situation erfolgen muss.

Die Thesen, die anhand der vier Fallstudien aufgestellt worden sind, müssen an weiteren Objekten evaluiert werden, um eine allgemeingültige, verlässliche Aussage treffen zu können.

Die hier beschriebenen Fragen zu mikroklimatischen Situationen werden in Kapitel 6 anhand der hygrothermischen Simulation weiter untersucht. Beispielsweise werden Gemälde an Außenwänden simuliert, um zu demonstrieren, wie der Temperatur- und Feuchtetransport verläuft.

178 Van Duin 2014.

Bewertung des Risikotools der TU Eindhoven

Basierend auf den Auswertungen der vier Fallstudien erfolgt die Bewertung des Risikotools nach Martens (vgl. 2.3.3). Die Risikoangaben der TU Eindhoven prognostizieren lediglich für das Lila Kabinett in Schloss Linderhof, für das Raumklima in Roggersdorf sowie für das Raum- und Mikroklima der Renatuskapelle Schäden am Bildträger. Diese sind aber auch auch im Spiegelsaal in Schloss Linderhof und im Königshaus am Schachen nachzuweisen. Die Prognosen für die Bildschicht fallen ebenfalls zu positiv aus. Sie sind in keinem Szenario zu finden. Zudem fehlt im Risikotool der TU Eindhoven die Auswertung von kurzfristigen Schwankungen. Schäden aufgrund von ungünstigen Temperaturen werden lediglich im Lifetime-Multiplier berücksichtigt. Auffallend ist, dass das Klima in der Renatuskapelle mit einer relativen Luftfeuchte von im Mittel 63 % (maximal 92%) als schädigend eingestuft wird, das im Erdgeschoss im Königshaus am Schachen, mit einer mittleren relativen Luftfeuchte von 70 % und Maximalwerten von über 90 % rF jedoch nicht. Zu erklären ist dies nur damit, dass im Erdgeschoss des Königshauses am Schachen die hohen relativen Luftfeuchten mit geringen Temperaturen einhergehen, in der Renatuskapelle sind sie an höhere Temperaturen über 20 °C gekoppelt. Trotzdem waren an den Grafiken im Königshaus Stockflecken sichtbar.

Raumklimata, bei denen nicht einmal mehr der ASHRAE Standard D greift (Roggersdorf) bergen laut der Prognose nach Martens das gleiche Risiko, wie beispielsweise die Renatuskapelle, die gemäß ASHRAE einer weniger schädlichen Risikoklasse zugeordnet ist. Insgesamt treffen die Prognosen nach Martens nur in rund der Hälfte der Fälle zu. Bisher reichen die Untersuchungen, die an Kunstgegenständen hinsichtlich klimatisch bedingter Schädigungen untersucht wurden noch nicht aus, um daraus ein verlässliches Auswertetool zu entwickeln. Für belastbare Aussagen bedarf es der Einschätzung und Bewertung eines Restaurators.

5 Hygrothermische Simulation der Feuchteverteilung im Materialverbund von Kunstwerken

Die hygrothermische Simulation ist ein nützliches Werkzeug für die Untersuchung von thermischen und hygri-schen Transportvorgängen in Kunstwerken. Im Folgenden werden die theoretischen Grundlagen des Simulationsprogramms, der Forschungsstand zur Simulation des Verhaltens von Kunstwerken sowie die mes-s-technische Bestimmung der dafür notwendigen Kenndaten dargelegt. Die Validierung der Simulation erfolgte durch die experimentelle Untersuchung der Temperatur- und Feuchteverteilung an Leinwandgemälden mit unterschiedlichem Abstand zur Außenwand (5.4).

5.1 Grundlagen des hygrothermischen Simulationsprogramms WUFI®Pro

Die in dieser Arbeit durchgeführten Simulationen erfolgten mit dem Programm WUFI®Pro. Es stammt aus der Softwarefamilie WUFI® (Wärme- und Feuchtetransport instationär). Im Folgenden wird das Funktionsprinzip der Software beschrieben und auf die relevanten Eingabedaten eingegangen.¹⁷⁹ Einen guten Überblick über Entwicklung, Funktionsprinzip und Möglichkeiten der hygrothermischen Simulation geben Künzel et al.¹⁸⁰

5.1.1 Die Softwarefamilie WUFI®

Künzel entwickelte, basierend auf den physikalischen Grundlagen des Wärme- und Feuchtetransports zur Ermittlung des Feuchteverhaltens von mehrschichtigen Bauteilaufbauten unter natürlichen Klimarandbe-dingungen ein geschlossenes Differenzialgleichungssystem.¹⁸¹ Dieses wurde im Softwareprogramm WUFI® numerisch umgesetzt, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik entwickelt und mit Hilfe der Freilandversuchsstelle Holzkirchen experimentell verifiziert. Die dafür benötigten Eingabegrößen (Künzel 2006) sind in Tabelle 5.1 zusammengefasst.

Folgende Kenntnisse sind für die Durchführung einer hygrothermischen Simulation notwendig:

Geometrie

Der Schichtenaufbau des zu berechnenden Bauteils muss bekannt sein. Allgemein richtet sich die Maschenweite des für jede Komponente bzw. jedes Material hinterlegten numerischen Gitters nach der Schichtdicke und den zu erwartenden lokalen klimatischen Schwankungen. Das Raster des Gitters ist manuell in grob, mittel, fein und benutzerdefiniert einstellbar.

179 Weitere Informationen unter <http://www.wissenwiki.de/WUFI>, Stand 8. Oktober 2015.

180 Künzel et al. 2006, S. 7–15.

181 Künzel 1994.

Thermische und hygrische Stoffkennwerte

Folgende materialspezifische Kenngrößen sind für die Simulation notwendig: Rohdichte, Porosität, spezifische Wärmekapazität sowie die feuchteabhängige Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl. Bei hygroskopischen, kapillaraktiven Stoffen sind zusätzlich die Feuchtespeicherfunktion und die Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterleitung erforderlich. Ihre Bestimmung wird in 5.3 beschrieben.

Klimaparameter

Die klimatischen Randbedingungen setzen sich für den Innenraum aus Temperatur und relativer Luftfeuchte zusammen. Um das Außenklima abzubilden sind zusätzlich die solare Einstrahlung, die Normal- und Schlagregenmenge sowie die Windgeschwindigkeit nötig. Die Rechengenauigkeit hängt von der Taktung der Zeitschritte ab. Üblicherweise werden Stundenmittelwerte verwendet. Im Programm stehen für das Außenklima unterschiedliche, statistisch ausgewertete Jahresverläufe zur Verfügung.¹⁸² Liegen für den zu untersuchenden Standort keine Daten für Innen- und Außenklima vor, müssen diese entweder gemessen, oder anhand von Erfahrungswerten realistisch abgeschätzt werden.¹⁸³

Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen

Die wichtigsten einstellbaren Übergangsbedingungen sind der Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient, der Strahlungsabsorptionsgrad und der Regenfaktor.

Steuerparameter

Anhand der Steuerparameter werden die Rechengenauigkeit und die Anfangsbedingungen – etwa die Anfangsfeuchte im Bauteil festgelegt.

Berechnung und Auswertung

Sind alle notwendigen Parameter hinreichend eingegeben, startet die Berechnung mit der iterativen Lösung des gekoppelten Differenzialgleichungssystems. Dies bedeutet, dass für jeden Zeitschritt an jedem Gitterpunkt die Temperatur und relative Luftfeuchte berechnet werden. Da beide Größen voneinander abhängig sind, wird, um das Ergebnis zu verbessern, die Temperatur aus der eben ermittelten relativen Luftfeuchte neu berechnet. Dieser Kreislauf wird solange fortgeführt, bis eine ausreichende Übereinstimmung vorliegt.

Die stündlichen Veränderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Bauteil sowie die Wärme- und Feuchteströme über die Bauteilgrenzen werden als Ergebnis ausgegeben. Sowohl die örtliche Verteilung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Wassergehalt zu einem bestimmten Zeitpunkt, als auch die Bestimmung des Langzeitverhaltens hygrothermischer Parameter, sind möglich.

Wärme- und Dampftransportvorgänge, die infolge von Luftströmungen entstehen, werden bei den Berechnungen mit WUFI® nicht berücksichtigt.

182 Künzel et al. 2000.

183 Künzel 1997.

Tabelle 5.1: Zusammenstellung der für alle WUFI®-Berechnungen benötigten Eingabedaten.

Eingabeparameter	Erforderliche Datensätze oder Angaben
Geometrie	Aufbau des zu berechnenden Bauteils
	Numerisches Gitter
Thermische und hygrische Stoffkennwerte und -funktionen	Rohdichte und Porosität
	Spezifische Wärmekapazität
	Feuchteabhängige Wärmeleitfähigkeit
	Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl
	Feuchtespeicherung (bei hygroskopischen Stoffen)
	richtungsabhängige Flüssigleitfunktionen für den Saugvorgang und die Weiterleitung
Klimaparameter	Temperatur
	relative Luftfeuchte
	kurzwellige Strahlung (nur außen)
	Niederschlag auf die Bauteiloberfläche (nur außen)
Übergangs- bzw. Symmetriebedingungen	Wärme- und Feuchteübergangskoeffizient
	Strahlungsabsorptionsgrad (nur außen)
	Regenabsorptionsgrad (nur außen)
Steuerparameter	Zeitschritte
	Rechengenauigkeit
	Form der Anfangsbedingungen (z. B. Startzeitpunkt)
	Sonstige berechnungsspezifische Parameter



Abbildung 5.1:

Ein Screenshot aus WUFI®Pro zeigt den Querschnitt eines Leinwandgemäldes, das mit Abstand von 2 cm an einer ungedämmten Außenwand aus Ziegelmauerwerk hängt. Aufbau von links nach rechts: Außenputz | Ziegelwand | Innenputz | Luftschicht | Leinwandgemälde. Der graue Kreis bzw. die Videokamera darüber kennzeichnet eine „Monitorposition“.

5.1.2 Die Software WUFI®Pro

Das Funktionsprinzip ist für alle WUFI®-Programme gleich. Je nach Fragestellung stehen unterschiedliche Tools zur Verfügung. WUFI®2D ist ein zweidimensionales Rechenmodell, das für Detailuntersuchungen wie Wärmebrückenbildungen entwickelt wurde. WUFI®Plus ist ein dreidimensionales Raummodell, das hygrothermische Bauteilberechnungen sowie die Simulation des Innenraumklimas für ein gesamtes Gebäude, inklusive Heizung, Belüftung und Energieverbräuche beinhaltet.

Um Temperatur- und Feuchteverläufe in Kunstwerken sowohl zwischen den einzelnen Schichten als auch im Übergang zur Wand zu untersuchen, eignet sich WUFI®Pro. Es stellt anhand des eindimensionalen Querschnitts eines Bauteils die Veränderung von thermischen und hygrischen Bedingungen über den zeitlichen Verlauf dar. Am Beispiel eines Leinwandgemäldes, das an einer ungedämmten Außenwand hängt, wird die Funktionsweise erläutert. In der Querschnittsansicht (Abbildung 5.1) ist der Schichtenaufbau von links nach rechts (außen nach innen) sichtbar:

Außenputz | Ziegelwand | Innenputz | Luftschicht | Leinwandgemälde.

Variiert die Schichtdicke der einzelnen Materialien im Verbund stark, so dass in den dünnen Schichten nur ein Netzelement vergeben wird, kann das Gitter an die Schichtdicke angepasst werden. Weiter ist der Feinheitsgrad des Gitters individuell einstellbar.

Zur Ermittlung der Temperatur- und Feuchteverteilung innerhalb der einzelnen Schichten können in den einzelnen Lagen „Monitorpositionen“ gesetzt werden. Die so markierten Stellen werden bei der Auswertung der hygrothermischen Rechenergebnisse berücksichtigt und gesondert dargestellt (Abbildung 5.1). Diese Einstellung ermöglicht die Beurteilung der Temperatur- und Feuchteverläufe sowohl an der Oberfläche als auch in Bauteilen, was messtechnisch, insbesondere bei sehr dünnen Schichten, nur schwer umzusetzen ist. Insbesondere für die Bewertung, welche Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte Schäden am Materialverbund hervorrufen können, sind diese Ausgaben aufschlussreich.

Weitere Einstellungen wie Ausgangsbedingungen, Klimaparameter, Übergangs- und Symmetriebedingungen müssen vor Beginn der Simulationsrechnung festgelegt werden. 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 erneut berechnet.

Das Ergebnis der berechneten Temperatur- und Feuchteverläufe ist entweder über die grafische Darstellung des Programmes sichtbar oder kann als Textdatei ausgegeben werden. Zusätzlich ist die Ausgabe in Form eines animierten Films möglich.

5.2 Adaption eines bauphysikalischen Simulationsprogramms für die Berechnung von Wärme- und Feuchtetransport in Kunstwerken

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. Diese Methode ermöglicht, die Auswirkung von kurzfristigen Schwankungen auf unterschiedliche Materialverbünde in differenzierter Weise zu untersuchen. Wie verläuft der Transport von Feuchtigkeit im Materialgefüge in Abhängigkeit unterschiedlicher Materialeigenschaften? Welche relativen Luftfeuchten stellen sich bei einer Schwankung im Gefüge ein? Welche Differenzen der relativen Luftfeuchte sind im Gefüge oder innerhalb einer Schicht zu erwarten? Wie lange dauert es, bis ein Kunstwerk, das sich im Gleichgewicht befindet und eine klimatische Schwankung erfährt, wieder zurück in die Ausgangsposition gelangt? In welchem Zeitraum erfahren Kunstwerke Transportprozesse von Temperatur und relativer Luftfeuchte? Zur Beantwortung dieser Fragen ist zunächst die Kenntnis der hygrothermischen Stoffkennwerte der im Verbund vorkommenden Materialien notwendig (vgl. 5.3).

Für Aussagen zu allgemein zulässigen klimatischen Schwankungen muss der gesamte räumliche Zusammenhang berücksichtigt werden. Ein Kunstwerk, das an einer Außenwand hängt, erfährt beispielsweise höhere Schwankungen, als ein Objekt, das in Raummitte ausgestellt ist. Auch hier ist WUFI®Pro ein hilfreiches Werkzeug, da die klimatische Situation eines Gemäldes in unterschiedlichen räumlichen Gegebenheiten durch die Variation der Randbedingungen simuliert werden kann.

Forschungsstand zur Simulation von Kunstwerken

Marion Mecklenburg wie auch die Forschergruppe um Roman Kozłowski verwenden CFD-Simulationen (computational fluid dynamics = numerische Strömungsmechanik), um das mechanische Verhalten von Kunstwerken, insbesondere die Verformung von Holztafeln, ausgelöst durch klimatische Schwankungen darzustellen.¹⁸⁴ Hier kommt meist die Finite-Elemente-Methode zum Einsatz. Ein weiteres Forschungsfeld ist die simulatorische Untersuchung des Verhaltens von Musikinstrumenten.¹⁸⁵

Hygrothermische Simulationen zu Leinwandgemälden an Außenwänden führte Jockusch (2012) durch.¹⁸⁶ Sie nutze dazu das Programm WUFI®Pro. Eine Schwierigkeit bei der Anwendung des Programms auf Kunstwerke ergab sich bei der Abschätzung der Luftwechselrate, welche sich im Luftspalt zwischen Gemälde und Wand einstellt.

Insbesondere die Luftwechselrate hinter dem Gemälde ist eine wichtige Eingabegröße, die bei der Validierung des Simulationsmodells messtechnisch überprüft wurde. Deshalb erfolgten an Dummiegemälden Messungen zur Luftgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Abständen zur ungedämmten Außenwand. Derselbe Versuchsaufbau wurde simuliert und beide Datensätze miteinander verglichen (5.4).

184 Jakiela et al. 2008; Bratasz et al. 2011.

185 Goli et al. 2012; Le Conte et al. 2012; Saft et al. 2012;

186 Jockusch 2012.

5.3 Messtechnische Bestimmung von Stoffkennwerten

Die hinterlegte Materialdatenbank der Software WUFI® mit den für die Simulation erforderlichen Kenndaten ist primär für Baumaterialien ausgelegt. Um den Materialverbund von Kunstwerken simulieren zu können, fehlten bislang die notwendigen Kenndaten. Erste Materialkenndaten für Temperamalerei geben Schwarz et al. (1994). Worch (2007) und Allegretti et al. (2008) bestimmten ebenfalls Kenndaten für Leinwand- und Tafelgemälde. Im Rahmen ihrer Diplomarbeit ermittelte Wehle (2010) für die Simulation des Türkischen Saales im Königshaus am Schachen hygrothermische Kenndaten von darin befindlichen Materialien (Teppich, Seidenstoff, vergoldetes Holz, Rosshaar). Jockusch (2012) bestimmte zusätzlich Kenndaten für diverse Gemäldetypen (wachs- und kleisterdoubliert im Vergleich zu nicht doubliert) und klimatische Rückseitenschutzsysteme. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Diffusions- und Sorptionseigenschaften für diverse Materialien, die insbesondere für Leinwandgemälde sowie gefasste und vergoldete Holzoberflächen verwendet werden, bestimmt (Anhang A). Die Daten für Wärmeleitfähigkeit und Wärmekapazität wurden den Literaturangaben entnommen oder nach den unten angegebenen Formeln berechnet.

Die *Rohdichte* ρ_{roh} gibt das Gewicht der gesamten Volumeneinheit inklusive Porenvolumen an. Die *Reindichte* ρ_{rein} ist im Vergleich dazu das Verhältnis von Masse zum reinen Materialvolumen ohne Porenvolumen.¹⁸⁷

$$\rho_{\text{roh}} = m / V_{\text{ges}}$$

$$\rho_{\text{rein}} = m / (V_{\text{ges}} - V_{\text{Poren}}) = m / V_{\text{rein}}$$

In WUFI® dient die Rohdichte der Umrechnung von massenspezifischer in volumenspezifische Wärmekapazität. Die *Porosität* ist das Verhältnis des Porenvolumens zum Gesamtvolumen und hängt daher direkt von der Rohdichte ab. Je höher diese ist, umso geringer ist die Porosität und umgekehrt.¹⁸⁸ In WUFI® wird aus der Porosität der maximale Wassergehalt eines Stoffes errechnet.

Die *Wärmeleitfähigkeit* λ ist abhängig von der chemischen Struktur und Rohdichte eines Stoffes, wie auch von der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Mit sinkender Rohdichte nimmt diese ab. Amorphe Strukturen sind generell weniger wärmeleitend als kristalline. Abhängig von der Achse kann sie bei mehrdimensional ausgerichteten Materialien, wie z. B. Holz stark variieren. Da Luft eine sehr geringe Wärmeleitfähigkeit besitzt, wirkt sich die Porosität ebenfalls aus: Je größer letzere ist, desto geringer ist die Wärmeleitfähigkeit.

Feuchtetransport und -speicherung

Der Dampfdiffusionswiderstand wird für den dampfförmigen Feuchtetransport und die kapillare Leitung benötigt. Für die Feuchtespeicherung wird die Feuchtespeicherfunktion beschrieben. Letztere gibt an, welcher Wassergehalt sich bei definierter relativer Luftfeuchte in einem Material einstellt. Sie wird im hygrokopischen Bereich aus der *Sorptionsisotherme* und im überhygrokopischen Bereich aus der Saugspannungskurve ermittelt.¹⁸⁹ Kennwerte des Feuchtetransports sind die *Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl* (μ -Wert) sowie die *äquivalente Luftschichtdicke* (s_d -Wert). Die messtechnische Bestimmung wird im Folgenden erläutert: Im Anhang befindet sich die Tabelle der ermittelten Kenndaten.

¹⁸⁷ <https://wufi.de/de>, Stand 8 Oktober 2015.

¹⁸⁸ Leimer 2003, www.bauphysik.fh-hildesheim.de, Februar 2013.

¹⁸⁹ Krus 1995.

Die Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben erfolgte nach DIN EN ISO 12572 durch das Feuchtbereichs- und das Trockenbereichsverfahren, auch als „wet-cup“ bzw. „dry-cup“-Verfahren bezeichnet. Als Prüfumgebung wurde eine Klimakammer mit einem konstanten Klima von 50 % relativer Luftfeuchte und einer Temperatur von 23 °C verwendet.¹⁹⁰ 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.¹⁹¹ Aufgrund des Wasserdampfpartialdruckgefälles zwischen Gefäßinnerem und Klimakammer diffundiert Wasserdampf durch die Probe. Nach einiger Zeit stellt sich ein konstanter Diffusionsstrom ein, der eine pro Zeiteinheit konstante Gewichtsab- (wet-cup) bzw. -zunahme (dry-cup) des Messgefäßes zur Folge hat. Diese entspricht dem Diffusionsstrom. Die Formeln zur Umrechnung der Wasserdampfdiffusionsstromdichte in den Wasserdampfdiffusionsdurchlasskoeffizienten, aus welchem sich über die Wasserdampfdiffusionsleitkoeffizienten schließlich die Wasserdampfdiffusionswiderstandszahl errechnet, sind in DIN EN ISO 12572 vorgegeben.¹⁹²

Daraus lässt sich die äquivalente Luftschichtdicke s_d bestimmen. Der Wert entspricht der Dicke einer ruhenden Luftschicht mit dem gleichen Wasserdampfdiffusionsdurchlasswiderstand wie der Probekörper.



Abbildung 5.2: Dry-cup-Messung an polimentvergoldeten PE-Fritten in den Prüfkammern des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik.

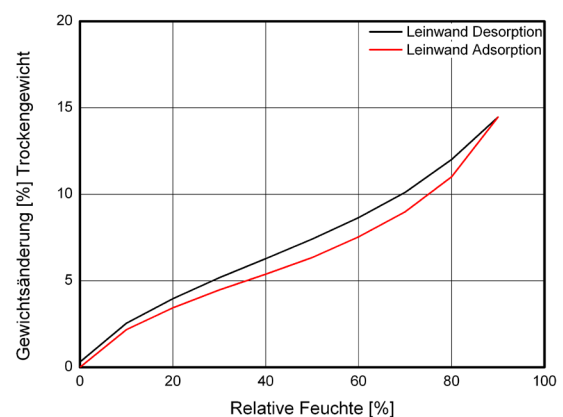
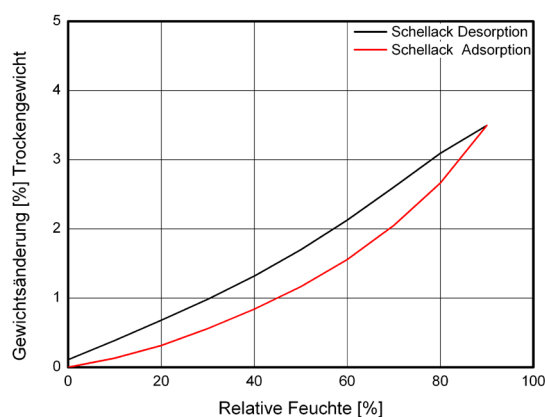


Abbildung 5.3:

Grafische Darstellung der Sorptionsisotherme am Beispiel von Schellack (links) und Leinwand (rechts). Die Adsorptionskurve ist mit der roten Linie dargestellt, die Desorptionskurve mit schwarzer Linie.

¹⁹⁰ Die Ermittlung der Materialkennwerte erfolgte in den Prüflaboren des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik, Holzkirchen.

¹⁹¹ Wetcup: Ammoniumdihydrogenphosphat erzeugt im Gefäß eine relative Luftfeuchte von 93 %, dry-cup: 0 % rF.

¹⁹² DIN EN ISO 1257, April 2000, Punkt 8.

$$s_d = \mu \cdot d \text{ in [m]}$$

μ [-] : Wasserdampfdurchlasswiderstand

d [m] : Schichtdicke

Zur Bestimmung der Wasserdampfdurchlässigkeit der Proben wurden Polyethylen-Fritten (PE-Fritten) als Trägermaterial verwendet. Diese sind chemisch inert und beeinflussen die Messungen des Wasserdampfdiffusionswiderstands nicht. Als Referenz wurden zunächst sechs Stück ohne Aufstriche jeweils im „wet-cup“- und „dry-cup“-Verfahren gemessen. Zur Ermittlung der Wasserdampfdurchlässigkeit eines Materials wurde dieses auf die Fritte aufgestrichen und wie oben beschrieben gemessen (Abbildung 5.2).

Zwischen Probekörperunterseite und Salzlösung bzw. Silicagel liegt eine Luftschicht vor, die nach Norm eine Dicke von 15 (\pm 5) mm haben muss. Diese Schicht stellt einen Widerstand für den Wasserdampfdiffusionsstrom dar. Für die meisten Stoffe ist dieser viel kleiner als der Widerstand des Prüfmaterials selbst. Bei sehr durchlässigen und dünnen Materialien, wie es bei Bestandteilen von Kunstwerken der Fall ist, hat die ruhende Luftschicht aber einen Einfluss und muss berücksichtigt werden. Bei Materialien mit einem s_d -Wert kleiner als 0,2 m muss der Wasserdampfdiffusionskoeffizient nach Anhang G der Norm korrigiert werden. Die Messunsicherheit des Verfahrens steigt, je diffusionsoffener das Prüfmaterial ist. In der Norm ist festgelegt, dass das Verfahren eigentlich nur für Prüfkörper mit einem s_d -Wert größer als 0,1 m zulässig ist. Dennoch gibt es derzeit keine Alternative zu dieser Methode. Da der s_d -Wert jedoch nicht die einzige Kenngröße eines Materials oder -verbunds ist, sondern in Kombination mit weiteren Kennwerten eingegeben wird, trägt dieser auch bei diffusionsoffenen Materialien zu einer guten Einschätzung des hygromischen Verhaltens von Kunstwerken bei. Zu den diffusionsoffenen Materialien zählen Leim, Grundierungen und Farbaufräge mit wässrigen Bindemitteln. Firnisse und Überzüge sind diffusionshemmend. Auch der Erhaltungszustand, also ob intakte, geschlossene oder durch Alterung veränderte Oberflächen (Craquelée) vorliegen, ist maßgeblich dafür, wie diffusionsdurchlässig ein Kunstwerk ist.

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 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 (Kapitel 2.1.2). Die Adsorptions- und Desorptionskurven der im Kunstwerk vorhandenen Materialien werden durch die Messung der Ausgleichsfeuchte bei 50 %, 65 %, 80 % und 93 % relative Luftfeuchte bestimmt. Für die nach DIN EN ISO 12571 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 ermittelt.¹⁹³ Hier wird für die Gewichtsbestimmung eine Mikrowaage verwendet, so dass wenige Gramm einer Probe ausreichen. In Abbildung 5.3 sind Schellack

¹⁹³ DVS = dynamic vapour sorption. Die Analysen wurden vom Fraunhofer-Institut für Verpackung und Verfahrenstechnik (IVV) in Freising durchgeführt.

(links) und Leinwand (rechts) als Materialbeispiele dargestellt. Die rote Linie zeigt den Verlauf der Adsorption, die Schwarze den der Desorption. Die Kurvenform ist zwar ähnlich, doch die Skala der Gewichtsänderung variiert deutlich. Somit ist die Feuchteaufnahmekapazität von Leinwand größer als die von Schellack.

Interaktion und Diversität der Schichten

Theoretisch ist ein Materialverbund mittels hygrothermischer Simulation nachstellbar, indem die Materialkenn-
daten der einzelnen Schichten separat bestimmt und anschließend addiert werden. Praktisch weichen die
Messungen des Materialverbunds und die Addition der identischen Schichten, die separat gemessen wurden,
voneinander ab. Am Beispiel von Ocker in Leinöl mit einer Schicht Dammar soll dies erläutert werden: In der
Einzelmessung hatte Ocker in Leinöl einen μ -Wert von 508,4, Dammar von 59,5 (Durchschnittswerte aus der
wet- und dry-cup-Messung). Beide Schichten zusammengezählt ergeben einen Wert von 567,9. Der μ -Wert
der im Verbund gemessenen Materialien ist mit 1065 fast doppelt so hoch (siehe Anhang A). Die Schichten
sind einerseits durch Kohäsion in sich und durch Adhäsion miteinander verbunden. Im realen Kunstwerk
können sich etwa beim Malprozess Schichten miteinander vermischen und weitere Reaktionen, wie das
Durchwandern in Schichten auftreten. Die Alterung verändert zusätzlich die ursprünglichen Eigenschaften der
Schichten. Durch Oxidation, Hydrolyse und weitere chemische Reaktionen verlieren die Bindemittel an Elasti-
zität und reagieren deshalb weniger flexibel auf Spannungen aller Art. Risse und Craquelée beeinflussen die
Durchlässigkeit und damit die Diffusionseigenschaften des Materialverbunds, so dass gealterte Kunstwerke
tendenzmäßig stärker und schneller auf klimatische Schwankungen reagieren.¹⁹⁴ Dies muss bei der Interpretation
der Simulationsergebnisse berücksichtigt werden.

5.4 Validierung der Simulation von Kunstwerken

Die Simulation von Kunstwerken in realer Umgebung, insbesondere von mikroklimatischen Situationen, stellt
eine Herausforderung dar. Luftschichten, die sich etwa durch den Abstand des Gemäldes zur Wand ergeben
und somit das Mikroklima an der Gemälderückseite beeinflussen, sind aufgrund der unbekanntenen Luftströ-
mung in der Simulation schwer nachzustellen. Um verlässliche Aussagen aus der Simulation zu erhalten,
müssen die Ergebnisse mit gemessenen Daten abgeglichen werden. Deshalb erfolgten in einem Versuchshaus
auf dem Freigelände des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik Untersuchungen zu Leinwandgemälden an einer
ungedämmten Außenwand (Nordseite).

Versuchsaufbau

Für den Versuch wurden Leinwandgemäldedummies mit unterschiedlichen Diffusionseigenschaften (mit und
ohne Wachsharz-doublierung) hergestellt und mit Sensoren zur Erfassung der Oberflächentemperatur und
der relativen Luftfeuchte an Vorder- und Rückseite bestückt. Weiter wurde das Klima an der Wandoberflä-
che und in Raummitte messtechnisch erfasst. Die Positionen sind in der grafischen Darstellung dokumen-
tiert (Abbildung 5.6). Ein Heizkörper und ein Luftbefeuchter stellten konstante klimatische Bedingungen im
Versuchshaus von $20\text{ °C} \pm 1\text{ °C}$ und $50\% \pm 5\text{ rF}$ sicher.¹⁹⁵ Über einen Zeitraum von mehreren Tagen wurden
die Gemäldedummies mit einem durch Abstandshalter definierten Abstand zur Wand montiert und die klimatischen
Bedingungen dokumentiert. Mit Hilfe der erhobenen Daten konnte die Plausibilität der Simulationen über-
prüft werden.

¹⁹⁴ Vgl. Lipinski 2009, S. 31.

¹⁹⁵ Disl et al. 2013.

Simulation

Wandaufbau und Materialeigenschaften des Versuchshauses (Abbildung 5.4) sind bekannt, die hygrothermischen Eigenschaften der Leinwandgemäledummies wurden im Labor ermittelt. Folgender Aufbau wurde angenommen: Für den Wandaufbau werden Kalkzementputz, Vollziegel und Kalkputz eingegeben, dann eine Luftschicht mit nach Abstand zur Wand variierender Stärke, anschließend folgt das Leinwandgemäledummy (Tabelle 5.2). Die Abweichung in der Stärke der Luftschicht entsteht durch den 2 cm tiefen Spanrahmen, der zwar in der Simulation an dieser Position nicht berücksichtigt wird, aber den Abstand der Leinwand zur Wand beeinflusst. Die Monitorpositionen zur Ausgabe der Temperatur- und Feuchtwerte wurden so gewählt, dass sie möglichst mit den Positionen der real angebrachten Sensoren übereinstimmen.

Als Außenklimadaten wurden die am Gelände aufgezeichneten Daten verwendet, für das Innenraumklima wurden die in Raummitte gemessenen Daten verwendet.



Abbildung 5.4: Aussenansicht des Versuchshauses auf der Freilandversuchsstelle am Fraunhofer - Institut für Bauphysik.

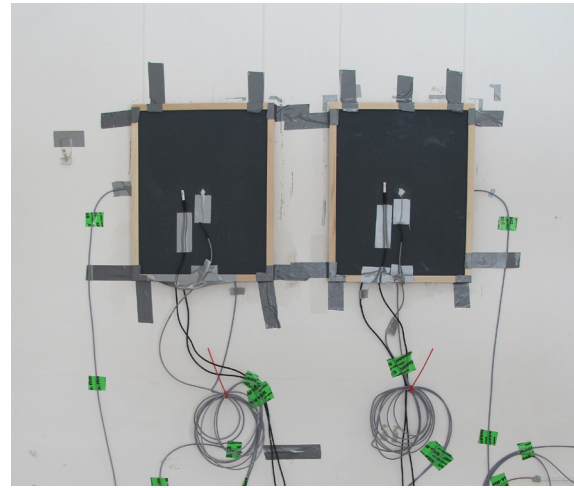


Abbildung 5.5: Ansicht der ungedämmten Innenwand mit den verschiedenen Leinwandgemäledummies (links: undoubliert, rechts: doubliert).

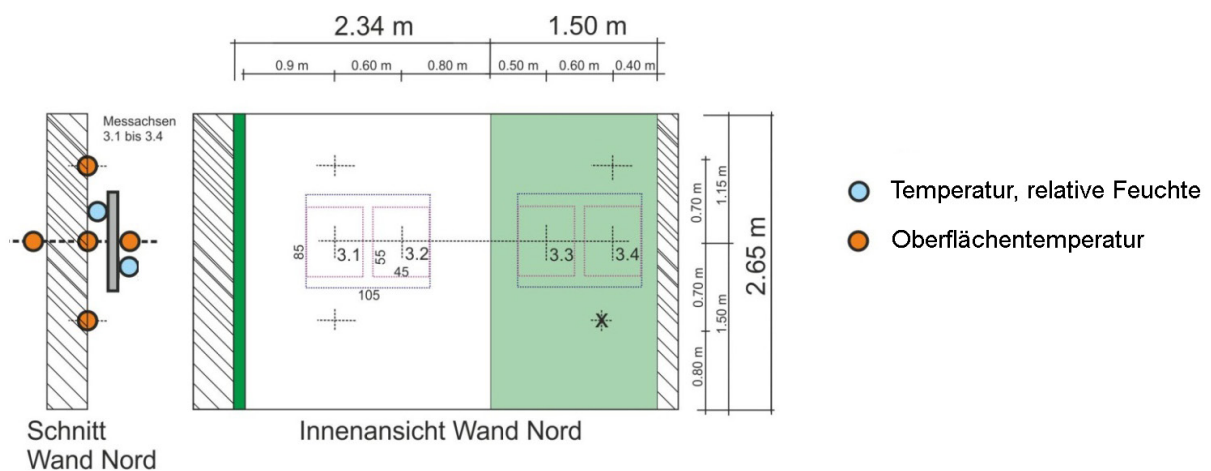


Abbildung 5.6: Schnitt und Ansicht der Wandfläche mit Angabe der Position der Temperatur- und Feuchte- bzw. Oberflächentemperatursensoren (TOF). Grafik: Bichlmair / Disl.

Die Luftgeschwindigkeiten zwischen Gemälderückseite und Wand wurden in Abhängigkeit der unterschiedlichen Hängeabstände erfasst. Der daraus berechnete Wert für die Luftwechselrate übersteigt jedoch das Maximum von 1000/h, das in WUFI® eingegeben werden kann. Da WUFI® primär für die Berechnung von Wärme- und Feuchteströmen in porösen Materialien ausgelegt ist, bedeutet die Simulation von Luftschichten einen Kompromiss. Die Simulation des Leinwandgemäldes mit Abstand zur Wand ist außerdem ein Sonderfall, da Wärme- und Dampftransporte infolge von Luftströmungen in der Simulation nicht berücksichtigt werden. Die Luftschicht als Widerstand gegenüber Wärme- und Feuchteströmen ist aber in die Berechnung einbezogen. In der Simulation wird das Leinwandgemälde wie eine Innendämmung behandelt. Folglich wird der seitliche Luftaustausch zwischen Gemälde und Wand vernachlässigt.

Der Vergleich der simulierten Werte mit den gemessenen Daten wird im Folgenden anhand von drei Szenarien dargelegt: Leinwandgemälde undoubliert an ungedämmter Außenwand ohne, sowie mit 12 und 20 mm Abstand zur Wand. Für die Simulation mit 12 und 20 mm Abstand wurde eine Luftwechselrate von 1000/h eingegeben. Ebenfalls berechnete Varianten mit geringerer Luftwechselrate führten zu einem insgesamt höheren Feuchteniveau hinter dem Gemälde.

Tabelle 5.2:

Querschnitt durch den Materialaufbau von Wand und Leinwandgemälde am Beispiel des Abstands von 12 mm mit Angabe der jeweiligen Schichtdicken.

Aussen				Innen	
Kalkzementputz 20 mm	Vollziegel (alt), 30 mm	Kalkputz, 15 mm	Luftschicht, 32 mm (20 mm Abstand durch den Spanrahmen, 12 mm Abstand von der Wand) Luftwechselrate 1000/ h.	Leinwandgemälde (mit im Labor bestimmten Materialkenndaten) 4,3 mm	

Abbildung 5.7 zeigt den Vergleich von gemessenen (blau / rot) und simulierten (schwarz / grau) Daten des Leinwandgemäldes ohne Abstand zur Wand. Simuliert wurde der Verbund ohne zusätzliche Luftwechselrate. Die Werte weichen zwischen gemessener und simulierter Wandoberflächentemperatur hinter dem Gemälde im Mittel um 1,3 K voneinander ab, an der Rückseite des Gemäldes sind es 0,8 K. Die Differenz der relativen Luftfeuchte zwischen der gemessenen Position an der Rückseite des Gemäldes und der simulierten an der Wandoberfläche beträgt im Mittel 2,5 %. An der Vorderseite sind es im Mittel 2,9 %.

Der Vergleich von gemessenen und simulierten Daten des Leinwandgemäldes mit 12 mm Abstand zur Wand ist in Abbildung 5.8 dargestellt. Die Abweichung der Temperatur beträgt an der Oberfläche der Rückseite 0,9 K, an der Wandoberfläche 2,1 K. Die Differenz der relativen Luftfeuchte ist an der Vorderseite des Leinwandgemäldes 1,3 %, an der Rückseite 0,8 %.

Die dritte Variante ist der Vergleich zwischen gemessenen und simulierten Daten für dasselbe Szenario mit 20 mm Abstand (Abbildung 5.9). Der Temperaturunterschied an der Gemälderückseite beträgt im Mittel 1,8 K vor, an der Wandoberfläche hinter dem Gemälde 2,7 K. Die relative Luftfeuchte weicht an der Vorderseite des Gemäldes um 0,9 %, an der Rückseite um 1,7 % ab.

Für die Bewertung des Vergleichs von gemessenen und simulierten Daten muss die Messgenauigkeit der Sensoren berücksichtigt werden. (Sensirion®-Sensoren geben eine Genauigkeit von ca. $\pm 0,3$ bis 0,5 K und ca. $\pm 1,5$ bis 2 % für die relative Luftfeuchte an, bei PT-100 Temperatursensoren liegt sie bei 0,1 K).¹⁹⁶

Der Auswertung nach Kilian zufolge zeigen alle drei Vergleiche hervorragende bis akzeptable Übereinstimmungen zwischen gemessenen und simulierten Werten.¹⁹⁷ So kann die Simulation trotz der vereinfachten Annahmen für die Simulation von Kunstwerken eingesetzt werden.

¹⁹⁶ <http://www.sensirion.com/en/products/humidity-temperature>, Stand 26. Oktober 2015.

¹⁹⁷ Kilian 2013, S. 91.

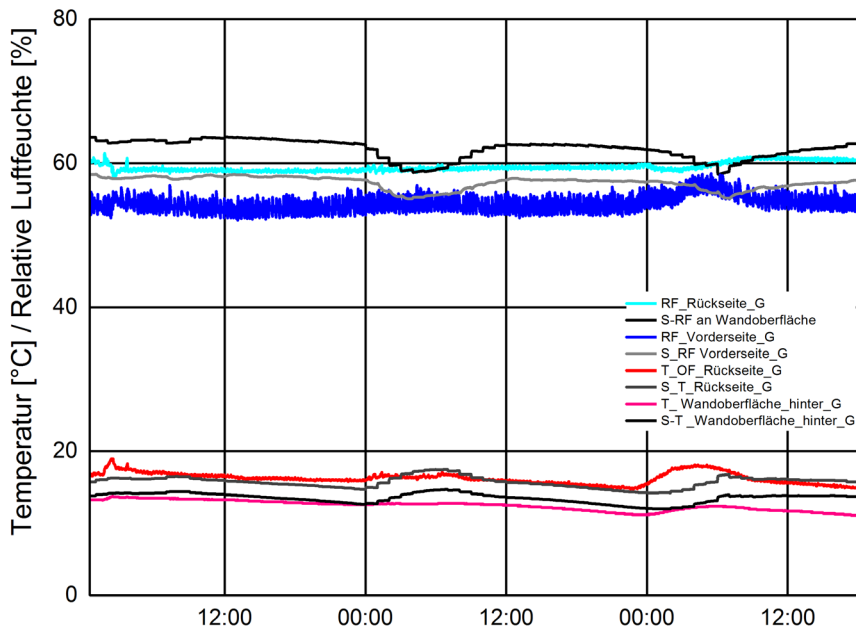


Abbildung 5.7:
Validierungsszenario Leinwand-
gemälde an ungedämmter
Außenwand ohne Abstand zur
Wand: Vergleich der gemessenen
(blau, rot) mit den simulierten
(schwarz, grau) Werten für Tem-
peratur und relative Luftfeuchte.

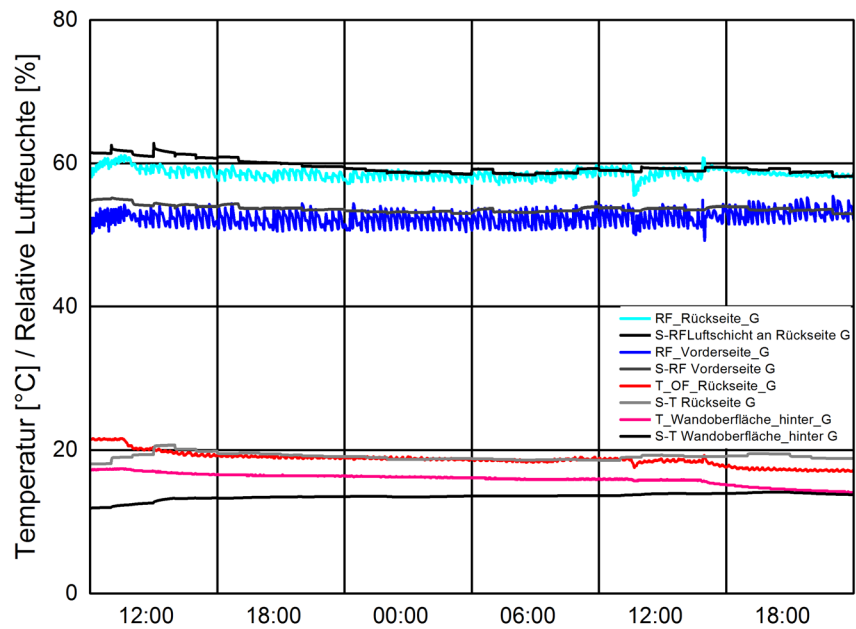


Abbildung 5.8:
Validierungsszenario Leinwand-
gemälde an ungedämmter
Außenwand mit 12 mm Ab-
stand zur Wand: Vergleich der
gemessenen (blau, rot) mit den
simulierten (schwarz, grau) Wer-
ten für Temperatur und relative
Luftfeuchte.

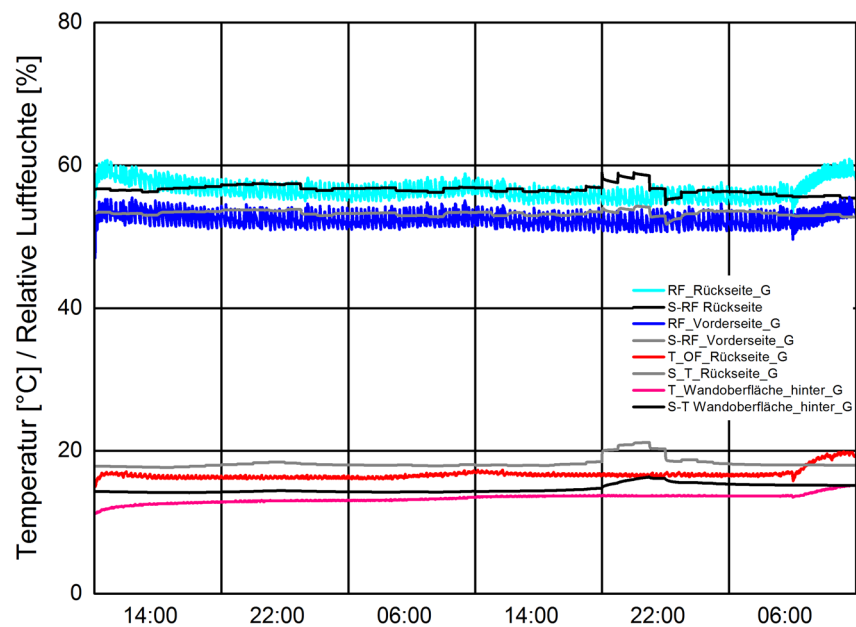


Abbildung 5.9:
Validierungsszenario Leinwand-
gemälde an ungedämmter
Außenwand mit 20 mm Ab-
stand zur Wand: Vergleich der
gemessenen (blau, rot) mit den
simulierten (schwarz, grau) Wer-
ten für Temperatur und relative
Luftfeuchte.

6 Kopplung der Erkenntnisse aus Laborexperimenten und restauratorischen Zustandsuntersuchungen mit der Simulation

In diesem Kapitel werden die Transportvorgänge in unterschiedlichen Materialgefügen sowie die mit Hilfe von Simulationen ermittelten Gradienten von Temperatur und relativer Luftfeuchte in den einzelnen Schichten untersucht. Die Ergebnisse aus den Laborexperimenten und den restauratorischen Untersuchungen vor Ort fließen in die Simulationsszenarien ein.

Zunächst wird gezeigt, wie sich Schwankungen der relativen Luftfeuchte – abhängig von den hygrothermischen Eigenschaften der unterschiedlichen Materialien – im Gefüge auswirken. Anschließend werden jene Materialverbände nachgestellt, bei denen während der Laborversuche sichtbare Veränderungen auftraten. Auf diese Weise soll untersucht werden, inwieweit anhand von Feuchteunterschieden im Materialverbund die Vorhersage von Schäden möglich ist. Die daraus abgeleitete These wird dann durch drei Fallstudien aus den restauratorischen Untersuchungen geprüft.

6.1 Wirkung klimatischer Schwankungen auf unterschiedliche Materialkombinationen

Wie lange dauert es, bis ein Materialverbund nach einer Feuchteschwankung zur Ausgleichsfeuchte zurückkehrt? Abhängig von den verwendeten Materialien wird dies unterschiedlich lange sein. Deshalb wurden Materialverbände mit unterschiedlichen Charakteristiken simuliert und miteinander verglichen. Die Auswertung bezieht sich auf einen, an die Laborversuche angelehnten Sprung der relativen Luftfeuchte von 70 auf 40 %. Eine solche Schwankung liegt nach den Vorgaben von Thomson noch im Korridor für ein Museum zweiter Klasse (55 ± 15 %).¹⁹⁸ Nach acht Stunden wird erneut eine relative Luftfeuchte von 70 % angelegt (schwarze Kurve in den Grafiken). Ausgewertet wird die in minütlichen Schritten berechnete Reaktion der Materialverbände innerhalb von 24 Stunden.

Die Simulation wird für einen Materialverbund, der an einer Innenwand angebracht ist, ohne zusätzliche Angaben von Außenwetterdaten, wie Regenanteil oder solare Einstrahlung durchgeführt. Als Anfangsfeuchte werden 70 % rF angenommen. Die angegebenen relativen Luftfeuchten beziehen sich – wenn nicht anders angegeben – auf die Schichtmitte.

Bei der Ermittlung der Materialeigenschaften anhand von Labormessungen ergaben sich zwischen einzelnen und im Verbund gemessenen Schichten erhebliche Unterschiede (Kapitel 5.3). In der Simulation wurde dies berücksichtigt, indem einmal ein Verbund mit den jeweils einzeln gemessenen Materialien eingegeben und einmal die im Verbund ermittelten Werte (z. B. Malschicht und Überzug) als eine Schicht angenommen wurden. Die Ergebnisse beider Simulationen werden anschließend miteinander verglichen (vgl. 6.1.3, 6.1.4).

¹⁹⁸ Thomson 1986.

6.1.1 Malerei auf Leinwand

Der Verbund Malerei auf Leinwand wurde in zwei Varianten mit diffusionsoffener und -hemmender Malschicht berechnet. Der Unterschied liegt im Bindemittel der Malschicht: Einmal wurde Vollei, einmal Leinöl verwendet. Weiter wurde exemplarisch der Einsatz von zwei unterschiedlichen Farbmitteln untersucht und die Dicke der Malschicht variiert. Für die Simulationen wurde folgender Aufbau angenommen: Leinwand, Vorleimung, Grundierung, Malschicht – Ocker in Ei bzw. Leinöl und Dammar als Firnis (Tabelle 6.1). Zur Eingabe wurden die im Labor ermittelten Kennwerte verwendet (Anhang A).

Tabelle 6.1:
Querschnitt durch den Materialaufbau Malerei auf Leinwand mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite				Vorderseite
Leinwand 1,5 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung Halbölgrund 2 mm	Malschicht Ocker in Ei (diffusionsoffen) 0,03 mm / Ocker in Leinöl (diffusionshemmend), 0,3 mm	Firnis (Dammar) 0,03 mm

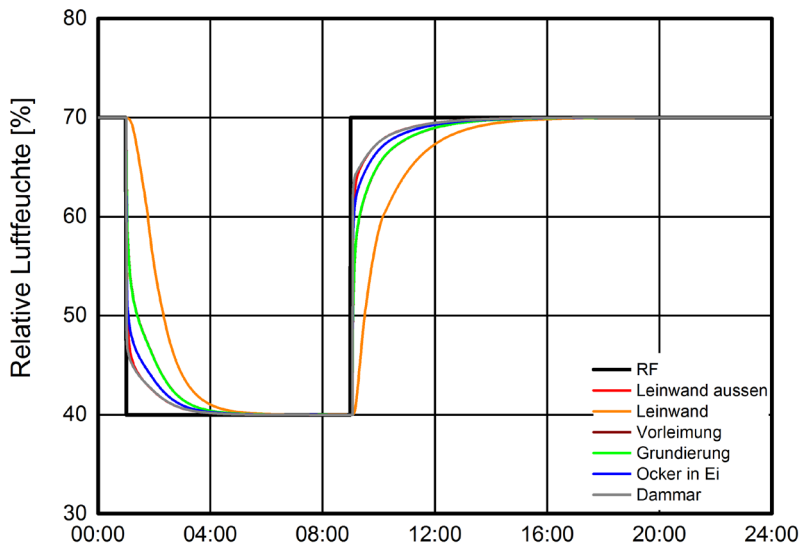


Abbildung 6.1:
Ergebnisse der Simulation von
Leinwand mit Ocker in Ei am Beispiel
einer achtstündigen Schwankung
von 70 auf 40 % rF.

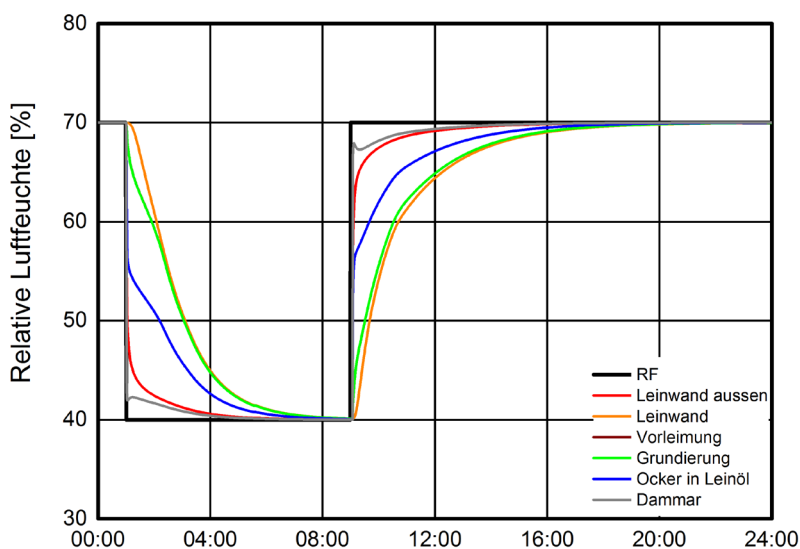


Abbildung 6.2:
Ergebnisse der Simulation von Lein-
wand mit Ocker in Leinöl am Beispiel
einer achtstündigen Schwankung
von 70 auf 40 % rF.

Vergleich diffusionsoffene / -hemmende Malschicht

Der Einfluss des Bindemittels in der Malschicht bei klimatischen Schwankungen wird beim Vergleich von Ocker in Ei und Leinöl sichtbar (Abbildungen 6.1 und 6.2). Der Verbund mit der Malschicht Ocker in Ei (Abbildung 6.1) reagiert unmittelbar und sehr stark auf die klimatische Schwankung. Zwischen den einzelnen Schichten treten kaum Feuchtedifferenzen auf. Ca. vier Stunden nach Reduzierung der relativen Luftfeuchte befindet sich der Verbund im neuen Gleichgewicht von 40 %, beim Anstieg zurück auf 70 % rF dauert es sechs Stunden bis zur Erlangung des Gleichgewichts.

Im Verbund mit Ocker in Leinöl (Abbildung 6.2) sind zwischen den einzelnen Schichten deutliche Abweichungen der relativen Luftfeuchte festzustellen. Innerhalb der ersten sechs Stunden sind zwischen Grundierung, Malschicht und Firnis Unterschiede von ca. 10 % vorhanden. Die Gleichgewichtsfeuchte stellt sich bei 40 % und 70 % nach jeweils ca. acht Stunden ein.

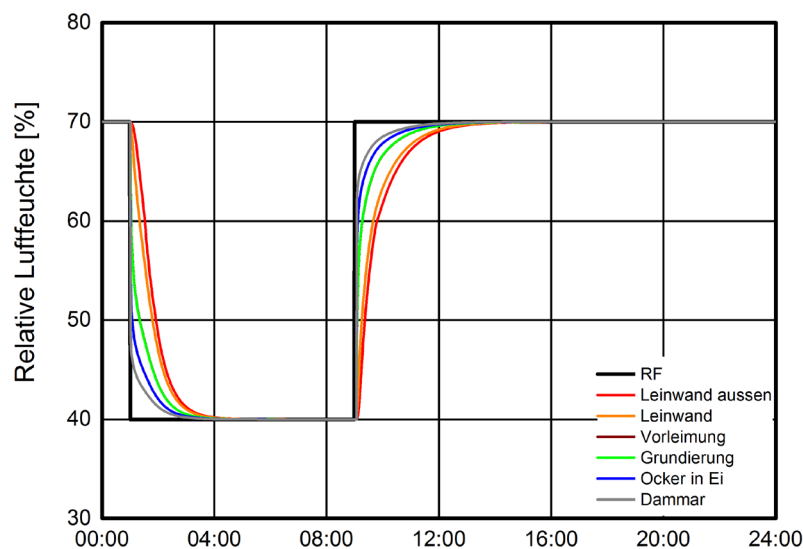


Abbildung 6.3: Ergebnisse der Simulation von Leinwand mit Ocker in Ei am Beispiel einer achtstündigen Schwankung von 70 auf 40 % rF mit abgedichteter Rückseite.

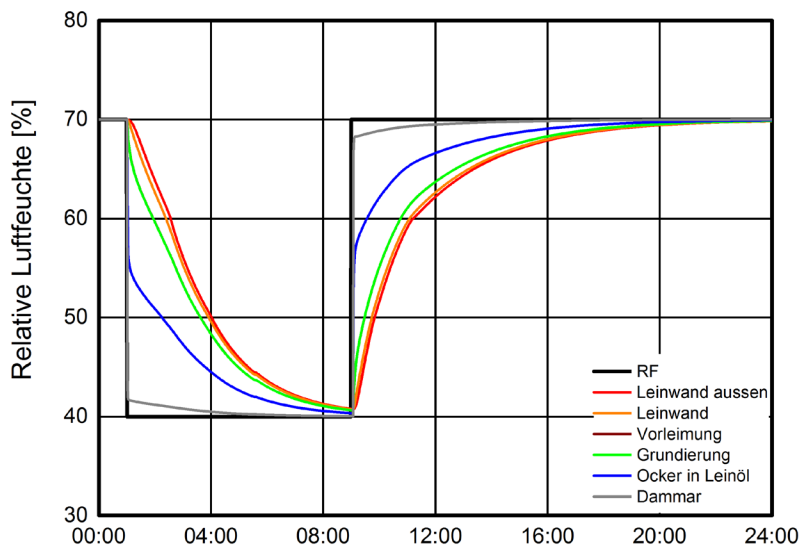


Abbildung 6.4: Ergebnisse der Simulation von Leinwand mit Ocker in Leinöl am Beispiel einer achtstündigen Schwankung von 70 auf 40 % rF mit abgedichteter Rückseite.

Die stärksten Reaktionen sind jedoch bei beiden Versuchen in der Leinwand festzustellen: Während sich der äußere Teil, also die Bildrückseite sofort dem neuen Klima anpasst, wird die Leinwand zur Malschicht hin in beiden Fällen durch die darüber liegenden Schichten gepuffert.

Inwieweit die Feuchteaufnahme durch die stark hygroskopische Leinwand erfolgt, zeigt der gleiche Versuch mit abgedichteter Rückseite, z. B. durch einen diffusionsdichten Rückseitenschutz.

Die diffusionsoffene Malschicht mit Ei als Bindemittel (Abbildung 6.3) reagiert zusammen mit Vorleimung, Grundierung und Firnis annähernd so wie ohne Abdichtung. Nach drei Stunden ist bei 40 % die Gleichgewichtsfeuchte erreicht, bei 70 % nach vier Stunden. Die beiden Abbildungen 6.1 und 6.3 unterscheiden sich lediglich durch die Reaktion der Leinwand. Der Verlauf der relativen Luftfeuchte in den anderen Schichten bleibt gleich. Folglich erfolgt die Befeuchtung großteils von der Vorderseite her (Abbildung 6.1).

Die Auswirkung der abgedichteten Leinwand ist im Verbund mit diffusionshemmender Malschicht ebenfalls kaum sichtbar (Abbildung 6.4). Es zeichnet sich lediglich ein leichter Rückgang der Reaktion an der Vorderseite ab. Das bedeutet für beide Szenarien, dass die Reaktion, die aufgrund der klimatischen Schwankung ausgelöst wird, maßgeblich über die Vorderseite, also die Bildschicht erfolgt (bei konstanten Bedingungen an beiden Seiten).

Einfluss des Farbmittels

Ähnlich wie die Wahl des Bindemittels können auch die Eigenschaften des Farbmittels die Reaktion eines Schichtverbunds auf klimatische Schwankungen beeinflussen (Kapitel 2.1.2). Inwieweit anhand von hygrothermischer Simulation Unterschiede sichtbar werden, wird hier am Beispiel von Ocker und Zinkweiß gezeigt. Für die Simulation von Zinkweiß in Leinöl und Ei wurden wieder die im Labor bestimmten feuchtetechnischen Eigenschaften verwendet (Anhang A). Die oben beschriebenen Simulationsaufbauten wurden beibehalten, lediglich Ocker durch Zinkweiß ersetzt (Tabelle 6.2).

Tabelle 6.2:
Querschnitt durch den Materialaufbau Malerei auf Leinwand mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite				Vorderseite
Leinwand 1,5 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung Halbölgrund 2 mm	Malschicht Zinkweiß in Ei (diffusionsoffen) 0,03 mm / Zinkweiß in Leinöl (diffusionshemmend), 0,3 mm	Firnis (Dammar) 0,03 mm

Die Reaktion der Verbünde mit Zinkweiß in Ei oder Leinöl auf die Schwankung der relativen Luftfeuchte (Abbildung 6.5 und 6.6) ist der von Ocker in Ei / Leinöl sehr ähnlich. Der diffusionsoffene Verbund mit Zinkweiß in Ei reagiert mit Ausnahme der Leinwand (orange) mit einer starken Feuchteab- bzw. zunahme. Nach ca. vier Stunden ist bei 40 %, nach fünf Stunden bei 70 % rF die Gleichgewichtsfeuchte erreicht. Im Verbund mit Zinkweiß in Leinöl reagieren die beiden äußersten Schichten im Verbund (Firnis und Leinwand außen) am stärksten, ähnlich wie in Abbildung 6.2. Zwischen Firnis, Malschicht und der Grundierung sind wiederum starke Feuchtedifferenzen von bis zu 15 % zu beobachten.

In Abbildung D 1 und D 2 (Anhang D) ist die Reaktion der beiden Schichtenverbünde mit abgedichteter Rückseite dargestellt. Sie unterscheiden sich wiederum nicht von den Simulationen mit Ocker als Farbmittel (Abbildung 6.3 und 6.4).

Bezüglich der Feuchteverteilung im Materialverbund zeigten die beiden Farbmittel Zinkweiß und Ocker in der Simulation keinen wesentlichen Unterschied. Dies ist wohl damit zu begründen, dass die physikalischen Prozesse, wie das Quellen und Schwinden der Farbmittel, als Reaktion auf das veränderte Klima, nicht abgebildet werden können.

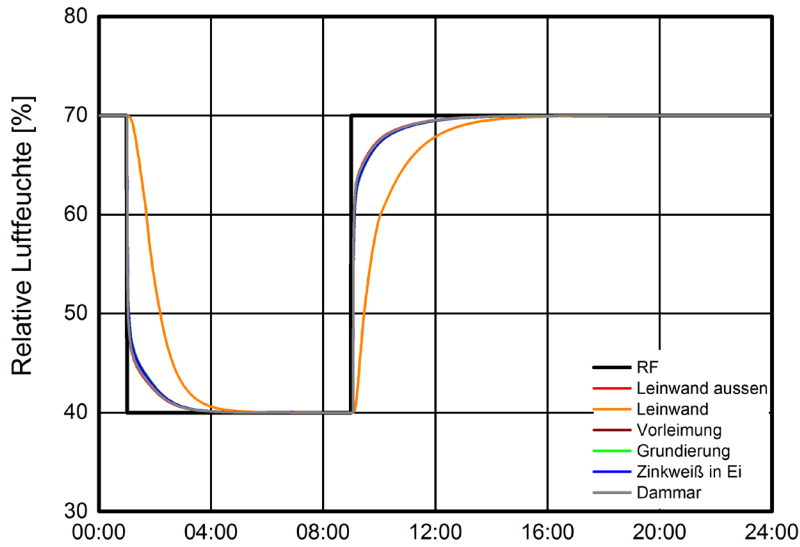


Abbildung 6.5: Ergebnisse der Simulation von Zinkweiß in Ei am Beispiel einer achtstündigen Schwankung von 70 auf 40 % rF.

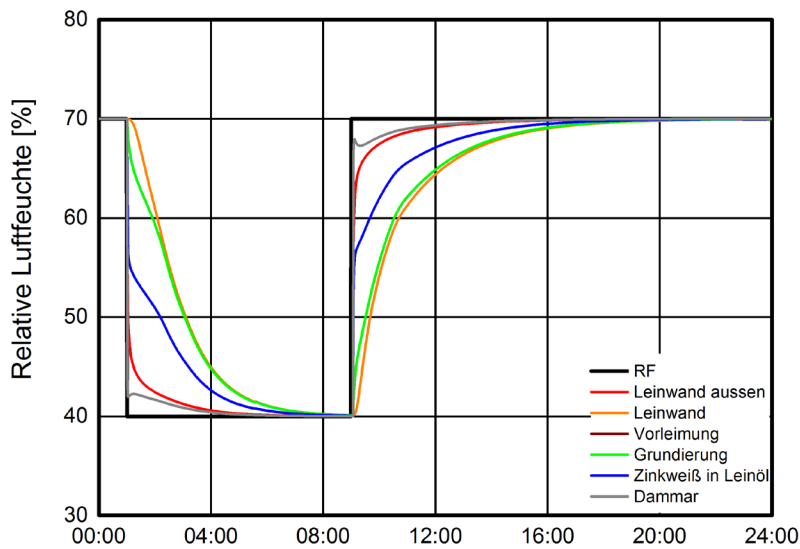


Abbildung 6.6: Ergebnisse der Simulation von Zinkweiß in Leinöl am Beispiel einer achtstündigen Schwankung von 70 auf 40 % rF.

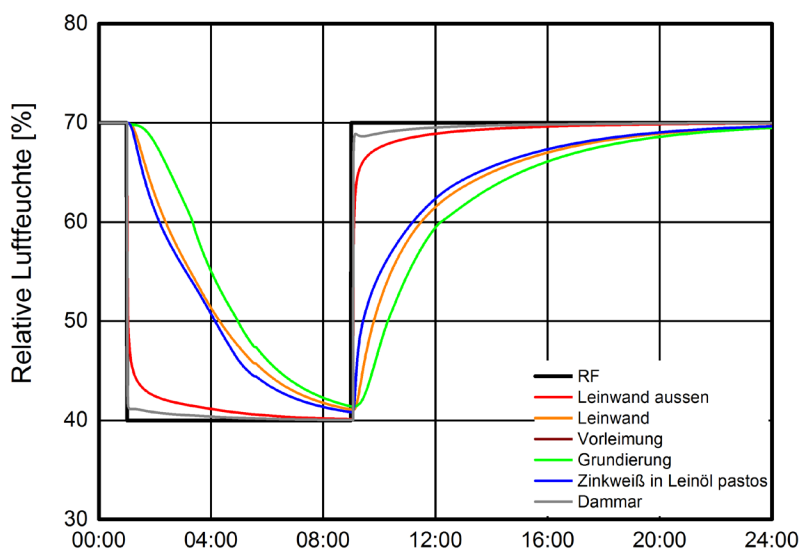


Abbildung 6.7: Reaktion des Materialverbunds mit Zinkweiß in Leinöl, pastos auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

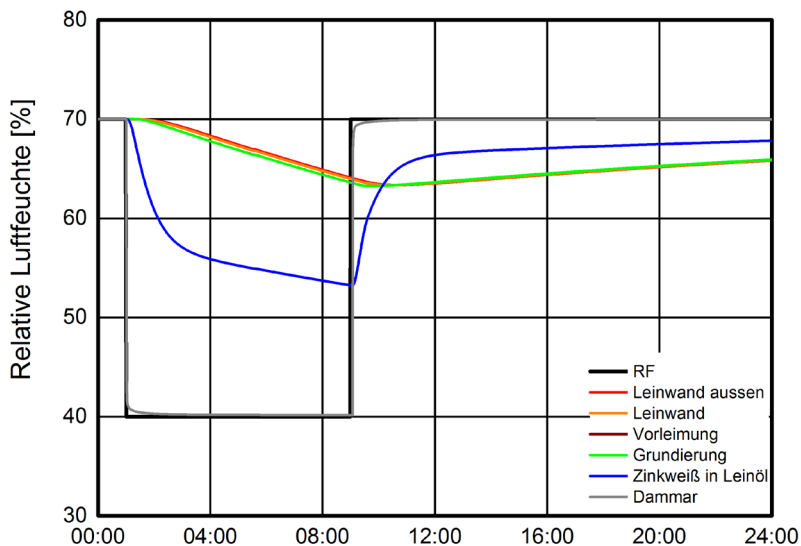


Abbildung 6.8:
Zinkweiß in Leinöl, pastos mit
abgedichteter Rückseite auf eine
achtstündige Schwankung von 70
auf 40 % rF.

Einfluss der Schichtdicke - Pastose Malschichten

Der Einfluss der Schichtdicke der Malschicht auf das Feuchteverhalten des Kunstwerks wird am Beispiel von Zinkweiß in Leinöl dargelegt. Dazu werden Malschichten unterschiedlicher Stärke (0,3 und 0,03 mm) miteinander verglichen (Abbildung 6.6 bzw. 6.7).

Die größere Malschichtstärke bewirkt im Verbund eine insgesamt langsamere und geringere Reaktion auf die Schwankung. Am stärksten gepuffert ist die Grundierung. Leinwand und Firnis reagieren bei beiden Malschichtstärken ähnlich. Zwischen Firnis und Malschicht stellt sich bei der pastosen Malschicht eine etwas höhere Differenz ein. Innerhalb der Leinwand erhöhen sich dort die Differenzen der relativen Luftfeuchte bis auf maximal 24 %, zwischen Firnis und Malschicht vergrößert sie sich auf maximal 28 % (vorher 18 %). Die Gleichgewichtsfeuchte im gesamten Gefüge stellt sich bei der pastosen Malschicht innerhalb von 24 Stunden nicht ein.

Die abgedichtete Rückseite führt im Verbund mit pastoser Malschicht – den Firnis ausgenommen – zu einer wesentlich geringeren Reaktion aller Schichten (Abbildung 6.8). Während Dammar (grau) die Feuchteschwankung wie zuvor fast exakt nachzeichnet, sinkt die Malschichtfeuchte beim Abfall der relativen Luftfeuchte auf 40 % bis auf 55 %, der restliche Schichtenverbund nur bis 65 % rF ab. Die Differenz zwischen Firnis und Malschicht beträgt maximal 24 %, zwischen Malschicht und Grundierung 11 %. Die größere Schichtdicke der Malschicht verstärkt die diffusionshemmende Eigenschaft. Die in Abbildung 6.7 dargestellte Reaktion des Schichtenverbunds mit pastoser Malschicht geht daher überwiegend von der Rückseite aus.

Als Ergebnis ist festzuhalten, dass in der hygrothermischen Betrachtung hinsichtlich der Reaktion des Schichtenverbunds auf klimatische Schwankungen die Wahl des Bindemittels den stärksten Einfluss hat. Diffusionsoffene Materialien zeigen eine unmittelbare, sehr starke Reaktion auf die Feuchteschwankung, während diffusionshemmende Schichten gepuffert reagieren. Dies kann im Verbund unter Umständen Differenzen zwischen den einzelnen Schichten hervorrufen. Weiter beeinflusst bei diffusionshemmenden Anstrichen die Schichtstärke der Malschicht den Materialverbund. Je stärker diese ist, desto größer ist die Feuchtedifferenz im gesamten Gefüge. Dies bestätigt die restauratorischen Beobachtungen, dass in Pastositäten teilweise verstärkte Craqueléebildung auftritt. Das verwendete Farbmittel hat in der Simulation mit WUFI® Pro einen geringen Einfluss. Dies widerspricht restauratorischen Untersuchungen, die zeigten, dass Erden, wie Ocker oder Umbra oft deutlich schlechter erhalten sind als Farbmittel, die keine Schichtsilikate enthalten (vgl. 2.1.2). Da mechanische Prozesse, wie das Quellen und Schwinden mit der hygrothermischen Simulation nicht

abgebildet werden, kann hierzu keine Aussage getroffen werden. Aus der Simulation geht hervor, dass der Feuchtegehalt bei beiden Farbmitteln gleich ist. Lediglich die Reaktion auf den Feuchtegehalt, die letztlich den Schaden bewirkt, ist unterschiedlich.

Mikroklimata am Leinwandgemälde

Bisher wurde der Temperatur- und Feuchtetransport ausschließlich am Gemäldeverbund untersucht. Dort wirken sich klimatische Schwankungen stark aus, da die durchlässige Leinwand keine starke Pufferung bietet. Durch Spannrahmen oder Rahmenkreuz verdeckte Oberflächen sind hingegen wesentlich geringeren Schwankungen ausgesetzt. Dies soll im Folgenden am Beispiel eines Spannrahmens hinter bzw. eines Zierrahmens vor dem Gemälde gezeigt werden. Auch der Einfluss einer Verglasung auf den Schichtenverbund wird ermittelt. Da in der hygrothermischen Simulation der Verbund im Querschnitt untersucht wird, sind hier unterschiedliche Modelle notwendig. Als Verbund wurde der in Tabelle 6.2 beschriebene Aufbau für Malerei auf Leinwand verwendet. In Tabelle 6.3 ist der Materialaufbau der Varianten für Spann- und Zierrahmen sowie Verglasung aufgeführt. Die Positionen für die Varianten (V1 – V4) sind in einem Schema in Frontalansicht und Querschnitt verdeutlicht (Abbildung 6.9).

Tabelle 6.3:
Querschnitt durch den Materialaufbau mit Angabe der Schichtdicken.

	Rückseite		Vorderseite
Variante 1 (V1)	Spannrahmen, 20 mm	Gemäldeverbund: Leinwand, 4 mm; Vorleimung, 0,06 mm; Grundierung, 2 mm; Malschicht Zinkweiß in Leinöl, 0,3 mm; Firnis, 0,03 mm	
Variante 2 (V2)	Spannrahmen, 20 mm	Gemäldeverbund (siehe V1)	Zierrahmen Fichtenholz mit diffusionsoffener Malschicht, 10 mm
Variante 3 (V3)		Gemäldeverbund (siehe V1)	Verglasung 3 mm
Variante 4 (V4)	Fichtenholz, 5 mm	Gemäldeverbund (siehe V1)	Verglasung 3 mm

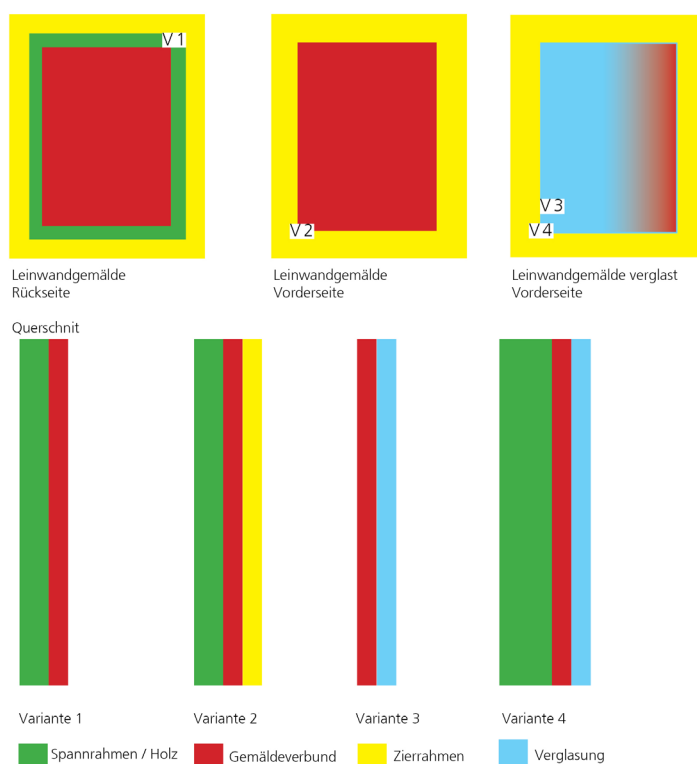


Abbildung 6.9:
Skizze der vier Positionen als Variationen des Mikroklimas bei Leinwandgemälden in Frontalansicht (oben, weiß hinterlegt) und im Querschnitt (unten).

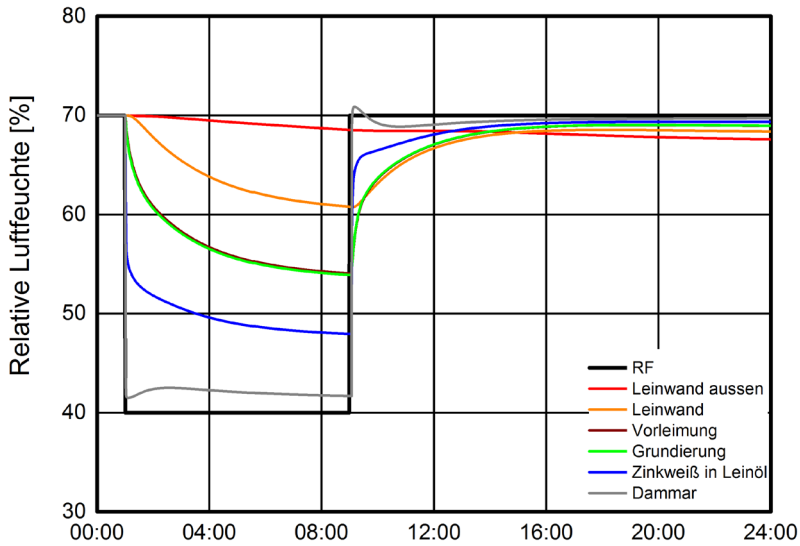


Abbildung 6.10:
Reaktion von Malerei auf Leinwand
mit Zinkweiß in Leinöl als Malschicht
mit rückseitigem Spannrahmen auf
eine achtstündige Schwankung von
70 auf 40 % rF (Variante 1).

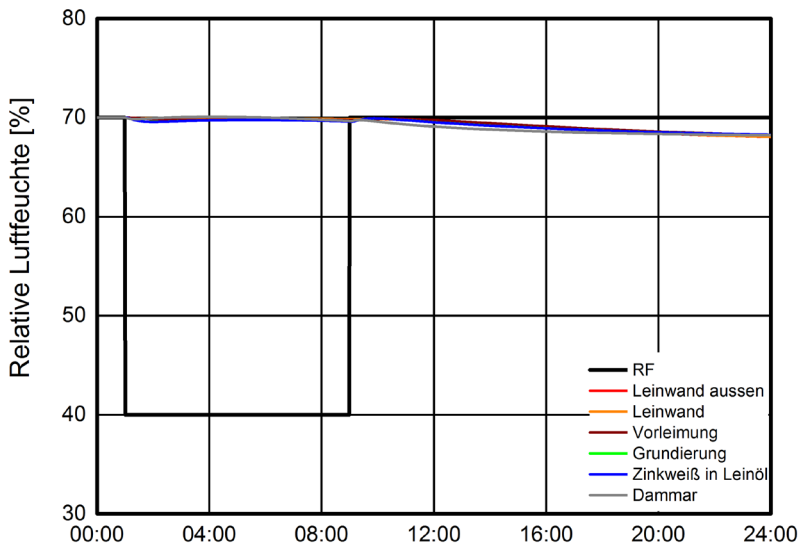


Abbildung 6.11:
Reaktion von Malerei auf Leinwand
mit Zinkweiß in Leinöl als Malschicht
zwischen Spann- und Zierrahmen
auf eine achtstündige Schwankung
von 70 auf 40 % rF (Variante 2).

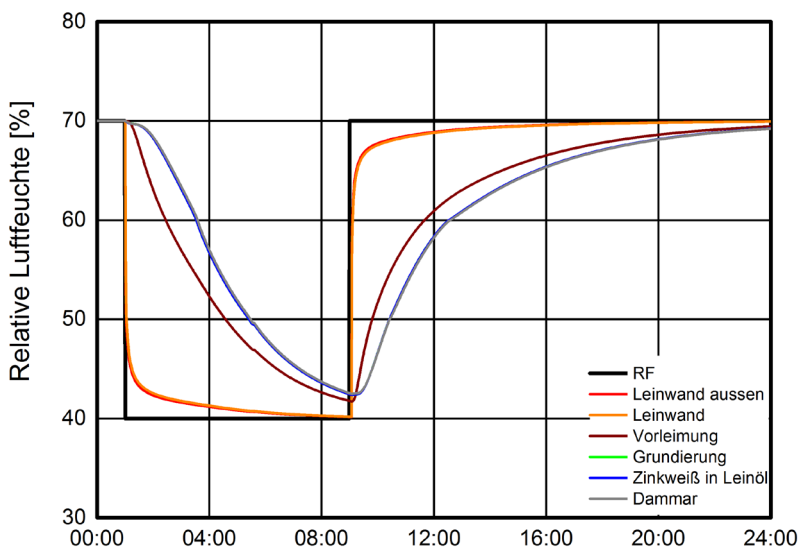


Abbildung 6.12:
Reaktion von Malerei auf Leinwand
mit Zinkweiß in Leinöl als Malschicht
mit vorderseitiger Verglasung auf
eine achtstündige Schwankung von
70 auf 40 % rF (Variante 3).

Die Reaktion des Gemäldeverbunds auf eine achtstündige Schwankung der relativen Luftfeuchte von 40 auf 70 % rF wurde bereits erläutert (Abbildungen 6.6). Abbildung 6.10 zeigt die grafische Auswertung desselben Gemäldes, hinter dem sich ein 2 cm starkes Fichtenholz befindet (Spannrahmen). Während in Abbildung 6.6 der gesamte Verbund bis auf ca. 40 % relative Luftfeuchte absinkt, bewirkt der Spannrahmen eine unterschiedliche Reaktion der einzelnen Schichten. Der Firnis fällt durch den Sprung der relativen Luftfeuchte auf 40 % bis auf 42 % rF ab, darauf folgt die Malschicht, die bis auf 48 % rF, sowie Grundierung und Vorleimung, die bis 55 % rF absinken. Die Leinwand ist, wie erwartet, am stärksten gepuffert und sinkt lediglich bis auf 60 % rF ab. Innerhalb der Schichten treten somit markante Differenzen auf: Zwischen Firnis und Malschicht sind es über 10 % (maximale Differenz: 18 %), zwischen Malschicht und Grundierung beträgt die maximale Differenz 12 %. Die Gleichgewichtsfeuchte ist nach 24 h noch nicht erreicht.

Ein sehr geringer Abfall der relativen Luftfeuchte auf ca. 68 % rF erfolgt in den Schichten des Leinwandgemäldes, das sich zwischen Spann- und Zierrahmen befindet (Abbildung 6.11). Es ist also nicht weiter verwunderlich, dass von Spann- und Zierrahmen verdeckte Flächen nicht nur aufgrund des Lichtschutzes besser erhalten sind, sondern auch weil sich klimatische Schwankungen weniger auf den Verbund auswirken.

Welche Wirkung eine Verglasung auf ein Leinwandgemälde hat, hängt davon ab, wie die Rückseite behandelt wird. Liegt kein Rückseitenschutz vor, reagiert der Malschichtverbund gepuffert und sinkt beim Feuchtesprung auf 40 % rF nur auf ca. 45 % rF ab (Abbildung 6.12, vgl. 6.6). Von der Rückseite her reagiert die Leinwand wie erwartet stark auf den klimatischen Abfall, was auch die Vorderseite beeinflusst. Zwischen Leinwand und Malschicht treten hohe Differenzen von maximal 24 % auf (zwischen Grundierung und Malschicht liegen keine Differenzen vor).

In der Simulation des Leinwandgemäldes mit Verglasung und 5 mm starkem Fichtenholz als Rückseitenschutz reagiert der gesamte Verbund mit einem Abfall auf 47 % rF auf die klimatische Schwankung (Abbildung 6.13). Die Differenzen der relativen Luftfeuchte innerhalb des Verbunds sind mit ca. 3 % gering.

6.1.2 Malerei auf Pappe

Ein weiterer, sehr durchlässiger Materialverbund ist die Malerei auf Pappe. Als Trägermaterial wurde für die Simulation eine Wabenplatte mit 4,3 mm Stärke eingesetzt, da hierzu die erforderlichen Materialkenndaten vorlagen. Als Malschicht wurde ohne weitere Zwischenschichten Zinkweiß in Ei angenommen. Als Variante wurde eine Verglasung simuliert. Hier wurden vor dem Verbund eine Glasscheibe und rückseitig Fichtenholz angenommen (Tabelle 6.4).

Tabelle 6.4:
Schichtenverbund für Malerei auf Pappe mit Angabe der Schichtdicken.

	Rückseite	Vorderseite
Variante 1 (V1)	Verbund Malerei auf Pappe: Wabenplatte, 4,3 mm; Zinkweiß in Ei, 0,3 mm	
Variante 2 (V2)	Fichtenholz, 5 mm	Verbund Malerei auf Pappe (siehe V1) Verglasung, 3 mm

Der Verbund der Malerei auf Pappe reagiert unmittelbar und ungepuffert auf den Abfall der relativen Luftfeuchte (Abbildung 6.14). Nach drei Stunden ist jeweils der neue Gleichgewichtszustand im Verbund erreicht. Zwischen Träger und Malschicht sind mit etwa 3 % geringe Feuchtedifferenzen festzustellen. Dieselbe Simulation des Verbunds mit Verglasung und Rückwand aus Holz (Abbildung 6.15) zeigt eine ähnliche Reaktion wie das verglaste Leinwandgemälde (Abbildung 6.13). Malschicht und Pappe sinken etwas zeitverzögert auf ca. 50 % relative Luftfeuchte. Zwischen Träger und Malschicht sind ebenfalls kaum Feuchtedifferenzen vorhanden. Die Gleichgewichtsfeuchte von 70 % rF wird innerhalb von 24 h nicht erreicht.

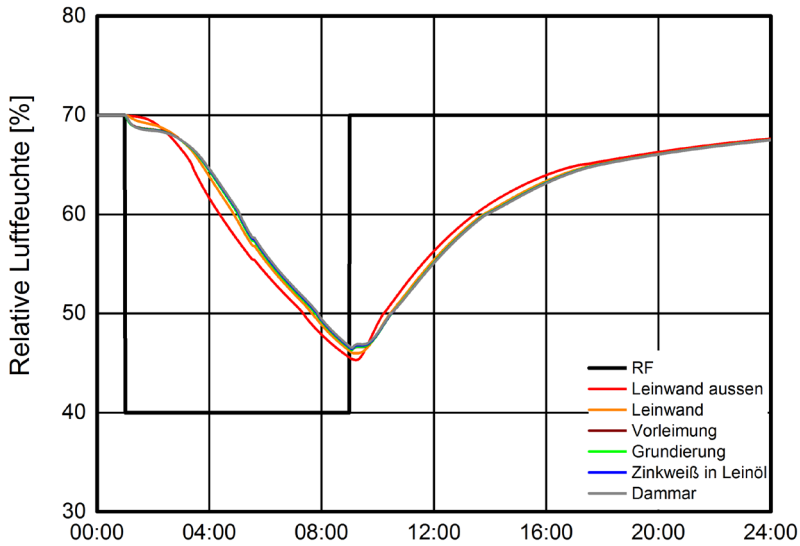


Abbildung 6.13:
Reaktion von Malerei auf Leinwand mit Zinkweiß in Leinöl als Malschicht mit Verglasung und rückseitiger Holzplatte auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF (Variante 4).

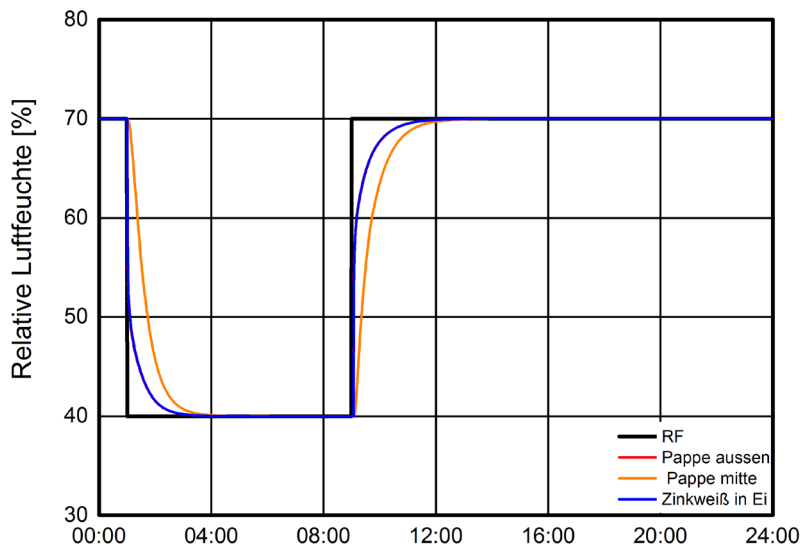


Abbildung 6.14:
Reaktion von Malerei auf Pappe mit Zinkweiß in Ei als Malschicht auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

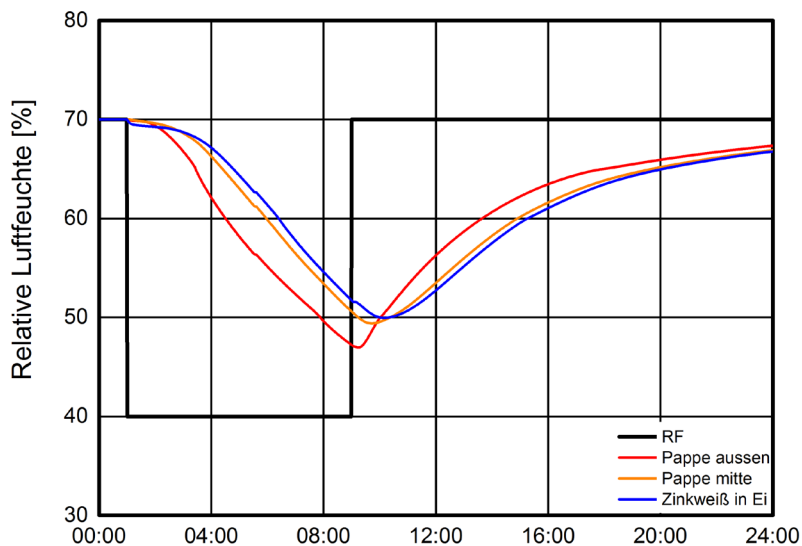


Abbildung 6.15:
Reaktion von Malerei auf Pappe, verglast mit rückseitiger Holzplatte (Variante 2) auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

6.1.3 Gefasste Holzoberfläche

Im Folgenden werden gefasste Holzoberflächen mit und ohne Überzug, mit diffusionsoffenem und -hemmendem Farbanstrich, sowie die Verwendung von Laub- und Nadelholz in radialer und longitudinaler Schnittrichtung miteinander verglichen: Longitudinal weist, unabhängig von der Holzart, die geringste, radial eine mittlere Reaktion auf Feuchtschwankungen auf. Da Holz ab einer Schichtstärke von ca. 2 cm nur geringe Reaktionen auf kurzfristige Schwankungen zeigt, erfolgt die Auswertung der klimatischen Schwankungen über einen längeren Zeitraum im Szenario Kunstwerke in Raummitte am Beispiel des Hochaltars von St. Margaretha in Roggersdorf (Kapitel 6.2.2).

Gefasste Holzoberfläche ohne Überzug

Um die Auswirkung unterschiedlicher Hölzer sowie der Schnittrichtung auf den Materialverbund zu vergleichen, werden für die Simulationen Fichte und Eiche in longitudinaler und radialer Schnittrichtung verwendet. Darauf folgen Vorleimung und Grundierung. Am Beispiel von Fichtenholz longitudinal wird der Vergleich von diffusionsoffener und -hemmender Malschicht gezeigt. Als diffusionsoffene Malschicht wird Ocker in Ei, als diffusionshemmende Ocker in Leinöl angenommen. Für die Varianten mit unterschiedlicher Holzart und Schnittrichtung wird als Malschicht Ocker in Leinöl verwendet (Tabelle 6.5). Für die Beurteilung des Feuchteverhaltens von Holz in unterschiedlicher Tiefe werden drei Monitorpositionen eingesetzt: Außen, in der Mitte und innen, angrenzend zu den weiteren Fassungsschichten.

Tabelle 6.5:
Schichtenaufbau für gefasste Holzoberflächen mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite			Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung 3 mm	Malschicht Ocker in Ei 0,3 mm / Ocker in Leinöl 0,3 mm
Fichtenholz radial, 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung 3 mm	Ocker in Leinöl 0,3 mm
Eiche longitudinal / radial, 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung 3 mm	Ocker in Leinöl 0,3 mm

Fichte longitudinal

In Abbildung 6.16 und D 3 (Anhang D) ist die Reaktion des Materialverbunds mit unterschiedlichem Bindemittel auf eine achtstündige Schwankung der relativen Luftfeuchte von 70 % auf 40 % dargestellt. In beiden Simulationen reagiert der äußere Teil des Fichtenholzes (rot) stark auf die geänderten Klimabedingungen und sinkt bis auf 48 % rF ab, während die relative Luftfeuchte in der Mitte (orange) fast konstant bei 70 % rF bleibt. An der Innenseite des Trägers (türkis) sinkt sie bis auf 68 % rF ab. Beim Vergleich der Grafiken, die sich auf die Situation mit abgedichteter Rückseite beziehen, wird deutlich, dass die Reaktion von der Vorderseite des Verbunds beeinflusst ist (Abbildung 6.17 und D 4). In beiden Malschichten sinkt die relative Luftfeuchte auf 54 % ab, Grundierung und Vorleimung sind stark gepuffert und sinken, gemeinsam mit dem Holz auf ca. 67 % rF ab. Anders als beim Leinwandgemälde verändert die Verwendung eines unterschiedlichen Bindemittels beim Farbanstrich die Reaktion auf kurzfristige Feuchteschwankungen kaum. Die Grafiken mit abgedichteter Rückseite (Abbildung 6.17 und D 4) unterscheiden sich lediglich in der äußeren Schicht des Trägermaterials, die nun gepuffert ist. In der Malschicht sind bei beiden Farbmitteln kaum Veränderungen festzustellen. Das Verhalten des Holzes dominiert das der Bildschichten.

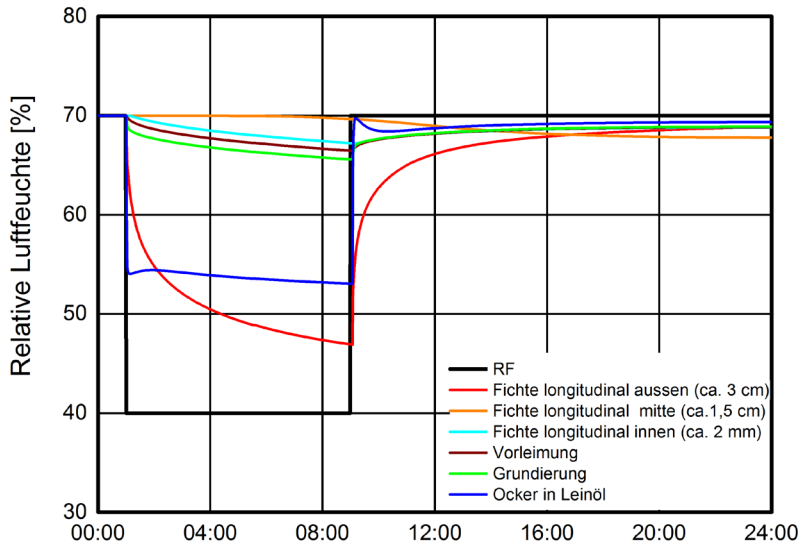


Abbildung 6.16:
Reaktion von Fichte longitudinal mit
Ocker in Leinöl als Malschicht auf
eine achtstündige Schwankung von
70 auf 40 % rF.

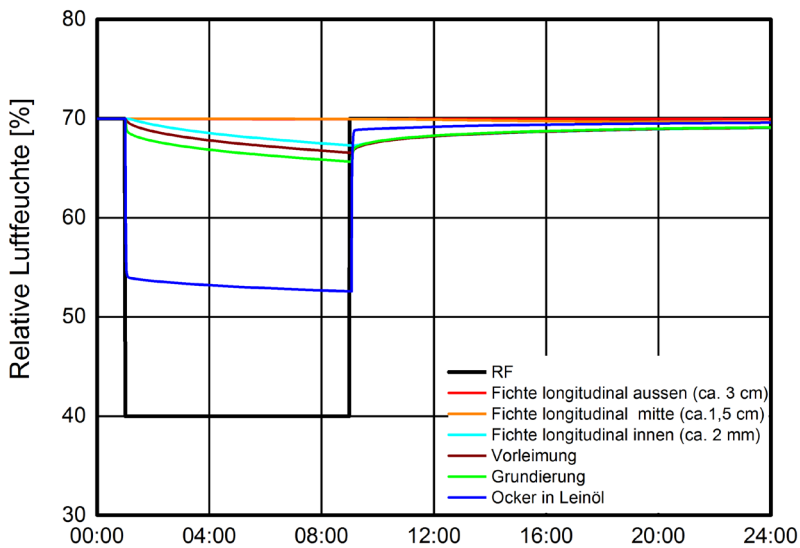


Abbildung 6.17:
Reaktion von Fichte longitudinal mit
Ocker in Leinöl als Malschicht auf
eine achtstündige Schwankung von
70 auf 40 % rF mit abgedichteter
Rückseite.

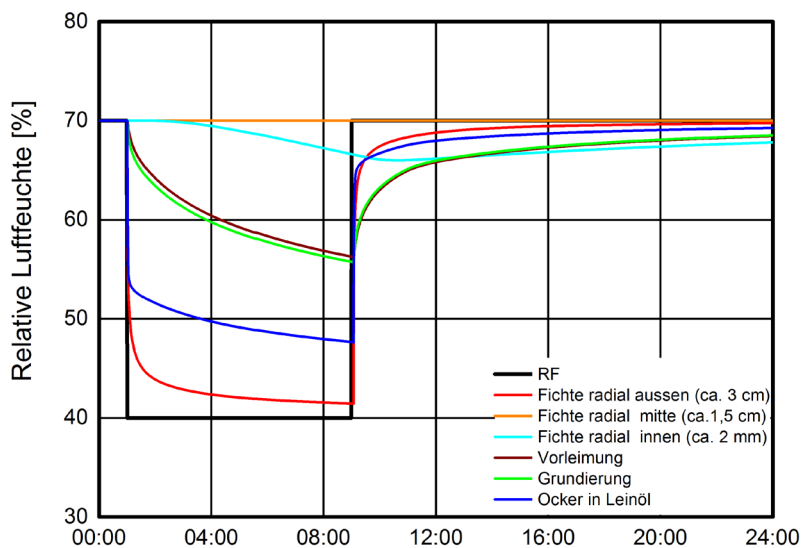


Abbildung 6.18:
Reaktion von Fichte radial mit Ocker
in Leinöl als Malschicht auf eine
achtstündige Schwankung von 70
auf 40 % rF.

Fichte radial

Welchen Einfluss die Schnittrichtung hinsichtlich der Reaktion auf klimatische Schwankungen hat, wird am Beispiel von Fichte radial und longitudinal gezeigt. Ocker in Leinöl wird als Malschicht angenommen: Wie erwartet zeigt Fichte radial (Abbildung 6.18) eine stärkere Reaktion auf die Feuchteschwankung als Fichte longitudinal (Abbildung 6.16). Anhand der drei Monitorpositionen wird eine starke Ungleichheit der relativen Luftfeuchte innerhalb des Trägermaterials sichtbar: Außen (rote Kurve) sinkt sie bis auf ca. 42 % rF ab, in der Mitte (orange) bleibt sie – wie bei Fichte longitudinal – auf 70 % rF. Zur Malschicht hin ist ein zeitverzögertes maximales Absinken auf 65 % rF zu beobachten. In den einzelnen Schichten der Vorderseite fällt auch die relative Luftfeuchte in radialer Schnittrichtung stärker ab, als in longitudinaler: Ocker in Leinöl sinkt auf 48 % rF, die Grundierung und Vorleimung bis auf 66 % rF ab. Zwischen Malschicht und Grundierung treten somit Differenzen von 18 % auf. Die abgedichtete Rückseite ändert hier ebenfalls nichts am von der Vorderseite ausgehenden Feuchtetransport (Abbildung 6.19).

Eiche longitudinal und radial

Wie beeinflusst die Auswahl der Holzart die Feuchteverteilung im Materialgefüge? Für den Vergleich von Laub- und Nadelholz wurden Fichte und Eiche als Trägermaterial eingesetzt. Hier wurde ebenfalls die Auswirkung von radialer und longitudinaler Schnittrichtung untersucht. Das Ergebnis der Simulationen ist in Abbildung 6.20 und 6.21 veranschaulicht. Beim Materialverbund mit Eiche longitudinal sind, wie bei Fichte longitudinal (Abbildung 6.16) innerhalb des Trägermaterials starke Feuchtedifferenzen sichtbar (außen: 46 %, Mitte: 70 %, innen: 68 % rF). Von der Bildseite her reagiert die Malschicht auf die geänderte klimatische Situation durch einen Abfall auf ca. 54 % rF, Grundierung und Vorleimung liegen nahe beieinander und sinken bis auf 65 % rF ab. Die Feuchteverteilung im Materialverbund mit Eiche radial als Träger (Abbildung 6.21) ist ebenfalls sehr ähnlich zur Fichte radial (Abbildung 6.18). Das Holz reagiert sehr stark auf den Feuchteabfall, so dass innerhalb des Materials eine Feuchtedifferenz von maximal 27 % vorliegt (außen: 43 %, Mitte: 70 %, innen: 67 % rF). Die Malschicht sinkt bis auf 48 % rF ab, Grundierung und Vorleimung bis auf 58 % rF. Innerhalb der Bildschicht tritt also eine Differenz von 10 % auf.

Es zeigt sich, dass in den Simulationen bei kurzfristigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte durch die unterschiedliche Schnittrichtung größere Unterschiede auftreten als aufgrund der Holzart. Die Auswirkung von längeren Schwankungszyklen wird in 6.2.2 untersucht. Eine Gegenüberstellung mit realen Erfahrungen steht noch aus.

Gefasste Holzoberfläche mit Überzug

Für die Untersuchung des Einflusses eines Überzugs wurde der Schichtenaufbau aus Tabelle 6.5 übernommen und um einen Naturharzüberzug aus Dammar ergänzt (Tabelle 6.6). Weil zwischen Laub- und Nadelholz kaum ein Unterschied sichtbar war, wurden die weiteren Simulationen mit Fichtenholz longitudinal durchgeführt.

Die eingangs erwähnte Diskrepanz der Materialkennwerte zwischen separat ermittelten, in der Simulation zusammengeführten Schichten und im Verbund gemessenen Materialverbänden soll hier am Beispiel einer kombinierten Messung von Ocker in Leinöl und Dammar gezeigt werden.

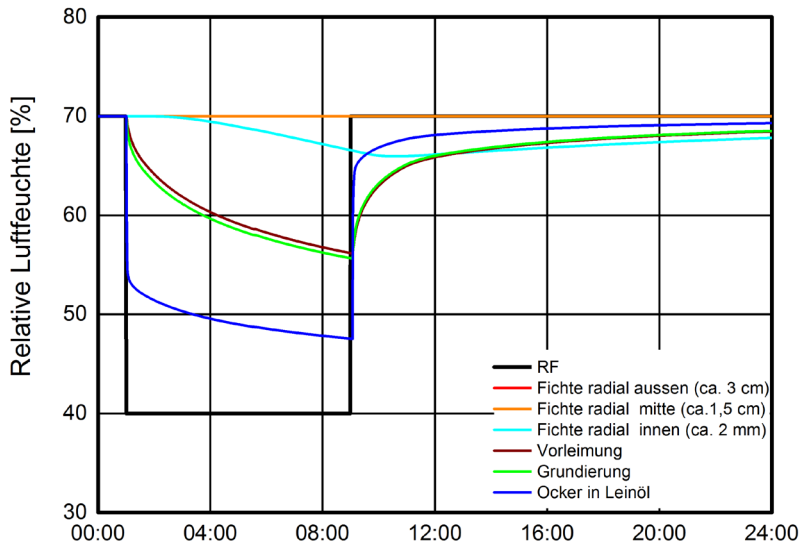


Abbildung 6.19:
Reaktion von Fichte radial Ocker
in Leinöl als Malschicht auf eine
achtstündige Schwankung von
70 auf 40 % rF mit abgedichteter
Rückseite.

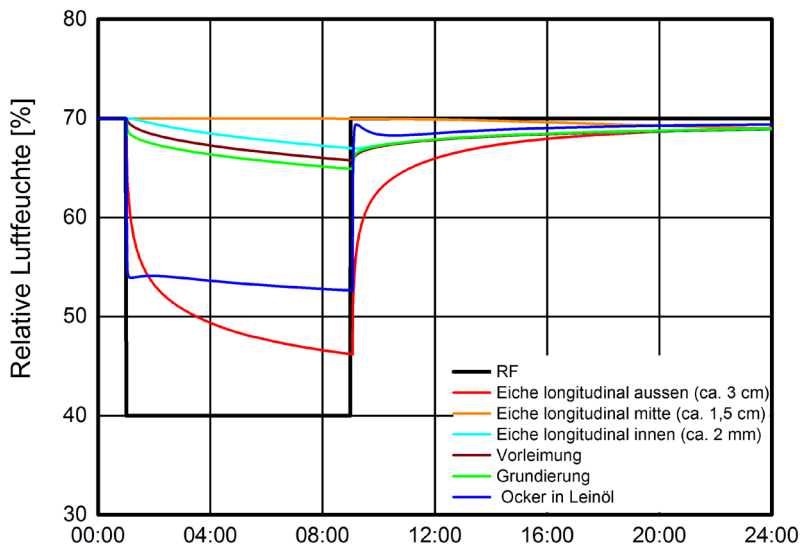


Abbildung 6.20:
Reaktion von Eiche longitudinal mit
Ocker in Leinöl auf eine achtstündi-
ge Schwankung von 70 auf 40 % rF.

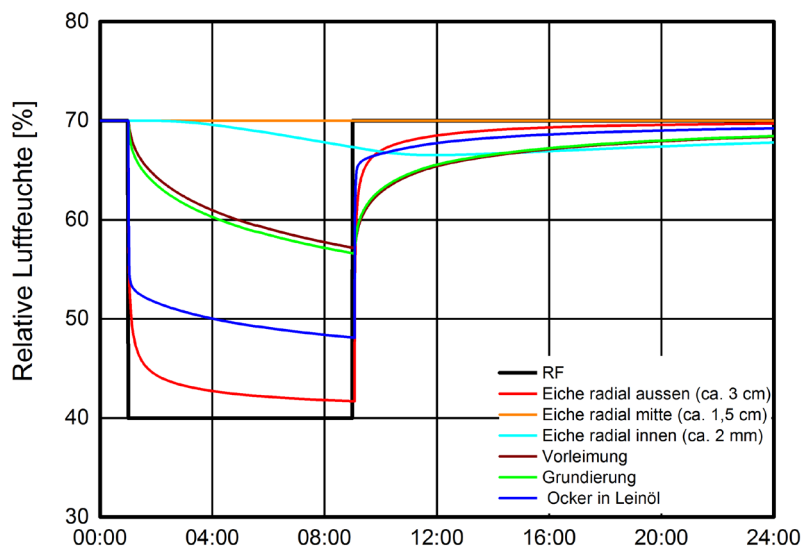


Abbildung 6.21:
Reaktion von Eiche radial mit Ocker
in Leinöl auf eine achtstündige
Schwankung von 70 auf 40 % rF.

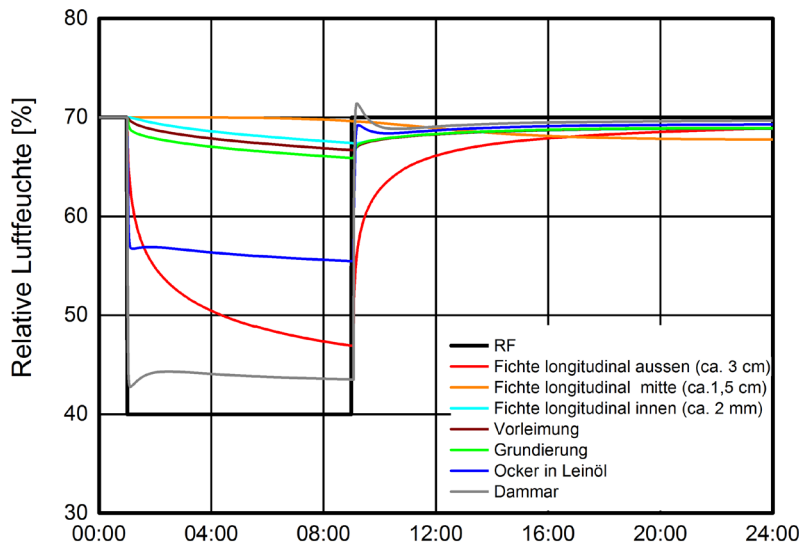


Abbildung 6.22: Reaktion von Fichte longitudinal, Ocker in Leinöl und Dammar als einzelne Schichten auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

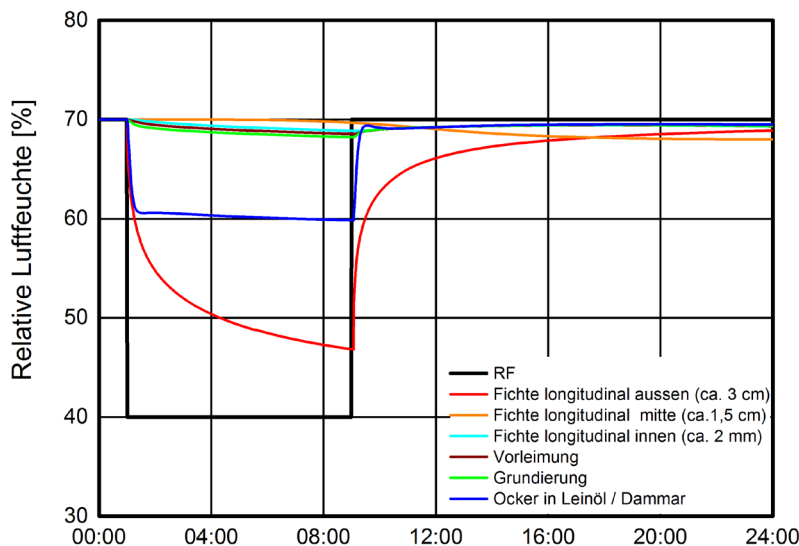


Abbildung 6.23: Reaktion von Fichte longitudinal, Ocker in Leinöl und Dammar als Verbund auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

Tabelle 6.6: Schichtenaufbau für die gefasste Holzoberfläche mit Naturharzüberzug unter Angabe der Schichtdicken.

Rückseite				Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,1 mm	Grundierung 3 mm	Ocker in Leinöl 0,3 mm	Dammar 0,3 mm
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,1 mm	Grundierung 3 mm	Verbund Ocker in Leinöl mit Dammar 0,6 mm	

In Abbildung 6.22 und 6.23 sind die Ergebnisse der Simulation mit dem oben beschriebenen, um die Firnis-schicht erweiterten Schichtenverbund einmal mit separat ermittelten und einmal mit im Verbund bestimmten Materialkennwerten dargestellt. Das Holz zeigt in Abbildung 6.22 eine ähnliche Reaktion wie bei den Simulationen ohne Überzug. Die Firnis-schicht reagiert stark auf die Feuchteschwankung und sinkt bis auf ca. 43 % rF ab. Sie puffert den Verbund geringfügig, so dass die Malschicht nur noch auf ca. 56 % rF absinkt (ohne Firnis auf 54 % rF, Abbildung 6.17). Zwischen Firnis, Malschicht und Grundierung treten wiederum hohe Differenzen der relativen Luftfeuchte von bis zu 12 % auf.

Der simulierte Materialverbund mit den Eigenschaften von Malschicht und Überzug in einer Schicht reagiert geringer auf die klimatische Schwankung (Abbildung 6.23). So sinkt die Malschicht mit Firnis nur auf ca. 60 % rF ab, Grundierung, Vorleimung und Fichte (mitte und innen) fallen auf ca. 68 % rF. Zwischen Malschicht / Firnis und dem restlichen Verbund stellt sich also eine Feuchtedifferenz von 8 % ein.

Insgesamt weicht die relative Luftfeuchte zwischen dem Verbund und den einzeln gemessenen Schichten geringer ab, als zunächst vermutet. Die generelle Reaktion der einzelnen Schichten bleibt in diesem Fall größtenteils gleich.

6.1.4 Vergoldete Holzoberflächen

Für die Simulation vergoldeter Holzoberflächen wird zwischen einer Polimentvergoldung mit und ohne Überzug sowie der Ölvergoldung unterschieden. Nach Stand des Wissens und eigenen Untersuchungen¹⁹⁹ ist davon auszugehen, dass insbesondere im 19. Jahrhundert mit Überzügen aus Leim oder Schellack gearbeitet wurde. Da aber nicht bekannt ist, inwieweit diese, z. B. zur Modellierung nur teilweise aufgetragen worden sind, wird hier auch die Reaktion des Verbundes ohne zusätzliche Schicht berücksichtigt. Untersuchungen in den historischen Räumen von Schloss Linderhof haben ergeben, dass die vergoldeten Wandflächen im nach dem Tod des Königs fertig gestellten Paradeschlafzimmer besser erhalten sind als in den restlichen Räumen. Eine mögliche Begründung könnte das ölige Bindemittelsystem sein, mit dem die Vergoldungen ausgeführt worden sind. Daher wird mit Hilfe der Simulation die Feuchteverteilung im Materialverbund von Poliment- und Ölvergoldung miteinander verglichen.

Polimentvergoldetes Holz ohne Überzug

Der Schichtenaufbau für polimentvergoldetes Holz ohne Überzug ist in Tabelle 6.7 dargestellt. Auf eine 30 mm dicke Holzplatte (Fichte longitudinal) folgen Vorleimung, Stein- und Kreidegrundierung, sowie eine Schicht Blattgold. Die originale Schichtdicke von Blattgold ist mit ca. 1 µm sehr gering und würde im Simulationsprogramm zu Fehlberechnungen führen. Daher wurde sie mit 0,01 mm angenommen und die Materialkennwerte diesbezüglich angepasst. Die hygrothermischen Eigenschaften von Poliment allein wurden nicht bestimmt, daher ist es in der Simulation nicht berücksichtigt.

Tabelle 6.7:
Schichtenaufbau für polimentvergoldetes Holz ohne Überzug mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite				Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Steingrundierung 1 mm	Kreidegrundierung 7 mm	Blattgold 0,01 mm

Die Reaktion der einzelnen Schichten der Polimentvergoldung auf die klimatische Schwankung ist sehr homogen (Abbildung 6.24). Gold, Kreide- und Steingrund sowie die Vorleimung sinken innerhalb der acht Stunden bei 40 % relativer Luftfeuchte auf maximal ca. 48 % ab. Auf den erneuten Feuchtesprung auf 70 % rF reagiert der gesamte Fassungsverbund mit einem abrupten Anstieg auf 60 %, steigt nach der ersten Stunde auf 65 % und gleicht sich dann langsam dem Ausgangszustand an. Innerhalb von 24 Stunden wird die Gleichgewichtsfeuchte nicht erreicht. Die Reaktion von der Vorderseite wirkt sich stärker als bei der gefassten Holzoberfläche auf das Trägermaterial aus. Die Innenseite des Holzes sinkt bis auf 55 % rF ab. Die Feuchtedifferenz zwischen Fassung und Holz liegt bei maximal 7 %.

¹⁹⁹ Untersuchungen in Schloss Linderhof mit UV-Licht, Holl et al. 2012.

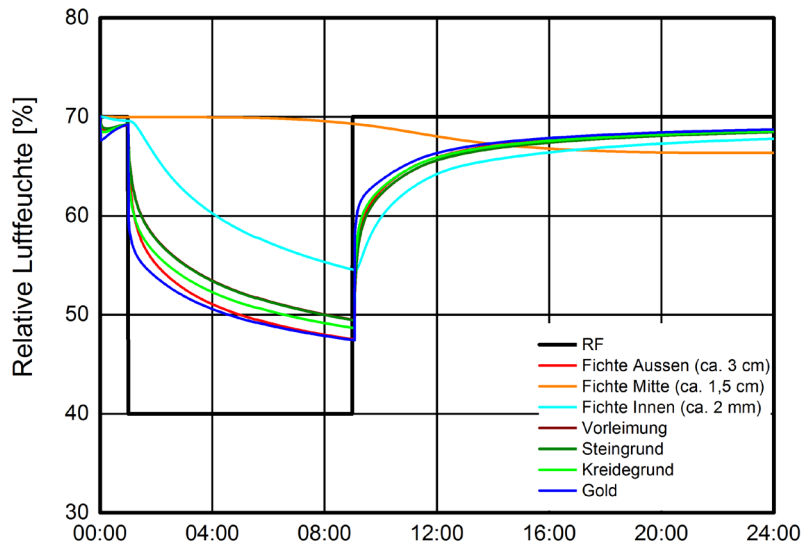


Abbildung 6.24:
Reaktion von Polimentvergoldung ohne Überzug auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

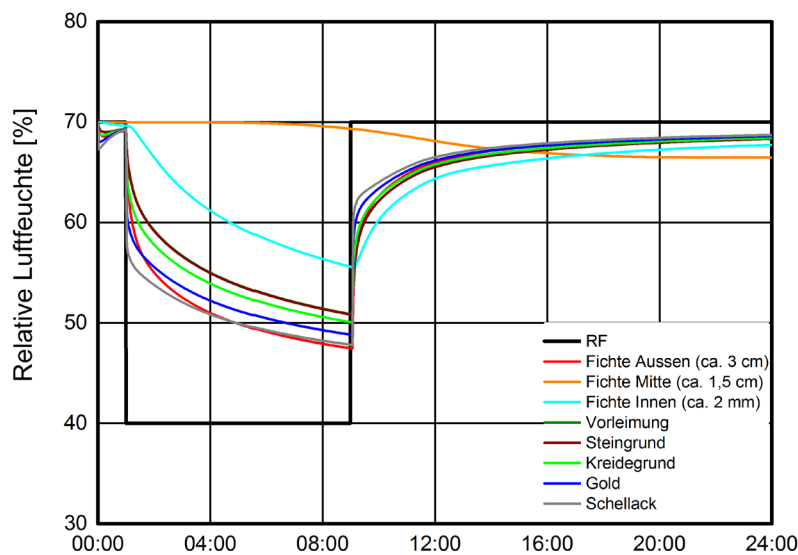


Abbildung 6.25:
Reaktion von Polimentvergoldung mit Schellack auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

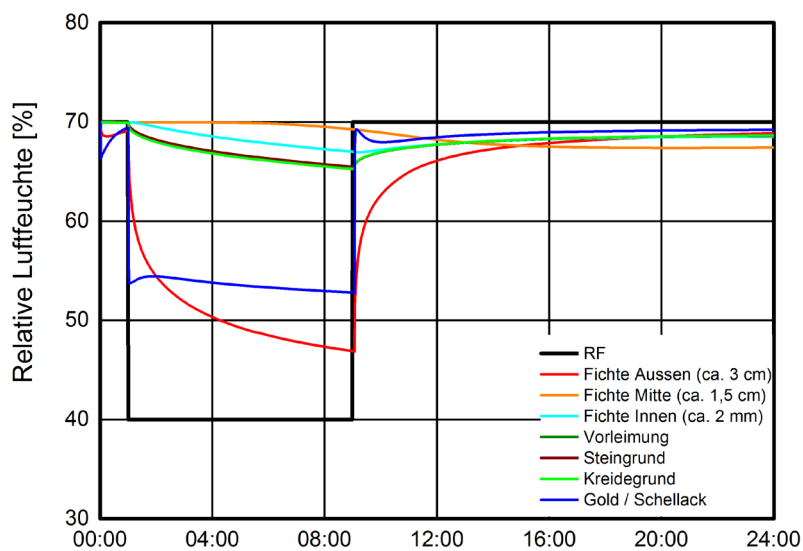


Abbildung 6.26:
Reaktion der Polimentvergoldung, mit im Verbund gemessenen Materialkennwerten für Blattgold und Schellack auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

Polimentvergoldetes Holz mit Überzug

Für die Untersuchung der Polimentvergoldung mit Überzug wird derselbe Aufbau wie ohne Überzug verwendet (Tabelle 6.7) und um eine Schicht aus Leim bzw. Schellack ergänzt. Zum Vergleich wird in einer Variante Gold und Schellack als eine Schicht angenommen und die Daten der im Verbund gemessenen Materialkombination eingegeben (Tabelle 6.8).

Tabelle 6.8:
Schichtenverbund für polimentvergoldetes Holz mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite					Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Steingrund 1 mm	Kreidegrundierung 7 mm	Blattgold 0,01 mm	Schellack, 0,06 mm
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Steingrund 1 mm	Kreidegrundierung 7 mm	Blattgold / Schellack 0,07 mm	

In Abbildung 6.25, wo Schellack als einzelne Schicht angenommen wurde, puffert diese den restlichen Verbund geringfügig, so dass die Fassungsschichten dennoch auf ca. 50 % rF absinken. Anders sieht die Reaktion aus, wenn Gold und Schellack als eine Schicht angenommen werden (Abbildung 6.26). Hier ähnelt die Reaktion der von gefasstem Holz (Abbildung 6.16). Der Verbund Gold / Schellack sinkt bis auf 53 % rF, die restlichen Schichten bis auf 66 % rF ab, sodass innerhalb der Fassung eine Differenz von 13 % rF auftritt und diese über den gesamten Zeitraum der Schwankung anhält. Hier zeigt sich zwischen im Verbund gemessenen und einzeln ermittelten Schichten ein sehr unterschiedliches Verhalten. Anhand der beiden Beispiele kann daher keine pauschale Aussage getroffen werden, wie sich die unterschiedlich ermittelten Materialkennwerte auf die Simulation auswirken.

Ölvergoldung

Für die sogenannte Ölvergoldung wird Öl oder Mixtion als Anlegemittel verwendet. Da hier kein spezieller Grundierungsaufbau notwendig ist, wird ein vereinfachter Schichtenverbund definiert: Auf Fichtenholz folgen die Vorleimung und anschließend das Anlegemittel und Blattgold als eine Schicht (Tabelle 6.9).

Tabelle 6.9:
Schichtenverbund für ölvergoldetes Holz mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite			Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Ölvergoldung 0,03 mm	

Das Ergebnis der Simulation ist in Abbildung 6.27 dargestellt. Die Schicht aus Anlegemittel und Blattgold (Ölvergoldung) sinkt bis auf 48 % rF ab und puffert somit die Feuchteschwankung im Gefüge. Die Vorleimung sinkt bis auf 55 % rF, die Innenseite des Holzes bis auf 68 % rF ab, so dass zwischen den Fassungsschichten Differenzen von maximal 7 % auftreten. Im Holz selbst liegen die Feuchteschwankungen bei über 20 %. Über die Simulationsergebnisse können also nur bedingt Rückschlüsse auf den intakten Zustand der Ölvergoldung im Paradeschlafzimmer in Schloss Linderhof gezogen werden.

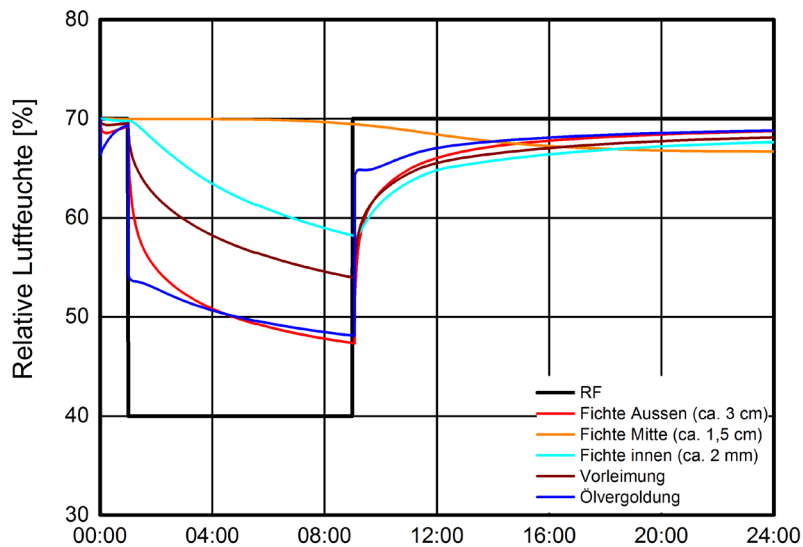


Abbildung 6.27
Reaktion der Ölvergoldung auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

Zusammenfassung / Diskussion

Die Simulation unterschiedlich gefasster und vergoldeter Hölzer hat gezeigt, dass sich beim Vergleich des Fassungsverbands zwischen Laub- und Nadelholz keine wesentlichen Unterschiede ergeben. Vielmehr ist es die Schnittrichtung des Holzes, die den größten Einfluss auf die Reaktion der Fassung hat. Da aufgrund der Anatomie des Holzes im Radialschnitt insgesamt mehr Feuchtigkeit sorbiert wird, als im Longitudinalschnitt, wirkt sich dies auch auf die darauf aufgetragenen Schichten aus. Obwohl also das Quellen und Schwinden im Gefüge mit der hygrothermischen Simulation nicht dargestellt werden kann, ist es möglich, anhand der Feuchteaufnahme bzw. -abgabe die mechanische Bewegung abzuleiten. Für konkrete Aussagen fehlt jedoch noch der Vergleich mit der Realität.

Die Simulationen mit abgedichteter Rückseite zeigten, dass die Reaktion des Fassungsverbands überwiegend von der Vorderseite ausgeht. Die Variation des Bindemittels als Vergleich von diffusionsoffenem und -hemmendem Fassungs Aufbau wirkte sich in der Simulation nicht aus, da der Träger mit einer größeren Schichtstärke hier den dominierenden Effekt hat. In den Wägeversuchen wurden ähnliche Ergebnisse erzielt (vgl. grundiertes und vergoldetes Holz in Abbildung 3.13)

Inwieweit die Art der Ermittlung der Materialkenndaten (Messung in einzelnen Schichten oder im Verbund) sich auf die hygrothermischen Eigenschaften im Verbund auswirkt, kann pauschal nicht beantwortet werden. Fest steht, dass beim Vergleich der beiden Verbände mehr oder weniger starke Unterschiede in der Feuchteverteilung sichtbar werden. Hier sind weitere Untersuchungen notwendig, um fundierte Aussagen treffen zu können.

Hohe Feuchtedifferenzen zwischen Überzug und Malschicht bzw. zwischen Malschicht und Bildträger können der Grund für Craquelébildung in Firnis und Malschicht sein. Aus dieser ersten Veränderung der Struktur folgen dann Schüsselbildung, Lockerung der einzelnen Schichten bis hin zum Ablösen der gesamten Bildschicht vom Untergrund. Bisher ist jedoch nicht geklärt was schädlicher ist: Wenn – wie beim Leinwandgemälde – der gesamte Materialverbund stark reagiert und dafür innerhalb der Schichten kaum Differenzen vorliegen oder wenn sich – wie bei den gefassten Oberflächen mit Holz als Träger – zwischen den Schichten und / oder im Träger hohe Gradienten bilden. Denkbar ist, dass beides Schadenspotential birgt, sich nur in unterschiedlicher Form auswirkt. Die starke Reaktion des gesamten Verbunds kann sich in der Verwölbung / Verwerfung

zeigen. Die Differenzen im Materialverbund sprechen für das Lockern bzw. Ablösen von einzelnen Schichten oder Schichtenpaketen vom Untergrund. Im Folgenden wird deshalb an zwei Beispielen, an denen in den Laborversuchen Schäden auftraten, der Feuchteverlauf im Materialverbund erläutert.

6.2 Kopplung der Laborversuche mit der hygrothermischen Simulation

Bei den Laborversuchen waren an zwei Testobjekten „gefasstes Holz“ und „Malerei auf Pappe“ klimatisch bedingte Schäden in Form von Schichtenablösung bzw. Craqueléebildung im Firnis nachweisbar (siehe Kapitel 3.1.2). Diese wurden in WUFI® Pro nachgestellt und mit denselben klimatischen Schwankungen simuliert. Ziel war die Untersuchung der Feuchteverteilung im Materialgefüge, wenn es zu Schäden kommt. Mit Hilfe der Simulationen war es möglich, über den Feuchteverlauf der einzelnen Schichten die größten Differenzen im Materialgefüge auszumachen und somit die potentielle Schwachstelle im Gefüge aufzuzeigen.

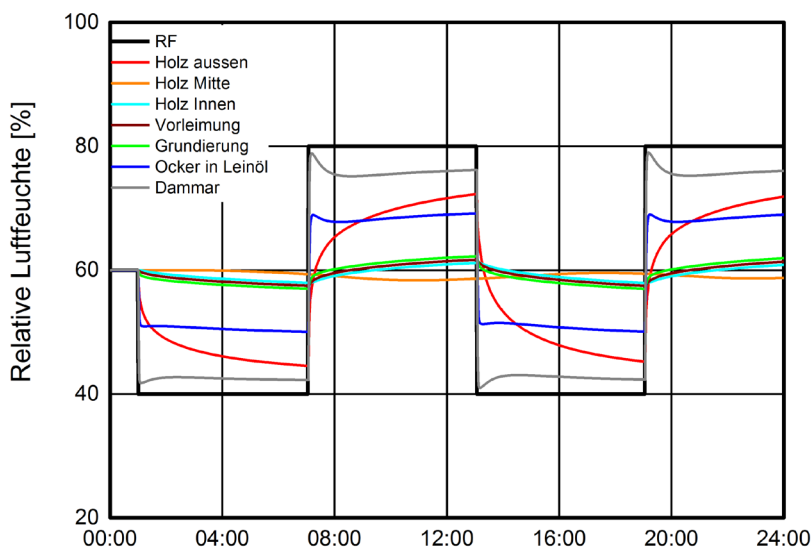


Abbildung 6.28:
Reaktion des Dummies „gefasstes Holz“ auf die im Labor durchgeführte klimatische Schwankung von 60 ± 20 % rF.

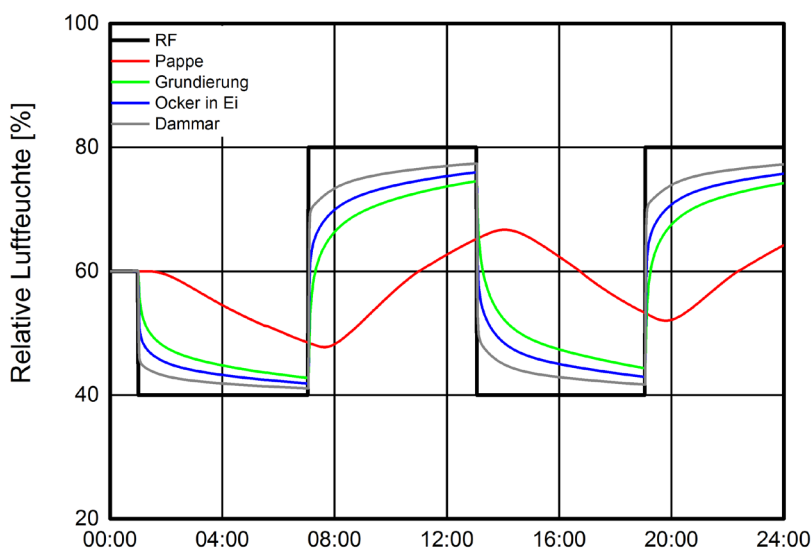


Abbildung 6.29:
Reaktion des Dummies „Malerei auf Pappe“ auf die im Labor durchgeführte klimatische Schwankung von 60 ± 20 % rF.

Gefasstes Holz – Craquelée im Firnis

In Tabelle 6.10 ist der Schichtenaufbau des Dummies „gefasstes Holz“ für die Eingabe im Simulationsmodell beschrieben. Die im Labor ermittelten Werte wurden für die Materialkenndaten übernommen. Als Klima wurde der in Kapitel 3.2 beschriebene Schwankungszyklus von 60 ± 20 % rF im sechsstündigen Wechsel verwendet, als Anfangsbedingung eine konstante relative Luftfeuchte von 60 % festgelegt.

Tabelle 6.10:
Schichtenaufbau für Dummy „gefasstes Holz“ mit Angabe der Schichten.

Rückseite				Vorderseite
Fichtenholz longitudinal 18 mm	Vorleimung 0,06 mm	Grundierung 3 mm	Malschicht Ocker in Leinöl 0,3 mm	Dammar 0,3 mm

In Abbildung 6.28 ist der Feuchteverlauf der einzelnen Schichten für das Klimakammerszenario dargestellt. Der Firnis reagiert unmittelbar und stark: 41 % ist der minimale, 78,5 % der maximale Wert der simulierten relativen Luftfeuchte im Gefüge. Nach dem maximalen Anstieg erfolgt ein geringfügiger Abfall, bis sich ein Wert von etwa 75 % rF eingestellt hat. Dieselbe Reaktion, wenn auch in geringerem Maß, zeigt die Malschicht (Maximum: 68,5 %, Minimum: 49,8 % rF). Innerhalb des Schichtenverbunds treten die größten Differenzen zwischen Firnis und Malschicht (maximal 11,7 %) bzw. zwischen Malschicht und Grundierung (9,8 %) auf. In der Mitte des Trägermaterials wirken sich die Schwankungen so gut wie nicht aus, ebenso wenig auf Vorleimung und Grundierung (Abweichung um maximal 3 % vom Mittelwert).

Nach den Klimakammersversuchen war im Firnis eine Craqueléebildung festgestellt worden (Abbildung 3.3). Die starken Differenzen zwischen Firnis und Malschichten, die in der Simulation auftraten, können eine Erklärung dafür sein.

Malerei auf Pappe – Ablösung der Malschicht

Über das vorgealterte Testobjekt „Malerei auf Pappe“ gibt es keine Information welches Mal- und Bindemittel verwendet wurde. Daher ist die Simulation ebenfalls eine Kombination aus den sichtbaren Merkmalen (Schichtdicke, Aufbau des Verbunds) und Annahmen. Der Aufbau ist in Tabelle 6.11 dargelegt: Auf das Trägermaterial Pappe folgt eine Grundierung aus einer Kreide-Gips-Mischung, eine diffusionsoffene Malschicht (Ocker in Ei) und ein Firnis, für den Dammar angenommen wurde. Als klimatisches Szenario wurde derselbe Klimakammerzyklus wie zuvor verwendet.

Tabelle 6.11:
Aufbau des Dummies „Malerei auf Pappe“ mit Angabe der Schichtdicken.

Rückseite			Vorderseite
Wellpappe (Klug Conservation) 15 mm	Grundierung 3 mm	Malschicht Ocker in Ei 0,3 mm	Dammar 0,3 mm

In Abbildung 6.29 ist die Feuchteverteilung von „Malerei auf Pappe“ für das Klimakammerszenario dargestellt. Die Firnisschicht reagiert stark auf die Zu- und Abnahme der Feuchtigkeit (Maximum: 77,4 %, Minimum: 41 % rF). Die Kurven von Malschicht und Grundierung folgen der des Firnis und liegen um jeweils ca. 8,5 % ober- bzw. unterhalb. Die Pappe reagiert weniger stark (Maximum: 66,7 %, Minimum: 47,8 % rF) und um ca. eine Stunde verzögert. Die größte Abweichung innerhalb des Verbunds liegt zwischen Grundierung und Pappe vor. Die maximale Differenz zur Grundierung beträgt 18,5 %. Während der gesamten Schwan-

kungsperiode sind Unterschiede von über 10 % vorhanden. Auf die Wiederholung des Zyklus reagiert die Pappe mit einem Auffeuchten, da nach einem Feuchtsprung die Gleichgewichtsfeuchte noch nicht wieder erreicht ist.

Bei den Klimakammerversuchen war das beobachtete Schadensphänomen die partielle Ablösung der Malschicht und der Grundierung von der Pappe. Die Feuchteunterschiede zwischen Träger und Malschicht können als Ursache für die Lockerung der Malschicht und Grundierung vom Untergrund interpretiert werden.

Konsequenz für die Auswertung der Materialverbände in den Simulationsszenarien

Aus den allgemeinen Studien zu unterschiedlichen Materialverbänden und der Analyse der beiden Fallstudien der Laborversuche wird abgeleitet, dass bei einer Differenz zwischen zwei Gefüge-Komponenten von über 5 % ein erstes Schadensrisiko besteht. Weiter wird für Holz als Träger mit einer Stärke über 5 mm angenommen, dass ein Unterschied innerhalb des Materials über 5 % ebenfalls ein Schadensrisiko darstellt.²⁰⁰ Damit aus dem ersten Fall ein erhöhtes Risiko entsteht, muss die Spannung, die sich aus dem Feuchteunterschied der beiden Schichten ergibt, länger wirksam sein. Nach Michalski 1993 rufen die Schwankungen die größte Spannung hervor, die länger andauern als die Reaktionszeit (response time), jedoch kürzer als die Entspannungszeit des Objektes sind.²⁰¹ Wie durch die Wägeversuche in Kapitel 3 und die Simulationsstudien gezeigt wurde, ist die Reaktion eines Kunstwerks auf eine klimatische Schwankung immer unmittelbar, da die Oberflächen sofort Feuchte aufnehmen oder abgeben. Demnach läge bereits bei jeder klimatischen Änderung eine Spannung vor. Wie durch die Mikroskopuntersuchungen festgestellt wurde, dauert es (je nach Materialverbund) einige Zeit, bis eine optische Veränderung eintritt, die als Spannung im Gefüge gewertet wird. In den beiden untersuchten Beispielen war nach ca. 120 Minuten eine Änderung sichtbar. Die Entspannung eines Objektes ist schwer zu messen, daher wird statt dessen der Zeitpunkt angenommen, zu dem die Gleichgewichtsfeuchte wieder erreicht ist. In den Beispielen „gefasstes Holz“ und „Malerei auf Pappe“ stellt die Änderung der relativen Luftfeuchte über einen Zeitraum von sechs Stunden bereits ein erhöhtes Risiko dar, da sich die Gleichgewichtsfeuchte noch nicht wieder eingestellt hat. Daher wird für die Auswertung der Fallstudien weiter angenommen, dass bei einer Differenz von über 5 % zwischen zwei Schichten oder bei Holz mit einer Schichtstärke über 5 mm über einen Zeitraum von über sechs Stunden, ein hohes Schadensrisiko vorliegt. Die folgenden Szenarien werden diesbezüglich analysiert und ausgewertet. Für die Beurteilung des Feuchteverhaltens von Holz als Trägermaterial werden die Simulationen an drei Positionen in unterschiedlicher Schichttiefe ausgewertet: Aussen, in der Mitte des Trägers und innen, also angrenzend zur Bildschicht.

6.3 Simulationsszenarien

Aus der restauratorischen Untersuchung an den vier Fallstudien (Kapitel 4) ging hervor, dass unabhängig von den klimatischen Schwankungen insbesondere der Standort einen enormen Einfluss hinsichtlich der Erhaltung hat. Ist ein Kunstwerk beispielsweise unmittelbar dem Außenklima ausgesetzt, sind deutlich höhere Schwankungen zu erwarten, als im Innenraum. Ein Leinwandgemälde, das an einer Außenwand hängt, ist zwei unterschiedlichen Klimata ausgesetzt, so dass – unabhängig von den Schwankungen des Raumklimas – eine permanente Temperatur- und Feuchtedifferenz höhere Gradienten im Gefüge verursacht. Im Folgenden wird die Auswirkung der Positionierung von verschiedenen Kunstgattungen an drei unterschiedlichen Standorten – an einer Außenwand, einer Innenwand und frei im Raum stehend – untersucht.

²⁰⁰ Angelehnt an Bratasz et al. 2011, S. 52, vgl. Kapitel 2.

²⁰¹ Michalski 1993, p. 626.

6.3.1 Szenario Kunstwerke an der Außenwand

In Schloss Linderhof und dem Königshaus am Schachen befindet sich ein Großteil der Ausstattung an den Außenwänden. Für die Untersuchung der Temperatur- und Feuchteverläufe mit der hygrothermischen Simulation wird das Szenario Schloss Linderhof heraus gegriffen. An einem Leinwandgemälde sowie an einem farbig gefasstem bzw. polimentvergoldetem Holzpanel wird die Auswirkung der klimatischen Situation ohne Klimatisierung und mit eingebauter Lüftungsanlage verglichen.

Aktuell wird Schloss Linderhof nicht klimatisiert. Das Raumklima ist jedoch insbesondere im Sommer aufgrund des hohen Feuchteniveaus und den täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte über 20 % nicht zuträglich für die Erhaltung der Ausstattung (vgl. Kapitel 4.1.1). Deshalb soll künftig eine minimalinvasive Lüftungsanlage eine Verbesserung erzielen. Das angestrebte Klima ist an der Norm DIN EN ISO 15757 orientiert.²⁰² Hier soll mit der hygrothermischen Simulation die Auswirkung beider Klimata auf die Ausstattung verglichen und aufgezeigt werden, ob bzw. inwieweit das „neue“ Raumklima die mikroklimatischen Situationen der Kunstwerke, die an der Außenwand montiert sind, verändert.

Das Szenario Leinwandgemälde / Holzpanel an der Außenwand wird am Beispiel des Audienzimmers nachgestellt (Abbildung 4.13). Die Daten zum Wandaufbau sind von Bichlmair übernommen.²⁰³ Die simulierte Wand ist, wie in Linderhof, nach Westen ausgerichtet. In Tabelle 6.12 ist der Schichtenaufbau für Leinwandgemälde bzw. gefasstes / vergoldetes Holzpanel an der Wand von außen nach innen (links nach rechts) dargelegt. Alle Varianten unterscheiden sich erst nach der Vollziegelschicht. Beim Gemälde wird ein Kalkputz und eine ca. 2 cm dicke Luftschicht mit einer Luftwechselrate von 1/h angenommen (vgl. Kapitel 4.1.1). Zwischen Innenwand und gefasstem Holzpanel befindet sich lediglich eine 3 cm starke Luftschicht sowie nach Befund zwei Farbanstriche.²⁰⁴ Mangels Kenndaten für die Dispersionsfarbe, die wohl als Überfassung eingesetzt wurde, wird Zinkweiß in Leinöl verwendet.

Als Außenklima werden für Temperatur, relative Luftfeuchte, Global- und Diffusstrahlung Stundenwerte herangezogen, die mit einer Wetterstation auf dem Gelände von Schloss Linderhof ermittelt wurden. Als Innenraumklima werden die von Bichlmair simulierten Daten verwendet. Aufgrund von Messausfällen der Klimasensoren in Linderhof entwickelte Bichlmair für die Simulation des Raumklimas im Paradeschlafzimmer ein Klimafile, welches hier eingesetzt wird. Damit die Innenraumklimadaten mit den Daten, die sich aus dem Einbau der Lüftungsanlage ergeben, vergleichbar sind, werden für beide Szenarien die simulierten Datensätze verwendet. An der Außenseite des Verbunds wird immer das Außenklima, auf der Innenseite das simulierte Innenraumklima mit und ohne Lüftungsanlage eingegeben. In den Grafiken mit simulierter Lüftungsanlage ist zum Vergleich das gemessene Raumklima ohne Anlage angegeben (hellgraue Kurve).

202 Bichlmair et al. 2013.

203 Bichlmair 2011, S. 13 ff. und 85. Bichlmair verwendet für Außenputz, Innenputz und Holz die Materialien der WUFI® Datenbank und für den Ziegel Daten einer Materialprobe aus dem Schloss.

204 Kriewitz et al. 1993; Mayrhofer 1998.

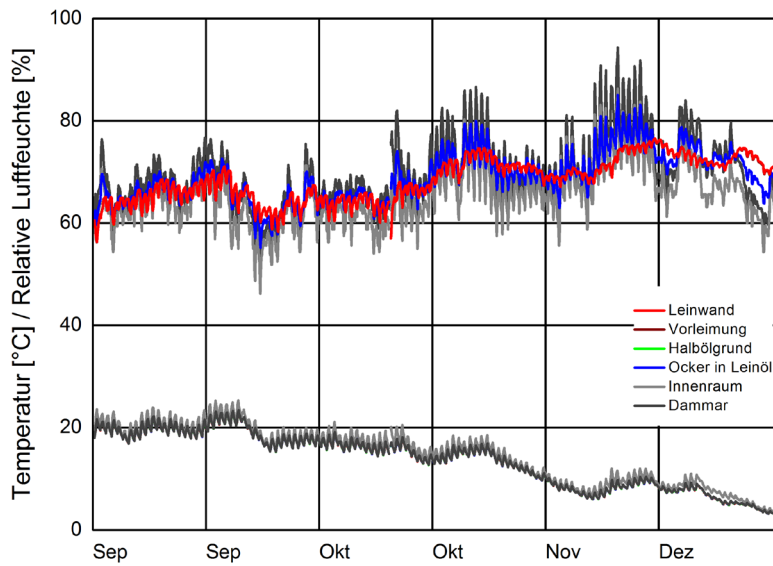


Abbildung 6.30:
Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, unter gemessenen Klimabedingungen (1.9. – 30.12.2011).

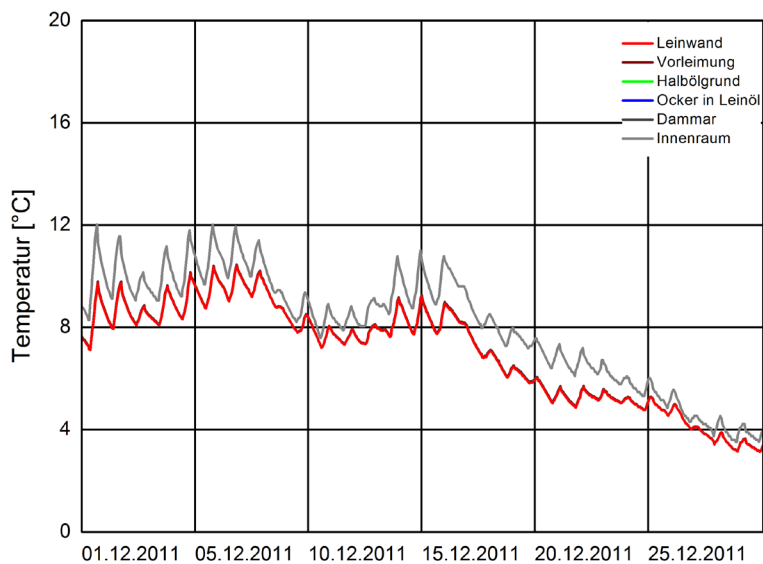


Abbildung 6.31:
Detailbetrachtung der Temperatur für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

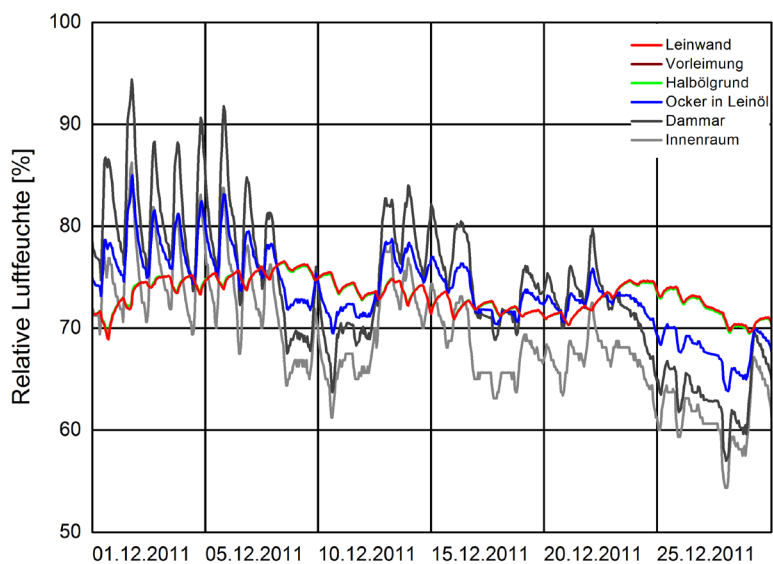


Abbildung 6.32:
Detailbetrachtung der relativen Luftfeuchte für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

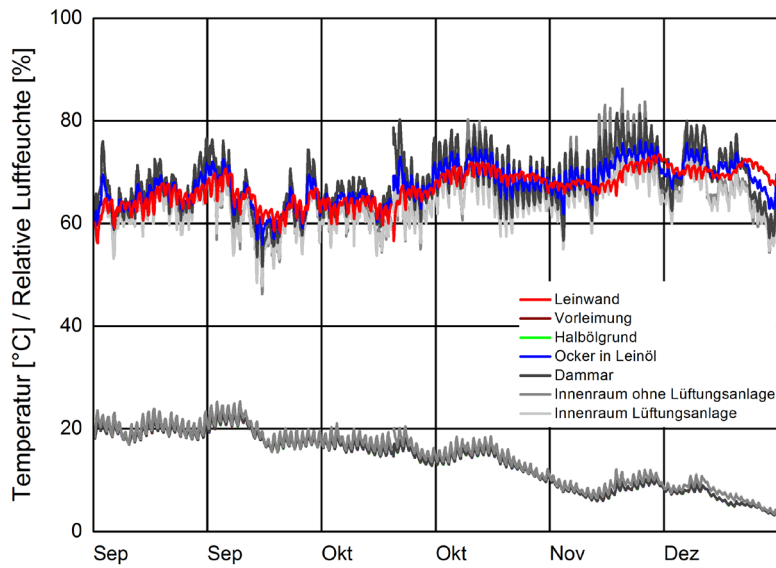


Abbildung 6.33: Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1.9. – 30.12.2011).

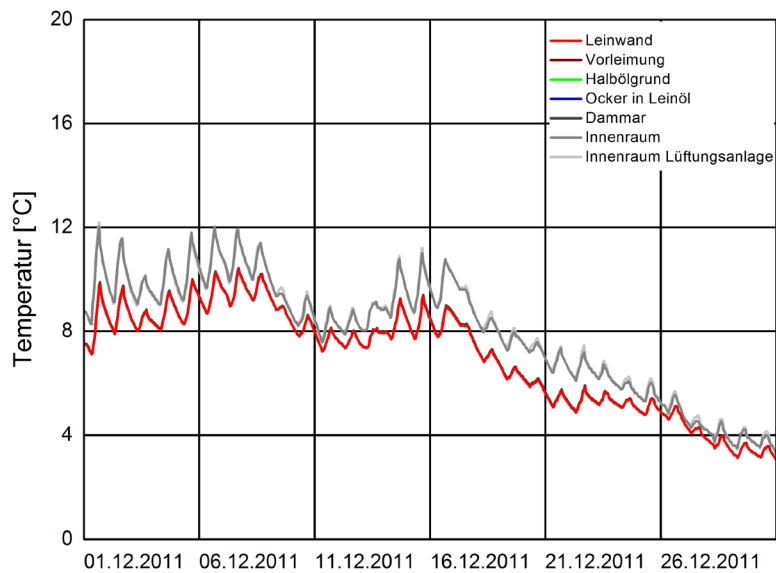


Abbildung 6.34: Detailbetrachtung der Temperatur für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1. – 30.12.2011).

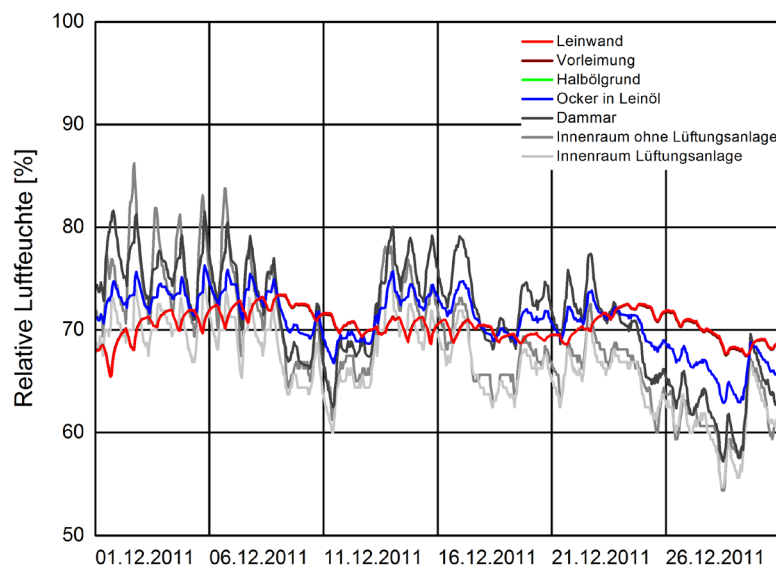


Abbildung 6.35: Detailbetrachtung der relativen Luftfeuchte für ein Leinwandgemälde, an einer Außenwand hängend, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1. – 30.12.2011).

Tabelle 6.12:

Wandaufbau in Schloss Linderhof mit Angabe der Schichtdicken für die simulierten Szenarien.

Variante	Außenseite					Innenseite
Leinwandgemälde an Außenwand	Außenputz (Kalkputz) 30 mm	Vollziegel 600 mm	Innenputz (Kalkputz) 20 mm	Luftschicht 20 mm, Luftwechselrate 1 [1/h]	Leinwand 4 mm / Vorleimung 0,06 mm / Halbölgrund 0,04 mm	Ocker in Leinöl 0,3 mm / Dammar 0,03 mm
Gefasstes Holzpanel an Außenwand	Außenputz (Kalkputz) 30 mm	Vollziegel 600 mm	Luftschicht 30 mm 1 [1/h]	Holzpanel (Fichte) 30 mm	Wässrig gebundene Malschicht (Zinkweiß in Ei) 0,03 mm	Zinkweiß in Leinöl 0,02 mm
Vergoldetes Holzpanel an Außenwand	Außenputz (Kalkputz) 30 mm	Vollziegel 600 mm	Luftschicht 30 mm 1 [1/h]	Holzpanel (Fichte) 30 mm	Kreidegrundierung 0,7 mm	Blattgold 0,001 mm; Leim 0,06 mm

Leinwandgemälde

Die Abbildungen 6.30 bis 6.32 zeigen den simulierten Temperatur- und Feuchteverlauf für ein an der Außenwand montiertes Leinwandgemälde ohne Klimatisierung in viermonatiger Übersicht und vierwöchiger Detailbetrachtung. Die außen liegenden Schichten Dammar und Ocker in Leinöl reagieren unmittelbar auf die Schwankungen im Innenraum, die relative Luftfeuchte in der Firnischicht ist durch den Einfluss der Außenwand höher als die Werte im Innenraum (Dammar Maximum: 94 % Minimum: 50 % rF, Malschicht Maximum: 85 %, Minimum: 55 % rF). Grundierung und Leinwand reagieren gepuffert. In der Detailauswertung wird sichtbar, dass insbesondere bei den hohen, kurzfristigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte von ca. 85 % auf 70 % am 2. Dezember der Schichtenverbund eine Feuchtedifferenz von ca. 8 % aufweist (Abbildung 6.32). Die maximale Abweichung zwischen Firnis und Malschicht liegt bei 8,9 %.

In der Temperaturverteilung zeigt sich ebenfalls der Einfluss der Außenwand: Die Temperatur von Leinwand und Dammar weichen über den gesamten Zeitraum im Mittel um 0,9 K vom Innenraumklima ab. Zwischen den Schichten beträgt die maximale Differenz 0,1 K (Abbildung 6.31).

Derselbe Schichtenverbund, jedoch mit dem Klima der eingebauten Lüftungsanlage simuliert, ist in den Abbildungen 6.33 bis 6.35 dargestellt. Hier ist das hohe Feuchteniveau deutlich reduziert und die Schwankungen der relativen Luftfeuchte in den einzelnen Schichten sind vermindert. Die Feuchteunterschiede im Gefüge liegen nun bei ca. 6 % (maximale Differenz zwischen Firnis und Malschicht: 6,9 %). Das Feuchteniveau des Verbunds ist insgesamt abgesenkt. Da die Lüftungsanlage ohne Heizung simuliert wurde, bleibt die oben beschriebene Temperaturabweichung unverändert erhalten.

Die Lüftungsanlage verbessert die klimatische Situation der Leinwandgemälde an der Außenwand. Es bleibt jedoch aufgrund der Feuchteunterschiede in den Malschichten ein geringes Schadensrisiko erhalten.

Gefasste Holzoberfläche

Die gefasste Holzoberfläche ist unklimatisiert (Abbildung 6.36 bis 6.38) und klimatisiert (Abbildung 6.39 bis 6.41) in viermonatiger Übersicht und vierwöchiger Detailbetrachtung dargestellt. Die gefasste Holzoberfläche reagiert wie erwartet geringer auf die Feuchteschwankungen des Innenraums als das Leinwandgemälde. Die beiden Farbfassungen wie auch die ersten Millimeter des Trägers folgen den hohen Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Über den Zeitraum von vier Monaten liegen bei Zinkweiß in Leinöl ein Maximum von 85 % und ein Minimum von 55 % rF, also eine Differenz von 30 % vor. Zinkweiß in Ei hat ein Maximum von 75 % und ein Minimum von 60 % rF, was einer Differenz von 15 % entspricht. An einigen Tagen liegt zwischen beiden Farbschichten ein Unterschied von über 5 % vor. Diese dauert länger als 6 Stunden an. An zwei Tagen

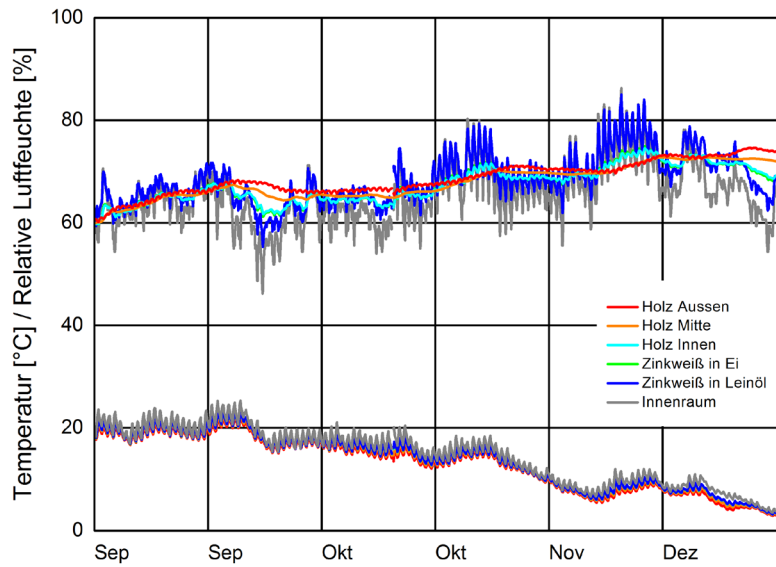


Abbildung 6.36: Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1.9. – 30.12.2011).

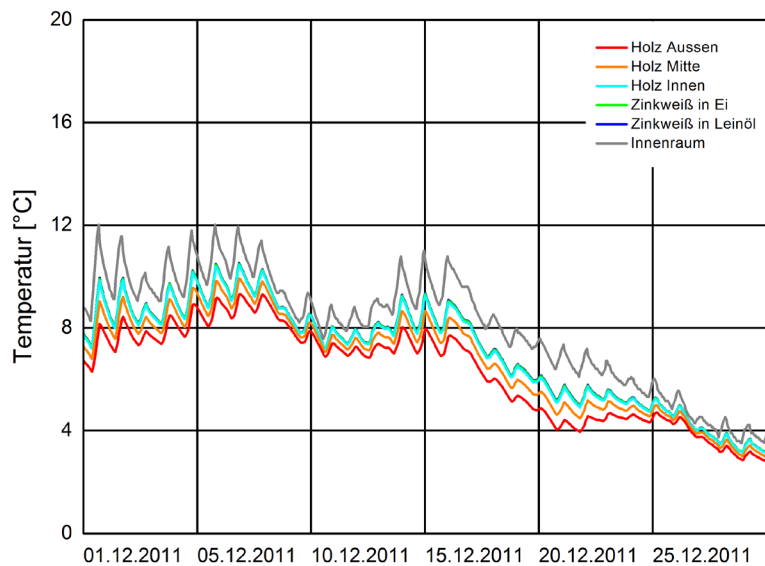


Abbildung 6.37: Detailbetrachtung der Temperaturverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

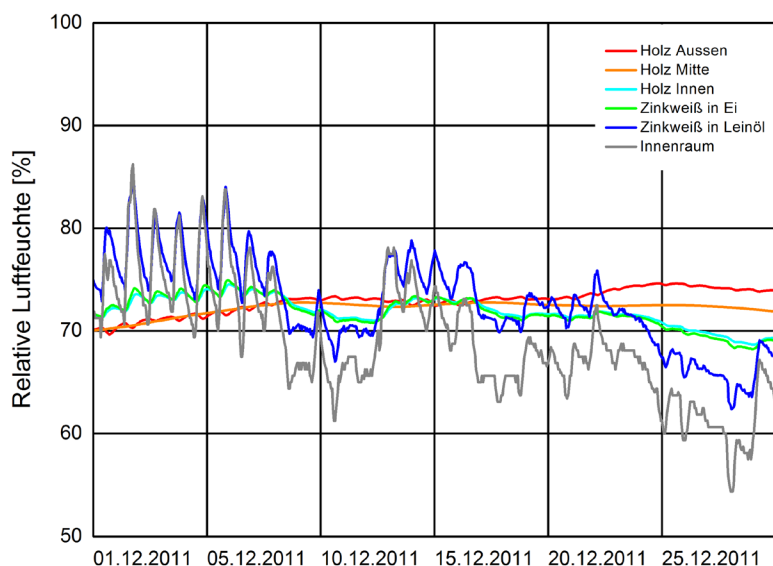


Abbildung 6.38: Detailbetrachtung der Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

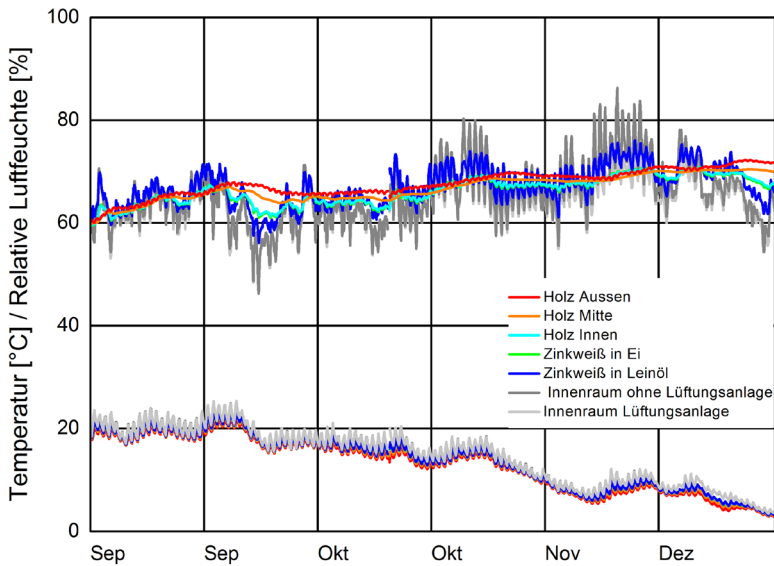


Abbildung 6.39:
Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1.9. – 30.12.2011).

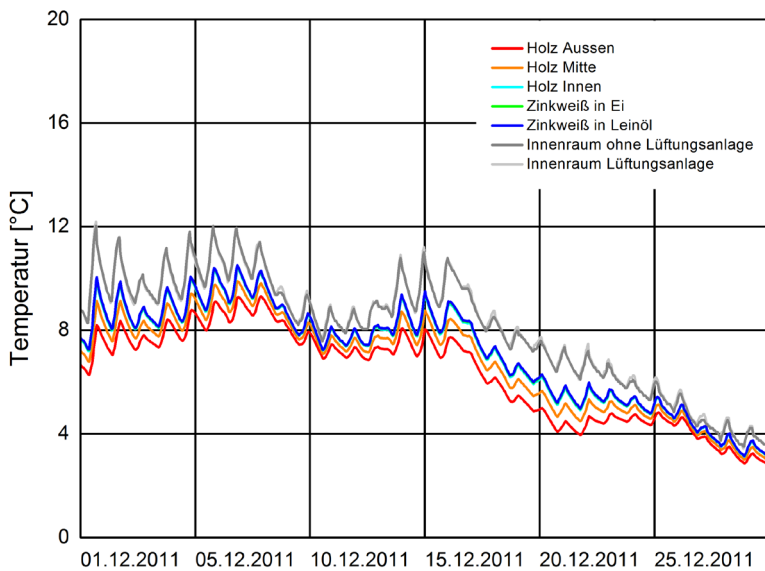


Abbildung 6.40:
Detailbetrachtung der Temperaturverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1. – 30.12.2011).

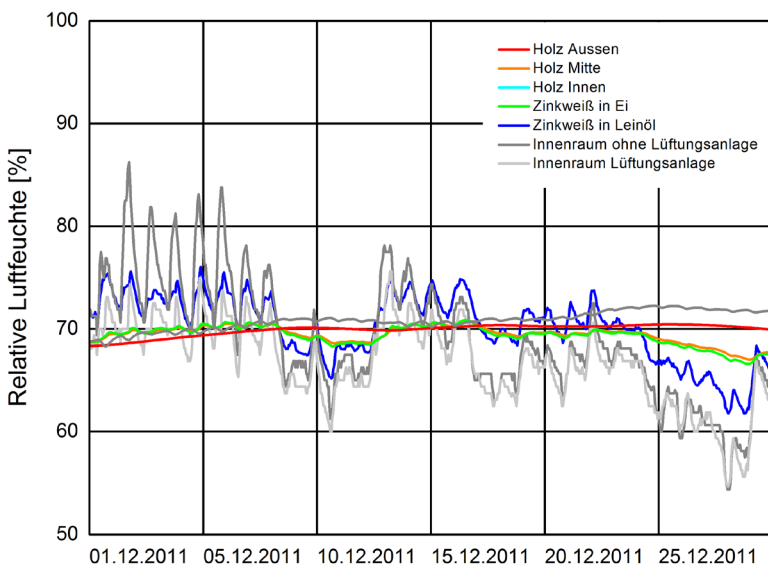


Abbildung 6.41:
Detailbetrachtung der Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes gefasstes Holzpanel, mit simuliertem Lüftungsanlagenklima (1. – 30.12.2011).

beträgt der Unterschied mehr als 10 % (29.11: 11,1 % und 2.12.: 10,2 %) und dauert maximal drei Stunden an. Innerhalb des Holzes tritt an vier Tagen über mehrere Stunden eine Differenz von 5 % auf.

Die relative Luftfeuchte von Holz weist bei der an die Farbschichten angrenzenden Monitorposition (Holz innen) nur eine geringe Differenz zur Farbschicht auf, daher ist ein Ablösen von beiden Malschichten vom Träger unwahrscheinlich. Eher wird sich die obere Malschicht von der unteren lösen (vgl. Kapitel 4.1.2).

Die Temperaturen in den einzelnen Schichten liegen nahe an den Werten des Innenraumklimas. Im Holz liegen Differenzen von maximal 1 K, zwischen Malschicht und Holz von 2,7 K vor.

Das Klima des mit einer Lüftungsanlage konditionierten Innenraums führt auch beim gefassten Holzpanel neben einem geringen Feuchteniveau zu einer deutlich geringeren Feuchtedifferenz im Gefüge. Die Malschichten unterliegen insgesamt geringeren Schwankungen (Zinkweiß in Leinöl Maximum: 76 %, Minimum, 56 % rF; Zinkweiß in Ei Maximum: 71 %, Minimum 60 % rF). Die Differenz zwischen den beiden Malschichten verringert sich auf maximal 8 %. Länger andauernde Feuchteunterschiede über 5 % liegen nun nur noch an vier Tagen vor (2.9., 23.10., 24.10., 1.12.). Die Temperaturdifferenzen bleiben auch hier weiter bestehen (Abbildung 6.40).

Insgesamt liegt aufgrund der Bewertung anhand der simulierten Laborversuche für die farbig gefasste Holzoberfläche ohne Klimatisierung ein Schadenspotential vor. Insbesondere zwischen den beiden Malschichten sind hohe Feuchtedifferenzen vorhanden, was zur Lockerung bzw. Ablösung der oberen Schicht führen könnte. Vereinzelt wurde die Ablösung der obersten Farbschicht vom Holzpanel festgestellt (z. B. im Speisezimmer). Die Lüftungsanlage bewirkt in der Simulation eine Reduzierung der Feuchtedifferenzen im Gefüge.

Vergoldete Holzoberfläche

In den Abbildungen 6.42 bis 6.44 ist der Temperatur- und Feuchteverlauf der vergoldeten Holzoberfläche ohne Klimatisierung in viermonatiger Übersicht und vierwöchiger Detailbetrachtung dargestellt. Generell reagiert der Materialverbund des vergoldeten Holzpanels ähnlich wie die farbig gefasste Oberfläche. Allerdings zeigt dort das Holz bereits ab der Schichtmitte eine geringere Reaktion, da die obersten Schichten der Farbfassung die Feuchtschwankungen stark puffern. Die durchlässigeren Schichten der Vergoldung führen zu höheren Schwankungen im Verbund und damit zu einem stärkeren Quellen und Schrumpfen des Holzes (Abbildung 6.38, 6.44). Leim und Gold reagieren sehr stark und unmittelbar auf die klimatischen Schwankungen (Leim Maximum: 90 %, Minimum 51 %; Gold Maximum: 89 %, Minimum: 51 % rF). Die Feuchteunterschiede zwischen Leim und Gold sind mit maximal 0,3 % gering. Die relative Luftfeuchte von Leim ist wie beim simulierten Leinwandgemälde geringfügig höher als das Innenraumklima (Abbildung 6.43). Dies ist wohl mit dem Einfluss der Außenwand zu begründen. Zwischen Kreidegrundierung und Goldschicht liegt der Unterschied bei maximal 5 % und dauert nur wenige Stunden an. Innerhalb des Holzes liegt eine maximale Feuchtedifferenz von 12,4 % vor. An zahlreichen Tagen liegen Unterschiede über 5 % vor und dauern länger als sechs Stunden.

Die Temperaturverteilung des Schichtenverbunds verläuft analog zu der des gefassten Holzpanels.

Die Auswirkung der Lüftungsanlage für die vergoldete Holzoberfläche ist in den Abbildungen 6.45 bis 6.47 zu sehen. Das geänderte Innenraumklima bewirkt im Schichtenverbund wieder ein niedrigeres Feuchteniveau und geringere Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Die maximale Schwankungsdifferenz innerhalb einer Schicht verringert sich bei Leim und Gold von ca. 49 % auf 26 % rF (Leim und Gold Maximum: 79 %, Mini-

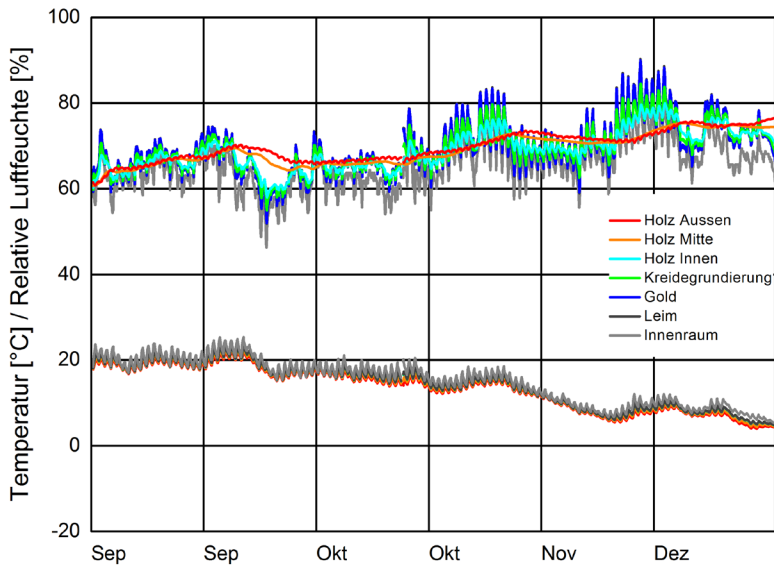


Abbildung 6.42:
Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1.9. – 30.12.2011).

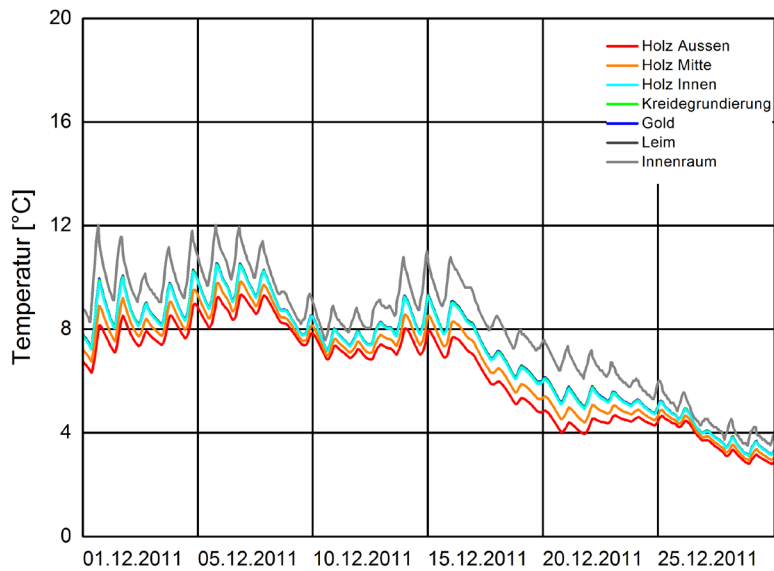


Abbildung 6.43:
Detailbetrachtung der Temperaturverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

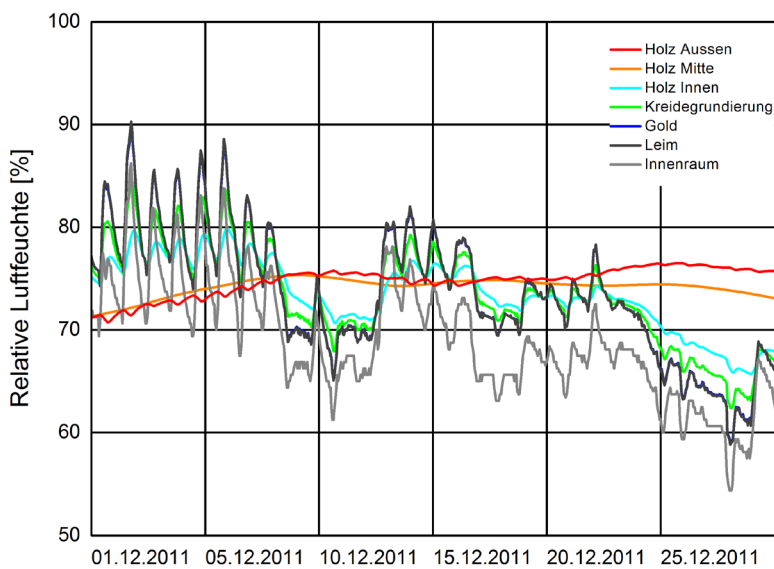


Abbildung 6.44:
Detailbetrachtung der Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, unter gemessenen Klimabedingungen (1. – 30.12.2011).

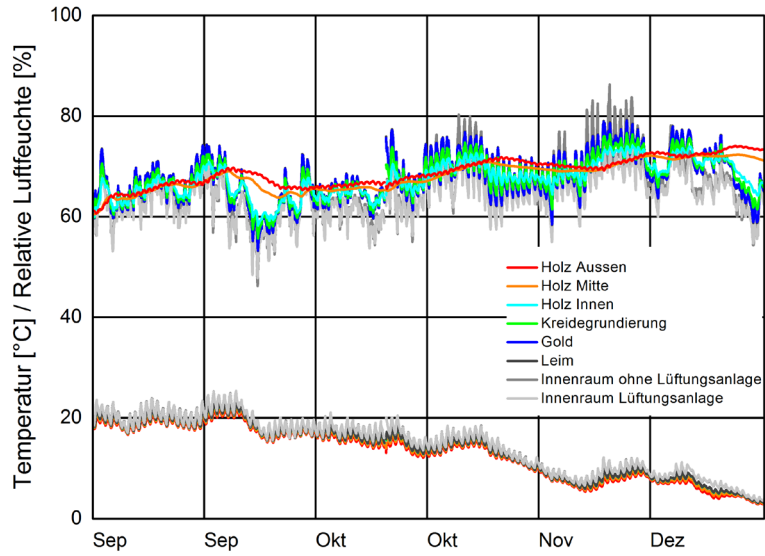


Abbildung 6.45: Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, mit simulierten Klimadaten (1.9. – 30.12.2011).

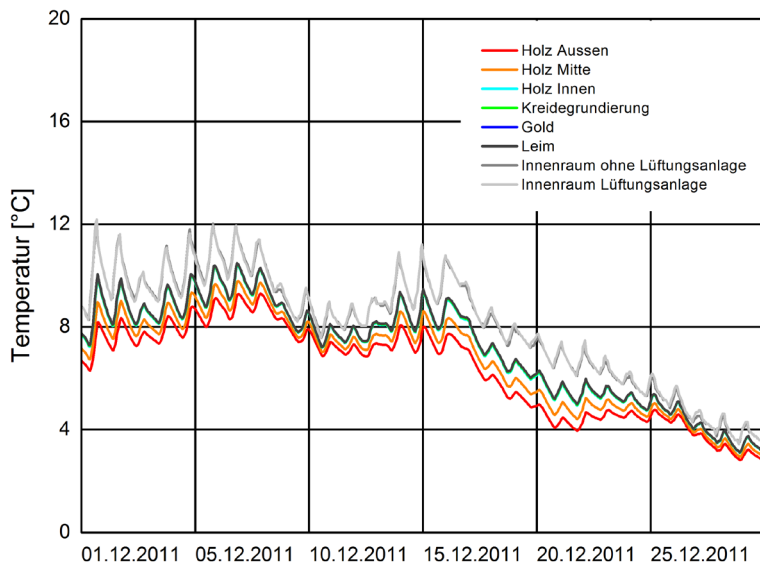


Abbildung 6.46: Detailbetrachtung der Temperaturverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, mit simulierten Klimawerten (1. – 30.12.2011).

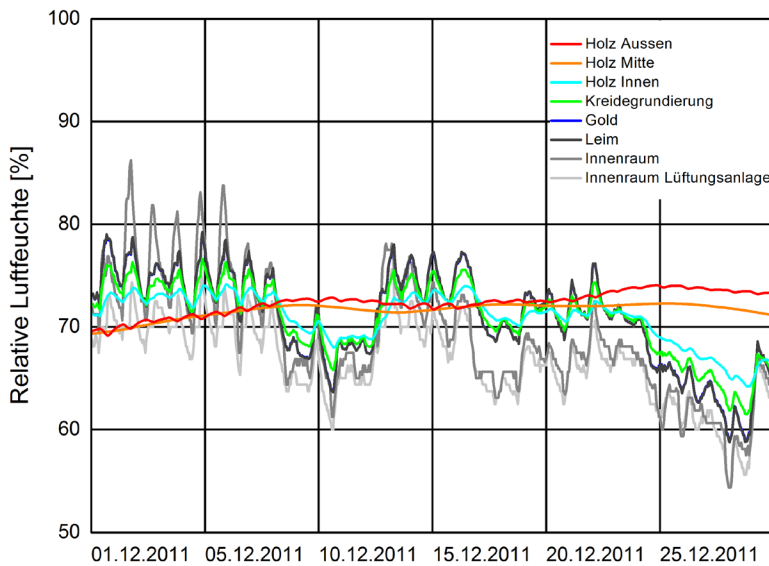


Abbildung 6.47: Detailbetrachtung der Feuchteverläufe für ein an einer Außenwand montiertes vergoldetes Holzpanel, mit simulierten Klimawerten (1. – 30.12.2011).

mum 53 % rF). Zwischen den beiden Schichten bleibt der Unterschied gering (maximal 0,3 %). Eine Differenz von über 5 % zwischen Kreidegrundierung und Gold liegt lediglich einmal vor (maximal 5,3 %). Innerhalb des Holzes bleiben die Feuchteunterschiede mit maximal 10,9 % nach wie vor hoch und dauern insbesondere in der Woche vom 25. bis 31. 12. konstant an.

Die Temperaturverteilung im Gefüge ist bei beiden Szenarien mit natürlichem Klima und simulierter Lüftungsanlage vergleichbar mit der gefassten Holzoberfläche.

Die Fassungsschichten der vergoldeten Holzoberfläche sind nur geringen Feuchteschwankungen ausgesetzt, jedoch unterliegt das Trägermaterial starken Differenzen, so dass hier ein Schadenspotential vorliegt.

Fazit

Wie erwartet führen die unterschiedlichen Materialverbände aufgrund der differierenden Eigenschaften zu individueller Temperatur- und Feuchteverteilung im jeweiligen Materialgefüge. Die Simulation eines Szenarios mit zwei unterschiedlichen Klimata veranschaulicht, dass sich bereits geringfügige Änderungen des Raumklimas direkt auf die Kunstwerke auswirken, auch wenn sie an der Außenwand angebracht sind und damit erfahrungsgemäß stärker dem Einfluss des Außenklimas unterliegen.

Mit Hilfe der Simulation konnte gezeigt werden, dass der Einbau der Lüftungsanlage die Schwankungen in allen drei Varianten des Materialverbunds vermindern kann. Aufgrund der Position an der Außenwand liegen insbesondere innerhalb des Leinwandgemäldes auch bei geänderter klimatischer Situation durch die Lüftungsanlage hohe Differenzen der relativen Luftfeuchte und damit weiterhin ein Schadensrisiko vor.

Für eine detaillierte Aussage zur Änderung der klimatischen Verhältnisse im Materialverbund an den Außenwänden sind weitere Messungen unmittelbar in Objektnähe notwendig. Statt dem oberflächennahen Klima kam für die Berechnungen das Innenraumklima aus der Raummitte zum Einsatz. Somit ist die Bewertung der Temperatur- und Feuchteverläufe im Materialgefüge nur eingeschränkt möglich.

6.3.2 Szenario Kunstwerk an der Innenwand

Die Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke, die an Innenwänden hängen, wird am Beispiel der Supraportengemälde, die in Schloss Linderhof zur originalen Ausstattung gehören, untersucht.

Schloss Linderhof – Supraportengemälde

Die Supraportengemälde in Schloss Linderhof sind über den Durchgangstüren zu den benachbarten Räumen Rücken an Rücken mit ca. 20 cm Abstand zueinander montiert. Ihre sehr gute Erhaltung (vgl. Kapitel 4.1) ist mitunter durch die Hängeposition bedingt. Auf diese Weise erfährt die diffusionsoffene Rückseite der Leinwand nur geringe Schwankungen. Die Vorderseite, vermutlich Ölmalerei, ist diffusionshemmend und spricht somit weniger auf klimatische Veränderungen an.

In Tabelle 6.13 ist der angenommene Simulationsaufbau gezeigt. Die Leinwandgemälde werden in einzelnen Schichten – Leinwand, Vorleimung, Grundierung (Halbölgrund), Farbschicht mit Ocker in Leinöl und Dammar als Firnissschicht – eingegeben, dazwischen wird eine Luftschicht von 20 cm mit einer Luftwechselrate von 1/h angenommen. Als Eingabedaten wurde eine Innenwand, nach Westen orientiert, ausgewählt. Als Klima beidseitig Stundenwerte des Innenraumklimas, mit und ohne Lüftungsanlage angenommen. Für eine höhere Genauigkeit wurde nach dem ersten Simulationslauf der Gesamtwassergehalt des Schichtenverbunds ausgegeben, diese Daten wiederum als Anfangsbedingung festgelegt und die Simulation wiederholt.

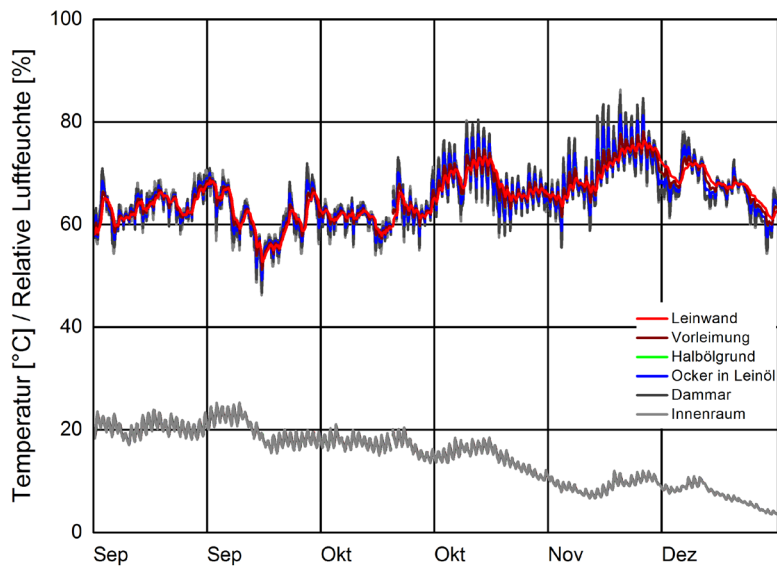


Abbildung 6.48: Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe eines Supraportengemäldes mit gemessenem Innenraumklima (1.9. – 30.12.2011).

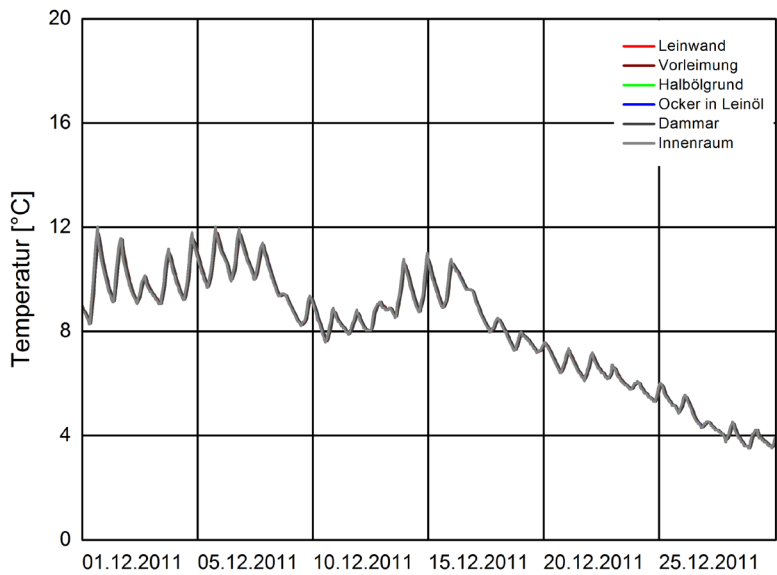


Abbildung 6.49: Detailbetrachtung der Temperaturverläufe eines Supraportengemäldes mit gemessenem Innenraumklima (1. – 30.12.2011).

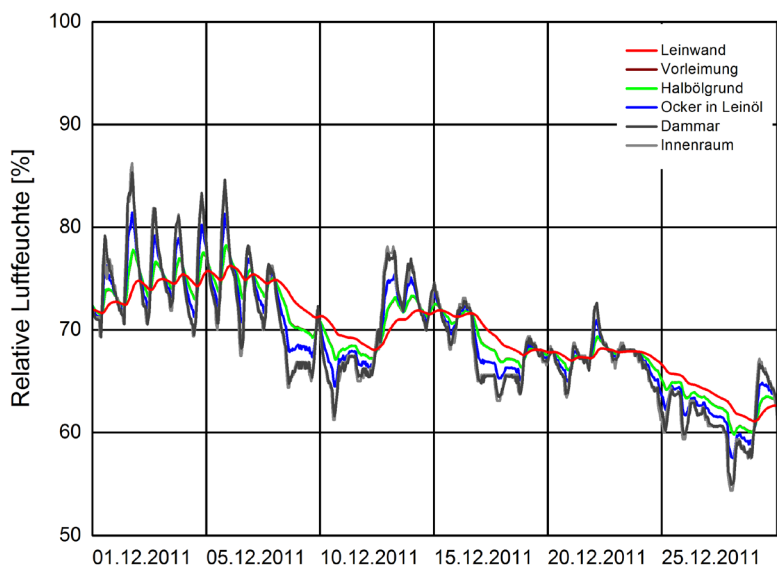


Abbildung 6.50: Detailbetrachtung der Feuchteverläufe eines Supraportengemäldes mit gemessenem Innenraumklima (1. – 30.12.2011).

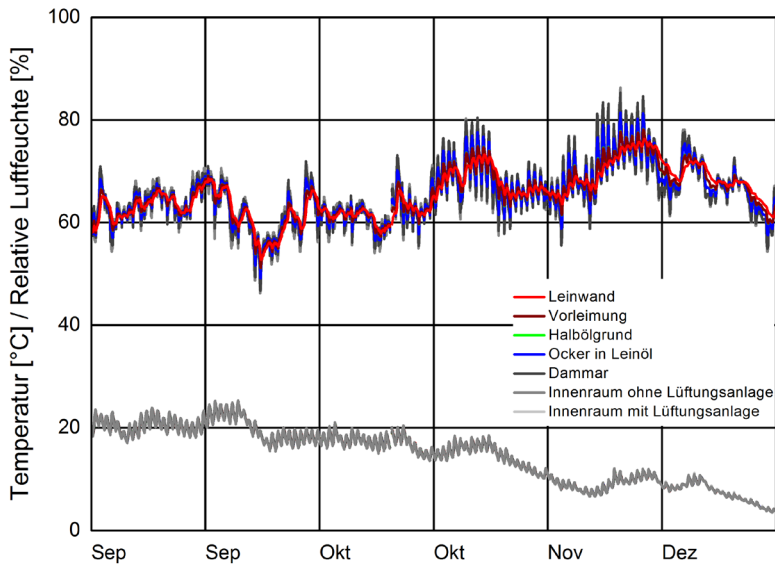


Abbildung 6.51:
Übersicht der Temperatur- und
Feuchteverläufe eines Supraporten-
gemäudes mit simulierter Lüftungs-
anlage (1.9. – 30.12.2011).

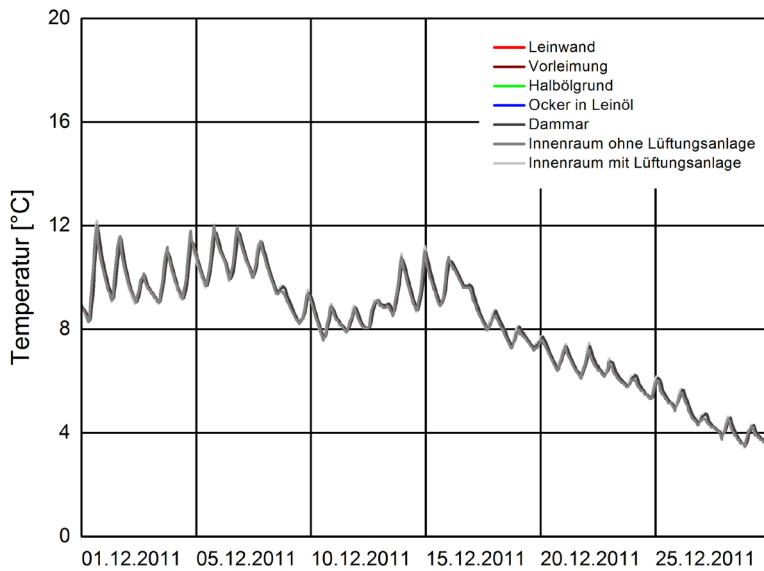


Abbildung 6.52:
Detailbetrachtung der Temperatur-
verläufe eines Supraportengemäudes
mit simulierter Lüftungsanlage
(1. – 30.12.2011).

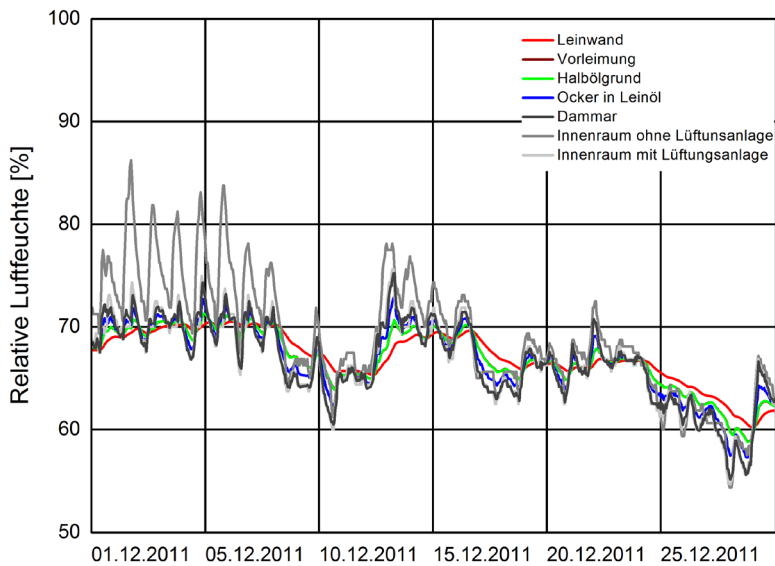


Abbildung 6.53:
Detailbetrachtung der Feuchtever-
läufe eines Supraportengemäudes
mit simulierter Lüftungsanlage
(1. – 30.12.2011).

Tabelle 6.13:
Simulationsaufbau der Supraporten Gemälde mit Angabe der Schichtdicken.

Vorderseite linkes Gemälde			Rückseite			Rückseite rechtes Gemälde			Vorderseite	
Dammar 0,03 mm	Malschicht Ocker in Leinöl 0,3 mm	Grundierung Halböl- grund 2 mm	Vorlei- mung 0,06 mm	Lein- wand 4 mm	Luftschicht 20 mm Luft- wechsel- rate 1/h	Lein- wand 4 mm	Vorlei- mung 0,06 mm	Grundierung Halböl- grund 2 mm	Malschicht Ocker in Leinöl 0,3 mm	Dammar 0,03 mm

Da auf beiden Seiten derselbe Materialverbund angenommen wird und sich somit beide Seiten gleich verhalten, wurde für die Auswertung nur ein Gemälde (das „rechte“) herangezogen. In den Abbildungen 6.48 bis 6.53 ist die Reaktion der einzelnen Schichten auf das Raumklima mit und ohne Lüftungsanlage in viermonatlicher Übersicht und vierwöchigem Detail dargestellt. Wie erwartet ist die Reaktion auf klimatische Schwankungen geringer als an der Außenwand. In beiden Szenarien ist die relative Luftfeuchte im Materialverbund sehr homogen. Es kommt lediglich bei sehr starken, kurzfristigen Klimaschwankungen z. B. durch Abfall der relativen Luftfeuchte am 2. Dezember von 85 % auf 70 % rF oder der Änderung des Raumklimas über mehrere Tage (Absinken der relativen Luftfeuchte zwischen 8. und 11. 12. von 76 % auf 50 % rF) zu relevanten Differenzen zwischen den einzelnen Schichten. Der maximale Unterschied zwischen Firnis und Malschicht bzw. Malschicht und Grundierung beträgt ohne Klimatisierung 4,7 %, mit simulierter Lüftungsanlage 3 %. Trotzdem ist bei dem Szenario ohne Lüftungsanlage die Spreizung der Werte für die relative Luftfeuchte, insbesondere in den äußeren Schichten, hoch (Dammar: Maximum: 85 %, Minimum: 46 %; Ocker in Leinöl: Maximum: 81 %, Minimum: 49 % rF). Von den darüber liegenden Schichten gepuffert und durch den Schutz der Leinwandrückseite wegen des dahinter angebrachten Gemäldes, reagiert die Leinwand am geringsten auf die klimatischen Schwankungen. Anders als beim Gemälde an der Außenwand sind beim Verbund in Raummitte mit und ohne Lüftungsanlage keine Temperaturunterschiede zum Innenraumklima festzustellen. Die Lüftungsanlage reduziert vor allem extreme Ereignisse (Abbildung 6.52 bis 6.54). In den einzelnen Schichten sind die Maxima der relativen Luftfeuchten um 10 % verringert (Dammar: Maximum: 75 %, Minimum: 48 % rF; Ocker in Leinöl: Maximum: 72 %, Minimum: 50 % rF). Der Mittelwert im Gemäldeverbund ändert sich hingegen nur um 1 % rF. Dies belegt das Konzept der Lüftungsanlage, dass lediglich die Feuchtespitzen, die zu abrupten Reaktionen in den angrenzenden Schichten führen, verhindert werden. Die Gleichgewichtsfeuchte im Material bleibt unverändert.

6.3.3 Szenario Kunstwerk frei im Raum stehend

Wie das Raumklima Kunstwerke, die frei im Raum stehen beeinflusst, wird anhand der vergoldeten Holzoberflächen des Hochaltars St. Margaretha in Roggersdorf untersucht.

In 4.3 wurde beschrieben, dass der Hochaltar in St. Margaretha im Rahmen der Kirchensanierung 2003 neu gefasst wurde und bereits fünf Jahre später erste klimatisch bedingte Schäden in Form von Lockerungen in den gefassten und vergoldeten Holzoberflächen, sowie Rissbildungen aufwies. Daher wird der vergoldete Materialverbund in der Simulation nachgestellt und das vor Ort gemessene Klima als Randbedingung eingesetzt.

Als Mauerwerk wird eine 20 cm starke Tuffsteinwand mit einer Schicht Kalkputz verwendet, darauf folgt eine Luftschicht von 90 cm mit einer Luftwechselrate von 1,3/h. Für den Hochaltar wurde die Schnittrichtung des Holzes variiert und Fichtenholz longitudinal und radial ausgewählt (vgl. 6.1.3). Nach Vorleimung, Stein- und Kreidegrundierung folgen eine Schicht Blattgold mit Leimüberzug (Tabelle 6.14). Es wurde eine nach Westen

orientierte Außenwand ausgewählt. Als Klima wurden außen und innen Stundenwerte der dort gemessenen Temperatur und relativen Luftfeuchte eingegeben. Um die Genauigkeit zu erhöhen, wurde nach der ersten Simulation wieder der Gesamtwassergehalt des Schichtenverbunds ausgegeben, als neue Anfangsbedingung festgelegt und die Temperatur- und Feuchteverläufe erneut berechnet.

Tabelle 6.14:

Schematischer Aufbau der vergoldeten Holzoberfläche des Hochaltars in Roggersdorf unter Angabe der Schichtdicken.

Außenseite				Innenseite				
Tuffstein 200 mm	Kalkputz 15 mm	Luftschicht 900 mm, Luft- wechselrate 1,3 [1/h]	Fichtenholz longitudinal / radial 30 mm	Vorlei- mung 0,06 mm	Steingrun- dierung 5 mm	Kreidegrun- dierung 8 mm	Blattgold 0,01 mm	Leimüberzug 0,1mm

Wie in 6.3.2 sind innerhalb des Schichtenverbunds nur minimale Temperaturdifferenzen festzustellen. Daher konzentriert sich die Detailbetrachtung auf die Feuchteverteilung im Gefüge. Die Auswirkung des Leimüberzugs ist, wie oben beschrieben, minimal. Daher ist er hier zur besseren Lesbarkeit der Diagramme nicht dargestellt.

In Abbildung 6.54 und 6.55 ist die Temperatur- und Feuchteverteilung von vergoldetem Fichtenholz in longitudinaler und radialer Schnittrichtung in der Übersicht dargestellt. Hier wird bereits die unterschiedliche Reaktion des Trägermaterials, insbesondere in der Mitte (orange Kurve) sichtbar. In beiden Fällen wird das Holz durch die darüber liegenden Schichten stark gepuffert. Während sich die Mitte des Holzes bei Fichte longitudinal etwas zeitverzögert der Außenseite anpasst, liegt sie bei Fichte radial konstant bei 75 % rF. In der Detaildarstellung werden die Unterschiede, die sich aus dem variierten Träger ergeben, deutlich (Abbildung 6.56, 6.57). In den äußeren Schichten liegt bei beiden Szenarien eine hohe Spreizung der relativen Luftfeuchte vor: Blattgold bei Fichte longitudinal: Maximum 93 %, Minimum: 50 % rF; Blattgold bei Fichte radial: Maximum: 90 %, Minimum 52 % rF. Die Feuchteunterschiede zwischen den Schichten sind eher gering. Zwischen Blattgold und Kreidegrundierung liegt das Maximum bei 9 % (Fichte longitudinal) bzw. bei 6 % rF (Fichte radial). Innerhalb des Holzes sind jedoch große Abweichungen zu finden: Bei Fichte radial ist die Differenz zwischen Holz innen und Holz mitte bei maximal 17 %. Unterschiede von über 10 % über einen

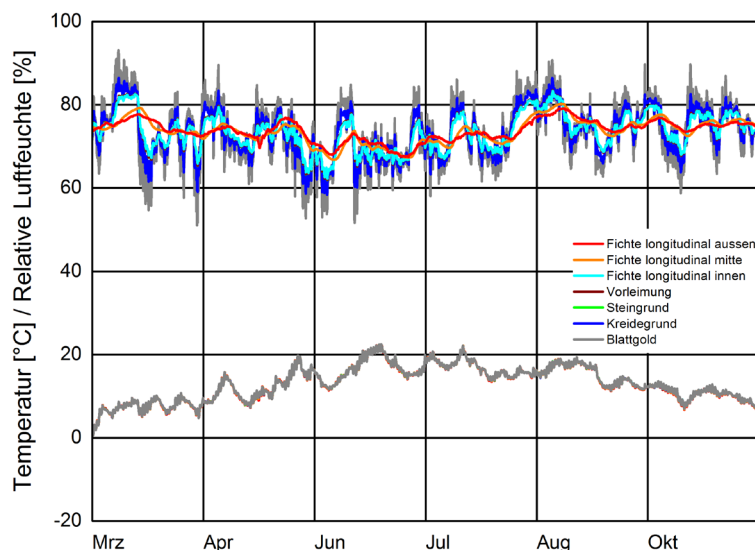


Abbildung 6.54:
Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe von vergoldeter Fichte longitudinal (15.3. – 15.11.2011).

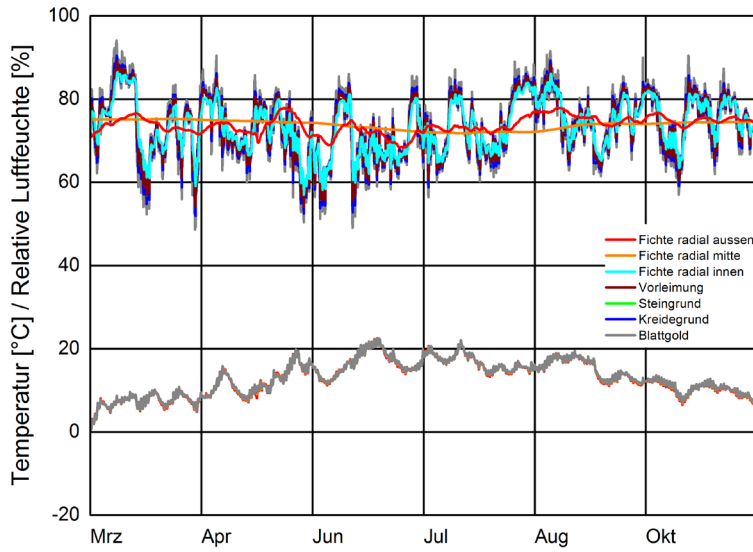


Abbildung 6.55:
Übersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe von vergoldeter Fichte radial (15. 3. – 15.11.2011).

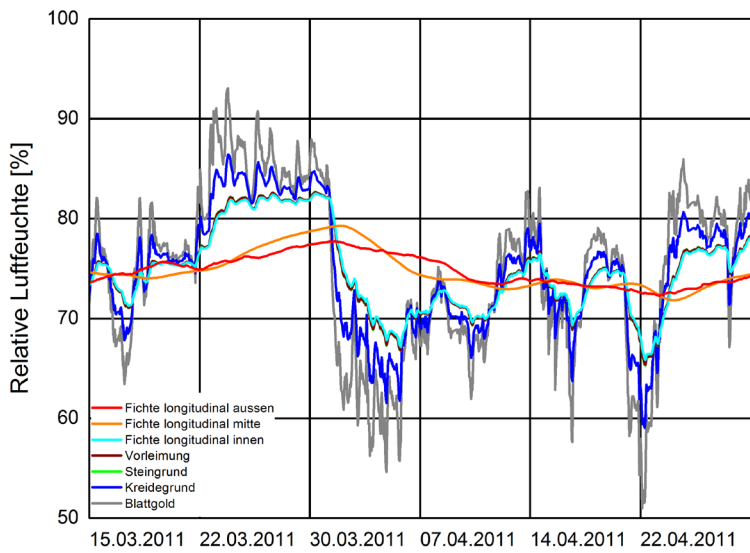


Abbildung 6.56:
Detailbetrachtung der Feuchteverläufe von vergoldeter Fichte longitudinal (15.3. – 30.04.2011).

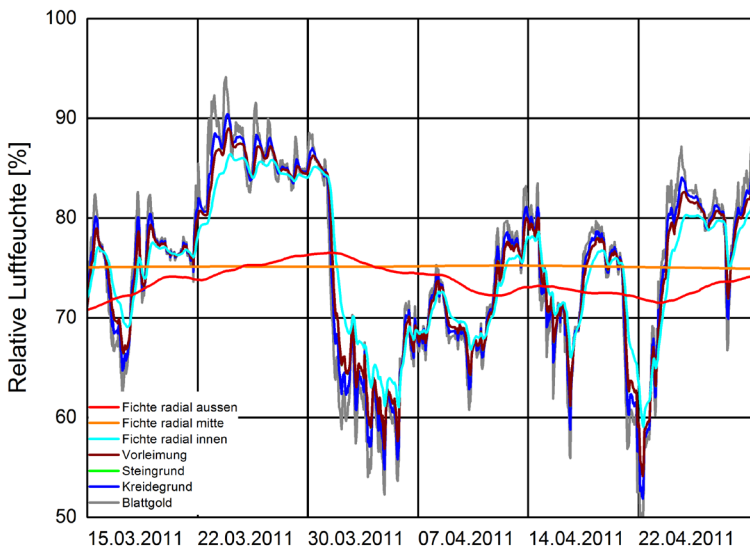


Abbildung 6.57:
Detailbetrachtung der Feuchteverläufe von vergoldeter Fichte radial (15.3. – 30.04.2011).

Zeitraum von mehreren Tagen liegen immer wieder vor, sodass hier ein Schadensrisiko gegeben ist. Fichte longitudinal weist dagegen maximal eine Differenz von 8,7 % auf.

Da für den Hochaltar in Roggersdorf nicht bekannt ist, welche Schnittrichtung überwiegend genutzt wurde, zeigt die Variantenrechnung auf, welchen potentiellen Schwankungen eine Fassung unterliegen kann. Nach den bisherigen Kriterien ist für beide Schnittrichtungen ein Schadensrisiko vorhanden. Auffällig sind hier zusätzlich die hohen Feuchteschwankungen, denen das gesamte Materialgefüge unterliegt. Dies sollte in Hinblick auf das Schadensrisiko ebenfalls berücksichtigt werden. So liegt hier neben den starken kurzfristigen Schwankungen über 15 % rF, auch aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte über 80 % rF, ein Schadensrisiko vor. Neben des erhöhten Risikos von Schimmelbildung kann z. B. Glutinleim seine Klebkraft verlieren (Kapitel 4.3). Außerdem sind mechanische Bewegungen durch klimatische Schwankungen bei höheren Luftfeuchten riskant (vgl. Kapitel 2.1.2). All diese Aspekte machen verständlich, warum hier bereits nach vergleichsweise kurzer Zeit Schäden am neu gefassten Hochaltar auftraten.

6.3.4 Szenario Seitenaltar vor temperierter Wand

Die Seitenaltäre St. Franziskus und St. Antonius stehen in der Renatuskapelle in Nischen westlich und östlich vom Hauptaltar (Abbildung 4.37). Die Temperierungsleitungen, die unter Putz verlegt sind, verlaufen unmittelbar neben bzw. hinter den Altären (Abbildung 4.40), weshalb insbesondere die Farbfassung am Unterbau Lockerungen und Substanzverluste aufweist (Abbildung 4.41). Die Seitenaltäre waren 2005 im Zuge der Sanierung der Renatuskapelle restauriert worden. In der Simulation wurde das Szenario am Beispiel des Franziskusaltars aufgegriffen, da hier zum einen Messdaten hinter dem Altar vorliegen, dieser zum anderen stärker beschädigt ist als der Antoniusaltar (vgl. Kapitel 4.4).

Für die Simulation wurde als Aufbau der Verbund einer bemalten Holztafel angenommen: Trägermaterial ist Fichte longitudinal, darauf folgen eine Kreide-Gips-Grundierung, die Farbschicht mit ölhaltigem Bindemittel (Ocker in Leinöl) und Schellack als diffusionshemmender Überzug (Tabelle 6.15). Für die Simulation der Variante 1 wird an der Außenseite – hier die Rückseite der Tafel – das hinter dem Altar gemessene Klima, für die Innenseite (Vorderseite) die in der Mitte des Innenraums erfassten Daten verwendet. Um zu untersuchen, was ein Standortwechsel des Seitenaltars beispielsweise in Raummitte hinsichtlich des Feuchtetransports bewirken würde, wurde in Variante 2 an beiden Seiten das Innenraumklima angelegt.

Tabelle 6.15: Schematisch dargestellter Schichtaufbau für den Seitenaltar St. Franziskus unter Angabe von Schichtdicken.

Rückseite		Vorderseite		
Fichte longitudinal 30 mm	Vorleimung 0,06 mm	Kreide-Gips-Grundierung 3 mm	Ocker in Leinöl 0,3 mm	Schellack 0,06 mm

Variante 1 – Seitenaltar an temperierter Wand

In Abbildung 6.58 ist der Temperatur- und Feuchteverlauf der einzelnen Schichten in der Jahresübersicht dargestellt. Wie in 4.4 erläutert, unterscheidet sich die Situation hinsichtlich der Temperatur im Sommer von der im Winter. Im Winter sind zwischen Raummitte und Altarrückseite Differenzen von maximal 4 K und 16 % relative Luftfeuchte anzutreffen. Im Sommer 2011 liegt eine homogenere Temperaturverteilung vor, jedoch zum Teil mit hohen relativen Luftfeuchten (Abbildung 6.59 und 6.60).

Die simulierte relative Luftfeuchte im Materialverbund liegt größtenteils zwischen dem in Raummitte und hinter dem Retabel gemessenen Klima. Über das gesamte Jahr passt sich das Materialgefüge der relativen

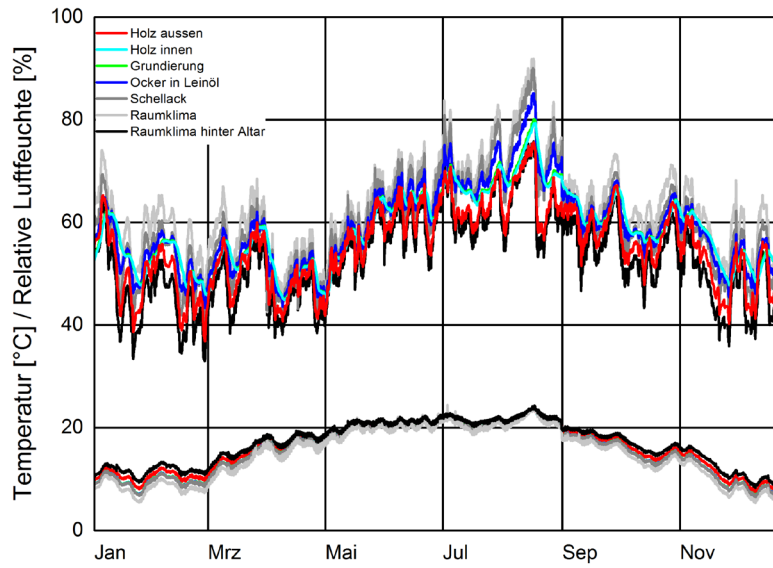


Abbildung 6.58: Jahresübersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe von gefasstem Holz, das dem Mikroklima durch die Temperierung ausgesetzt ist (1.1. – 31.12.2011).

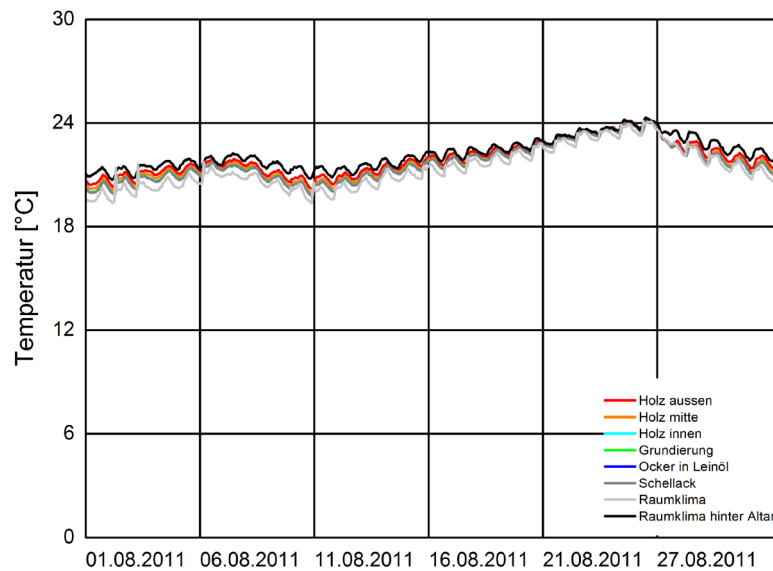


Abbildung 6.59: Detaildarstellung der Temperaturverläufe von gefasstem Holz für den Sommer (1.8. – 1.9.2011).

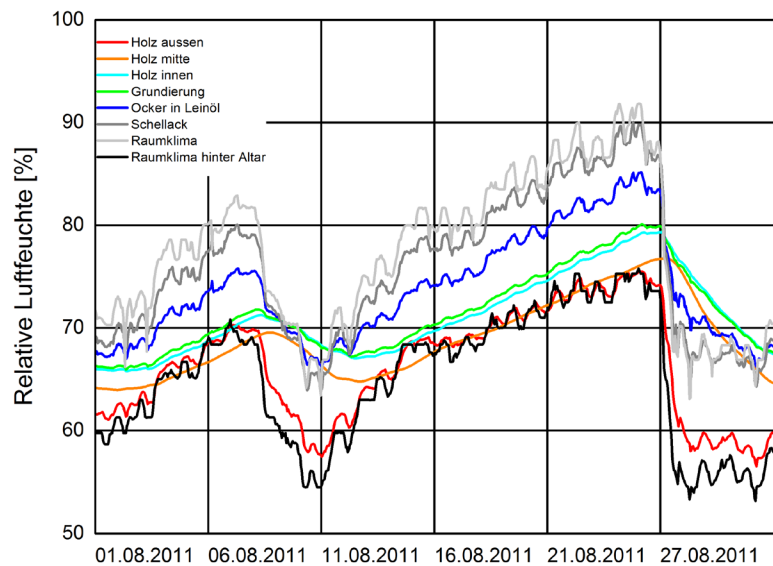


Abbildung 6.60: Detaildarstellung der Feuchteverläufe von gefasstem Holz für den Sommer (1.8. – 1.9.2011).

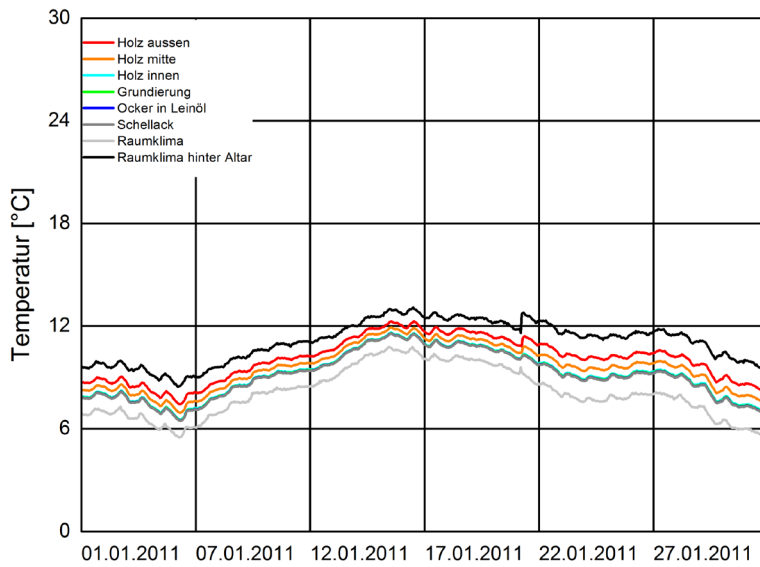


Abbildung 6.61:
Detaildarstellung der Temperaturverläufe von gefasstem Holz für den Winter (1.1. – 1.2.2011).

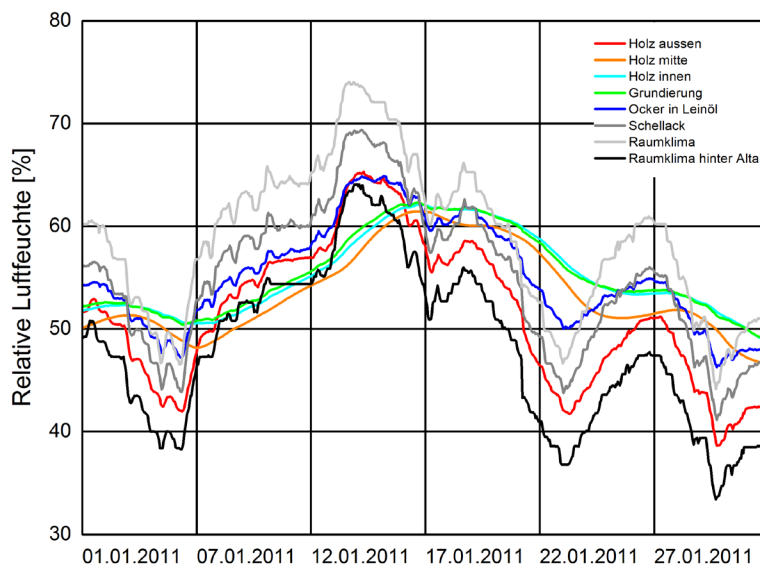


Abbildung 6.62:
Detaildarstellung der Feuchteverläufe von gefasstem Holz für den Winter (1.1. – 1.2.2011).

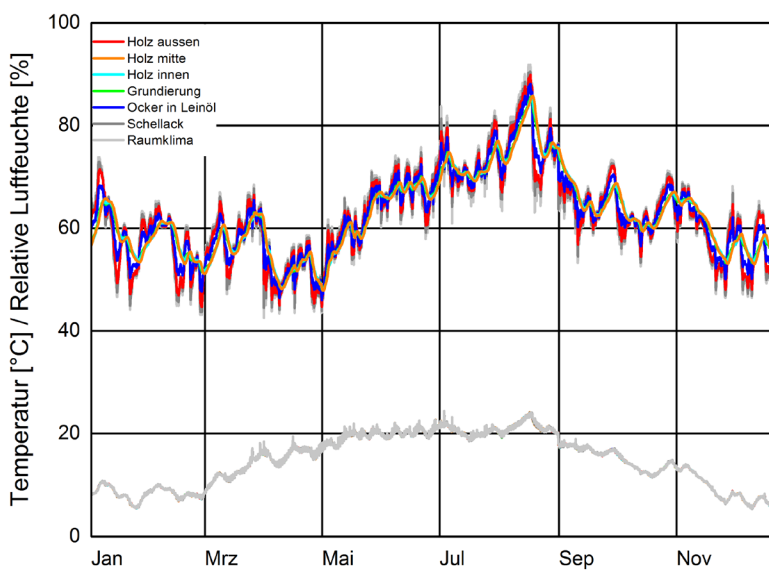


Abbildung 6.63:
Jahresübersicht der Temperatur- und Feuchteverläufe von gefasstem Holz, das beidseitig dem Innenraumklima ausgesetzt ist (1.1. – 1.2.2011).

Luftfeuchte des Innenraumklimas an, während das Holz, insbesondere die Außenseite, an das durch die Heizleitungen erzeugte Mikroklima angeglichen ist (Abbildung 6.60, 6.62). Für den gesamten Zeitraum liegt für Schellack ein Maximum von 90 % und ein Minimum von 40 % rF, also eine Spanne von 50 % rF vor. Die Feuchteunterschiede zwischen den Fassungsschichten liegen bei ca. 7,5 %. Innerhalb des Holzes ist die maximale Differenz 17 %. Unterschiede über 10 % liegen während der Wintermonate konstant und vereinzelt auch im Sommer vor, so dass anhand der Simulation ein Schadensrisiko bestätigt wird (Abbildung 6.60, 6.62). Aufgrund der Heizleitung ergibt sich im Materialgefüge eine gesamte Temperaturdifferenz von 1,3 K. Innerhalb des Holzes liegt ein Unterschied von 1,2 K vor, welcher während der Wintermonate konstant vorhanden ist (Abbildung 6.61).

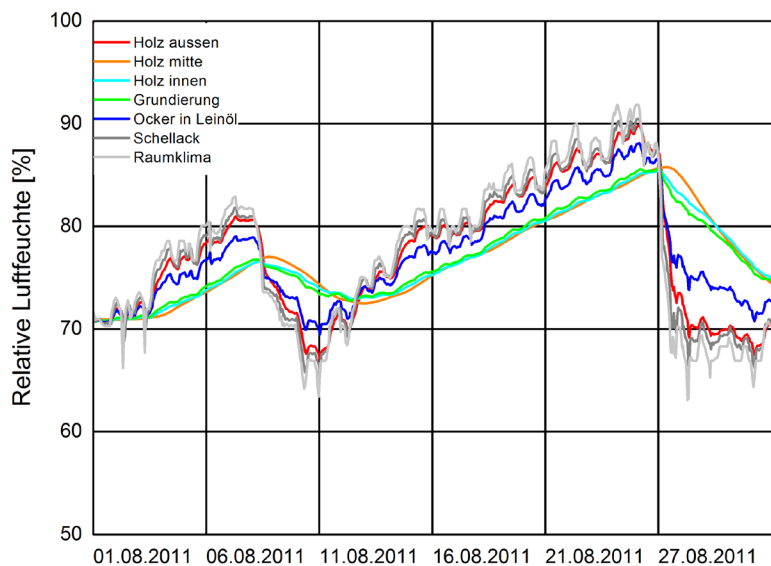


Abbildung 6.64: Detaildarstellung der Feuchteverläufe von gefasstem Holz im Sommer (1.8. – 1.9.2011).

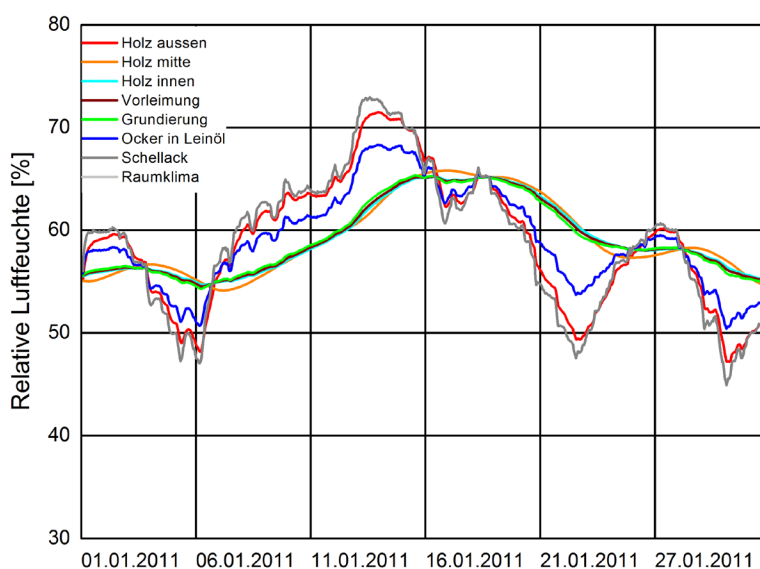


Abbildung 6.65: Detaildarstellung der Feuchteverläufe von gefasstem Holz im Winter (1.1. – 1.2.2011).

Variante 2 – Seitenaltar in Raummitte

In Abbildung 6.63 sind die Temperatur- und Feuchteverläufe beider Materialverbände mit beidseitig gleichem Klima in der Jahresübersicht dargestellt. Im Detail sind die Feuchteverläufe in 6.65 (Winter) und 6.66 (Sommer) abgebildet. Die Differenzen zwischen den einzelnen Schichten sind nun geringer: Die maximale Abweichung von 6,9 % zwischen Schellack und Malschicht tritt am 23.1. auf (Abbildung 6.64). Innerhalb des Holzes liegt nur noch an einigen Tagen ein Feuchteunterschied von 10 % vor. Im Vergleich zur Variante 1 steigt das Feuchteniveau des gesamten Materialverbunds jedoch um ca. 5 %. Das Maximum der relativen Luftfeuchte in der Grundierung liegt nun bei 85 % rF. Die Temperaturverteilung im Gefüge entspricht der des Innenraums. Es liegen hier also keine Temperaturgradienten mehr vor (Abbildung Anhang D 5 / D 6).

Stünden die Seitenaltäre in Raummitte, wäre zwar das Risiko, das sich durch die Wandheizung ergibt, reduziert. Trotzdem ist das Raumklima sehr feucht und liegt selbst nach ASHRAE D im Risikobereich. Der alleinige Platzwechsel verringert somit das Schadensrisiko, dennoch bleibt es weiterhin bestehen. Eine geregelte Entfeuchtung in den Sommermonaten könnte Abhilfe schaffen.

Anhand der Simulationen konnte die in 4.4 formulierte These, dass sich die Erhaltung der Ausstattung, die unmittelbar neben den Heizleitungen steht, verschlechtert hat, nachvollzogen werden. Der hohe Temperaturgradient zwischen Vorder- und Rückseite der gefassten Holzoberflächen führt zu hohen Differenzen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Gefüge. Den Standort der Seitenaltäre zu ändern, würde das Schadensrisiko nur geringfügig vermindern bzw. das Risiko aufgrund der hohen relativen Luftfeuchte bliebe nach wie vor unverändert.

Seit 2014 wird die Temperierung nach der relativen Luftfeuchte geregelt. Die Heizwirkung hinter den Altären wird durch eine an der Wand montierte Metallfolie reduziert. Die Auswirkungen dieser Maßnahmen wurden jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht überprüft.

6.4 Ergebnisse

Anhand der unterschiedlichen Materialbeispiele und Szenarien konnte gezeigt werden, dass die Möglichkeit der Darstellung von Temperatur und Feuchteverteilung im Materialverbund von Kunstwerken mit der hygrothermischen Simulation hilfreich für das Verständnis der Vorgänge im Material ist. Wie individuell unterschiedliche Materialkombinationen auf dieselbe klimatische Schwankung reagieren, ist damit nachvollziehbar.

Leinwandgemälde

Aufgrund ihrer Materialbeschaffenheit reagieren die Rückseiten von Leinwandgemälden bei Feuchteschwankungen stark mit. Dies konnte anhand der unterschiedlichen Reaktionen mit und ohne abgedichteter Rückseite dargelegt werden (Abbildungen 6.1 – 6.8). Die Reaktion auf klimatische Schwankungen wirkt dort beidseitig. Wegen der geringen Schichtdicken des Materialgefüges können insbesondere bei Leinwandgemälden die Materialeigenschaften von Malschicht und Firnis einen sehr starken Einfluss auf das Verhalten des gesamten Verbunds haben.

Der Vergleich von unterschiedlichen Farbmitteln führte in der Simulation zu keinem signifikanten Unterschied. Hinsichtlich der Reaktion des Schichtenverbunds auf klimatische Schwankungen hat in der hygrothermischen Betrachtung die Wahl des Bindemittels einen starken Einfluss. Bei diffusionshemmenden Malschichten beein-

flusst die Schichtdicke den Feuchteverlauf: Je größer diese ist, desto höher ist die Feuchtedifferenz im gesamten Gefüge. Die starke Reaktion des gesamten Verbunds auf klimatische Schwankungen mit nur geringen Feuchteunterschieden zwischen den Schichten birgt wohl ebenfalls ein Schadenspotential.

Die Variantenberechnungen mit Spann- und Zierrahmen haben außerdem gezeigt, welche konstruktionsbedingten Mikroklimata innerhalb eines Leinwandgemäldes vorherrschen. Die durch Spann- oder Zierrahmen verdeckte Leinwand ist wesentlich geringeren klimatischen Schwankungen ausgesetzt (Abbildung 6.11) und damit häufig besser erhalten. Die puffernde Wirkung der Verglasung wird in Abbildung 6.13 sichtbar. Hier zeigt sich, dass die alleinige Anbringung einer Glasscheibe an der Front nicht zwangsläufig zu geringeren Schwankungen am Gemälde führen muss. Erst die Kombination mit einem Rückseitenschutz, etwa einer Holzplatte, führt zur Verminderung der Schwankungen des Materialverbunds.

Das Fallbeispiel Malerei auf Pappe liefert ähnliche Erkenntnisse. Der Materialverbund ist noch durchlässiger als das Gemälde und reagiert somit schneller und stärker auf klimatische Schwankungen (Abbildung 6.14).

Gefasste und vergoldete Holzoberflächen

Bei der Simulation unterschiedlich gefasster Hölzer konnte in der Reaktion auf die klimatischen Schwankungen zwischen diffusionsoffener und -hemmender Fassung kein Unterschied festgestellt werden. Dies ist wohl mit den im Vergleich zum Trägermaterial geringen Schichtdicken zu begründen. Auch der Vergleich von Laub- und Nadelholz ergab keine wesentlichen Unterschiede. Vielmehr hat die Schnittrichtung des Holzes den größten Einfluss hinsichtlich der Reaktion auf klimatische Schwankungen. Die Simulationen mit abgedichteter Rückseite veranschaulichen, dass die Reaktion des Fassungsverbunds wie beim Leinwandgemälde überwiegend von der Vorderseite ausgeht, das Trägermaterial diese aber durch Schichtstärke und Materialität beeinflusst.

Ein Vergleich der beiden unterschiedlichen Trägermaterialien Holz und Leinwand ergab hingegen deutliche Unterschiede bei der Reaktion auf Feuchteschwankungen. Dies zeigt erneut, wie wichtig die Betrachtung des Materialverbunds bei der Aussage hinsichtlich der Empfindlichkeit von Objekten ist.

Erkenntnis aus der Simulation von Laborversuchen

Nach dem bisherigen Verständnis der hygrothermischen Reaktionen ist neben der Stärke mit der ein Verbund auf klimatische Schwankungen reagiert insbesondere eine hohe Feuchtedifferenz im Materialgefüge ungünstig. Letztere bedingt ein unterschiedliches Quellen / Schrumpfen innerhalb der einzelnen Schichten und trägt somit vermehrt zu Spannungen im Verbund bei. Die Kopplung der Laborversuche mit der hygrothermischen Simulation an zwei Fallbeispielen führte zur These, dass Differenzen über 5 % zwischen zwei Schichten im Materialverbund und innerhalb von Holz bei einer Stärke über 5 mm Schäden in Form von Schichtenablösungen verursachen können. Diese wurde für die Auswertung der simulierten Fallbeispiele berücksichtigt.

Vergleich Außenwand / Innenwand – Schloss Linderhof

Am Beispiel der Ausstattung von Schloss Linderhof wurden die Auswirkungen des Raumklimas auf ein Leinwandgemälde an der Außenwand mit dem an einer Innenwand verglichen. Die restauratorischen Untersuchungen haben gezeigt, dass Leinwandgemälde, die an der Außenwand hängen, schlechter erhalten sind, als die Supraportengemälde. Die Simulation beider Szenarien führte zu einem analogen Ergebnis: Die Feuchteschwankungen, denen die Leinwandgemälde an der Außenwand ausgesetzt sind, sind wesentlich höher als die der Supraportengemälde. Auch die Feuchtedifferenzen im Gefüge sind bei den Gemälden an der Außenwand höher. Die gefassten und vergoldeten Holzoberflächen zeigen insgesamt eine geringe Reaktion auf die klimatischen Schwankungen. Sie weisen jedoch auch in den Simulationen mit einer Lüftungsanlage Schwankungen im Verbund auf (Abbildungen 6.37 bis 6.48). Anhand des Vergleichs der Ausstattung mit und ohne Lüftungsanlage konnte die klimatische Veränderung, die durch die Anlage entstehen wird, in erster Näherung abgeschätzt werden. Allerdings ist fraglich, inwieweit das für das Paradeschlafzimmer simulierte Innenraumklima auf die angrenzenden Räume übertragbar ist. Dies ist jedoch nur praktisch überprüfbar.

Das Szenario Kunstwerke an der Außenwand hat außerdem gezeigt, dass für die Interpretation der Ergebnisse eine ausreichende Grundlage an Klimadaten notwendig ist. Für den Vergleich Kunstwerk an der Außenwand und im Innenraum wurde das in Raummitte gemessene Klima verwendet. Tatsächlich wird sich das Mikroklima an den Gemälden an der Außenwand anders darstellen. Daher kann derzeit auf die Frage, inwieweit die Lüftungsanlage auch die Ausstattung nahe den Außenwänden verbessert, nur eine vorläufige Aussage getroffen werden. Da durch die Lüftungsanlage die Temperatur nicht verändert werden soll, bleibt die Temperaturdifferenz, die hinter dem Objekt zu Mikroklima führt, weiterhin bestehen.

Kunstwerk frei im Raum stehend – Hochaltar in St. Margaretha

Mit der Fallstudie des Hochaltars wurde gezeigt, dass ungünstige klimatische Bedingungen auch bei als stabil gegenüber kurzfristigen Schwankungen angesehenen Materialverbänden, wie gefassten und vergoldeten Holzoberflächen, die darüber hinaus frei im Raum platziert sind, tatsächlich ein deutliches Schadenspotential haben (Abbildung 6.54 bis 6.57). Unabhängig von der Position im Raum ist die Feuchtedifferenz, die sich aufgrund des Raumklimas innerhalb des Verbunds des Kunstwerks einstellt, der Auslöser für Spannungen im Gefüge, die zu Lockerungen und Schichtenablösungen führen. Aber auch das hohe Feuchteniveau ist hier als schädigender Faktor zu sehen.

Seitenaltar vor temperierter Wand

Anhand des Szenarios der Renatuskapelle wurde durch die Simulation die Auswirkung von lokaler Beheizung auf den gefassten Seitenaltar veranschaulicht. Aufgrund der Heizleitungen, die zwar unter Putz, jedoch direkt neben den Seitenaltären verlaufen, entstand hinter diesen ein Mikroklima, das zu beachtlichen Temperatur- und Feuchtedifferenzen im Materialgefüge führte (Abbildung 6.60, 6.62). Die Untersuchung der Erhaltung ergab ebenfalls Lockerungen und Substanzverluste der Farbfassung (vgl. 4.4). Weiter konnte gezeigt werden, dass eine Positionsänderung in Richtung Raummitte die Differenzen von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Gefüge mindern würde, dann jedoch das Feuchteniveau im betrachteten Zeitraum insgesamt zu hoch wäre (Abbildungen 6.54 – 6.56).

Festzuhalten ist, dass sich bei einer Feuchteschwankung die Höhe der Amplitude unmittelbar auf die Reaktion im Material auswirkt, da der Materialverbund – abhängig vom Trägermaterial – vor allem von der Vorderseite

her reagiert. Je höher also die Amplitude, umso höher ist der Feuchtetransport ins Gefüge. Es existieren daher keine superkurzfristigen Schwankungen, die sich auf das Gefüge aufgrund seiner materiellen Beschaffenheit und der zeitlichen Beschränkung nicht auswirken. Sie können höchstens so gering sein oder nur so kurz andauern, dass der Materialverbund anschließend wieder in den Gleichgewichtszustand zurückkehrt. Craqueléebildung im Firnis ist ein gutes Beispiel für die Reaktion der Oberfläche auf klimatische Schwankungen (vgl. 3.1.2). Michalskis Annahme, eine kurzfristige Schwankung sei zu kurz, um das Kunstwerk zu beeinflussen kann sich daher nur auf die Schichtmitte eines diffusionshemmenden Materialverbunds, wie hier mit Holz angenommen, beziehen (vgl. mittlere Schichten von Holz, z. B. Abbildung 6.44, 6.47). Was die Reaktion auf eine Schwankung verlangsamen kann, ist die Diffusionseigenschaft des Materialverbunds selbst.

Die These, dass Differenzen der relativen Luftfeuchte innerhalb des Materialverbunds, die häufiger über 5 % hinaus gehen und zusätzlich länger als sechs Stunden anhalten, als potentiell schädigend eingeschätzt werden, konnte anhand der Simulationen der Fallstudien bestätigt werden. Es zeigte sich aber auch, dass die Differenzen im Gefüge nicht die alleinige Schadensquelle sind, sondern die absolute Feuchtedifferenz, der ein Kunstwerk unterliegt, ebenfalls berücksichtigt werden muss.

Grundsätzlich kann das Hilfsmittel der Simulation dazu dienen, bestimmte vorgefundene Phänomene an Kunstobjekten, wie auch Vermutungen zu klimatischen Situationen zu untermauern. Variationen zum realen Aufbau, etwa ein alternativer Aufstellungsort im Raum (6.3.3) oder die Auswirkung von Verglasung oder eines Rückseitenschutzes können ebenfalls mit vergleichsweise geringem Aufwand getestet werden. Mit Hilfe der Simulation können lediglich mögliche Risiken bzw. Tendenzen abgebildet werden. Insgesamt stellt jedoch die Ableitung von Schadensrisiken anhand von simulierten Temperatur- und Feuchtverläufen im Materialverbund von Kunstwerken einen interessanten Ansatz dar. Aufgrund der noch fehlenden Datengrundlage bergen die Prognosen noch ein gewisses Risiko und müssen durch restauratorische Untersuchungen mit dem realen Erhaltungszustand abgeglichen werden. Tatsächlich auftretende Schäden zu simulieren ist mittels hygrothermischer Simulation derzeit noch nicht möglich, da dazu die Spannungen, die sich aus den Feuchtedifferenzen im Verbund ergeben, bekannt sein müssen. Werden jedoch weitere Phänomene berücksichtigt, etwa dass Leim oberhalb von 80 % rF seine Klebkraft verliert, liefern die Daten aus der Simulation wertvolle Hinweise auf Schadenspotentiale.

Was die Eigenschaften der Schichten betrifft, konnten bisher nur einzelne Materialkennndaten ermittelt werden. Für eine genauere Unterscheidung der Auswirkung von Farb- und Bindemittelsystemen und zur Bewertung des Einflusses des Schichtenverbunds selbst, sind weitere Kennndaten erforderlich. Auch der Einfluss der Luftwechselrate muss weiter untersucht werden.

7 Beurteilung der angewandten Methoden hinsichtlich der Erkenntnis zur klimatisch bedingten Schädigung von Kunstwerken

Die Ergebnisse aus den Laborversuchen, den restauratorischen Zustandsuntersuchungen und der hygrothermischen Simulation sind im Folgenden zusammengefasst und die angewandten Methoden hinsichtlich ihrer Eignung zur Beurteilung der Auswirkung von kurzfristigen klimatischen Schwankungen bewertet. Wie Abbildung 1.3 zeigt, sind die einzelnen Methoden inhaltlich miteinander verknüpft. Daher werden die Erkenntnisse aus der jeweiligen Methode separat beschrieben, bevor auf die gesamte Herangehensweise eingegangen wird.

7.1 Beurteilung der Laborversuche

Für die Untersuchung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke wurden Dummies und gealterte Kunstwerke im Klimaschrank definierten Schwankungen der relativen Luftfeuchte ausgesetzt. Die Reaktion der Objekte auf die geänderten klimatischen Bedingungen wurde optisch und mit Hilfe von Wägeversuchen untersucht. Die ausgewählten Feuchtezyklen zielten zum einen darauf ab, Klimavorgaben zu untersuchen, zum anderen, um realistische klimatische Bedingungen in historischen Gebäuden nachzustellen. Der Klimakammerzyklus wurde aus den gemessenen Klimadaten der Fallstudien abgeleitet und geringfügig modifiziert, indem die Dauer der Schwankungen auf sechs Stunden ausgedehnt wurde. Durch den längeren Zeitraum, den die Schwankung auf den Materialverbund einwirkt, wird eine stärkere Bewegung verursacht und somit das Schadenspotential erhöht.

Durch die mikroskopische Untersuchung der Testobjekte vor und nach den Schwankungszyklen im Klimaschrank war nachweisbar, dass wenige Zyklen kurzfristiger (sechsstündig) klimatischer Schwankungen von $\pm 20\%$ (Ausgangsklima 60 % relative Luftfeuchte) ausreichen, um an fünf Jahre alten, farbig gefassten Holzoberflächen sowie vorgeschädigten Kunstwerken sichtbare Veränderungen hervorzurufen. Die Art der produzierten Schäden variierte allerdings. An den Testobjekten wurden Craqueléebildung im Firnis sowie Malschichtablösung festgestellt. An bereits gelockertem Malschichtverbund bewirkten die Schwankungszyklen eine Verstärkung der Schädigung.

Weiter konnte aufgezeigt werden, dass das „proofed fluctuation“-Konzept (vgl. 2.3.3) im ursprünglichen Sinn nicht funktioniert, da sich an Objekten, die wiederholt denselben Schwankungen unterlagen, erst bei mehrmaliger Wiederholung derselben Zyklen Schäden einstellten. Inwieweit hier der yield point erreicht bzw. überschritten wurde, konnte nicht festgestellt werden. Es ist jedoch davon auszugehen, dass die mehrmalige

Wiederholung desselben Zyklus zu einer Materialermüdung führt, die wiederum die Grenze des elastischen Bereichs herabsetzt. In der Materialprüfung werden die mechanischen Tests üblicherweise unter konstanten Klimabedingungen ausgeführt, also die Auswirkung von klimatischen Schwankungen nicht berücksichtigt. Dies sollte jedoch in Betracht gezogen werden, wenn beim Materialverbund von Kunstwerken aus mechanischen Messungen Klimavorgaben abgeleitet werden (vgl. 2.1.2).

Die Erfassung der Gewichtsänderung eines Kunstwerkes mit dem Ziel, die Sensibilität gegenüber klimatischen Änderungen zu verfolgen, ist ein vielversprechender Ansatz. Die Versuche veranschaulichen, wie unterschiedlich scheinbar gleiche Materialverbünde auf klimatische Schwankungen reagieren können. Es kommt auf die Schichtstärke und die Diffusionseigenschaften der einzelnen – insbesondere der äußeren – Schichten an, wie stark ein Kunstwerk auf Feuchteschwankungen reagiert. Welche Schwankungen, also welche Amplituden und Zeiträume gerade noch nicht schädlich sind, ist von den verwendeten Materialien abhängig. Ebenso wirken sich die Geschichte des Objektes, seine Herstellungstechnik und seine Vorschädigungen / Restaurierungen aus. Somit ist bei der Beurteilung von klimatischen Schwankungen immer der individuelle Zustand eines Objektes zu berücksichtigen. Der Abgleich zu den optischen Untersuchungen ergab, dass sich klimatische Schwankungen erst nach ca. 60 Minuten abzeichnen. Dies ist wiederum materialabhängig und bedarf weiterer Untersuchungen.

Wegen der geringen Anzahl und der unterschiedlichen Materialverbünde der Testobjekte konnte mit den Messungen im Labor keine statistische Bewertung erfolgen. Es ist daher nicht möglich abzuleiten, bei welchen Amplituden und Frequenzen es generell zu optisch sichtbaren Veränderungen kommt. Dies ist auch stark abhängig vom Materialverbund und seinen feuchttechnischen Eigenschaften. Je hygroskopischer ein Material ist, desto stärker ist die Reaktion gegenüber klimatischen Schwankungen, die wiederum in der Gewichtsänderung sichtbar wird.

Die Laborversuche dienten der Untermauerung, dass es vom individuellen Materialverbund abhängt, wie stark ein Kunstwerk auf klimatische Schwankungen reagiert. Sie bestätigten die Erkenntnisse aus den restauratorischen Zustandsuntersuchungen bzgl. der unterschiedlichen Reaktion auf klimatische Schwankungen und beeinflussten diese Arbeit in Bezug auf die Auswahl der Simulationsversuche. Sie bildeten das Bindeglied zwischen den restauratorischen Untersuchungen und der hygrothermischen Simulation.

7.2 Beurteilung der restauratorischen Zustandsuntersuchungen

Über einen Zeitraum von ca. drei Jahren wurde die historische Ausstattung in vier Fallstudien hinsichtlich klimatisch bedingter Veränderungen kontinuierlich untersucht. In die Zustandsbeurteilung floss die Analyse des Raumklimas ein. Diese beinhaltete die Erhebung der Daten von Temperatur und relativer Luftfeuchte, deren Auswertung sowie den Abgleich von durch Schadfunktionen prognostizierten Schäden mit der realen Situation.

Die Untersuchung der Oberflächen erfolgte überwiegend optisch. Der Einsatz von Hilfsmitteln, wie dem 3D-Mikroskop in der Fallstudie Roggersdorf (Kapitel 4.3), machte die Bewegung im Materialverbund aufgrund von klimatischen Schwankungen messbar. Es trug so zu einem besseren Verständnis für die direkte Auswirkung unterschiedlicher Frequenzen und Amplituden bei Feuchteschwankungen bei.

Rein klimatisch bedingte Schäden an Kunstwerken zu identifizieren und diese von anderen Ursachen, wie der Abnutzung durch Besucher, abzugrenzen, stellt eine Herausforderung dar. Häufig sind Schäden eine Kom-

bination mehrerer Ursachen, die u. U. einander bedingen oder sogar katalysieren. Der Eintrag von Feuchte durch ein undichtes Dach beispielsweise kann der Auslöser für Lockerungen im Materialgefüge sein, klimatische Schwankungen bewirken dann die Fortsetzung des Schadens.

Da klimatische Schwankungen immer vorliegen und die Schädigung von Kunstwerken ein kumulativer Prozess ist, ist erst die regelmäßige Überprüfung des Zustands der Objekte über einen längeren Zeitraum zielführend. Die Untersuchungen vor Ort haben verdeutlicht, dass es sehr darauf ankommt, wo im Raum sich ein Kunstwerk befindet. Das Mikroklima – etwa an ungedämmten Außenwänden – kann sich, wiederum abhängig vom Materialverbund, ungünstig auf die Erhaltung auswirken. Zudem müssen für die Beurteilung der klimatischen Situation vor Ort weitere Faktoren wie Licht, Schadstoffe oder Besucher berücksichtigt werden, da diese ebenfalls das Raumklima beeinflussen.

Mit der Auswertung der erhobenen Klimadaten der vier Fallstudien erfolgte im Abgleich mit der restauratorischen Untersuchung eine Prüfung der Schadprognosen nach Martens. Diese ergab, dass vor allem die Prognosen, die zur mechanischen Schädigung von Tafelgemälden und Skulpturen (Trägermaterial und Malschicht) gegeben werden, nur in der Hälfte der Fälle zutreffen. Damit sind sie für konkrete Einschätzungen, die Kunstwerke betreffend, nicht verwendbar.

Die restauratorischen Untersuchungen waren erforderlich, um Erfahrung mit tatsächlich rein klimatisch bedingten Schadensphänomenen zu sammeln. Anhand der vor Ort erhobenen und ausgewerteten Klimadaten wurden die Schwankungszyklen für die Klimakammerversuche entwickelt. Der Einfluss des Mikroklimas auf die Ausstattung, die bei den restauratorischen Untersuchungen zentrale Fragen aufwarf, wurde an ausgewählten Szenarien mit WUFI Pro® simuliert.

7.3 Beurteilung der hygrothermischen Simulation von Kunstwerken

Für die Beurteilung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf den Materialverbund von Kunstwerken ist es wichtig zu verfolgen, wie und in welchem Zeitraum sich diese auf das gesamte Materialgefüge auswirken. Durch die geringen Schichtstärken im Materialverbund von Kunstwerken ist es nur schwer möglich, die Temperatur- und Feuchteverläufe im Gefüge messtechnisch zu erfassen. Um diese Vorgänge im Material dennoch aufzuzeigen, stellt die hygrothermische Simulation ein hilfreiches Werkzeug dar. Auch die Wirkung von präventiven Maßnahmen, wie ein Rückseitenschutz am Leinwandgemälde oder der veränderte Abstand zur Außenwand können damit beurteilt werden.

Zunächst war es notwendig, die erforderliche Datengrundlage zu schaffen. Der Einsatz der neu ermittelten Materialien und -verbünde in WUFI® erforderte, besonders wegen der geringen Schichtstärken, einen Abgleich mit der Realität. Die Validierung erfolgte anhand des Vergleichs der gemessenen und simulierten Daten für Temperatur und relative Luftfeuchte vor und hinter einem Leinwandgemälde, das in unterschiedlichen Abständen zur ungedämmten Außenwand montiert ist (Kapitel 5.3).

Mit dem Werkzeug der Simulation konnte nachvollzogen werden, dass, wie anhand der Laborversuche gezeigt, speziell bei den Verbänden mit geringer Schichtstärke, gerade die Oberflächeneigenschaften die Reaktion eines Kunstwerks auf kurzfristige Schwankungen im Gefüge maßgeblich prägen. Dies wurde mit einer Reihe von unterschiedlichen Materialverbänden (Leinwandgemälde, Malerei auf Pappe, gefasste und vergoldete Holzoberflächen), die derselben klimatischen Schwankung ausgesetzt waren, anschaulich belegt (Kapitel 6.1).

Aus den Versuchen zeichneten sich zwei Phänomene ab: Entweder reagierte der gesamte Verbund stark auf die veränderte klimatische Bedingung (Leinwandgemälde, Malerei auf Pappe), oder nur eine Schicht des Verbunds (Firnisschicht und / oder Malschicht bei gefassten Holzoberflächen) sprach an. Letzteres führte häufig zu starken Feuchtedifferenzen im Materialverbund. Beide Reaktionen können Schäden an den Objekten hervorrufen, doch ist die Form des Schadens unterschiedlich. So ist vorstellbar, dass sich Leinwandgemälde durch die gesamte Reaktion des Verbunds eher verwellen, während die Feuchtedifferenzen zwischen den Schichten eher eine Lockerung oder Schichtenablösung bewirken werden.

Bei der Auswertung der Simulation der Fallstudien wurden die Gradienten zwischen den Schichten betrachtet. Aufgestellt wurde die These, dass Feuchteunterschiede zwischen zwei Schichten des Verbunds über 5 % ein erstes Schadensrisiko darstellen. Liegen innerhalb des Trägermaterials Holz (ab einer Stärke von 5 mm) Differenzen der relativen Luftfeuchte von 5 % vor, so ist auch hier ein Schadenspotential gegeben. Dauert der Feuchteunterschied im Gefüge länger als fünf Stunden an, erhöht sich das Schadenspotential weiter. Hintergrund für diesen Ansatz war, dass Differenzen der relativen Luftfeuchte im Materialgefüge Spannungen verursachen. Er wurde auf die Szenarien angewandt und mit den Erkenntnissen aus den Untersuchungen vor Ort abgeglichen. Ergebnis war, dass die alleinige Analyse der Feuchtedifferenzen im Verbund oder einer stärkeren Trägerschicht für die Beurteilung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen nicht ausreicht. Insbesondere der Hochaltar der Fallstudie Roggersdorf, der hohen kurzfristigen Schwankungen unterliegt und Schäden aufweist, zeigte im Verbund nur geringe Differenzen der relativen Luftfeuchte. Im Umkehrschluß heißt dies, dass sich ein hohes Feuchteniveau bei klimatischen Schwankung auf das gesamte Kunstwerk auswirkt und für die Beurteilung berücksichtigt werden muss.

Der Einsatz der hygrothermischen Simulationen hat Vorteile. Jede Simulation bildet jedoch nur begrenzt die Realität ab und bedarf der sorgfältigen Interpretation. Fehler können bei der Eingabe der Anfangsparameter auftreten, durch vereinfachte Annahmen, etwa die Reduzierung auf eine monochrome Farbschicht oder das Adaptieren von Schichtdicken. Auch die Bestimmung der für die Simulation notwendigen Parameter stellt einen Unsicherheitsfaktor dar. So kann es zu einem unterschiedlichen Ergebnis führen, wenn ein Materialverbund mit in einzelnen Schichten oder im Verbund gemessenen Daten eingegeben wird, obwohl dies rein physikalisch nicht sein dürfte (Kapitel 5.3, Anhang A). Jedoch können die einzelnen Schichten miteinander reagieren (chemische Reaktionen mit Substraten) und so das Feuchteverhalten des Materials beeinflussen. Dies wurde durch den Vergleich von einzeln und im Verbund gemessenen Schichten gezeigt (Kapitel 6.1.3). Da jedoch die Ermittlung der Materialkennwerte nicht zerstörungsfrei ist, muss für die Beurteilung des individuellen Kunstwerks eine Annahme getroffen werden. Je nach Fragestellung, also ob es notwendig ist, die Temperatur- und Feuchteverteilung in jeder Schicht ablesen zu können, oder ob hier eine Vereinfachung ausreicht, muss der Materialverbund für die Simulation individuell zusammen gestellt werden.

Die Simulationen der Fallstudien, insbesondere der Vergleich zwischen Außenwand und Innenraum in Schloss Linderhof haben gezeigt, dass (Mikro)Klimadaten vorhanden sein müssen. Für eine realistischere Aussage der Feuchteverteilung im Gemälde an der Außenwand wäre als Eingabe das Nahfeldklima notwendig gewesen.

Eine technische Einschränkung ist bei der Simulation von sehr dünnen Schichten wie vergoldeten Holzoberflächen systembedingt. Ein vergoldetes Holzpanel allein ist beispielsweise über einen längeren Zeitraum nicht simulierbar. Hier ist der Materialverbund zusammen mit der Position im Raum einzugeben.

Weiter erfolgt durch die eindimensionale Berechnung von Wufi®Pro eine Vereinfachung, die bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden muss. Für die Simulation eines Leinwandgemäldes an der Wand bedeckt dieses beispielsweise die gesamte Wandoberfläche. Dadurch wird in der Simulation eine Situation geschaffen, die in der Realität so nicht gegeben ist. Der Einfluss der seitlichen Strömung zwischen Wand und Gemälde wird hier nicht berücksichtigt. Durch die vereinfachte Flächendarstellung im Querschnitt ist für die Betrachtung des textilen Bildträgers hinter dem Spannrahmen ein gesonderter Simulationslauf anzunehmen (Abbildung 6.9).

7.4 Beurteilung der entwickelten Vorgehensweise

Wie aus der Literatur hervor geht, sind die Erkenntnisse über die Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke, die anhand von Laborversuchen und Simulationen gewonnen werden, hilfreich (vgl. Kapitel 2). Erst mit diesen Methoden ist es möglich, „ins Kunstwerk“ hinein zu schauen und die physikalischen Vorgänge zu verstehen und zu veranschaulichen. Versuche und Simulationen stellen jedoch immer eine Vereinfachung dar und bilden damit – auch mit „worst case“ Szenarios – nicht die Realität ab. Daher wurde in dieser Arbeit für eine realistischere Bewertung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke die restauratorische Zustandsuntersuchung um Simulationen und Laborversuche ergänzt. Die einzelnen Methoden waren miteinander vernetzt und ergänzten sich gegenseitig.

Auf diese Weise wurde das Thema von mehreren Seiten beleuchtet und die eingangs formulierten Fragen konnten beantwortet werden. Dieser Ansatz ist somit als gut und zielführend zu beurteilen.

Die wichtigsten Erkenntnisse sind, dass die hygrothermische Simulation für die Untersuchung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke ein wichtiges Werkzeug darstellt, auch wenn die Interpretation der Daten noch Rätsel aufgibt. Für verlässliche Aussagen erweist es sich als zielführend, in die Durchführung und Interpretation der Simulation die Erkenntnisse der restauratorischen Untersuchung einzubeziehen. Andernfalls kann es zu Fehlinterpretationen kommen.

Für die Beurteilung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke ist es unerlässlich, dieses individuell zu betrachten, da die jeweiligen sorptiven Eigenschaften maßgeblich für die Reaktion auf die klimatische Umgebung sind. Ebenso beeinflusst der Zustand des Kunstwerks die Empfindlichkeit gegenüber klimatischen Schwankungen.

Im Sinne der Präventiven Konservierung muss bei jeglicher Handlung im historischen Umfeld ganzheitlich gedacht werden. Damit ist gemeint, dass nicht nur das einzelne Objekt betrachtet werden sollte, sondern dass die unmittelbare Umgebung (Mikroklima), der Raum und das ganze Gebäude zusammenspielen. Umgekehrt führt eine kleine Änderung des Systems (z. B. der Einbau einer Temperierung) zur Veränderung der gesamten klimatischen Situation. Dies ist bestenfalls gewünscht und kontrollierbar. Dennoch sollten, um spätere Schäden auszuschließen, vor einer solchen Entscheidung sämtliche denkbaren Auswirkungen und Konsequenzen erwogen werden.

Die Fallstudien „Schloss Linderhof“ und „Königshaus am Schachen“ boten wegen ihrer originalen wandfesten Raumausstattungen den Idealfall zur langfristigen Beurteilung der Auswirkung von klimatischen Schwankungen. Zusätzlich sind sich die beiden Ausstattungen durch denselben Auftraggeber und Fertigungszeitraum um 1870, kunsttechnologisch gesehen ähnlich. Dies erlaubte einen Vergleich der beiden Raumklimata und der Erhaltung der beiden Ausstattungen miteinander.

Aufnahmen der Ausstattung in Schloss Linderhof von 1992 ermöglichten, klimatisch bedingte Veränderungen an der Ausstattung über die letzten 20 Jahre nachzuvollziehen. Die Zustandsuntersuchung, die an einer Vielzahl unterschiedlicher Objekten durchgeführt wurde ergab, dass die Position im Raum eine wichtige Rolle für die langfristige Erhaltung spielt. Die Untersuchungen im Königshaus am Schachen zeigten auf, dass durch eine dem Standort angepasste Bauweise (Haus-in-Haus-Konstruktion) und den Einsatz von sorptiven Materialien als Innenausstattung auch an einem klimatisch ungünstigen Ort (in den Alpen, auf 1850 m) ein stabiles Raumklima zu erzielen ist.

Oft ist es schwierig, vorgefundene, klimatisch bedingte Schäden an Kunstwerken zeitlich einzuordnen, da entweder die Klimageschichte nicht ausreichend bekannt ist, oder der beobachtete Schaden vor Jahrzehnten entstand. Mit der Simulation des Hochaltars in Roggersdorf war es möglich nachzuvollziehen, wie an intakten Oberflächen über einen Zeitraum von ca. fünf Jahren Schäden – Lockerungen und Substanzverlust an gefassten Holzoberflächen – aufgrund von ungünstigen klimatischen Bedingungen auftraten. Interessanterweise war hier kein spezielles Mikroklima ausschlaggebend, sondern die hohen Schwankungen der relativen Luftfeuchte. Dies konnte mit Hilfe der Simulation bestätigt werden.

Dass baulich Eingriffe, etwa der Einbau einer Temperierung, nicht immer zuträglich für die Erhaltung der historischen Ausstattung sind, konnte am Beispiel des Seitenaltars in der Renatuskapelle nachvollzogen werden. Dort stellt sich durch eine ungeeignete Präsentation lokal ein Mikroklima ein, das zu Schäden an der Ausstattung führte.

Die Klimaanalyse der vier Fallstudien bestätigte, dass die Risikoprognosen für gefasste Holzobjekte und Leinwandgemälde durch Schadfunktionen nach dem heutigen Stand nicht ausreichend für eine restauratorische Bewertung sind.

Anzumerken bleibt noch, dass die Untersuchungen vor Ort, die über den Zeitraum von ca. drei Jahren durchgeführt wurden, nur einen kleinen Ausschnitt der bereits vergangenen und noch kommenden Klimaereignisse abdeckt. Auch die in Hinblick auf das gesamte Spektrum an Kunstwerken vergleichsweise geringe Anzahl von untersuchten Objekten reicht nicht aus, um daraus allgemeingültige Klimavorgaben abzuleiten.

Es wurde jedoch aufgezeigt, dass zum einen das individuelle Verhalten eines Kunstwerks berücksichtigt werden muss und zum anderen eine ganzheitliche Betrachtung, die Gebäude, Raum und Position im Raum einschließt, notwendig ist. So sollten Klimavorgaben im Allgemeinen lediglich als Empfehlung verstanden und immer die individuelle Situation berücksichtigt werden. Die Einschätzung aufgrund von restauratorischem Wissen kann keinesfalls durch Ergebnisse aus Simulationen ersetzt werden.

8 Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf Kunstwerke

Kernfrage dieser Arbeit war, wie sich kurzfristige klimatische Schwankungen auf den Materialverbund von Kunstwerken auswirken. Die drei Methoden, die miteinander kombiniert wurden, führten diesbezüglich zu folgenden Ergebnissen: Zunächst konnte mit Hilfe der Wägeversuche gezeigt werden, dass ein Kunstwerk unmittelbar auf klimatische Veränderungen reagiert, egal welche Schichtstärke das Trägermaterial hat oder wie dicht der Schichtaufbau ist (Kapitel 3.2). Gleichwohl sind die materialtechnischen Eigenschaften maßgebend für die Stärke der Reaktion auf eine Klimaänderung. Bei der restauratorischen Untersuchung mit dem 3D-Mikroskop am Hochaltar in St. Margaretha in Roggersdorf konnte bei einer diffusionshemmenden vergoldeten Holzoberfläche an einer gelockerten Stelle Bewegung sichtbar gemacht werden. Diese trat bei einer Feuchteänderung von unter 10 % innerhalb von 12 Stunden auf. Damit konnte auch optisch belegt werden, dass sich kurzfristige Schwankungen auf klimatisch träge (vorgeschiedigte) Holzoberflächen unmittelbar auswirken, bzw. dass die alleinige Betrachtung des grundierten Trägermaterials nicht alle zu erwartenden Schadensphänomene abdeckt (vgl. Bratasz et. al. 2014).

Die Simulation bestätigte die These der Laborversuche, dass insbesondere bei diffusionsoffenem Materialverbund ein großer Anteil der Reaktion auf klimatische Schwankungen von der Vorderseite (Bildseite) kommt. Kunstwerke stehen im kontinuierlichen Austausch mit dem sie umgebenden Klima. Daher kann, anders als von Michalski dargestellt, keine Zeit festgelegt werden, die das Kunstwerk benötigt, um zu reagieren (vgl. Kapitel 2.3.1). Die Vermutung, dass sich kurzfristige Schwankungen auf Kunstwerke mit großem Volumen nicht auswirken, kann sich daher ausschließlich auf das Trägermaterial – etwa Holz – beziehen, nicht aber auf die Fassung oder die Malschicht.

Die Gewichtsänderung stellt eine sensible Methode zur Untersuchung von Veränderungen im Materialverbund dar. Bis jedoch Verformungen, die aus dem Quellen und Schwinden resultieren, sichtbar werden, dauert es – abhängig vom Objekt – eine Weile. Wie gezeigt werden konnte, bewirken klimatische Schwankungen ($55 \pm 15 \%$), die unter 15 Minuten bleiben, bei empfindlichen Materialien wie Pergament nur geringe Gewichtsänderungen (Abbildung 3.11). Danach hat ein kurzzeitiges Stoßlüften, auch bei stark hygroskopischen Materialien, eine zu vernachlässigende Auswirkung (salzbelastete Oberflächen ausgeklammert).

Weiter konnte durch die Versuche gezeigt werden, dass bei Änderung des Ausgangsklimas insbesondere zu Beginn, also innerhalb der ersten Stunden, in denen der Verbund eine neue Gleichgewichtsfeuchte anstrebt, die höchste Gewichts- oder abnahme auftritt. Demnach stellt eine abrupte Änderung der Umgebungsfeuchte eine stärkere Belastung dar als eine langsame. Je höher dabei die Amplitude ist, umso stärker fällt die Reaktion aus. Optisch sichtbare Veränderungen traten an zwei Beispielen erst nach 60 Minuten auf.

Welche klimatischen Schwankungen sind nun schädlicher – kurz- oder langfristige? Die Antwort darauf lautet: Beides stimmt zum Teil. Die unterschiedlichen Argumente der Autoren sind richtig, denn sie beziehen

sich auf unterschiedliche Materialien bzw. fokussieren auf unterschiedliche Teile im Verbund. Ein sehr empfindlicher Materialverbund, etwa eine Urkunde auf Pergament, wird bereits bei kurz andauernden Schwankungen Veränderungen, wie Verwölbungen, erfahren. Eine dichte Ölmalschicht auf hölzernem Träger wird auf dieselbe Schwankung in geringerem Maß reagieren.

Bei Klimavorgaben sollte daher darauf geachtet werden, worauf sich die in der Literatur genannten Werte beziehen. Die bisherige Reduzierung der Vielfalt von Kunstgattungen und -materialien auf wenige Eigenschaften (dünn / dick, reagiert schnell / langsam, vgl. Abbildung 2.11) ist nicht ausreichend, um daran die Variation an möglichen Auswirkungen klimatischer Schwankungen abzuleiten.

Mit Hilfe der Untersuchungen konnte dargestellt werden, dass auf Zahlenwerten basierende Klimavorgaben geeignet sind, um Klimaanlage zu planen bzw. anzusteuern. Da individuelle Materialeigenschaften darin jedoch nicht berücksichtigt werden, reichen sie nicht aus, um Gültigkeit für das gesamte Spektrum an Kunstwerken zu haben oder tatsächliche Prognosen zum Schadensrisiko durch klimatische Einflüsse zu treffen. Dazu müsste immer vom empfindlichsten Materialverbund der Sammlung ausgegangen werden oder vorgeschädigte Oberflächen miteinbezogen werden. Weiter liegt aufgrund der Varianz des Klimas innerhalb eines Raumes niemals ein Klima vor, so dass sowohl in klimatisierten wie auch in nicht klimatisierten Räumen der Aufstellungsort der Kunstwerke eine große Rolle spielt. Aus den Untersuchungen der Kunstwerke an Außenwänden, wie auch an Wänden mit Heizleitungen waren die Kunstwerke trotz geringer klimatischer Schwankungen hohen Temperatur- und Feuchtegradienten und folglich einem Schadensrisiko ausgesetzt. Kunstwerke reagieren auf die Änderung von klimatischen Bedingungen mit Quellen oder Schwinden. Eine längerfristige Änderung der Gleichgewichtsfeuchte über 10 % muss daher unter restauratorischer Begleitung erfolgen (vgl. Abbildung 2.8). Dies ist besonders bei Wechselausstellungen, wo Exponate aus unterschiedlich konditionierten Museen, Depots und historischen Gebäuden zusammengeführt werden zu berücksichtigen. Hier muss ein Kompromiss für das Raumklima definiert und eingegangen werden.

Aus heutiger Sicht ergibt sich aufgrund der unterschiedlichen Ausstellungssituationen in Museen und historischen Gebäuden eine Diskrepanz hinsichtlich der Vorstellung eines restauratorisch unbedenklichen Raumklimas. So können die engen Vorgaben, die für Museen gelten, nicht ohne ausreichendes Wissen über das Schadensrisiko aufgeweitet werden. Zahlreiche Gemälde wurden beispielsweise in den letzten 30 Jahren restauriert und waren seither nur geringen klimatischen Schwankungen, dem „Museums-klima“, ausgesetzt. Eine Änderung dieser Situation könnte zu neuen Schäden führen. Zusätzlich ist vor allem die Reaktion von zeitgenössischer Kunst gegenüber klimatischen Schwankungen wenig erforscht. Zudem sind Vorgaben mit stündliche Schwankungen von $\pm 2,5$ % relative Luftfeuchte kritisch zu sehen, da sie im Rahmen der Messgenauigkeit vieler Sensoren liegen. Anhand der Versuche im Labor konnte gezeigt werden, dass sich stündliche Schwankungen von ± 5 % relative Luftfeuchte kaum auswirken. Um den ökologischen Fußabdruck von Museen zu verringern, gibt es heute zahlreiche Möglichkeiten, etwa durch Dämmung oder Erneuerung der Verglasung. Nicht nur die Änderung der Klimavorgaben birgt Einsparpotential, im Gegenteil; Klimaanlage sind nämlich immer auf bestimmte Werte ausgelegt. Diese zu ändern führt nicht zwangsläufig zur Energieeinsparung (Burmester 2014b).

Bei Klimavorgaben in denkmalgeschützten Gebäuden ist es empfehlenswert, sich am historischen Raumklima, in dem sich die Ausstattung befindet, zu orientieren (DIN EN 15757). Letzteres ist definiert als Klima, in dem sich ein Objekt schon seit langer Zeit, mindestens aber seit einem Jahr befindet. Die relative Luftfeuchte zwischen 40 und 70 % ist ein für die meisten Kunstwerke akzeptabler Klimakorridor. Für die Beurteilung von

klimatischen Schwankungen werden üblicherweise Zeiträume von 24 Stunden angegeben. Allerdings ist es ratsam, den Verlauf innerhalb von 72 Stunden mit zu berücksichtigen. Denn in dieser Zeit laufen oberflächlich die größten Bewegungen ab.

Für historische Gebäude ohne Klimatisierung ist es sinnvoll die kurzfristigen klimatischen Schwankungen, die sich vor allem durch geöffnete Fenster oder Türen ergeben zu minimieren und hohe relative Luftfeuchten über 70 % sowie geringe Feuchten unter 40 % zu vermeiden. Ist die Erhaltung der Ausstattung akzeptabel, ist es nicht notwendig, das bestehende Klima grundlegend zu ändern. Objekte, die sensibel gegenüber klimatischen Schwankungen, aber auch auf Erschütterungen oder andere konservatorisch relevante Aspekte reagieren, müssen zusätzlich – etwa durch die Präsentation in einer Vitrine – geschützt werden.

Hinsichtlich der Frage, welche Heizstrategie für Kirchen besser ist, langsames oder schnelles Aufheizen, ist ersterem der Vorzug zu geben. Die Aussage, das schnelle Aufheizen würde keine Reaktion in Kunstwerken hervorrufen (Kapitel 2.1.3), kann sich wiederum nur auf die Mitte des Materialverbunds mit großem Volumen beziehen, nicht auf die Oberflächen. Die Reaktion der Malschicht, die aufgrund der Bewegung des Trägers Holz erfolgt, führt mit hoher Wahrscheinlichkeit zu Schäden. Doch gibt es auch Schäden, die bereits von geringer mechanischer Bewegung des Trägers herrühren, etwa die Craqueléebildung in Überzügen (Abbildung 3.3). Diese gilt es ebenfalls zu vermeiden.

Ausblick

Die Reaktion unterschiedlicher Materialverbände auf klimatische Schwankungen konnte in der Arbeit am Beispiel von Leinwandgemälden und gefassten Holzoberflächen aufgezeigt und das daraus entstehende Schadenspotential abgeleitet werden. Schadensmerkmale waren jedoch nur an einzelnen Objekten sichtbar und können daher nicht auf Kunstgattungen übertragen werden. Bisher fehlt die Kenntnis, welche konkreten Auswirkungen klimatische Schwankungen auf das gesamte Spektrum an Materialverbänden, aus denen Kunstwerke geschaffen sein können, haben. Auch die Abgrenzung von kurz- und langfristigen Schwankungen muss weiter präzisiert werden. Um Schadensphänomene, die an einem Objekt festgestellt wurden auf andere übertragen zu können, ist eine Vielzahl von Proben notwendig. Daher sind auch die Prognosen aus bisher entwickelten Schadfunktionen noch von eingeschränkter Aussagekraft und müssen konkretisiert werden.

Der Ansatz, restauratorische Untersuchungen mit Laborversuchen und hygrothermischer Simulation zu kombinieren erscheint zielführend. Für konkretere Aussagen hinsichtlich des Schädigungspotentials sollte diese Methode um Untersuchungen der mechanischen Bewegungen des Materialverbunds bei klimatischen Schwankungen erweitert werden.

Die bei der restauratorischen Zustandserfassung gefundenen, klimatisch bedingten Schäden zeigen nicht den Ursprung, also die Reaktion auf kurz- oder langfristige Schwankungen auf. Um dieser Frage auf den Grund zu gehen, sollten Ausstattungen, die in der Vergangenheit Schäden aufwiesen und weiterhin denselben klimatischen Bedingungen unterliegen (wie hier am Beispiel Roggersdorf gezeigt), langfristig restauratorisch untersucht und mit einer kontinuierlichen Klimaaufzeichnung überwacht werden. Optische Hilfsmittel, wie die Streifenlichtprojektion, die 3D-Mikroskopie oder die Interferometrie können Zustandsuntersuchungen ergänzen, wodurch optische Veränderungen besser dokumentiert und in Bezug auf klimatische Schwankungen beurteilt werden können. Hier sollten weitere Messungen unter realen Bedingungen erfolgen.

Weitere Forschung ist bei der Interpretation simulierter Temperatur- und Feuchteverläufe im Verbund und zwischen den einzelnen Schichten erforderlich, genauso wie die Rückkopplung auf reale Objekte. Bei speziellen Fragestellungen, wie beispielsweise der Auswirkung des Abstands und der damit verbundenen Strömungsverhältnisse zwischen Leinwandgemälden und (ungedämmter) Außenwand, stößt die hygrothermische Simulation an ihre Grenzen. Der Einsatz einer CFD-Simulation könnte hier Antworten liefern.

Weiter wären ergänzende Untersuchungen der Gewichtsänderung im Klimaschrank sinnvoll, um die Auswirkung von Temperaturschwankungen und Temperaturen über 25 °C sowie unter 8 °C zu erforschen. Ebenfalls sinnvoll wäre es, kurz- und mittelfristige Feuchtsprünge zu kombinieren, um nachzuweisen, wie sich dies im Unterschied zu statischen Schwankungen auf den Materialverbund auswirkt. Alternativ könnten die Wägeversuche auch in einem historischen Gebäude durchgeführt werden, bei gleichzeitiger Erfassung des Raumklimas. Auf diese Weise wäre eine längerfristige Auswirkung von klimatischen Schwankungen zu untersuchen. Auf der Suche nach Erkenntnis über die Auswirkung von klimatischen Schwankungen wurde bereits viel geforscht. Die Herangehensweise war dabei immer unterschiedlich und auch die untersuchten Objekte wichen bei der Anfertigung, im Zustand und der Alterung voneinander ab. Damals wie heute wurden Vereinfachungen vorgenommen, Annahmen getroffen, interpretiert und aus einzelnen Ergebnissen Vorgaben entwickelt, die später sorglos übernommen wurden. Heute werden die einzelnen Forschungsergebnisse zusammen getragen. Die bisher fehlende einheitliche Herangehensweise kann jedoch zu Fehlinterpretationen führen. Sinnvoll wäre es, sorgfältig dokumentierte Aufstriche anzufertigen, diese an unterschiedlichen Orten mit kontinuierlicher Klimaerfassung zu positionieren und über einen Zeitraum von mehreren Jahren oder Jahrzehnten kontinuierlich nach einheitlichem Prinzip restauratorisch zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

Normen

DIN 4108-3 Teil 3: Klimabedingter Feuchteschutz; Anforderungen, Berechnungsverfahren und Hinweise für Planung und Ausführung, Juli 2002

DIN EN ISO 12571 : 2013-12: Bestimmung der hygroskopischen Sorptionseigenschaften

DIN EN 15757 : 2010-12: Erhaltung und kulturelles Erbe – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien

BSI Group (Hrsg.): Specification for environmental conditions for cultural collections. BSI Group, 2011

ASHRAE 2007

ASHRAE, HVAC. Applications Handbook. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Atlanta 2007

Arendt 2007

Arendt, Claus: Möglichkeiten zur Temperaturgestaltung, in: Klimagestaltung im Spannungsfeld zwischen Kulturgutschutz und Nutzerwünschen, in: 1. Konservierungswissenschaftliches Kolloquium in Berlin/Brandenburg, Potsdam 16. November 2007, Potsdam 2007, S. 6 – 23

Ahrens 1933

Ahrens, Werner: Temperatur- und Feuchtigkeitsüberwachung in Museen und Archiven, in: Museumskunde 5, 1933, S. 5 – 8

Allegretti et al. 2008

Allegretti, Ottavio; Raffaelli, Francesca: Barrier Effect to water vapor of early European materials on wood panels, in: Studies in Conservation 53, 2008, pp. 187 – 197

Althöfer 1987

Althöfer, Heinz: Schäden an Bildern des 19. Jahrhunderts, in: Das 19. Jahrhundert und die Restaurierung. Beiträge zur Malerei, Maltechnik und Konservierung, München 1987, S. 266 – 267

Ashley-Smith 1999

Ashley-Smith, Jonathan: Risk assessment for object conservation, Oxford, Boston 1999

Ashley-Smith et al. 2013

Ashley-Smith, Jonathan; Burmester, Andreas; Eibl, Melanie (Hrsg.): Climate for Collections – Standards and Uncertainties. Climate for Collections – Standards and Uncertainties, München, 7 – 9 November 2012, London 2013

Ashley-Smith 2014

Ashley-Smith, Jonathan: Report on newly gathered knowledge on damage functions, Deliverable 4.1, Climate for Culture 2014. Online verfügbar unter www.climateforculture.eu, Stand 23. September 2015

Ashok et al. 1994

Ashok, Roy; Smith, Perry (Hrsg.): Preventive Conservation. Practice, theory and research, Ottawa, 12 – 16 September 1994, International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works, London 1994

Atkinson 2014

Atkinson, Jo Kirby: Environmental conditions for the safeguarding of collections. A background to the current debate on the control of relative humidity and temperature, in: *Studies in Conservation*, 2014, Vol. 59, Nr. 4, pp. 205 – 212

Bacher 1995

Bacher, Ernst: Alois Riegl und die Denkmalpflege, in: *Kunstwerk oder Denkmal? Alois Riegls Schriften zur Denkmalpflege*, Wien, Köln, Weimar 1995, S. 13 – 48

Bauer-Bolton 1933

Bauer-Bolton, Victor: Zur Frage der Konservierung der Tafelbilder, in: *Museumskunde* 5, 1933, S. 95 – 112

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege 2002

Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): *Vorsorge, Pflege, Wartung. Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung. Eine Handreichung für Denkmaleigentümer, Verwalter, Hausmeister, Kirchenvorsteher, Kirchenpfleger, Küster und Mesner* bearbeitet von Michael Kühnenthal, München 2002

Berger et al. 1994

Berger, Gustav A.; Russel, William H.: Interaction between canvas and paint film in response to environmental changes, in: *Studies in Conservation* 39, 1994, pp. 73 – 86

Berger et al. 2000

Berger, Gustav A.; Russell, William H.: *Conservation of paintings. Research and innovation*, London 2000

Bickersteth 2014

Bickersteth, Julian: Environmental conditions for safeguarding collections: What should our set points be?, in: *Studies in Conservation*, 2014, Vol. 59, Nr. 4, pp. 218 – 224

Bichlmair 2011

Bichlmair, Stefan: *Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof*, Masterarbeit, Hochschule Rosenheim 2011 (unveröffentlicht)

Bichlmair et al. 2013a

Bichlmair, Stefan; Holl, Kristina; Kilian, Ralf: The moving fluctuation range - a new analytical method for evaluation of climate fluctuations in historic buildings, in: *Climate for Collections - Standards and Uncertainties*, München 7 – 9 November 2012, London 2013, pp. 429 – 440

Bichlmair et al. 2013b

Bichlmair, Stefan; Kilian, Ralf; Krus, Martin: Concept of a New Airing Strategy and Simulation of the expected indoor climate in Linderhof Palace. in: *Clima 2013. 11th REVHA World Congress & 8th International Conference on IAQVEC*, Prague 16 – 19 Juni 2013, Prague 2013, pp. 2879 – 2889

Bläuer 2011

Bläuer, Christine: Hören, sehen, riechen, tasten, schmecken als Grundlage der Objektuntersuchung, in: *Einfache, zerstörungsfreie Prüfverfahren. Beiträge des 5. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin / Brandenburg am 18. November 2011 in Potsdam. Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums*, Petersberg 2011, S. 5 – 9

Boersma et al. 2014

Boersma, Foekje; Dardes, Kathleen; Druzik, James: Precaution, Proof and Pragmatism: Evolving Perspectives on the Museum Environment, in: GCI Newsletter 2014, Vol. 29, Nr. 2, pp. 4 – 9, online verfügbar unter: www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/pdf/v29n2.pdf, Stand 8. September 2015

Bratasz et al. 2005

Bratasz, Lukasz; Jakiela, Slawomir; Kozlowski, Roman: Allowable thresholds in dynamic changes of microclimate for wooden cultural objects: monitoring in situ and modelling, in: ICOM Committee for Conservation, 14th triennial meeting, The Hague, 12 – 16 September 2005, Preprints, Bd. 2, London 2005, pp. 582 – 589

Bratasz et al. 2008

Bratasz, Lukasz; Kozlowski, Roman; Kozlowska, Antonina; Rivers, Shayne: Conservation of the Mazarin Chest: structural response of Japanese lacquer to variations in relative humidity, in: ICOM Committee for Conservation, 15th triennial meeting 22 – 26 September 2008, New Delhi 2008, Bd. 2, pp. 1086 – 1093

Bratasz 2010

Bratasz, Lukasz: Acceptable and non-acceptable microclimate variability: The case of wood, in: Basic Environmental Mechanisms affecting Cultural Heritage, Florenz 2010, pp. 49 – 58

Bratasz et al. 2011

Bratasz, Lukasz; Kozlowski, Roman; Lasyk, Łukasz; Lukomski, Michal; Rachwal, Bartosz: Allowable microclimatic variations for painted wood: numerical modelling and direct tracing of the fatigue damage, in: ICOM Committee for Conservation, 16th Triennial Conference, Lissabon, 19 – 23 September 2011, Lissabon 2011, pp. 1 – 7

Bratasz 2013

Bratasz, Lukasz: Allowable microclimatic variations for painted wood, in: Studies in Conservation 58, 2013, pp. 65 – 79

Buck 1971

Buck, Richard D.: What is condition in a work of art? in: Bulletin of the American Group-IIC 12 (1), 1971, pp. 63 – 67

Burmester 2000

Burmester, Andreas: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und- sanierung: Oder welche Klimawerte sind die richtigen? in: Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000, S. 9 – 24

Burmester et al. 2013

Burmester, Andreas; Ashley-Smith, Jonathan: The Plus-Minus-Debate Doerner Institut, online verfügbar unter <http://www.doernerinstitut.de/downloads/Plus-Minus-Debate.pdf>, Stand 23. September 2015

Burmester et al. 2014a

Burmester, Andreas; Kozlowski, Roman: The stability versus stress discussion, online verfügbar unter www.doernerinstitut.de/downloads/Stability_versus_Stress.pdf, Stand 23. September 2015

Burmester et al. 2014b

Burmester, Andreas; Böllinger, Andreas; Strobl, Johann: The real savings, online verfügbar unter: http://www.doernerinstitut.de/downloads/The_Real_Savings.pdf, Stand 26. Oktober 2015

Bylund Melin et al. 2014

Bylund Melin, Charlotta; Legnér, Matthias: The relationship between heating energy and cumulative damage to painted wood in historic churches, in: Journal of the Institute of Conservation, Volume 37, Issue 2, 2014, pp. 94 – 109

Costain 1994

Costain, Charlie: Framework for Preservation of Museum Collections, in: CCI Newsletter 14, 1994, pp. 1 – 4

Deutscher Museumsbund e.V. 2006

Deutscher Museumsbund e.V.: Standards für Museen, ICOM Deutschland, Berlin 2006

Dehio-Vereinigung 2006

Dehio-Vereinigung – Wissenschaftliche Vereinigung zur Fortführung des kunsttopographischen Werkes von Georg Dehio e. V. (Hrsg.): Georg Dehio Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Berlin 2006

Doerner 1938

Doerner, Max: Malmaterial und seine Verwendung im Bilde, Stuttgart 1938

Dudley 1979

Dudley, Dorothy: Museum registration methods, in: American Association of Museums, Washington D.C. 1979, pp. 73 – 87

Eibl 2011

Eibl, Melanie: Lernen aus der Geschichte. Historisches Klima in Museen und resultierende Klimatisierungsstrategien am Beispiel der Alten Pinakothek, Masterthesis, Technische Universität München 2011 (unveröffentlicht)

Eibl et al. 2013

Eibl, Melanie; Burmester, Andreas: Learning from history. Historic indoor climate conditions and climate control strategies. in: Climate for Collections – Standards and Uncertainties, München, 7 – 9 November 2012, London 2013, pp. 217 – 232

Eipper et al. 2004

Eipper, Paul-Bernhard; Frankowski, Gottfried; Opielka, Horst; Welzel, Julia: Ölfarben-Oberflächenreinigung: Die Reinigung von Ölfarbenoberflächen und ihre Überprüfung durch das Raster-Elektronen-Mikroskop, das Niederdruck-Raster-Elektronen-Mikroskop, die Laser-Profilometrie und die 3D-Messung im Streifenprojektionsverfahren, München 2004

Erhardt et al. 1997

Erhardt, David; Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles; Mc Cormick-Goodhart, Mark: The determination of appropriate museum environments, in: British Museum Occasional Papers 1997, Bd. 116, pp. 153 – 163

Erhardt et al. 2007

Erhardt, David; Tumosa, Charles; Mecklenburg, Marion: Applying science to the question of museum climate, in: Museum Microclimates – Contributions to the Copenhagen conference, 19 – 23 November 2007, Copenhagen 2007, pp. 11 – 18

Erhardt et al. 1994

Erhardt David, Mecklenburg Marion: relative-humidity re-examined, in: Preventive Conservation. Practice, theory and research. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Ottawa, 12 – 16 September 1994, London 1994, pp. 32 – 38

Fachinstitut für Gebäude-Klima 2000

Fachinstitut für Gebäude-Klima e. V. (Hrsg.): Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000

Garrecht et al. 2010

Garrecht, Harald; Reeb, Simone; Glaser, Wilhelm; Hassler, Uta: 3D microscopy for monitoring dynamic environmental impacts on painted wood, COST Action IE0601 Allowable microclimatic variations for polychrome wood. International Workshop Oslo, 18 – 19 February 2010, online verfügbar unter: <http://www.cyfronet.krakow.pl/~ncbratas/oslo/GarrechtOslo2010.pdf>, Stand 23. September 2015

Goli et al. 2012

Goli, Giacomo; Fioravanti, Marco; Busoni, Simone; Carlson, Bruce; Mazzanti, Paola; Measurement and modelling of mass and dimensional variations of historic violins subjected to thermo-hygrometric variations: The case study of the Guarneri "del Gesù" violin (1743) known as the "Cannone", in: *Journal of Cultural Heritage* 2012, Vol. 13, pp. 154 – 160

Großschmidt et al. 2008

Großschmidt, Henning; Kotterer, Michael: Klima in Museen und historischen Gebäuden. Vom konservatorisch richtigen Heizen und Lüften, in: *VDR Beiträge* 2008, S. 87 – 100

Hanfstaengl ca. 1890

Hanfstaengl, Franz: Pigment-Drucke der königl. Schlösser zu Chiemsee Linderhof, München ca. 1890

Hilbert 2002

Hilbert, Günter: Sammlungsgut in Sicherheit – Schadstoffprävention, Schädlingsbekämpfung, Sicherungstechnik, Brandschutz, Gefahrenmanagement, Beleuchtungs- und Lichtschutz, Klimatisierung, Berlin 2002

Hoadley 1998

Hoadley, Bruce R.: Wood as a physical surface for paint application, in: *Painted wood. History & conservation*, Getty Conservation Institute, Los Angeles 1998, pp. 2 – 16

Holl 2008

Holl, Kristina: Der Türkische Saal im Königshaus am Schachen. Die Erhaltung der Ausstattung in Hinblick auf das Raumklima, Diplomarbeit Technische Universität München 2008 (unveröffentlicht)

Holl 2009

Holl, Kristina: Protokoll zum Ortstermin in der Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf, 18.05.2009 (interner Bericht Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Holl et al. 2010

Holl, Kristina; Kilian, Ralf; Krus, Martin; Sedlbauer, Klaus: Bewertung der Klimastabilität aus restauratorischer und bauphysikalischer Sicht am Beispiel des Königshauses am Schachen, in: *Klima und Klimastabilität in historischen Bauwerken. Tagung zur Vorstellung des Merkblatt - Gelbdruckes der Arbeitsgruppe 6.11 – Klima und Klimastabilität in historischen Räumen Teil 1 - Einführung*, Pfaffenhofen 2010, S. 49 – 58

Holl et al. 2012

Holl, Kristina; Raffler, Susanne; Janis, Katrin: Konservatorische Untersuchung der historischen Ausstattung in Schloss Linderhof, 30. April 2012, (interner Bericht Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen)

Holl 2013

Holl, Kristina: Comparison of the indoor climate analysis according to current climate guidelines with the conservational investigation using the example of Linderhof Palace, in: *Climate for Collections – Standards and Uncertainties*, München, 7 – 9 November 2012, München 2012, pp. 289 – 300

Holm 2001

Holm, Andreas: Ermittlung der Genauigkeit von instationären hygrothermischen Bauteilberechnungen mittels eines stochastischen Konzeptes, Dissertation, Universität Stuttgart 2001

Holmberg 1997

Holmberg, Jan: Technical Classification of Museum Buildings, in: EURO CARE Eureka Project EU 140, EU 1278 PREVENT, Preventive Conservation, Report No. 7 from Swedish Partners, Stockholm 1997

Holmberg 2001

Holmberg, Jan: Environment control in historical buildings, Dissertation, Royal Institute of Technology Stockholm 2001

Holmberg et al. 2011

Holmberg, Jan; Kylsberg, Bengt; Skeri, Karin: Damage assessment of objects of art correlated to local outdoor climate during 300 years, in: Developments in climate control of historic buildings, Schloss Linderhof 2 December 2010, Stuttgart 2011, pp. 73 – 81

Horie 1987

Horie, Velson: Materials for Conservation. Organic consolidants, adhesives and coatings, Oxford 1987

Huber 1992

Huber, Alfons: Klimaschwankungen und ihre Auswirkungen auf Kunst- und Kulturgut in öffentlichen Sammlungen, in: Linzer Werkstattgespräche 1992, S. 123 – 147

Huber 2012

Huber, Alfons: Ökosystem Museum. Grundlagen zu einem konservatorischen Betriebskonzept für die Neue Burg in Wien, Dissertation, Akademie der bildenden Künste Wien 2012

Huth 1923

Huth, Hans: Künstler und Werkstatt der Spätgotik, Augsburg 1923

ICOM International Council of Museums 1997

ICOM International Council of Museums (Hrsg.): Manual on the conservation of paintings, London 1997

ICOM 2014

ICOM International Council of Museums (Hrsg.): IIC announces declaration on Environmental Guidelines, online verfügbar unter: <https://www.iiconservation.org/node/5168>, submitted by Athanasios Velios on 26 Sep 2014, Stand 8. Oktober 2015

Jakiela et al. 2007

Jakiela, Slawomir; Bratasz, Lukasz; Kozlowski, Roman: Acoustic emission for tracing the evolution of damage in wooden Objects, in: Studies in Conservation 52, 2007, pp. 101 – 109

Jakiela et al. 2008

Jakiela, Slawomir; Bratasz, Lukasz; Kozlowski, Roman: Numerical modelling of moisture movement and related stress field in lime wood subjected to changing climate conditions, in: Wood Science Technology 42, 2008, pp. 21 – 37

Jeberien 2014

Jeberien, Alexandra: IIC -Declaration, 3. Dezember 2014, online verfügbar unter: www.restauro.de/iic-declaration, Stand 28. September 2015

Jockusch 2012

Jockusch, Meike: Rückseitenklimaschutz für Gemälde auf textilem Bildträger, Diplomarbeit Hochschule für bildende Künste Stuttgart 2012 (unveröffentlicht)

Keeley et al. 1951

Keeley, T. R.; Rawlins, F. Ian G.: Air conditioning at the National Gallery, London. Its influence upon the preservation and presentation of pictures, in: *Museum Ill*, 1951, Nr. 3, pp. 194 – 197

Kilian 2004

Kilian, Ralf: Die Wandtemperierung in der Renatuskapelle in Lustheim. Auswirkungen auf das Raumklima, Diplomarbeit Technische Universität München 2004, München 2004

Kilian et al. 2008

Kilian, Ralf; Holm, Andreas; Radon, Jan; Künzel, Hartwig: The King's House of Schachen – Indoor climate analysis of a cultural heritage building, in: *Nordic Symposium on building physics. 8th Symposium on Building Physics in Nordic Countries*, Copenhagen, 16 – 18 Juni 2008, Copenhagen 2008, pp. 841 – 847

Kilian et al. 2009

Kilian, Ralf; Holm, Andreas: Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf, 26.01.2009, (interner Bericht Fraunhofer-Institut für Bauphysik)

Kilian et al. 2010

Kilian, Ralf; Vyhřídál, Tomáš; Broström, Tor (Hrsg.): Developments in Climate Control of Historic Buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of historic buildings – state of the art", Schloss Linderhof, 2 Dezember 2010, Stuttgart 2011

Kilian 2013

Kilian, Ralf: Klimastabilität historische Gebäude. Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung, Dissertation Universität Stuttgart 2013

Kölsch 1987

Kölsch, Hans Ulrich: Der Einsatz von Kunststoffen in der Kunst des 19. Jahrhunderts, in: Althöfer, Heinz: *Das 19. Jahrhundert und die Restaurierung. Beiträge zur Malerei, Maltechnik und Konservierung*, 1987, S. 335 – 346

Koller 1978

Koller, Manfred: Barocke Altarbilder in Mitteleuropa: Technik - Schäden - Konservierung, in: *Der Altar des 18. Jahrhunderts. Das Kunstwerk in seiner Bedeutung und als denkmalpflegerische Aufgabe*, München 1978, S. 173 – 222

Koller 1981

Koller, Manfred: Klima und Sicherheit in Ausstellungen: Probleme und Forderungen, in: *Restauratorenblätter* 5, 1981, S. 106 – 122

Koller 1994

Koller, Manfred: Learning from the history of preventive conservation, in: *Preventive Conservation. Practice, theory and research. International Institute for Conservation of Historic and Artistic Works Ottawa*, 12 – 16 September 1994, London 1994, pp. 1 – 7

Koller 1995

Koller, Manfred: Zur Geschichte der vorbeugenden Konservierung, in: *Restauratorenblätter* 15, 1995, S. 27 – 38

Krarup Andersen 2013

Krarup Andersen, Cecil: Lined canvas paintings. Mechanical properties and structural response to fluctuating relative humidity, exemplified by the collection of Danish Golden Age paintings at Statens Museum for Kunst (SMK), Dissertation, Royal Academy of Fine Arts Copenhagen 2013

Kriewitz et al. 1993

Kriewitz, Jutta; Mayrhofer, Hans: Raumbuch Schloss Linderhof, 1992 / 93 (interner Bericht Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen)

Krus 1995

Krus, Martin: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Messtechniken, Dissertation Universität Stuttgart 1995

Künzel et al. 1991

Künzel, Helmut; Holz, Dieter: Bauphysikalische Untersuchungen in beheizten und unbeheizten Gebäuden alter Bauart. Bauphysikalische Grundlagen und generelle Zusammenhänge über die Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf Grund von Langzeituntersuchungen, Holzkirchen 1991, Fraunhofer IBP-Bericht FB-32/1991

Künzel 2000

Künzel, Helmut: Verbesserung der Raumklima- und Feuchteverhältnisse in historischen Gebäuden durch gesteuertes Heizen und Lüften, in: Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000, S. 71 – 88

Künzel 1994

Künzel, Hartwig: Verfahren zur ein- und zweidimensionalen Berechnung des gekoppelten Wärme- und Feuchtetransports in Bauteilen mit einfachen Kennwerten, Dissertation Universität Stuttgart 1994

Künzel 1997

Künzel, Hartwig: Raumluftfeuchteverhältnisse in Wohnräumen, in: IBP-Mitteilung 314, Stuttgart 1997

Künzel et al. 2000

Künzel, Hartwig M.; Schmidt, Thomas: Wetterdaten für rechnerische Feuchteschutzbeurteilungen, in: IBP-Mitteilung 364, Stuttgart 2000

Künzel et al. 2006

Künzel, Hartwig; Sedlbauer, Klaus; Holm, Andreas; Krus, Martin: Entwicklung der hygrothermischen Simulation im Bauwesen am Beispiel der Softwarefamilie WUFI®, in: WKSZB Zeitschrift für Wärmeschutz, Kälteschutz, Schallschutz, Brandschutz 2006, S. 7 – 15

Lampl 2004

Lampl, Sixtus: Filialkirche St. Margaretha in Roggersdorf, o. O. 2004

Larsen 2005

Larsen, René: Improved damage assessment of parchment, 2005, online verfügbar unter: http://www.cyfronet.krakow.pl/~ncbratas/pdf/organic_4_larsen_poster.pdf 2005, Stand 23. September 2015

Le Conte et al. 2012

Le Conte, Sandie; Le Moyne, Sylvie; Ollivier, Francois; Viaedelich, Stéphane: Using mechanical modelling and experimentation for the conservation of musical instruments, in: Journal of Cultural Heritage 2012, Vol. 13, pp. 161 – 164

Leimer et al. 2002

Leimer, Hans Peter; Bode, Jens: Klimastabilität in historischen Museumsbauten: Bauphysikalische Untersuchungen im Herzog-Anton-Ulrich-Museum, in: RestauRO – Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, Heft 1, 2002, S. 20 – 27

Leimer 2003

Leimer, Hans Peter: Vorlesungsskripte zur Vertiefung Bauphysik der Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst Hildesheim / Holzminden / Göttingen, 2003, online verfügbar unter: <http://www.bauphysik.fh-hildesheim.de>, Stand 23. September 2015

Leisher 1977

Leisher, William: Humidity-temperature requirements for museum collections, in: American Association of Museums Energy Workshop, Washington D.C., 1977, pp. 1–5

Lipinski 2010

Lipinski, Wolff-Hartwig: Untersuchungen zum feuchtephysikalischen Verhalten von Gemälden auf textilem Bildträger unter biaxialer Dehnung, Diplomarbeit Universität Stuttgart 2010, Stuttgart 2010

Lucanus 1881

Lucanus, Friedrich Gottfried Hermann: Vollständige Anleitung zur Erhaltung, Reinigung und Wiederherstellung der Gemälde, zur Bereitung der Firnisse, so wie auch zum Aufziehen, Reinigen, Bleichen und Restaurieren der Kupferstiche etc., Halberstadt 1881

Luciani 2013

Luciani, Andrea: Historical climates and conservation environments. Historical perspectives on climate control strategies within museums and heritage buildings, Dissertation Politecnico di Milano 2013

Luciani et al. 2013

Luciani, Andrea; Wessberg, Magnus; Broström, Tor: The influence of air exchange on the stability of the indoor climate in skocloster castle, in: e-Preservation Science 2013, 10, pp. 77 – 82

Lukomski 2012

Lukomski, Michal: Painted wood. What makes the painting crack? in: Journal of Cultural Heritage, Vol. 13, 2012, pp. 90 – 93

Luxford et al. 2013

Luxford, Naomi; Thickett, David: Monitoring complex objects in real display environments - How helpful is it? in: Climate for Collections – Standards and Uncertainties, München, 7 – 9 November 2012, München 2013, pp. 257 – 269

Martens 2011

Martens, Marco H. J.: Predicting damage to museum objects, online verfügbar unter: <http://www.monumenten.bwk.tue.nl/CfC/default.aspx>, Stand 23. September 2015

Martens 2012

Martens, Marco H. J.: Climate risk assessment in museums. Degradation risks determined from temperature and relative humidity data, Dissertation TU Eindhoven 2012

Mayerhofer 1998

Mayrhofer, Hans: Linderhof. Schloß. Prunkräume. Voruntersuchung. Schadensphänomene und mögliche Ursachen, 6. März 1998 (interner Bericht, Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen)

Mecklenburg et al. 1991a

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles: An introduction into the mechanical behaviour of paintings under rapid loading conditions, in: Art in Transit. Studies in the transport of paintings, National Gallery of Art Washington. International Conference on the Packing and Transportation of Paintings, London, 9 – 11 September 1991, Canadian Conservation Institute of Communications Canada, Conservation Analytical Laboratory of the Smithsonian Institution, London 1991, pp. 137 – 171

Mecklenburg et al. 1991b

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles: Mechanical behavior of paintings subjected to changes in temperature and relative humidity, in: *Art in Transit. Studies in the Transport of Paintings*, National Gallery of Art Washington. International Conference on the Packing and Transportation of Paintings, London, 9 – 11 September 1991, Canadian Conservation Institute of Communications Canada, Conservation Analytical Laboratory of the Smithsonian Institution, London 1991, pp. 173 – 217

Mecklenburg et al. 1996

Mecklenburg, Marion; Tumosa, Charles: The relationship of externally applied stresses to environmentally induced stresses, in: *Fiber composites in infrastructure. Proceedings of the first international conference on composites in infrastructure. First international conference on composites in infrastructure ICCI*, Tucson, Arizona, 15 – 17 January 1996, Tucson 1996, pp. 956 – 971

Mecklenburg et al. 1998

Mecklenburg, Marion Tumosa, Charles Erhardt, David: Structural response of painted wood surfaces to changes in ambient relative humidity, in: *Painted wood: history and conservation*, Getty Conservation Institute, Los Angeles 1998, pp. 464 – 483

Mecklenburg 2005

Mecklenburg, Marion: The changing mechanical properties of aging oil paints, in: *Materials research society 2005*, pp. 13 – 24

Mecklenburg 2007

Mecklenburg, Marion: Micro climates and moisture induced damage to paintings, in: *Museum Microclimates – Contributions to the Copenhagen conference*, 19 – 23 November 2007, Copenhagen 2007, pp. 9 – 25

Mecklenburg 2010a

Mecklenburg, Marion: Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries. Part 1 Structural response to relative humidity, 2010, online verfügbar unter <http://www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part1-RH.pdf>, Stand 23. September 2015

Mecklenburg 2010b

Mecklenburg, Marion: Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in Museums and Galleries. Part 2 Structural response to temperature. 2010, online verfügbar unter <http://www.si.edu/mci/downloads/reports/Mecklenburg-Part2-Temp.pdf>, Stand 23. September 2015

Michalski 1991

Michalski, Stefan: Crack mechanisms in gilding, in: *Gilded wood: conservation and history*, Madison, 1991, pp. 171 – 181

Michalski 1993

Michalski, Stefan: Relative humidity: a discussion of correct/incorrect values, in: *ICOM Committee for Conservation, 10th Triennial Meeting, Washington D.C., 22 – 27 August 1993, Preprints*, Paris 1994, pp. 624 – 629

Michalski 1996

Michalski, Stefan: Quantified risk reduction in the humidity dilemma, in: *APT Bulletin, Vol. 27, No.3, Museums in historic buildings*, pp. 25 – 29

Michalski 2002

Michalski, Stefan: Double the life for each five-degree drop, more than double the life for each halving of relative humidity, in: *Preprints of 13th Triennial Meeting of ICOM Committee for Conservation*, 22 – 27 September 2002, pp. 66 – 72

Michalski 2007

Michalski, Stefan: The Ideal Climate, Risk Management, the ASHRAE Chapter, Proofed fluctuations, and towards a full risk analysis model, in: Contributions to the Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, held in April 2007, in Tenerife, The Getty Conservation Institute, online verfügbar unter http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/paper_michalski.pdf, Stand 23. September 2015

Michalski 2010

Michalski, Stefan: Correction to the proofed fluctuation concept by stress relaxation and fatigue, Vortrag bei der Tagung: Allowable microclimatic variations for polychrome wood, 18 – 19 February 2010, online verfügbar unter: <http://www.cyfronet.krakow.pl/~ncbratas/oslo/MichalskiOslo2010.pdf>, Stand 23. September 2015

Michalski 2011

Michalski, Stefan: Agent of deterioration: Incorrect relative humidity, 2011, online verfügbar unter <http://www.cci-icc.gc.ca/resources-ressources/agentsofdeterioration-agentsdedeterioration/chap08-eng.aspx>, Stand 28. September 2015

Michalski 2014a

Michalski, Stefan: The power of history in the analysis of collection risks from climate fluctuations and light in: ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15 – 19 September 2014, 8 pp.

Michalski 2014b

Michalski Stefan: Conservation Research into the Museum Climate: The Current Landscape, in: GCI Newsletter 2014, Vol. 29, Nr. 2, pp. 10 – 12, online verfügbar unter: www.getty.edu/conservation/publications_resources/newsletters/pdf/v29n2.pdf, Stand 8. September 2015

Nicolaus 2008

Nicolaus, Knut: Handbuch der Gemälderestaurierung, Köln 2008

Padfield 1998

Padfield, Tim: The role of absorbent materials in moderating changes of relative humidity, Dissertation Technical University of Denmark Copenhagen 1998

Padfield et al. 2007

Padfield, Tim; Borchersen, Karen (Hrsg.): Museum Microclimates – Contributions to the Copenhagen conference, 19 – 23 November 2007, Copenhagen 2007

Pettenkofer 1870

Pettenkofer, Max: Über Ölfarbe und Conservirung der Gemälde-Gallerien durch das Regenerations-Verfahren, Braunschweig 1870

Petzold 1980

Petzold, Karl: Wärmelast, Berlin 1980

Pfeil 1975

Pfeil, Axel: Kirchenheizung und Denkmalschutz. Wärmebedarf – Feuchtehaushalt – Heizungssysteme, Wiesbaden 1975

Plenderleith 1971

Plenderleith, Harold J.; Werner, A. E. A.: The conservation of antiquities and works of art – treatment, repair and restoration, London 1971

Pretzel 2011

Pretzel, Boris: Predicting risks to artefacts from indoor climates, in: ICOM-CC 16th Triennial Conference Preprints, Lisbon, 19 – 23 September 2011, 10 pp.

Pretzel 2014

Pretzel, Boris: [Un]Reasonable - Broadening acceptable climate parameters for furniture on open display, in: ICOM-CC 17th Triennial Conference Preprints, Melbourne, 15 – 19 September 2014, 10 pp.

Ranacher 1995

Ranacher, Maria: Bilder an kalten Wänden, Oberflächentemperaturmessungen an Wänden und Bildern als Neuansatz für konservatorisch richtige Klimatisierung in Gemäldegalerien, in: Restauratorenblätter 15, 1995, S. 147 – 163

Ryhl-Svedsen et al. 2013

Ryhl-Svedsen, Morten; Aasberg Jensen, Lars; Larsen, Paul Klenz; Bøhm, Benny; Padfield, Tim: A museum storage facility controlled by solar energy, in: Climate for Collections – Standards and Uncertainties München, 7 – 9 November 2012, London 2013, pp. 141 – 162

Saft et al. 2012

Saft, Susanne; Kaliske, Michael: Computational approach towards structural investigations for the restoration of historical keyboard instruments, in: Journal of Cultural Heritage 2012, Vol. 13, pp. 165 – 174

Sailer 1887

Sailer, Ludwig: The art monuments of his late Majesty King Ludwig II. of Bavaria. A guide and souvenir for visitors to the royal palaces of Herrenchiemsee, Neuschwanstein, Linderhof, Hohenschwangau, Berg and the hunting seat at the Schachen by Ludwig Sailer, translated by J. R. Morell, München 1887

Schaible 1989

Schaible, Volker: Vom Atmen der Bilder, Bern 1989, online verfügbar unter: <http://www.restauratoren.de/ausbildung/studiumforschung/aktuelles.html>, Stand 26. September 2015

Schaible 1990

Schaible, Volker: Überlegungen zum Phänomen der Schüsselbildung, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 1990, Heft 2, S. 235 – 250

Schramm 1995

Schramm, Hans-Peter: Historische Malmaterialien und ihre Identifizierung, Stuttgart 1995

Schulze 2013

Schulze, Andreas: How the usual museum climate recommendations endanger our cultural heritage, in: Climate for Collections – Standards and Uncertainties, München, 7 – 9 November 2012, London 2013, pp. 81 – 92

Schwarz et al. 1994

Schwarz, Andreas; Gadesmann, Detlev: Holzfeuchtemessungen an Tafelgemälden, in: Restauo – Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen, 1994, Heft 4, S. 256 – 261

Sedlbauer 2001

Sedlbauer, Klaus: Vorhersagemodell der Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen, Dissertation Universität Stuttgart 2001

Seidel 2012

Seidel, Wolfgang: Werkstofftechnik. Werkstoffe – Eigenschaften – Prüfung – Anwendung, München, Wien 2012

Staniforth 2007

Staniforth, Sarah: Conservation heating to slow conservation: a tale of appropriate rather than the ideal, in: Contributions to the Experts' Roundtable on Sustainable Climate Management Strategies, held in April 2007, in Tenerife, The Getty Conservation Institute, online verfügbar unter http://www.getty.edu/conservation/our_projects/science/climate/paper_staniforth.pdf, Stand 23. September 2015

Staniforth 2014

Staniforth, Sarah: Environmental conditions for the safeguarding of collections: Future trends, in: Studies in Conservation, 2014, Vol. 59, Nr. 4, pp. 213 – 217

Stolow 1987

Stolow, Nathan: Conservation and Exhibitions. Packing, transport, storage, and environmental considerations, London 1987

Strlic et al. 2013

Strlic, Matija; Thickett, David; Taylor, Joel; Cassar, May: Damage functions in heritage science, in: Studies in Conservation 2013, Vol. 58, pp. 80 – 87

Thomson 1986

Thomson, Garry: The Museum Environment, Oxford 1986

Urquhart 1960

Urquhart, A.R.: Sorption Isotherms, in: Moisture in Textiles, London 1960, pp.14 – 32

Van Duin 2014

Van Duin, Paul: Climate effects on museum objects: The need for monitoring and analysis, in: GCI Newsletter 2014, Vol. 29, Nr. 2, pp . 13 – 15

Vitruv 1981

Vitruv: Zehn Bücher über Architektur, übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Dr. Curt Fensterbusch, Darmstadt 1981

Wehle 2010

Wehle, Barbara: Simulation des Raumklimas unter Berücksichtigung der Feuchtepufferungseigenschaften des Türkischen Saales im Königshaus am Schachen, Diplomarbeit FH Rosenheim 2010 (unveröffentlicht)

Wehle et al. 2011

Wehle, Barbara; Holl, Kristina; Kilian, Ralf; Krus, Martin: Klimastabilität historischer Gebäude. Das Königshaus auf dem Schachen, Holzkirchen 2011, IBP-Bericht RK 013_2/2011/294

Wehlte 1967

Wehlte, Kurt: Werkstoffe und Techniken der Malerei, Ravensburg 1967

Weiß et al. 2014

Weiß, Andreas; Holl, Kristina; Bylund Melin, Charlotta: Report on the findings of the retrospective investigation on the state of preservation, Climate for Culture Deliverable 2.3, online verfügbar unter www.climatefor-culture.eu, Stand 8. Februar 2015

Welsch 1834

Welsch, Friedrich: Vollständige Anweisung zur Restauration der Gemälde in Oel-, Wachs-, Temperar-, Wasser-, Miniatur-, und Pastellfarben, Quedlinburg, Leipzig 1834

Wiegerling 1997

Wiegerling, Erwin: Roggersdorf, Markt Holzkirchen, Landkreis Miesbach. Katholische Filialkirche St. Margaretha. Ausstattung, Befund, (unveröffentlichter Bericht 1997)

Wiesend 2013

Wiesend, Manuela: Malerei auf „Spinnweben“, in: Restauro – Zeitschrift für Kunsttechniken, Restaurierung und Museumsfragen 2013, Heft 1, S. 12

Wolters 1975

Wolters, Christian: Vorbeugende Maßnahmen zum Schutz von Kunstwerken in Museen, in: Das Museum im technischen und sozialen Wandel unserer Zeit, München 1975, S. 22 – 31

Worch 2007

Worch, Anatol: Zu ausgewählten feuchtephysikalischen Eigenschaften von Ölgemälden auf Leinwand, in: WTA-Almanach 2007, S. 510 – 522

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1.1: Houckgeest 1650, http://www.essentialvermeer.com/dutch-painters/houckgeest_b.html,
Stand 12. Februar 2015

Abbildung 1.2: Koller 1981, S. 203

Abbildung 2.1: Holl, nach Pfeil 1975, S. 11

Abbildung 2.2: <http://www.wasseraktivitaet.de/assets/documents/Wasseraktivitaet-aw.pdf> Stand 13. Mai 2015

Abbildung 2.3: Seidel 2012, S. 337

Abbildung 2.4: Mecklenburg 2010 a, S. 27

Abbildung 2.5: Mecklenburg et al. 1996, S. 966

Abbildung 2.6: Mecklenburg et al. 1998, S. 469

Abbildung 2.7: Bratasz et al. 2011, S. 4

Abbildung 2.8: Jakiela et al. 2011, S. 14

Abbildung 2.9: Eipper et al. 2004, S. 2–4

Abbildung 2.10: Michalski 1993, S. 626

Abbildung 2.11: Michalski 2010, Folie 12

Abbildung 3.1: Holl / Bellendorf

Abbildung 4.1 links: Sailer 1887, S. 38; rechts: Hanfstaengl, ca. 1890, S. 85

Abbildung 4.5, 4.19, 4.31, 4.39, Anhang C 4, C 12: Holl nach Martens, <http://www.monumenten.bwk.tue.nl/CfC/default.aspx> Stand 12. Juli 2015

Abbildung 4.6 – 4.16, 4.37 rechts, 4.41: Holl / Raffler

Abbildung 4.36: Schwaiger / Kilian, Bearbeitung: Holl

Abbildung 4.37 links, 4.40: Kilian

Abbildung 5.6: Disl / Bichlmair

Holl: Abbildungen 1.3, 3.2 – 3.16; 4.2 – 4.4, 4.17 – 4.18, 4.20 – 4.30, 4.32 – 4.35, 4.38; 5.1 – 5.5,
5.7 – 5.9; 6.1 – 6.65; Anhang B; Anhang C 2, C 3, C 5 – 11; Anhang D

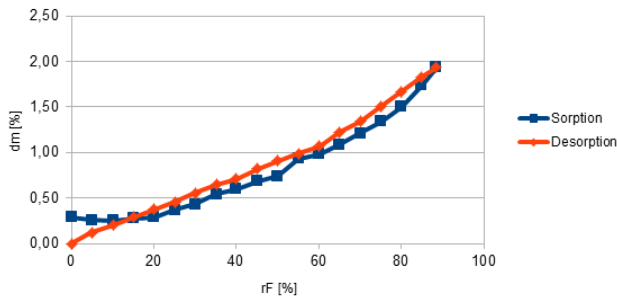
Anhang A

Ermittelte Materialkenndaten

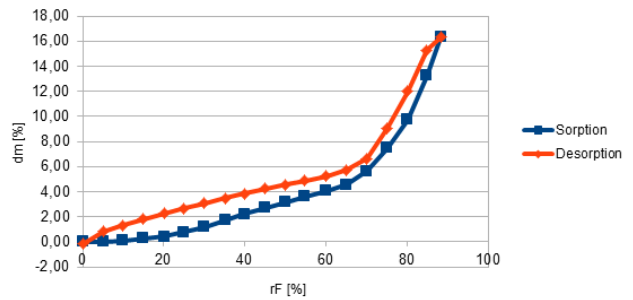
Material	μ-Wert dry cup	μ-Wert wet cup	sd-Wert dry cup	sd-Wert wet-cup	Rohdichte [kg/m ³]	Porosität [%]
Leinwand	37,2	-	0,037	-	647	0,6
Hautleim 10%	1,3	1,1	0,00007	0,00006	166,4	0,9
Grundierung Steinkreide	0,9	0,3	0,00008	0	987	0,4
Kreidgrund Gips-Kreide-Mix	4,1	3,4	0,0028	0,0023	1323	0,2
Gesso Grosso (Grundierung nur mit CaSO ₄)	11,1	6,5	0,024	0,014	1616	0,001
Kreidegrund nur CaCO ₃	0,4	1,0	0,0003	0,0006	1431	0,08
Halbölgrund nach Wehlte	1,0	2,7	0,00004	0,0001	5661	0,0001
Vollei mit Ocker	2,3	2,6	0,00006	0,00007	3087	0,0001
Vollei mit Zinkweiß	1,3	1,7	0,00004	0,00005	4560	0,0001
Leinöl Ocker	660,8	355,9	0,18	0,1	818	0,4
Leinöl Zinkweiß	573,1	149,1	0,11	0,03	872	0,4
Aquarell Ocker	2,6	2,2	0,0002	0,0002	404	0,7
Aquarell Weiß	1,7	0,8	0,00002	0,00001	2471	0,0001
Polimentvergoldung glanz	114,9	75,2	0,08	0,05	954	0,4
Mattgold	96,2	69,4	0,06	0,05	899	0,4
Mastix	247,4	77,8	0,014	0,004	2565	0,0001
Schellack	73,9	31,6	0,005	0,002	2116	0,0001
Dammar	73,4	45,5	0,002	0,001	4077	0,0001
Vergoldung mit Mixtion als Anlegemittel	681,4	293,5	0,02	0,01	7559	0,0001
Polimentvergoldung mit Schellacküberzug	1949,1	524,2	1,3	0,34	456	0,7
Ocker in Leinöl mit Dammar	1611,9	517,6	0,3	0,1	-	-
Zinkweiß in Leinöl mit Mastix	2724,7	1102,1	0,7	0,3	-	-
Polimentvergoldung mit Leimüberzug	167,63	85,0	0,1	0,1	686	0,5
Wabenplatte Fa. Klug Conservation	30,5	-	1,3	-	212	0,6
Leinwandgemälde für Validierung der Simulation (wachsdoubliert)	3465	-	14,9	-	925	0,65

Sorptionsisotherme

Dammar in Terpentinöl



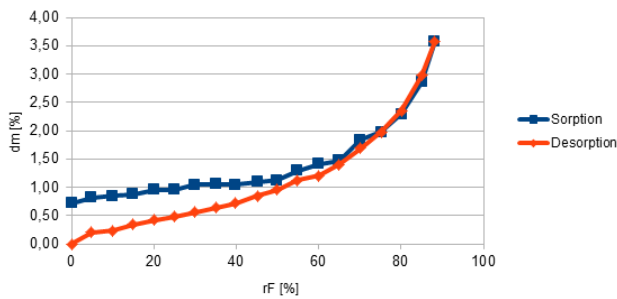
Zinkweiß in Gummi arabicum



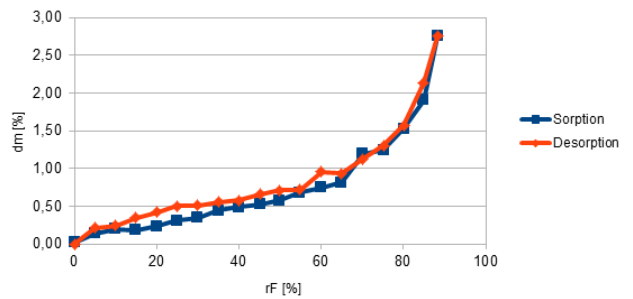
Dammar 60000, Lärchenterpentinöl 70107, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 1:3

Zinkweiß bleifrei 46300, Gummi arabicum 633000 in destilliertem Wasser, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 1:3

Zinkweiß in Leinöl



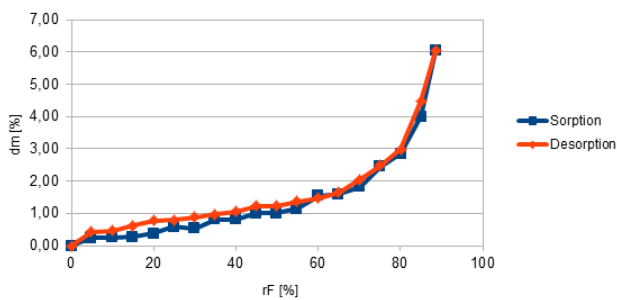
Ocker in Leinöl



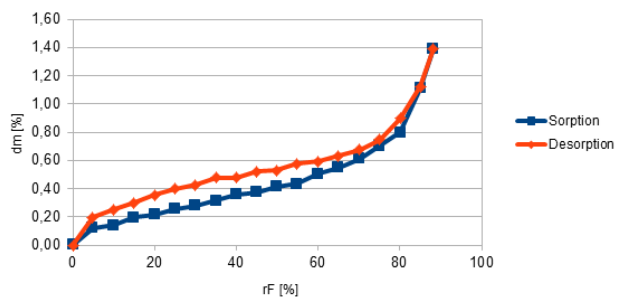
Zinkweiß bleifrei 46300, Leinöl natur kaltgeschlagen 73054, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 1:1

Goldocker DD 40214, Leinöl natur kaltgeschlagen 73054, beides Kremer Pigmente, Verhältnis 2:5

Halbölgrund nach Wehlte



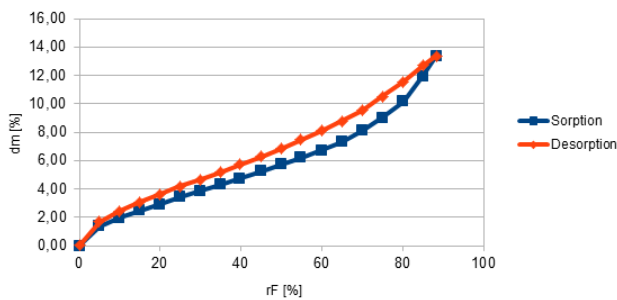
Gips-Kreide-Grundierung



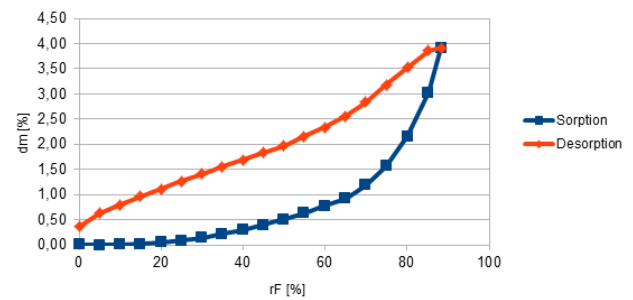
Wehlte 1967, S. 437.

Kreide von Bologna 58150, Champagner Kreide 58000, beides Kremer Pigmente, Hautleim in Körnern (601), Deffner & Johann, Verhältnis 2:1

Wabenplatte Fa. Klug Conservation



Leinwandgemälde wachsdoubliert



Anhang B

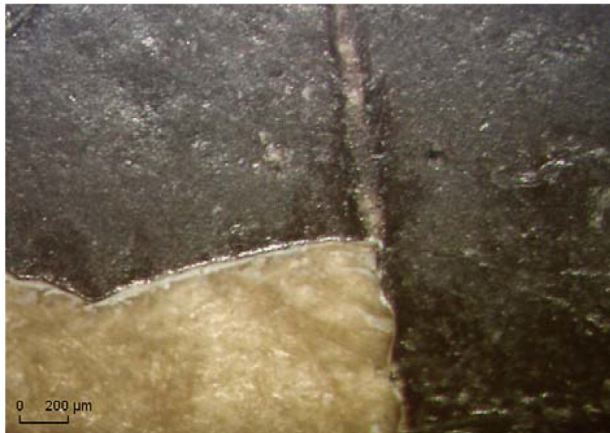
Protokoll Klimakammerversuche

Protokoll Klimakammerversuche	
Arbeitsbezeichnung: Männerportrait	 
Darstellung: Portrait eines alten Mannes mit Hut und Bart	
Beschreibung der einzelnen Schichten: Bildträger - Pappe - dünne weiße Grundierung - rückseitig mit einseitig braun gefärbtem Papier beklebt - rückseitig zwei Aufkleber aus Papier	
Maltechnik - vermutlich Öl, leicht pastoser Auftrag - Überzug	
Erwerb: Ebay, Juli 2010	
Maße: [l / b / h in cm] 12 x 10 x 0,2	
Untersuchungen / Kenntnis über Materialaufbau: [Querschliffe, BM-Untersuchungen] Querschliffe an brauner Jacke und gelbem Hintergrund vorhanden	
Zustandsbeschreibung: -Lockerung und Ausbruch (an einer Stelle) der Malschicht - Kratzer in der Malschicht - Papier der Rückseite löst sich und ist beschädigt - ungleichmäßiger Überzug	
Stand 21.09.2011	
Fotografische Dokumentation	
Medium, Ort: Bronnbach, Stereomikroskop Auflicht zu Beginn war noch ein anderes Kamerasystem eingebaut, ab dem 2. Zyklus wurde mit Leicasystem dokumentiert	Positionen im Raster, Beschreibung E6: Bart, weiße Strähne F6: Inkarnat J6: Hintergrund D9: braune Jacke F10: Ausbruchstelle

Klimakammerversuche	
Gesamtanzahl 3	weitere Informationen: während 1. Zyklus, Detailaufnahmen mit USB-Mikroskop, während 3. Zyklus Gesamtaufnahmen mit Digitalkamera, alle 30 Minuten
Zyklus 1 26.-29.10.2010 Beginn 26.10. 16:57, 40% rF, 24 °C, Dauer 6h → innerhalb einer Stunde Erhöhung auf 80%, 24°C, Dauer 6 h Ende: 29.10.2010, 8:00 Dauer der Bewitterung insgesamt 63 h	Auswertung - keine Veränderungen in der Malschicht - die Ausbruchsstelle ist gleich geblieben
Zyklus 2 12.-18.11.2010 Beginn 12.11. 14:00, 40% rF, 24 °C, Dauer 6 h → innerhalb einer Stunde Erhöhung auf 80%, 24°C, Dauer 6 h Ende: 18.11.2010, 10:00, insgesamt 140 h	Auswertung weitere Lockerung der Malschicht am Ausbruch festzustellen, beim fotografieren brach die Scholle ab
Zyklus 3 16.12.- 1.1.2011 Beginn 16.12. 13:35, 40% rF, 24 °C, Dauer 6 h → innerhalb einer Stunde Erhöhung auf 80%, 24°C, Dauer 6 h insgesamte Dauer 28,5 h, 14 Zyklen → 399 h Ende: 1.1.2011, 20:00	Auswertung weitere Lockerung der Malschicht am Ausbruch festzustellen
Gesamtbewitterung: [h]: 602	
Gesamtbewitterungszyklen: 21	
erste Veränderung nach 7 Bewitterungszyklen Beschreibung: an bereits vorgeschädigten Stellen, setzte sich die Lockerung / Ausbruch weiter fort	

Vergleich vorher nachher (relevante Abbildungen)

[Datum / Versuchsnr.]



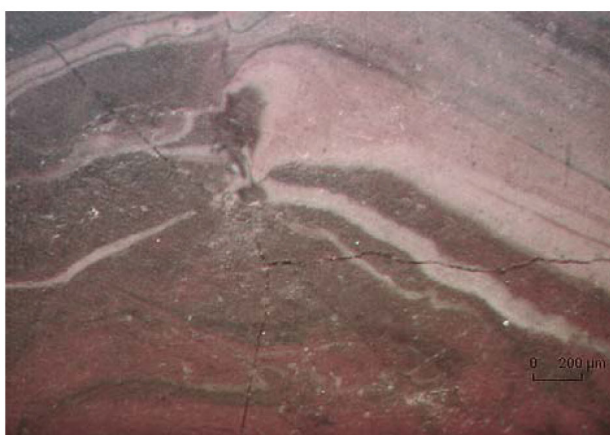
F10, Ausbruch nach V1, 29.10.2010



F10, Ausbruch nach V2, 18.11.2010



F10, Ausbruch, selbe Stelle, 90° gegen Uhrzeigersinn gedreht



E6, Vorzustand, 26.10.2010

E6, nach V2, 18.11.2010
keine Veränderung sichtbar

Anhang C

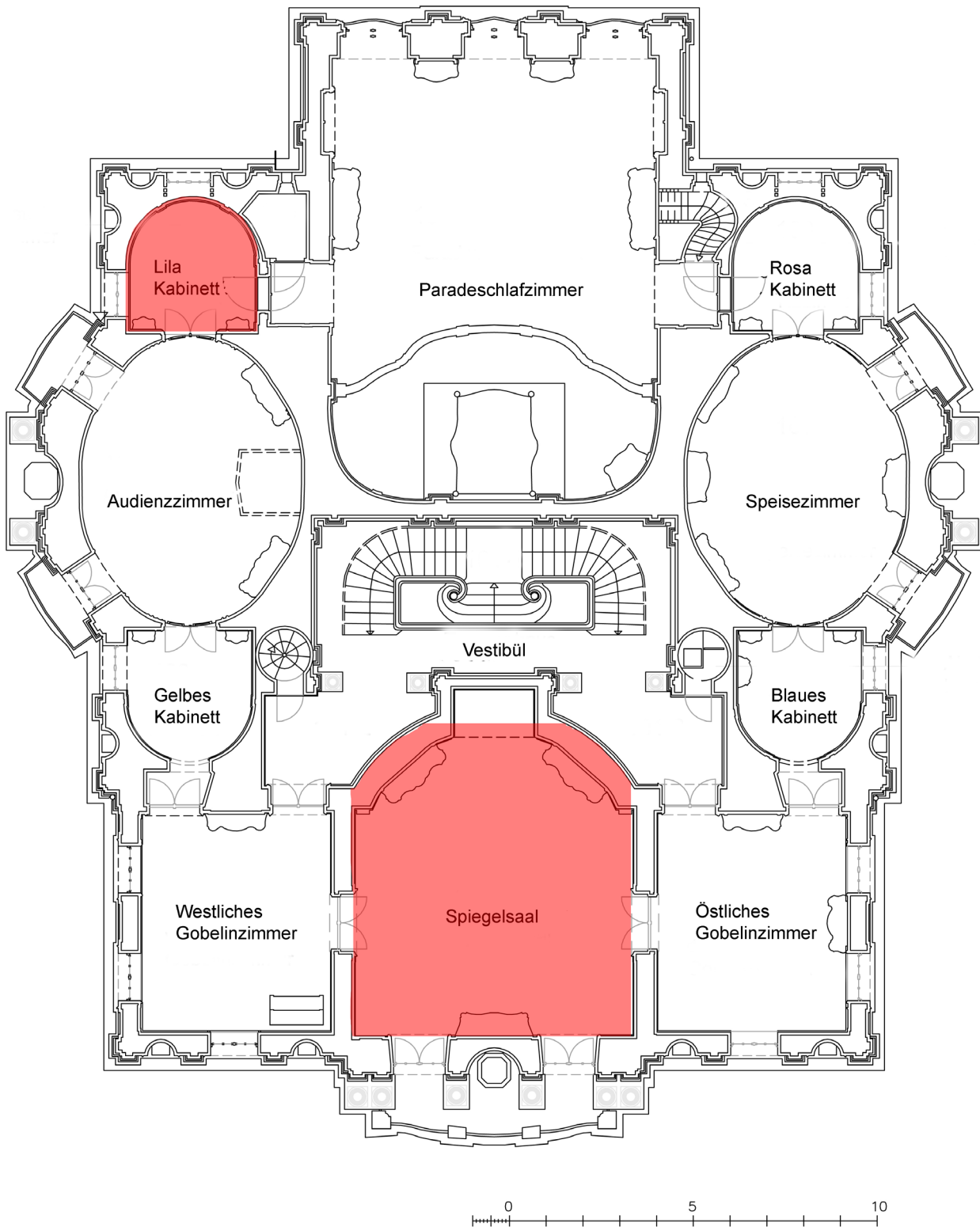


Abbildung C 1:
Schloss Linderhof, 1. Obergeschoss: Der Spiegelsaal und das Lila Kabinett sind rot markiert (Vergleich der Klimadaten).

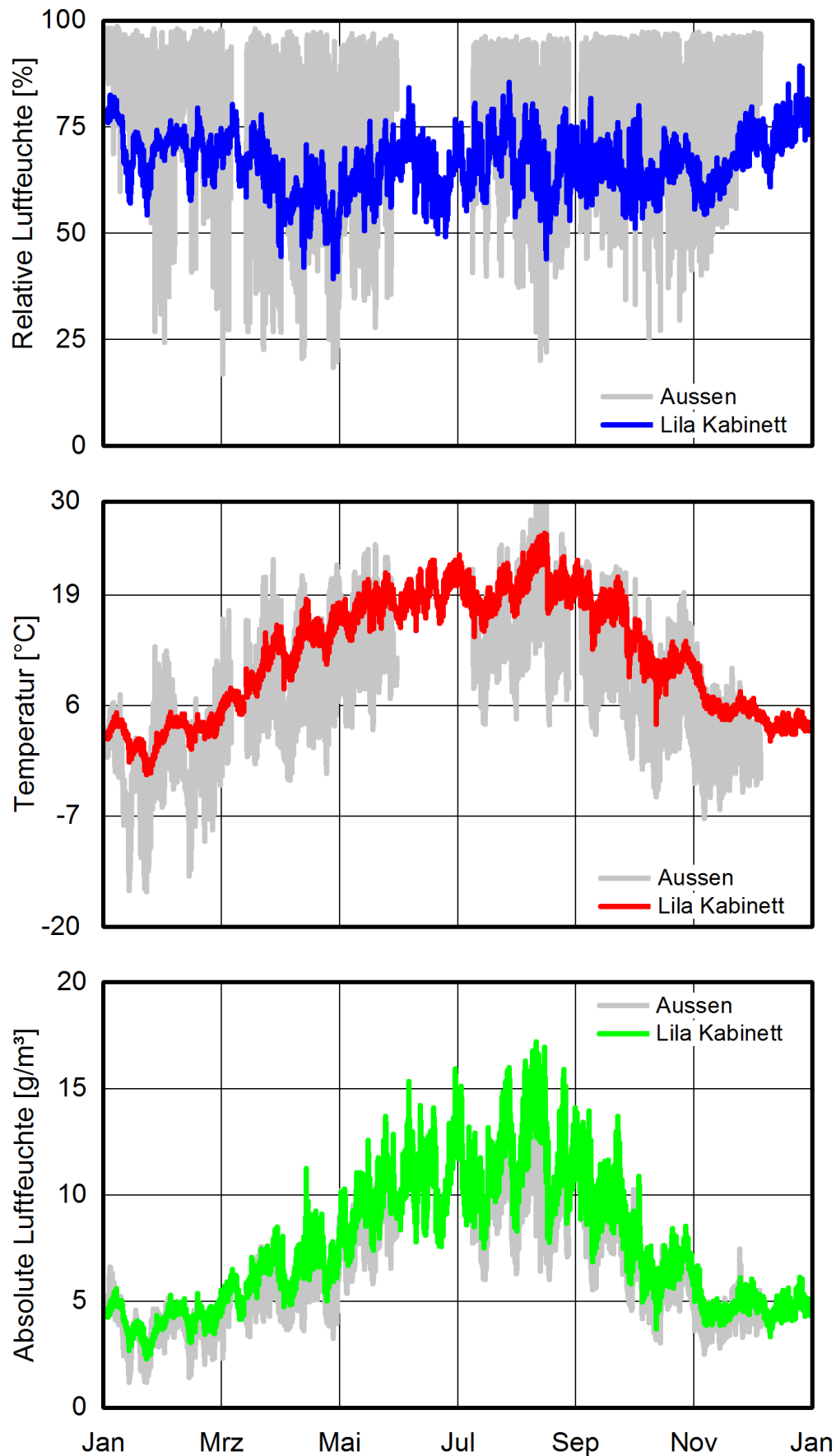


Abbildung C 2:
Liniendiagramm für relative Luftfeuchte (oben), Temperatur (Mitte) und absolute Luftfeuchte (unten) des Lila Kabinetts
verglichen mit dem Außenklima. Zeitraum: 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012.

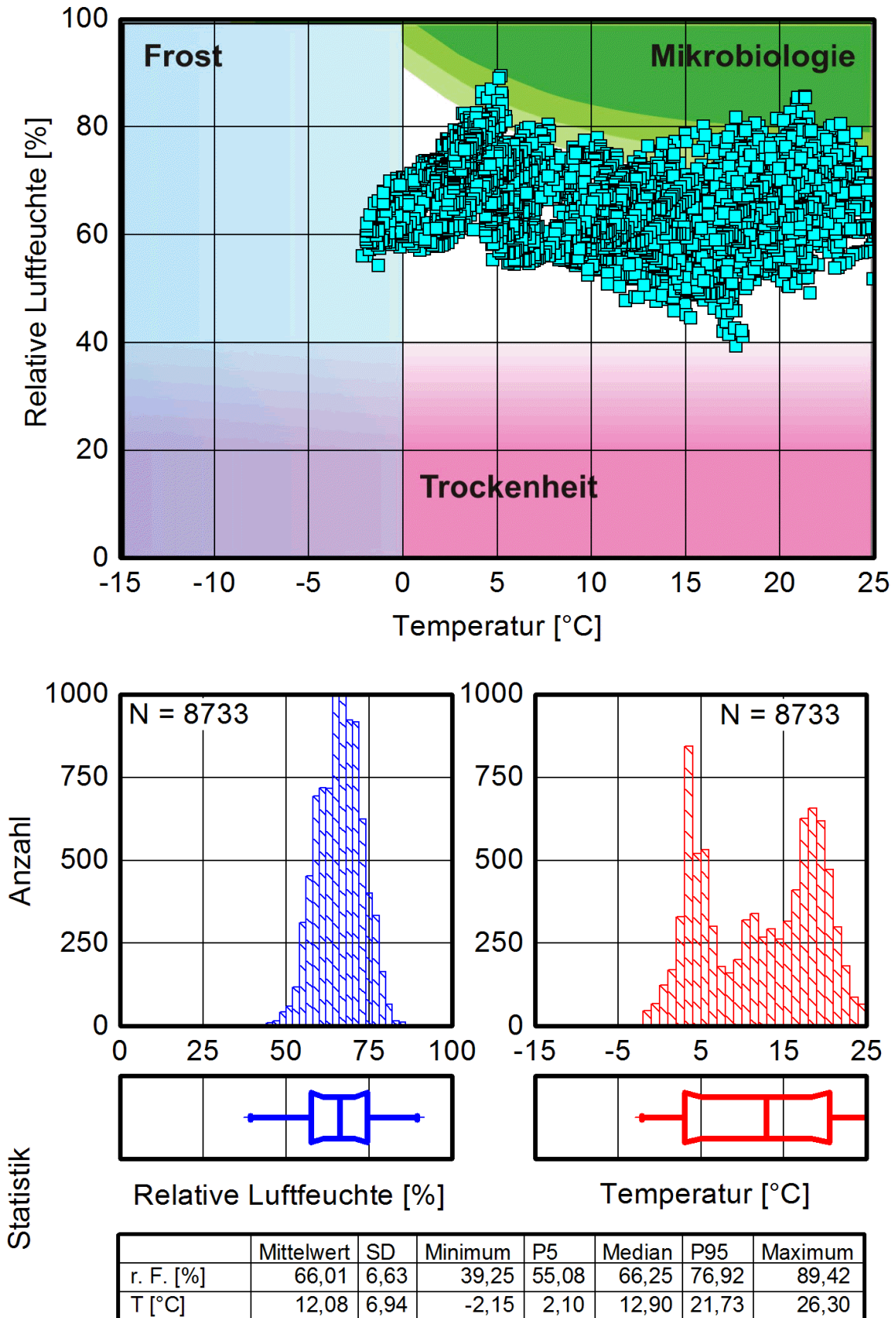


Abbildung C 3: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte des Lila Kabinetts. Zeitraum: 12. Januar 2011 bis 11. Januar 2012.

Linderhof Palace (D), Lilac Cabinet Surface

21-Jun-2009 tot 11-Jan-2012

	Mould	LM	Base material	Pictorial layer
PAPER	germination? 0.000911		-	-
PANEL PAINTING	germination? 0.0702		damage possible	safe
FURNITURE	germination? 0.0727		safe	-
SCULPTURE	germination? 0.0701		safe	-

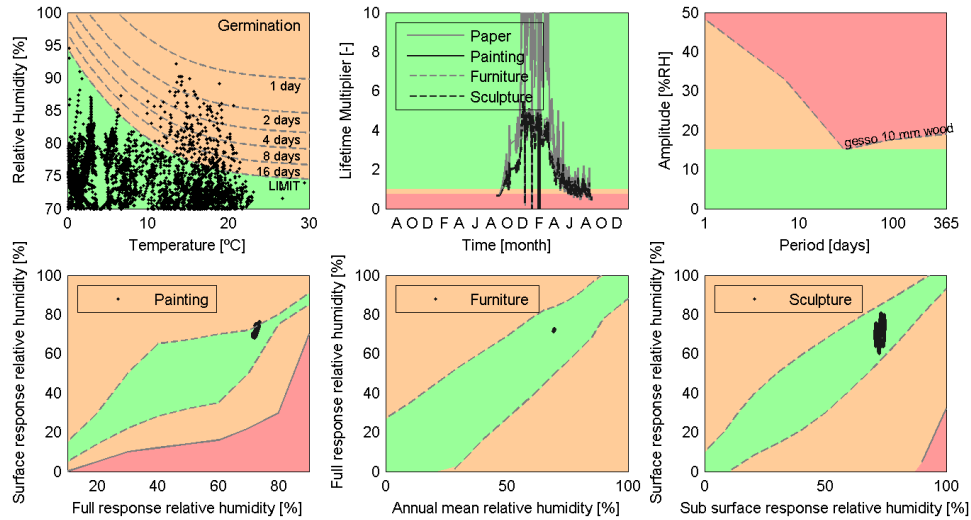


Abbildung C 4: Risikoprognosen nach Martens für das Lila Kabinett basierend auf den Klimadaten von Juni 2009 bis Januar 2012, gemessen an der Wandoberfläche.

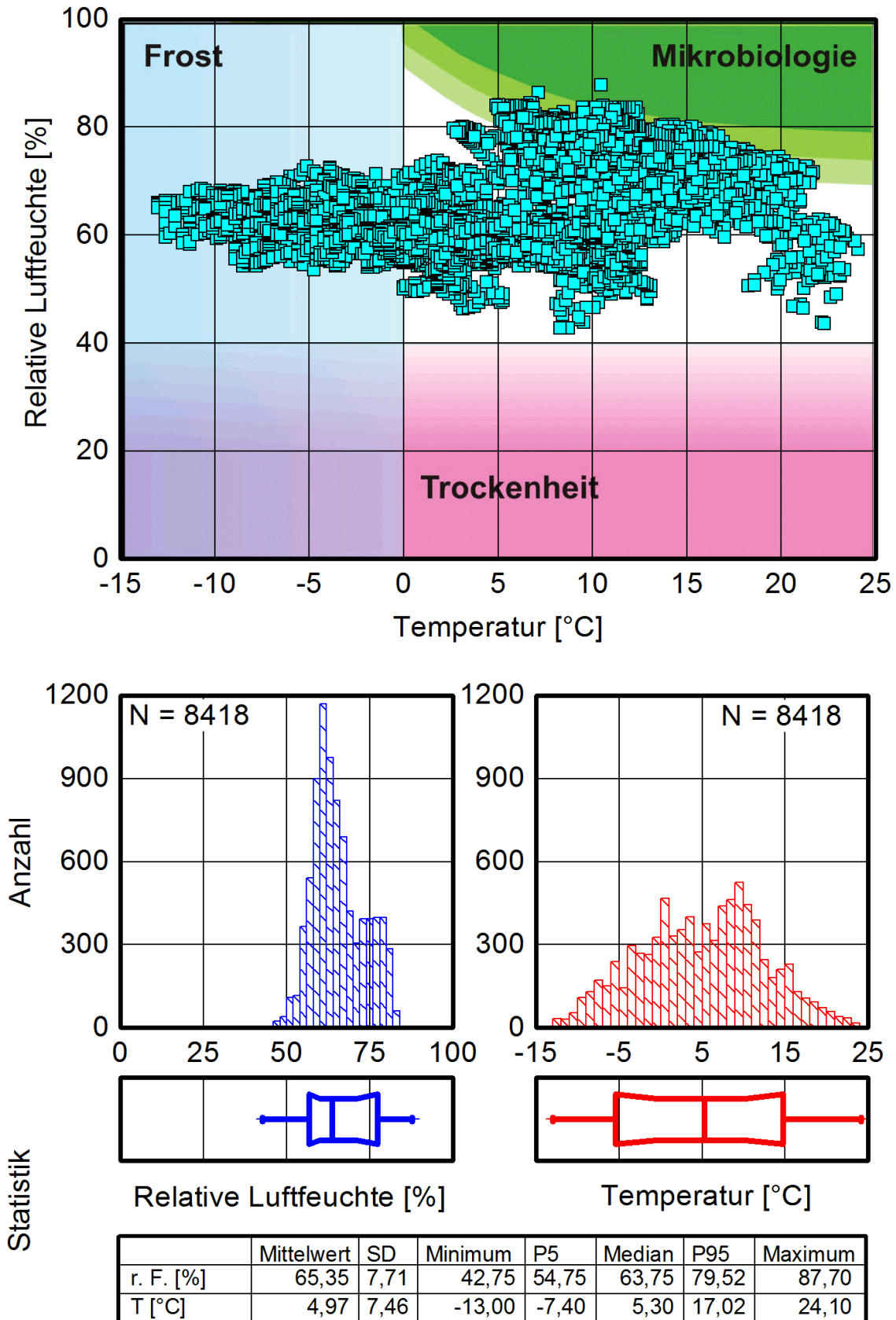


Abbildung C 5: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte des Türkischen Saals im Königshaus am Schachen. Zeitraum: 26. August 2010 bis 26. August 2011.

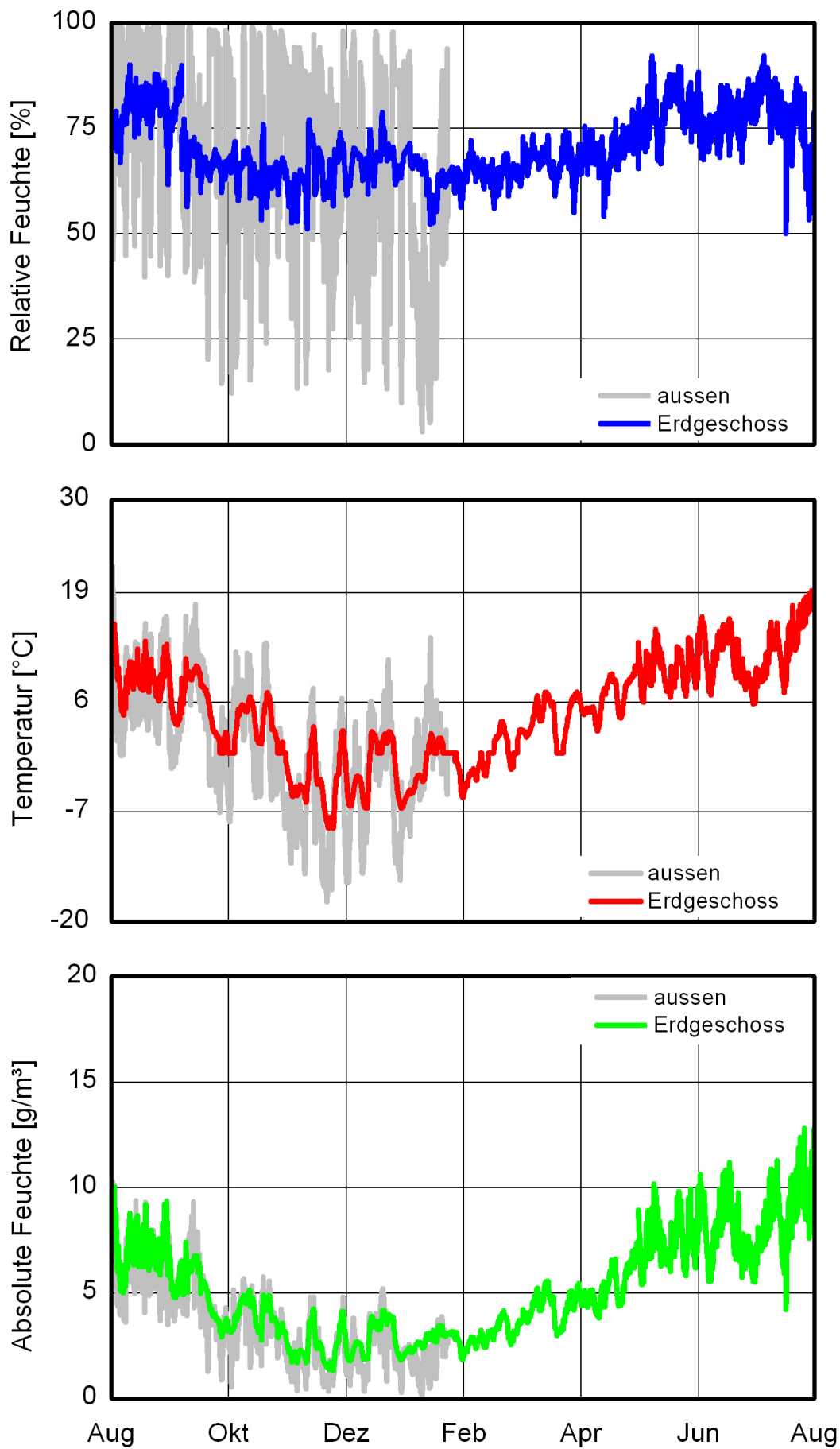


Abbildung C 6:
Linienendiagramme für relative Luftfeuchte (oben), Temperatur (Mitte) und absolute Luftfeuchte (unten) des Königshaus am Schachen, Erdgeschoss verglichen mit dem Außenklima. Zeitraum: 26. August 2010 bis 26. August 2011.

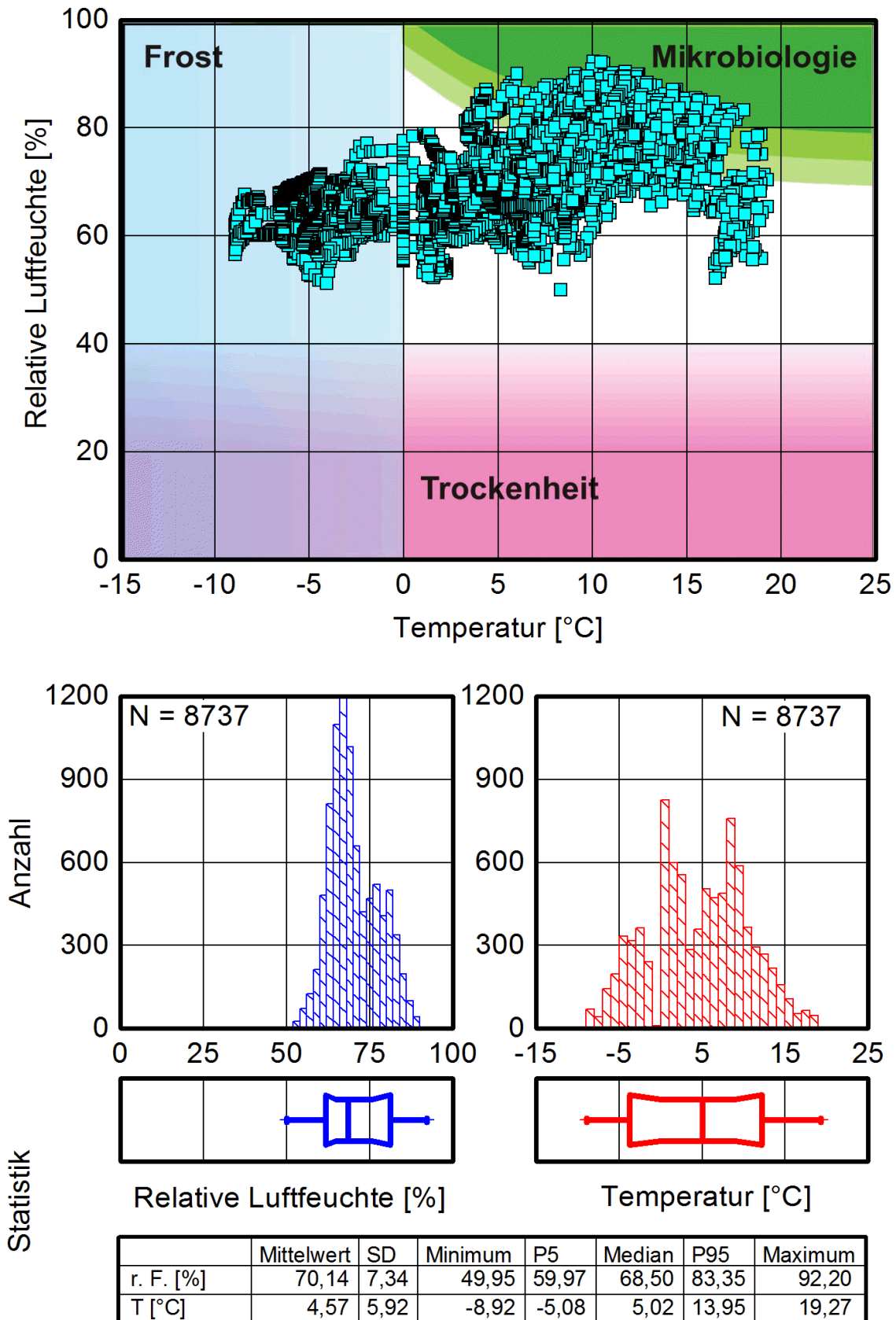


Abbildung C 7: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte des Königshauses am Schachen, Erdgeschoss. Zeitraum: 26. August 2010 bis 26. August 2011.

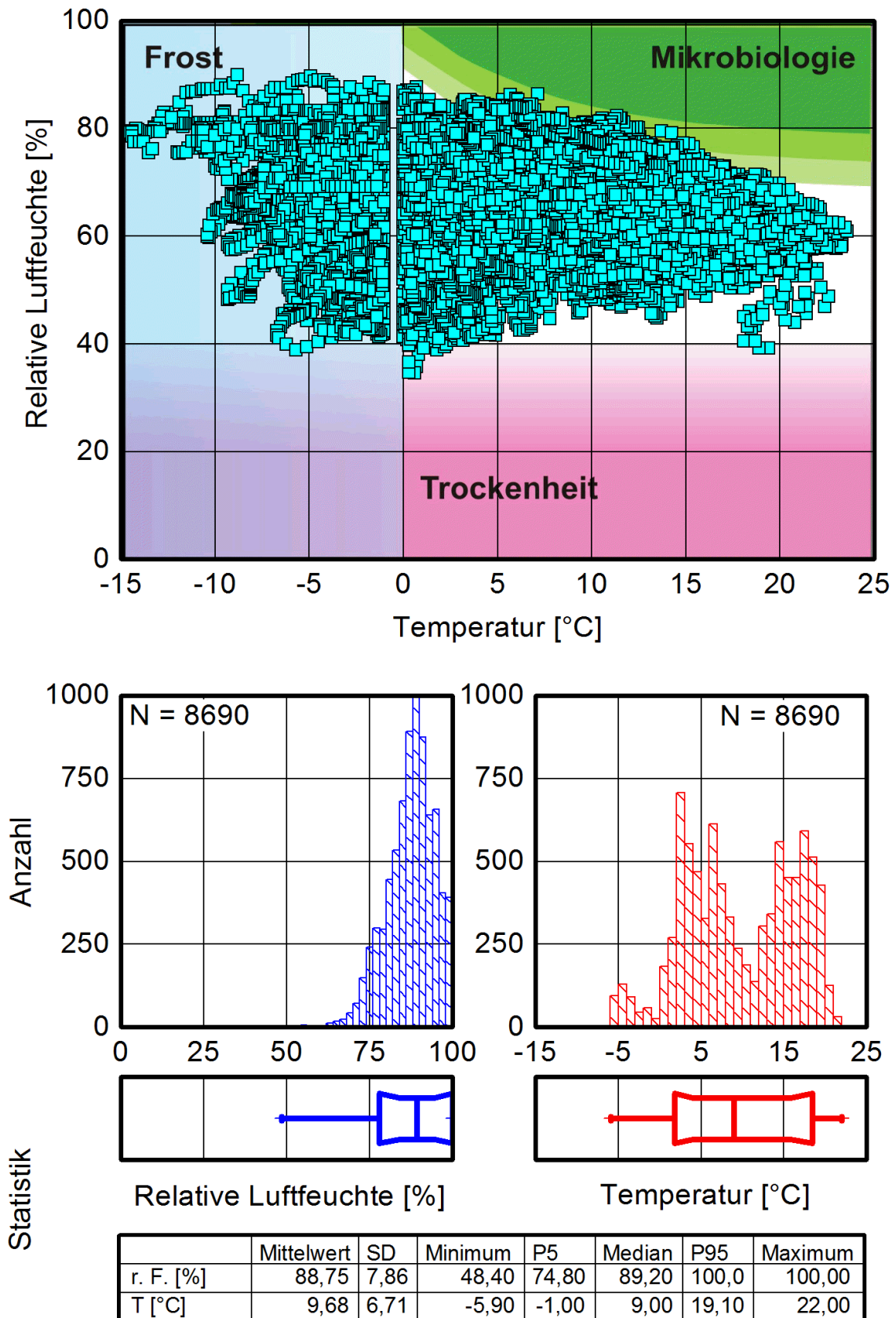


Abbildung C 8: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte in St. Margaretha in Roggersdorf. Zeitraum: 30. August 2011 bis 30. August 2012.

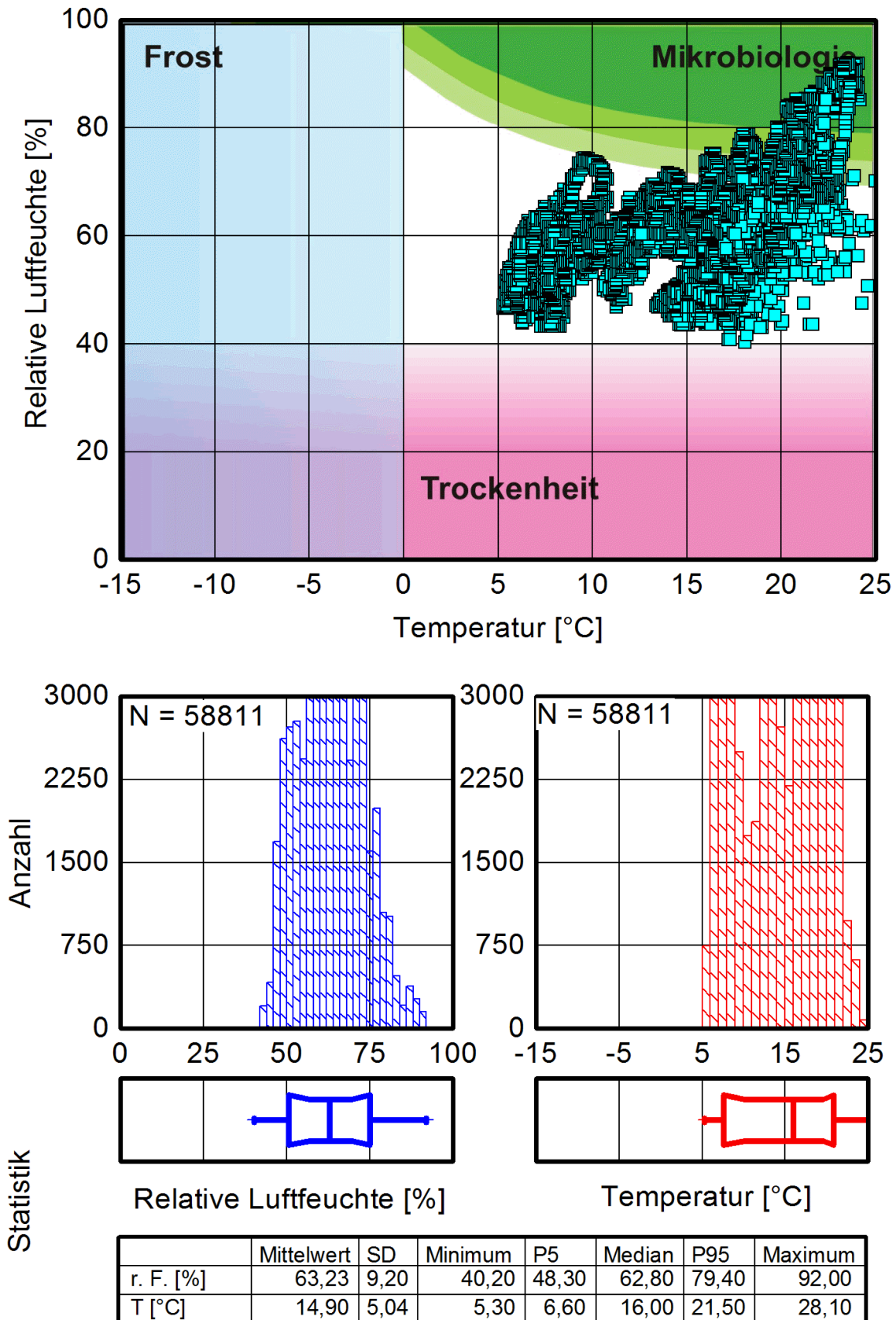


Abbildung C 9: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte in der Renatuskapelle Raummitte, Zeitraum: 15. September 2010 bis 15. September 2011.

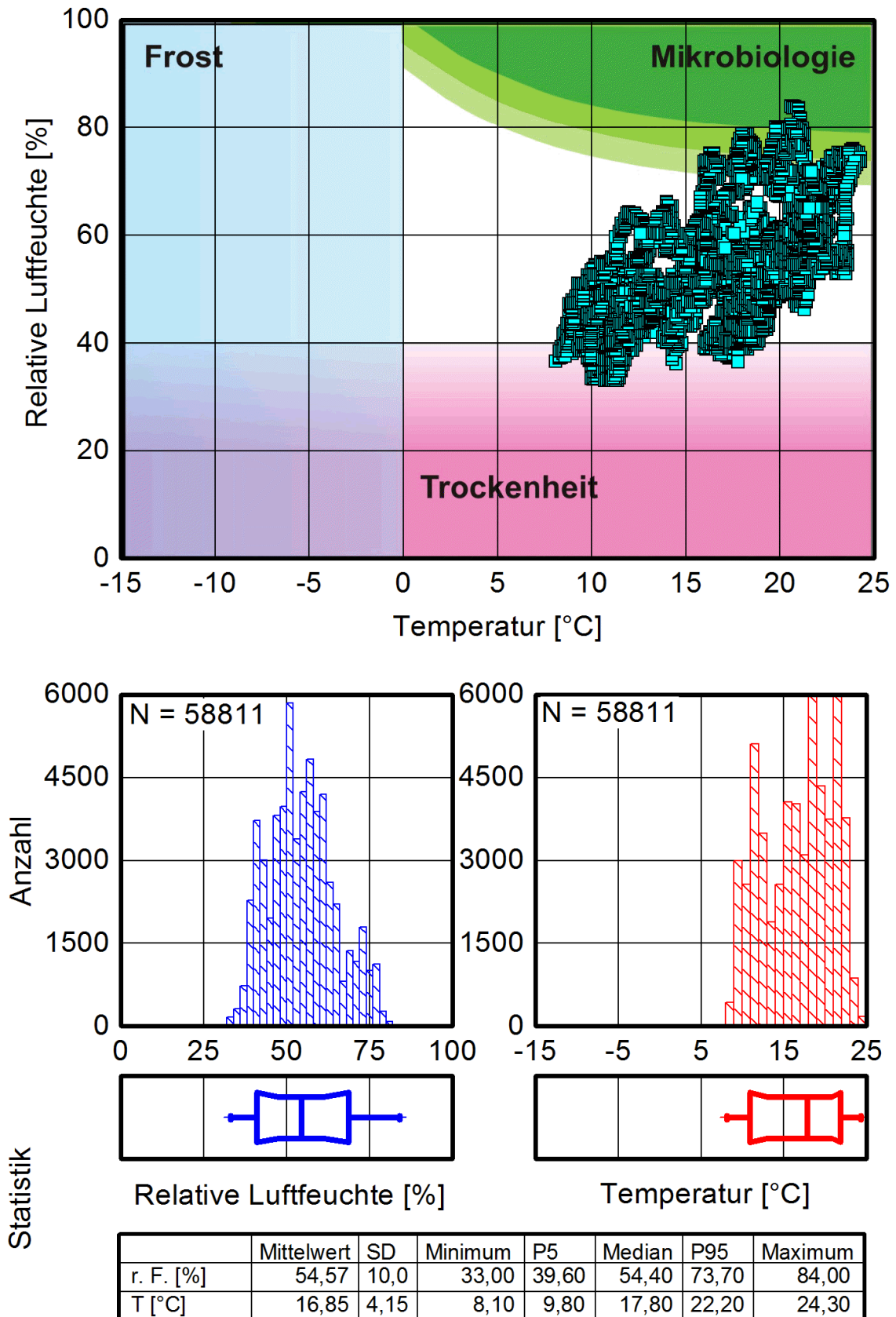


Abbildung C 10: Streudiagramm (oben), Histogramme (Mitte) und statistische Auswertung für Temperatur und relative Luftfeuchte in der Renatuskapelle hinter dem westlichen Seitenaltar, Zeitraum: 15. September 2010 bis 15. September 2011.

Renatus Chapel at Lustheim Palace (D), Altar

01-Sep-2009 tot 02-Sep-2011

	Mould	LM	Base material	Pictorial layer
PAPER	safe	1.17	-	-
PANEL PAINTING	safe	1.19	safe	safe
FURNITURE	safe	1.19	safe	-
SCULPTURE	safe	1.13	damage possible	-

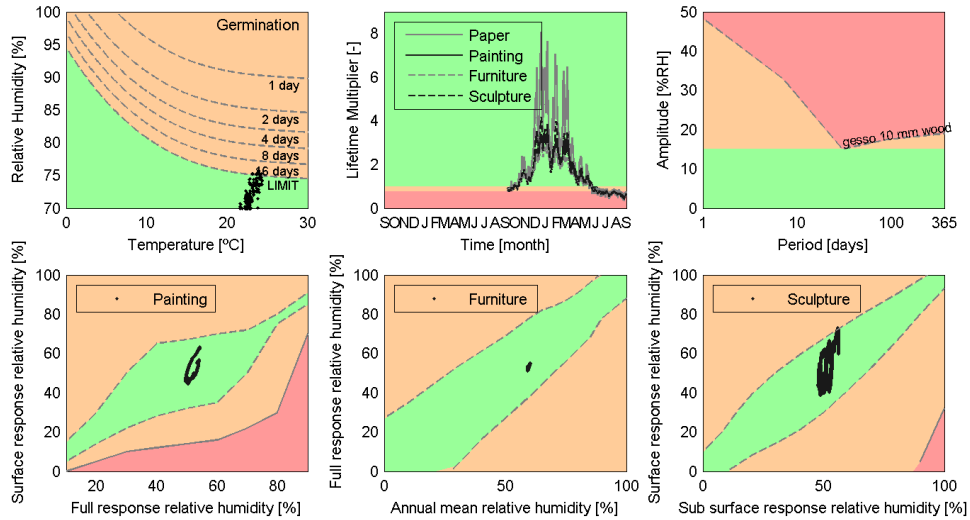


Abbildung C 11: Risikoprognosen nach Martens für die Renatuskapelle basierend auf den Klimadaten von September 2009 bis September 2011, gemessen hinter der Altarrückseite von St. Franziskus.

Anhang D

Simulation

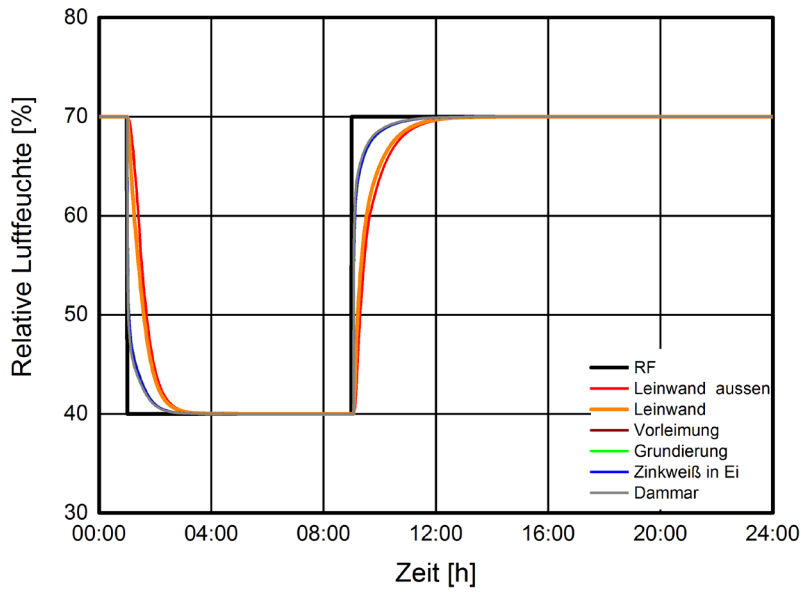


Abbildung D 1:
Ergebnisse der Simulation von Zinkweiß in Ei mit abgedichteter Rückseite auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

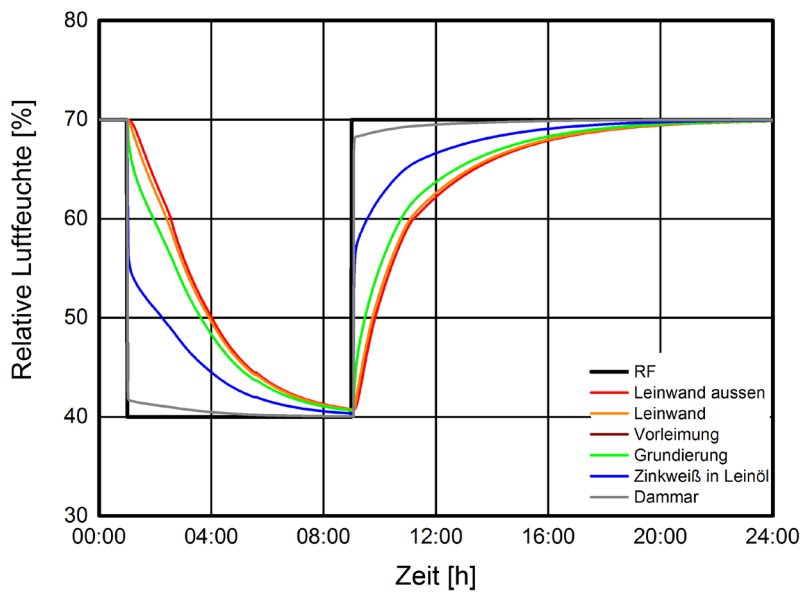


Abbildung D 2:
Ergebnisse der Simulation von Zinkweiß in Leinöl mit abgedichteter Rückseite auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

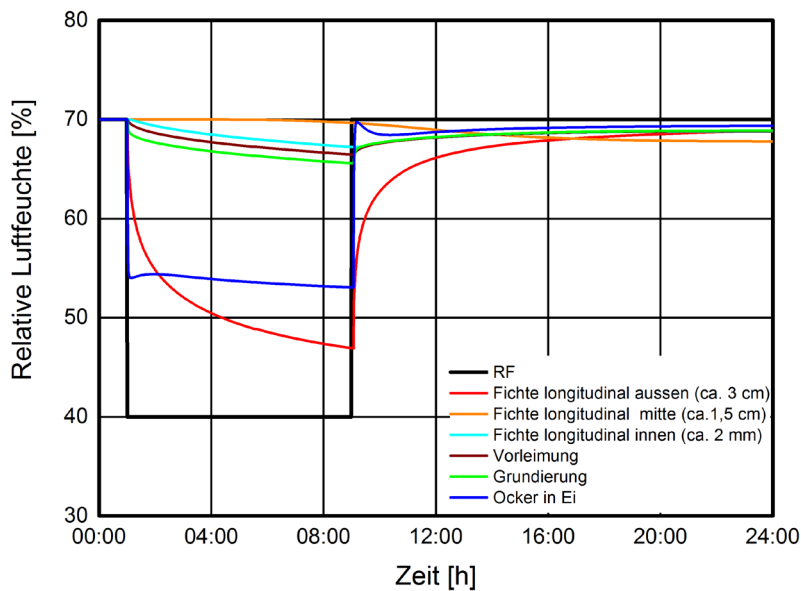


Abbildung D3:
Reaktion von Fichte longitudinal mit Ocker in Ei als Malschicht auf eine achtstündige Schwankung von 70 auf 40 % rF.

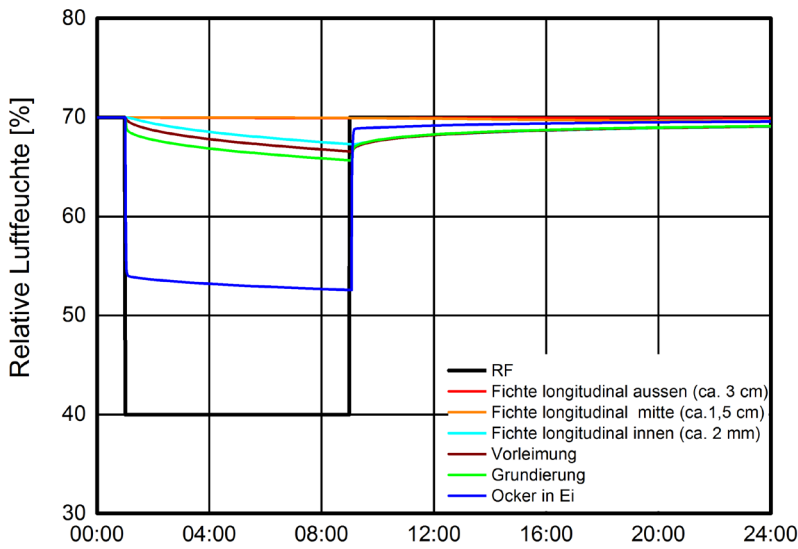


Abbildung D 4:
 Reaktion von Fichte longitudinal
 mit Ocker in Ei als Malschicht auf
 eine achtstündige Schwankung von
 70 auf 40 % rF mit abgedichteter
 Rückseite.

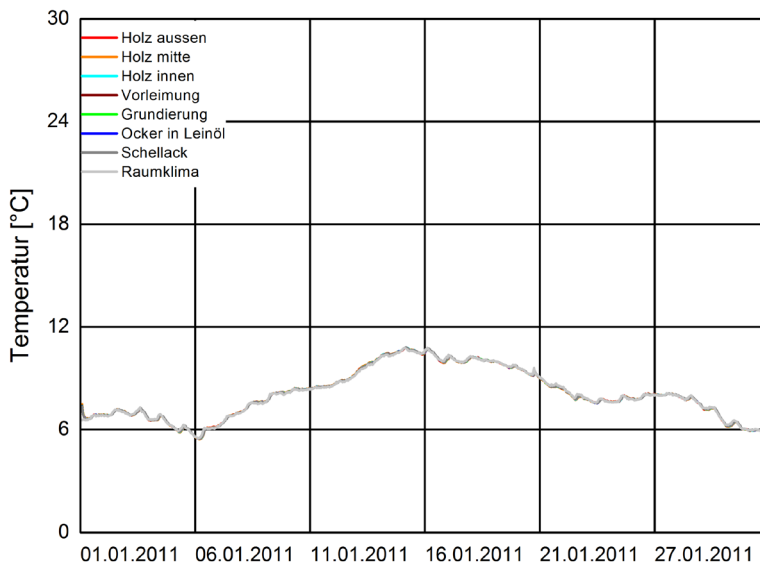


Abbildung D 5:
 Renatuskapelle, Detaildarstellung
 der Temperaturverläufe von gefas-
 stem Holz für den Winter (1.1. –
 1.2.2011).

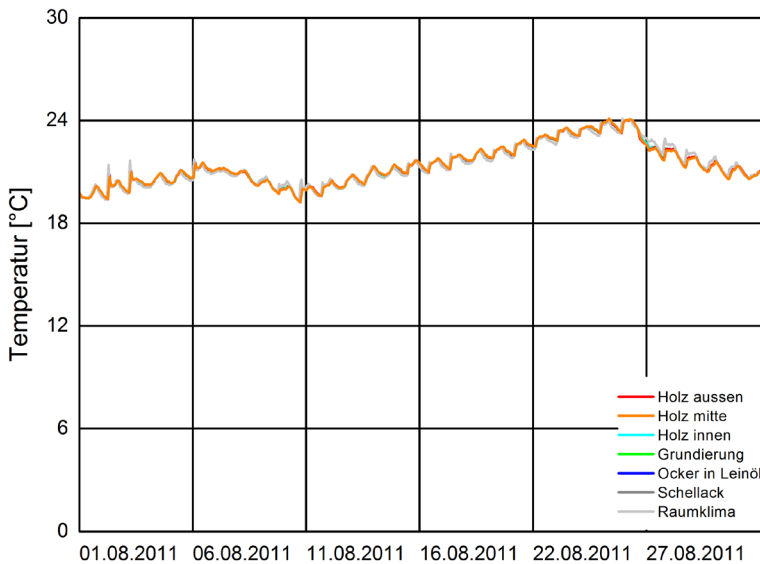


Abbildung D 6:
 Renatuskapelle, Detaildarstel-
 lung der Temperatur-verläufe von
 gefasstem für den Sommer (1.8. –
 1.9.2011).