



DBU-Projekt Klimawandel an kulturellem Erbe, AZ 35598-01/02-45

Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern.

Analyse und Empfehlungen zum Umgang hinsichtlich der Auswirkungen der globalen, anthropogenen Klimaerwärmung.

Geänderte Laufzeit 1. März 2020 – 31. Dezember 2021

Abschlussbericht

Bamberg, den 31.03.2022

Otto-Friedrich-Universität Bamberg

Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT)

Professur für Restaurierungswissenschaft

Dr. Kristina Holl | Prof. Dr. Paul Bellendorf

Am Zwinger 6

96047 Bamberg

E-Mail: kristina.holl@uni-bamberg.de; paul.bellendorf@uni-bamberg.de

Inhaltsverzeichnis

| | |
|---|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 4 |
| Zusammenfassung | 6 |
| Rahmenbedingungen | 7 |
| 1. Einführung | 8 |
| 2. Problemstellung und Herangehensweise | 9 |
| 2.1 Fragebogen | 10 |
| 2.2 Erfassung von Schäden durch Trockenheit | 14 |
| 2.3 Raumklimamessung | 17 |
| 2.4 Streifenlichtscanning | 19 |
| 2.5 Klimaschrankversuche | 22 |
| 2.6 Zeitrafferaufnahmen | 26 |
| 3. Fallstudien | 27 |
| 3.1 Wandmalereien in Schloss Albrechtsburg | 27 |
| 3.1.1 Auswertung Klimamessungen | 27 |
| 3.1.2 Auswertung der Streifenlichtscans | 28 |
| 3.2 Tafelgemälde von Lucas Cranach d. Jüngeren in Schloss Augustusburg | 29 |
| 3.2.1 Auswertung Klimamessungen | 32 |
| 3.3 Ledertapeten von Schloss Moritzburg | 36 |
| 3.3.1 Auswertung Klimamessungen | 37 |
| 3.3.2 Auswertung Streifenlichtscanning | 38 |
| 3.4 Flügelretabel in St. Nicolai Döbeln | 40 |
| 3.4.1 Auswertung Klimamessungen | 40 |
| 3.4.2 Auswertung Streifenlichtscanning | 41 |
| 4. Fazit | 43 |
| 5. Öffentlichkeitsarbeit | 44 |
| Anhang | 47 |
| A Schloss Albrechtsburg | 47 |
| Position der Streifenlichtmessungen | 47 |
| B Schloss Augustusburg | 50 |

| | |
|--|----|
| B1 Dokumentation der Messposition der Klimamessungen | 50 |
| B2 Auswertung Klimadaten Langzeitmessung durch IDK | 52 |
| B3 Position der Streifenlichtmessung am Altargemälde | 53 |
| C Schloss Moritzburg | 54 |
| Dokumentation der Messpositionen der Klimamessungen | 54 |
| D Döbeln | 59 |
| D1 Auswertung Klimadaten Langzeitmessung durch IDK | 59 |
| D2 Position der Streifenlichtmessungen | 61 |
| Dokumentation Scanversuche Klimakammer | 69 |
| Holzfurnier | 69 |
| Ledertapete | 70 |

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abb. 1: Auflistung der Fragen zur Auswirkung des Klimawandels | 11 |
| Abb. 2: Anteilige Verteilung der Teilnahmen nach Bundesländern | 12 |
| Abb. 3: Angegebene Klimaereignisse | 13 |
| Abb. 4: Übersicht Ecke Nordseite/Westseite | 14 |
| Abb. 5: Risse in den Holzvertäfelungen an der Nordseite (links) und der Westseite (rechts) | 15 |
| Abb. 6: Lockerungen und Substanzverluste in gefassten Holzvertäfelungen der Emporen | 15 |
| Abb. 7: Rissbildung im polychrom gefassten Kanzelaltar | 16 |
| Abb. 8: Risse an der Ostwand der Dorfkirche in Druxberge | 16 |
| Abb. 9: Farbabplatzungen am Niedergräfenhainer Altar | 17 |
| Abb. 10: Erfassung des Mikroklimas an Wandmalereien in der Albrechtsburg | 18 |
| Abb. 11: Streifenlichtscanner an den historischen Ledertapeten in Quartier 6 in Schloss Moritzburg. Diese Scanflächen wurden mit dem 75mm-Objektiven erfasst | 19 |
| Abb. 12: Links: OneShot-Ausschnitt der Scans der Ledertapeten in Moritzburg; 75er Objektiv mit 0,03 mm Auflösung. Rechts: Gekippte Ansicht der gescannten Wandoberfläche im großen Appellationsaal in der Albrechtsburg, Meißen; 250er Objektiv mit 0,1 mm Auflösung | 20 |
| Abb. 13: Scanvergleich am Beispiel des linken Altarflügels des Tafelgemäldes von St. Nicolai in Döbeln. | 21 |
| Abb. 14: Aufbau der Messsituation bei offener Klimaschranktür und mit eingestellter Glasplatte | 22 |
| Abb. 15: Holzfurnier an Schaumstoffplatte angepinntes Holzfurnier (vor Wahl der Pins) | 23 |
| Abb. 16: Untersuchung der Auswirkung einer 10 % igen Klimaschwankung von 50 % auf 40 % r.F. | 24 |
| Abb. 17: Ledertapete M 10 FH 58, rechts: M 10 FH 58 | 25 |
| Abb. 18: Bewertung der Auswirkungen einer Klimaschwankung von 40 % auf 27 % r.F. | 25 |
| Abb. 19: Bewertung der Auswirkungen einer Klimaschwankung von 40 % auf 27 % r.F. | 26 |
| Abb. 20: Schloss Albrechtsburg, Kleine Tafelstube, Raumklima 2018 bis 2021 | 27 |
| Abb. 21: Darstellung der relativen Feuchte und Temperaturen an den drei Messpositionen über den gesamten Messzeitraum des Forschungsprojektes | 28 |
| Abb. 22: Aufnahme der gelockerten Wandmalerei im Großen Appellationszimmer in Schloss Albrechtsburg. | 29 |
| Abb. 23: Vergleich der Referenzfläche im Großen und Kleinen Appellationsaal zwischen 10.März und 18. Juni 2021 | 29 |
| Abb. 24: Altargemälde von Lucas Cranach dem Jüngeren mit den Positionen der Streifenlichtscanaufnahmen | 30 |
| Abb. 25: 3D-Scan an der Predella am Altar der Schlosskirche Augustusburg | 31 |
| Abb. 26: Links: 3D-Scan auf Gerüst zum Zwecke der Bestandsdokumentation. Rechts: Gesamtscan des Cranach-Altars in der Schlosskirche Augustusburg mit dem 800er Objektiv des Comet L3D | 31 |
| Abb. 27: Scanvorschau der Schlosskirche der Augustusburg des Faro Focus Scans | 32 |
| Abb. 28: Schloss Augustusburg, Schlosskapelle, Raumklima 1999 bis 2021 | 33 |

| | |
|--|----|
| Abb. 29: Langzeitklimamessung am Tafelgemälde in Schloss Augustusburg an unterschiedlichen Positionen bzw. in unterschiedlicher Schichttiefe _____ | 33 |
| Abb. 30: Liniendiagramm der Temperatur (rot) und relativen Feuchte (blau) für den gesamten Messzeitraum von August 2020 bis August 2021 _____ | 34 |
| Abb. 31: 3D-Vergleich des Tafelgemäldes zwischen April und Juni 2021 _____ | 35 |
| Abb. 32: 3D-Vergleich der Predella zwischen April und Juni 2021 _____ | 35 |
| Abb. 33: Langzeitklimamessung von Temperatur und relative Feuchte im Schrankzimmer Q7 von Schloss Moritzburg _____ | 37 |
| Abb. 34: Auswertung der Klimadaten der drei Räume Q6, Q7 und Q8 über den Messzeitraum von 23.8.2020 bis 12.7. 2021 _____ | 38 |
| Abb. 35: 3D-Vergleich der Ledertapete zwischen August 2020 und November 2020 _____ | 39 |
| Abb. 36: 3D-Vergleich der Ledertapete zwischen Mai und Juli 2021, die zur besseren Lesbarkeit auf eine Fotografie des Ausschnitts gelegt wurde _____ | 39 |
| Abb. 37: Langzeit-Klimamessung in der St. Nicolaikirche in Döbeln von 2003 bis 2018 _____ | 41 |
| Abb. 38: Vergleich der Messungen von Oktober 2020 mit März 2021, linke Tafel (links) und rechte Tafel (rechts) _____ | 42 |
| Abb. 39: Vergleich der Messungen von März und Juni 2021, linke Tafel (links) und rechte Tafel (rechts) _____ | 42 |

Zusammenfassung

Die immer auffälligeren Folgen des Klimawandels wirken sich auch auf unser Kulturgut aus. Während in historischen Gebäuden bisher zu hohe Luftfeuchten das Problem darstellten, werden jetzt in Innenräumen immer öfter kritische Werte unter 40 % r.F. gemessen. Das zeigte Auswertung von Klimadatensätze aus Langzeitklimamessungen in historischen Gebäuden in Sachsen und Sachsen-Anhalt. Diese geringen Luftfeuchten führen zu einem hohen Schadensrisiko für zahlreiche Kunstgattungen. Speziell bei polychromen Oberflächen, wie Leinwandgemälde, Papier- und Ledertapeten, gefasste Holzoberflächen sowie Wandmalerei, kann es zu einer irreversiblen Schädigung, wie Rissbildung, Lockerung und Substanzverlust der Farbfassung kommen.

Unklar ist jedoch bisher, wann ein Raumklima zu trocken wird, da dies stark von den darin befindlichen Materialkombinationen, ihres Erhaltungszustands und ihrer (Restaurierungs-) Geschichte ist. Durch die Dokumentation der Veränderungen an der Ausstattung in Kombination mit einer detaillierten Erfassung des Raumklimas kann ein zunächst ein objektspezifisches, individuelles Risiko ermittelt werden. Diesen Ansatz verfolgt das Projekt „Kleiner 40“. Der Name bezieht sich auf die bisher als kritisch angesehenen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit von unter 40 % r. F.

Im Rahmen des Projektes wurden drei unterschiedliche Materialkombinationen (Holztafelgemälde, Wandmalerei und Ledertapeten) an vier Standorten (Schloss Augustusburg, Schloss Albrechtsburg, Schloss Moritzburg und St. Nicolaikirche Döbeln) in Hinblick auf ihre klimatisch bedingte Veränderung untersucht. Auch wenn der Untersuchungszeitraum von März 2020 bis Dezember 2021 ohne Hitzeperioden vermeintlich günstigere klimatische Voraussetzungen brachte, wurden in den Häusern relative Feuchte unter 40 % und Temperaturen über 25 °C verzeichnet. Die Reaktion viel, wie erwartet je nach Materialgattung unterschiedlich aus. Die stärksten Bewegungen waren in den Ledertapeten festzustellen. Als kritisch wurden auch die Bewegungen in den beiden Holztafelgemälden eingeschätzt. Insbesondere die vorgeschädigten Tafeln des Flügelretabels in Döbeln zeigten alarmierende Bewegungen. An den Wandmalereien in Schloss Albrechtsburg traten die geringsten Bewegungen auf.

Das Monitoring mit dem Streifenlichtscanner ist eine zerstörungsfreie und hochauflösende Methode zur Untersuchung von historischen Oberflächen, die empfindlich auf klimatische Schwankungen reagieren. Mit Hilfe dieser Technik können unterschiedlichste Oberflächen untersucht und analysiert werden. Die Auswertungen ermöglichen es, die klimatisch bedingten Bewegungen an den Oberflächen zu quantifizieren und diese mittels Falschfarbendarstellung auch Fachfremden verständlich zu vermitteln.

Da die Messungen überwiegend in dem Zeitraum durchgeführt wurden, in denen die Häuser coronabedingt über einen langen Zeitraum geschlossen waren, hat sich ein vom Normalbetrieb abweichendes Raumklima mit teilweise geringeren Raumklimaschwankungen eingestellt. Dementsprechend ist damit zu rechnen, dass die festgestellten Reaktionen der historischen Materialien auf das Raumklima von denen im regulären Betrieb abweichen.

Die Ergebnisse wurden den Verantwortlichen der jeweiligen Fallstudien vorgestellt und individuelle Möglichkeiten zur Verbesserung des Raumklimas, wie die Verbesserung des Schutzes vor solarem Eintrag, passive Lüftungslösungen oder passive Befeuchtungsmöglichkeiten vorgestellt.

Rahmenbedingungen

Angestoßen wurde die Idee zum Forschungsprojekt durch mündliche Hinweise des Instituts für Diagnostik und Konservierung an Denkmalen in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V. (IDK) bzgl. erster sichtbarer Auswirkungen an Kulturgut im Innenraum durch die Hitzesommer der vergangenen Jahre 2017 und 2019.

Das Forschungsprojekt war am Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Otto-Friedrich-Universität Bamberg angesiedelt. Für die Untersuchungen an vier Fallstudien mit unterschiedlichen Materialkombinationen wurde ein opto-technisches Monitoring durchgeführt. Dies erfolgte mit dem bestehenden Equipment der Uni Bamberg (Streifenlichtscanner) sowie einer mit Projektmitteln angeschafften Fotokamera und Klimadatenloggern zur Erfassung von Temperatur und relativer Feuchte für Messungen vor Ort und im Klimaschrank. Die Leitung des Projektes teilten sich Prof. Paul Bellendorf und Dr. Kristina Holl. Die Durchführung der Messkampagnen wie auch die Auswertung der Scanflächen erfolgte durch die Projektangestellten Anne Karl und Kristina Holl, unterstützt durch Leander Pallas, wissenschaftlicher Mitarbeiter des KDWTs im Bereich zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden.

Das IDK fungierte im Forschungsprojekt als Unterauftragnehmer. Thomas Löther stellte die Kontakte vor Ort her, beteiligte sich an den fachlichen Diskussionen und dem Fragebogen, der im Rahmen des Projektes erstellt wurde und wertete die Daten aus den Langzeitklimamessungen aus.

Die Untersuchungen vor Ort wurden mit jeweils zwei Personen durchgeführt. Speziell das Scannen der Oberflächen zu zweit erleichtert die Durchführung der Messungen. Zudem war es teilweise aufgrund der schwingenden Holzböden in Schloss Moritzburg erforderlich, die Messungen morgens und abends, also vor und nach Ende der regulären Öffnungszeiten durchzuführen. Aus arbeitsrechtlichen Gründen war es während der Schließzeit zwei anwesende Personen erforderlich.

Das Personal vor Ort unterstützte die Untersuchungen an allen vier Stationen durch ihre regelmäßigen Beobachtungen in und am Gebäude sowie der Ausstattung.

Aufgrund der coronabedingten Pandemie, die unmittelbar nach Projektbeginn startete, konnte der ursprüngliche Zeitplan nicht eingehalten werden. Die Messungen vor Ort konnten erst im Sommer 2020 starten, so dass sich die Umsetzung um drei Monate verlängerte, wofür die DBU zusätzliche Unterstützung zur Verfügung stellte.

Im September 2021 fand in Schloss Moritzburg eine – coronabedingt kleine - Abschlussveranstaltung statt, in der die Ergebnisse der einzelnen Fallstudien vorgestellt und im kleinen Expertenkreis gemeinsame Lösungsstrategien diskutiert wurden.

1. Einführung

In den Jahren 2017, 2018 und 2019 waren vor allem in Ostdeutschland vermehrt Hitzeperioden mit hohen Temperaturen über 39 °C bei gleichzeitigen längeren Trockenzeiten zu verzeichnen. Dies ist mit der globalen Klimaerwärmung zu begründen und wird sich in den kommenden Jahren noch weiter verstärken. Die Folge davon ist, dass sich auch die Innenräume von Denkmälern mit wertvoller historischer Ausstattung aufheizen, und die relative Feuchte auf kritische Werte unter 40 % r.F. absinkt. Dieses Phänomen konnte in dieser Weise bislang noch nicht beobachtet werden – im Gegenteil, in historischen Gebäuden waren bislang in der Regel zu hohe Luftfeuchten das Problem.

Geringe Luftfeuchten führen zu einem hohen Schadensrisiko für zahlreiche Kunstgattungen, speziell für polychrome Oberflächen, wie Leinwandgemälde, Papier- und Ledertapeten, gefasste Holzoberflächen sowie Wandmalerei, da es zu einer irreversiblen Schädigung, wie etwa Rissbildung, Lockerung und Substanzverlust der Farbfassung, etc. kommen kann.

Die vier Fallbeispiele des Projektes spiegeln die Material- und Geschichtsvariation deutschen Kulturguts wider:

Ledertapeten in Schloss Moritzburg

Im Jagdschloss von Moritz von Sachsen von 1542, welches unter August dem Starken im 18. Jahrhundert zu einem Barockschloss umgebaut wurde, befindet sich der weltweit größte Bestand an barocken Ledertapeten. 11 von ursprünglich 60 Räumen im Schloss sind heute noch mit geprägten, gepunzten und bemalten Kalbs- oder Ziegenledertapeten ausgestattet, die fortlaufend restauriert werden. Das organische Material, das sehr sensibel auf klimatische Änderungen reagiert, leidet trotz der Lage des Schlosses umgeben von Wasser unter einer sinkenden Luftfeuchtigkeit im Innenraum.

Wandmalereien in der Albrechtsburg in Meißen

In der Albrechtsburg in Meißen, die als erster deutscher Schlossbau zwischen 1471 und 1524 errichtet worden ist, stellen die Wandmalereien aus dem 19. Jahrhundert einen außergewöhnlichen Bestandteil der Innenausstattung dar. Finanziert durch Gelder der Reparationszahlungen Frankreichs konnten ab 1873 historische Ereignisse der Burg, dem Adelsgeschlecht der Wettiner und zur Entstehung von Porzellan abgebildet werden. Die Wandmalereien sind nach Restaurierungen und Überarbeitungen in einem divergenten Zustand. Zusätzlich wirkt sich die geringe Luftfeuchte und die extremen Temperaturen auch auf das Gestein, die Fugen und Malereischichten aus.

Tafelgemälde von Lucas Cranach dem Jüngeren in der Schlosskirche der Augustusburg

In der Schlosskirche im vom sächsischen Kurfürsten August 1568 bis 1575 errichteten Jagdschloss Augustusburg nahe Chemnitz befindet sich ein auf Holz gemaltes Tafelgemälde. Das 1572 von Lucas Cranach dem Jüngeren gefertigte Werk zeigt das einzig erhaltene Bildnis des Kurfürsten August mit seiner

Familie in der zeitgemäßen Ausstattung der Renaissance. In den letzten Jahren wurde das durch Risse geschädigte Bildnis aufwändig restauriert. Opto-technische Untersuchungen des Tafelgemäldes sollen zeigen, inwieweit dieses sich auf die sich ändernden Klimaverhältnisse reagiert.

Flügelretabel in St. Nicolai in Döbeln

In der St. Nicolai Kirche in Döbeln ist das zweifach wandelbare Flügelretabel das zentrale Ausstattungsobjekt im Innenraum. Der spätgotische Schnitzaltar wurde vermutlich von einem Schüler von Lucas Cranach dem Älteren 1515/16 geschaffen und durchging zwischen 1918 bis 2002 mehrere Restaurierungskampagnen. Der Altar wurde aufgrund der offensichtlich starken Reaktion auf die veränderten Klimaverhältnisse der letzten Jahre nach Projektbeginn mit aufgenommen. Ein bis zu einem Zentimeter breiter Riss führt über die gesamte Breite der inneren beiden Altarflügel, womit dieser zu einem Paradebeispiel von negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Kulturgut in Deutschland gehört.

2. Problemstellung und Herangehensweise

Im Sommer 2018 und 2019 haben hohe Temperaturen in den Frühjahrs- und Sommermonaten in Kombination mit einer mehrmonatigen Periode geringer Niederschläge in vielen national wertvollen Kulturgütern zu niedrigen Luftfeuchten in den Innenräumen geführt. Speziell in Kirchen und Schlössern ohne Klimatisierungsstrategien in Sachsen und Sachsen-Anhalt war dieses bislang in dieser Form und in diesem Ausmaß unbekanntes Phänomen festzustellen. Bisher lag das Schadensrisiko insbesondere in Kirchen bei einer zu hohen relativen Feuchte von über 65 % r.F.

Erste Messungen zeigten, dass Innenraumwerte von unter 40% r.F. in den genannten Frühjahrs- und Sommermonaten vermehrt auftraten. Aufgrund des damit verbundenen Schadensrisikos an der historischen Bausubstanz (z. B. Kristallisieren von Salzen in Wänden oder Lockerung und Substanzverlust in der Wandmalerei), wie der in den Räumen befindlichen Ausstattung (Rissbildungen in Hölzern, Lockerung und Substanzverluste an polychromen Farbfassungen, Verformung von Tapeten etc.) ist es erforderlich, Strategien zu entwickeln, die diesem Phänomen langfristig entgegenwirken. Des Weiteren besteht aufgrund der kurzen Reaktionszeit von Kunstwerken auf die Änderung der klimatischen Bedingungen akuter Handlungsbedarf. Erste irreversible Veränderungen, etwa Risse in Kunstwerken oder Substanzverluste in der Farbfassung, wurden bereits festgestellt.

Um ein besseres Verständnis zum Verlauf von Temperatur und relativer Feuchte im Innenraum zu erhalten, wurden an ausgewählten Standorten in den historisch wertvollen Baudenkmalen der Albrechtsburg in Meißen, der Moritzburg und der Augustusburg Datenlogger aufgestellt, welche regelmäßig von Fachkräften vor Ort oder durch Projektmitarbeiter ausgelesen werden. Ein Vergleich der Messungen über einen kompletten Jahreszyklus soll aufzeigen, welchen kurz- und langfristigen Schwankungen die historischen Oberflächen ausgesetzt sind. Um festzustellen, inwieweit sich das direkte Umgebungsklima bereits verändert hat, sind langfristige Messungen (über 3 Jahre) erforderlich. An den ausgewählten Standorten sind

diese Daten durch die langjährige Begleitung des Unterauftragnehmers IDK vorhanden und werden für die Auswertung zur Verfügung gestellt.

Parallel zu den Klimamessungen werden ausgewählte Musterflächen mittels hochauflösenden 3D-Scannern zu unterschiedlichen Zeitpunkten erfasst. Etwaige Bewegungen oder Veränderungen im Messzeitraum lassen sich so erfassen und mit den Klimadaten korrelieren.

Um ein besseres Verständnis für den Einfluss des Klimawandels auf Kunst- und Kulturgüter zu erhalten, wurde eine bundesweite Umfrage bei Denkmaleigentümern und -verantwortlichen initiiert. Darin werden u. a. die bereits heute sichtbaren Auswirkungen des Klimawandels aufs Baudenkmal abgefragt.

2.1 Fragebogen

Um einen allgemeinen Überblick über die Auswirkungen des Klimawandels und die Auffassung der Denkmalverwalter zu erhalten, wurde zu Projektbeginn eine Umfrage erarbeitet und in Umlauf gebracht. Um die Teilnahme für die verschiedenen Zielgruppen dieser Umfrage zu erleichtern und zu verkürzen, musste eine Umfrage mit einem System erstellt werden, welches Filterfragen ermöglicht.

Die technische Umsetzung erfolgte über das Onlineportal SoSci Survey¹ (Laufzeit 01.06. bis 01.10.2020). Die Umfrage unterteilte sich in die Kategorien: Leichtbauten, Massivbauten, Garten- und Parkanlagen bzw. Friedhöfe und Archäologische Stätten, siehe Abb. 1.

¹ SoSci der Online-Fragebogen, URL: <https://www.soscisurvey.de/> [Stand 22.4.2021].

Umfrage im Projekt „Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern“

Hier finden Sie weitere Informationen zur Umfrage im Rahmen des von der DBU-geförderten Vorhabens „Schadensrisiko für Kulturgut aufgrund zu geringer relativer Luftfeuchte in Innenräumen von national wertvollen Kulturgütern“.

Zum Fragebogen kommen Sie über folgenden Link: https://www.soscisurvey.de/kleiner_40/ (https://www.soscisurvey.de/kleiner_40/)

Der Fragebogen besteht aus folgenden Themenblöcken

1. Allgemeine Fragen

Im folgenden Abschnitt werden allgemeine Fragen zu Ihren Objekten und zu Ihrer Wahrnehmung des Klimawandels abgefragt, damit im anschließenden objektbezogenen Frageteil die richtigen Fragen für Sie herausgefiltert werden können.

- Wie viele Objekte betreuen Sie insgesamt?
- In welchem Bundesland liegen die von Ihnen betreuten Objekte?
- In welchen Landkreisen liegen die von Ihnen betreuten Objekte?
- Welcher Verwaltung unterliegen die von Ihnen betreuten Objekte?
- Haben Sie seit 2017 extreme Wetterereignisse in der Region der von Ihnen betreuten Objekte festgestellt?
- Wie viele der von Ihnen betreuten Liegenschaften waren von den vorher genannten Klimaereignissen direkt oder indirekt betroffen?
- Welcher Art sind die Objekte, die Sie betreuen?

2. Objektbezogene Fragen

Je nachdem welche Antwortoption Sie bei der Objektfrage angegeben haben, werden Sie zu dem entsprechenden Fragenabschnitt weitergeleitet. In den Abschnitten Leichtbau, Massivbau, Garten-/Parkanlagen & Friedhöfe und Archäologische Stätten werden die Fragen und Antwortoptionen an die betreffende Objektgruppe angepasst.

- In welcher Lage liegen die von Ihnen betreuten Objekte in Bezug auf deren direktes Umfeld? (nur bei Objektgruppe Leicht- & Massivbau)
- Liegen die von Ihnen betreuten Objekte in einem Risikogebiet?
- Hat die Verwaltung des Bezirkes in dem die von Ihnen betreuten Objekte liegen präventive Maßnahmen bezüglich der Gefahren im Risikogebiet getroffen?
- Werden die von Ihnen betreuten Objekte aktiv genutzt?
- Traten seit 2017 Schäden an ihren Objekten auf, welche auf die oben genannten extremen Wetterereignisse zurückzuführen sind?
- Haben Sie infolge von Schäden Maßnahmen an oder in der Nähe der Objekte ergriffen?
- In welchem Bereich lagen die Kosten der Maßnahme/n?
- Rechnen Sie in Zukunft mit Schäden an ihren Objekten aufgrund der Klimaveränderung?
- Haben Sie Maßnahmen ergriffen und umgesetzt, um weiteren oder zu erwartenden Schäden an und in den Objekten vorzubeugen?
- Ziehen Sie präventive Maßnahmen in Zukunft in Betracht?
- Wirken sich die extremen Wetterereignisse auf den Innenraum Ihrer Objekte aus?
- Welcher Bereich ist dadurch betroffen? (nur bei Objektgruppe Leicht- & Massivbau)
- Welche Schadensbilder treten auf?
- Sind die Schadensbilder akut oder das Resultat langjähriger Veränderungen?
- Rechnen Sie in Zukunft mit Schäden im Innenraum ihrer Objekte aufgrund der Klimaveränderungen?
- Hatten oder haben die oben genannten extremen Wetterereignisse positive Auswirkungen auf ihre Objekte?
- Haben Sie durch die Einschränkungen durch COVID-19 Veränderungen an den von Ihnen betreuten Objekten beobachtet?
- Haben Sie unabhängig der Zeitspanne und des Objekttyps Ereignisse an Ihren Objekten beobachtet, die auf den Klimawandel zurückzuführen sind, in der Umfrage aber nicht aufgeführt sind?
- Wurden in den letzten Jahren in oder an ihren Objekten Klimadaten erfasst?
- Sind Sie bereit die erfassten Daten (roh oder ausgewertet) der Forschung im Projekt „Kleiner40“ zur Verfügung zu stellen?

Kontaktdaten

Sollten Sie Rückfragen zum Fragebogen oder zum Projekt haben, so können Sie sich gerne an [klimawandel.restaurierungswissenschaft\(at\)uni-bamberg.de](mailto:klimawandel.restaurierungswissenschaft(at)uni-bamberg.de) (<mailto:klimawandel.restaurierungswissenschaft@uni-bamberg.de>) wenden.

Abb. 1:

Auflistung der Fragen zur Auswirkung des Klimawandels.

Insgesamt wurden 92 verwertbare Fragebögen (n = 92) abgegeben. Fünf Teilnehmende haben Objekte in zwei verschiedenen Bundesländern angegeben, ansonsten kann die Angabe des Bundeslandes der Liegenschaften äquivalent zum Standort der Teilnehmenden gesetzt werden (Abb. 2).

Die Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass eine Vielzahl von Objektverantwortlichen für Kulturgüter in Deutschland bereits heute mit den unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels zu tun haben. Vor allem für den Leichtbau und die Gartenanlagen werden in Zukunft vermehrt Schäden erwartet. Aufgrund des bestehenden Desiderats an (nationalen) Forschungsergebnissen zu den konkreten Auswirkungen des Klimawandels auf Kunst- und Kulturgut ist eine weitere und intensivere Beschäftigung mit dem Themengebiet unerlässlich.

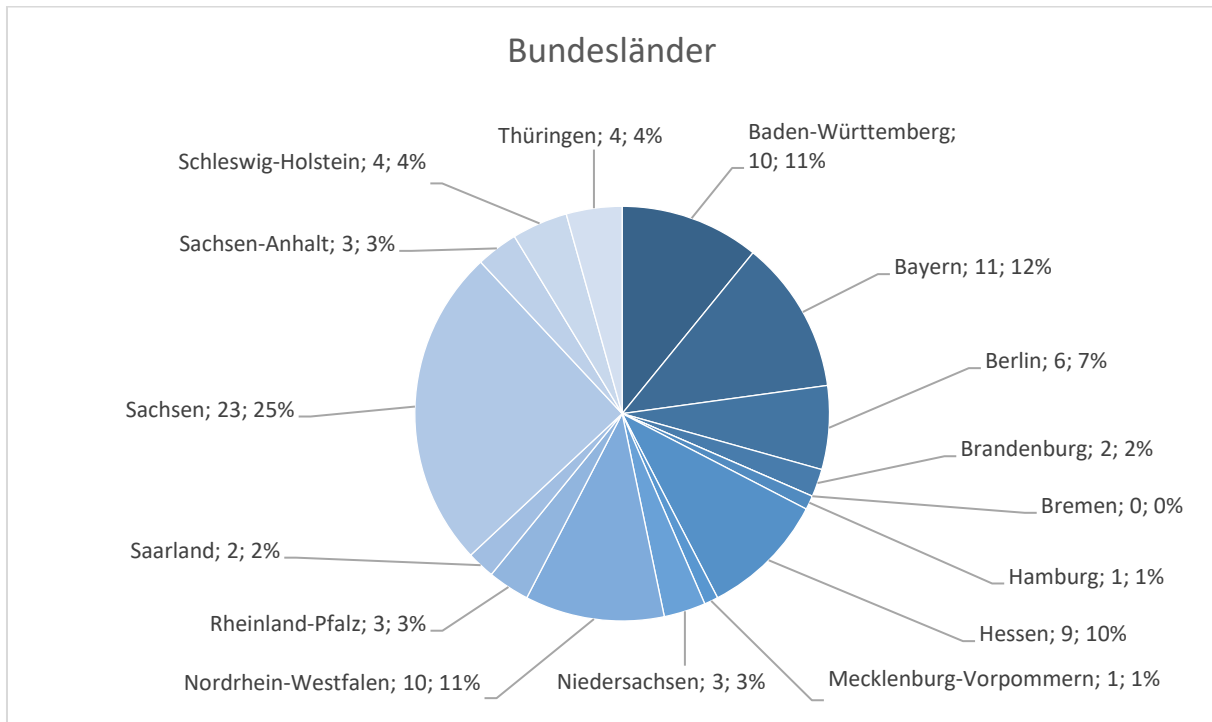


Abb. 2:
Anteilige Verteilung der Teilnahmen nach Bundesländern.

Die überdurchschnittliche hohe Anzahl an Rückmeldungen aus Sachsen lässt sich damit begründen, dass das von der DBU geförderte Vorhaben in enger Abstimmung mit dem Landesamt für Denkmalpflege in Sachsen durchgeführt wurde. Hilfreich war hier, dass das Landesamt in Sachsen durch eine eigene Pressemitteilung zu Beginn der Umfrage für das Themengebiet bei den Adressaten sensibilisiert hat.

Die bundesdeutsche Verteilung der Rückmeldungen zeigt auch, dass man auf dem ganzen Gebiet der Bundesrepublik Deutschland an dem Themengebiet interessiert ist. Die teilweise geringen Rückmeldungen aus den Stadtstaaten aber auch aus den Flächenstaaten hängen unter anderem mit der lokalen Organisation der Denkmalpflege zusammen sowie mit der starken Überbelastung der dortigen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, wie aus persönlichen Rückmeldungen zu erfahren war.

2.1.1 Klimaereignisse

Auf die Frage, ob die Teilnehmer seit 2017 extreme Wetterereignisse in der Region der von Ihnen betreuten Objekte festgestellt haben, haben nur sieben von keinen Klimaereignissen berichtet. 60 Umfrageteilnehmer

haben angegeben, im Zusammenhang mit dem Kulturgut von Trockenheitsereignissen und 31 von einem Temperaturanstieg beobachtet zu haben. 44 haben von Sturm, 39 von Starkregenereignissen und 13 von Überschwemmungen berichtet, siehe Abb. 3. Hinzu kommen 4 Nennungen von extremen Schneemassen und sechs von sonstigen Ereignissen, wie zum Beispiel Hagel oder extrem schnellen Wetterwechseln mit hohen Temperaturschwankungen. Insgesamt kam es zu 214 Angaben, wobei Mehrfachnennungen möglich waren.

Es zeigt sich deutlich, dass bereits heute viele denkmalgeschützte Einrichtungen von den Auswirkungen des Klimawandels betroffen sind. Eine detaillierte Auswertung zur geografischen Verteilung der Nennungen nach Bundesländern sowie nach Gebäudetyp steht noch aus.

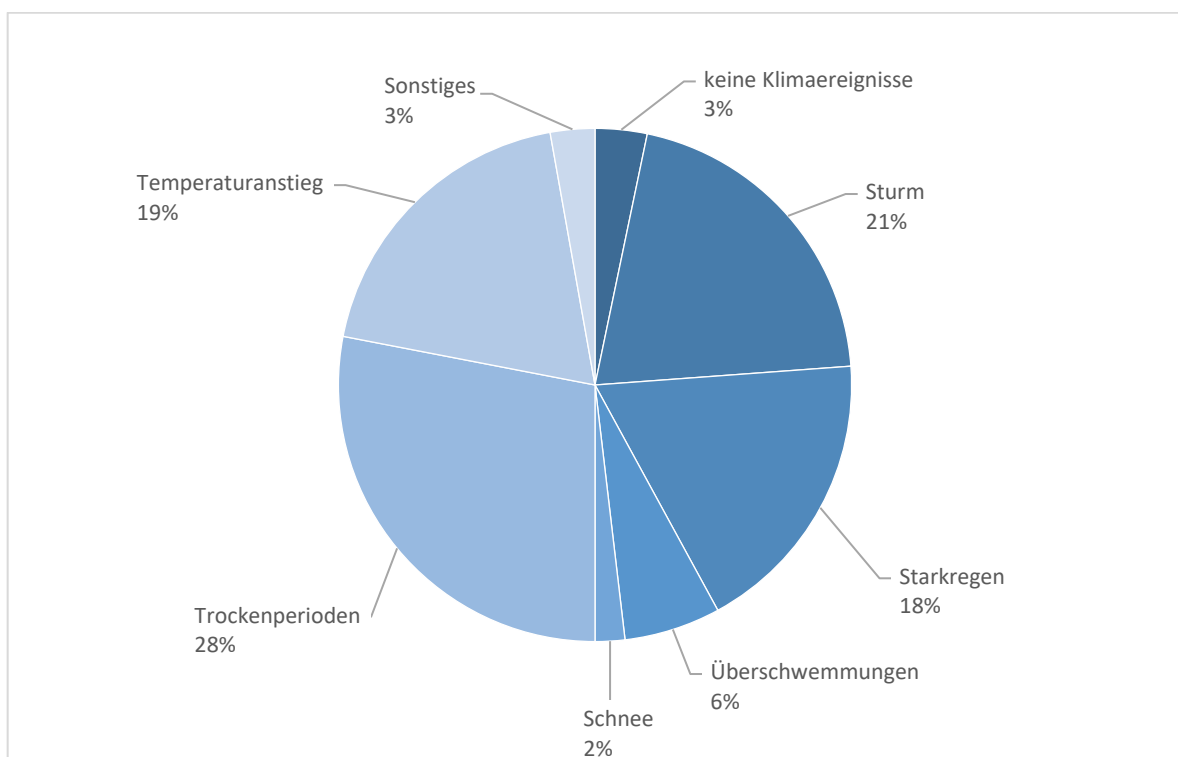


Abb. 3: Angegebene Klimaereignisse (Mehrfachauswahl möglich).

2.1.2 Zukünftige Schäden

Die Frage, ob in Zukunft mit Schäden an den Objekten aufgrund der Klimaveränderung gerechnet werden, haben insgesamt 84 Personen beantwortet. 70 gehen davon aus, dass die Veränderung des Klimas zukünftig zu Schäden führen wird, 14 gehen nicht davon aus. Interessant ist die Verteilung nach den Denkmalarten. Demnach geht die überwiegende Mehrheit davon aus, dass der Klimawandel zukünftig am Denkmal zu Schäden führen wird. Am massivsten wird das nach Aussage der Umfrageteilnehmer die Gartenanlagen und Gebäude in Leichtbauweise treffen, weniger Massivbauten und archäologische Stätten.

2.1.3 Zusammenfassung und Ausblick zur Umfrage

Die ersten Ergebnisse der Umfrage zeigen, dass eine Vielzahl von Objektverantwortlichen für Kulturgüter in Deutschland bereits heute mit den unterschiedlichen Auswirkungen des Klimawandels zu tun haben. Vor allem für den Leichtbau und die Gartenanlagen werden in Zukunft vermehrt Schäden erwartet. Aufgrund des bestehenden Desiderats an (nationalen) Forschungsergebnissen zu den konkreten Auswirkungen des Klimawandels auf Kunst- und Kulturgut ist eine weitere und intensivere Beschäftigung mit dem Themengebiet unerlässlich.

Die Auswertung wurde im Jahrbuch des Landesamtes für Denkmalpflege für Sachsen 1/2022 veröffentlicht.

2.2 Erfassung von Schäden durch Trockenheit

Neben den Fallstudien, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden, hat das IDK eine Dokumentation von Schadensbildern in Sachsen und Sachsen-Anhalt vorgenommen, die bei Dienstfahrten erkannt oder durch angefragte Ämter und Verwaltungen mitgeteilt wurden. Eine Auswahl dieser Schadbilder wird im folgenden Abschnitt vorgestellt.

Stadt- und Klosterkirche St. Clemens und St. Jakobus in Sandersdorf-Brehna, Lkr. Anhalt-Bitterfeld

Im Kirchenschiff befindet sich auf gedrehten Säulen eine dreiseitige, bis an die Ostwand geführte Empore, an der Westseite ist sie zweigeschossig (spätes 17. Jh., Fassung Anfang 20. Jh.). Die Risse in den Füllungen der Holzvertäfelungen haben sich in den Dürresommern 2018 / 2019 neu gebildet (Abb. 4, 5).



Abb. 4:
Übersicht Ecke Nordseite/Westseite, (Fotos 7.10.2020, Karoline Danz).



Abb. 5:
Risse in den Holzvertäfelungen an der Nordseite (links) und der Westseite (rechts), (Fotos 7.10.2020, Karoline Danz).

Kirche St. Ägidius, Hergisdorf, Lkr. Mansfeld Südharz

In den zweigeschossigen Emporen der Kirche auf der West- und Nordseite (16. Jh.) haben sich die Lockerungen der gefassten Holzoberflächen verstärkt (Abb. 6).



Abb. 6:
Lockerungen und Substanzverluste in gefassten Holzvertäfelungen der Emporen. (Fotos: 21.01.2019, Karoline Danz).

Evangelische Kirche in Könnern, OT Beesedau, Lkr. Salzlandkreis

Am um 1800 gefertigten Kanzelaltar haben sich im Bildträger Risse gebildet (Abb. 7)



Abb. 7:

Rissbildung im polychrom gefassten Kanzelaltar, (Fotos 10.07.2019, Karoline Danz).

Evangelische Dorfkirche Druxberge, Landkreis Börde

In der evangelischen Dorfkirche haben sich im Sommer 2019 an der Ostwand aufgrund der langen Trockenheit Risse im Mauerwerk gebildet (Abb. 8).



Abb. 8:

Risse an der Ostwand der Dorfkirche in Druxberge, (Fotos: Uwe Kalisch).

Leipzig, Nikolaikirche

Am Niedergräfenhainer Altar in der Nordkapelle der Nikolaikirche in Leipzig kommt es vermehrt zu kleinteiligen Lockerungen und Substanzverlust der farbig gefassten Oberflächen (Abb. 9). Dieses Schadensbild steht beispielhaft für eine Vielzahl von Objekten, die durch eine doppelte Belastung (Nutzung und Klima-
veränderungen) gefährdet sind. Die langen Trockenphasen sorgen für einen immer schnelleren Restaurierungsaufwand.



Abb. 9:
Farbabplatzungen am Niedergräfenhainer Altar, (Foto: Thomas Löther).

2.3 Raumklimamessung

Am IDK werden seit über 20 Jahren raumklimatische Untersuchungen mittels elektronischer Klimadatenlogger durchgeführt. Da sich viele Baumaßnahmen in größeren historischen Gebäuden über mehrere Jahre erstrecken können und zwischen den einzelnen Bauabschnitten auch mehrere Jahre liegen, konnten so in einigen Gebäuden in Sachsen und Sachsen-Anhalt zum Teil sehr lange Raumklimadaten aufgezeichnet werden.

Bei den Auswertungen von Raumklimadaten aus verschiedenen Untersuchungsobjekten mit mehrjährigen Raumklimaaufzeichnungen wurde deutlich, dass sich scheinbar lang eingestellte Raumklimawerte ändern. In vielen historischen Gebäuden wurden in den zurückliegenden Jahren raumklimatische Untersuchungen vor allem dann beauftragt und installiert, wenn sich Schäden durch eine zu hohe Raumlufffeuchte einstellten. In Sachsen sind hier die Albrechtsburg Meißen, das Schloss Moritzburg oder das Schloss Augustusburg zu nennen. Teilweise wurde in den 1990 bis 2000er Jahren in diesen Gebäuden Werte der relativen Luftfeuchte von über 90 % r.F. gemessen und Schäden von zu hoher Raumlufffeuchte, wie Schimmelpilzbildung und Feuchtflecken, dokumentiert.

Mittlerweile ändert sich jedoch das Bild der Schäden in historischen Gebäuden. So sind vor allem an Holzobjekten (Orgeln, Altäre, Tafelbilder, Holzbrüstungen, etc.) sichtbare Schäden durch Risse, Verformungen oder Farbabplatzungen dokumentiert. Diese Schäden, die von zu trockenen Zeiträumen herrühren, müssen als irreversibel bezeichnet werden, im Gegensatz zu Schimmelpilzen bei zu feuchten Raumklimazuständen. Dies belegen auch die langfristigen Aufzeichnungen der Klimadaten in den Häusern der Fallstudien.²

² Zu den Fallstudien sind folgende Berichte entstanden:

Augustusburg

Löther, Th., DD 27/2008 Schloss Augustusburg, Raumklimauntersuchungen

Löther, Th., DD 07/2017 Schloss Augustusburg, Lichtmessung am Cranachaltar

Löther, Th., DD 84/2020 Schloss Augustusburg, Lichtmessung an Mustergläsern.

Albrechtsburg Meißen

Für die begleitende Klimamessung während des Forschungsprojektes zeichneten sieben Datenlogger die Klimaverhältnisse in den Räumen der Fallbeispiele auf. Diese wurden nach Festlegung der Messpositionen für die Streifenlichtscanning in der Nähe davon platziert, um mit dem gemessenen Nahfeldklima eine exaktere Bewertung der Messergebnisse zu erzielen. Neben der Aufzeichnung von Temperatur, relativer Feuchte nahe der Messposition wurde auch die Oberflächentemperatur in unmittelbarer Umgebung des Messfeldes ermittelt (siehe Abb. 10). Dazu kamen Datenlogger der Fa. Driesen & Kern zum Einsatz, Typ DK390-DM MultiLog-RH Plus rF/T+ 2 flex. Eingänge und DK320-DMTR HumiLog ruggedPlus zum Einsatz. Die Oberflächensensoren wurden aus konservatorischen Gründen nicht angeklebt, sondern mit Hilfe eines Auslegers an die entsprechenden Oberflächen angedrückt. Die Außenklimadaten für die drei Standorte, sowie weitere Innenraumklimadaten über einen längeren Zeitraum wurden durch den Unterauftragnehmer IDK zur Verfügung gestellt.



Abb. 10:
Erfassung des Mikroklimas an Wandmalereien in der Albrechtsburg.

Löther, Th., DD 56/2015 Albrechtsburg Meißen, Großer Wendelstein, Untersuchungen zu vorherrschenden Luftströmungen im Wendelstein und den daran angrenzenden Räumen

Löther, Th., DD 54/2017 Albrechtsburg Meißen, Zusammenstellung bisheriger raumklimatischer Untersuchungen in der Albrechtsburg Meißen

Löther, Th., DD 51/2021 Albrechtsburg Meißen, Raumklimamonitoring, Untersuchungszeitraum: 2018 – 2021 Schloss Moritzburg

Löther, Th., DD 57/2013 Schloss Moritzburg, raumklimatische Untersuchung

Löther, Th., DD 01/2018 Schloss Moritzburg, Speisesaal, raumklimatische Untersuchungen an Parketttafeln

Löther, Th., DD 62/2020 Schloss Moritzburg, Raumklimamonitoring, Untersuchungszeit: 2011 - 2020

2.4 Streifenlichtscanning

Für die Untersuchung der Fallstudien wurden in Absprache mit dem Fachpersonal und dem Unterauftragnehmer vor Ort exemplarische Oberflächen mit einem 3D Scanner aufgenommen. Zum Einsatz kam der Streifenlichtscanner COMET L3D 5M der Carl Zeiss Optotechnik GmbH, ehemals Steinbichler Optotechnik GmbH (Abb. 11). Mit Hilfe des Verfahrens ist es möglich, je nach Projektor- und Kameraobjektiv unterschiedlich große Oberflächen zu scannen: Mit den 75 mm-Objektiven entsteht ein Messfeld von 74 x 62 x 45 mm³, mit den 250 mm-Objektiven ein Ausschnitt von 260 x 215 x 140 mm³. Der Punktabstand beim größeren Messfeld liegt bei 100 µm, wohingegen der Abstand des kleineren Messfeldes bei 30 µm zu verzeichnen ist. Der Punktabstand ist also abhängig vom Objektiv, je kleiner der Bildausschnitt, desto geringer der Abstand und damit umso dichter die erzeugte Punktwolke.



Abb. 11:
Streifenlichtscanner an den historischen Ledertapeten in Quartier 6 in Schloss Moritzburg. Diese Scanflächen wurden mit dem 75mm-Objektiven erfasst.

Aufgrund der reflektierenden und teilweise sehr dunklen Oberflächen, vor allem in Moritzburg und Augustusburg ließen sich lokale Fehlstellen nicht immer vermeiden (Abb. 12). Trotzdem konnten die wesentlichen Merkmale erfasst werden, so dass die Scanergebnisse zufrieden stellend sind und sich für die Analyse in Abhängigkeit des Raumklimas eignen.

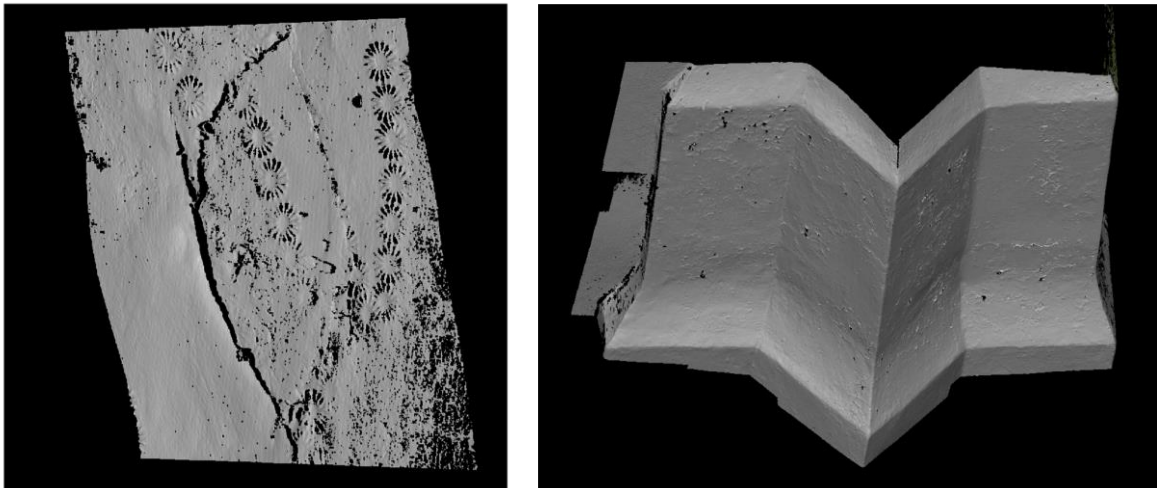


Abb. 12:
Links: OneShot-Ausschnitt der Scans der Ledertapeten in Moritzburg; 75er Objektiv mit 0,03 mm Auflösung.
Rechts: Gekippte Ansicht der gescannten Wandoberfläche im großen Appellationsaal in der Albrechtsburg, Meißen; 250er Objektiv mit 0,1 mm Auflösung.

Um die Zustandsänderung analysieren zu können, wurden die Scanaufnahmen im zeitlichen Verlauf des Projektes mehrmals wiederholt. Der Grad der Verformung kann über den Vergleich zweier Scans untersucht werden. Mit den gewonnenen Daten aus zwei Messkampagnen kann durch weitere Nachbearbeitung in Geomagic Wrap und GomInspect ein so genannter Soll-Ist-Vergleich erstellt werden.

Hier werden die Oberflächendaten der 3D-Messung aus der zweiten Messkampagne (Ist) passgenau auf die Daten der ersten Messung (Soll) gelegt und anschließend die Abweichungen berechnet. Die Veränderungen werden numerisch und optisch in einem Falschfarbenbild dargestellt, in dem angezeigt wird, um wie viel sich das Objekt an bestimmten Stellen verändert hat (Abb. 13). Die Scans der Sollmessung dienen als Ausgang der Abweichungsberechnungen. Im Abgleich mit den Klimadaten sind somit Aussagen über die quantitative Formänderung in Korrelation mit dem Raumklima möglich.

Vergleich St. Nikolai in Döbeln linker Altarflügel 08/2020 - 10/2020

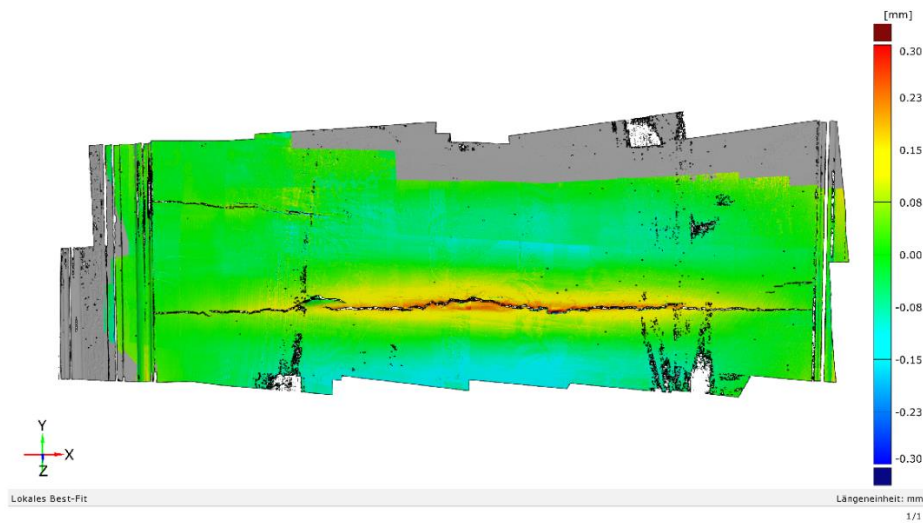


Abb. 13:

Scanvergleich am Beispiel des linken Altarflügels des Tafelgemäldes von St. Nicolai in Döbeln. Vergleich der Messungen von August mit Oktober 2020, Die grün gefärbten Flächen zeigen keine Veränderung, die blau gefärbten Flächen eine Verwölbung nach hinten (max. 0,15 mm), die gelben und orangen Flächen eine Bewegung nach vorne (max. 0,15 mm).

One-Shot-Messung

Mit Hilfe der „OneShot-Methode“ konnten wertvolle Hinweise hinsichtlich der Auswirkung kurzfristiger Schwankungen auf die unterschiedlichen Oberflächen gewonnen werden. Sie zielt darauf ab, den Fehler zu minimieren, der bei der Datenverarbeitung auftritt. Somit werden nur zwei Scans desselben Details zu unterschiedlichen Zeitpunkten (z.B. letzter Scan am Abend und erster Scan am Morgen) aufgenommen, ohne das Messgerät zu bewegen (Abb.12 links). Auf diese Weise ist eine Auswertung ohne eine manuelle Orientierung über Referenzpunkte möglich. Dies vermindert den Fehler, der bei der automatischen Best-Fit Ausrichtung des Programmes entsteht. Damit ist eine quantitative Aussage hinsichtlich der Bewegung der Oberfläche aufgrund von kurzfristigen Klimaschwankungen in einer hohen Auflösung möglich.

Auswertung

Da bei den vier untersuchten Fallstudien jeweils bis zu acht Messkampagnen durchgeführt wurden, ergeben sich daraus zahlreiche Möglichkeiten, die einzelnen Scans miteinander zu vergleichen und auszuwerten. Aufgrund eines Fehlers bei der Kalibrierung konnten die Messungen, die im Mai 2021 mit dem 250 mm Objektiv durchgeführt wurden für die Auswertung nicht verwendet werden. Für die Bewertung der Schadensprozesse der einzelnen Fallstudien wurden die aussagekräftigsten Vergleiche herangezogen. Alle weiteren Auswertungen finden sich im Anhang.

2.5 Klimaschrankversuche

Für Untersuchungen an Dummyobjekten aus verschiedenen Materialien wurden Versuche mit Hilfe eines Klimaprüfschranks durchgeführt. Der Klimaprüfschrank ClimeEvent C/340/40/3/M von Weisstechnik kann zwischen einer Temperatur von -42 bis $+180^{\circ}\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchte von 10 bis 98 % r.F. variieren. Mittels eines Baukastensystems können in der produkteigenen Software nicht nur extreme Schwankungen, sondern auch an vor Ort gemessenen Klimadaten angelehnte Klimazyklen nachgestellt werden.

Zunächst war es notwendig, die Methodik zur Untersuchung der Kunstwerke im Klimaschrank mittels Streifenlichtscanner von außen zu optimieren. Während der ersten Versuche wurde noch durch die geschlossene, vierfach verglaste Klimakammertür gemessen, was die Messqualität der Daten zwar nicht beeinträchtigt hat, allerdings die Messfläche stark verringerte. Deshalb wurde eine Glasscheibe mit 4 mm Dicke angefertigt, die passgenau auf den Dichtungsring bei offener Tür angebracht werden konnte. Somit wurde die Messfläche deutlich vergrößert, Temperatur und Feuchtigkeit allerdings trotz offener Tür möglichst konstant gehalten. Während der Messungen traten im Klimaschrank kurzfristige Schwankungen von ca. 3 K und ca. 5 % r.F. auf, die der Schrank nach einigen Minuten wieder ausgleichen konnte (Abb. 14).



Abb. 14
Aufbau der Messsituation bei offener Klimaschranktür und mit eingestellter Glasplatte.

Vortests an Holzfurnier

Die durchgeführten Klimaschrankversuche wurden zu Testzwecken an einem ca. $144 \times 178 \times 0,5$ mm großen und 9,15 g schweren Holzfurnier durchgeführt. Nach fotografischer und messtechnischer Dokumentation wurde das Furnier an eine Schaumstoffplatte gepinnt, um den Einfluss der Luftströmung durch den systembedingt notwendigen Gehäuseventilator im Klimaprüfschrank abzumindern. Die Pins zur Fixierung

wurden bewusst angebracht (farbig und aus Kunststoff), um diese bei Vergleichen als Referenzpunkte verwenden zu können (Abb. 15).

Die Messungen wurden über fünf Tage bei verschiedenen Luftfeuchten und einer konstanten Temperatur von 20 °C durchgeführt. Dabei wurde manuell von einer relativen Luftfeuchte von 50 % über 40 % auf 30 % r.F. herunter- und wieder heraufgefahren. Während der Umstellung wurde zunächst stündlich über einen Zeitraum von acht Stunden gescannt, danach erst wieder vor der nächsten Umstellung am nächsten Tag, ca. 24 h nach der letzten Umstellung.

Auch wenn die gewonnenen Punktwolken qualitativ hochwertig aussehen, konnten Fehlermeldungen zur Objektverschiebung aufgrund der Vibration des Kompressors, dessen Betrieb zur Aufrechterhaltung der Klimaeinstellungen nötig ist, nicht vermieden werden. Dies bedeutet, dass die Genauigkeit des 75er Objektivs bei der Auswertung niedriger als die eigentlichen 0,03 mm angesetzt werden muss. Erfasste Veränderungen können weiterhin qualitativ ausgewertet werden. Der Vergleich der einzelnen Messungen innerhalb von 25 Stunden zeigt, dass die stärkste Bewegung nach 7 Stunden auftritt (Abb. 16).

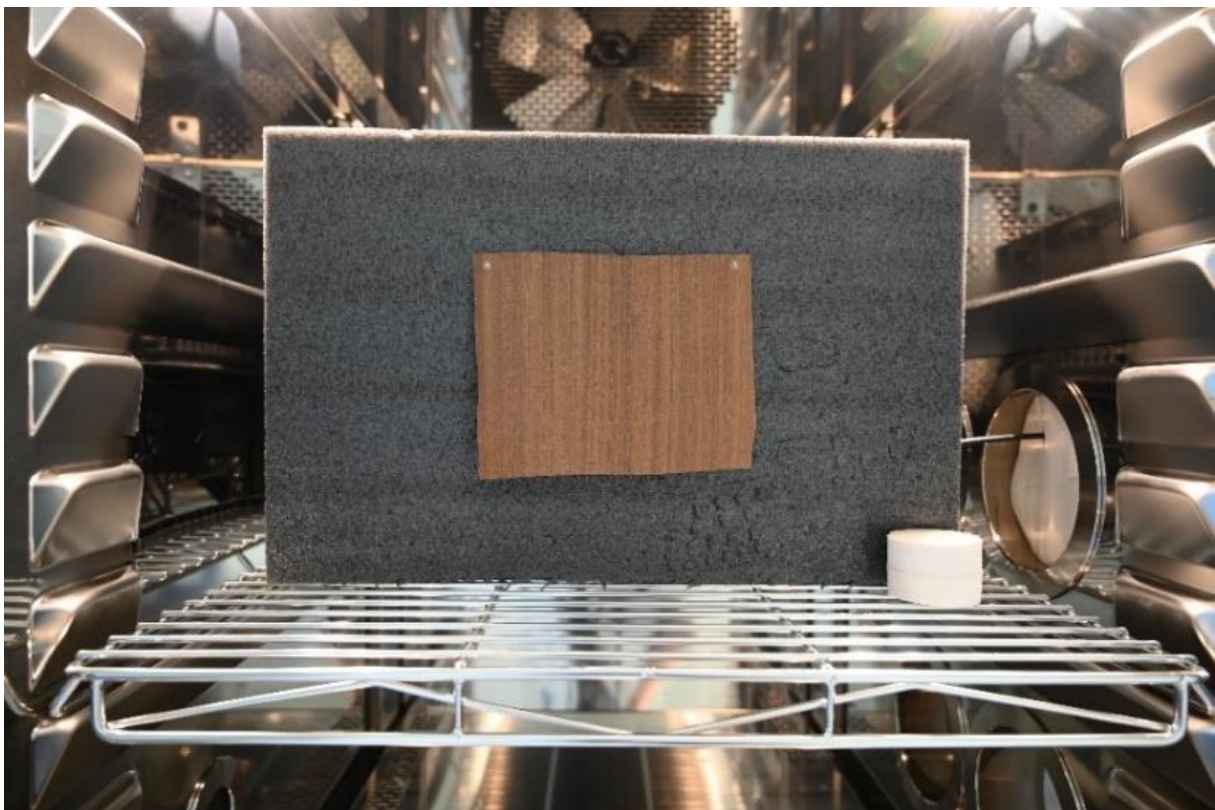


Abb. 15
Holzfurnier an Schaumstoffplatte angepinntes Holz (vor Wahl der Pins).

Wood veneer: Change from 50 % to 40 % RH: Comparison 1h 40 % vs

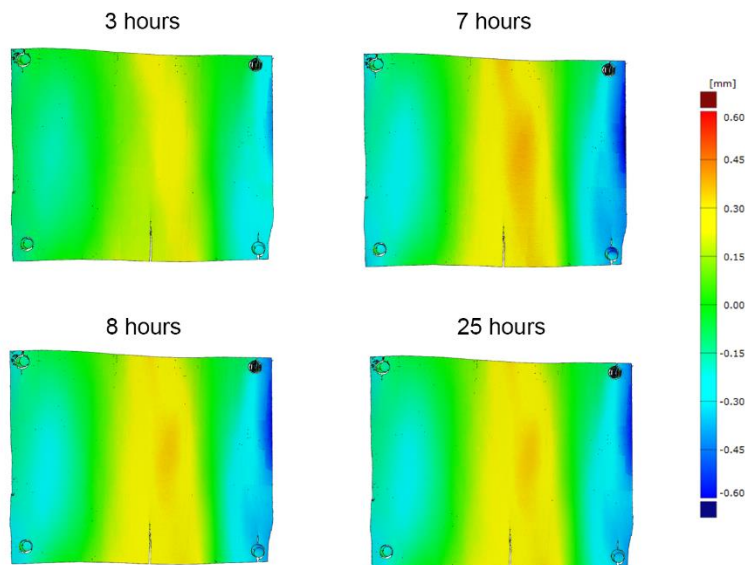


Abb. 16:

Untersuchung der Auswirkung einer 10 % igen Klimaschwankung von 50 % auf 40 % r.F. Die Veränderungen der Oberflächen nach einer Stunde bei 40 % r.F. werden mit denen nach 3, 7, 8 und 25 Stunden verglichen. Dabei zeigt sich, dass hier die höchste Spannung nach 7 Stunden auftritt.

Tests an historischen Ledertapeten

Von den Restauratoren in Schloss Moritzburg wurden für Klimaschrankversuche zwei Ledertapetenstücke (M 10 FH 58 und M 16 K 276) aus der originalen Raumausstattung von Schloss Moritzburg zur Verfügung gestellt. Mit diesen wurden Klimaversuche über 24 h durchgeführt. Dafür wurde basierend auf den Klimamessungen in Schloss Moritzburg eine Klimakurve entworfen, die in ihrem Verlauf und den Werten einem vereinfachten Tageszyklus an einem heißen Sommertag entspricht. Dabei bleibt die Temperatur über acht Stunden konstant bei 25 °C, die relative Luftfeuchtigkeit sinkt von 40 % auf 27 % ab und steigt danach wieder auf den Ursprungswert an. Aufgrund der Größe des Tapetenstücks wurde das 250er Objektiv mit 0,1 mm Genauigkeit verwendet. Damit konnte die Fläche in ca. 5 Minuten mit 6 Scans aufgenommen werden. Bei einem genaueren Objektiv mit geringerer Oberflächenerfassung bestand die Gefahr die Daten über einen zu langen Zeitraum bei wechselnden Luftfeuchten zu erfassen und demnach die Ergebnisse zu verfälschen. Die Vibration des Generators und die Schwingungen durch den Ventilator zeigen sich in den Ausrichtungen der Einzelscans. Die Verschiebungen sind allerdings in ihrer Gesamtheit so gering, dass die Scans nachbearbeitet und zu Vergleichen herangezogen werden können.

Die Ledertapete M 10 FH 58 (Abb. 17 links) zeigt beim neunstündigen Versuch vor allem im linken unteren Bereich eine starke Zunahme um ca. +1,4 mm bei 27 % r. F. Mit zunehmender Feuchtigkeit schwächt diese Verformung ab, erreicht aber nicht den Ursprungszustand. Wie schon beim Holzfurnier zu beobachten war, erreicht die Abnahme der Oberfläche erst nach dem Zyklusminimum bei aufsteigender Luftfeuchtigkeit ihr Maximum. In Vergleich der ersten mit der siebten Messung (also nach der ersten und der siebten Stunde) ist die Verformung mit -0,7 mm am oberen Rand der Ledertapete am stärksten. Bis auf eine geringe

Zunahme am linken oberen Rand sind keine Auffälligkeiten zu erkennen. In der Messung eine Stunde nach Ende des Messzyklus' ist bei gleichbleibender Luftfeuchtigkeit (40 %) die stärkste Zunahme des Versuches mit +1,5 mm zu verzeichnen (Abb. 18). Fehlstellen in der Ledertapete scheinen keinen Einfluss auf das Bewegungsverhalten. Das Gewicht war nach den Messungen um 0,02 g auf 27,86 g angestiegen.

Die Ledertapete M 16 K 276 (Abb. 17 rechts) durchlief denselben Zyklus bei 18 °C. Die Reaktion ist vergleichbar mit der ersten Ledertapete. Die maximale Bewegung zeigte die Tapete nach dem Absinken auf 27 % r.F. mit einer Bewegung von ca. 1,3 mm in beide Richtungen (Abb. 19).



Abb. 17:
Links: Ledertapete M 10 FH 58, rechts: M 10 FH 58.

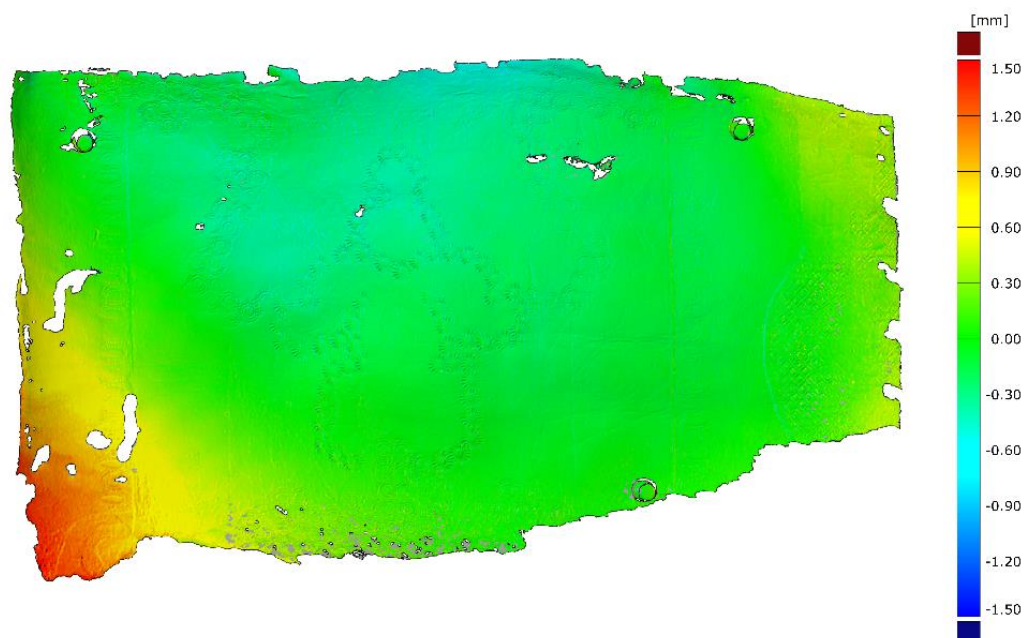


Abb. 18:
Bewertung der Auswirkungen einer Klimaschwankung von 40 % auf 27 % r.F. an der Ledertapete M 10 FH 58. Die Messung, die einer Stunde nach Ende der Klimaschwankung von 40 % r.F. auf 27 % und zurück auf 40 % r.F. erstellt wurde, zeigte sich die stärkste Abweichung zur ersten Messung um +1,5 mm.

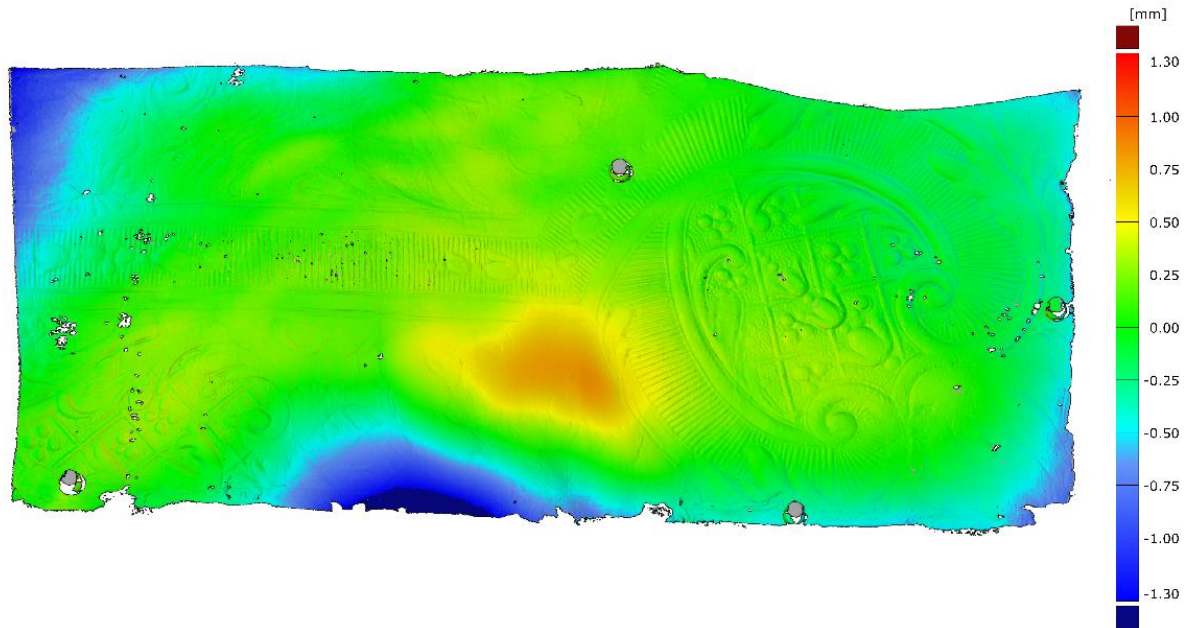


Abb. 19:
Bewertung der Auswirkungen einer Klimaschwankung von 40 % auf 27 % r.F. an der Ledertapete M 16 K 276. Die maximale Bewegung von $\pm 1,3$ mm stellte sich nach Änderung der relativen Feuchte auf 27 % r.F. ein.

2.6 Zeitrafferaufnahmen

Mit Hilfe der Fotokamera ist es möglich, mit Hilfe von Zeitrafferaufnahmen klimatisch bedingte Bewegungen an (vorgeschädigten) Oberflächen sichtbar zu machen. Dies war im Projekt teil des Monitorings. Da jedoch sich jedoch die Messkampagnen über mehrere Orte hinzogen, und das Equipment nicht über einen längeren Zeitraum unbewacht aufgestellt werden sollte, beschränkte sich die Zeitrafferaufnahmen auf die Fallstudie Schloss Moritzburg. Dort wurde im Zeitraum vom 17. bis 30 Juni 2021 die Fotokamera Nikon Z6 in Q8 (Chinesenzimmer) nahe der Monitoringfläche des Streifenlichtscanners für Zeitrafferaufnahmen aufgestellt. Alle 20 Minuten wurde ein Foto aufgenommen. Die Einstelloptionen (Blende, Belichtung, Schärfe, Iso-Wert) der Kamera wurden so gewählt, dass die Bilder möglichst identisch aufgenommen werden konnten. Im Anschluss an die Messungen wurden die Einzelaufnahmen in Adobe Photoshop zu einem Zeitrafferfilm geschnitten (im Anhang). Auf diese Weise konnte die klimatisch bedingte Bewegung an den Ledertapeten dokumentiert werden. Die sich ändernden Lichtverhältnisse erschwerten eine gleichmäßige Belichtung. Außerdem sind vermutlich manche Bewegungen dem Holzboden geschuldet, der beim Betreten durch Besucher schwingt und so die Kameraposition leicht verändert. Das Raumklima war in Zeitraum der Aufnahmen sehr stabil, die Temperatur lag zwischen 23 und 25 °C, und die relative Feuchte schwankte zwischen 48 % und 61 %, wobei die täglichen Schwankungen unter 5 % lagen. Dementsprechend waren keine größeren Bewegungen festzustellen.

3. Fallstudien

3.1 Wandmalereien in Schloss Albrechtsburg

Die Wandmalereien der Albrechtsburg Meißen wurden im 19. Jahrhundert angefertigt. Dieser Zeitraum zeichnet sich durch die Experimentierfreudigkeit der Künstler und der Verwendung von bis dato wenig in Hinblick auf ihre Haltbarkeit erprobte Farb- und Bindemitteln aus. Dementsprechend sind die Malereien teilweise aus maltechnischen Gründen in einem schlechten Zustand. Sie weisen zum Teil ein großflächiges Craquelé auf und sind großflächig gelockert. Gleichzeitig schwankt das Raumklima im Schloss stark, so dass sich dies zusätzlich negativ auf die Erhaltung auswirkt. Seit vielen Jahren werden umfassende restauratorische Arbeiten an den sehr großflächigen Wandmalereibeständen durchgeführt. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden charakteristische Flächen untersucht, die zum einen die Auswirkung von klimatischen Schwankungen auf vorgeschädigte Oberflächen zeigen soll. Zum anderen wurde untersucht, ob die konservierenden Maßnahmen durch systematische Malschichtfestigungen aller Flächen ihre Wirkung zeigen, oder ob sich aufgrund der klimatischen Situation neue Schäden einstellen. Die Referenzflächen sind im Anhang zu finden.

3.1.1 Auswertung Klimamessungen

Ähnlich wie im Schloss Moritzburg ist in älteren Dokumenten und Aufzeichnungen vor allem von zeitweise sehr hohen Luftfeuchten bis hin zum Tauwasserausfall die Rede. Raumklimatische Aufzeichnungen gibt es in der Albrechtsburg viele, aber keine fortlaufende Raumklimamessung an festen Messpunkten. Diese einzelnen Messaufgaben aus den zurückliegenden Jahren verdeutlichen gut, dass das Thema Trockenheit erst in den letzten Jahren an Bedeutung zugenommen hat. Eine umfangreiche raumklimatische Erfassung der Albrechtsburg Meißen wird seit hat 2018 aufgebaut (Abb. 20).

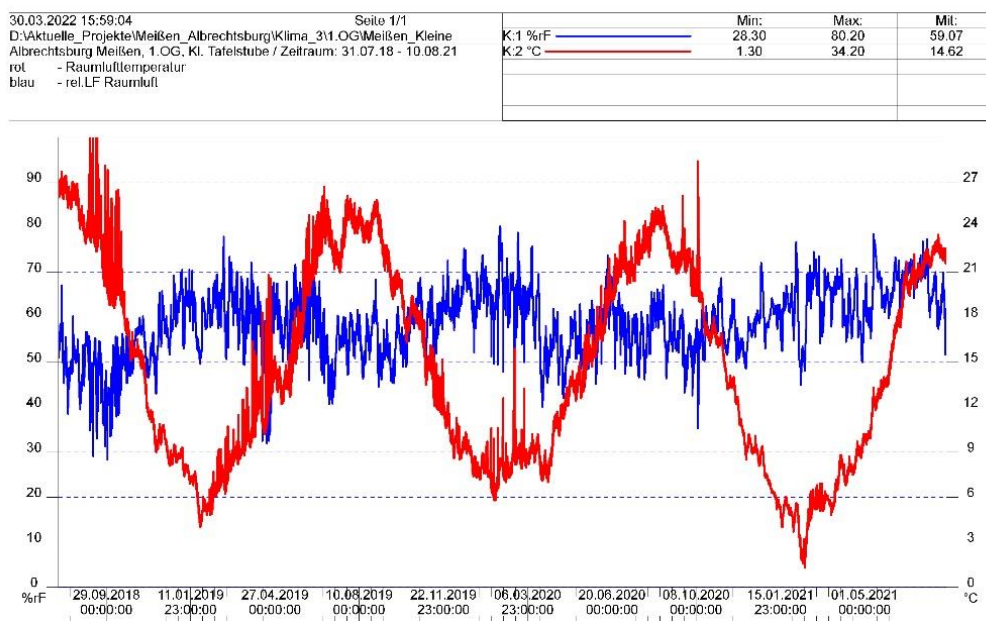


Abb. 20:
Schloss Albrechtsburg, Kleine Tafelstube, Raumklima 2018 bis 2021.

Abb. 21 zeigt das gemessene Raumklima in den Räumen, in denen Referenzflächen festgelegt wurden über den gesamten Messzeitraum von 26. August 2020 bis 7. August 2021. Hier wird insbesondere in den relativen Feuchten sichtbar, dass sich das Raumklima im Schloss stark unterscheidet und stark von der geographischen Lage des Raumes abhängt. In Hinblick auf die relative Feuchte variieren die Werte in den drei Räumen zum Teil sehr stark. Insbesondere die Messposition im 2. OG West (vgl. Abb. 21) weist hohe Schwankungen von unter 30 % bis über 90 % r.F. auf.

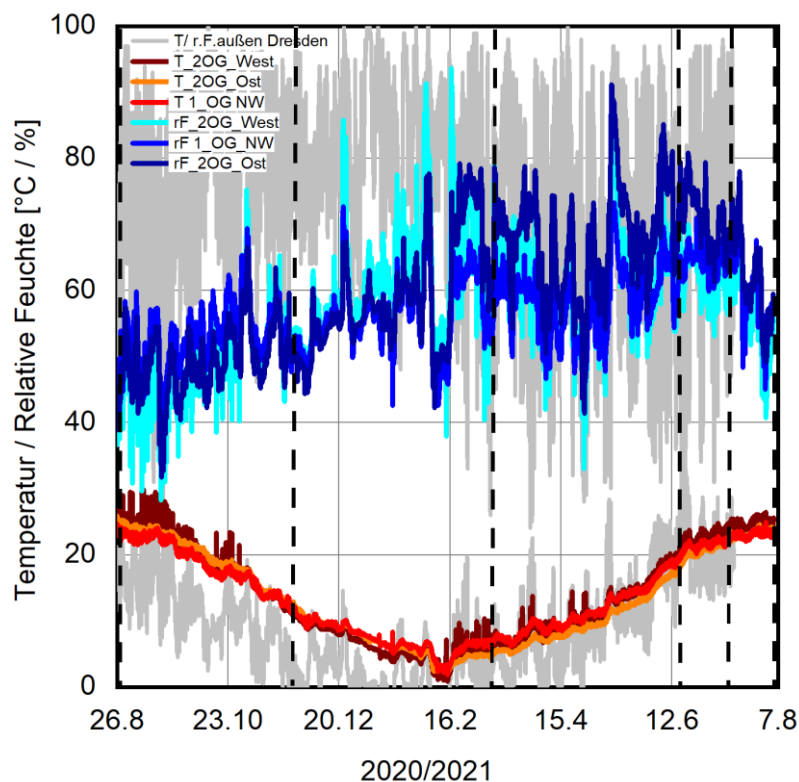


Abb. 21:
Darstellung der relativen Feuchte und Temperaturen an den drei Messpositionen über den gesamten Messzeitraum des Forschungsprojektes.

3.1.2 Auswertung der Streifenlichtscans

In der Albrechtburg wurden ein charakteristisches Detail der Wandmalereien im großen Saal des ersten OGs, sowie je eine Fläche im Kleinen und Großen Appellationssaal im zweiten OG mit dem 250er Objektiv aufgenommen (Abb. 22). Die vorgeschädigte Fläche im Großen Appellationssaal ist durch die Sonne, die zeitweise über die Malereien streicht, stark belastet. Nichtsdestotrotz zeigte sich die Malschicht unkritisch gegenüber der klimatischen Situation (Abb. 23 links). Die gefestigte Testfläche im 1. OG wies während der sieben Messkampagnen nur geringfügige Veränderungen auf. Der Erfolg der restauratorischen Strategie der konsequenten kontinuierlichen Festigung gelockerter Malschichten konnte durch das Monitoring nachgewiesen werden. Im kleinen Appellationssaal (2.OG Ost) wurden innerhalb der gelockerten Malschicht im Vergleich der dritten und sechsten Messung Bewegungen von 0,3 mm verzeichnet (Abb. 23 rechts).



Abb. 22: Links: Aufnahme der gelockerten Wandmalerei im Großen Appellationszimmer in Schloss Albrechtsburg. Das durch die Fenster einfallende Licht wird mit einer provisorischen Verschattung während des Scanprozesses abgehalten.

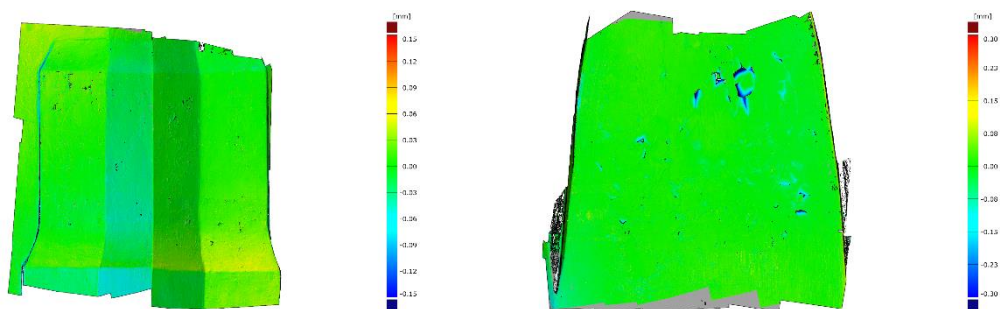


Abb. 23:

Vergleich der Referenzfläche im Großen und Kleinen Appellationsaal zwischen 10. März und 18. Juni 2021. Im Großen Appellationsaal (links) sind geringfügige Bewegungen von $\pm 0,06$ mm erkennbar. Die Referenzfläche im Kleinen Appellationsaal (rechts) zeigt innerhalb der gelockerten Malschichten Bewegungen nach hinten (max. 0,3 mm).

3.2 Tafelgemälde von Lucas Cranach d. Jüngeren in Schloss Augustusburg

Das Tafelgemälde in der Augustusburger Schlosskapelle blickt auf eine umfangreiche Restaurierungsgeschichte zurück.³ Bis 2015 wurden der Zierrahmen und das Tafelgemälde aufwändig restauriert. Letzteres wies aufgrund der Dünnung des Trägermaterials der Tafel einen Riss von ca. 20 cm Länge in der Mitte der Tafel auf. Eine Aufdopplung der Rückseite mit der Möglichkeit das Raumklima zu puffern, sollte dem entgegenwirken. Ein detailliertes Klimamonitoring, das seit dem Abschluss der

³ Eisbein, Manfred: Die Restaurierungsgeschichte des Augustusburger Cranach-Altars in: Arbeitshefte des Landesamtes für Denkmalpflege Sachsen (Hrsg.): Der Cranach-Altar in der Augustusburger Schlosskapelle, S. 52-57.

Restaurierung auf der Rückseite des Tafelgemäldes durch das IDK durchgeführt wird, ergab, dass die trockenen Sommer der Jahre 2018, 2019 und 2020 das Raumklima in der Schlosskapelle stark beeinflussen und sehr geringe relative Feuchten vorliegen (siehe 3.2.1). Die Besorgnis hinsichtlich neuer klimatisch bedingter Schäden machte diese Fallstudie zu einer wichtigen Referenzoberfläche für das Forschungsprojekt. Daher wurden im Rahmen des Projektes insbesondere der ehemalige Riss in der Mitte des Tafelgemäldes als Monitoringfläche ausgewählt. Weiter wurde links davon ein kleiner Riss identifiziert, der weder Kittung noch Retusche aufwies, und somit jünger als die abgeschlossene Restaurierung sein musste. Auch hier wurde eine Scanfläche für das regelmäßige Monitoring definiert (siehe Abb. 24).



Abb. 24:
Altargemälde von Lucas Cranach dem Jüngeren mit den Positionen der Streifenlichtscanaufnahmen.

Im Oktober 2020 wurde der Altar in Schloss Augustusburg eingerüstet. Ziel war es, den Erhaltungszustand des Gemäldes und des Zierrahmens fünf Jahre nach der Restaurierung durch das damals damit betraute Fachpersonal in Hinblick auf neue Schäden zu überprüfen. Die Projektbeteiligten wurden gemeinsam mit dem betreuenden Personal seitens des Landesamtes zu einem gemeinsamen Besprechungstermin eingeladen. Nach einer kurzen Einführung in das Forschungsprojekt wurde der Zustand des Altars diskutiert. Es bestand Einigkeit, dass das Tafelgemälde sich in einem besseren Zustand befindet als befürchtet. Dies wurde insbesondere dem Mikroklima, das durch die Aufdopplung der Rückseite ermöglicht wurde, zugeschrieben. Gleichzeitig wurde von den Restauratorinnen die Annahme des Forschungsteams von „Kleiner 40“, dass es sich bei dem linken Riss, um ein neues Schadensbild handelt, bestätigt und als sinnvolle Monitoring Position erachtet. In diesem Zuge rieten die Restauratorinnen von der ursprünglich angedachten weiteren Scanposition an der Kanzel ab und empfahlen stattdessen, exemplarisch Teile der restaurierten Predella zu untersuchen. Daher wurde die Volute der Predella an der Südwestseite des Altars aufgenommen, an der eventuell zu erwartende Veränderungen an Ersatzstellen untersucht werden sollen (Abb. 25). Die 3D-Scans wurden wie am Tafelgemälde mit dem L3D Comet mit dem 250er Objektiv durchgeführt.

Das Gerüst wurde außerdem genutzt, um das Tafelgemälde einmal komplett zu scannen (Abb. 26). Um die Lage des Altars in der Kirche zu ermitteln und damit Fehlerquellen in der Nachbearbeitung zu minimieren, wurde ein Übersichtsscan mit dem terrestrischen Laserscanner Faro Focus angefertigt (Abb. 27).

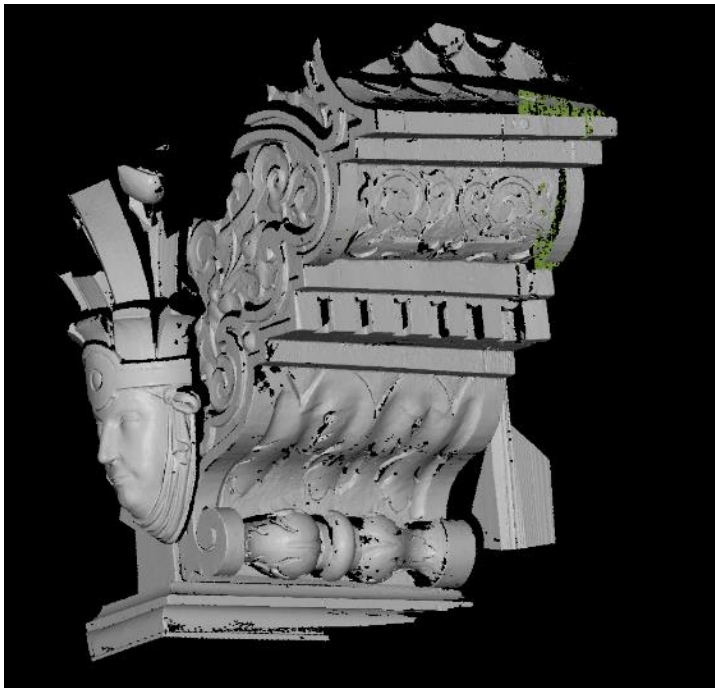


Abb. 25:
3D-Scan an der Predella am Altar der Schlosskirche Augustusburg.

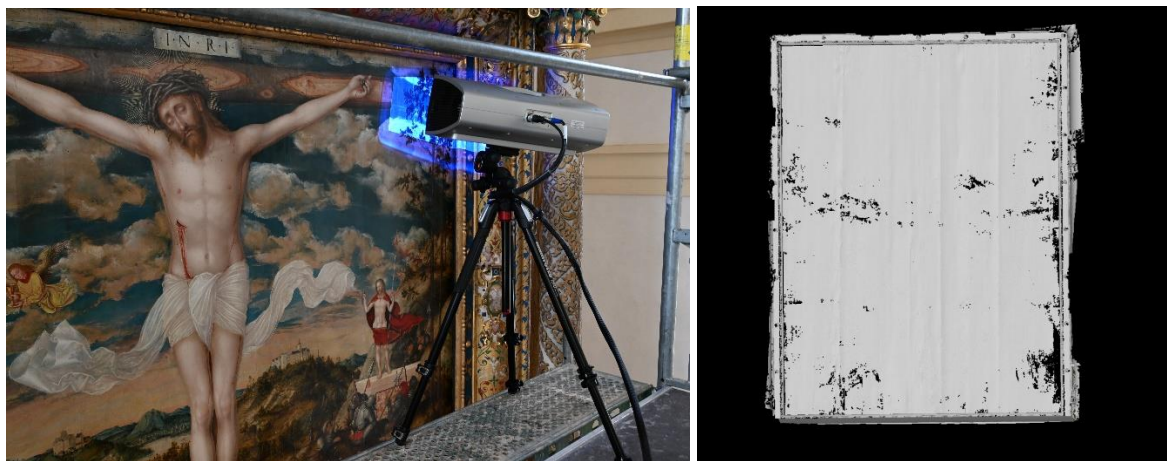


Abb. 26:
Links: 3D-Scan auf Gerüst zum Zwecke der Bestandsdokumentation. Rechts: Gesamtscan des Cranach-Altars in der Schlosskirche Augustusburg mit dem 800er Objektiv des Comet L3D.



Abb. 27:
Scanvorschau der Schlosskirche der Augustusburg des Faro Focus Scans.

3.2.1 Auswertung Klimamessungen

Die Auswertung der Klimadatensätze aus der Schlosskapelle von Schloss Augustusburg zeigte, dass sich das Raumklima langsam in einen zu trockenen Zustand verändert (Abb. 28). Hier muss aber angemerkt werden, dass es noch keine Aussage darüber geben kann, wann ein Raumklima zu trocken wird. Nur durch dokumentierte Veränderungen an der Ausstattung und durch eindeutig festgestellte Schäden in Kombination mit einer Klimamessung können solche Aussagen getroffen werden. Am Cranach-Altar in der Schlosskapelle von Schloss Augustusburg sind es deutliche Veränderungen am Tafelgemälde (Schwindprozesse), die eine kritische temporäre Raumluftfeuchte ableiten lassen. Dies war eine Entwicklung von ca. 10 Jahren und konnte nur durch die langfristig angelegte Raumklimaerfassung und Messung der Breite des Tafelgemäldes erkannt werden (Abb. 29). „Kurzzeitige“ Messungen von ca. 3 bis 4 Jahren hätten diese Entwicklung nicht erkennen lassen.

Anhand der Langzeitmessungen konnte erkannt werden, dass sich im Raumklima die Werte der relativen Luftfeuchte verändert haben. Im Zeitraum 1999 bis 2008 gab es neben trockenen Zeiträumen (<50% r.F.) auch zeitliche Abschnitte mit höheren Feuchtwerten (>80% r.F.). Ab ca. 2012 sind dann vermehrt vor allem trockene Raumklimasituationen feststellbar, die dann auch über mehrere Wochen anhalten konnten (Abb. 28). Durch diese Verschiebung der Raumluftfeuchte kommt es zu einer Feuchteabgabe aus porösen Materialien und somit auch zu Verformungen durch Schwindprozesse.

| | | | | | |
|---|--|-----------|-------|-------|-------|
| 24.03.2022 16:17:48 | | Seite 1/1 | Min: | Max: | Mit: |
| D:\Aktuelle_Projekte\Augustusburg_Schloss\Klima\Klima\Berechnet\Kapelle-Klima | | K:1 %rF | 24.80 | 99.90 | 65.01 |
| Raumklima Kapelle: April 1999 bis August 2021 | | K:2 °C | -3.10 | 27.60 | 12.33 |
| rot - Raumlufttemperatur | | | | | |
| blau - rel.LF Raumluft | | | | | |

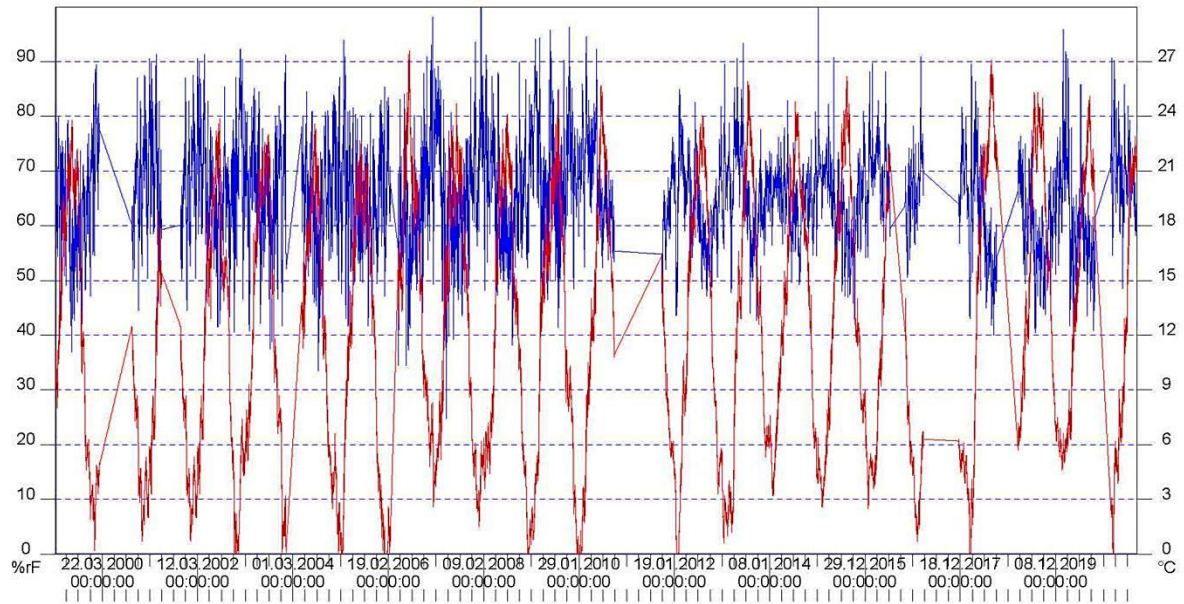


Abb. 28
Schloss Augustusburg, Schlosskapelle, Raumklima 1999 bis 2021.

| | | | | | |
|--|--|-----------|----------|---------|--------|
| 06.10.2021 09:49:34 | | Seite 1/1 | Min: | Max: | Mit: |
| D:\Aktuelle_Projekte\Augustusburg\Klima\Riss_Neu\Riss-Feuchte_1-45.vi2 | | K:7 %rF | 35.90 | 86.10 | 60.27 |
| | | K:5 %rF | 38.60 | 77.60 | 58.05 |
| | | K:3 %rF | 49.90 | 74.10 | 60.78 |
| | | K:1 µm | -6134.00 | 7328.00 | 366.62 |

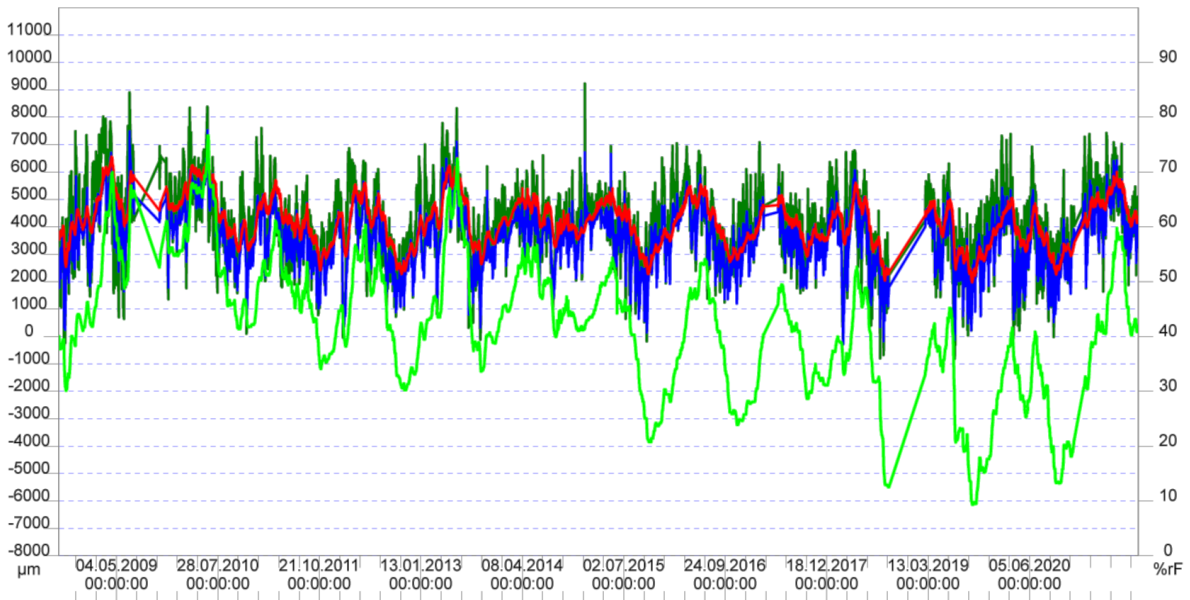


Abb. 29:
Langzeitklimamessung am Tafelgemälde in Schloss Augustusburg an unterschiedlichen Positionen bzw. in unterschiedlicher Schichttiefe. Die hellgrüne Linie zeigt die Breite des in der Mitte der Tafel aufgetretenen Risses. Insbesondere in den Jahren ab 2018 zeigen sich hier immer größer werdende Längenänderungen.

Abb. 30 zeigt das an der Kanzel gemessene Raumklima für den Zeitraum der Messungen (26. August 2020 bis 8 August 2021) im Vergleich zum Außenklima. Die Temperatur liegt im Mittel bei ca. 10,7 °C (Minimum: -1,0 °C; Maximum: 23,1 °C), die relative Feuchte im Mittel bei 63,1 % r.F. (vgl. Tabelle 1).

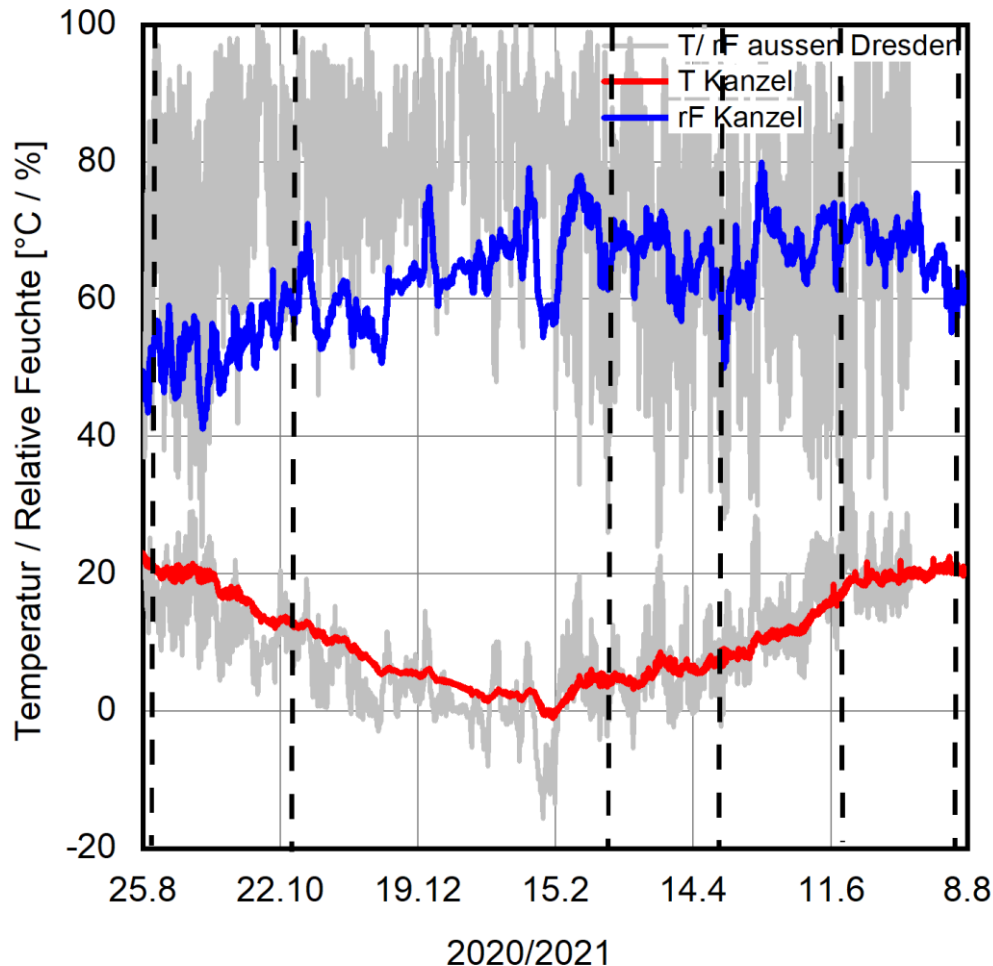


Abb. 30: Liniendiagramm der Temperatur (rot) und relativen Feuchte (blau) für den gesamten Messzeitraum von August 2020 bis August 2021. Die grauen Linien stellen das in Dresden gemessene Außenklima dar. Die gestrichelten Linien markieren die Zeiträume der Messkampagnen.

3.2.2 Auswertung Streifenlichtscanning

Die beiden Positionen am Tafelgemälde zeigten ähnliche Reaktionen gegenüber dem Raumklima. Der Riss, der im Rahmen der Restaurierung geschlossen, verkittet und retuschiert wurde, zeigte zu etwas geringeren Bewegungen als der neu entstandene Riss. In Abb. 31 ist der Vergleich zwischen April und Juni 2021 abgebildet, bei dem die höchsten Schwankungen der relativen Feuchte von 29,5 % verzeichnet wurden (Min.: 50,8 %, Max.: 80,0 % r.F.). Als Reaktion sind Bewegungen der Oberflächen von bis zu ±0,5 mm festzustellen. Die Predella reagiert ebenfalls auf die hohen Klimaschwankungen mit Bewegungen von bis zu ±0,25 mm (Abb. 32).

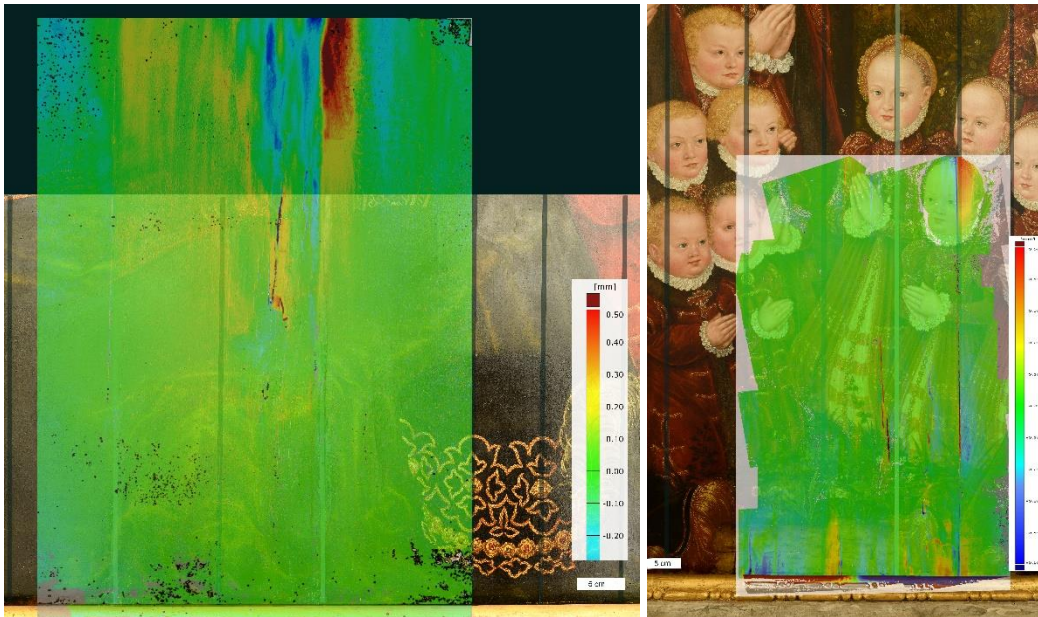


Abb. 31:
 3D-Vergleich des Tafelgemäldes zwischen April und Juni 2021, die zur besseren Lesbarkeit auf eine Fotografie des Ausschnitts gelegt wurde. Zur Verortung der Bewegung sind die Holzfugen (graue Linien) eingezeichnet. In diesem Zeitraum wurden die höchsten Schwankungen der relativen Feuchte von 29,2 % verzeichnet. Die Tafel zeigt an beiden Positionen Bewegungen von $\pm 0,5$ mm (links) bzw. $\pm 0,3$ mm rechts.

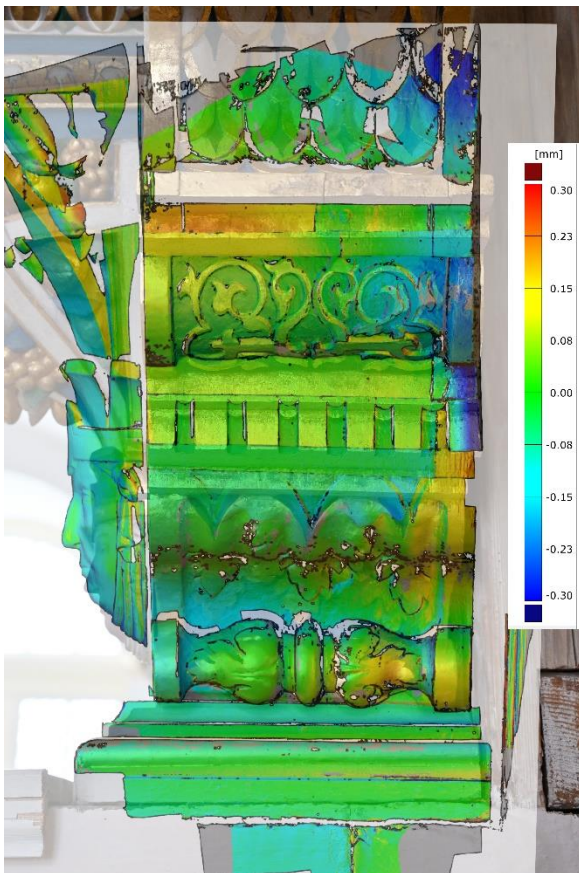


Abb. 32:
 3D-Vergleich der Predella zwischen April und Juni 2021, die zur besseren Lesbarkeit auf eine Fotografie des Ausschnitts gelegt wurde. Hier lagen Bewegungen von $\pm 0,25$ mm vor.

Tabelle 1:

Auflistung der Zeiträume, in denen die Messkampagnen durchgeführt wurden, sowie die statistische Auswertung der Klimadaten, die an der Kanzel erhoben wurden. In der Tabelle werden jeweils die Werte für den Zeitraum zwischen zwei Messungen dargestellt. Die statistische Auswertung für den Zeitraum vom 25. August 2020 bis 8. August 2021 ist in der letzten Zeile dargestellt.

| Nr. | Datum | | Minimum | Mittelwert | Maximum | Δ |
|--|------------------|----------------------|---------|------------|---------|----------|
| 1 | 25. August 2020 | unzutreffend | | | | |
| 2 | 27. Oktober 2020 | Temperatur[°C] | 12,1 | 17,6 | 23,1 | 11,0 |
| | | Relative Feuchte [%] | 41,1 | 52,9 | 64,3 | 23,2 |
| 3 | 8. März 2021 | Temperatur[°C] | -1,0 | 5,2 | 13,1 | 14,1 |
| | | Relative Feuchte [%] | 50,7 | 63,8 | 79,1 | 28,4 |
| 4 | 27. April 2021 | Temperatur[°C] | 3,2 | 5,7 | 9,1 | 5,9 |
| | | Relative Feuchte [%] | 49,9 | 66,0 | 73,3 | 23,4 |
| 5 | 16. Juni 2021 | Temperatur[°C] | 7,1 | 11,8 | 18,5 | 11,4 |
| | | Relative Feuchte [%] | 50,8 | 67,4 | 80,0 | 29,2 |
| 6 | 12. Juli 2021 | Temperatur[°C] | 17,2 | 5,7 | 19,3 | 2,1 |
| | | Relative Feuchte [%] | 61,8 | 69,3 | 73,3 | 11,5 |
| 7 | 6. August 2021 | Temperatur[°C] | k.a. | k.a. | k.a. | k.a. |
| | | Relative Feuchte [%] | k.a. | k.a. | k.a. | k.a. |
| Statistische Auswertung im Zeitraum von 24. August 2020 bis 8. August 2021 | | Temperatur[°C] | -1,0 | 10,7 | 23,1 | 24,1 |
| | | Relative Feuchte [%] | 41,1 | 63,1 | 80,0 | 38,9 |

3.3 Ledertapeten von Schloss Moritzburg

Die weltweit einzigartige Sammlung barocker Ledertapeten war Fokus der Fallstudie in Schloss Moritzburg. Diese sind aufgrund ihrer Materialität sehr sensibel gegenüber Schwankungen von Temperatur und relativer Feuchte. In den letzten Jahrzehnten gab es bereits einige Untersuchungen zu den Tapeten.⁴ Außerdem wurden für die Neupräsentation nach der umfangreichen Restaurierung einzelner Räume unterschiedliche Hängemethoden ausgetestet. Der letzte Ansatz, die Tapeten an Magnetschienen zu montieren ist aus konservatorischer Sicht unbedenklich, da sich die einzelnen Tapetenteile bewegen können und so keine Spannungen im Materialverbund entstehen. Allerdings entstehen aufgrund der Bewegungsfreiheit Verwölbungen, die einen welligen Eindruck der Wandfläche erwecken. Daher ist diese Art der Montage aus ästhetischen Gründen nicht für die Fortsetzung der weiteren Räume geplant. Im Rahmen des Projektes wurden Tapeten aus Räumen untersucht, die bisher nicht restauriert wurden. Die historische Montage erfolgte mit Nägeln an einem Holzrahmen. Dadurch sind die einzelnen Tapetenstücke eingeschränkt in ihrer Bewegung, so dass es bei klimatischen Schwankungen und dem daraus resultierenden Quellen und

⁴ Schulze, Andreas: Die Ledertapeten im Schloß Moritzburg in: Denkmalpflege in Sachsen 1894–1994. Teil I, Weimar 1997, S. 229–240.

Schrumpfen zu Rissbildungen kommt. In drei Räumen wurden anhand von Referenzflächen vorgeschädigte Tapeten untersucht.

3.3.1 Auswertung Klimamessungen

Die Auswertung der Langzeitklimamessung

Die Klimamessungen aus Schloss Moritzburg und die dortige intensive Befassung mit dem umfangreichen Bestand an Ledertapeten zeigten auf, dass sich auch in diesem Objekt die Raumklimadaten ändern. Es wird beobachtet, dass sich bestimmte Lederbahnen verformen und, dass sich bereits geschädigte Flächen weiter negativ entwickeln, u.a. weiten sich bereits bestehende Risse. Aus älteren Klimaaufzeichnungen der 1970er Jahre ist bekannt, dass man in zurückliegenden Jahrzehnten vor allem ein Schimmelpilzwachstum an einigen Ledertapeten im Blick haben musste. Davon ist derzeit keine Rede mehr. Die Auswertung der Klimamessung im Schrankzimmer (Q7) über einen Zeitraum von 10 Jahren zeigt Werte von minimal 30,9 % r.F. und maximal 80,8 % r.F. (Abb. 33). Die geringen Werte um 30 % r.F. haben in den Jahren ab 2018 stark zugenommen. Das Temperaturmaximum von 30,4 °C wurde im August 2018, bei einer gleichzeitig sehr niedrigen Feuchte unter 30 % gemessen!

| | | | | |
|--|-------------------|---------|-------|-------|
| 24.03.2022 16:40:07 | Seite 1/1 | Min: | Max: | Mit: |
| D:\Aktuelle_Projekte\Moritzburg_Schloss\Schloss\Klima\Berichte\Schrankzimmer.vk:1 °C | | 0.00 | 30.40 | 16.42 |
| Schloss Moritzburg, Schrankzimmer / Zeitraum: 31.03.2011 - 28.01.2021 | | K:2 %rF | 30.90 | 80.80 |
| rot | - Lufttemperatur | | | |
| blau | - rel.LF Raumluft | | | |

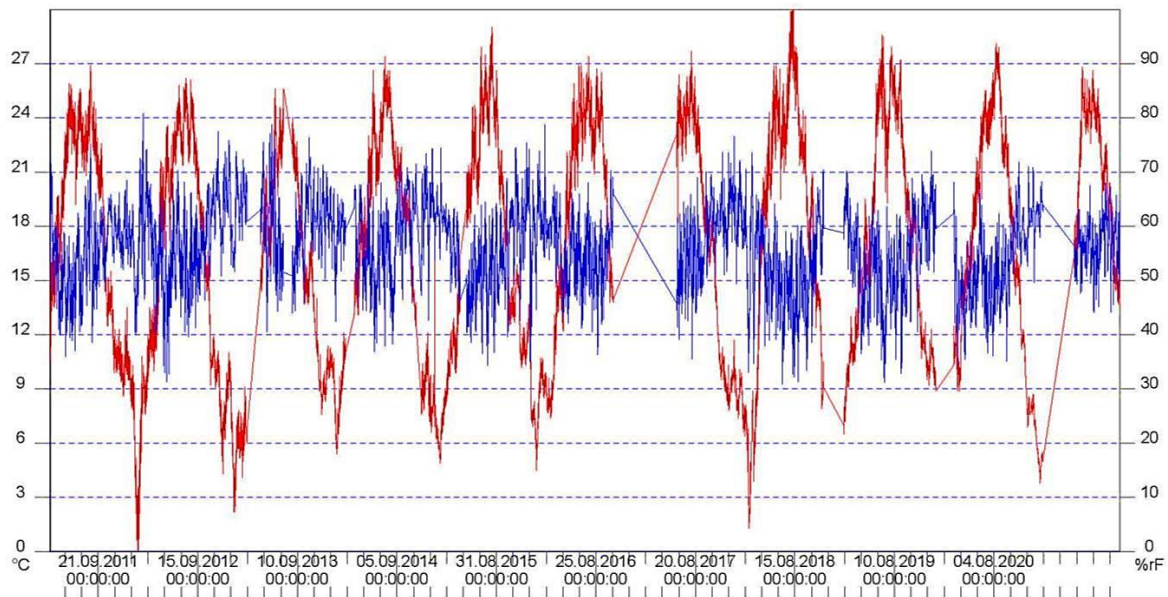


Abb. 33:

Langzeitklimamessung von Temperatur und relative Feuchte im Schrankzimmer Q7 von Schloss Moritzburg.

In Abb. 34 ist die Auswertung des Raumklimas in den drei Räumen Q6, Q7 und Q8 dargestellt. Diese befinden sich in unterschiedlichen Himmelsrichtungen (siehe Abb. C1), so dass sich ein geringfügig unterschiedliches Mikroklima einstellt. Die geringsten Werte der relativen Feuchte wurden in Q8 mit 27 % r.F. gemessen.

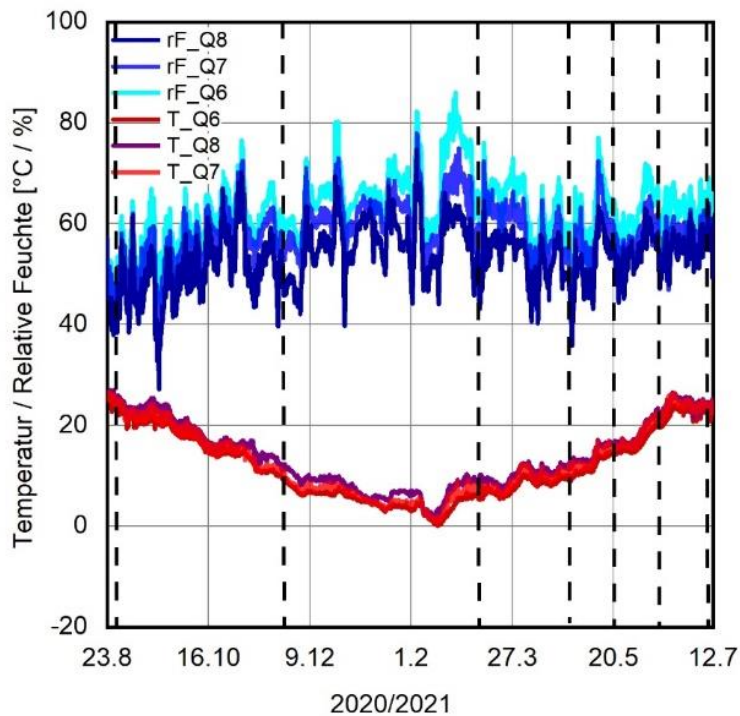


Abb. 34:

Auswertung der Klimadaten der drei Räume Q6, Q7 und Q8 über den Messzeitraum von 23.8.2020 bis 12.7. 2021. Die schwarz gestrichelte Linie markiert die Messkampagnen.

3.3.2 Auswertung Streifenlichtscanning

Die Ledertapeten zeigten im Vergleich zu den anderen untersuchten Materialkombinationen die größte Reaktion auf klimatische Schwankungen. Diese waren an allen drei Messpositionen (siehe Anhang) bei allen Vergleichen stark ausgeprägt. Im monatlichen Vergleich ist gut sichtbar, wie sich die Oberflächen an bereits vorgeschädigten Flächen nach vorne und nach hinten bewegen (Abb. 35, 36). Die maximale Bewegung wurde im Zeitraum zwischen Mai und Juli 2021 gemessen. In diesem Zeitraum waren die klimatischen Schwankungen mit 19 % vergleichsweise gering (siehe Tabelle 2). Die größten Schwankungen der relativen Feuchte wurden im Zeitraum zwischen August und November 2021 gemessen. Der Vergleich der 3D-Scans zeigte jedoch eine geringere Reaktion auf diese Schwankungen (Abb. 36).⁵ Daher muss es einen weiteren Grund für die starken Bewegungen geben. Da aufgrund der Coronarestriktionen das Haus für einige Monate geschlossen war und erst im Mai wieder geöffnet wurde, könnte die erneute Frequentierung durch Besucher und die damit zusammenhängende Veränderung der Luftströmung eine Rolle gespielt haben. Dies wurde aber nicht weiterverfolgt.

⁵ Im Rahmen der Veröffentlichung für die „International Conference on Cultural Heritage and New Technologies Vienna 2021“ wurden die Scanvergleiche in Raum Q8 detailliert ausgewertet.

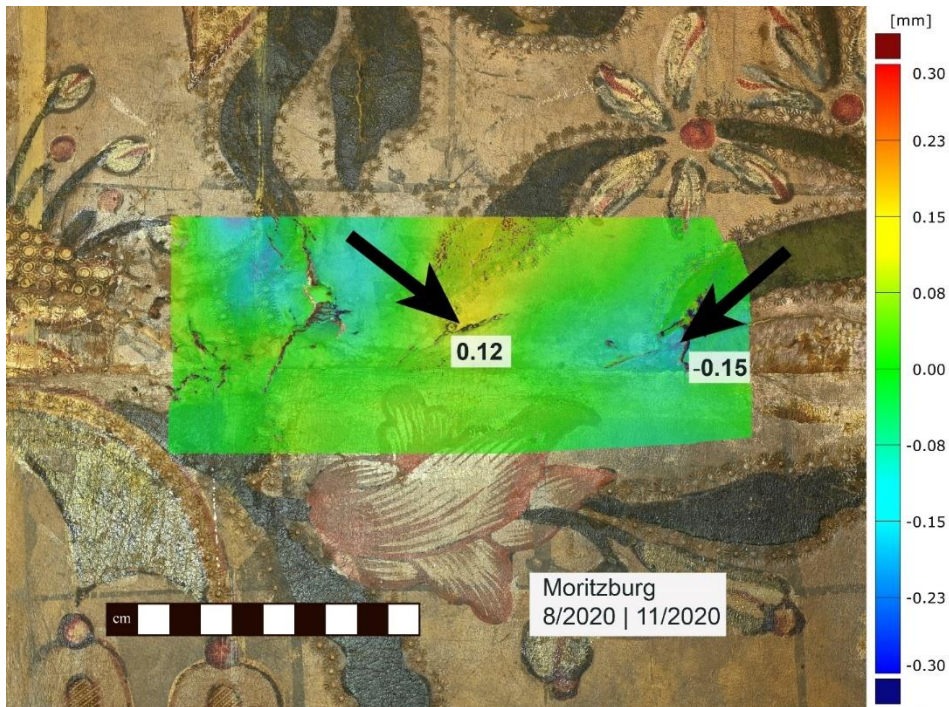


Abb. 35:
3D-Vergleich der Ledertapete zwischen August 2020 und November 2020, die zur besseren Lesbarkeit auf eine Fotografie des Ausschnitts gelegt wurde. In diesem Zeitraum wurden die höchsten Schwankungen der relativen Feuchte verzeichnet. Dennoch ist die Reaktion der Ledertapete gering (± 0.15 mm).

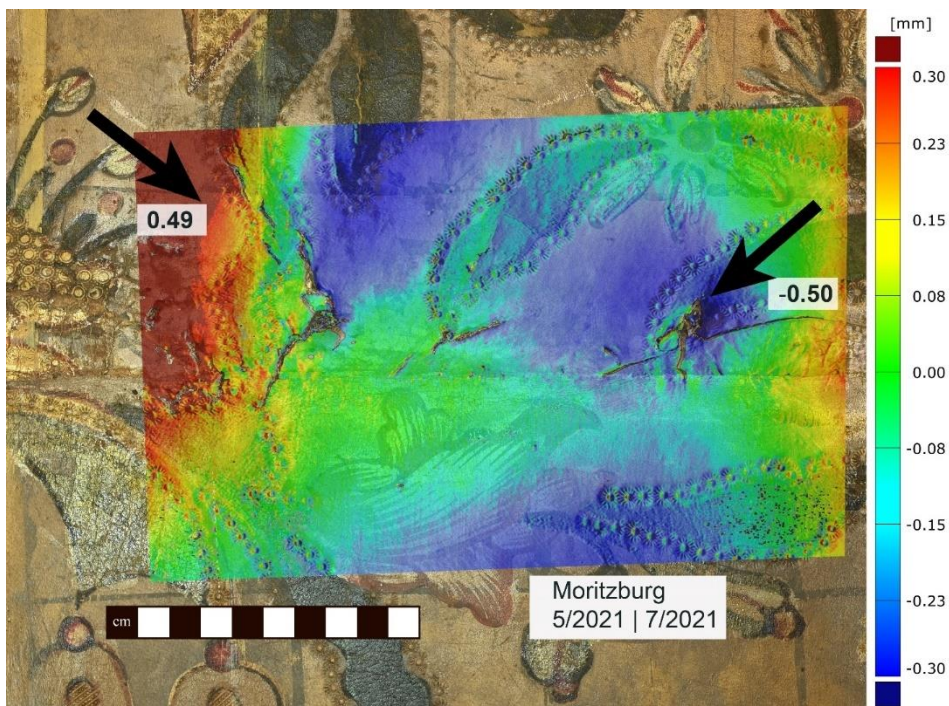


Abb. 36:
3D-Vergleich der Ledertapete zwischen Mai und Juli 2021, die zur besseren Lesbarkeit auf eine Fotografie des Ausschnitts gelegt wurde. Innerhalb der Ledertapete ist eine deutliche Verschiebung zu erkennen, insbesondere an den bereits beschädigten Oberflächen (hellblau zu dunkelblau: Verschiebung nach hinten, hellgrün zu rot: Verschiebung nach vorne). Die Messungen wurden mit einer Auflösung von $30 \mu\text{m}$ durchgeführt. Hier ist eine Verschiebung von etwa $\pm 0,5$ mm sichtbar.

Tabelle 2:

Auflistung der Zeiträume, in denen die Messkampagnen durchgeführt wurden, sowie die statistische Auswertung der Klimadaten, die hinter dem Tafelgemälde erhoben wurden. In der Tabelle werden jeweils die Werte für den Zeitraum zwischen zwei Messungen dargestellt. Die statistische Auswertung für den Zeitraum vom 24. August 2020 bis 5. August 2021 ist in der letzten Zeile dargestellt.

| Nr. | Datum | | Minimum | Mittelwert | Maximum | Δ |
|--|----------------------|----------------------|---------|------------|---------|----------|
| 1 | 24./ 25. August 2020 | unzutreffend | | | | |
| 2 | 25. November 2020 | Temperatur[°C] | 10.9 | 19.1 | 27.1 | 16.2 |
| | | Relative Feuchte [%] | 27.1 | 50.3 | 70.2 | 43.1 |
| 3 | 9. März 2021 | Temperatur[°C] | 1.4 | 7.3 | 11.9 | 10.5 |
| | | Relative Feuchte [%] | 39.7 | 56.1 | 74.8 | 35.1 |
| 4 | 6. April 2021 | Temperatur[°C] | 6.8 | 10.3 | 12.9 | 6.1 |
| | | Relative Feuchte [%] | 40.2 | 53.1 | 64.6 | 24.4 |
| 5 | 20. Mai 2021 | Temperatur[°C] | 11.4 | 14.4 | 17.2 | 5.8 |
| | | Relative Feuchte [%] | 35.8 | 52.5 | 63.4 | 27.6 |
| 6 | 2. Juli 2021 | Temperatur[°C] | 15.8 | 21.7 | 26.6 | 10.8 |
| | | Relative Feuchte [%] | 44.3 | 54.7 | 63.4 | 19.1 |
| 7 | 5. August 2021 | Temperatur[°C] | 22.5 | 24.9 | 26.6 | 4.1 |
| | | Relative Feuchte [%] | 36.9 | 54.0 | 69.0 | 32.1 |
| Statistische Auswertung im Zeitraum von 24. August 2020 bis 5. August 2021 | | Temperatur[°C] | 1.4 | 14.8 | 27.1 | 25.7 |
| | | Relative Feuchte [%] | 27.1 | 53.5 | 74.8 | 47.1 |

3.4 Flügelretabel in St. Nicolai Döbeln

Neben den drei bereits im Antrag aufgeführten Fallbeispielen kam mit dem Altar der St. Nicolai Kirche in Döbeln kurzfristig noch ein weiteres projektbegleitendes Objekt hinzu. Das Landesamt für Denkmalpflege in Sachsen hatte um die Aufnahme des Flügelaltars von 1515 in das Projekt gebeten, da dieser akut von der sinkenden Luftfeuchtigkeit betroffen ist. Risse bis zu einem Zentimeter Breite in den beiden inneren Altartafeln bestätigen die Ausmaße und die Dringlichkeit einer Dokumentation, um sowohl die Schäden im Detail zu erfassen als auch um effektive Maßnahmen zu erarbeiten. Mit dem Schadensbild und den Umgebungsbedingungen ist der zweifach wandelbare Flügelaltar in Döbeln nicht nur ein Paradebeispiel für spätgotische Schnitzaltäre, sondern leider auch für die negativen Auswirkungen des Klimawandels auf Kulturgut und wurde daher als projektbegleitendes Fallbeispiel mit aufgenommen. Durch die jahrelange Begleitung des Objekts durch Restaurator Wilfried Sitte liegen langfristige Klimamessungen vor, die regelmäßig durch das IDK ausgewertet werden.

3.4.1 Auswertung Klimamessungen

Am Flügelretabel sind deutliche Schäden, wie die Risse von den polychrom gefassten Tafelgemälden und Verformungen von deren Rahmenkonstruktion festzustellen. Hier spielen jedoch eine Vielzahl von Faktoren

bei der Schädigung eine Rolle (Auswirkungen von Hochwasser, die konstruktiv bedingte Schädigung des Retabels, das sich durch Personalwechsel ändernde Heizregime der Grundtemperierung). Jedoch stellen auch sich ändernde Außenklimabedingung mit langen zu trockenen Zeiträumen eine Belastung auch für den Innenraum dar, da es zeitlich versetzt auch zu einer Trocknung des Innenraumes führt. Hier wird einem kritischen trockenen Ausgangszustand noch eine weitere negative und sehr stark dominierende Belastung auferlegt. Auch hier konnten die sehr langfristig erfassten Raumklimadaten das Phänomen der langsamen und temporären Raumtrocknung belegen. Die Langzeitklimamessung des Raumklimas in Döbeln ab 2003 zeigt, dass die Temperatur ab 2013 speziell im Winter um ca. 3 K gestiegen ist. Dies wirkt sich auf das Feuchteniveau in der Kirche aus, das über den Messzeitraum kontinuierlich abnimmt (Abb. 37). Auch die Hitzesommer ab dem Jahr 2017 zeichnen sich in den Klimadaten durch höhere Temperaturen und geringere relative Feuchten deutlich ab.

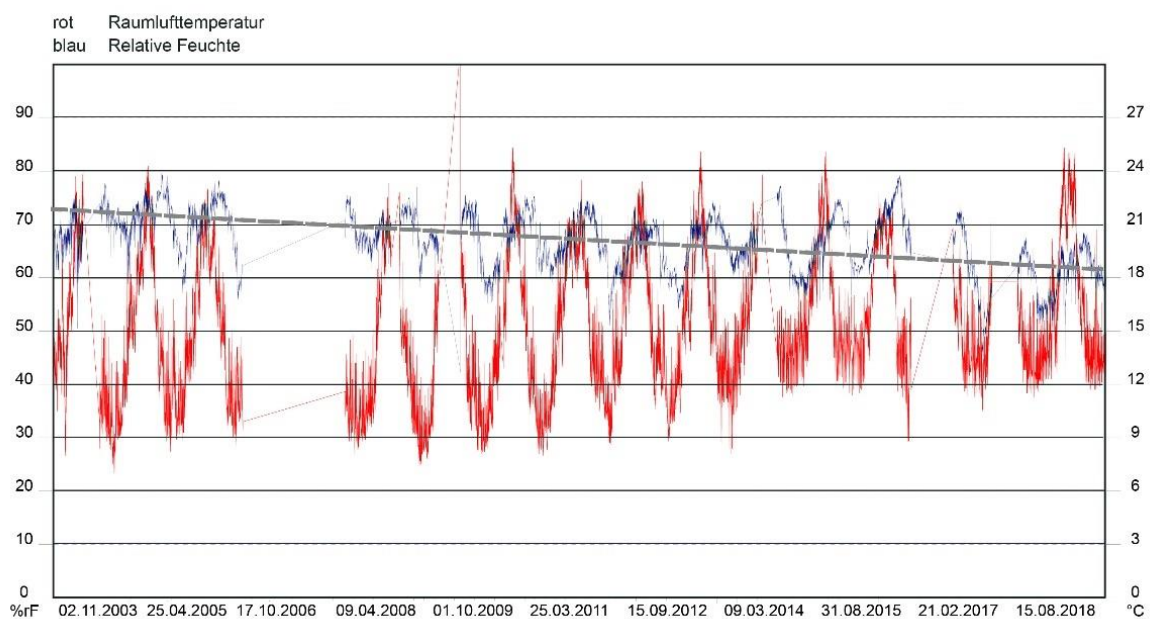


Abb. 37:
Langzeit-Klimamessung (rot: Temperatur, blau: relative Feuchte) in der St. Nicolaikirche in Döbeln von 2003 bis 2018. Ab 2013 wurde die Temperatur im Winter von ca. 9 °C auf ca. 12 °C angehoben. Die grau gestrichelte Linie zeigt die langfristige Reduktion der relativen Feuchten.

3.4.2 Auswertung Streifenlichtscanning

Zwischen August 2020 und November 2021 wurden insgesamt sieben Messungen durchgeführt. Aufgrund der Höhe mussten diese mit Hilfe eines Gerüsts aufgenommen werden. Daraus resultierte durch unvermeidbare Bewegungen während der Messungen eine geringfügige Reduzierung der Genauigkeit der Scans. Trotzdem konnten deutliche Veränderungen innerhalb der Messzeiträume festgestellt werden. Abb. 38 zeigt den Vergleich der Scans der beiden Tafeln vom 20. Oktober 2020 und 12. März 2021. Grün gefärbte Flächen weisen keine Veränderungen auf, gelbe bis rote Flächen haben sich – entsprechend der in der Skala angegebenen Größe – nach vorne gewölbt, hellblaue bis dunkelblaue Flächen haben sich nach hinten bewegt. Der Vergleich der beiden Referenzflächen zeigt starke Reaktionen der beiden Tafelgemälde auf das Klima. In der linken Tafel treten mit maximal 1,5 mm die größten Bewegungen auf, die rechte weist

Bewegungen von maximal 0,6 mm auf. Aus der statistischen Analyse des Raumklimas (Tabelle 3) geht hervor, dass in diesem Zeitraum eine Feuchtedifferenz von 22,5 % (Minimum: 51,1 %; Maximum: 73,6 %) und ein Temperaturunterschied von 6,9 K vorlag.

Vom Frühjahr bis Sommer zeigt sich eine Gegenbewegung zu der im Herbst und Winter, jedoch ist diese weniger stark ausgeprägt (Abb. 39). Die Klimaschwankungen sind mit 6,4 % in diesem Zeitraum (Minimum: 52 %; Maximum: 64 %) geringer.

Der Messzeitraum von August 2020 bis Juni 2021 zeigt die gleiche maximale Differenz der relativen Feuchte wie der Zeitraum zwischen Oktober 2020 und März 2021. Dies legt nahe, dass insbesondere der Zeitraum der Heizperiode einen entscheidenden Einfluss auf das Raumklima hat und dass das Tafelgemälde besonders an den Rissen mit Quell- und Schwindprozessen reagiert.

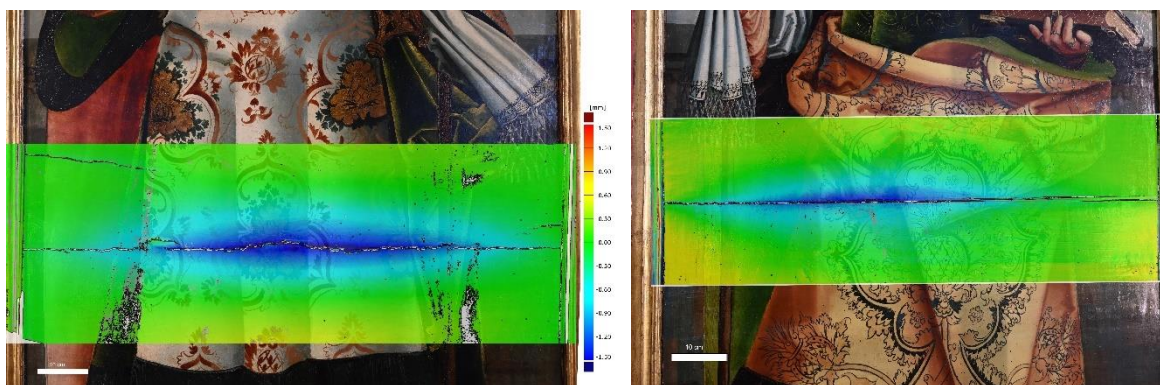


Abb. 38: Vergleich der Messungen von Oktober 2020 mit März 2021, linke Tafel (links) und rechte Tafel (rechts). Die grün gefärbten Flächen zeigen keine Veränderung, die blau gefärbten Flächen eine Verwölbung nach hinten (links max. 1,5 mm, rechts max. 0,6 mm), die gelben Flächen eine Bewegung nach vorne (links max. 0,6 mm, rechts max. 0,3 mm).

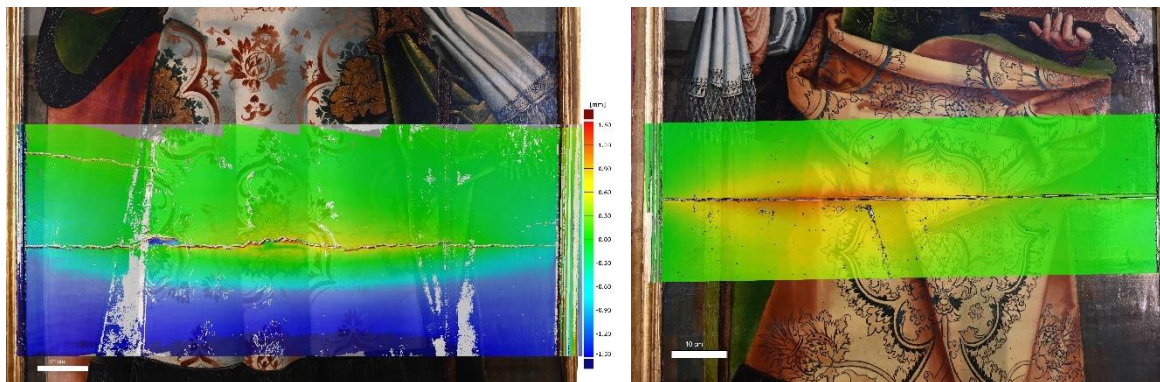


Abb. 39: Vergleich der Messungen von März und Juni 2021, linke Tafel (links) und rechte Tafel (rechts). Die linke Tafel weist insbesondere unterhalb des Risses eine Verwölbung nach hinten von ca. 1,5 mm auf, am Riss ist eine geringere Bewegung nach vorne (0,9 mm) erkennbar. Die rechte Tafel zeigt im Riss eine Gegenbewegung nach vorne (Maximum: 0,6 mm).

Tabelle 3:

Auflistung der Zeiträume, in denen die Messkampagnen durchgeführt wurden, sowie die statistische Auswertung der Klimadaten, die hinter dem Tafelgemälde erhoben wurden. In der Tabelle werden jeweils die Werte für den Zeitraum zwischen zwei Messungen dargestellt. Die statistische Auswertung für den Zeitraum vom 26. August 2020 bis 17. Juni 2021 ist in der letzten Zeile dargestellt.

| Nr. | Zeitraum Messkampagne | | Minimum | Mittelwert | Maximum | Δ |
|---|--------------------------|----------------------|---------|------------|---------|----------|
| 1 | 26. August 2020 | unzutreffend | | | | |
| 2 | 20. Oktober 2020 | Temperatur [°C] | 13,1 | 18,5 | 23,5 | 10,4 |
| | | Relative Feuchte [%] | 53,8 | 66,9 | 71,7 | 17,3 |
| 3 | 11. März 2021 | Temperatur [°C] | 10,6 | 13,3 | 17,5 | 6,9 |
| | | Relative Feuchte [%] | 51,1 | 63,3 | 73,6 | 22,5 |
| 4 | 17. Juni 2021 | Temperatur [°C] | 11,9 | 15,7 | 22,5 | 6,8 |
| | | Relative Feuchte [%] | 52 | 57,9 | 64,0 | 6,1 |
| Statistische Auswertung der Daten von 26. August 2020 – 17. Juni 2021 | | Temperatur [°C] | 10,6 | 15,1 | 23,5 | 12,9 |
| | | Relative Feuchte [%] | 51,1 | 62,2 | 73,6 | 22,5 |

Schlussfolgerung / Ausblick

An den beiden untersuchten polychromen Holztafeln zeigten sich Reaktionen auf den jahreszeitlichen Verlauf des Raumklimas. Dabei verformte sich die linke Tafel stärker als die rechte. Die größten Reaktionen traten im Zeitraum zwischen Herbst und Frühjahr auf (siehe Abb. 38). Die entsprechende Gegenreaktion findet in der zweiten Jahreshälfte statt, jedoch weniger stark ausgeprägt (Abb. 39).

Für die Erhaltung des Hochaltars spielt im Hinblick auf künftige Veränderungen durch den Klimawandel die Heizstrategie eine große Rolle. Eine Verringerung der Temperatur im Winter von derzeit minimal 18 °C auf 15 °C würde in diesem Zeitraum eine Erhöhung der relativen Feuchte in der Kirche um ca. 10 % r. F. bewirken. Dies hätte eine puffernde Wirkung zur Folge, von der das Altarretabel bis über die künftig trockener werdenden Sommermonate profitieren würde.

4. Fazit

Anhand der vorhandenen langfristigen raumklimatischen Erfassungen einiger weniger Objekte in Sachsen und Sachsen-Anhalt war es möglich, die Veränderungen durch sich ändernde Außenklimasituationen auf den Innenraum zu erkennen und zu analysieren. Erst diese Erkenntnisse ermöglichten die Beantragung dieses Forschungsprojekt und zeigten die Notwendigkeit weiterer Untersuchungen und Raumklimamessungen zum Thema „Trockenheit in historischen Gebäuden“ auf. Vor allem aber müssen die Auswirkungen von sich ändernden Klimasituationen in historischen Räumen breiter erfasst und bewertet werden. Dazu müssen mehr Klimamesspunkte installiert und bewertet werden. Bedacht werden soll: Jetzt installierte Klimamessungen zeigen wahrscheinlich erst in ca. 10 Jahren ein sich änderndes Raumklima!

Historische Raumklimaaufzeichnungen (Datenblätter von Thermohygrographen) müssen dokumentiert, digitalisiert und ausgewertet werden. Die gewonnenen Messdaten müssen durch begleitende restauratorische Untersuchungen so weit aufgearbeitet werden, um einzelne Schäden oder Schadursachen einer bestimmten Trockenheitsstufe zuzuordnen.

Das Monitoring mit dem Streifenlichtscanner ist eine zerstörungsfreie und sensible Methode zur Untersuchung von historischen Oberflächen, die auf klimatische Schwankungen mit Volumenzu- bzw. abnahme reagieren. Durch die Quantifizierung der Bewegungen könne mit Hilfe der Messungen das individuelle Risiko eines Objekts abgeschätzt und Maßnahmen zur Verbesserung der Situation entwickelt werden. Die im Rahmen des Projektes weiterentwickelte Methode der Kombination der Auswertung von Streifenlichtmessungen mit dem vor Ort gemessenen Raumklima ist übertragbar auf weiteres Kulturgut. Um allgemeine Schlüsse auf das Verhalten unterschiedlicher Materialkombinationen ziehen zu können, sind jedoch weitere Messungen sowohl vor Ort wie auch im Klimaschrank erforderlich. Des Weiteren kann die Methode zur langfristigen Überprüfung der Schadensfreiheit genutzt werden.

Um künftige Schadensprognosen abzuleiten, ist es erforderlich, möglichst detaillierte Klimaprognosen für den jeweiligen Standort zu erhalten. Außerdem ist eine Anpassung von Lüftungsstrategien über eine Wetterprognose möglich. So kann beispielsweise einer bevorstehenden Hitzeperiode gezielt im Vorfeld entgegengewirkt werden, indem Fenster geschlossen gehalten oder zusätzlich verschattet werden.

Gemeinsam mit den Betrauten des jeweiligen Kulturguts müssen individuell sinnvolle präventive Strategien zum Schutz vor künftigen Klimaereignissen gefunden werden. Dabei sollten insbesondere passive Methoden, wie die Pufferung des Raumklimas über feuchteabsorbierende Materialien im Vordergrund stehen.

5. Öffentlichkeitsarbeit

Die brisante Thematik der Auswirkungen des Klimawandels auch auf das kulturelle Erbe wurde bereits vor Projektbeginn von Seiten der Medien bemerkt. Nachdem sowohl vom Landesamt für Denkmalpflege in Sachsen (9.7.2020, <https://www.denkmalpflege.sachsen.de/>), als auch von der Universität Bamberg (28.07.2020, <https://www.uni-bamberg.de/presse/pm/artikel/klimawandel-schadet-kulturguetern/> Stand 31.8.2020) Pressemitteilungen zum Projekt herausgegeben wurden, kamen an die Projektleitung vermehrte Pressefragen. Das ZDF drehte bereits für das Heute Journal einen feuilletonistischen Beitrag am KDWT zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Kulturgut.

Weiterhin fand am 28.8.2020 in Schloss Augustusburg ein Presstermin mit Minister für Regionalentwicklung Thomas Schmidt statt, der vom Landesamt für Denkmalpflege Sachsen und dem IDK organisiert wurde und in dem das Forschungsprojekt vorgestellt wurde (<https://www.mdr.de/sachsen/chemnitz/floeha-hainichen/untersuchung-trockenheit-denkmale-100.html>, Stand 31.8.2020).

Anbei eine Liste der Veröffentlichungen zum Projekt

- <https://oiger.de/2020/07/30/forscher-untersuchen-klimawandel-schaeden-an-kulturgut-in-moritzburg/175670>
- https://www.energieagentur.nrw/klimaschutz/projekt_kleiner_40_umfrage_zur_auswirkungen_des_klimawandels_auf_kulturgueter?preview=1&utm_content=buffer6550a&utm_medium=social&utm_source=twitter.com&utm_campaign=buffer
- <https://www.uni-bamberg.de/presse/pm/artikel/klimawandel-schadet-kulturguetern/>
- https://www.vdl-denkmalpflege.de/index.php?id=42&no_cache=1&tx_news_pi1%5Bnews%5D=119
- <https://www.mainpost.de/regional/hassberge/klimawandel-schadet-kulturguetern;art513833,10477170>
- <https://www.medienservice.sachsen.de/medien/news/238509>
- <https://www.bayerische-staatszeitung.de/staatszeitung/kultur/detailansicht-kultur/artikel/klimawandel-schadet-kulturguetern.html#topPosition>
- <https://www.sueddeutsche.de/kultur/forschungsarbeit-kunstschaeden-durch-klimawandel-1.4962223>

Uni Bamberg: Pressemitteilung: "Klimawandel schadet Kulturgütern" vom 28.07.2020

ZDF Heute Journal: "Klimaschäden an Kunstwerken" vom 26.09.2020

BR2: Klimawandel schadet Kulturgütern vom 29.09.2020

MDR aktuell: "Extreme Trockenheit wird zum Problem für Kunstschatze" vom 20.10.2020

BR24: "Klimawandel: Denkmäler und Kulturgüter kommen ins Schwitzen" vom 27.10.2020

BR Fernsehen: "Klimawandel schadet Kulturgut" vom 27.10.2020

BR Fernsehen: "Gut zu wissen" vom 27.06.2021

Folgende Vorträge wurden im Rahmen des Forschungsprojektes gehalten:

- Holl, Kristina, Bellendorf, Paul, Karl, Anne, Löther, Thomas: Optical techniques and hygrothermal simulation for the investigation of climate change effects on cultural heritage items Tagungsbeitrag auf Symbol – Sustainable Management of Heritage Building in a long term perspective International Final conference held online in September 2nd-and 3rd 2021
- Holl, Kristina, Pallas, Leander, Bellendorf, Paul: Structured light scanning as a monitoring method to investigate dimensional changes due to climatic changes on cultural heritage, in: CHNT Editorial board. Proceedings of the 26th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, November 2021

- Holl, Kristina, Karl, Anne, Bellendorf, Paul: Structured Light Scanning as a Method to Investigate the Effect of Climate Change on Cultural Heritage Items in: ICDH003 2021: 15. International Conference on Digital Heritage, November 18-19, 2021 in London, United Kingdom

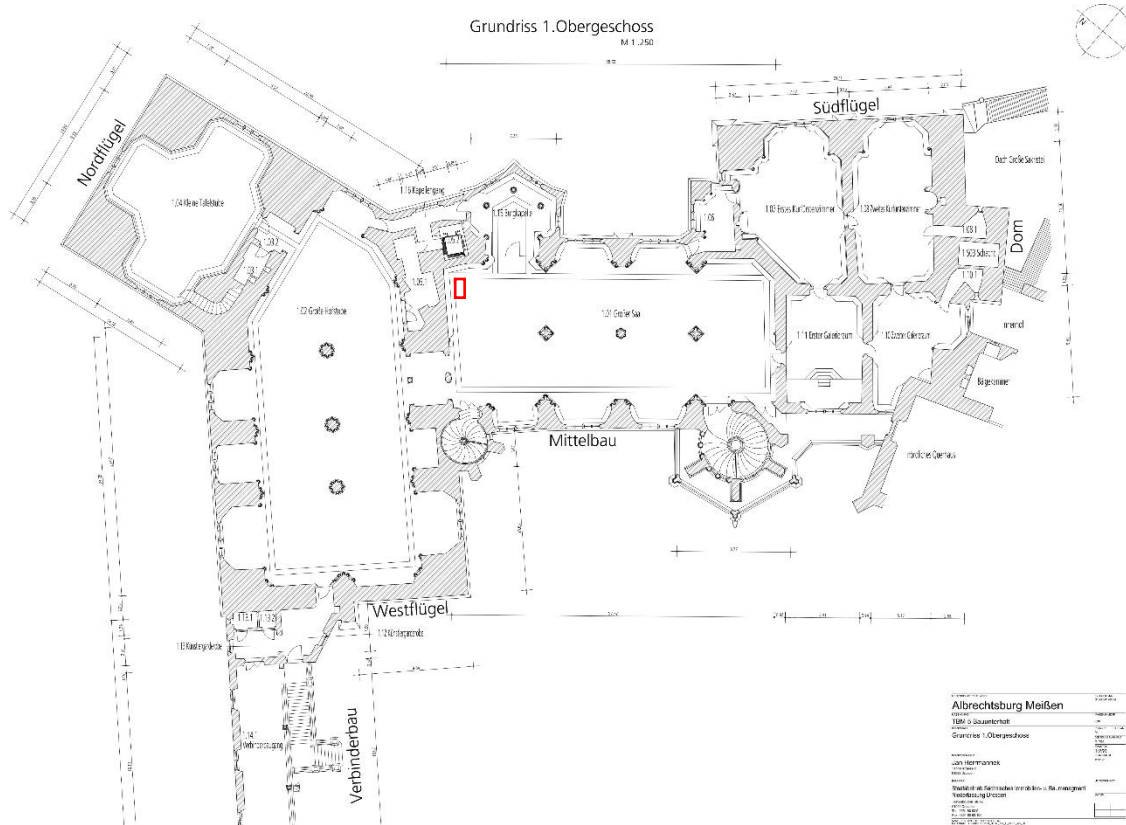
Folgende Artikel wurden im Rahmen des Forschungsprojektes erarbeitet und veröffentlicht:

- Holl, Kristina, Karl, Anne, Bellendorf, Paul: Structured Light Scanning as a Method to Investigate the Effect of Climate Change on Cultural Heritage Items in: ICDH 2021: 15. International Conference on Digital Heritage November 18-19, 2021 in London, United Kingdom, <https://wa-set.org/profile/submissions/papers/detail/136715>
- Holl, Kristina, Pallas, Leander, Bellendorf, Paul: Structured light scanning as a monitoring method to investigate dimensional changes due to climatic changes on cultural heritage, in: CHNT Editorial board. Proceedings of the 26th International Conference on Cultural Heritage and New Technologies, held in Vienna and online, November 2021 (im Druck)
- Holl, Kristina, Bellendorf, Paul, Karl, Anne, Löther, Thomas: Auswirkungen des Klimawandels auf Kulturgut in Deutschland. Auswertung einer Umfrage im Rahmen eines DBU-Forschungsprojektes, in: Denkmalpflege in Sachsen – Jahrbuch 2021 (im Druck)
- Bellendorf, Paul, Holl, Kristina, Löther, Thomas: Opto-technisches Monitoring am Hochaltar in Döbeln – klimainduzierte Bewegungen sichtbar machen, in: Die Denkmalpflege Heft 2/2021 (<https://doi.org/10.1515/DKP-2022-1009>)

Anhang

A Schloss Albrechtsburg

Position der Streifenlichtmessungen



Grundriss 1. OG mit gekennzeichnete Scanfläche



1. OG Großer Saal, Nordwand, auf Höhe 1,30 m Lockerungen und Substanzverluste in der Malerei (rote Umrandung im Grundriss).

| | |
|---|---|
| | |
| | <p>Lockerungen und Ausbrüche in der Malerei</p> |
| <p>1. Messung mit dem Streifenlichtscanner, 250 mm Objektiv, 25.8.2020 (rote Umrandung)</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged, Höhe 1,50 m</p> |

2. OG Großes Appellationszimmer/ Großer Gerichtssaal

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>2. Appellationszimmer Westwand, südwestlicher Teil; gelockerte Malschicht an Pilaster (blau umrandet im Grundriss)</p> | |
| <p>Messung mit dem Streifenlichtscanner 250 mm Objektiv</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged, TrF Höhe 1,30 m, TOF ca. 1,50 m an der Oberfläche der Wandoberfläche;</p> <p>Start: 25.8.2020, 13:30 10-minütige Taktung</p> |

2. OG Kleine Appellationsstube / Kleiner Gerichtssaal

| | |
|---|---|
|  |  |
| <p>Südostwand, Gelockerte Malschicht an Wandmalerei, Substanzverluste, (grün umrandet im Grundriss)</p> | |
| <p>Streifenlichtscanner 250 mm Objektiv</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged TrF Höhe 1,30 m, TOF ca. 1,50 m an der Wandoberfläche unterhalb der geschädigten Malerei;</p> |

B Schloss Augustusburg

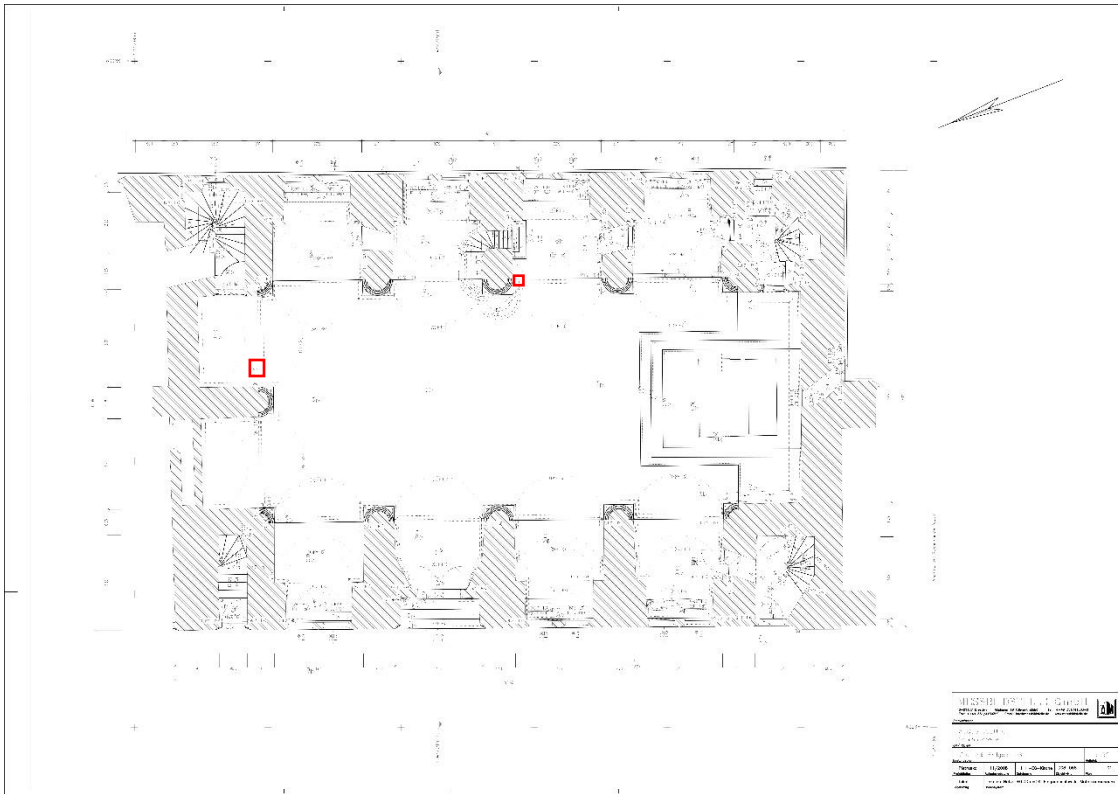
B1 Dokumentation der Messposition der Klimamessungen



| | | |
|---------------------|----------------------|--------------|
| Objekt: | Schloss Augustusburg | |
| | Schloss 1 | |
| | 09573 | Augustusburg |
| Bundesland: | Sachsen | |
| Baualter (Objekt) | 1568–1572 | |
| Gebäudeteil: | Schlosskapelle | |
| Raumbezeichnung: | Schlosskapelle | |
| Bauteilalter (Raum) | 1568–1572 | |
| Ziel der Messungen: | Klimamonitoring | |
| Raumnutzung: | Schlosskapelle | |



Außenansicht der Kapelle von Schloss Augustusburg mit Markierung der Position der Kanzel (rote Umrandung).



Grundriss mit der Position des Datenloggers an der Kanzel

| | |
|---|---|
| | |
| <p>Kanzel mit Position des Datenloggers in der Übersicht (rote Umrandung)</p> | <p>Detaildarstellung der Position des Datenloggers an der Kanzel</p> |
| <p>Messung der Temperatur und relativen Feuchte an der Kanzel, auf die Malereien trifft das Sonnenlicht; Die Auswirkungen hinsichtlich der Erhaltung sollen untersucht werden</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged, Start: 25.6.2020, 13:30 10-minütige Taktung Ende: 8.8.2021: 11:30</p> |
| | <p>Langzeitklimamessung seit April 1999</p> |

Klimamessung IDK: Verortung Messpunkt mitte

B3 Position der Streifenlichtmessung am Altargemälde

| | |
|--|--|
|  <p>Altargemälde von Lucas Cranach dem Jüngeren mit den Positionen der Streifenlichtscanaufnahmen</p> |  <p>Position der One Shot-Messung (blaue Umrahmung)</p> <p>Messung 1: 25.8.2020, 17:50 Uhr</p> <p>Messung 2: 26.8.2020, 08:10 Uhr</p> <p>Objektiv: 75 mm</p> |
|--|--|

Liste Messungen Streifenlichtscanning

Gerät: Comet L3D 5 M von Steinbichler – Streifenlichtscanner, Objektiv 250 mm

| Messkampagne | Zeitpunkt |
|--------------|---|
| 1 | 25.8.2020 |
| 2 | 19.10.2020 (Predella) 27.10.2020 (Gemälde) |
| 3 | 08.03.2021 |
| 4 | 27.4.2021 |
| 5 | 18.05.2021 (Aufgrund eines Fehlers bei der Kalibrierung sind die Daten nicht verwendbar) |
| 6 | 16.06.2021 |
| 7 | 12.07.2021 |
| 8 | 06.08.2021 |

C Schloss Moritzburg

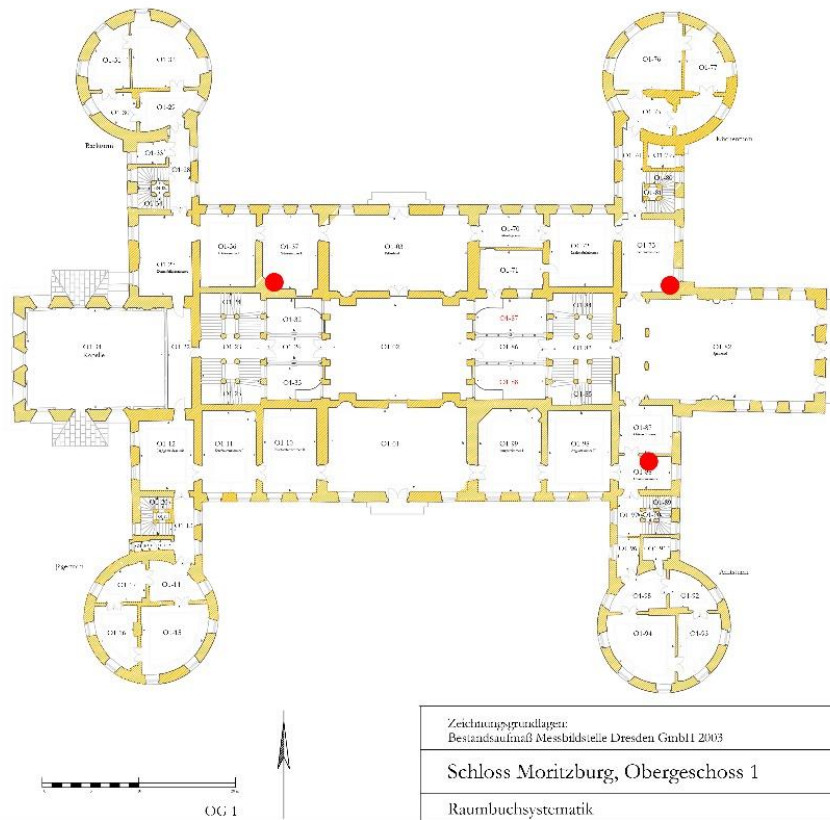
Dokumentation der Messpositionen der Klimamessungen



| | | |
|---------------------|------------------------|------------|
| Objekt: | Schloss Moritzburg | |
| | 01468 | Moritzburg |
| Bundesland: | Sachsen | |
| Baualter (Objekt) | um 1723 | |
| Gebäudeteil: | Südflügel | |
| Raumbezeichnung: | Schrankzimmer | |
| Bauteilalter (Raum) | um 1723 | |
| Ziel der Messungen: | Klimamonitoring | |
| Raumnutzung: | Früher: Wohnnutzung | |
| | Heute: museale Nutzung | |





Schloss Moritzburg, Ansicht von Westen



Grundriss mit den Messpositionen (Klima- und Streifenlichtmessungen)

Quartier 6, 3. Zimmer (O1-37, Gästezimmer II)

| | |
|--|---|
|  |  |
| <p>Raum O1-37 Gästezimmer II, Südwestwand (Raum soll als nächstes restauriert werden; Tapeten sind an Wand genagelt)</p> | <p>Ledertapete (Ziegenleder), punziert, bemalt Italien um 1725 Testfläche der Tapeten: Fehlstellen, Krepierungen im Goldlack, Kraquelé,</p> |
| <p>1. Messkampagne: 24.8.2020 Messung mit dem Streifenlichtscanner, 75 mm Objektiv</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged, Höhe 1,50 m TrF Logger auf 1,50 m, TOF ca. 1,50 m an der Oberfläche der Tapete anliegend</p> |

Quartier 7, 3. Zimmer (O1-73, Schrankzimmer)

| | |
|--|--|
| <p>Langzeitklimamessung IDK</p> | |
|  | <p>1. Obergeschoss, Schrankzimmer, Verortung Messpunkt (rot: Raumklima), Blick Richtung: Nord-Süd</p> |
| <p>Dokumentation Messpositionen im Rahmen des Forschungsprojektes</p> | |
|  |  |
| <p>Zimmer O1-73 Schrankzimmer, Südostwand</p> | <p>Ledertapete (Ziegenleder), punziert, bemalt Italien um 1725 Untersuchung der Auswirkung des Außenklimas auf die Tapete, Vorschädigungen: Verwölbung, Ausbrüche, Risse in der Tapete, Tapeten sind stark übermalt, bisher nicht restauriert; fest fixiert mit Nägeln am Träger</p> |
| <p>Aus Zeitgründen Testfeld bei der ersten Messkampagne mit dem Streifenlichtscanner nicht erfasst</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged TrF Höhe 1,50 m, TOF ca. 1,50 m an der Oberfläche der Tapete;</p> |

Quartier 8, 3 (O1-88, Chinesenzimmer)

| | |
|--|--|
|  |  |
| <p>Quartier 8, Zimmer 3, O1-88, Nordwand;</p> | <p>Ledertapete, Versilbert, Goldlack punziert, mit Chinoi- sen Motiven Risse in der Tapete an den Anstückungen, bisher nicht restauriert</p> |
| <p>1. Messkampagne: 25.8.2020 Messung mit dem Streifenlichtscanner, 75 mm Objektiv OneShot-Messung 1. Messung: 24.8.2020, 21:15 Uhr 2. Messung 25.8.2020, 08:10 Uhr</p> | <p>Datenlogger: Driesen & Kern Multilog rugged TrF Höhe 1,50 m, TOF ca. 1,50 m an der Oberfläche der Tapete;</p> |

Liste Messungen Streifenlichtscanning

Gerät: Comet L3D 5 M von Steinbichler – Streifenlichtscanner, Objektiv 75 mm

| Messkampagne | Zeitpunkt |
|--------------|---------------|
| 1 | 24./25.8.2020 |
| 2 | 25.11.2020 |
| 3 | 09.03.2021 |
| 4 | 26.4.2021 |
| 5 | 20.05.2021 |
| 6 | 16./17.6.2021 |
| 7 | 12.7.2021 |

D Döbeln

D1 Auswertung Klimadaten Langzeitmessung durch IDK



| | | |
|---------------------|-----------------------------------|--------|
| Objekt: | St. Nikolai, Döbeln | |
| | Kleine Kirchgasse 1, | |
| | 04720 | Döbeln |
| Bundesland: | Sachsen | |
| Baualter (Objekt) | 1479 bis 1485 | |
| Gebäudeteil: | Chor | |
| Raumbezeichnung: | Chor | |
| Bauteilalter (Raum) | 1479 bis 1485 | |
| Ziel der Messungen: | Langfristige Raumklimabeobachtung | |
| Raumnutzung: | kirchliche Nutzung | |

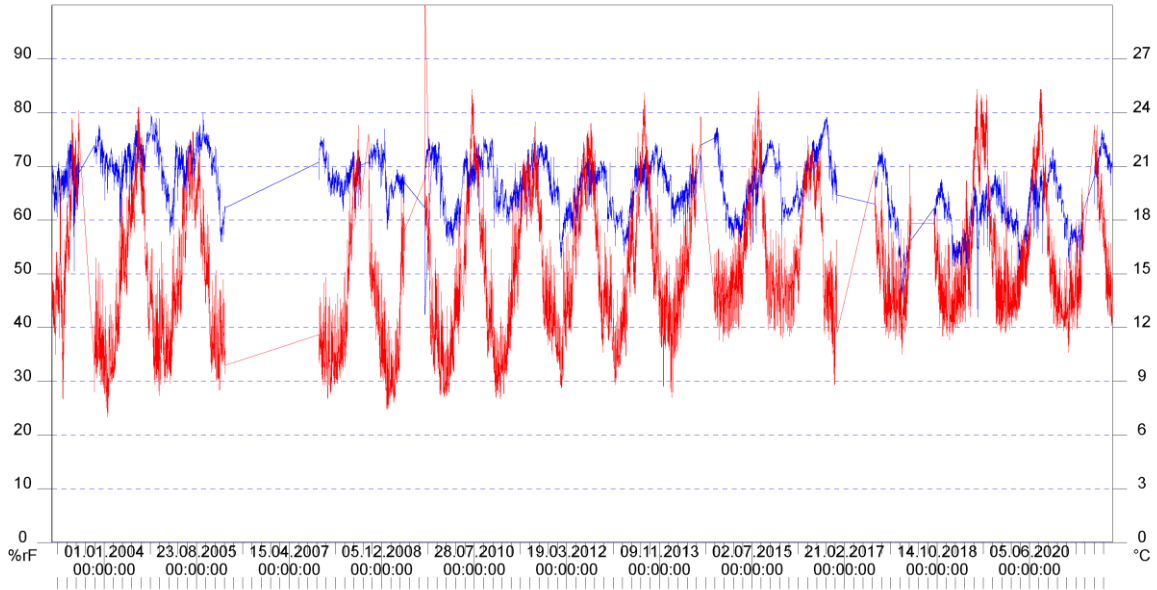


Links: Döbeln, St. Nikolai, Ansicht aus westlicher Richtung

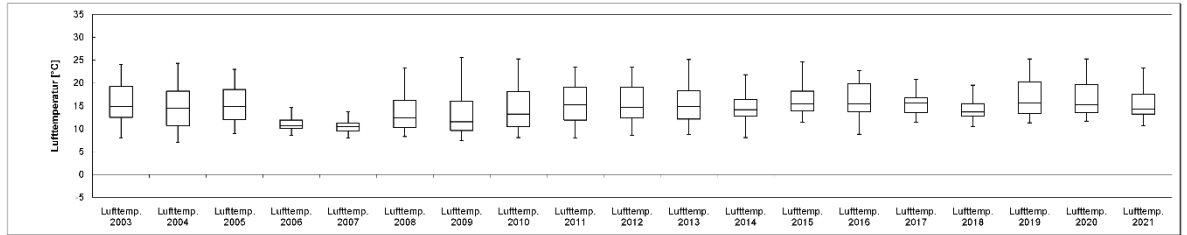


Rechts: Döbeln, St. Nikolai, Ansicht des Hochaltars mit Lokalisierung des Messpunktes auf der Rückseite

| | | | | |
|--|---------|-------|-------|-------|
| D:\Aktuelle_Projekte\DBU_Trockenheit\Fallbeispiele\Döbeln\Raumklima_Döbeln | K:1 %rF | Min: | Max: | Mit: |
| Döbeln, St. Nikolai / Zeitraum: 2003 - 2021 | K:2 °C | 41.90 | 79.90 | 66.57 |
| rot - Raumlufttemperatur | | 7.00 | 31.00 | 15.17 |
| blau - rel.LF Raumluft | | | | |

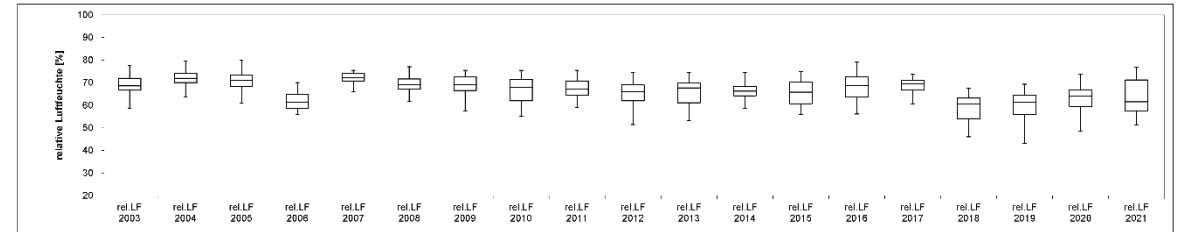


Vergleich der Jahreswerte der Lufttemperatur aus der Kirche St. Nikolai, Döbeln
Zeitraum: 2003 - 2021



| Label | Lufttemp. 2003 | Lufttemp. 2004 | Lufttemp. 2005 | Lufttemp. 2006 | Lufttemp. 2007 | Lufttemp. 2008 | Lufttemp. 2009 | Lufttemp. 2010 | Lufttemp. 2011 | Lufttemp. 2012 | Lufttemp. 2013 | Lufttemp. 2014 | Lufttemp. 2015 | Lufttemp. 2016 | Lufttemp. 2017 | Lufttemp. 2018 | Lufttemp. 2019 | Lufttemp. 2020 | Lufttemp. 2021 |
|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| Min | 8 | 7 | 8,9 | 6,5 | 8 | 8,3 | 7,4 | 8,3 | 8 | 8,8 | 8,7 | 8,1 | 11,4 | 8,8 | 11,4 | 10,5 | 11,3 | 11,7 | 10,5 |
| Q1 | 12,5 | 10,7 | 12 | 10,05 | 9,5 | 10,3 | 9,8 | 10,4 | 11,9 | 12,4 | 12,1 | 12,8 | 13,9 | 13,776 | 13,625 | 12,8 | 13,4 | 13,5 | 13,2 |
| Median | 14,8 | 14,8 | 14,8 | 10,6 | 10,4 | 12,4 | 11,5 | 15,2 | 15,2 | 14,7 | 14,8 | 14,2 | 15,4 | 15,4 | 15,6 | 13,65 | 15,6 | 15,2 | 14,3 |
| Q3 | 19,2 | 18,2 | 18,8 | 11,8 | 11,2 | 15,2 | 16 | 18,3 | 18,1 | 18,3 | 18,3 | 18,4 | 19,2 | 19,8 | 18,6 | 15,5 | 20,3 | 19,7 | 17,4 |
| Max | 34,7 | 34,3 | 28 | 14,7 | 14,8 | 23,3 | 31 | 25,3 | 23,5 | 25,4 | 25,1 | 23,8 | 25,2 | 23,7 | 20,8 | 21,1 | 25,3 | 25,3 | 23,3 |
| IQR | 6,7 | 7,8 | 6,0 | 1,85 | 1,7 | 5,9 | 6,4 | 7,7 | 7,2 | 6,7 | 6,2 | 3,6 | 4,5 | 6,025 | 3,278 | 2,7 | 6,9 | 6,2 | 4,4 |
| Upper Outliers | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lower Outliers | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

Vergleich der Jahreswerte der relativen Luftfeuchte aus der Kirche St. Nikolai, Döbeln
Zeitraum: 2003 - 2021



| Label | rel.LF 2003 | rel.LF 2004 | rel.LF 2005 | rel.LF 2006 | rel.LF 2007 | rel.LF 2008 | rel.LF 2009 | rel.LF 2010 | rel.LF 2011 | rel.LF 2012 | rel.LF 2013 | rel.LF 2014 | rel.LF 2015 | rel.LF 2016 | rel.LF 2017 | rel.LF 2018 | rel.LF 2019 | rel.LF 2020 | rel.LF 2021 |
|----------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Min | 50,5 | 58 | 53,3 | 56,9 | 65,2 | 61,6 | 62,3 | 65,2 | 69,1 | 61 | 63,3 | 59,7 | 63,9 | 56,1 | 58,3 | 46 | 41,5 | 43,6 | 61,1 |
| Q1 | 66,4 | 70 | 68,4 | 57,7 | 70,8 | 67,2 | 66,5 | 62 | 64,8 | 62 | 61,1 | 64,2 | 60,7 | 63,7 | 66,8 | 64,1 | 65,8 | 69,5 | 67,5 |
| Median | 68,8 | 71,9 | 71,1 | 61,2 | 72,2 | 69,18 | 69 | 68 | 67,1 | 69 | 67,7 | 68,2 | 68,8 | 68,7 | 69,8 | 61,2 | 61,2 | 61,2 | 69,5 |
| Q3 | 71,9 | 74,2 | 73,3 | 64,95 | 74,1 | 71,8 | 72,5 | 71,3 | 76,8 | 69 | 69,9 | 68,3 | 70,3 | 72,7 | 71 | 63,1 | 64,4 | 66,8 | 71,2 |
| Max | 77,7 | 79,8 | 79,9 | 70 | 78,5 | 77 | 75,5 | 75,5 | 75,4 | 74,5 | 74,4 | 77,2 | 75 | 78,2 | 73,8 | 67,8 | 68,2 | 73,8 | 76,8 |
| IQR | 5,3 | 4,2 | 4,9 | 8,25 | 3,3 | 4,4 | 6 | 9,3 | 6,3 | 7 | 8,8 | 4,1 | 8,9 | 9 | 4,2 | 9 | 6,5 | 7,2 | 13,7 |
| Upper Outliers | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| Lower Outliers | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

D2 Position der Streifenlichtmessungen



Linke Tafel



Rechte Tafel

Liste Messungen Streifenlichtscanning

Gerät: Comet L3D 5 M von Steinbichler – Streifenlichtscanner, Objektiv 250 mm

| | |
|--------------|---|
| Messkampagne | Zeitpunkt |
| | 26.8.2020 |
| 2 | 20.10.2020 |
| 3 | 11.03.2021 |
| 4 | 19.05.2021 (Aufgrund eines Fehlers bei der Kalibrierung sind die Daten nicht verwendbar) |
| 5 | 17.06.2021 |
| 6 | 30.07.2021 |
| 7 | 25.11.2021 |

Dokumentation Messkampagnen

| | | |
|---------------------------------------|---|---|
| 1. Messkampagne 24.-26.08.2020 | | |
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 24.08.2020 18:37 | Q6.3 |
| | 24.08.2020 21:01 | Q8.3 (OneShot) |
| | 25.08.2020 08:17 | Q8.3 (OneShot) |
| | 25.08.2020 08:23 | Q8.3 Fläche2 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 25.08.2020 | Siehe Dokumentation Klimamessung (1. Zwischenbericht) |
| | | |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 25.08.2020 11:54 | OG1 |
| | 25.08.2020 13:28 | OG2 – großer Appellationssaal |
| | 25.08.2020 14:20 | OG2 – kleiner Appellationssaal |
| | | |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 25.08.2020 | Siehe Dokumentation Klimamessung (1. Zwischenbericht) |
| | | |

| | | |
|--|--|--|
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er (& 75er) | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 25.08.2020 17:28 26.08.2020 08:14 26.08.2020 08:27 26.08.2020 09:09 26.08.2020 10:50 | Gemälde (OneShot) Gemälde (OneShot) Gemälde-Mitte 75er Fehlversuch Gemälde-Mitte Gemälde-Links |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 25.08.2020 | Siehe Dokumentation Klimamessung (1. Zwischenbericht) |
| Ort | St.-Nikolai-Kirche Kleine Kirchgasse 1, 04720 Döbeln | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 26.08.2020 14:01 26.08.2020 15:03 | Altarflügel rechts Altarflügel links |
| 2. Messkampagne 19.10.-20.10.2020; 27.10.-28.10.2020; 25.11.-26.11.2020 | | |
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 25.11.2020 12:49 25.11.2020 15:13 25.11.2020 15:51 25.11.2020 16:17 | Q7.3 Q8.3 Q8.3 (OneShot) Q6.3 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 25.11.2020 13:27 25.11.2020 13:30 25.11.2020 13:36 | Q7.3 Q8.3 Q6.3 |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Klimamessungen | Datum | Ort |
| | 26.11.2020 11:16 26.10.2020 13:12 26.11.2020 13:52 26.11.2020 15:10 | OG1 OG1 M-F OG2 – großer Appellationssaal OG2 – kleiner Appellationssaal |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 26.11.2020 | Siehe Dokumentation Klimamessung (1. Zwischenbericht) |

| | | |
|----------------|---|---|
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er/800er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 19.10.2020 13:27 19.10.2020 15:04 27.10.2020 10:09 27.10.2020 10:09 27/28.10.2020 | Predella Fehlversuch Gemälde-Mitte Gemälde-Links Gesamt (800er) |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 28.10.2020 | Siehe Dokumentation Klimamessung (1. Zwischenbericht) |
| Ort | St.-Nikolai-Kirche Kleine Kirchgasse 1, 04720 Döbeln | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 20.10.2020 10:05 20.10.2020 13:21 | Altarflügel rechts Altarflügel links |

| | | |
|--|--|---|
| 3. Messkampagne 09.03. – 12.03.2021 | | |
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 09.03.2021 12:34 09.03.2021 13:17 09.03.2021 13:32 09.03.2021 14:23 | Q7.3 Q8.3 (OneShot) Q8.3 Q6.3 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 09.03.2021 09.03.2021 09.03.2021 | Q7.3 Q8.3 Q6.3 |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Klimamessungen | Datum | Ort |
| | 10.03.2021 10:20 10.03.2021 11:41 10.03.2021 12:34 10.03.2021 13:35 | OG1 OG1 M-F OG2 – großer Appellationsaal OG2 – kleiner Appellationsaal |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 10.03.2021 10.03.2021 10.03.2021 | OG1 OG2 – großer Appellationsaal OG2 – kleiner Appellationsaal |

| | | |
|----------------|---|---|
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 08.03.2021 12:34 08.03.2021 14:47 08.03.2021 15:42 | Riss rechts Riss Links Predella |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 10.03.2021 | Kanzel |
| Ort | St.-Nikolai-Kirche Kleine Kirchgasse 1, 04720 Döbeln | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 11.03.2021 14:03 11.03.2021 15:59 | Altarflügel rechts Altarflügel links |

| | | |
|--|--|--|
| 4. Messkampagne 26.04. – 27.04.2021 | | |
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 26.04.2021 12:43 26.04.2021 12:52 26.04.2021 13:25 26.04.2021 13:59 | Q8.3 (OneShot) Q8.3 Q7.3 Q6.3 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 26.04.2021 26.04.2021 26.04.2021 | Q7.3 Q8.3 Q6.3 |
| Methodik/Gerät | Zeitrafferaufnahmen / Kamera Nikon Z6 | |
| Messungen | Datum/Einstellungen | Ort |
| | 26.04.2021 15:35 Bis 27.04.2021 14:56 Blendenzahl F/4 Belichtungszeit 1/30 s ISO 800 Brennweite 70 mm | Q8.3 |
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 27.04.2021 09:36 27.04.2021 11:23 27.04.2021 12:24 | Riss Links Riss rechts Predella |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 27.04.2021 | Kanzel |

| 5. Messkampagne 17.05. – 20.05.2021 | | |
|--|---|-------------------------------|
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 20.05.2021 09:44 | Q7.3 |
| | 20.05.2021 10:59 | Q6.3 |
| | 20.05.2021 13:20 | Q8.3 |
| | 20.05.2021 13:41 | Q8.3 (OneShot) |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 20.05.2021 | Q7.3 |
| | 20.05.2021 | Q8.3 |
| | 20.05.2021 | Q6.3 |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Klimamessungen | Datum | Ort |
| | 17.05.2021 14:42 | OG2 – kleiner Appellationsaal |
| | 17.05.2021 16:02 | OG1 M-F |
| | 17.05.2021 16:12 | OG1 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 17.05.2021 | OG1 |
| | 17.05.2021 | OG2 – großer Appellationsaal |
| | 17.05.2021 | OG2 – kleiner Appellationsaal |
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 18.05.2021 10:06 | Predella |
| | 18.05.2021 10:50 | Riss Links |
| | 18.05.2021 13:13 | Riss rechts |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 18.05.2021 | Kanzel |
| Ort | St.-Nikolai-Kirche Kleine Kirchgasse 1, 04720 Döbeln | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 18.05.2021 16:32 | OneShot 1 |
| | 19.05.2021 08:35 | OneShot 2 |
| | 19.05.2021 08:42 | Altarflügel links |
| | 19.05.2021 10:37 | Altarflügel rechts |
| Die in grauer Schrift gekennzeichneten Messungen sind aufgrund eines Fehlers in der Kalibrierplatte nicht verwendbar für die Vergleiche. | | |

| 6. Messkampagne 16.06. – 18.06.2021 | | |
|--|---|--------------------------------|
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 16.06.2021 18:49 | Q6.3 |
| | 16.06.2021 20:12 | Q8.3 (OneShot) |
| | 17.06.2021 08:39 | Q8.3 |
| | 17.06.2021 08:54 | Q7.3 |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 16.06.2021 | Q7.3 |
| | 16.06.2021 | Q8.3 |
| | 16.06.2021 | Q6.3 |
| Methodik/Gerät | Zeitrafferaufnahmen / Kamera Nikon Z6 | |
| Messungen | Datum/Einstellungen | Ort |
| | 17.06.2021 – 30.06.2021 Blendenzahl 5,6 Belichtungszeit 1/40s ISO 640 Brennweite 35 mm | Q8.3 |
| | | |
| | | |
| | | |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Klimamessungen | Datum | Ort |
| | 18.06.2021 10:38 | OG1 großer Saal |
| | 18.06.2021 12:07 | OG1 großer Saal M-F |
| | 18.06.2021 12:44 | OG2 – großer Appellationssaal |
| | 18.06.2021 13:30 | OG2 – kleiner Appellationssaal |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 18.06.2021 | OG1 |
| | 18.06.2021 | OG2 – großer Appellationssaal |
| | 18.06.2021 | OG2 – kleiner Appellationssaal |
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 16.06.2021 12:15 | Predella |
| | 16.06.2021 13:05 | Riss Links |
| | 16.06.2021 14:17 | Riss rechts |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 16.06.2021 | Kanzel |
| Ort | St.-Nikolai-Kirche Kleine Kirchgasse 1, 04720 Döbeln | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 17.06.2021 12:05 | Altarflügel links |
| | 17.06.2021 14:46 | Altarflügel rechts |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |

| | | |
|--|---|--------------------------------|
| | 17.06.2021 | Altar Rückseite |
| 7. Messkampagne 12.07. – 13.07.2021 | | |
| Ort | Schloss Moritzburg Schloßallee, 01468 Moritzburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 75er | |
| Methodik/Gerät | Datenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 12.07.2021 | Q7.3 |
| | 12.07.2021 | Q8.3 |
| | 12.07.2021 | Q6.3 |
| Ort | Albrechtsburg Domplatz 1, 01662 Meißen | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Klimamessungen | Datum | Ort |
| | 13.07.2021 12:11 | OG1 |
| | 13.07.2021 13:11 | OG1 M-F |
| | 13.07.2021 13:45 | OG2 – großer Appellationssaal |
| | 13.07.2021 14:12 | OG2 – kleiner Appellationssaal |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Messungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 13.07.2021 | OG1 |
| | 13.07.2021 | OG2 – großer Appellationssaal |
| | 13.07.2021 | OG2 – kleiner Appellationssaal |
| Ort | Schloss Augustusburg Schloss, 09573 Augustusburg | |
| Methodik/Gerät | Comet L3D 5M von Steinbichler - Streifenlichtscanner | |
| Objektiv | 250er | |
| Messungen | Datum | Ort |
| | 12.07.2021 11:54 | Predella |
| | 12.07.2021 12:47 | Riss Links |
| | 12.07.2021 14:09 | Riss rechts |
| Methodik/Gerät | Datenlogger Driesen & Kern Multilog rugged TrF – Klimadatenlogger | |
| Klimamessungen | Datum Auslesung | Ort |
| | 12.07.2021 | Kanzel |

Dokumentation Scanversuche Klimakammer

Holz furnier

| | |
|------------------------|--|
| Objekt | Holz furnier |
| Objektmaße | 144 x 178 x 0,5 mm |
| Trägermaterial | Holz |
| Oberflächenmaterial | Holz |
| Oberflächenbearbeitung | geschliffen |
| Oberflächenreflektion | Leicht glänzend |
| Messbedingungen | Klimaschrankzimmer, teilweise abgedunkelt, 1 Person |
| Temperatur | 22° C - 24° C im Raum |
| Luftfeuchte | 40 – 50 % r.F. im Raum |
| Scanner | Steinbichler L3D 5M |
| Objektiv/Projektor | 75er |
| Genauigkeit | 0.03 mm (durch Vibration des Generators heraufzusetzen auf 0.1 mm) |
| Methode | Aufnahme bei offener Tür mit Glasscheibe, ca. 13 – 20 Einzelscans Temperatur konstant 20 °C, Luftfeuchte: von 50 % r.F. stufenweise verringert auf 30 % r.F. und wieder auf 50 % r.F. erhöht |
| Erkenntnisse Messung | <p>Während der Veränderung der Feuchtigkeit hat sich das an vier Ecken festgepinnte Stück Holz furnier vor allem längs der Holzfasern verzogen. Bei der Abnahme der relativen Luftfeuchte zeigt sich eine deutliche konvexe Verformung an den Rändern links und rechts des Furniers. Vor allem rechts ist eine „Zunahme“ bis zu 0.85 mm zu verzeichnen während in der Mitte die Oberfläche um bis zu -0.43 mm abweicht (beide Extremwerte bei der Verringerung der Luftfeuchte sind beim Vergleich von dem Ursprungszustand des Holz furniers bei 50 % r.F. zu dem Scan bei 30 % r.F. für eine Stunde zu beobachten).</p> <p>Bei der Zunahme der relativen Luftfeuchte zeigt sich eine Umkehrung des Verformungsprozesses. Bei der Erhöhung der Luftfeuchte von 30 % r.F. auf 40 % r.F. zeigt sich die größte Verformung nach 7h mit einer konvexen Bewegung in der Mitte bis zu + 0.4 mm und gegenteilig am rechten Rand des Holz furniers um - 0.66 mm. Danach (bis 25 h) nehmen die Verformungsparameter ab. Ein größerer Sprung ist danach bei der Umstellung auf 50 % r.F. zu verzeichnen bei dem sich das Furnier ähnlich der Umstellung auf 40 % r.F. zuvor. Die Oberfläche verformt sich um - 0.28 mm konkav während in der Mitte eine Wölbung von + 0.17 mm zu verzeichnen ist.</p> <p>Die Verformung scheint bei der Erhöhung von 30 % r.F. deutlich stärker zu sein als bei 40 % r.F. auf 50 % r.F.</p> <p>Der Riss in der Mitte des Furniers fällt bei den Verformungsprozessen nicht auf, da keine Anomalität zum Rest der Oberfläche zu erkennen ist. Nur bei dem Vergleich von 30 % r.F. zu 40 % r.F. für eine Stunde zeigt sich eine</p> |

| | |
|------------------|--|
| | <p>Verformung um + 0.29 mm und damit das Maximum an Verformung während dieser Veränderung der Luftfechtigkeiten, der sich nirgends anders auf dem Furnier zu erkennen ist.</p> <p>Es ist zu beobachten, dass die Verformung mit bis zu 0.85 mm bei der Abnahme der Luftfeuchte deutlich höher ist als bei der Zunahme (max. 0.66 mm).</p> <p>Ein Vergleich des Anfangszustands bei 50 % r.F. zum Endzustand bei 50 % r.F. steht aus Auswertungstechnischen Problemen noch aus.</p> |
| Material Zunahme | + 0.85 mm |
| Material Abnahme | - 0.66 mm |

Ledertapete

| | |
|------------------------|--|
| Objekt | Ledertapete Schloss Moritzburg Inv.Nr. M 10 FH 58 |
| Objektmaße | 34,5 cm x 19 cm, 27.84 g (Ausgleichsfeuchte vor Messung); 27.86 g (nach Messungen) |
| Trägermaterial | Vermutl. Ziegenleder |
| Oberflächenmaterial | Blattgold, Farbfassung |
| Oberflächenbearbeitung | Gepunzt & geprägt, teilweise vergoldet & bemalt |
| Oberflächenreflektion | Teilweise Reflexion des Blattgoldes |
| Messbedingungen | Klimaschrankzimmer, 20 °C, tagsüber, nicht abgedunkelt, 1 Person |
| Temperatur | 25 °C |
| Luftfeuchte | 40 % r.F. -> 27 % r.F. -> 40 % r.F.; gradueller Verlauf |
| Scanner | Steinbichler L3D 5M |
| Objektiv/Projektor | 250er |
| Genauigkeit | 0.1 mm (durch Vibration des Generators heraufzusetzen auf 0.3 mm) |
| Methode | <p>Aufnahme bei offener Tür mit Glasscheibe, je 6-10 Einzelscans</p> <p>Temperatur konstant 25 °C, relative Feuchte: von 40 % r.F. Ausgleichsfeuchte graduell verringert auf 27 % r.F. und wieder auf 40 % r.F. erhöht, stündlich gemessen</p> |

| | |
|---------------------|---|
| Objekt | Ledertapete Schloss Moritzburg Inv.Nr. M 16 K 276 |
| Objektmaße | 24,3 cm x 17 cm |
| Trägermaterial | Vermutl. Ziegenleder |
| Oberflächenmaterial | Blattgold, Farbfassung |

| | |
|------------------------|---|
| Oberflächenbearbeitung | Gepunzt, geprägt, teilweise vergoldet, polychrom bemalt |
| Oberflächenreflektion | Teilweise durch Blattgold |
| Messbedingungen | Klimaschrankzimmer, 20 °C, tagsüber, nicht abgedunkelt, 1 Person |
| Temperatur | 18 °C |
| Luftfeuchte | 40 % r.F. -> 27 % r.F. -> 40 % r.F.; gradueller Verlauf |
| Scanner | Steinbichler L3D 5M |
| Objektiv/Projektor | 250er |
| Genauigkeit | 0.1 mm (durch Vibration des Generators heraufzusetzen auf 0.3 mm) |
| Methode | Aufnahme bei offener Tür mit Glasscheibe, je 6-10 Einzelscans Temperatur konstant 18 °C, relative Feuchte: von 40 % r.F Ausgleichsfeuchte graduell verringert auf 27 % r.F und wieder auf 40 % r.F. erhöht, stündlich gemessen |