



Bayerische Verwaltung der
staatlichen Schlösser, Gärten und Seen



Wissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof

DBU-Projekt Linderhof AZ 31017

Abschlussbericht

München, 28.02.2018

Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen (BSV)

Dr. Katrin Janis, Restaurierungszentrum

Tel.: 089 17908-340, Fax: 0 89 17908-333

Email: katrin.janis@bsv.bayern.de

Wissenschaftliche Begleitung: Dr. Kristina Holl

Projektpartner:

Fraunhofer- Institut für Bauphysik

Fraunhofer Str. 10, 83626 Valley

Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und
Denkmaltechnologien, Am Zwinger 4/6, 96047 Bamberg

Gliederung

| | | |
|-------|---|----|
| 1. | Projektidee..... | 4 |
| 2. | Rahmenbedingungen | 5 |
| 3. | Untersuchung von klimatisch bedingten Veränderungen an historischen Oberflächen | 7 |
| 3.1 | Untersuchungsverfahren | 7 |
| 3.1.1 | 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren | 7 |
| 3.1.2 | 3D-Mikroskopie | 9 |
| 3.1.3 | Vergleichende hochauflösende Fotografie..... | 10 |
| 3.1.4 | Messung des Nahfeldklimas und der Strömungsgeschwindigkeit..... | 10 |
| 3.1.5 | Wägeversuche | 11 |
| 3.2 | Auswahl der Monitoring-Flächen..... | 12 |
| 3.3 | Durchführung des Monitorings | 14 |
| 3.3.1 | Messkampagnen | 14 |
| 3.3.2 | Klimamonitoring..... | 14 |
| 3.3.3 | Staubmonitoring | 15 |
| 3.4 | Auswertung..... | 15 |
| 3.4.1 | Auswertung längerfristiger Klimaschwankungen | 15 |
| 3.4.2 | Auswertung von kurzfristigen Klimaschwankungen | 17 |
| 3.4.3 | Wägeversuche | 18 |
| 3.4.4 | Auswertung Staubmonitoring | 19 |
| 3.5 | Ergebnisse..... | 22 |
| 3.5.1 | Reaktion der Ausstattung auf kurzfristige Klimaschwankungen | 22 |
| 3.5.2 | Reaktion der Ausstattung auf saisonale Klimaschwankungen | 23 |
| 3.5.3 | Raumklima..... | 24 |
| 3.5.4 | Strömungsmessung | 26 |
| 4. | Entwicklung eines Leitfadens | 27 |
| 5. | Bewertung der Methoden und Zusammenfassung | 28 |
| 5.1 | 3D-Mikroskopie | 28 |
| 5.2 | SLR-Fotografie | 28 |
| 5.3 | Streifenlichtprojektion | 29 |
| 5.4 | Wägeversuche | 29 |
| 5.5 | Staubmonitoring | 29 |
| 6. | Öffentlichkeitsarbeit..... | 31 |
| 7. | Literatur | 32 |
| | Abbildungsverzeichnis..... | 36 |
| | Tabellenverzeichnis..... | 37 |
| | Anhang | 37 |

Abkürzungsverzeichnis

BSV: Bayerische Verwaltung der staatlichen Schlösser, Gärten und Seen

rF: relative Luftfeuchte

T: Temperatur

TGA: Technische Gebäude Ausrüstung

SLR: Single Lense Reflex (Spiegelreflexkamera)

SGV: Schloss- und Gartenverwaltung

Zusammenfassung

Ziel des Forschungsprojektes mit einer Laufzeit vom 20.03.2013 – 28.02.2018 war die konservatorische Begleitung der Inbetriebnahme einer Lüftungsanlage mit innovativem Klimakonzept in Schloss Linderhof. Diese wurde durch ein umfangreiches zerstörungsfreies Monitoring an der historischen Ausstattung sowie des Raumklimas durchgeführt. Die Abhängigkeit von Veränderungen an Ausstattungsoberflächen von klimatischen Bedingungen vor und nach Inbetriebnahme einer Lüftungsanlage stellt die Kernaufgabe des Projektes dar. Um die Vielfalt der Materialgattungen, die sich im Schloss befinden, abzubilden, wurden verschiedene Oberflächen der wandfesten Ausstattung mit unterschiedlicher Erhaltung ausgesucht. Das Monitoring wurde mit verschiedenen optischen Verfahren durchgeführt. Für die Untersuchung der Auswirkung von kurzfristigen Klimaschwankungen wurden ein 3D-Mikroskop und eine zeitgesteuerte Spiegelreflexkamera eingesetzt. Für die Beurteilung von Bewegungen, die über einen längeren Zeitraum entstehen, kam ein Streifenlichtscanner zum Einsatz. Um einen Überblick über das Spektrum an Bewegung zu erhalten, wurden die Kampagnen zu unterschiedlichen Jahreszeiten durchgeführt.

Parallel dazu erfolgte die Erarbeitung eines Leitfadens zur Beurteilung von klimatisch bedingten Bewegungen an historischen Oberflächen.

Ein weiterer Aspekt des Projektes war die Untersuchung des Staubes, der Zusammensetzung und Verteilung in den einzelnen Räumen. Die Frage, ob und wie sich die Staubverteilung künftig durch die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage und dem damit einhergehenden Schließen der Fenster ändern wird, war ebenfalls Bestandteil der Untersuchungen.

1. Projektidee

Wie reagieren Kunstwerke auf Klimaschwankungen? Organische Materialien, aus denen eine Vielzahl von Kunstwerken bestehen, quellen und schrumpfen bei der Veränderung der relativen Luftfeuchte. Dies allein ist nicht schädlich, so lange die Bewegung, die sich daraus ergibt, reversibel ist. Doch welche Feuchteschwankungen führen zu irreversiblen Veränderungen? Dies hängt stark vom jeweiligen Kunstwerk, seiner Materialbeschaffenheit und Herstellungstechnik sowie der individuellen Klimasensibilität ab.

Bestimmte Werte, wie eine zu hohe und zu niedrige Luftfeuchte, sind langfristig schädigend für Kunstwerke. Weiter besteht in der Fachwelt weitgehend Einigkeit darüber, dass ein in kurzen Intervallen schwankendes Klima ungünstig für den langfristigen Erhalt von Kulturgut ist. Allerdings gibt es – abhängig von der Kunstgattung wie auch den verschiedenen Kulturinstitutionen – unterschiedliche Vorstellungen darüber, welche täglichen und saisonalen Schwankungen noch zulässig sind.

Schloss Linderhof unterliegt aufgrund seiner starken touristischen Nutzung hohen Schwankungen des Raumklimas (tägliche Schwankungen über 20 % rF) und einem zu hohen Feuchteniveau (3 Jahres-Mittelwert im Paradeschlafzimmer: 71 % rF). Daher war es für die Erhaltung der im Schloss befindlichen originalen Ausstattung notwendig, die klimatische Situation zu verbessern. Gleichzeitig sollte das Raumklima jedoch nicht grundlegend geändert werden, sondern lediglich die Schwankungsspitzen und das Feuchteniveau reduziert werden (vgl. DIN EN 15757).

Trotzdem bedeutet jeder Eingriff in das bestehende Raumklima – auch wenn damit aus konservatorischer Sicht eine Verbesserung erreicht wird – immer eine dynamische Veränderung der im Raum befindlichen Ausstattung. Die Idee des Forschungsprojektes war, die Gelegenheit der Inbetriebnahme einer Lüftungsanlage in Linderhof zu nutzen, um detailliert zu untersuchen, wie die Ausstattung auf diese Klimaregulierungsmaßnahme reagiert. Um die Reaktion auf das geänderte Raumklima beurteilen zu können, erfolgte im Vorfeld sowie nach Inbetriebnahme der Anlage eine umfangreiche Messung an der historischen Ausstattung unter Berücksichtigung des Mikroklimas. Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Methode zum In-situ-Monitoring von klimatisch bedingten Bewegungen an historischen Oberflächen entwickelt.

2. Rahmenbedingungen

Das Ende des 19. Jahrhunderts erbaute Schloss Linderhof beherbergt bis heute einen Großteil seiner originalen Ausstattung, die aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialkombinationen (farbig gefasste und vergoldete Holzoberflächen, Wandmalerei, Leinwandgemälde, Textilien, Keramik, Spiegel, etc.) besteht. Aufgrund der starken touristischen Nutzung unterliegen diese Ausstattungsgegenstände starken klimatischen Schwankungen, so dass die Wirkung von Klimaschwankungen hier deutlich abzulesen ist. Die Bayerische Schlösserverwaltung entschied, im Sinne der Präventiven Konservierung eine Lüftungsanlage zu installieren, die das bestehende Raumklima stabilisieren und verbessern soll. Dies bot die einmalige Gelegenheit, die historische Ausstattung hinsichtlich ihrer Reaktion auf kurz- und längerfristige Klimaschwankungen vor und nach der Inbetriebnahme der Anlage zu untersuchen.

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 aufgrund der hohen Besucherfrequenz und der daraus resultierenden Schwingungen der Holzböden erforderlich, die Messungen abends und nachts nach Ende des Führungsbetriebs durchzuführen. Aus arbeitsrechtlichen Gründen ist es ebenfalls erforderlich, sich nach Schließung des Schlosses zu zweit darin aufzuhalten.

Um die Projektidee umsetzen zu können, waren Kooperationen mit den Abteilungen innerhalb der Schlösserverwaltung sowie mit externen Forschungseinrichtungen erforderlich.

Die Projektleitung lag bei der Leitung des Restaurierungszentrums der **Bayerischen Schlösserverwaltung**. Hier wurde Kristina Holl als wissenschaftliche Mitarbeiterin eingestellt, die sehr eng mit Kollegen des Restaurierungszentrums und der Bauabteilung zusammenarbeitete. Tina Naumović, Leiterin der Präventiven Konservierung im Restaurierungszentrum, führte im Rahmen des Forschungsprojektes das Staubmonitoring durch. Klaus Häfner, Restaurator für Wandmalerei, war in die Diskussionen zur Methodik der Messkampagnen involviert und auch bei der Durchführung der Messkampagnen beteiligt. Mit Martin Bosch von der Bauabteilung erfolgte die Absprache zu Klimavorgaben für die Lüftungsanlage. Weiterhin nahmen alle Projektinvolvierten an den beiden Expertentreffen teil und führten regelmäßig Abstimmungsgespräche zum Fortgang des Projektes.

Die **Schloss- und Gartenverwaltung Linderhof** unterstützte durch ihre täglichen Beobachtungen im Schloss die Beurteilung von Veränderungen an der historischen Ausstattung. Beispielsweise stand im Rahmen der Baumaßnahmen die Frage im Raum, wie nah am Schloss der Boden mit Rüttelplatten verdichtet werden kann, ohne die Kristallleuchten im Paradeschlafzimmer und im Spiegelsaal zum Vibrieren zu bringen und ob dies Einfluss auf die Untersuchungen des Forschungsprojektes haben könnten. Die Außenverwaltung war außerdem bei der Umsetzung des Bauvorhabens zum Einbau der Lüftungsanlage involviert.

Das **Fraunhofer-Institut für Bauphysik, Holzkirchen** konnte für die wissenschaftliche Begleitung der Lüftungsanlage als Kooperationspartner gewonnen werden. In diesem Rahmen

erfolgte die Überwachung / Einschätzung der Funktion der Lüftungsanlage anhand von Klimadaten, die an und in der Anlage erhoben wurden. Der Institutsmitarbeiter Stefan Bichlmair koordinierte den Einbau der Messtechnik, überwachte vor und während der Inbetriebnahme die Funktion der Lüftungsanlage und meldete, wenn Unstimmigkeiten auftraten. Die Ergebnisse der messtechnischen Begleitung sind detailliert im separaten Abschlussbericht zu finden (Anhang). Im Rahmen des Klimamonitorings wurden Datenlogger in der Nähe der ausgewählten Oberflächen installiert, um das Mikroklima untersuchen zu können. Außerdem stand das 3D-Mikroskop des Instituts für die Messkampagnen zu Verfügung.

Die **Universität Bamberg**, speziell das Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) verlieh das optische Equipment (Streifenlichtscanner, 3D-Mikroskop) für die Messkampagnen. Die Durchführung der Messkampagnen in Linderhof wie auch die Auswertung der Scanflächen erfolgte in enger Zusammenarbeit mit Herrn Rahrig, wissenschaftlicher Mitarbeiter am KDWT.

Das **Bauamt Weilheim** war für die Ausführung der Bauarbeiten zur Lüftungsanlage zuständig. Die Absprachen zur Umsetzung der Klimavorgaben nach Vorgaben des Fraunhofer-Instituts für Bauphysik erfolgten unter Einbeziehung der Bauabteilung und des Restaurierungszentrums.

Expertentreffen

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden zwei Expertenworkshops durchgeführt. Der erste hatte das Thema „Auswertung und Interpretation der Messergebnisse“ und wurde am 25. und 26. März 2015 in Linderhof abgehalten. Der zweite Workshop am 17. Oktober 2017 in Nymphenburg hatte die Planung und Umsetzung einer innovativen Lüftungsanlage zum Thema. Für beide Veranstaltungen wurden externe Experten hinzugezogen, die im Vorfeld umfangreiches Informationsmaterial sowie einen Fragenkatalog zugeschickt bekamen. Dieser wurden dann diskutiert. Die Ergebnisse sind jeweils in einem Protokoll festgehalten.

Klimakonzept

Das für Schloss Linderhof gewählte Klimakonzept unterscheidet sich von bisher oftmals praktizierten Vorgaben. Die klimatischen Vorgaben für die Lüftungsanlage wurden, angelehnt an die DIN EN 15757, am Fraunhofer-Institut für Bauphysik formuliert und in Absprache mit dem Restaurierungszentrum als Klimavorgaben konkretisiert. Zum einen soll die relative Luftfeuchte im Paradeschlafzimmer auf das Niveau der angrenzenden Räume (dreijähriges Jahresmittel im Spiegelsaal: 62 % rF) abgesenkt werden. Dazu wird ein Korridor von 62 ± 6 % rF des gleitenden Monatsmittels festgelegt. Für eine schonende Annäherung des Raumklimas wurde zunächst ein Zielwert von 67 % rF eingestellt.

Um kurzfristige Schwankungen zu reduzieren, soll zu 90 % der Zeit das gleitende Monatsmittel ± 8 % rF nicht überschritten werden. Die Temperatur soll dem Jahresgang freischwingend folgen, jedoch sind geringe Temperaturänderung möglich: Liegt eine Temperatur über dem

Nullpunkt vor, soll die Zuluft-Temperatur um maximal 6 K über der Raumlufftemperatur liegen. Ab 20 °C hat keine Temperaturerhöhung mehr zu erfolgen. Insgesamt ist die Kontrolle der Temperatur jedoch untergeordnet zu betrachten. Als Hauptkriterium der Zuluftregelung darf die relative Feuchte einen Mindestwert von 40 % rF nicht unterschreiten. Der Volumenstrom ist durch Frequenzumrichter regelbar und kann abhängig von der Besucherzahl variieren.

Aufgrund von einigen Mängeln an der Lüftungsanlage, die während der Planung und Umsetzung entstanden sind, verzögerte sich die Inbetriebnahme um ca. 2 Jahre. Am 3. April 2017 wurde die Lüftungsanlage offiziell in Betrieb genommen. Im Zeitraum vom 13. Juli bis 5. Oktober 2017 war sie wegen einer technischen Störung außer Betrieb. Daher ist die ursprüngliche Idee, den Zeitraum vor und nach der Inbetriebnahme hinsichtlich der Auswirkung auf die historische Ausstattung zu vergleichen, nur eingeschränkt möglich.

3. Untersuchung von klimatisch bedingten Veränderungen an historischen Oberflächen

Um kleinste Oberflächenveränderungen sichtbar zu machen wurden für die Untersuchungen in Schloss Linderhof drei bildgebende Verfahren – digitale Fotografie, Streifenlichtprojektion und 3D-Mikroskopie – eingesetzt. Diese wurden mit weiteren Untersuchungsmethoden (Wägeversuche, Shearografie, Glassensoren) kombiniert sowie durch eine detaillierte Klimamessung ergänzt. Im Folgenden werden die Untersuchungsverfahren und das Monitoring beschrieben. Daran schließen sich die Auswertung der Messungen und die Ergebnisdarstellung an. Aus der Vorgehensweise wurde das Konzept „Leitfaden zur Entwicklung einer Methode zur Beurteilung von klimatisch bedingten Bewegungen an Kunstwerken“ erarbeitet (vgl. 4).

3.1 Untersuchungsverfahren

Neben der Anwendung der optischen Verfahren erfolgte parallel die Dokumentation des Raumklimas durch Strömungs- und detaillierte Klimamessungen. Wägeversuche mit einem originalen Ornamentstück sollten zusätzlich Aufschluss über die Reaktionsgeschwindigkeit der historischen Ausstattung auf klimatische Schwankungen geben.

3.1.1 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren

Die Kombination von optischer Triangulationstechnik (optische Abstandsmessung durch Winkelmessung innerhalb von Dreiecken) und Interferometrie (Überlagerung von Wellen) ist Grundlage der Streifenprojektionstechnik. Ein großer Vorteil dieses optischen Verfahrens besteht in seiner schnellen Oberflächenerfassung mit hoher Auflösung (Eipper 2004).

Funktionsweise

Die zu ermittelnde Fläche wird mit einer LED-Lichtquelle beleuchtet. Ein opto-elektronischer Sensor nimmt diese in einem definierten Projektionswinkel (Triangulationswinkel) auf. Die registrierten Höhenunterschiede (d) sind durch eine Triangulationsgleichung auszuwerten:

$$D = \Delta s / \tan \alpha$$

Für die Auswertung von gescannten Triangulationsflächen muss der Zusammenhang zwischen Auslenkung der projizierten Linien auf der Objektfläche und Oberflächenform hergestellt werden. Dieser ergibt sich aus der sog. effektiven Wellenlänge λ_{eff} , die wie folgt bestimmt wird:

$$\lambda_{\text{eff}} = 2p / \cos \Phi \tan \alpha = 2d / \tan \alpha = 2\beta L / \sin \alpha$$

wobei p der Abstand der projizierten Streifenmuster aus Projektionsrichtung, d der Streifenabstand aus Sicht der Kamera ist.

Für die Messungen kommt ein Streifenlichtscanner der Fa. Steinbichler COMET LED 5M zum Einsatz (Abbildung 1). Mit Hilfe dieses Verfahrens ist es möglich, je nach Objektiv unterschiedlich große Oberflächen zu scannen: Mit dem 75 mm-Objektiv entsteht ein Messfeld von $74 \times 62 \times 45 \text{ mm}^3$, mit dem 250 mm-Objektiv ein Ausschnitt von $260 \times 215 \times 140 \text{ mm}^3$. Der Punktabstand ist bei 250 mm $100 \mu\text{m}$, bei 75 mm $30 \mu\text{m}$, also je kleiner der Bildausschnitt umso höher die Auflösung. Mit Hilfe der Software Comet Plus 9.63 werden mehrere Scans nacheinander durchgeführt und zu einer Gesamtdatei zusammengesetzt.

Vorteil dieses Verfahrens ist neben der hohen Auflösung und der berührungslosen Datenerfassung, dass die Messungen an einem Standort beliebig oft wiederholt und miteinander verglichen werden können. Auf diese Weise wird ein saisonales Monitoring ermöglicht, ohne dass das Gerät vor Ort bleiben muss. Die Untersuchungen mit dem Streifenlichtscanner werden daher v. a. für die Beurteilung von saisonalen Schwankungen eingesetzt.

Im Verlauf des Forschungsprojektes zeigte sich zudem, dass das Scanverfahren mit Hilfe der „1-Shot-Methode“ wertvolle Hinweise hinsichtlich der Auswirkung kurzfristiger Schwankungen auf die Oberflächen liefern kann.

Die „1-Shot-Methode“ zielt darauf ab, den Fehler zu minimieren, der bei der Datenverarbeitung auftritt. Somit werden nur zwei Scans desselben Details zu unterschiedlichen Zeitpunkten (letzter Scan am Abend und erster Scan am Morgen) aufgenommen, ohne das Messgerät zu bewegen. 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.

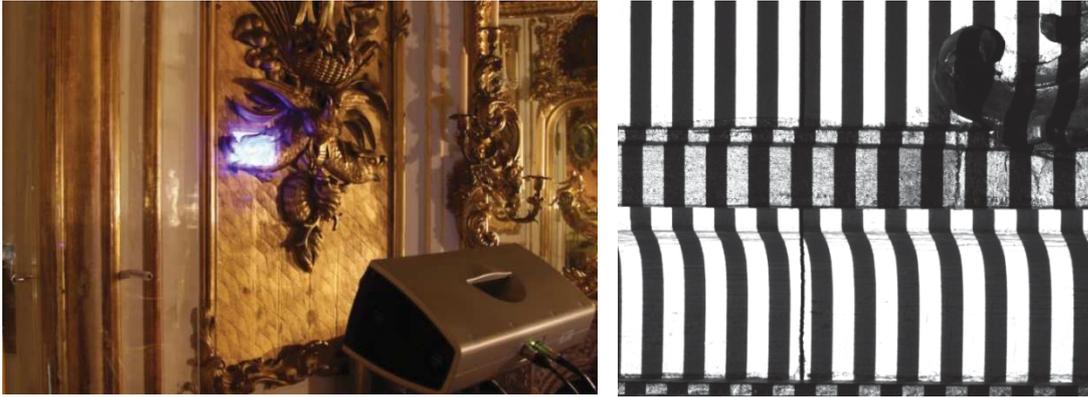


Abbildung 1:
 Links: 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren im Speisezimmer von Schloss Linderhof. Rechts:
 Streifenlichtprojektion während des Scanprozesses.

3.1.2 3D-Mikroskopie

Mit Hilfe der 3D-Mikroskopie sollen kleinste Veränderungen an vorgeschädigter Ausstattung (z. B. gelockerte Fassung), die sich aufgrund von kurzfristigen (24-stündigen bis mehrtägigen) Schwankungen des Raumklimas ergeben, erfasst werden.

Vorteil des 3D-Mikroskops gegenüber eines herkömmlichen ist die erhöhte Tiefenschärfe, die durch das stufenweise Scannen vom tiefsten zum höchsten Punkt des Ausschnitts erreicht wird. Alle Einzelaufnahmen werden zu einem tiefenscharfen Bild zusammengefügt. Weiter gibt die Software ein Tiefenprofil und eine topografische Darstellung im Falschfarbenmodus aus.

Ziel ist es, Oberflächendetails unterschiedlicher Materialgattungen über 24 Stunden und darüber hinaus zu beobachten und die Veränderungen zu dokumentieren (Abbildung 2). Diese Untersuchung wird zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr an ähnlichen Positionen durchgeführt, so dass das Verhalten der Materialverbände bei unterschiedlichen klimatischen Situationen sichtbar wird. Aufgrund der starken Vergrößerung und der dreidimensionalen Untersuchungsobjekte ist es nicht möglich, exakt denselben Ausschnitt im selben Betrachtungswinkel erneut herzustellen, nachdem das Messgerät bewegt wurde. Dennoch sollte ein Vergleich der Reaktion der Oberflächen bei unterschiedlich starken klimatischen Schwankungen abhängig von den Jahreszeiten sichtbar werden.



Abbildung 2: 3D-Mikroskopie im Bad von Schloss Linderhof.

3.1.3 Vergleichende hochauflösende Fotografie

Derselbe Ansatz, der für die 3D-Mikroskopie beschrieben wurde, wird auch mit Hilfe der hochauflösenden Digitalfotografie verfolgt: Bewegungen des Materialgefüges an vorgeschädigten Oberflächen aufgrund von klimatischen Schwankungen werden über einen Zeitraum von mehreren Tagen dokumentiert. Im Unterschied zur mikroskopischen Untersuchung werden durch den Einsatz von Digital-Spiegelreflexkameras Oberflächenänderungen im makroskopischen Bereich detektiert. Weiter werden hier einzelne Aufnahmen gemacht. Die Tiefenschärfe wird über Zeit- und Blendeneinstellungen an der Kamera eingestellt. Diese Methode ist gegenüber der mikroskopischen Untersuchung wesentlich kostengünstiger, so dass diese bei positiver Wirkung auch im Anschluss an das Forschungsprojekt zum Monitoring eingesetzt werden könnte.

3.1.4 Messung des Nahfeldklimas und der Strömungsgeschwindigkeit

Über den gesamten Zeitraum des Projektes zeichnen Datenlogger die Temperatur- und Feuchteverhältnisse in den Schauräumen des Schlosses sowie das Außenklima auf. An vier der festgelegten Messstellen für Streifenlichtscanner und 3D-Mikroskopie wird auch das Nahfeldklima ermittelt (Abbildung 3, links). Dort wird einmal das Lokalklima (Temperatur, relative Luftfeuchte) nahe der Messposition gemessen, zum anderen die Oberflächentemperatur in unmittelbarer Umgebung des Messfeldes. Im Treppenhaus und Paradeschlafzimmer ist dort je ein zusätzlicher Sensor zu Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte montiert.

Parallel zu den Messungen mit Streifenlichtscanner und 3D-Mikroskop werden Strömungsmessungen durchgeführt. So wird neben der klimatischen Situation die Luftgeschwindigkeit zur Zeit der Messungen erfasst. Weiter erfolgten Messungen zu unterschiedlichen Tages- und Jahreszeiten, um die Unterschiede der Luftströmung aufgrund von variierender Besucherfrequenz aufzeigen. Dazu sind an einem Messbaum zwei Strömungssensoren (unten: 1,09 m, oben: 1,56 m) angebracht (Abbildung 3, rechts). Die Messung erfolgt im Sekundentakt.



Abbildung 3:
 Links: Nahfeldklimamessung am Beispiel der Westwand im Paradeschlafzimmer. Rechts: Messbaum für Strömungsmessung und die lokale Erfassung des Raumklimas.

3.1.5 Wägeversuche

Die Untersuchung der Gewichtsänderung von Kunstwerken ist ein sehr sensibles Verfahren, da hygroskopische Materialien bei Änderung des Klimas unmittelbar Feuchte aufnehmen bzw. abgeben. Daher stellt diese einen Indikator für mögliche Schädigungen dar. Abhängig von den jeweiligen Materialeigenschaften wird der Verbund stärkere oder geringere Gewichtsschwankungen aufweisen. Die Untersuchung der Gewichtsänderung bei realen klimatischen Schwankungen wird an Originalmaterial aus dem Schloss, z. B. einem abgebrochenen Stück Holzornament durchgeführt (Abbildung 4).



Abbildung 4:
 Wägeversuche im Paradeschlafzimmer mit einem vergoldeten Holzornament.

3.2 Auswahl der Monitoring-Flächen

Die historische Ausstattung im Schloss besteht aus einer Vielzahl unterschiedlicher Materialkombinationen. Diese reagieren unterschiedlich auf Klimaschwankungen. Für die Auswahl geeigneter Oberflächen im Vorfeld der ersten Messkampagne half die restauratorische Zustandsuntersuchung, die 2012 bereits von der Projektmitarbeiterin durchgeführt wurde. Kriterien für die Auswahl waren Oberflächen, die durch die Position im Raum wie auch die Erhaltung (Vorschädigung) aussagekräftig sind und von denen am ehesten Aussagen zur Fragestellung des Projektes zu erwarten sind. Der Luftauslass der Lüftungsanlage befindet sich im östlichen Kamin des Paradeschlafzimmers (vgl. Abschnitt Lüftungsanlage). Daher stellten die daran angrenzende Ausstattung, wie auch die Oberflächen, die sich gegenüber dem Luftauslass befinden, interessante Testfelder dar. Eine weitere Frage war, wie sich die Lüftungsanlage auf das Raumklima und die Oberflächen in den angrenzenden Räumen auswirken würde. Deshalb wurden im Speisezimmer und im Östlichen Gobelinzimmer geeignete Testflächen ausgesucht (Dokumentation der Testflächen im Anhang).

Weiter wurde im Vorfeld eine individuelle Fragestellung zu den ausgewählten Oberflächen formuliert. Je nachdem, ob die Reaktion auf kurz- oder langfristige Klimaschwankungen untersucht werden sollte, kommen unterschiedliche Monitoringverfahren zum Einsatz (vgl. Tabelle 2). Hierbei muss gewährleistet sein, dass die jeweilige Methode mit der vorgesehenen Taktung auch technisch umgesetzt werden kann. Speziell bei Messaufbauten, die über einen längeren Zeitraum an einem Ort aufgestellt bleiben (3D-Mikroskopie, Zeitraffer-Aufnahmen mit SLR Kamera), mussten mögliche Einschränkungen wegen des Besucherbetriebs berücksichtigt werden. Um die Streifenlichtscans durchführen zu können ist eine erschütterungsfreie Umgebung erforderlich. Da der Holzboden bei Betreten zu stark federt, wurden die Messkampagnen überwiegend nachts durchgeführt.

Ein weiteres Kriterium für die Untersuchung ist die Zugänglichkeit. So konnten beispielsweise die Deckengemälde für das Monitoring nicht berücksichtigt werden. Der Schwerpunkt der Untersuchungen lag an der wandfesten Ausstattung, die größtenteils aus gefassten und vergoldeten Holzoberflächen und verputzten Oberflächen bestehen. Innerhalb dieser Gattungen wurden unterschiedliche Schadensbilder, wie Rissbildungen oder gelockerte Fassungen, ausgewählt und mit verschiedenen Methoden untersucht.

Der Einsatz der optischen Geräte war auf die zu erwartende zeitabhängige Reaktion der Oberflächen und deren Schadensbilder abgestimmt. So wurden gelockerte Fassungen hinsichtlich ihrer Reaktion auf kurzzeitige Schwankungen untersucht, intakte Oberflächen tendenziell hinsichtlich der Reaktion auf die allgemein vorliegenden Klimaschwankungen (Tabelle 2). Als Zwischenglied ist hier die Untersuchung mit dem Streifenlichtscanner zu sehen. Diese kann zum einen für die Untersuchung der Auswirkung von längerfristigen Klimaschwankungen, zum anderen über die 1Shot-Messungen zur Beurteilung von kurzfristigen Schwankungen eingesetzt werden.

*Tabelle 1:
Auflistung der Testflächen unterteilt in Material, Position im Schloss, vorgefundener Oberflächenveränderung sowie die angewandte Untersuchungsmethode.*

| Material | Schaden | Methode | Ort |
|----------------------------|--|--|---|
| Gefasste Holzoberflächen | Risse / Fugenöffnungen | Streifenlichtscanner | Paradeschlafzimmer Treppenhaus, Türe zum Östlichen Gobelinzimmer |
| | Lockerung der Fassung | Streifenlichtscanner 3D-Mikroskop Hochauflösende Digitalfotografie | Speisezimmer Audienzzimmer |
| Vergoldete Holzoberflächen | Risse / Fugenöffnungen | Streifenlichtscanner 3D-Mikroskop | Speisezimmer Östliches Gobelinzimmer |
| | Lockerung der Fassung (glatt, gesandelt) | | |
| Verputzte Oberflächen | Lockerung, Craquelé | Streifenlichtscanner 3D-Mikroskopie | Treppenhaus Bad |

*Tabelle 2:
Darstellung des Einsatzes der verschiedenen Methoden, um die Reaktion der Ausstattung in unterschiedlichen Zeiträumen zu untersuchen.*

| Klima | Untersuchung | Methode |
|---------------------------------------|---|---|
| Kurzfristige klimatische Schwankungen | Untersuchung von vorgeschädigten Oberflächen hinsichtlich ihrer Bewegung (Quellen/Schrumpfen) | Digitale Fotografie 3D-Mikroskopie Wägeversuche |
| Kurzfristige klimatische Schwankungen | Vergleich eines Ausschnitts der historischen Oberfläche im täglichen Verlauf | Streifenlichtscanner |
| Saisonale Schwankungen | Vergleich eines Ausschnitts der historischen Oberfläche im saisonalen Verlauf | Streifenlichtscanner Wägeversuche |

Um die relevanten Positionen und Zeiträume besser eingrenzen zu können, wurden anfangs insbesondere mit den Verfahren zur Untersuchung kurzfristiger Klimaschwankungen (3D-Mikroskop und SLR-Kamera) mehrere Positionen innerhalb einer Kampagne untersucht (vgl. Abbildung II). Hierbei zeigte sich, dass die Reaktion der Oberflächen über mehrere Tage aufschlussreicher ist. Daher wurden die relevantesten Positionen (gelockerte Fassungsscholle im östlichen Gobelinzimmer, gelockerter Putz um Treppenhaus) in den folgenden Kampagnen detaillierter untersucht und weniger aussagekräftige Stellen (Badezimmer, da kaum Bewegung aufgrund des konstanten Raumklimas) nicht mehr weiter verfolgt.

3.3 Durchführung des Monitorings

3.3.1 Messkampagnen

Tabelle 3 gibt einen Überblick, wann die Messkampagnen durchgeführt wurden und welche Methoden dabei im Einsatz waren. Aufgrund der zweijährigen Verzögerung der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage fiel die Untersuchung der Ausstattung ohne Klimabeeinflussung detaillierter aus. Für die Entwicklung der Monitoring-Methode war dies jedoch nicht hinderlich. Im Rahmen jeder Messkampagne wurden die Auswirkungen von kurzfristigen (24-stündig bis mehrtägig) und langfristigen (monatlichen und saisonalen) Schwankungen beobachtet.

*Tabelle 3:
Zusammenstellung der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Messkampagnen.*

| Jahreszeit | Zeitraum | Art der Messungen |
|-------------------|--------------------|---|
| Frühjahr | 25. – 28. 3. 2013 | Streifenlichtscans |
| Winter | 25. – 29. 11. 2013 | 3D-Mikroskopie |
| Winter | 16. – 20. 12. 2013 | Streifenlichtscans, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche |
| Sommer | 22. – 25. 7. 2014 | Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |
| Frühjahr | 23. – 27. 3. 2015 | Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |
| Frühjahr | 23. – 24. 4. 2015 | Streifenlichtscans im Rahmen des Rütteltests (Paradeschlafzimmer, Speisezimmer) |
| Sommer | 6. – 10. 7. 2015 | Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |
| Herbst | 20. – 23. 10. 2015 | Streifenlichtscans, 3D-Mikroskopie, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |
| 3. 4. 2017 | | Offizielle Inbetriebnahme der Lüftungsanlage |
| Frühsommer | 6. – 9. 6 2017 | Streifenlichtscans, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |
| Sommer | 3. – 7. 7 .2017 | Streifenlichtscans, SLR-Aufnahmen, Wägeversuche, Strömungsmessung |

3.3.2 Klimamonitoring

Zur Überprüfung des Raumklimas ist in den Schauräumen des Schlosses ein kabelgebundenes Messnetz der Fa. Krah & Grote installiert. Die Datenübertragung erfolgt über DSL an das Restaurierungszentrum der Schlösserverwaltung. Als Redundanz zeichneten in den einzelnen Räumen „Stand alone Logger“ der Fa. Escort das Raumklima auf. Nachdem die Positionen für das Monitoring im Rahmen des Forschungsprojektes festgelegt waren, wurden in der Nähe Datenlogger zur Erfassung des Nahfeldklimas (Temperatur, relative Luftfeuchte und Oberflächentemperaturen) montiert (vgl. Bericht im Anhang). Für die Überprüfung der Wirkungsweise der Lüftungsanlage wurde vom Fraunhofer Institut für Bauphysik eine separate Messanlage mit Sensoren für Temperatur, relative Luftfeuchte, CO₂, Strömungsgeschwindigkeit installiert (vgl. Bericht im Anhang).

3.3.3 Staubmonitoring

Für das Staubmonitoring standen folgende Fragen im Vordergrund: Wie ist die Staubbeschaffenheit und –verteilung im Schloss? Können anhand des Monitorings Rückschlüsse auf Staubquellen getroffen werden? Ist der Teppich an sich eine Staubquelle (Abrieb)? Erhöht sich die bewegliche Staubmenge durch die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage?

Für das Staubmonitoring wurden Staubsammler und Klebefallen im Erdgeschoss (Äußeres Vestibül und Treppenhaus) und in den Schauräumen (Westliches und Östliches Gobelinzimmer, Audienz- und Speisezimmer sowie Paradeschlafzimmer) ausgebracht (Plan siehe Anhang). Um in den verschiedenen Räumen eine vergleichbare, waagrechte Sammelhöhe zu erreichen, wurden die Kaminsimse als Aufstellungsort ausgewählt. Im Westlichen und Östlichen Gobelinzimmer erfolgte zusätzlich eine Untersuchung der Höhenschichtung. Dort sind weitere Behälter am Boden und am Türsturz angebracht. Das Staubmonitoring startete bereits im November 2012. Die Sammelzeiträume richten sich nicht nach dem Jahresverlauf, sondern saisonal nach den Besucherzahlen. Durch die Verzögerung der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage pausierte das Monitoring zwischen Winter 2014/2015 und Winter 2015/2016. Im Herbst 2016 wurde es wieder aufgenommen. Trotzdem war der Zeitraum, in dem die Lüftungsanlage in Betrieb war zu kurz, um einen eindeutigen Vergleich zwischen dem Staubaufkommen bzw. der –verteilung vor und nach der Inbetriebnahme zu erhalten.

Die Ergebnisse des Staubmonitorings sind in eine Anleitung zum Lüften eingeflossen (vgl. 3.4.4)

3.4 Auswertung

3.4.1 Auswertung längerfristiger Klimaschwankungen

Für die Auswertung von klimatisch bedingten Bewegungen, die über einen längeren Zeitraum entstanden sind, werden jeweils zwei Scans der Oberfläche, die mit dem Streifenlichtscanner aufgenommen wurden, mit der Software Inspect Plus[®] verglichen. Nach einer manuellen Orientierung durch Referenzpunkte richtet die Software die Scans gegeneinander aus und berechnet eine "Best-Fit-Orientierung" (der Fehler liegt zwischen 0,05 und 0,1 mm). Danach kann der Vergleich der Oberflächen durchgeführt werden. Um zu zeigen, wie stark die beiden Scans voneinander abweichen, erstellt die Software ein farbkodiertes Bild, das die Abweichung darstellt (Abbildung 5). Die Skala der Falschfarben-Illustration ist frei wählbar. Der Abstand zwischen den einzelnen Farben sollte jedoch über dem Fehler liegen, der durch Überlappung zweier Scans entsteht. Der Farbverlauf wurde von dunkelblau und türkis über grün bis gelb und rot gewählt. Dunkelgrüne Bereiche bedeuten keine Veränderung; von hellgrün bis rot weist auf eine Bewegung zur Vorderseite hin; Von türkis bis dunkelblau zeigt es eine umgekehrte Bewegung.

Um die Bewegung in der Oberfläche mit dem vorherrschenden Klima vor bzw. während der beiden Messungen korrelieren zu können, ist dem Scanvergleich in Falschfarbendarstellung das zugehörige Klimadiagramm angefügt (Abbildung 5, rechts).

Der ursprüngliche Ansatz war, mit Hilfe des Streifenlichtscanners an unterschiedlichen Testflächen in saisonaler Taktung zu untersuchen, welche Bewegungen sich einstellen. Dies sollte als Grundlage für die Beurteilung der Wirkungsweise der Lüftungsanlage herangezogen werden.

Zunächst bestand die These, dass sich an den unterschiedlichen Testflächen – in Abhängigkeit des saisonalen Verlaufs – ein vergleichbares Bild der Bewegung / Verformung abzeichnen wird. Tatsächlich konnte jedoch auch unter Einbeziehung des Raumklimas, das sich in den einzelnen Räumen zwar im Detail unterscheidet, aber nicht komplett unterschiedlich ist, keine einheitliche Reaktion der Oberflächen auf das Klima ausgemacht werden. Dies hat mitunter damit zu tun, dass die einzelnen Scans an unterschiedlichen Tagen und damit unterschiedlichen klimatischen Situationen durchgeführt wurden. Weiter ist, abhängig von der Materialzusammensetzung, die Ausgleichsfeuchte der einzelnen Testflächen unterschiedlich und damit auch die (zeitverzögerte) Reaktion auf eine Klimaschwankung. Deshalb ist ein Vergleich der Testflächen untereinander nur eingeschränkt möglich. Um die Bewegungen der Scanvergleiche besser einschätzen zu können, wurden die letzten Messkampagnen monatlich getaktet. Aufgrund der langen Wartezeit bis zur Inbetriebnahme der Lüftungsanlage, konnten nur zwei Kampagnen zur Überprüfung der Auswirkung der Klimaänderung auf die Ausstattung unternommen werden.

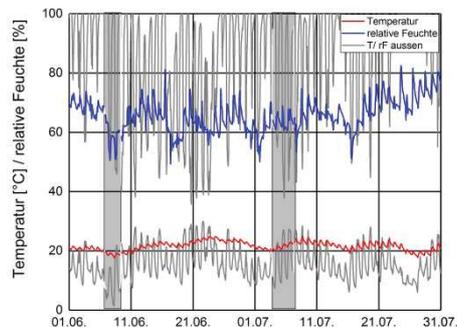
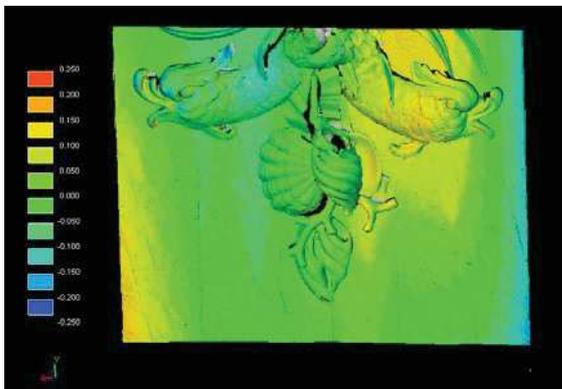


Abbildung 5:

Links: Vergleich zweier Scans mit farbig codierter Darstellung der Abweichung am Beispiel der Position im Speisezimmer (Juni – Juli 2017). Grün gefärbte Bereiche zeigen keine Veränderung, gelbe bis rote Bereiche eine Bewegung nach vorne, Blautöne eine Bewegung nach hinten auf. Hier tritt eine Bewegung von $\pm 0,2$ mm auf.

Rechts: Grafische Darstellung des Mikroklimas an der Versuchsfläche im Zeitraum von Juni – Juli 2017 mit Markierung der Zeiträume der Messkampagnen (orange).

3.4.2 Auswertung von kurzfristigen Klimaschwankungen

Für die Untersuchung kurzfristiger (ein- bis mehrtägiger) Schwankungen waren drei Methoden im Einsatz: Der Streifenlichtscanner, die zeitgesteuerte SLR-Fotografie und die 3D-Mikroskopie. Da die Auswertung mit dem Streifenlichtscanner von der oben beschriebenen Auswertung etwas abweicht, ist sie hier beschrieben.

Auswertung der 1Shot-Streifenlichtprojektion

Für die Auswertung der 1Shot-Messungen mit dem Streifenlichtscanner wird dieselbe Software Inspect Plus[®] eingesetzt. Jedoch entfällt die „Best-fit“-Ausrichtung da die Position der Einzelaufnahmen sich während der Messungen nicht verändert hat. Bisher ist wenig bekannt, inwieweit die vorliegenden Materialkombinationen verzögert auf das vorliegende Raumklima reagieren. Anhand der 1-Shot Messungen konnte dies im Juni und Juli 2017 durch den Abgleich mit dem Raumklima anschaulich gezeigt werden. In der Nacht vom 7. Juni wurden die oben beschriebene 1-Shot Messung im Speisezimmer durchgeführt. Bisher hatten die Messungen an der Position keine Bewegungen aufgezeigt. In dieser Nacht war auch das Raumklima mit einer Spannweite der relativen Luftfeuchte von 2,9 % und 1,2 °C (Min.: 60,6 %. Max.: 63,5 %) sehr stabil. Trotzdem wies die untersuchte Oberfläche eine Bewegung von $\pm 0,6$ mm auf (Abbildung 6, links). Daran ist festzustellen, dass die Oberflächen noch auf die Klimaschwankungen der letzten Tage reagiert (Abbildung 6, rechts). An den beiden Tagen zuvor war aufgrund von Ferienzeit (Pfingsten) und den damit einher gehenden hohen Besucherzahlen ein Feuchtepeak über 70 % rF entstanden. Am Tag darauf sank die relative Feuchte um 10 % auf ca. 60 % rF. Daher resultierte die festgestellte Bewegung an der untersuchten Oberfläche.

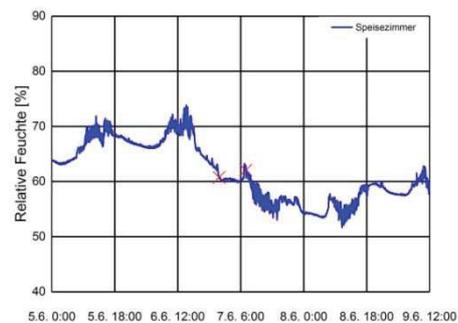
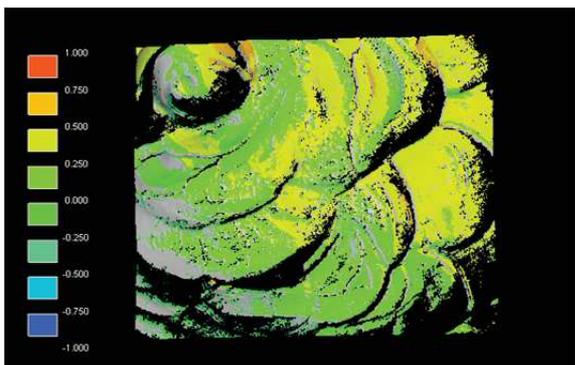


Abbildung 6:

Links: 1-Shot Messung Speisezimmer am 7. Juni 2017 nachts. Innerhalb einer Nacht ist eine Bewegung von $\pm 0,6$ mm festzustellen.

Rechts: Graphische Darstellung der relativen Feuchte im Speisezimmer während der gesamten Messkampagne vom 6. – 9. Juni 2017. Die roten Kreuze markieren die 1-Shot Messungen.

Auswertung der 3D-Mikroskopie und der zeitgesteuerten Fotoaufnahmen

Auch für die Beurteilung der Bewegung anhand von fotografischen und mikroskopischen Aufnahmen ist zunächst eine Analyse des Raumklimas erforderlich. Diese erfolgt einmal anhand der Auswertung des Mikroklimas von Temperatur und relativer Luftfeuchte, das unmittelbar neben der Messposition gemessen wurde (Abbildung 7, Graphik rechts). Die exakten Klimawerte, die während der jeweiligen Aufnahmen vorlagen, sind bei den Auswertungen angegeben. Zur Visualisierung der Bewegung anhand von Bildern wurde in beiden Verfahren (3D-Mikroskopie und hochauflösende Spiegelreflexkamera) dieselbe Methode zur Auswertung verwendet. Dazu wurden die einzelnen, aufgrund der Klimadaten (maximale Spannweite der relativen Feuchte) ausgewählten Aufnahmen im Grafikprogramm Photoshop® übereinander gelegt, und die Bewegung durch Nachzeichnen der gelockerten Schollenkontur sichtbar gemacht (Abbildung 7, links). Auf diese Weise konnte die Stärke der Bewegung einer gelockerten Scholle verdeutlicht und deren Abhängigkeit der Höhe der Klimaschwankung sowohl im mikro- als auch im makroskopischen Bereich nachgewiesen werden.

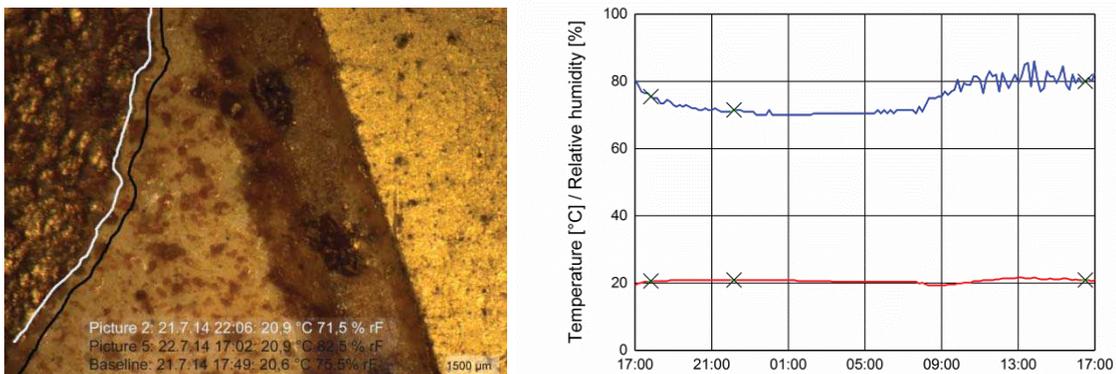


Abbildung 7:

Links: Darstellung der klimatisch bedingten Bewegung durch das Übereinanderlegen einzelner Fotos und Markierung der Umrisse der gelockerten Fassungsscholle.

Rechts: Graphische Darstellung der relativen Feuchte im Östlichen Gobelzimmer während der Aufnahmen vom 21. – 22. Juni 2014. Die grünen Kreuze markieren die einzelnen Aufnahmen, die zum Vergleich herangezogen wurden.

3.4.3 Wägeversuche

Um das aufgezeichnete Gewicht in Bezug zu seinem Volumen zu setzen, wurde die Gewichtsänderung bezogen auf das zu Beginn ermittelte Gewicht in kg/m^3 dargestellt. Auch hier ist für den klimatischen Bezug das Nahfeldklima (Temperatur und relative Feuchte), das neben der Waage aufgezeichnet wurde, dargestellt. Abbildung 8 zeigt als Beispiel die Gewichtsänderung des Holzornaments (vgl. Abbildung 4) aufgrund des vorliegenden Raumklimas im Paradeschlafzimmer (Juli 2014). Wegen der nächtlichen Stromabschaltung kommt es zu Unterbrechungen in der Klimamessung. Auf den kurzfristigen Anstieg der relativen Luftfeuchte am 23. Juli 2014 reagiert das Ornament mit Gewichtszunahme, während es sonst an Gewicht verliert (Abbildung 8).

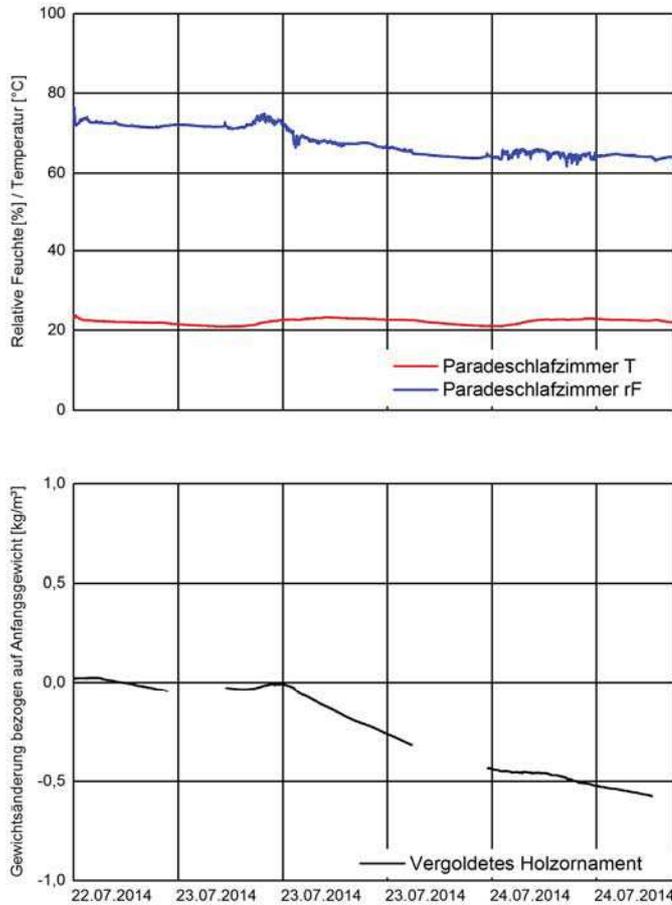


Abbildung 8:
Gewichtsänderung eines vergoldeten Holzornamentstücks (unten) in Abhängigkeit der klimatischen Schwankungen im Paradeschlafzimmer (oben).

3.4.4 Auswertung Staubmonitoring

Für die Auswertung der Voruntersuchung wurde die an den unterschiedlichen Standorten gesammelte Staubmenge fotografisch dokumentiert (Abbildung 9, links). Außerdem erfolgte die Ermittlung des Gewichts der Proben mit Hilfe einer Feinwaage (0,001 g). Zur besseren Vergleichbarkeit wurden diese über eine Woche einem konstanten Raumklima von 20 °C und 50 % relativer Luftfeuchte konditioniert. Auf diese Weise erfolgte eine statistische Auswertung der Staubverteilung im zeitlichen Verlauf. Die Klebefallen wurden mit Hilfe von Auflicht- und Polarisationsmikroskop untersucht, so dass eine qualitative und quantitative Bewertung der Staubverteilung erfolgen konnte (Abbildung 9, rechts).

Deutlich sichtbar ist eine Zunahme der Staubkonzentration zu den Sommermonaten hin bzw. eine Abnahme in den Wintermonaten (Abbildung 9, links). Hauptquelle der Staubbilastung sind die Besucher, der überwiegende Anteil des luftgängigen Staubes sind Kleidungsfasern. Das Monitoring zeigte außerdem, dass beim Teppich kein nennenswerter Abrieb nachgewiesen werden konnte. Insgesamt hat die Staubmenge in den letzten Jahren zugenommen (vgl.

Abbildung 10). Dies ist wohl der aktuellen Baustelle an der Grotte mit sehr viel Transportverkehr geschuldet, wie auch den wassergebundenen Wegedecken, die zum Schloss führen.

Da es im Berichtszeitraum nicht möglich war, das Monitoring über ein komplettes Jahr mit Lüftungsanlage laufen zu lassen, sind hinsichtlich der Auswirkung der veränderten Belüftung auf die Staubablagerung keine Aussagen möglich.



Abbildung 9:
Links: Fotografischer Vergleich der Staubsammler im saisonalen Verlauf. Rechts: Aufsicht-Mikroskop-Aufnahme einer Klebprobe.

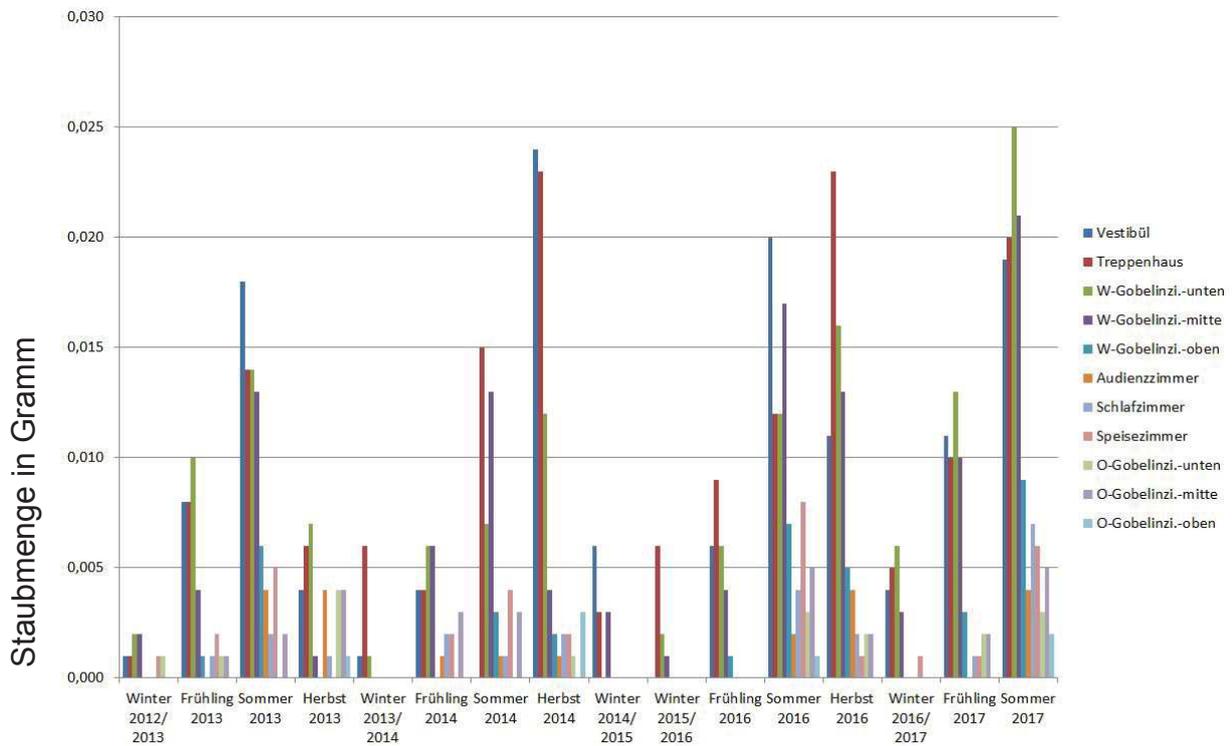


Abbildung 10:
Auswertung aller Staubsammler in allen untersuchten Räumen von Winter 2012/2013 bis Sommer 2017. Zwischen Winter 2014/2015 und Winter 2015/2015 wurde das Monitoring pausiert.

Die Ergebnisse des Staubmonitorings flossen in eine Lüftungsanleitung, die für das Personal der Schlösserverwaltung in Linderhof entwickelt wurde. Im Grundriss (Abbildung 11) ist markiert, welche Fenster mit der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage weiterhin geöffnet werden können (grün), welche nur im Notfall geöffnet werden dürfen (gelb) und welche immer geschlossen bleiben müssen (rot).

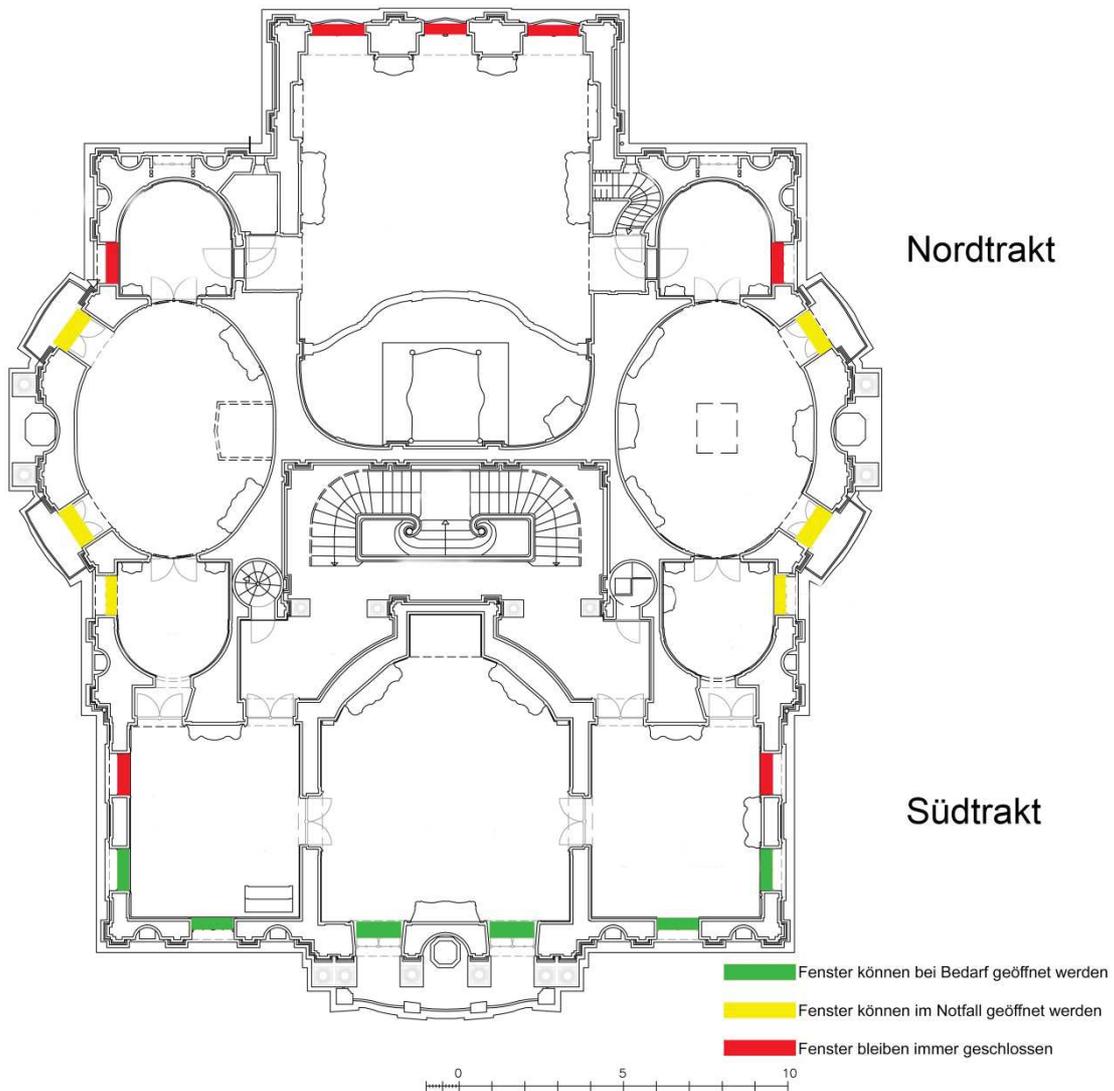


Abbildung 11:
Ausschnitt aus dem Lüftungskonzept: Die unterschiedliche Farbmarkierung zeigt, welche Fenster bei Betrieb der Lüftungsanlage zusätzlich geöffnet werden können (grün), welche im Notfall betätigt werden können (gelb) und welche immer geschlossen bleiben (rot).

3.5 Ergebnisse

3.5.1 Reaktion der Ausstattung auf kurzfristige Klimaschwankungen

Im Vorfeld der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage wurden mit dem 3D-Mikroskop und der SLR-Fotografie zu unterschiedlichen Jahreszeiten über mehrere Tage Oberflächen untersucht, die bereits Vorschädigungen, wie Lockerungen der Fassung oder Craquelébildung, aufwiesen. Wie eingangs angenommen, ist die Bewegung der Fassungsschollen abhängig von der Höhe der Feuchteschwankung. So zeigte die Ausstattung in den Sommermonaten, in denen aufgrund der höheren Besucherzahlen die täglichen Schwankungen der relativen Luftfeuchte zum Teil deutlich über 15 % pro Tag liegen, eine stärkere Bewegung der gelockerten Fassungsschollen (vgl. Abbildung 7) als im Winter, wenn das Raumklima stabiler ist. Die Untersuchungen zeigten, dass bei der betrachteten gelockerten Fassungsscholle ab einer täglichen Schwankung von 10 % rF durch Quellen und Schwinden makroskopisch sichtbare Bewegungen resultieren. Die Ergebnisse der Messungen fließen in die Erweiterung des Klimakonzeptes ein.

Inwieweit die Lüftungsanlage die kurzfristigen Klimaschwankungen speziell in den Sommermonaten vermindert, kann im Rahmen des Projektes nicht beantwortet werden. Da die Anlage erst im Frühjahr 2017 in Betrieb genommen werden konnte und aufgrund eines Defekts erneut von Mitte Juni bis Anfang Oktober stillstand, fehlt für eine belastbare Aussage die Datengrundlage.

Hinsichtlich der Beurteilung der Reaktion der historischen Ausstattung auf das geänderte Raumklima waren die Ergebnisse der 1-Shot-Messungen besonders aufschlussreich. Die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage setzt einen langfristigen Prozess des Entfeuchtens der historischen Ausstattung in Gang. Die Reaktion der Ausstattung auf die langfristige Klimaänderung war speziell über das Monitoring mit dem 1Shot-Verfahren nachvollziehbar. Davor war hinsichtlich der Reaktion intakter Oberflächen auf kurzfristige Änderungen des Raumklimas mit dieser Methode keine Veränderungen festzustellen.

Im Vergleich dazu gaben die Versuche zur Gewichtsänderung ein Indiz für die Reaktionsgeschwindigkeit des vergoldeten Holzes. Dies zeigte sich als reaktionsträge gegenüber kurzfristigen Klimaschwankungen.

3.5.2 Reaktion der Ausstattung auf saisonale Klimaschwankungen

Die untersuchten Oberflächen zeigen bei saisonalen Klimaschwankungen eine deutlich sichtbare Veränderung. Die größte Bewegung fand vor Inbetriebnahme der Lüftungsanlage zwischen Frühjahr und Sommer bzw. zwischen Sommer und Herbst statt, wie beispielhaft an der vergoldeten Holzschnitzerei im Speisezimmer gezeigt wird (Abbildung 12). Die Auswertung der anderen Positionen befindet sich im Anhang. Engere Abstände zwischen den Scans speziell im Frühjahr und Sommer grenzen das für die Bewegung relevante Klima ein.

Nach Inbetriebnahme der Lüftungsanlage erfolgten im Juni und Juli 2017 zwei Messkampagnen. Da die Anlage Mitte Juni ausfiel, konnte die Auswertung nicht auf das sich neu einstellende Klima hin bewertet werden. Gleichzeitig handelt es sich um einen Zeitraum, in dem sehr hohe Schwankungen auf die historische Ausstattung einwirkten, ähnlich einem „worst case“-Szenario. Anhand der Vergleiche in monatlicher Taktung war eine Bewegung von $\pm 0,2$ mm aufzuzeigen (Abbildung 5).

Diese ist jedoch, verglichen mit den Messungen im März und April 2015, wo sich eine Bewegung von $\pm 0,15$ mm abzeichnete (Abbildung 13), im Rahmen der bisher gemessenen Bewegungen. Für eine finale Bewertung der Auswirkung der Lüftungsanlage fehlt eine langfristige Untersuchung der Oberflächen bei stabil laufender Anlage.

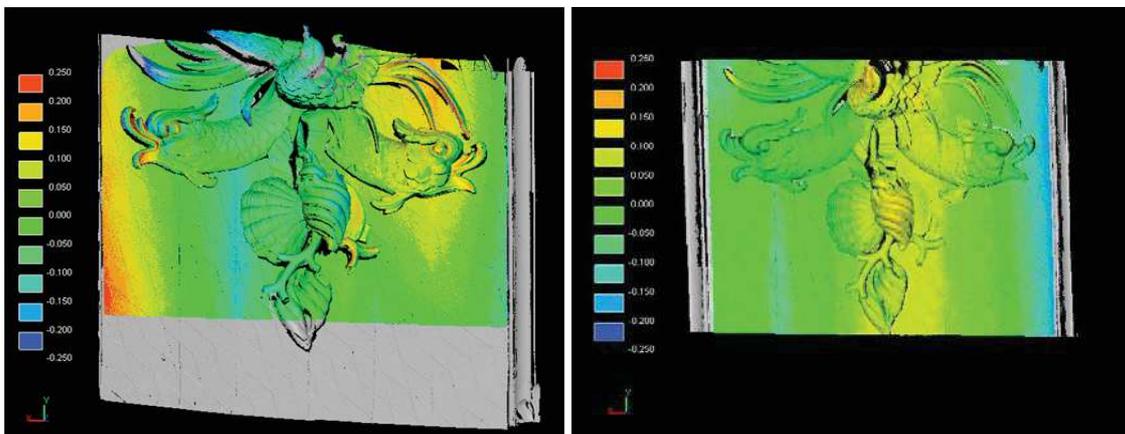


Abbildung 12:
Darstellung der saisonalen Bewegung am Beispiel der vergoldeten Holzschnitzerei im Speisezimmer, die anhand der Streifenlichtscans sichtbar wird. Der Vergleich März – Juli 2015 erzeugt eine gewisse Bewegung innerhalb der Oberflächen (links). Anhand des Vergleichs Juli – Oktober 2015 ist die Gegenbewegung ersichtlich (rechts).

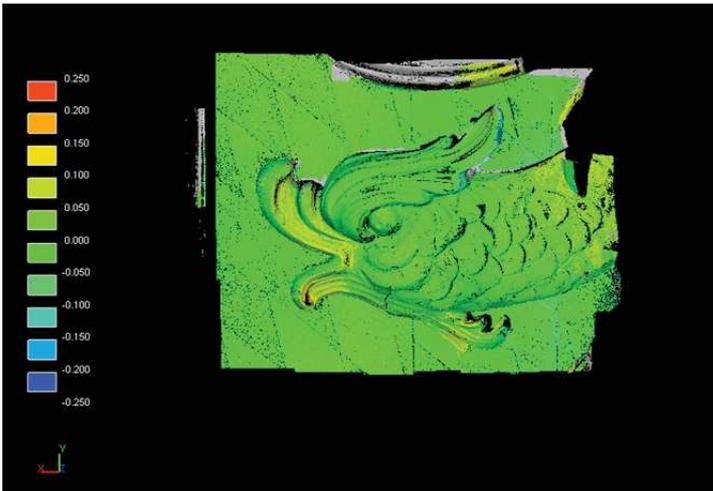


Abbildung 13:
Darstellung des Vergleichs zwischen März und April 2015. Hier ist eine Bewegung von $\pm 0,15$ mm sichtbar.

3.5.3 Raumklima

Da die Bewegungen an der Ausstattung, die im Rahmen des Projektes untersucht wurden, abhängig von den Klimaschwankungen sind, ist es für die Interpretation der erhobenen Daten unerlässlich, eine detaillierte Analyse des vorliegenden Klimas durchzuführen. Wie eingangs ausgeführt ist das Raumklima in Schloss Linderhof bisher starken täglichen Schwankungen unterworfen. Diese treten insbesondere in den Sommermonaten durch die hohen Besucherzahlen auf. Zum einen stellen die Besucher eine zusätzliche Temperatur- und Feuchtequelle dar, zum anderen sind die Schlossführer aufgrund der Schwüle, die sich in den Räumen einstellt, gezwungen, die Fenster für zusätzlichen Frischluftbedarf zu öffnen. Abbildung 14 zeigt den Temperatur- und Feuchteverlauf für das Jahr 2015, das für die exemplarische Auswertung der Streifenlichtscans (3.5.2) herangezogen wurde.

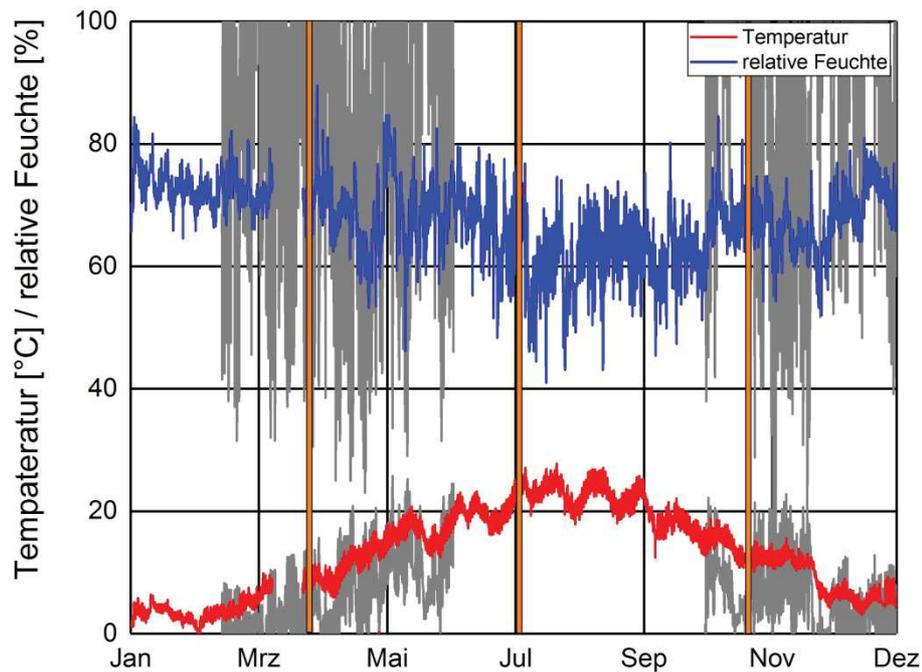


Abbildung 14:
Darstellung der Temperatur und Feuchtverläufe für das Speisezimmer im Vergleich mit dem Außenklima (graue Kurven) für das Jahr 2015. Die Zeiträume der Messkampagnen sind orange markiert.

Mit der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage wird das Raumklima sukzessive entfeuchtet. Dies wird bereits im Klimadiagramm aus dem Jahr 2017 sichtbar (Abbildung 15). Zwischen Februar (Start der Inbetriebnahme) und Anfang Juli (Ausfall der Anlage) ist das Feuchteniveau geringer als in den Vorjahren. Der bislang eingestellte Sollwert von 67 % rF wird mit der Inbetriebnahme angestrebt und erreicht. Bei der Reduzierung der kurzfristigen Klimaschwankungen herrscht noch Optimierungsbedarf. Beispielsweise lagen am Ostersonntag (16.4.2017) im Paradeschlafzimmer eine Tagesschwankung der relativen Feuchte von über 20 % vor. Dies ist zu einem großen Teil der Zeitschaltuhr geschuldet, die die Anlage speziell in den Sommermonaten zu früh herunterfahren lässt. Diese und weitere Möglichkeiten zur Optimierung der Lüftungsanlage werden in Abstimmung mit den zuständigen Behörden sukzessive weiter verfolgt. Eine detaillierte Betrachtung und Auswertung des sich einstellenden Klimas aufgrund der Lüftungsanlage ist im Bericht des Projektpartners Fraunhofer-Institut für Bauphysik zu finden.

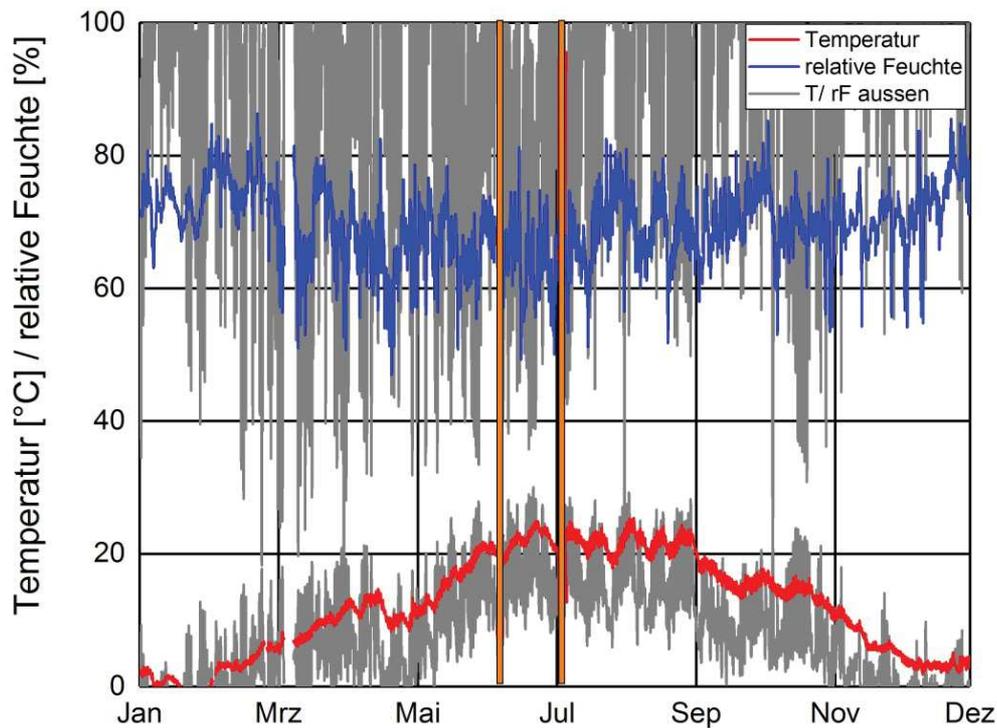


Abbildung 15:
Darstellung der Temperatur und Feuchtverläufe für das Speisezimmer im Vergleich mit dem Außenklima (graue Kurven) für das Jahr 2017. Die Zeiträume der Messkampagnen sind orange markiert.

3.5.4 Strömungsmessung

Wie eingangs beschrieben wurde neben der Dokumentation der Luftgeschwindigkeit während der Messkampagnen auch zu unterschiedlichen Zeiten im Jahr eine Messung durchgeführt. In Abbildung 16 links ist die Verteilung der Luftgeschwindigkeiten über die einzelnen Räume im Februar 2015 angezeigt. Die Luftgeschwindigkeit bei laufender Lüftungsanlage wurde im Rahmen der Messkampagne im Juni 2017 (Abbildung 16 rechts) gemessen. Wie zu erwarten war ist die Luftgeschwindigkeit direkt vor dem Auslass am Kamin erhöht, jedoch zeigt die Messung an der Westwand, dass sich eine homogene Verteilung der Luft einstellt. Bei dieser Messung handelt es sich natürlich um eine punktuelle Messung, die lediglich einen Anhaltspunkt geben kann.

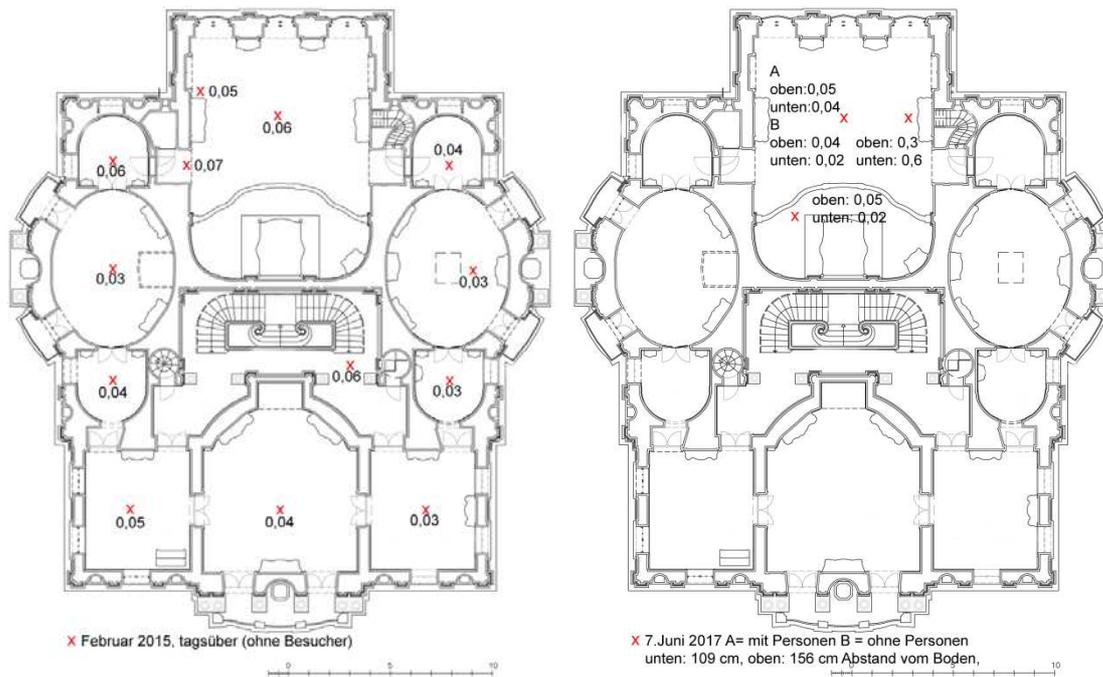


Abbildung 16:
Darstellung der Luftgeschwindigkeit in den einzelnen Räumen im Februar 2015 ohne Lüftungsanlage (links) und im Juni 2017 bei laufender Lüftungsanlage (rechts).

4. Entwicklung eines Leitfadens

Wie im Forschungsvorhaben beschrieben wurde eine grundlegende Methode zur Dokumentation quantitativer und qualitativer Veränderungen infolge klimatischer Prozesse erarbeitet.

Für die Entwicklung eines Monitoringkonzeptes ist zunächst eine Beschreibung des Objektes bzw. der Sachlage erforderlich. Nach der Analyse des Erhaltungszustands und einer ersten Einschätzung der möglichen Ursachen können die Problemstellung und konkrete Fragen formuliert werden, die ein Monitoring erfordert. Basierend darauf wird ein Monitoringkonzept erarbeitet. Die Untersuchungen und die anschließende Bewertung hängen stark von der Aussagekräftigkeit der untersuchten Oberflächen ab. Daher ist es notwendig, im Vorfeld des Monitorings geeignete Testfelder auszuwählen (vgl. 3.2). Abhängig von der Fragestellung wird ein geeignetes Monitoringverfahren ausgewählt, ggf. auch in Kombination verschiedener Verfahren. Nach der Durchführung des Monitorings vor Ort erfolgt die Auswertung, die stets das aktuelle und das Klima der Vergangenheit berücksichtigen muss. Basierend auf den Erkenntnissen aus den Auswertungen können dann je nach anfänglicher Fragestellung Empfehlungen zur künftigen Lagerung von Kulturgut und zur Gestaltung des Raumklimas ausgesprochen werden. Die Entwicklung einer Methode zur Untersuchung und Bewertung von klimatisch bedingten Bewegungen ist in einem separaten Dokument zusammengefasst (siehe Anlage).

5. Bewertung der Methoden und Zusammenfassung

Ein wesentliches Ziel des Forschungsvorhabens war die Bewertung verschiedener Methoden, hinsichtlich ihrer Eignung zur Untersuchung von klimatisch bedingten Bewegungen an Kunstwerken.

5.1 3D-Mikroskopie

Im Rahmen der Messkampagnen wurden Mikroskope unterschiedlicher Hersteller und Versionen eingesetzt. Insgesamt waren drei verschiedene Systeme im Einsatz. In der ersten Kampagne wurde ein Mikroskop der Fa. Hirox verwendet, das anhand der mitgelieferten Software eine quantifizierbare Bewegung ausgeben konnte. Hier war es jedoch nicht möglich, die Messungen exakt zu wiederholen, da der oberste und unterste Punkt der stufenweisen Aufnahmen nicht gespeichert werden konnte. Somit war ein Vergleich mehrerer 3D-Aufnahmen nicht möglich.

In den weiteren Messkampagnen kamen Mikroskope der Fa. Keyence zum Einsatz. Hier funktionierte die Erstellung von 3D- Aufnahmen nicht vor Ort, da der Motor zum stufenweisen Abfahren der zu untersuchenden Oberfläche starke Vibrationen im Objektiv auslöste und die Aufnahmen beim Zusammenfügen zu sehr verzerrte. Daher wurden für die Auswertung wie bei der zeitgesteuerten Fotografie Einzelaufnahmen miteinander verglichen. Somit wird mit dieser Methode eine Bewegung sichtbar gemacht, die jedoch schwer bewertet werden kann. Eine messbare Bewertung der Bewegung aufgrund von klimatischen Schwankungen ist nicht gegeben. Damit rechtfertigt sich der im Vergleich zur Spiegelreflexkamera wesentlich höhere Anschaffungspreis für ein 3D-Mikroskop hier nicht. Zusammenfassend stellte die Methode eingangs ein vielversprechendes Verfahren dar. Die Untersuchungen vor Ort zeigten jedoch einige Nachteile auf, so dass das 3D-Mikroskop nur sehr eingeschränkt für den Einsatz zur Untersuchung von klimatisch bedingten Bewegungen empfohlen werden kann.

5.2 SLR-Fotografie

Die Methode der zeitgesteuerten Spiegelreflexkamera hat in den Untersuchungen gut verwertbare Ergebnisse geliefert. Bei der Darstellung der zeitgesteuerten Aufnahmen gibt es jedoch noch Optimierungsbedarf. Die durch den Besucherbetrieb erzeugten Schwingungen des Holzbodens erschütterten das Kamerastativ zwar minimal. Dies reichte jedoch aus, dass die aufgenommenen Bewegungen nicht automatisiert als Film abgespielt werden konnten. So wurden einzelne Fotos, in denen aufgrund der Klimadatenauswertung Bewegungen erwartet wurden herausgegriffen und durch übereinanderlegen der Aufnahmen in Photoshop die Veränderungen der Oberfläche kenntlich gemacht. Auf diese Weise ist zwar qualitative eine Bewegung schnell ablesbar, jedoch ist diese nicht quantifizierbar. Hier wäre der Einsatz weiterer Verfahren, etwa das Digital Image Scanning zu empfehlen.

5.3 Streifenlichtprojektion

Die Streifenlichtprojektion eignet sich sehr gut für die detaillierte Untersuchung von klimatisch bedingten Bewegungen an historischen Oberflächen. Je nach Fragestellung kann der Einsatz verschiedener Objektive entweder die Genauigkeit oder die Größe des Messfeldes beeinflussen. Beide Objektive, die hier eingesetzt wurden (250 mm und 75 mm, vgl. 3.1.1), hatten für die Auswertung eine ausreichend genaue Auflösung. Speziell die Ergebnisse, die mit der 1Shot-Messung erzielt wurden, sind vielversprechend. Insbesondere bei der Änderung des bisherigen Klimas, das etwa bei der Änderung von Aufstellungs- bzw. Lagerortes von Kunstgut möglich ist, ist die Methode der Streifenlichtprojektion als Monitoringmethode sehr zu empfehlen. Was hier allerdings nicht unterschätzt werden sollte ist der zeitliche Aufwand, der zunächst für die Einarbeitung zur Bedienung des Scanners wie auch für die spätere Auswertung erforderlich ist. Sind nur wenige Scankampagnen vorgesehen, ist die Miete eines Gerätes und der zugehörigen Software dem Kauf vorzuziehen.

5.4. Wägeversuche

Die Untersuchung der Gewichtsänderung bei Klimaschwankungen stellt eine ergänzende Methode dar. Sie ist besonders aussagekräftig zur Untersuchung der Reaktionsgeschwindigkeit bei vorgeschädigten Materialkombinationen. Allerdings ist die Methode eher für eine längerfristige Detektion ausgelegt, so dass wenige Tage mit schwankendem Klima für eine Beurteilung des klimatisch bedingten Verhaltens nicht ausreichen. Zusätzlich erschwerte in Linderhof die nächtliche Stromabschaltung die Auswertung. Verglichen mit den anderen Methoden, die in Linderhof eingesetzt wurden, war die Untersuchung der Gewichtsänderung weniger aussagekräftig. Daher ist sie bei der Entwicklung einer Methode zum Monitoring von klimatisch bedingten Veränderungen an Kunstwerken eher nachrangig zu bewerten.

5.5 Staubmonitoring

Die angewandte Methode eignete sich gut, um die eingangs formulierten Fragen zu beantworten. Speziell die Korrelation zwischen Staub und Besucher, die sich über den Jahresverlauf deutlich abzeichnet, war über die saisonale Quantifizierung gut darzustellen. Um die Gründe für die über die Jahre angestiegene Staubbelastung herauszufinden, sind detailliertere Messungen notwendig. Für die Beurteilung, inwieweit sich die Staubablagerung durch die Inbetriebnahme der Lüftungsanlage verändert, ist ein Monitoring über eine Laufzeit der Lüftungsanlage von mindestens einem Jahr erforderlich. Dies war aufgrund der Verzögerung bei der Inbetriebnahme der Anlage bisher nicht möglich.

Die Bayerische Schlösserverwaltung betrat mit der Installation einer Lüftungsanlage zur Umsetzung eines innovativen Klimakonzeptes Neuland, das eine detaillierte konservatorische Begleitung erforderte. Erst die finanzielle Förderung durch das DBU-Forschungsprojekt ermöglichte es, die historische Ausstattung in Linderhof mit einem detaillierten Monitoring zu begleiten. Erst so war eine Beurteilung von Wirkungsweise und Nachhaltigkeit einer derartigen Klimabeeinflussung im Sinne der Präventiven Konservierung gegeben. Im Rahmen des Forschungsprojektes wurde ein Konzept zur Untersuchung von klimatisch bedingten Bewegungen an historischen Oberflächen erarbeitet. Sowohl die Erkenntnisse, die bei der Umsetzung der Lüftungsanlage gewonnen wurden, als auch das erarbeitete Konzept zur konservatorischen Begleitung sind exemplarisch und können eine Grundlage für künftige Entscheidungen sein und auf ähnliche Fragestellungen in anderen Liegenschaften übertragen werden.

Es ist geplant, die Lüftungsanlage hinsichtlich ihrer Funktion für ein weiteres Jahr messtechnisch zu begleiten. Eine Fortsetzung der Untersuchungen an den Oberflächen ist wünschenswert. Die Bereitstellung entsprechender finanzieller Mittel wird derzeit geprüft.

Die Auswirkung der Lüftungsanlage auf die benachbarten Räume im Erdgeschoss sollte langfristig beobachtet werden. Speziell das Badezimmer mit wertvollen historischen Oberflächen in konservatorisch bedenklichem Zustand könnte bei einer langfristigen Trocknung Schaden nehmen.

Hinsichtlich der Methodenentwicklung ist insbesondere die Frage zu stellen, ab welcher Bewegung, die sich aus den Messungen abzeichnet mit einer Schädigung an den Oberflächen zu rechnen ist. Dazu wäre es denkbar, die Messungen mit einer hygrothermischen Simulation zu kombinieren. Über die Verbindung der Temperatur- und Feuchteverteilung im Materialgefüge und der festgestellten Bewegung können Schlüsse hinsichtlich einer zu erwartenden Schädigung gezogen werden.

6. Öffentlichkeitsarbeit

Der Fortschritt des Forschungsprojektes wurde regelmäßig nationalem und internationalem Fachpublikum vorgestellt. Eine Liste der Vorträge und Veröffentlichungen unten aufgelistet.

Vorträge

- Kristina Holl, Stefan Bichlmair, Katrin Janis, Tina Naumovic, Ralf Kilian:
„Konservierungswissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof“
32. WTA-Kolloquium Bauinstandsetzen und Bauphysik in Hildesheim am 10. / 11. März 2016
- Kristina Holl, Stefan Bichlmair: Klima in Bayerischen Schlössern - die Lüftungsanlage in Schloss Linderhof: Klimawirkung der Besucher, Simulation, Planung, Ausführung und Monitoring einer Maßnahme der Präventiven Konservierung
Fachtreffen Präventive Konservierung, Schloss Charlottenburg, 23. Mai 2016
- Max Rahrig, Kristina Holl, Katrin Janis: Monitoring of microclimate changes on wooden panels in Linderhof Palace
Conference Wood Science and Technology II: Microclimates for Panel Paintings
October 20th – 21st 2016
- Kristina Holl: Konservierungswissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof
Fachexkursion Schloss Linderhof für Bamberger Studenten am 27. Juni 2017
- Kristina Holl, Katrin Janis: „Monitoring of microclimate changes on the historic furnishing in Linderhof Palace“ Preventive Conservation in Historic houses and Palace-Museums: Assessment, Methodologies and Applications“, November 29th – December 1st 2017, Versailles
- Holl, Kristina, Rahrig, Max, Janis, Katrin: „Monitoring von klimatisch bedingten Bewegungen mit Hilfe des Structured-Light-Scannings am Beispiel der historischen Ausstattung von Schloss Linderhof“. 3D – Durchblick oder Datenmüll? 1. – 3. März 2018, Hochschule für bildende Künste Dresden

Veröffentlichungen

- Holl, Kristina, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin, Naumović, Tina, Kilian, Ralf: Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen Lüftungsanlage in Schloss Linderhof, in: Bausubstanz 4 / 2015, S. 40 – 47
- Holl, Kristina, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin, Naumović, Tina, Kilian, Ralf: Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen Lüftungsanlage in Schloss Linderhof, in: 32. Internationales WTA-Kolloquium Bauinstandsetzen + Bauphysik, 10. – 11. März 2016
- Holl, Kristina, Rahrig, Max, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin: „Monitoring of changes of wooden panels due to changes in the microclimate at Linderhof Palace“ eingereicht im Journal of Cultural Heritage

Außerdem ist ein weiterer Artikel mit den Projektergebnissen in der Fachzeitschrift *Bauphysik* geplant, um die Projektergebnisse in deutscher Sprache zu veröffentlichen.

7. Literatur

- | | |
|------------------------|---|
| Ashley-Smith 1999 | Ashley-Smith, Jonathan: Risk Assessment for object conservation, Oxford 1999 |
| Bellendorf 2007 | Bellendorf, Paul: Metallene Grabplatten aus Franken und Thüringen aus dem 15. bis 18. Jahrhundert - eine interdisziplinäre Studie zum Denkmalbestand und seiner Gefährdung durch Umwelteinflüsse, Dissertation Universität Bamberg 2007 |
| Bichlmair et al. 2011 | Bichlmair, Stefan, Kilian, Ralf, Krus, Martin: Klimastabilität historischer Gebäude – Schloss Linderhof, IBP-Bericht RK 013_3/2011/294, Holzkirchen 2011 |
| Bichlmair 2011 | Bichlmair, Stefan: Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof, Masterthesis Hochschule Rosenheim 2011 (unveröffentlicht) |
| Bichlmair et al. 2013a | Bichlmair, Stefan, Kilian, Ralf, Krus, Martin: Concept of a New Airing Strategy and Simulation of the Expected Indoor Climate in Linderhof Palace, in: Clima 2013, Prag 16.-19.6.2013, pp. 2879 – 2889 |
| Bichlmair et al. 2013b | Bichlmair, Stefan, Kilian, Ralf: Planungsvorgaben für die Pilotlüftungsanlage Schloss Linderhof, interner Bericht 29. October 2013, Fraunhofer-Institut für Bauphysik |
| Bratasz 2010 | Bratasz, Lukasz: Acceptable and non-acceptable microclimate variability: The case of wood, in: Basic Environmental Mechanisms affecting Cultural Heritage, 2010, S. 49-58 |

- Burmester 1994 Burmester, Andreas; Wei, Will: All good paintings crack: Nondestructive analysis of transport damage of paintings using digital image processing. in: Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. (Hg.). 4th International Conference Non-Destructive Testing of Works of Art. Berlin, 3.-8.10.1994 Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung e.V. Berlin, S. 114–126.
- Burmester 2000 Burmester, Andreas: Die Beteiligung des Nutzers bei Museumsneubau und- sanierung oder welche Klimawerte sind die richtigen? in: Raumklima in Museen und historischen Gebäuden, Bietigheim-Bissingen 2000, 9 – 24
- Eibl 2009 Eibl, Melanie: Die Reinigung musealer Räume als Maßnahme der Präventiven Konservierung, Diplomarbeit München 2008, Publiziert in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, Jg. 23, Heft 1 + 2, 2009
- Eipper et al. 2004 Eipper, Paul-Bernhard, Frankowski, Gottfried, Opielka, Horst, Wenzel, Julia: Ölfarben-Oberflächenreinigung. Die Reinigung der Ölfarbenoberflächen und ihre Überprüfung durch das Raster-Elektronen-Mikroskop, das Niederdruck-Raster-Elektronen-Mikroskop, die Laser-Profilometrie und die 3D-Messung im Streifenprojektionsverfahren, München 2004
- CEN / TC 2010 European Standard CEN/TC 346 EN 15757: Conservation of Cultural Property – Specifications for temperature and relative humidity to limit climate-induced mechanical damage in organic hygroscopic materials, European Committee for Standardization, Brussels 2010
- DIN EN 15757 DIN EN 15757, 2010-12: Erhaltung des kulturellen Erbes - Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien
- Dulieu-Barton et al. 2015 Dulieu-Barton, Janice M., Dokos, Leonidas, Eastop, Dinah, Lennard, Frances, Chambers, Alan R., Sahin, Melin: Deformation and strain measurement techniques for the inspection of damage in works of art in: Reviews in Conservation 6 (2015) pp. 63 – 73
- Erhardt et al. 1994 Erhardt, David, Mecklenburg, Marion: Relative humidity re-examined, in: Preventive Conservation Practice, Theory and Research. Preprints of the Contributions to the Ottawa Congress, 12 – 16 September 1994, London 1994, pp. 32 – 38
- Erhardt et al. 2007 Erhardt, David, Tumosa, Charles, Mecklenburg, Marion: Applying Science to the Question of Museum Climate, in: Contributions to the Copenhagen Conference 19 – 23 November 2007 Museum Microclimates, Copenhagen 2007, pp. 11 – 17
- Grabon et al. 2015 Grabon, Michel, Anderson, Jackie, Brushnell, Peter, Calvo, Aritz, Chadwick, William: The Sistine Chapel. New HVAC System for Cultural Preservation, in: ASHRAE Journal 6 / 2015, pp. 20 – 34
- Gowing 2003 Gowing, Robert: Investigating the use of a CCD camera system for monitoring insolation of painted architectural surfaces. In: Conserving the Painted Past, London 2003 pp. 85 – 94

- Häfner 2004 Häfner, Klaus: Indoor climate and tourism effects, in: European research on Cultural Heritage, Band 2, Prag 2004, S. 375
- Haller 2015 Haller, Bernd: Die Kunst des Unsichtbaren. Die HLK-Technik in der Sixtinischen Kapelle. In: tab Das Fachmedium der TGA-Branche 12 / 2015, S. 34 – 38
- Hein 2007 Hein, Niclas: 3D-Weißlicht-Streifenprojektionsscanner zur Untersuchung von Transportschäden an Skulpturen, Diplomarbeit Universität Stuttgart 2007
- Hein et al. 2010 Hein, Niclas, Krekel, Christoph: 3D-Weißlicht-Streifenprojektionsscanner zur Untersuchung von Transportschäden an Skulpturen in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft 24/1 2010, S. 146 – 159
- Hein 2015 Hein, Niclas: Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren, Dissertation Stuttgart 2015
- Holl / Raffler 2012 Holl Kristina, Raffler, Susanne: Konservatorische Untersuchung der historischen Ausstattung in Schloss Linderhof , 1.November 2011 bis 30. April 2012, Abschlussbericht, April 2012 (interner Bericht BSV)
- Holl 2013 Holl, Kristina: Comparison of indoor climate analysis according to current climate guidelines with a conservational investigation using the example of Linderhof Palace in: Climate for Collections. Klima und Kulturgut – Wissen und Unwissen, München 9. - 11. November 2012, London 2013, pp. 289 – 300
- Holl et al. 2105 Holl, Kristina, Bichlmair, Stefan, Janis, Katrin, Naumovic, Tina, Kilian, Ralf: Konservierungswissenschaftliche Begleitung der Inbetriebnahme einer innovativen Lüftungsanlage in Schloss Linderhof, in: Bausubstanz 4 / 2015, S. 40 – 47
- Holl 2016 Holl, Kristina: Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchungen des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation, Dissertation München 2016
- Holmberg 1997 Holmberg, Jan G.: Technical Classification of Museum Buildings ICOM-ICAMT 1989, in: EURO CARE Eureka Project EU 140, EU 1378 PREVENT, Preventive Conservation, Report No.7 from Swedish Partners, 1997
- Holmberg 2001 Holmberg, Jan G.: Environment Control in historical buildings. In: Royal Institute of technology building services engineering (Hg.): Bulletin No. 53. Stockholm 2001
- Kalisch 2007 Kalisch, Uwe: Die Verbesserung der raumklimatischen Aufbewahrungsbedingungen im Domschatz Halberstadt. In: Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt (Hrsg.): Jahrbuch 2006/07 Stiftung Dome und Schlösser in Sachsen-Anhalt. Stiftung Kloster Michaelstein Musikinstitut für Aufführungspraxis Landesmusikakademie, S. 53 – 57

- Kalisch 2011 Kalisch, Uwe: Monitoring fragiler Oberflächen in Abhängigkeit von Raumklimaschwankungen, in: Einfache, zerstörungsfreie Prüfverfahren, Potsdam 2011, S. 18 - 19
- Kilian et al. 2011 Kilian, Ralf, Vyhlídal, Tomáš, Broström, Tor (Hrsg.): Developments in climate control of historic buildings. Proceedings from the international conference "Climatization of historic buildings, state of the art", Linderhof Palace December 2nd 2010, Stuttgart 2011
- Kilian et al. 2012 Kilian, Ralf, Holl, Kristina, Bichlmair Stefan, Naumović, Tina: Klimastabilität historischer Gebäude. Einflussfaktoren und Rückschlüsse für die Präventive Konservierung am Beispiel von Schloss Linderhof, in: Restauro 8/2012, S. 34 - 38
- Kilian 2013 Klimastabilität historischer Gebäude. Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung, Dissertation Universität Stuttgart 2013
- Lennard et al. 2015 Lennard, Frances, Dulieu-Barton, Janice M: Quantifying and visualizing change: Strain monitoring of tapestries with digital image correlation in: Studies in Conservation 59, London 2015, pp.241 – 255
- Mecklenburg 2011 Mecklenburg, Marion: Determining the acceptable ranges of relative humidity and temperature in museums and galleries, part 2, structural response to temperature lecture script, 2011, <http://www.si.edu/mci/downloads/reports/mecklenburg-part1-rh.pdf>, Stand 30.6.2016

Abbildungsverzeichnis

| | |
|--|----|
| Abbildung 1: Links: 3D-Messung mittels Streifenprojektionsverfahren im Speisezimmer von Schloss Linderhof. Rechts: Streifenlichtprojektion während des Scanprozesses. | 9 |
| Abbildung 2: 3D-Mikroskopie im Bad von Schloss Linderhof. | 10 |
| Abbildung 3: Links: Nahfeldklimamessung am Beispiel der Westwand im Paradeschlafzimmer. Rechts: Messbaum für Strömungsmessung und die lokale Erfassung des Raumklimas. | 11 |
| Abbildung 4: Wägeversuche im Paradeschlafzimmer mit einem vergoldeten Holzornament. ... | 11 |
| Abbildung 5: Links: Vergleich zweier Scans mit farbig codierter Darstellung der Abweichung am Beispiel der Position im Speisezimmer (Juni – Juli 2017). Grün gefärbte Bereiche zeigen keine Veränderung, gelbe bis rote Bereiche eine Bewegung nach vorne, Blautöne eine Bewegung nach hinten auf. Hier tritt eine Bewegung von $\pm 0,2$ mm auf. Rechts: Grafische Darstellung des Mikroklimas an der Versuchsfläche im Zeitraum von Juni – Juli 2017 mit Markierung der Zeiträume der Messkampagnen (orange). | 16 |
| Abbildung 6: Links: 1-Shot Messung Speisezimmer am 7. Juni 2017 nachts. Innerhalb einer Nacht ist eine Bewegung von $\pm 0,6$ mm festzustellen. Rechts: Graphische Darstellung der relativen Feuchte im Speisezimmer während der gesamten Messkampagne vom 6. – 9. Juni 2017. Die roten Kreuze markieren die 1-Shot Messungen. | 17 |
| Abbildung 7: Links: Darstellung der klimatisch bedingten Bewegung durch das Übereinanderlegen einzelner Fotos und Markierung der Umrisse der gelockerten Fassungs-scholle. Rechts: Graphische Darstellung der relativen Feuchte im Östlichen Gobelzimmer während der Aufnahmen vom 21. – 22. Juni 2014. Die grünen Kreuze markieren die einzelnen Aufnahmen, die zum Vergleich herangezogen wurden. | 18 |
| Abbildung 8: Gewichtsänderung eines vergoldeten Holzornamentstücks (unten) in Abhängigkeit der klimatischen Schwankungen im Paradeschlafzimmer (oben). | 19 |
| Abbildung 9: Links: Fotografischer Vergleich der Staubsammler im saisonalen Verlauf. Rechts: Aufsicht-Mikroskop-Aufnahme einer Klebprobe. | 20 |
| Abbildung 10: Auswertung aller Staubsammler in allen untersuchten Räumen von Winter 2012/2013 bis Sommer 2017. Zwischen Winter 2014/2015 und Winter 2015/2015 wurde das Monitoring pausiert. | 20 |
| Abbildung 11: Ausschnitt aus dem Lüftungskonzept: Die unterschiedliche Farbmarkierung zeigt, welche Fenster bei Betrieb der Lüftungsanlage zusätzlich geöffnet werden können (grün), welche im Notfall betätigt werden können (gelb) und welche immer geschlossen bleiben (rot). | 21 |
| Abbildung 12: Darstellung der saisonalen Bewegung am Beispiel der vergoldeten Holzschnitzerei im Speisezimmer, die anhand der Streifenlichtscans sichtbar wird. Der Vergleich März – Juli 2015 erzeugt eine gewisse Bewegung innerhalb der Oberflächen (links). Anhand des Vergleichs Juli – Oktober 2015 ist die Gegenbewegung ersichtlich (rechts). | 23 |
| Abbildung 13: Darstellung des Vergleichs zwischen März und April 2015. Hier ist eine Bewegung von $\pm 0,15$ mm sichtbar. | 24 |
| Abbildung 14: Darstellung der Temperatur und Feuchtverläufe für das Speisezimmer im Vergleich mit dem Außenklima (graue Kurven) für das Jahr 2015. Die Zeiträume der Messkampagnen sind orange markiert. | 25 |
| Abbildung 15: Darstellung der Temperatur und Feuchtverläufe für das Speisezimmer im Vergleich mit dem Außenklima (graue Kurven) für das Jahr 2017. Die Zeiträume der Messkampagnen sind orange markiert. | 26 |
| Abbildung 16: Darstellung der Luftgeschwindigkeit in den einzelnen Räumen im Februar 2015 ohne Lüftungsanlage (links) und im Juni 2017 bei laufender Lüftungsanlage (rechts). | 27 |

Tabellenverzeichnis

| | |
|---|----|
| Tabelle 1: Auflistung der Testflächen unterteilt in Material, Position im Schloss, vorgefundener Oberflächenveränderung sowie die angewandte Untersuchungsmethode. | 13 |
| Tabelle 2: Darstellung des Einsatzes der verschiedenen Methoden, um die Reaktion der Ausstattung in unterschiedlichen Zeiträumen zu untersuchen. | 13 |
| Tabelle 3: Zusammenstellung der im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Messkampagnen. | 14 |

Anhang

Dokumentation der Testflächen

 Streifenlichtscans

 3D-Mikroskopie und SLR-Fotografie

 Staubmonitoring

Screenshots Auswertung Streifenlichtscans

Bericht Fraunhofer

Leitfaden

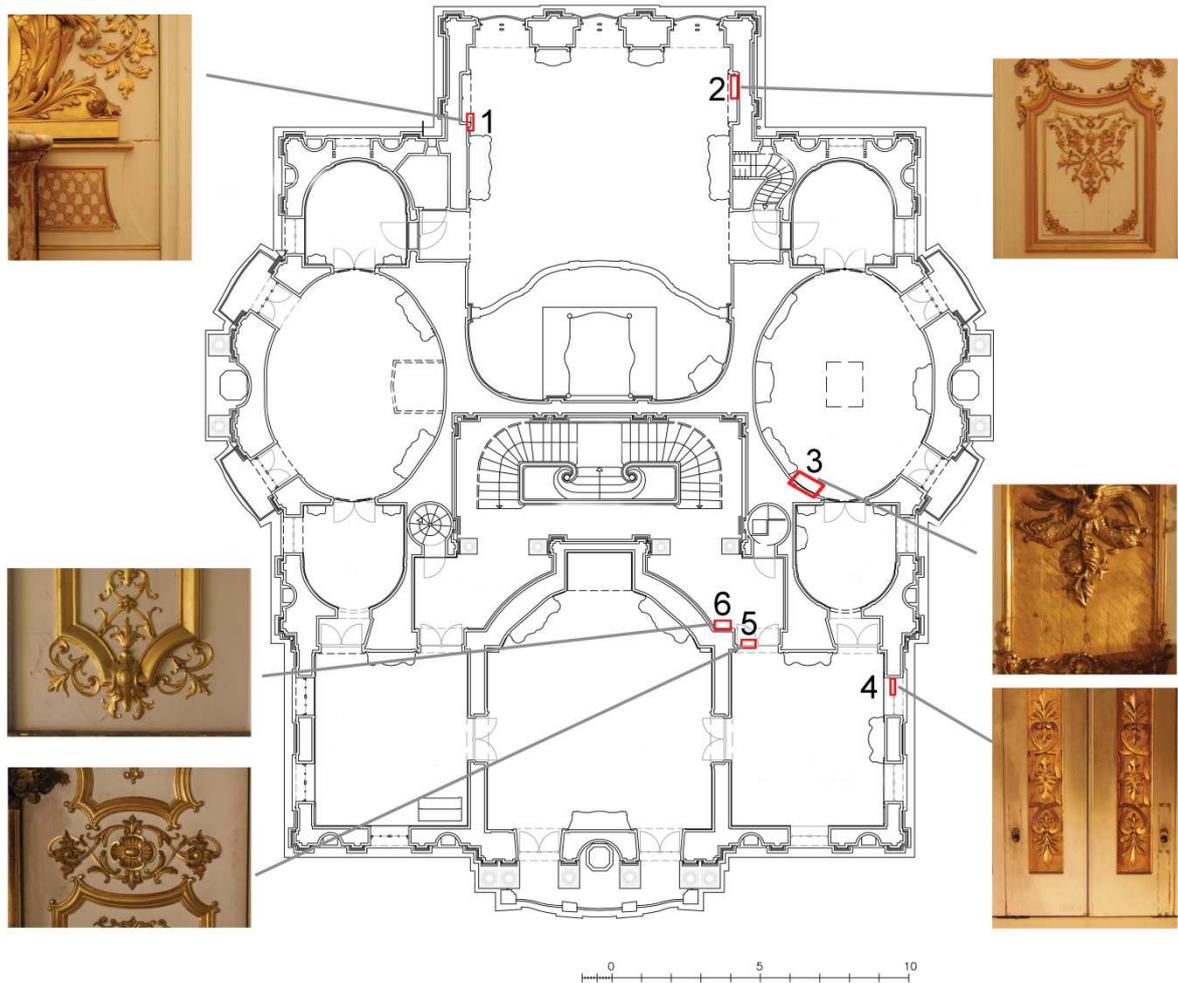


Abbildung I:

Dokumentation der Position der Testflächen für das Streifenprojektionsverfahren.

Position 1: Paradeschlafzimmer Westwand, gefasste und vergoldete Holzoberfläche mit Riss

Position 2: Paradeschlafzimmer Ostwand, farbig gefasstes Holzpaneel mit vergoldeten Ornamenten, Fugenöffnungen

Position 3: Speisezimmer, vergoldete Wandvertäfelung, Fugenöffnungen; Übersicht

Position 4: Östliches Gobelinzimmer, Fensterladen nordwestliches Fenster

Position 5: Treppenhaus Ost, farbig gefasstes Türsegment mit vergoldeten Ornamenten

Position 6: Treppenhaus Ost, in den 90er Jahren angefertigte Putzoberfläche, starke Craquelébildung

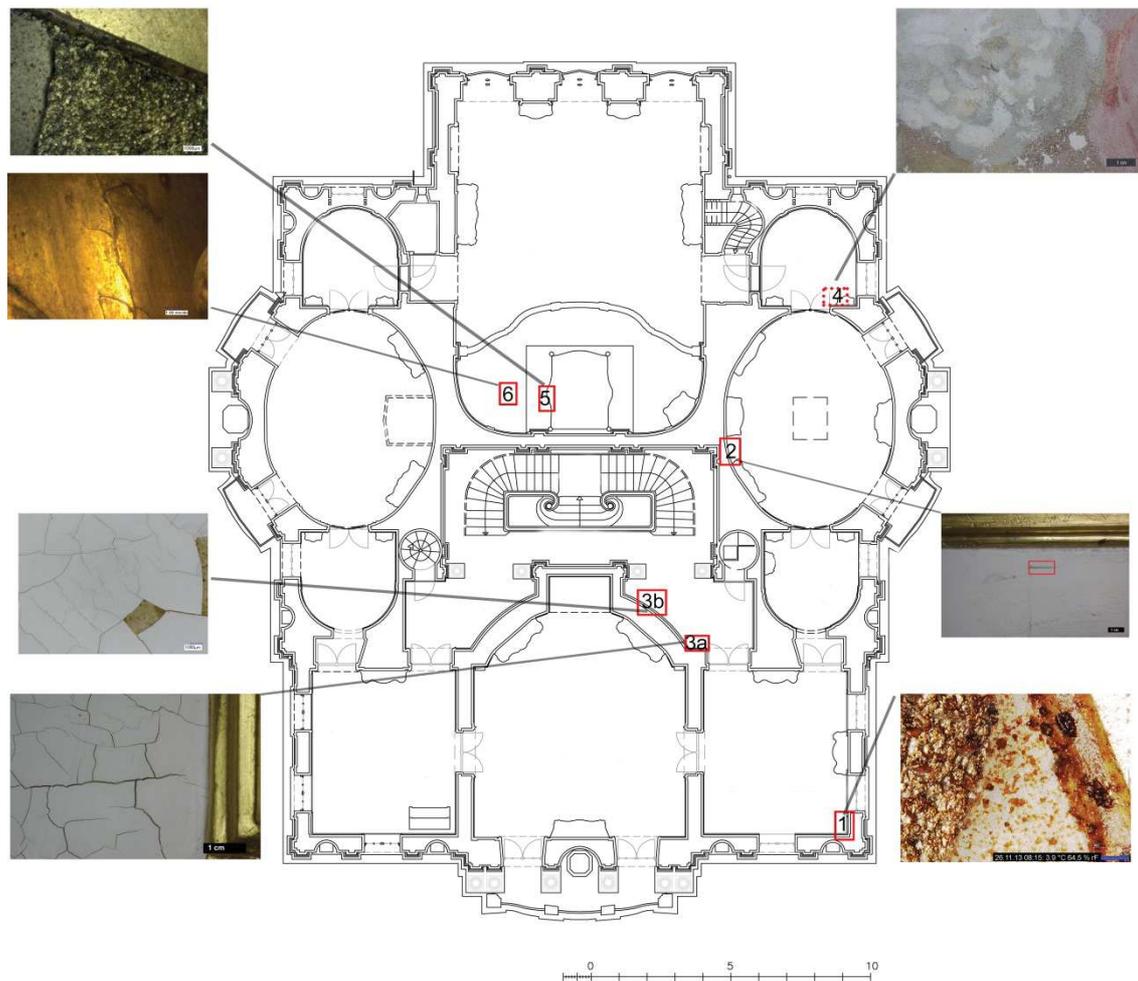


Abbildung II:
 Dokumentation der Position der Testflächen für die Untersuchungen mit dem 3D-Mikroskop und der SLR-Fotografie.

- Position 1: Östliches Gobelinzimmer, Nordwestwand, Höhe 1,95 m, 4 cm links von vergoldetem Rahmen (3D-Mikroskop / SLR-Kamera)*
- Position 2: Speisezimmer, Westwand, unteres Kassettensegment Höhe 78,5 cm, 21cm rechts vom Kamin (3D-Mikroskop)*
- Position 3a: Treppenhaus, Südwestwand, Höhe: 1,79 m, 35 cm links vom Türstock (3D-Mikroskop)*
- Position 3b: Treppenhaus, Südwestwand, Höhe: 1,68 m (3D-Mikroskop)*
- Position 4: Bad, Südwand, Höhe: 1,79m, 35 cm links vom Türstock (3D-Mikroskop)*
- Position 5: Paradeschlafzimmer, Paradebett, untere Kante, Ausbruch in der Vergoldung (SLR-Kamera)*
- Position 6: Paradeschlafzimmer, vergoldeter Kerzenleuchter, 1,20 m Untersuchung einer Lockerung der Vergoldung (3D-Mikroskop).*

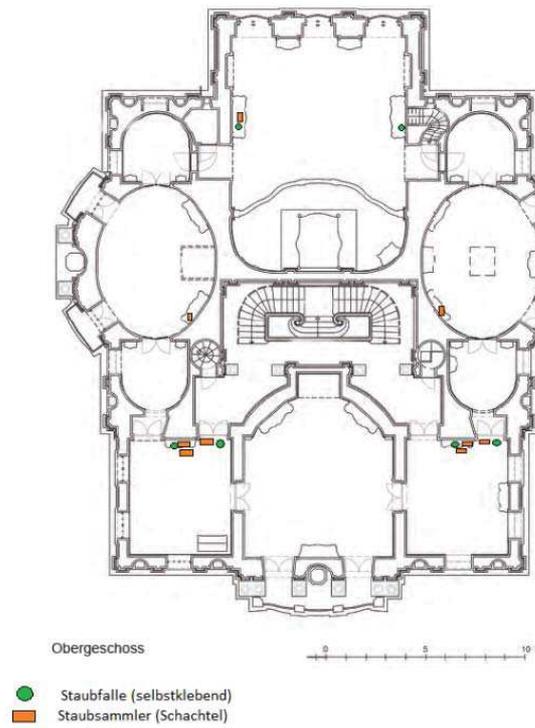
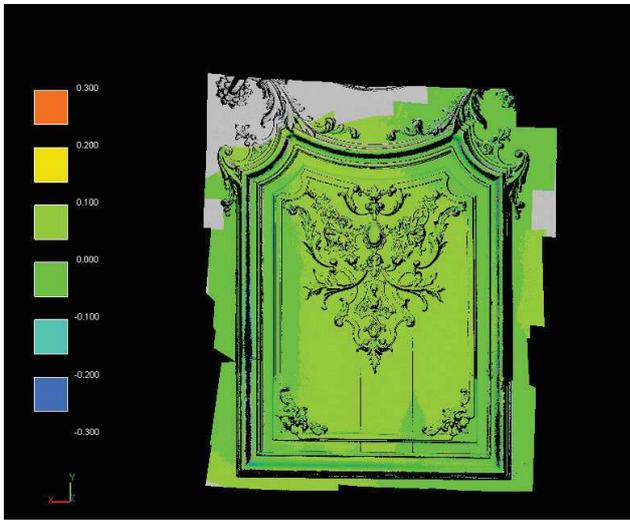


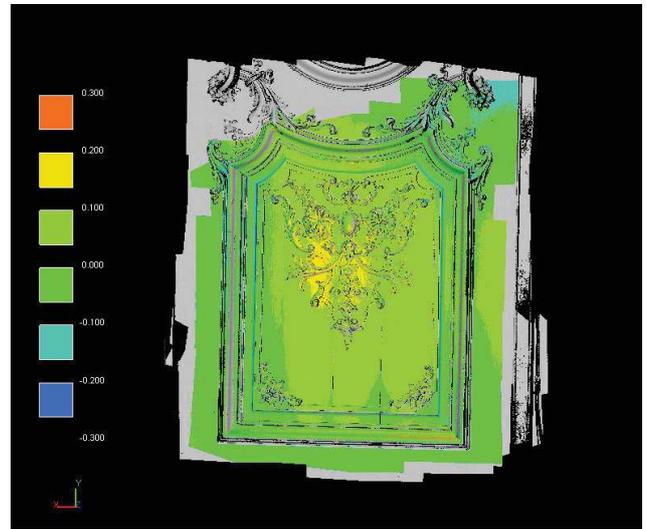
Abbildung III:
 Standorte der Staubfallen und -sammler für das Monitoring im Obergeschoss von Schloss Linderhof.

Screenshots Streifenlichtscans

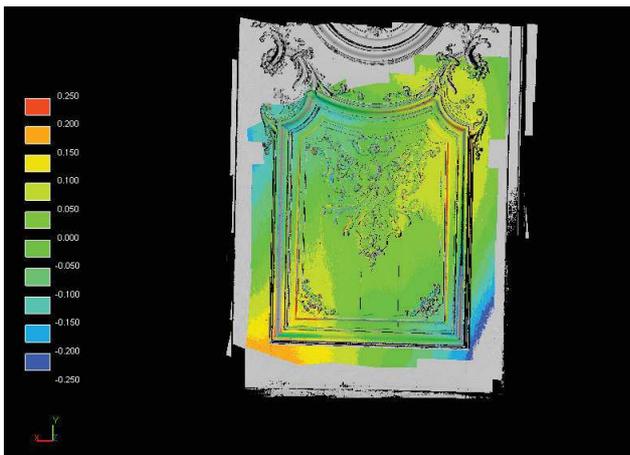
Paradeschlafzimmer Ost



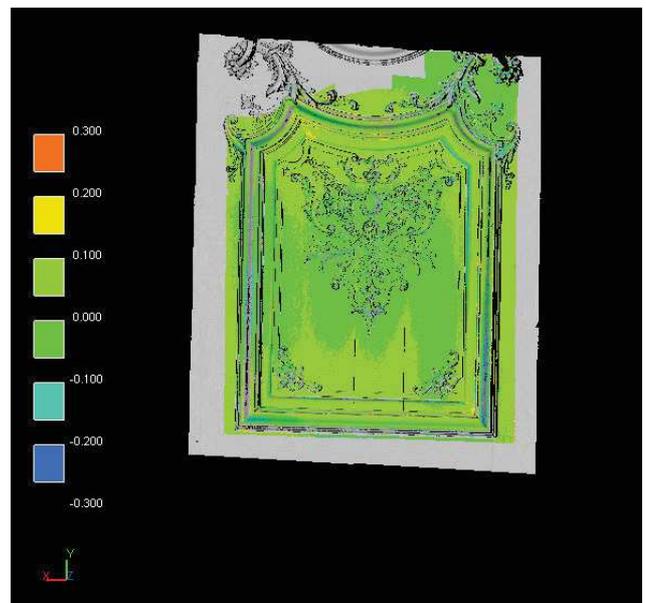
2013_03_2013_12_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



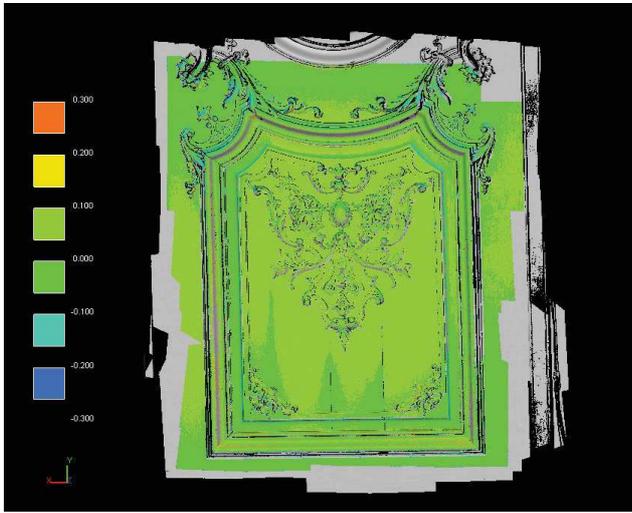
2013_03_2014_07_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



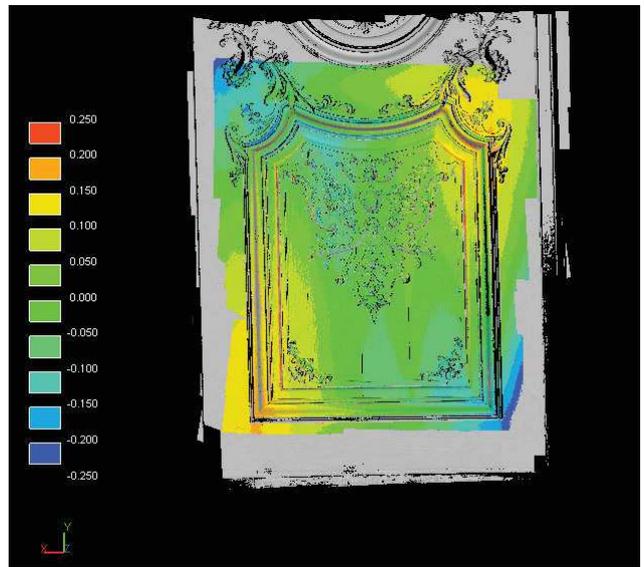
2013_03_2015_03_Parade_ost_250_sk_0-25.PNG



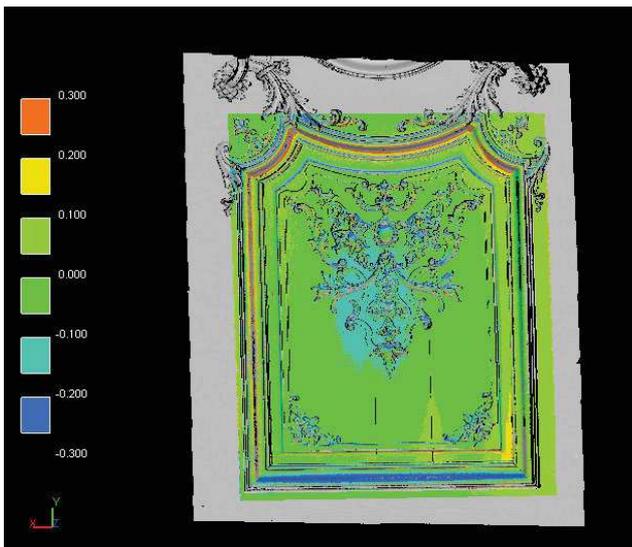
2013_03_2015_07_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



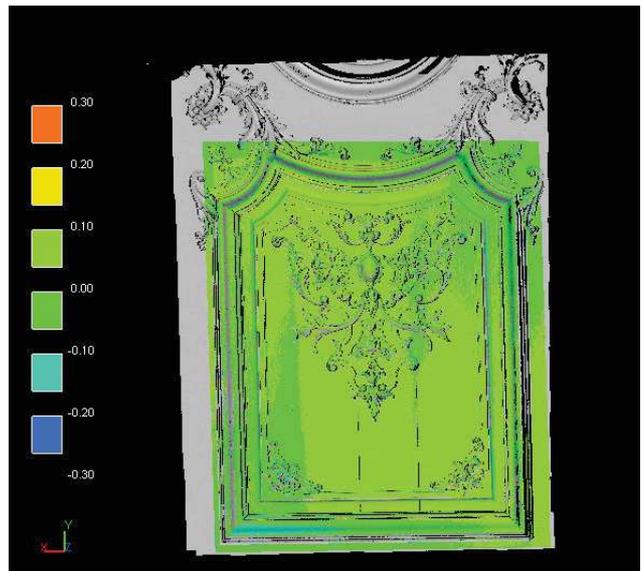
2013_12_2014_07_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



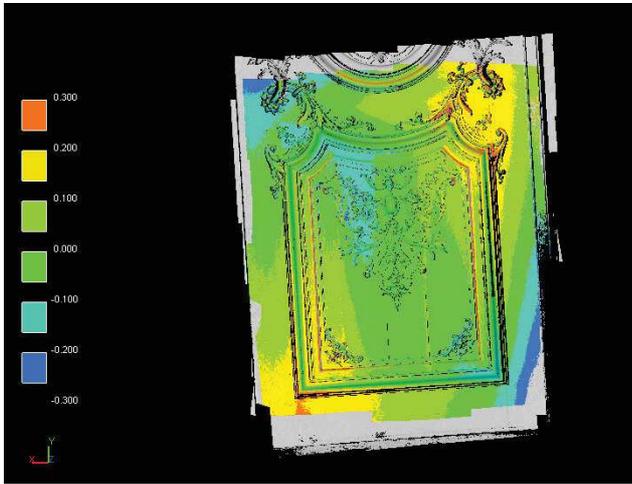
2013_12_2015_03_Parade_ost_250_sk_0-25.PNG



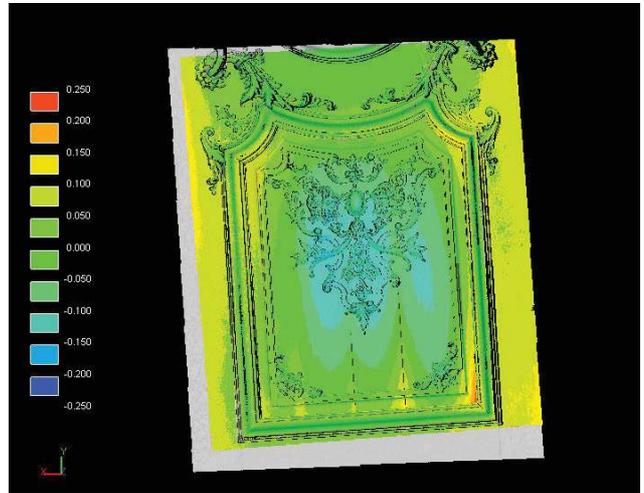
2013_12_2015_07_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



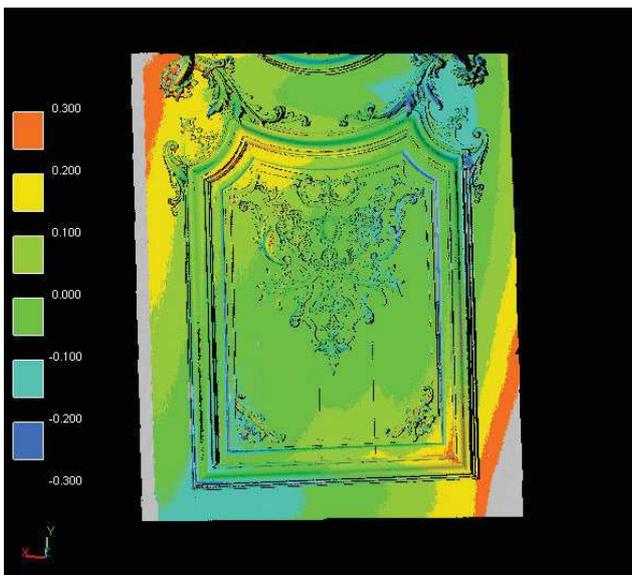
2013_12_2015_10_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



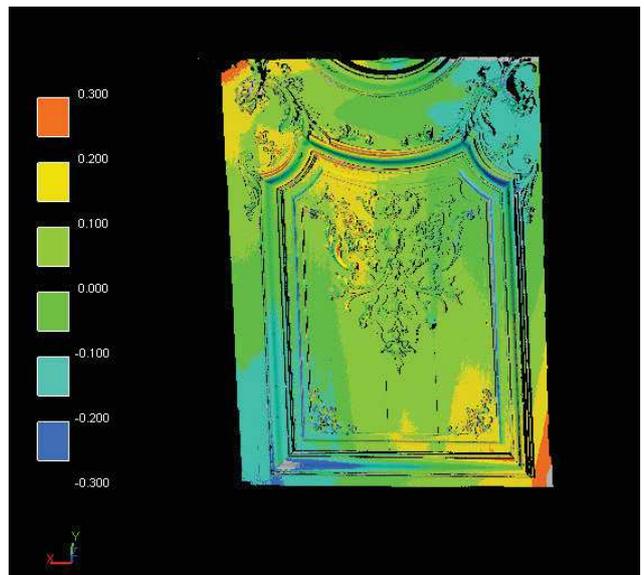
2014_07_2015_03_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



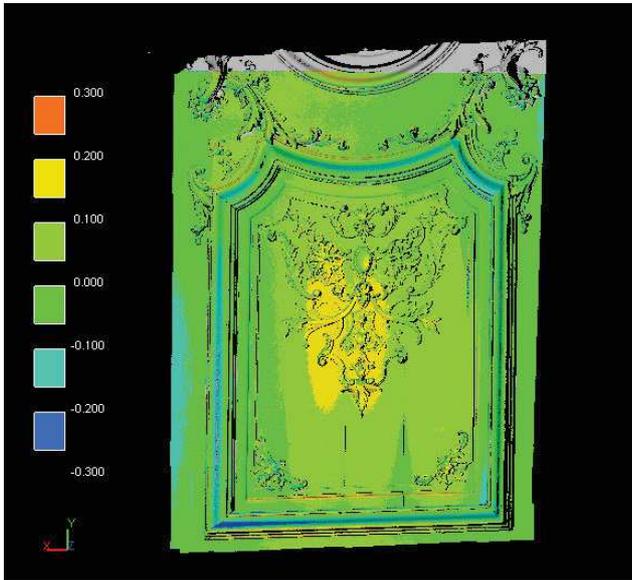
2014_07_2015_07_Parade_ost_250_sk_0-25.PNG



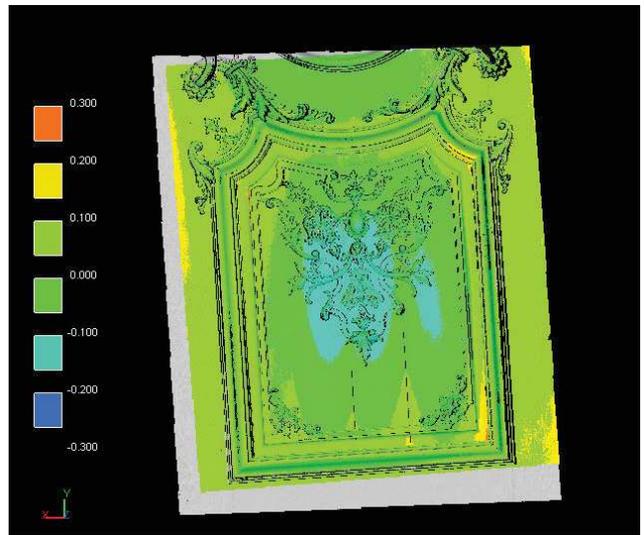
2015_03_2015_07_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



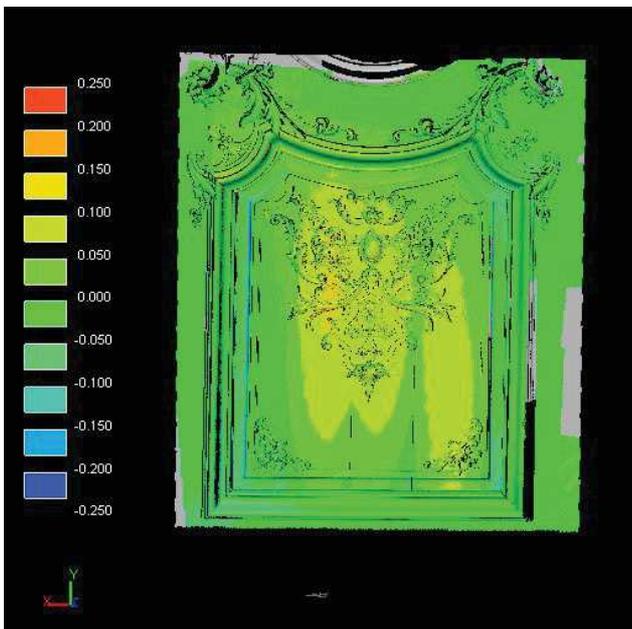
2015_03_2015_10_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



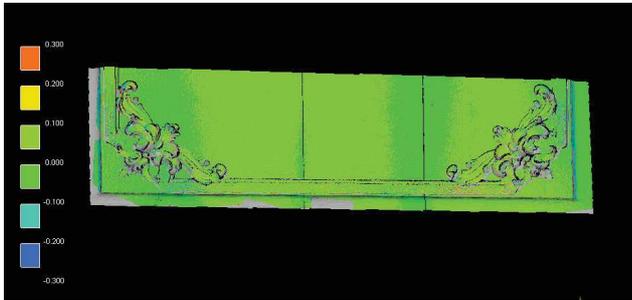
2015_07_2015_10_Parade_ost_250_sk_0-3.PNG



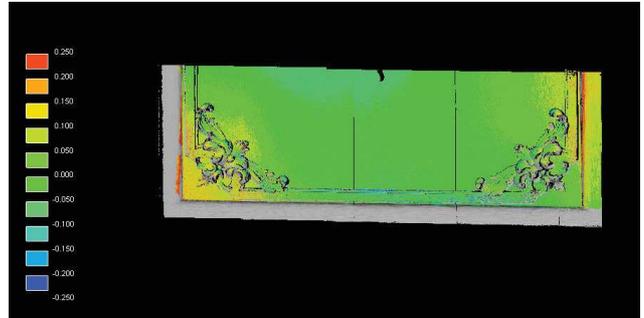
2014_07_2015_07_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



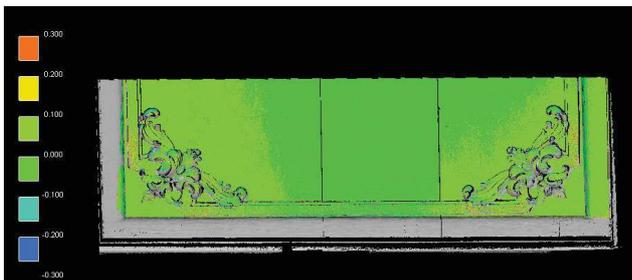
2017_06-07_Parade_250_sk0-25.JPG



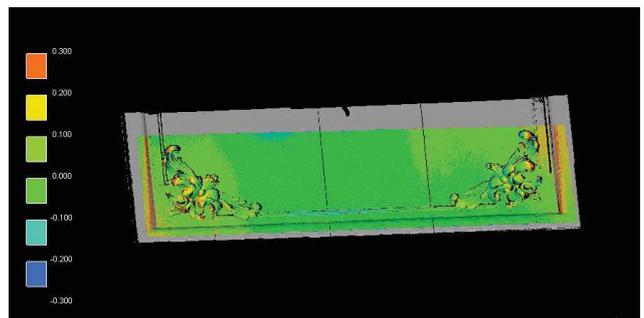
2013_03_2014_07_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



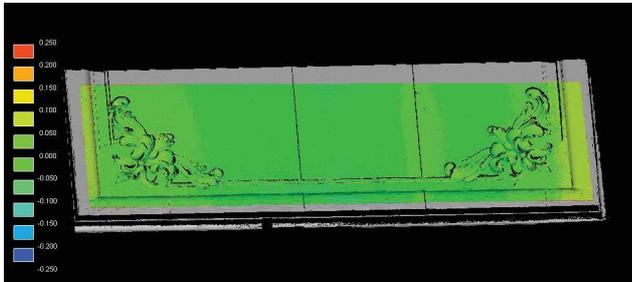
2013_03_2015_03_Parade_ost_75_sk_0-25.PNG



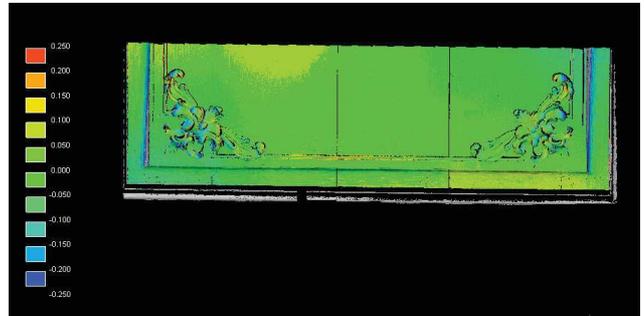
2013_03_2015_07_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



2014_07_2015_03_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



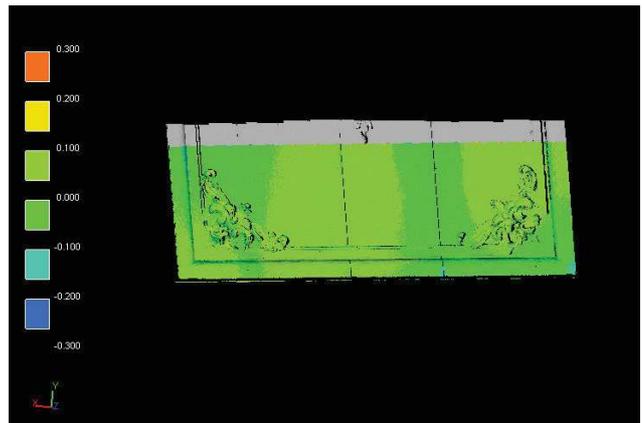
2014_07_2015_07_Parade_ost_75_sk_0-25.PNG



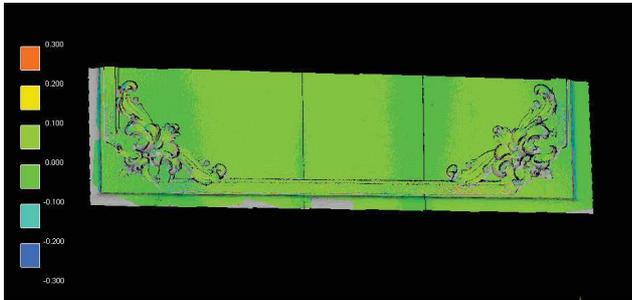
2015_03_2015_07_Parade_ost_75_sk_0-25.PNG



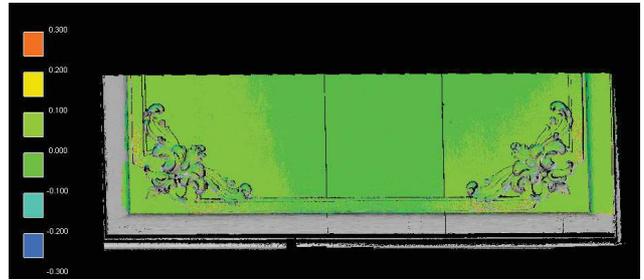
2015_03_2015_10_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



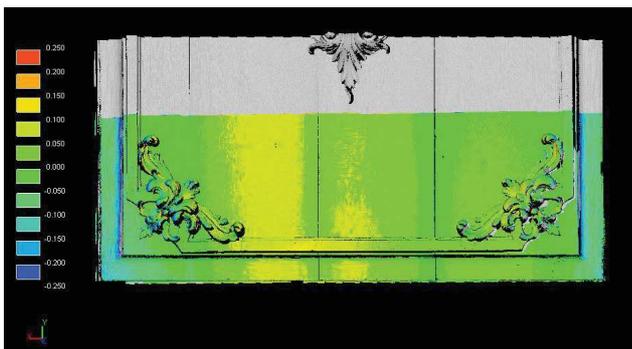
2015_07_2015_10_Parade_ost_75_sk_0-3.PNG



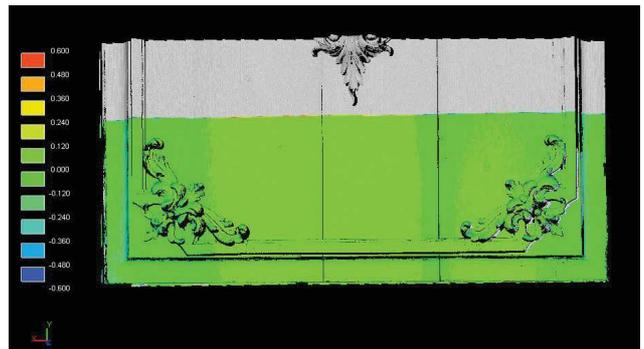
2013_03_2014_07_Parade_ost_75_0-3_NEU.PNG



2013_03_2015_07_Parade_ost_75_0-3_NEU.PNG

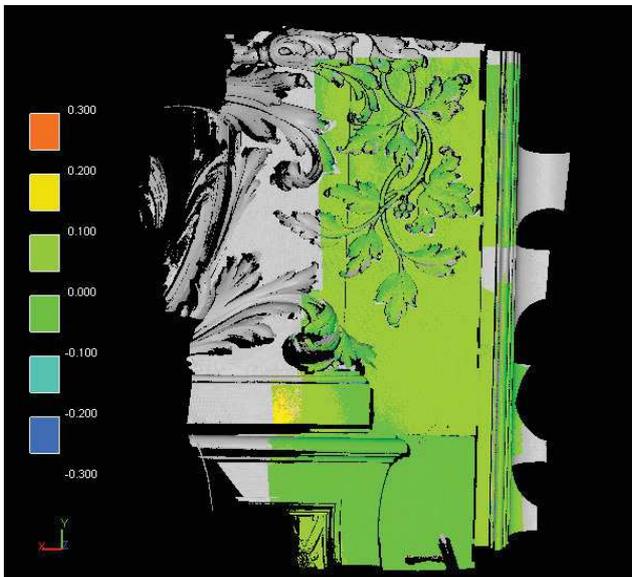


2017_06-07_Parade_ost_75_sk_0-25.JPG

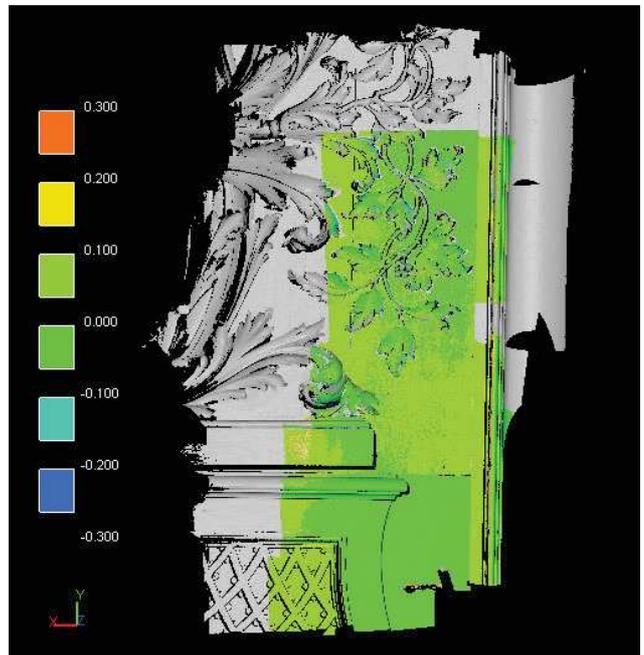


2017_06-07_Parade_ost_75.JPG

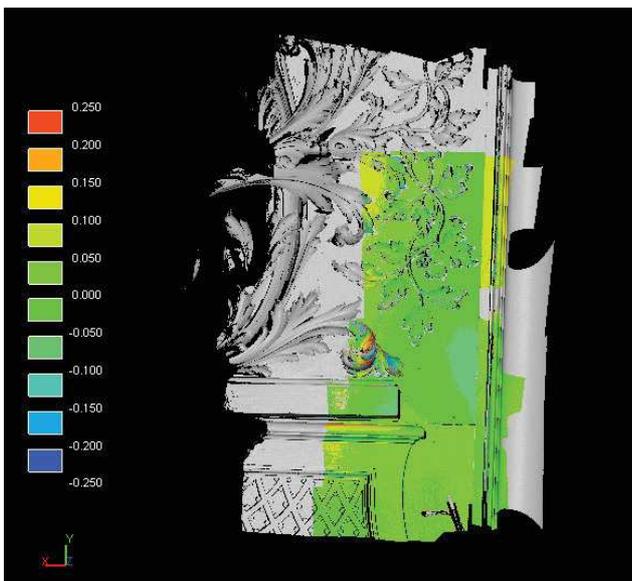
Paradeschlafzimmer West



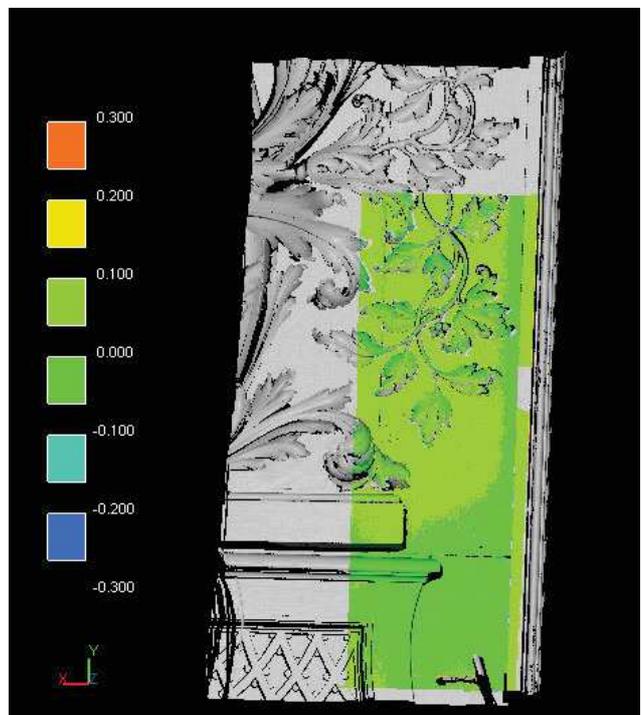
2013_03_2013_12_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



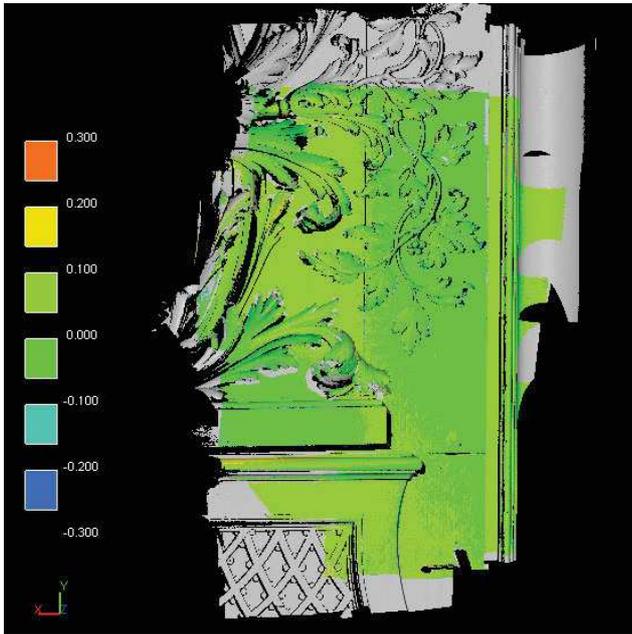
2013_03_2014_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



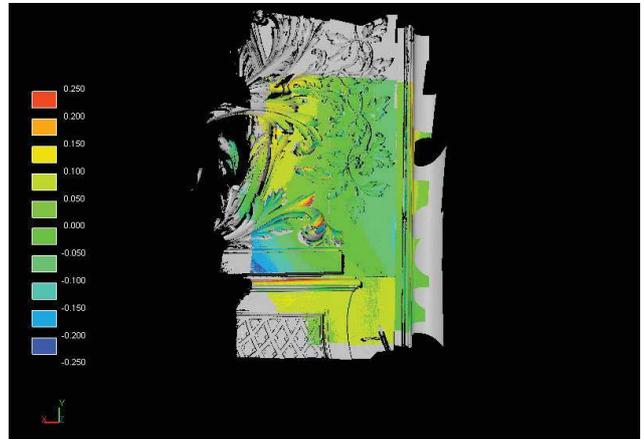
2013_03_2015_03_Parade_west_250_sk_0-25.PNG



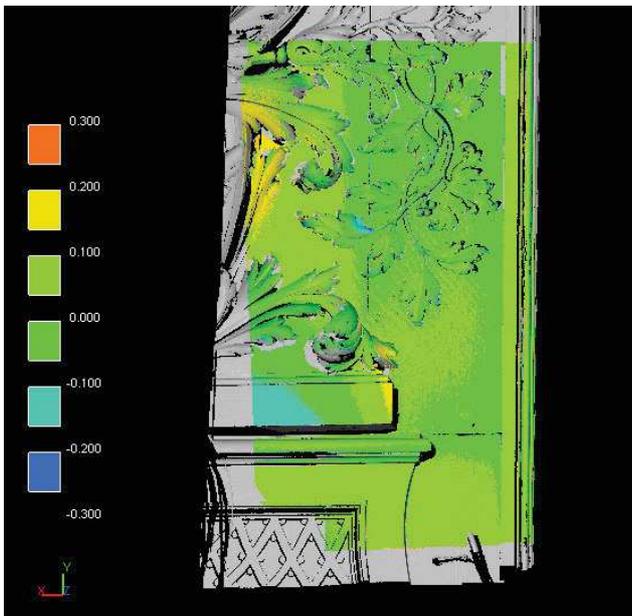
2013_03_2015_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



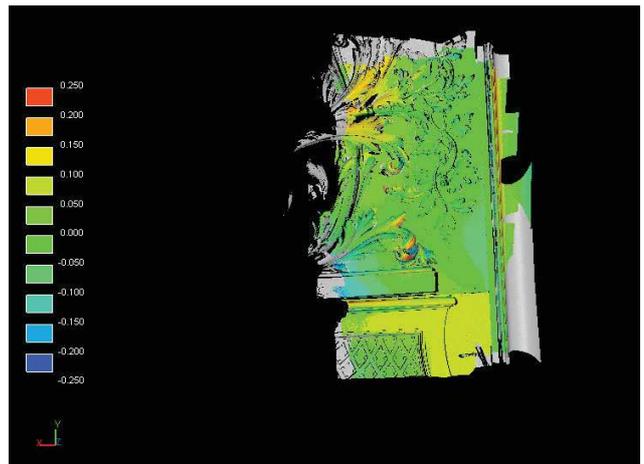
2013_12_2014_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



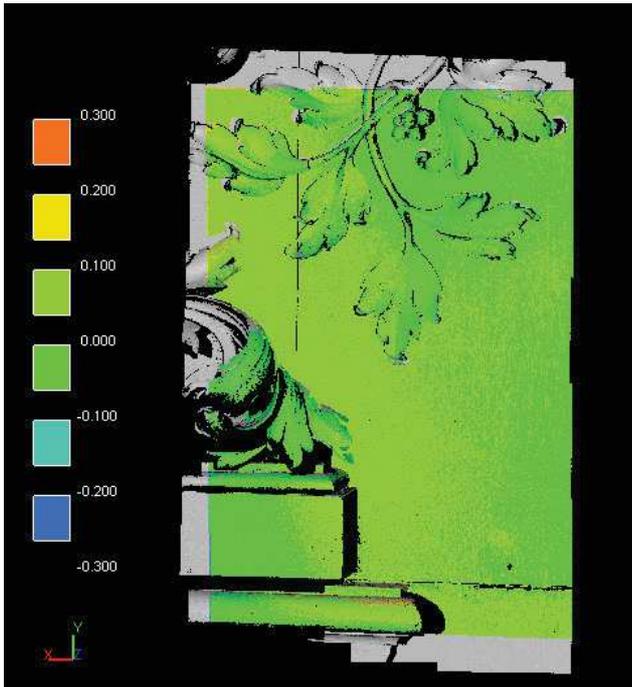
2013_12_2015_03_Parade_west_250_sk_0-25.PNG



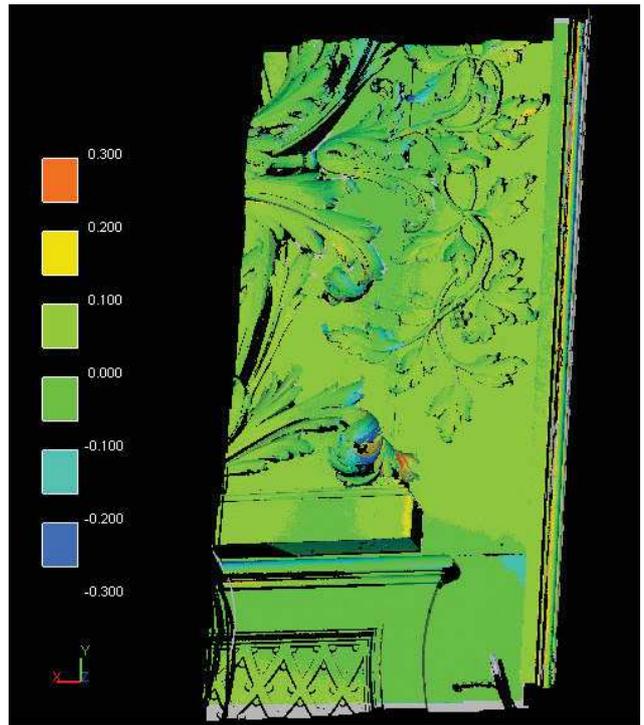
2013_12_2015_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



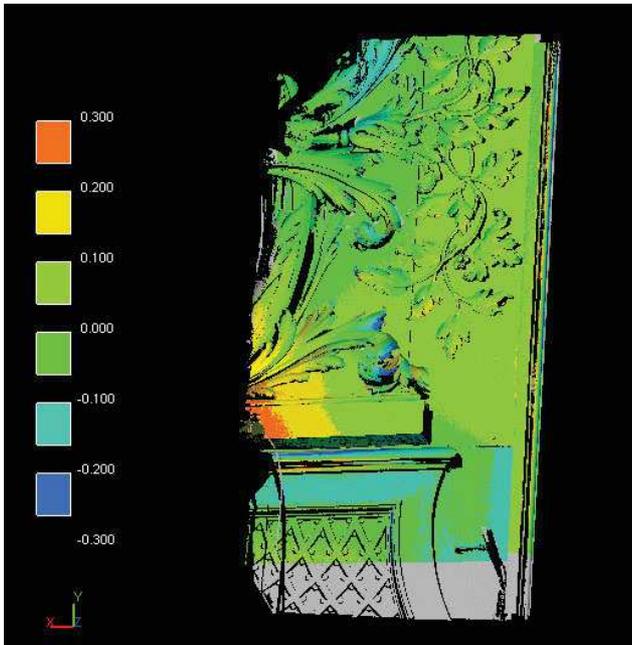
2014_07_2015_03_Parade_west_250_sk_0-25.PNG



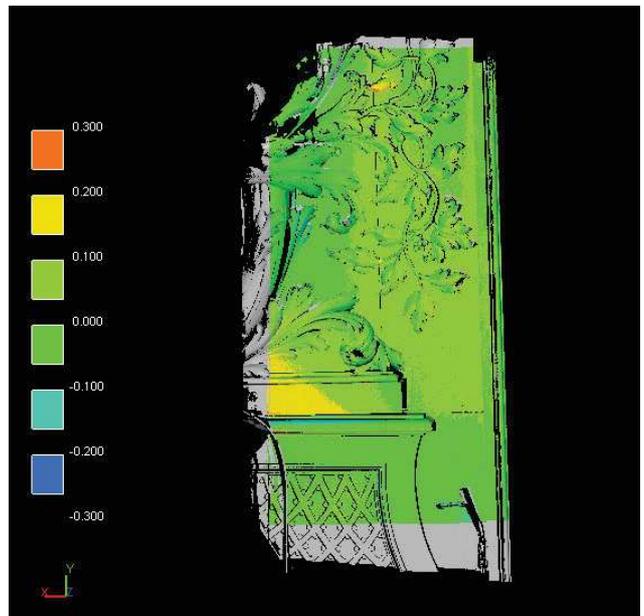
2014_07_2015_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



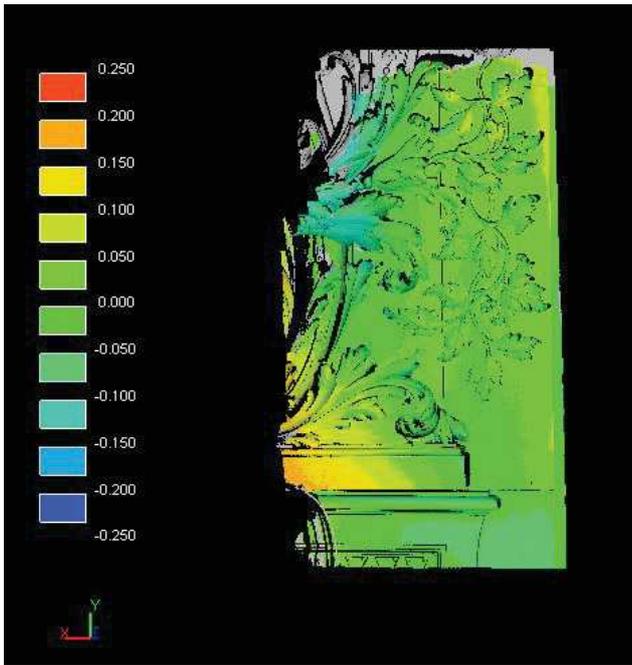
2015_03_2015_07_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



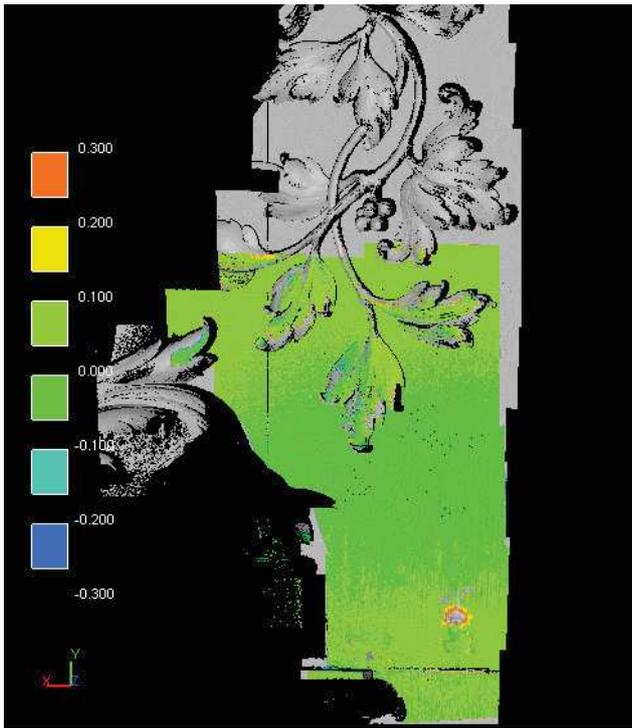
2015_03_2015_10_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



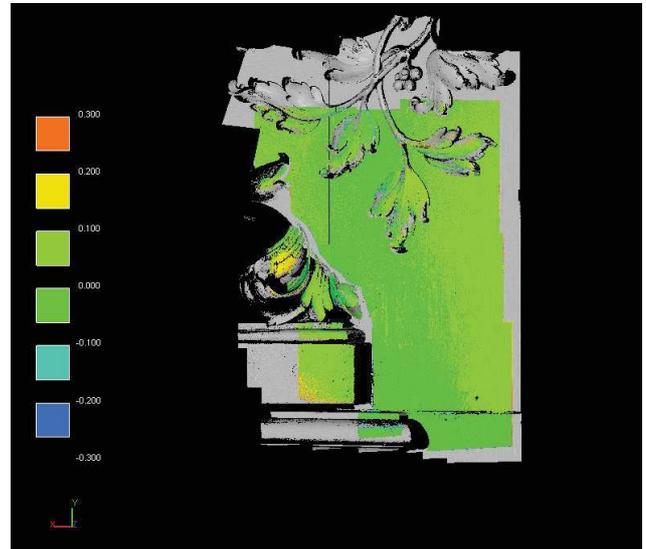
2015_07_2015_10_Parade_west_250_sk_0-3.PNG



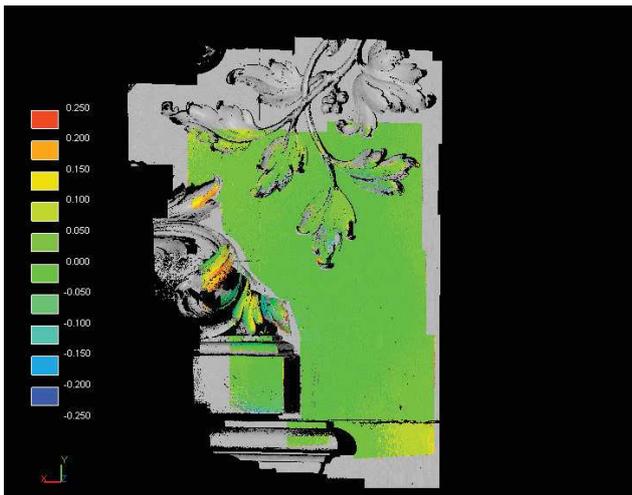
2017_06-07_Parade_West_50_sk0-25.JPG



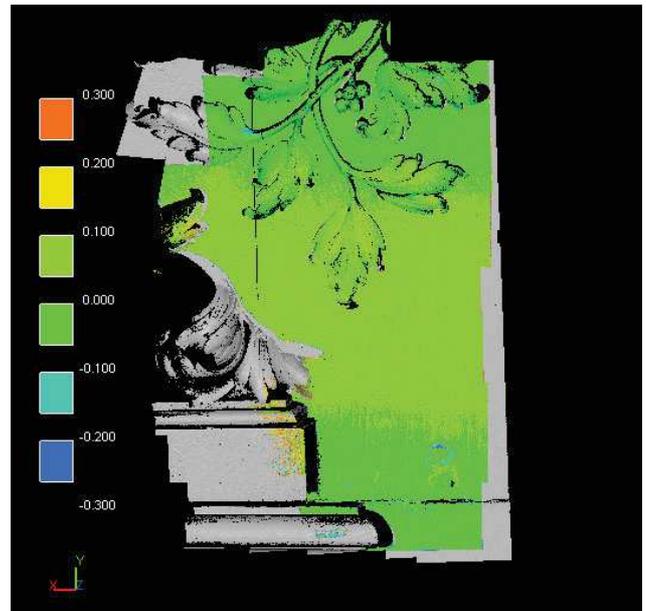
2013_03_2013_12_Parade_west_75_sk_0-3.PNG



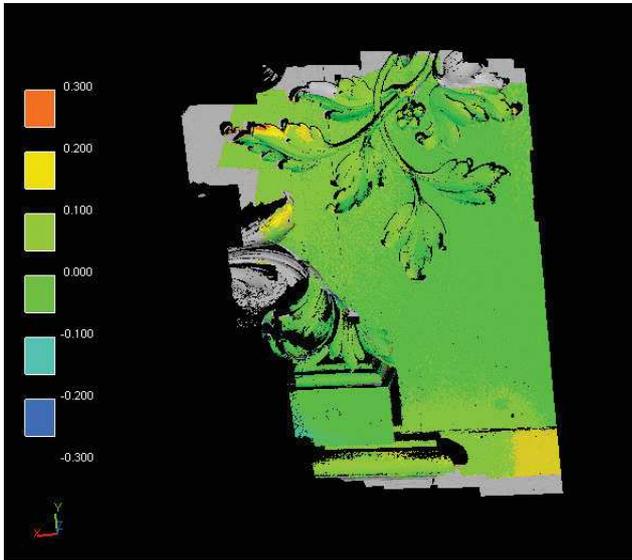
2013_03_2014_07_Parade_west_75_sk_0-3.PNG



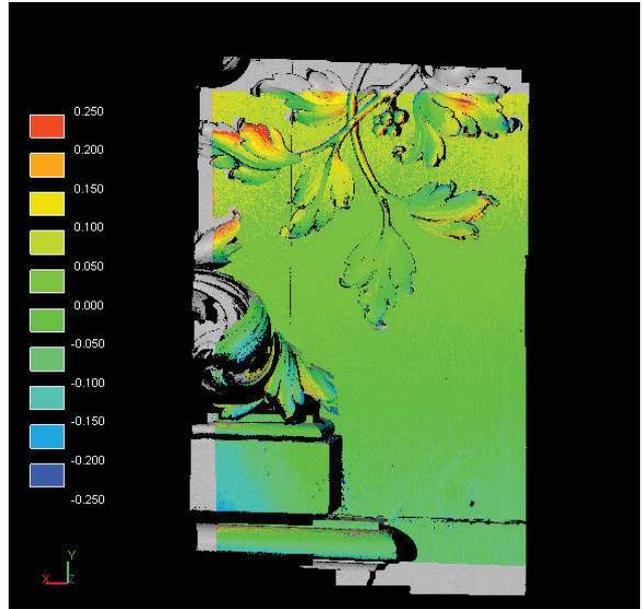
2013_03_2015_03_Parade_west_75_sk_0-25.PNG



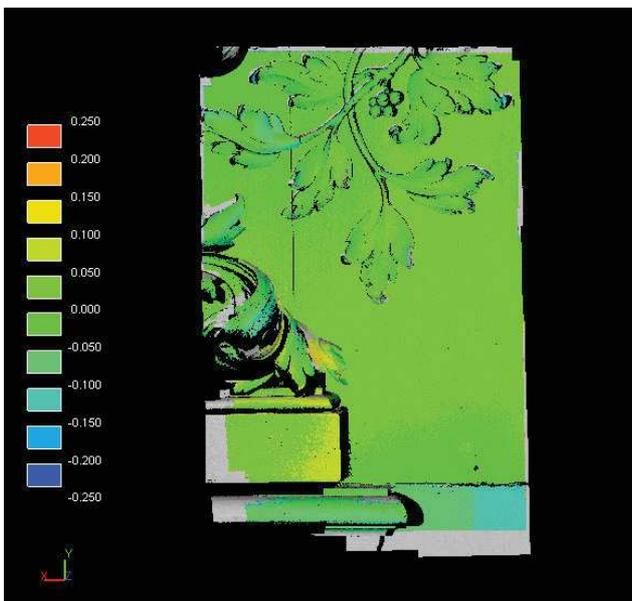
2013_12_2014_07_Parade_west_75_sk_0-3.PNG



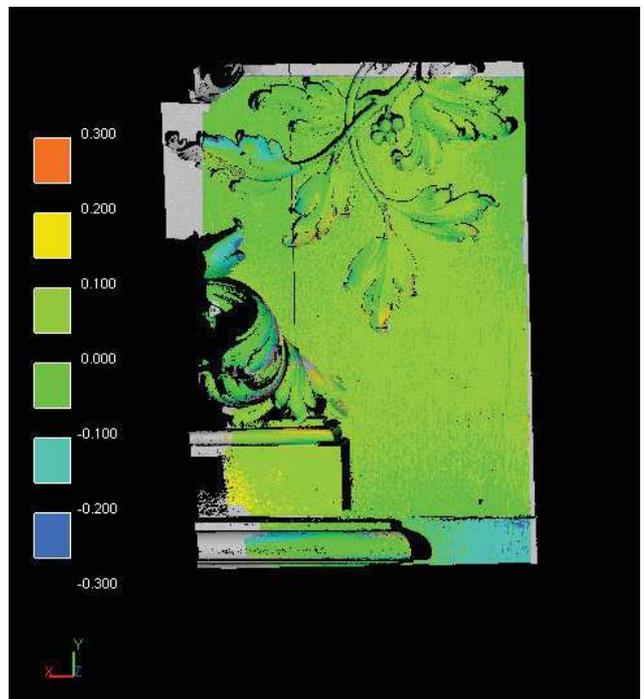
2014_07_2015_03_Parade_west_75_sk_0-3.PNG



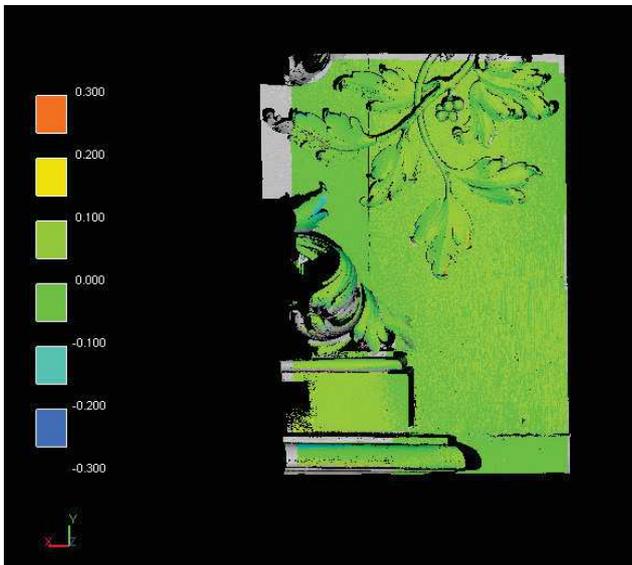
2014_07_2015_07_Parade_west_75_sk_0-25.PNG



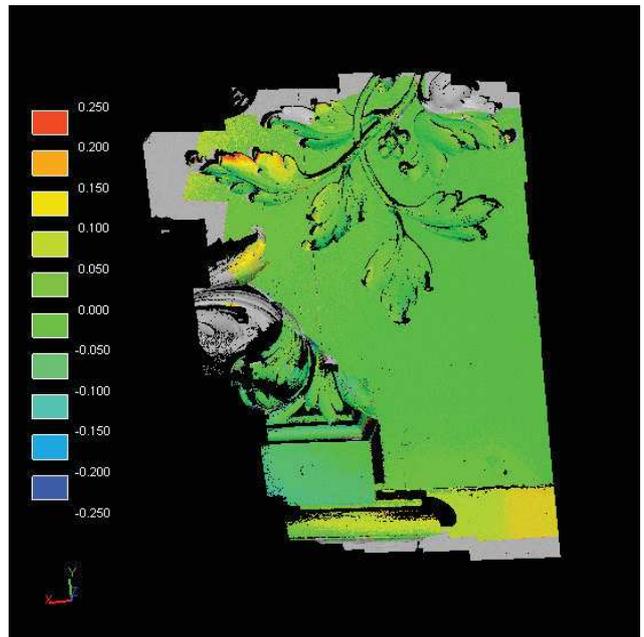
2015_03_2015_07_Parade_west_75_sk_0-25.PNG



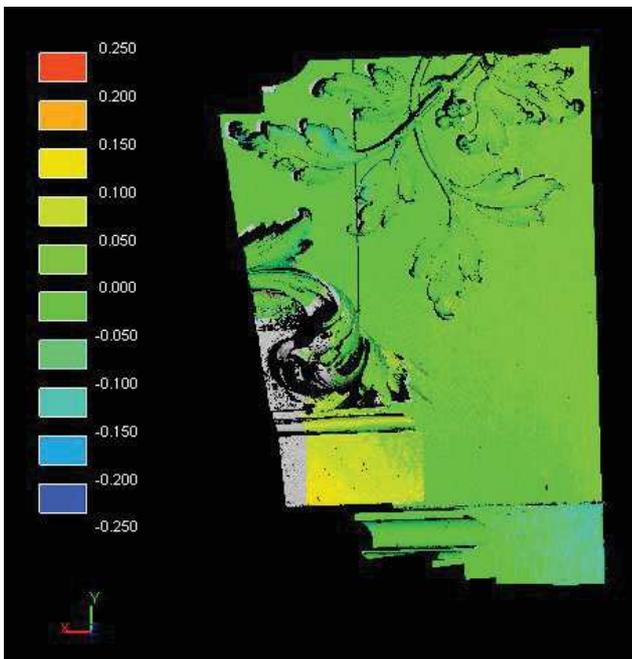
2015_03_2015_10_Parade_west_75_sk_0-3.PNG



2015_07_2015_10_Parade_west_75_sk_0-3.PNG

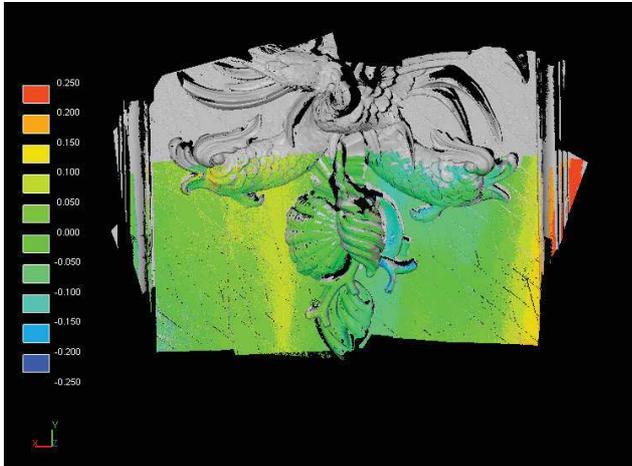


2014_07_2015_03_Parade_west_75_sk_0-25.PNG

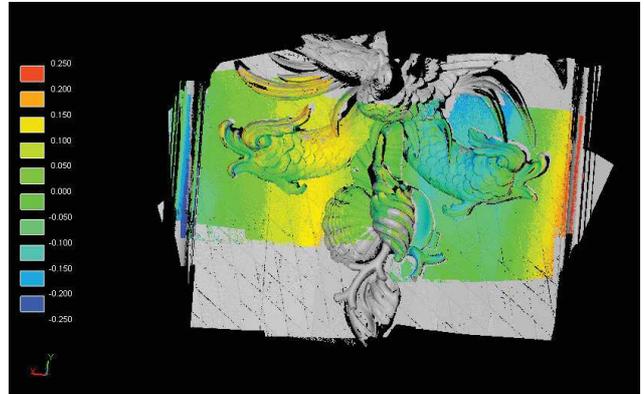


2017_06-07_Parade_West_75_sk0-25.JPG

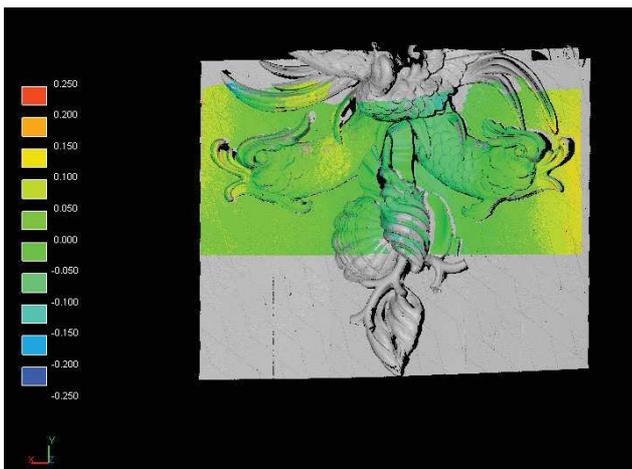
Speisezimmer



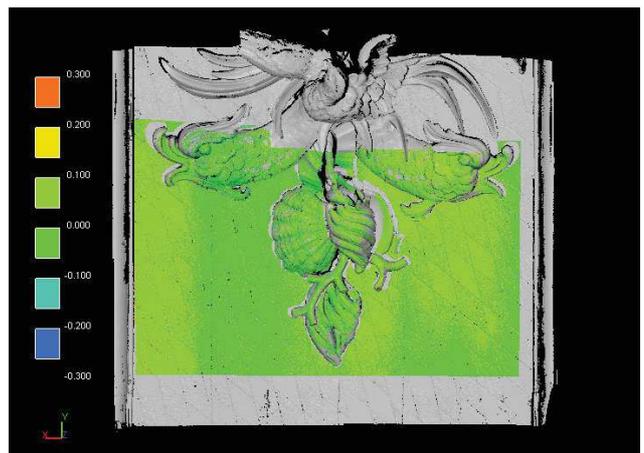
2013_03_2015_03_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-25.PNG



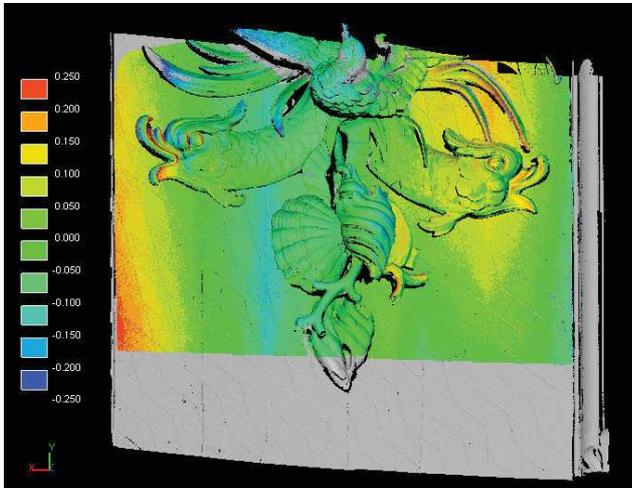
2013_12_2015_03_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-25.PNG



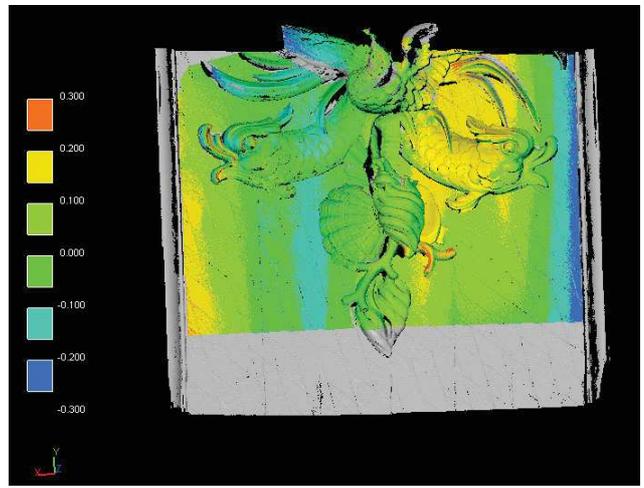
2013_12_2015_07_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-25.PNG



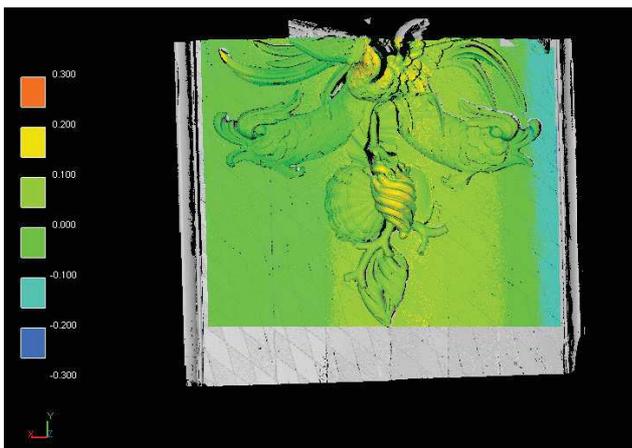
2013_12_2015_10_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-3.PNG



2015_03_2015_07_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-25.PNG



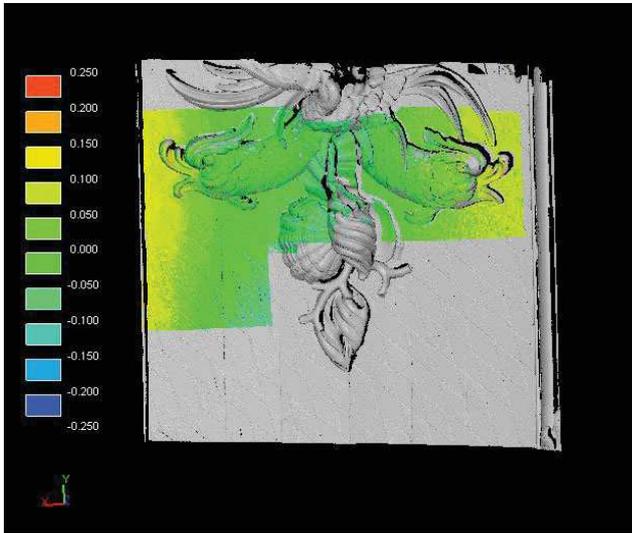
2015_03_2015_10_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-3.PNG



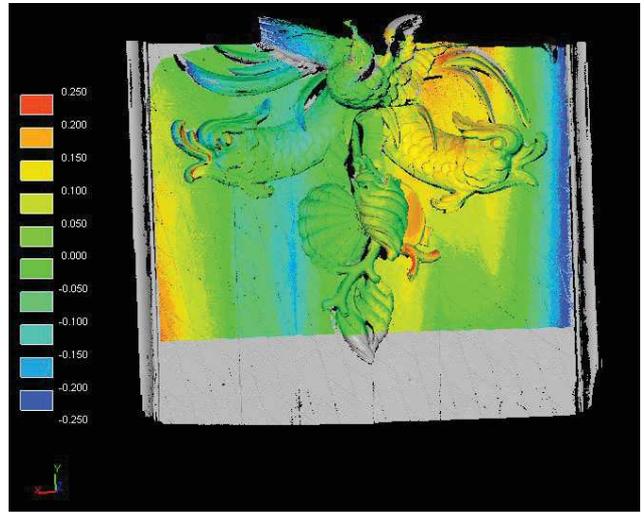
2015_07_2015_10_Speisezimmer_Fisch_250_sk_0-3.PNG



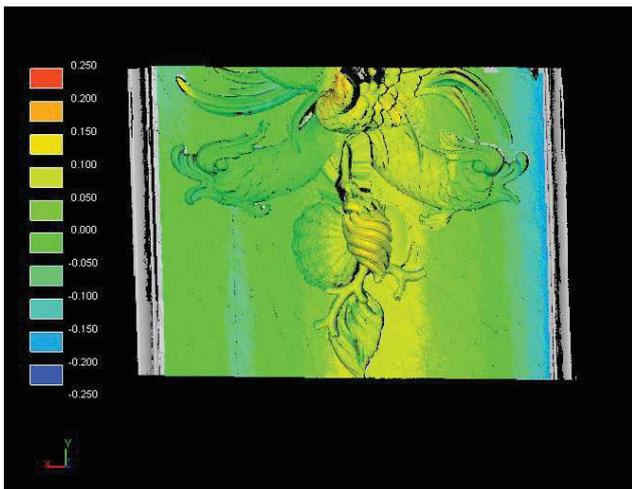
2013_03-2013_12_Speisezimmer_250_Sk0-25.JPG



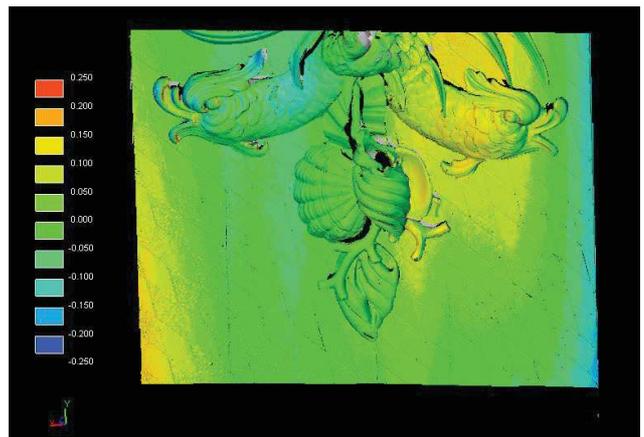
2013_03-2015_07_Speisezimmer_250.JPG



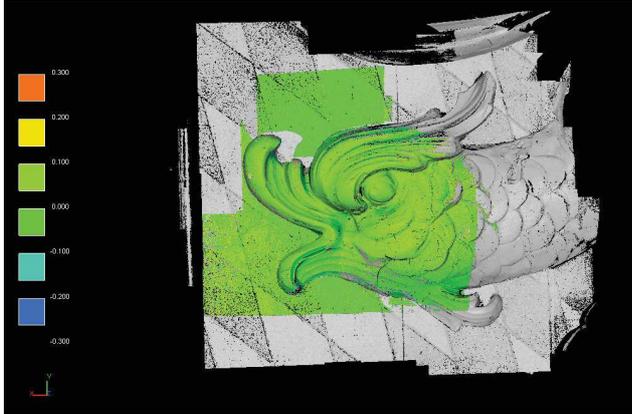
2015_03-2015_10_Speisezimmer_250_sk_0-25.JPG



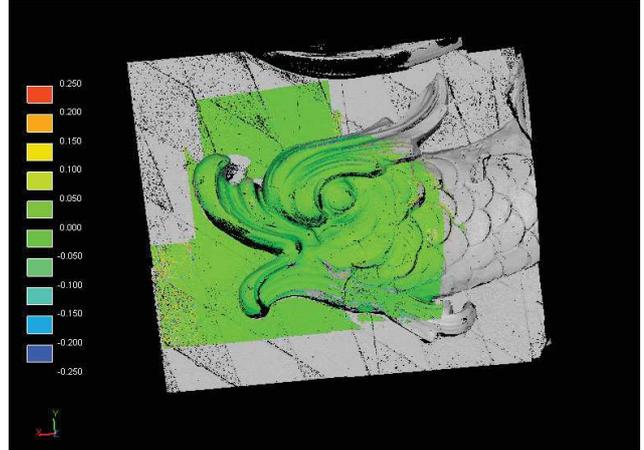
2015_07-10_Speisezimmer_250_Sk_0-25.JPG



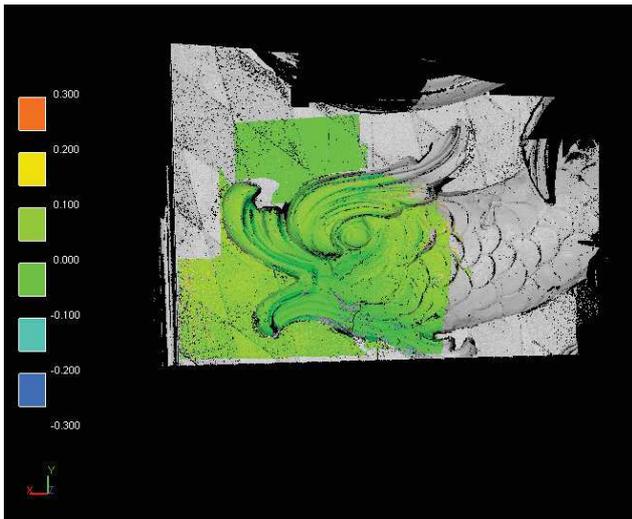
2017_06-07_Speisezimmer_250_sk0_25.JPG



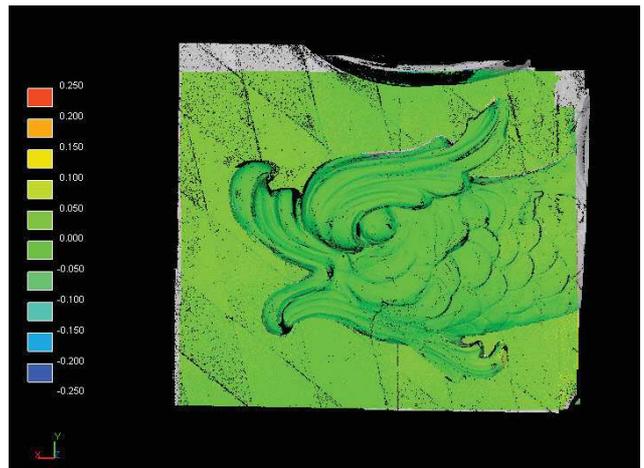
2013_03_2014_07_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-3.PNG



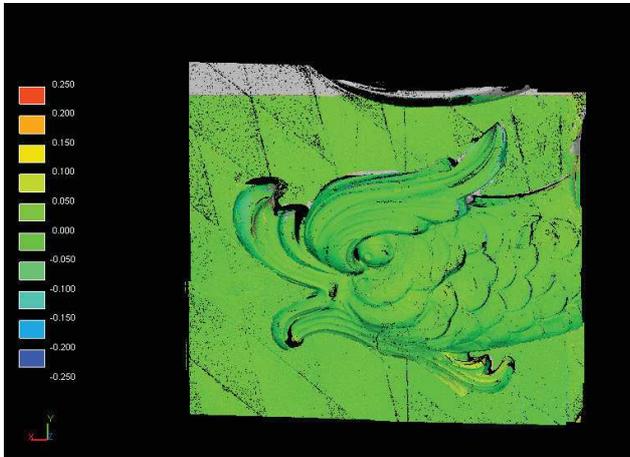
2013_03_2015_07_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG



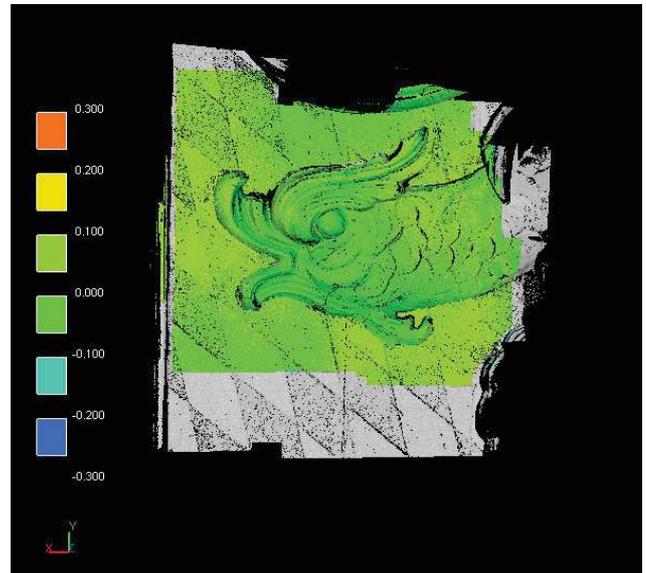
2013_03_2015_03_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-3.PNG



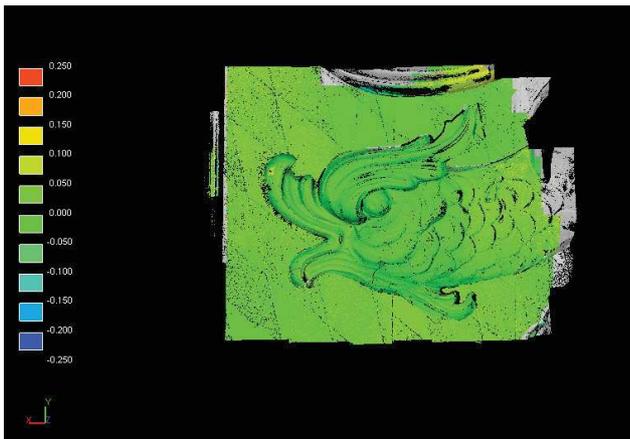
2014_07_2015_07_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG



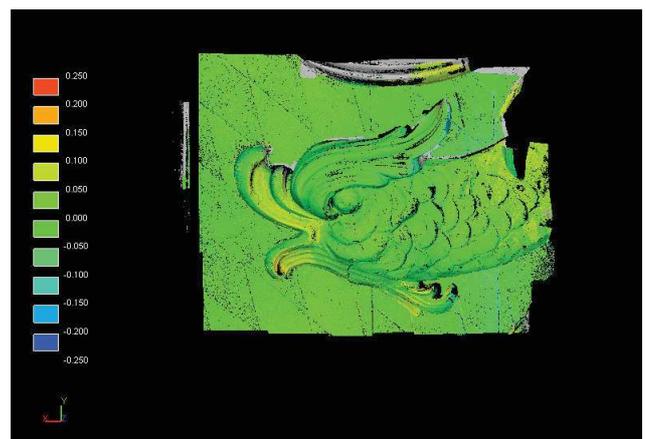
2015_03_2015_07_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG



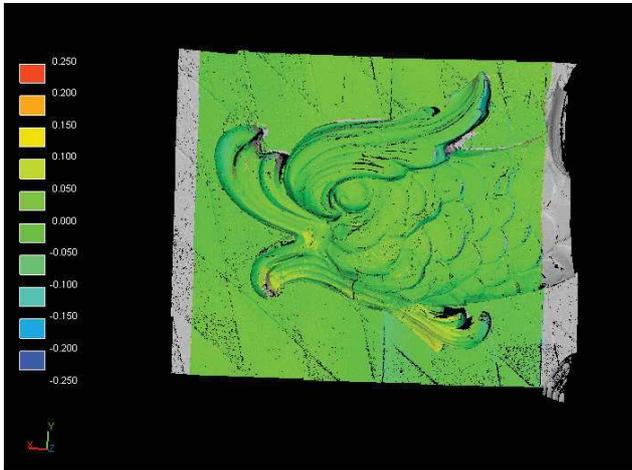
2014_07_2015_03_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-3.PNG



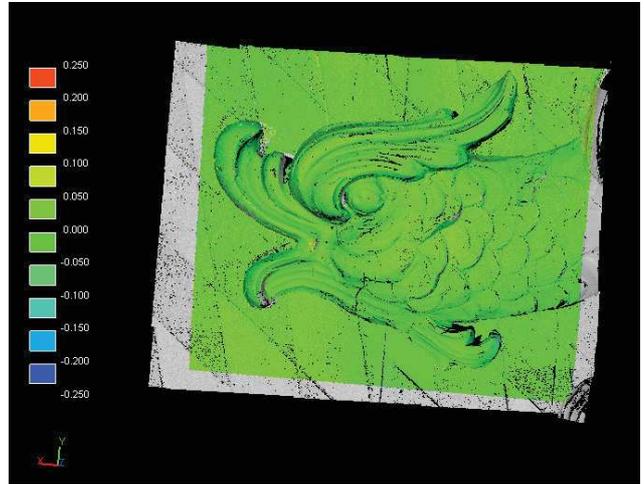
2014_07_2015_04_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG



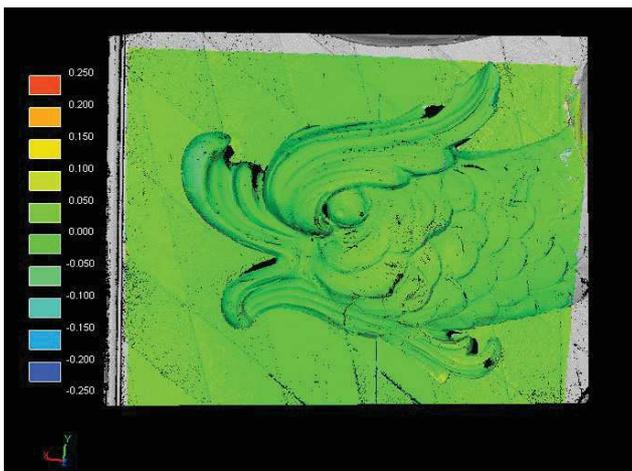
2015_03_2015_04_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG



2015_03_2015_10_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG

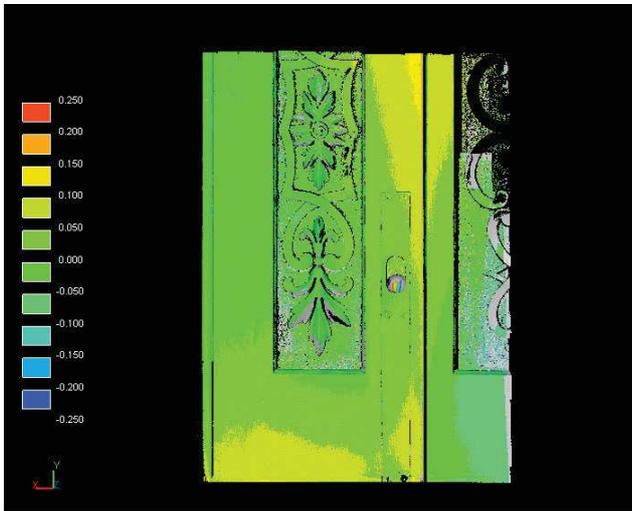


2015_07_2015_10_Speisezimmer_Fisch_75_sk_0-25.PNG

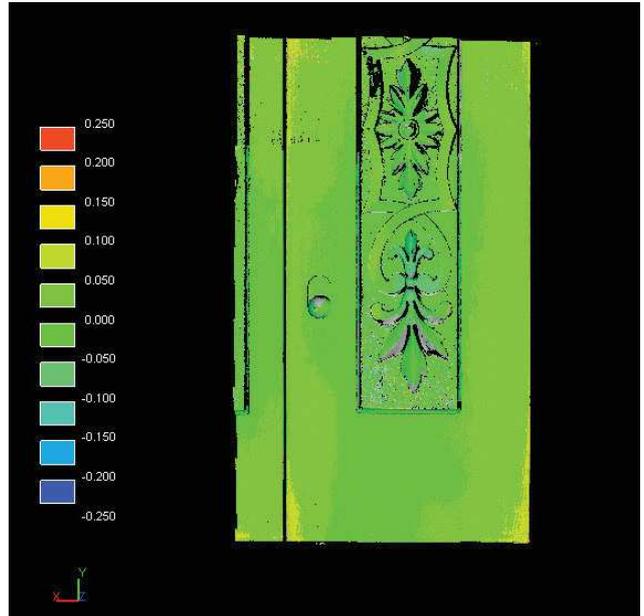


2017_06-07_Speisezimmer_75_Sk0-25.JPG

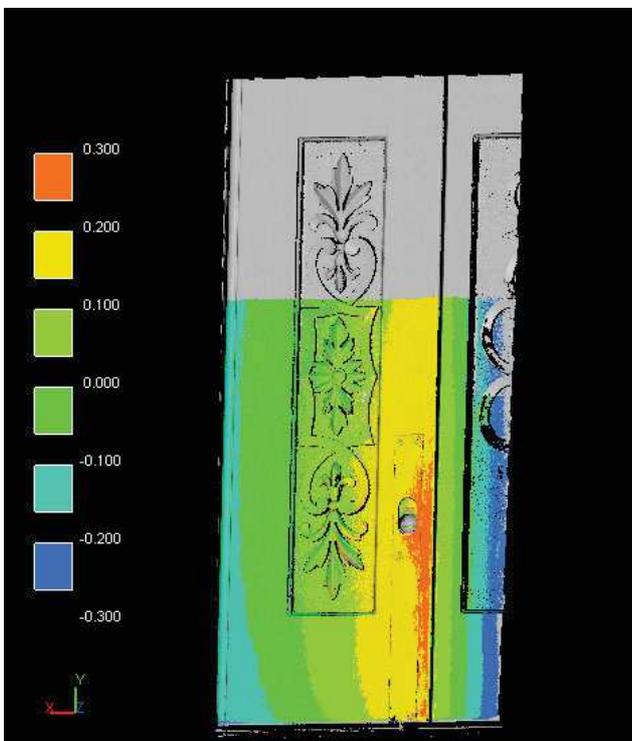
Östliches Gobelinzimmer



2013_03_2013-12_Oest_Gobelin_sued_250_sk_0-25.PNG



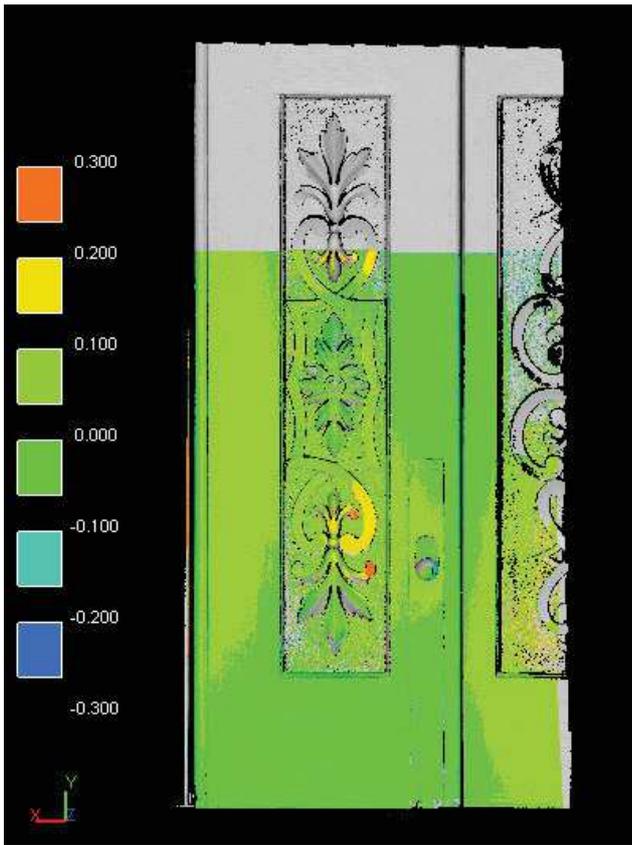
2013_03_2013-12_Oest_Gobelin_nord_250_sk_0-25.PNG



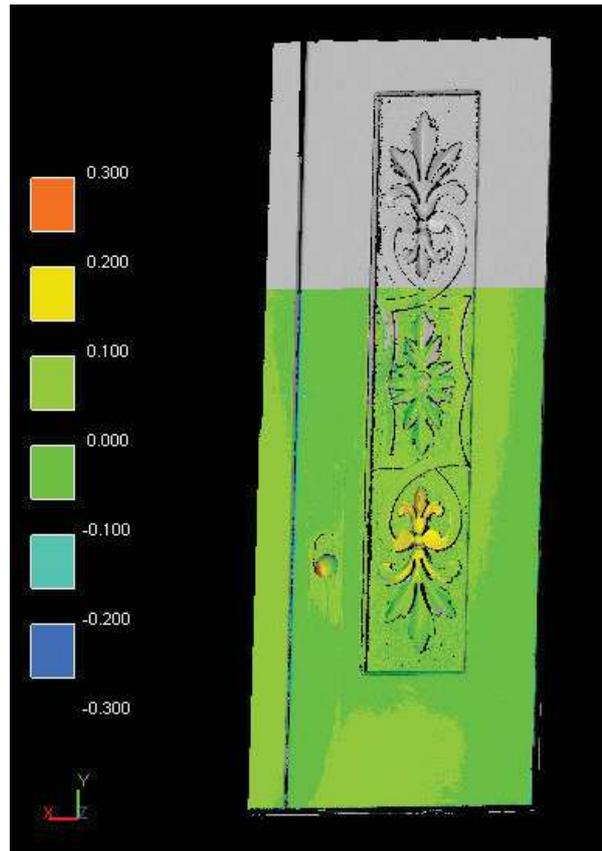
2013_12_2015_03_Oestl_Gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



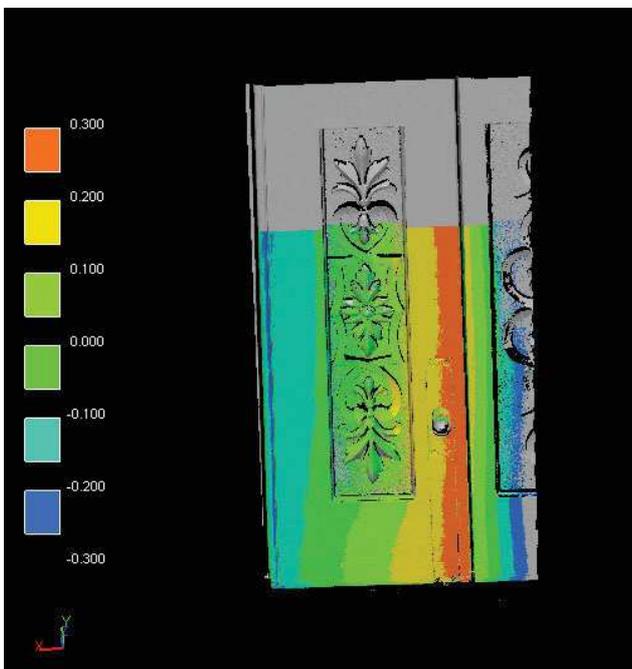
2013_12_2015_03_Oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



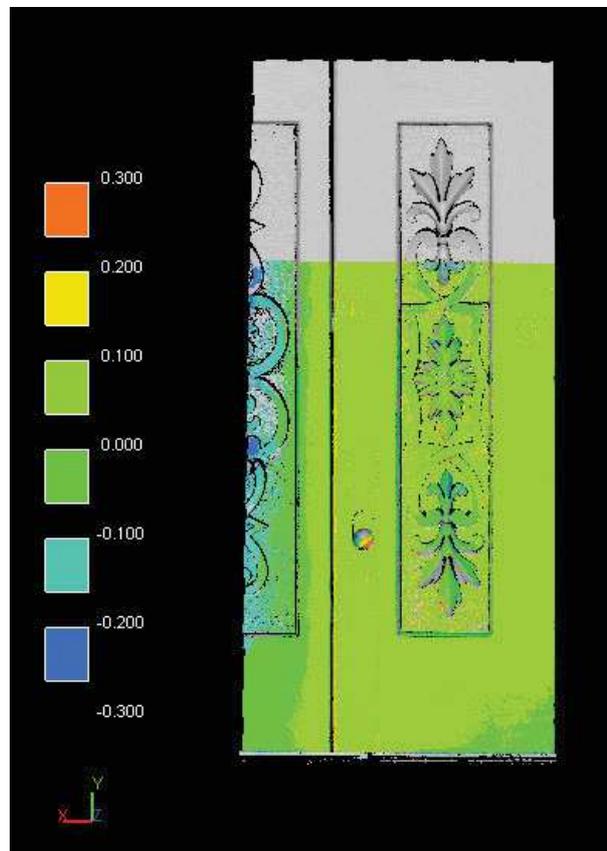
2013_03_2014_07_Oestl_gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



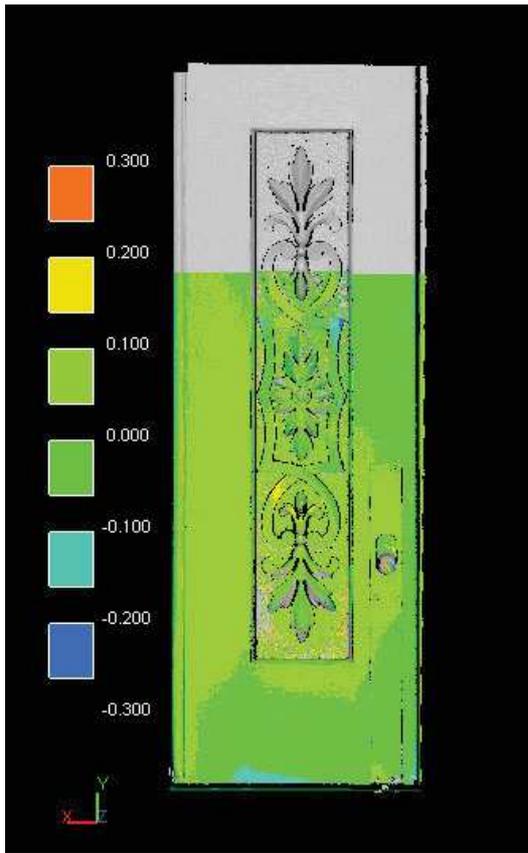
2013_03_2014_07_Oestl_gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



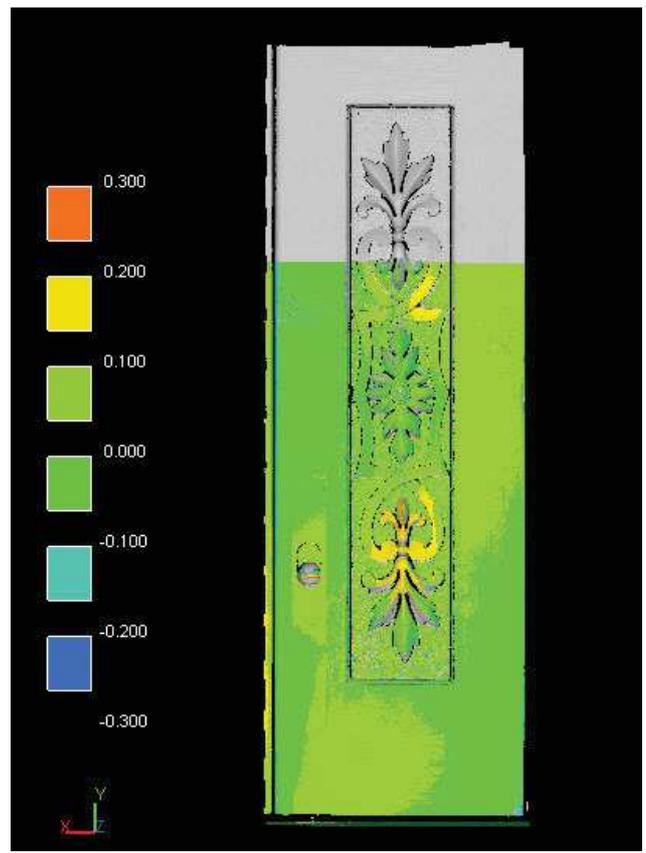
2013_03_2015_03_Oestl_Gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



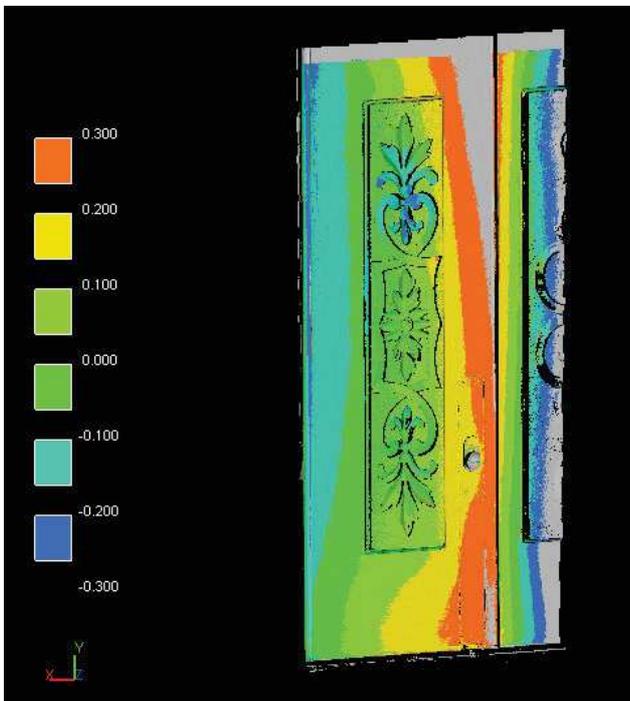
2013_03_2015_03_Oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



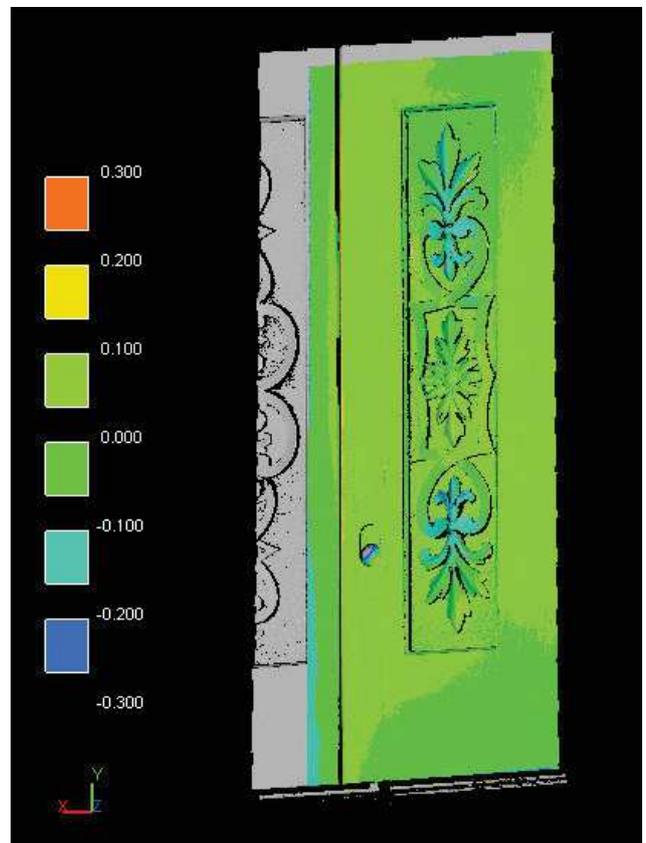
2013_03_2015_07_Oestl_Gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



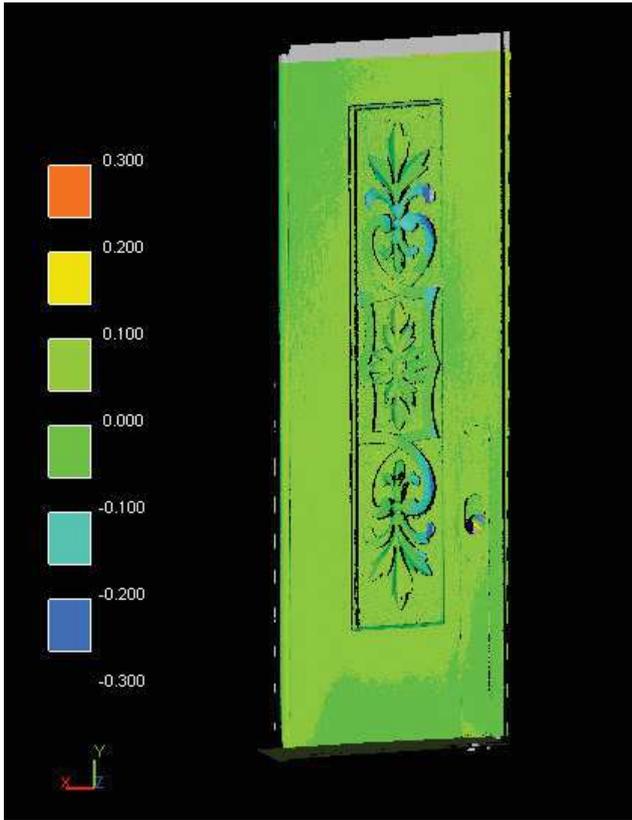
2013_03_2015_07_Oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



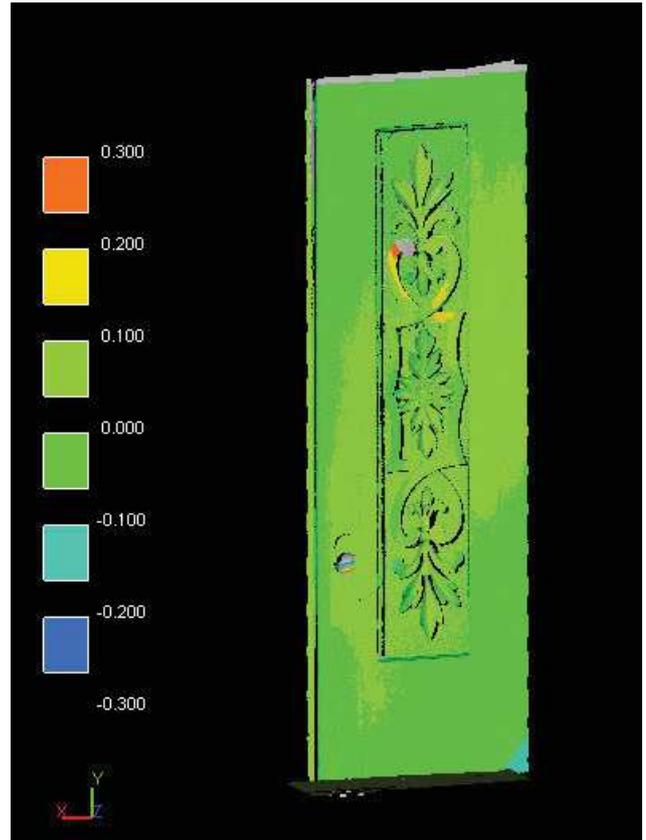
2014_07_2015_03_Oestl_Gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



2014_07_2015_03_Oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



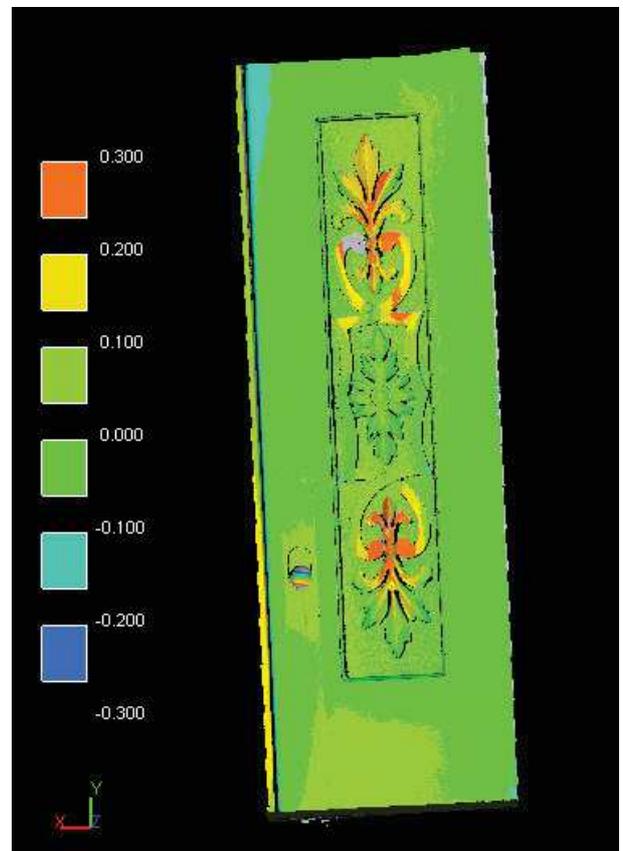
2014_07_2015_07_Oestl_Goebelin_250_sued_sk_0-3.PNG



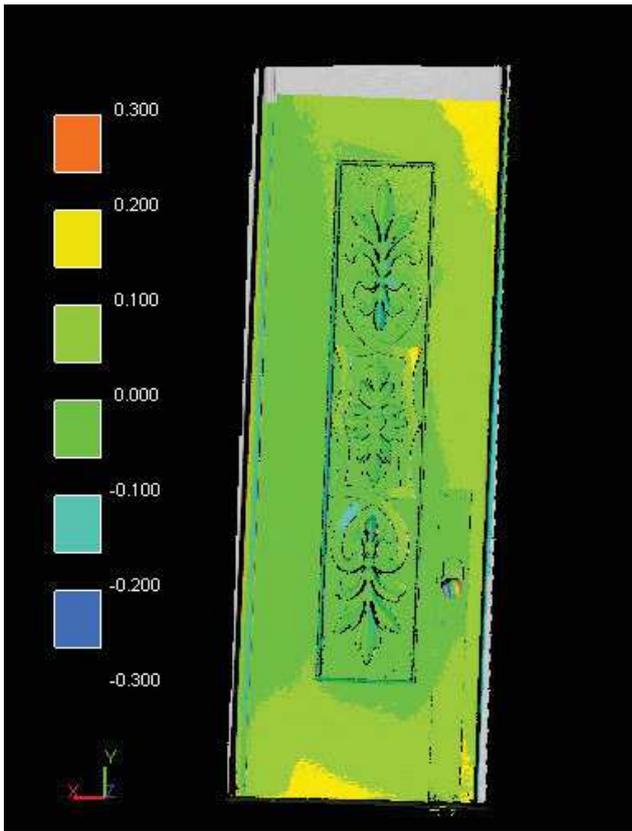
2014_07_2015_07_Oestl_Goebelin_250_nord_sk_0-3.PNG



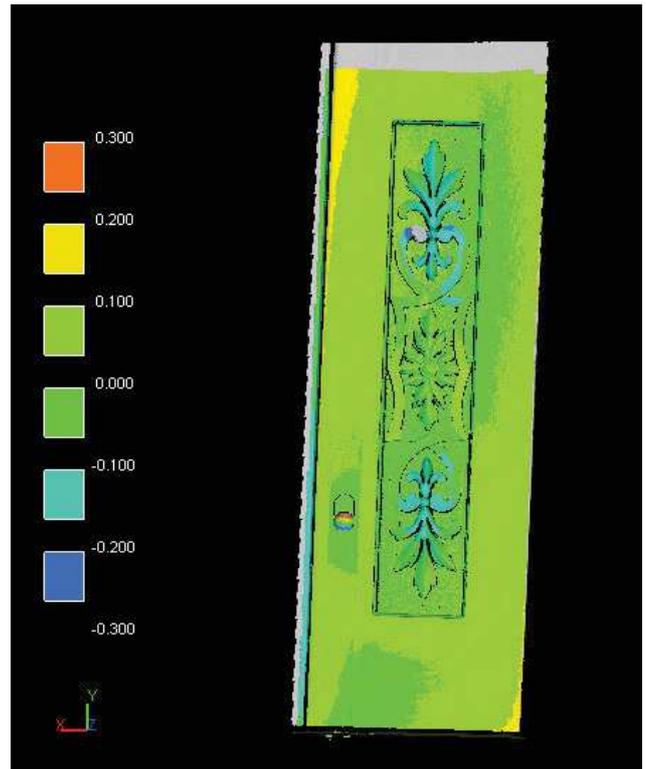
2015_03_2015_07_Oestl_Goebelin_250_sued_sk_0-3.PNG



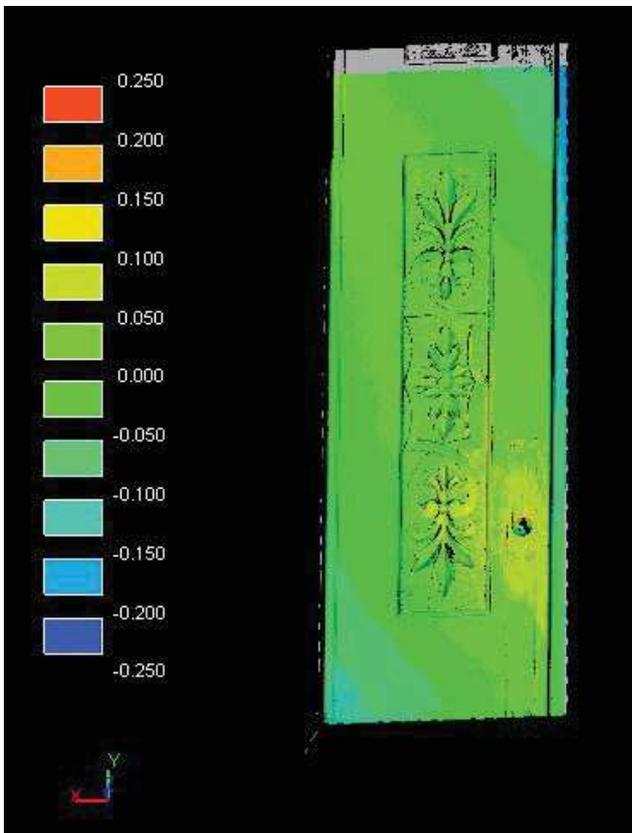
2015_03_2015_07_Oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



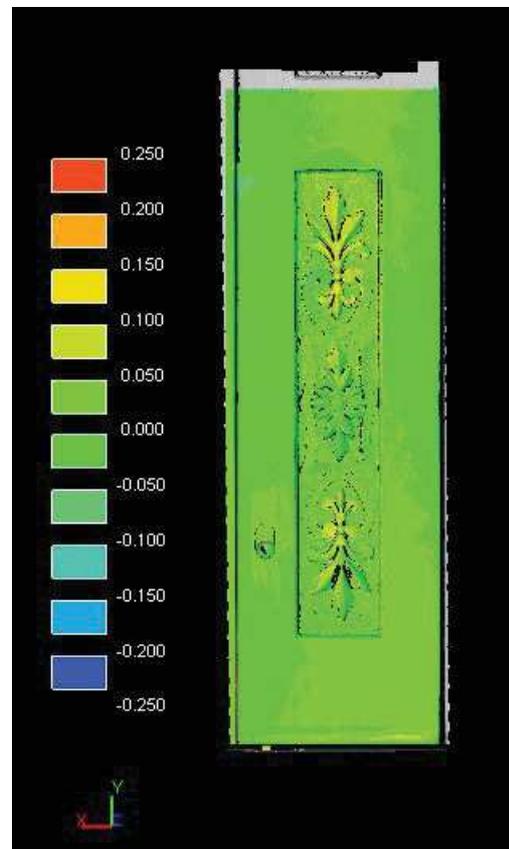
2015_07_2015_10_oestl_Gobelin_250_sued_sk_0-3.PNG



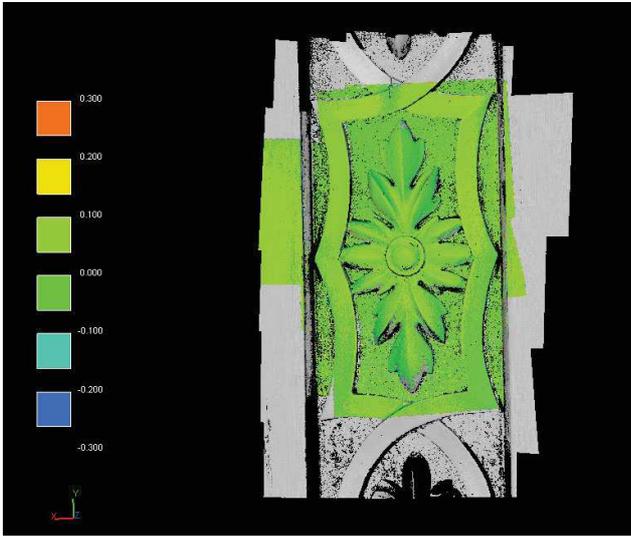
2015_07_2015_10_oestl_Gobelin_250_nord_sk_0-3.PNG



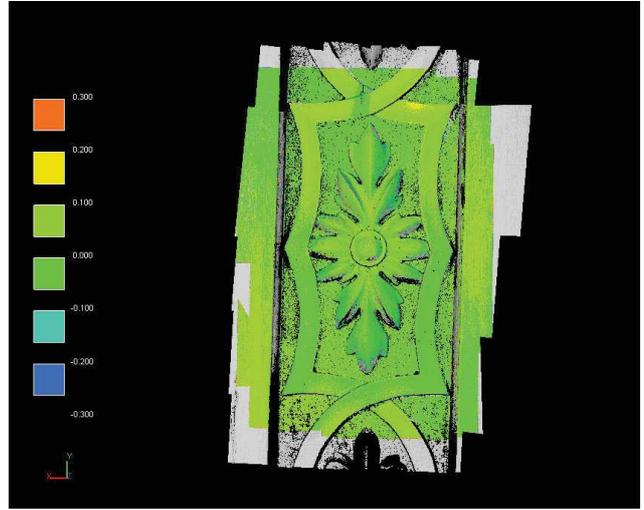
2017_06-07_oestl-Gob_sued_250_sk_0-25.JPG



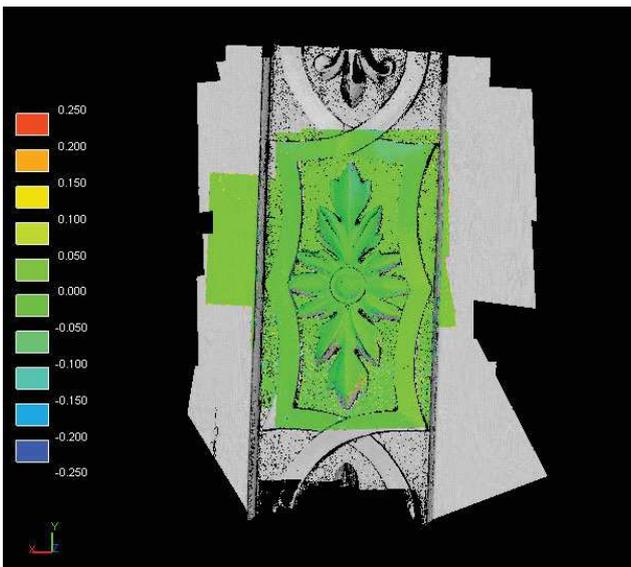
2017_06-07_oestl-Gob_nord_250_sk_0-25.JPG



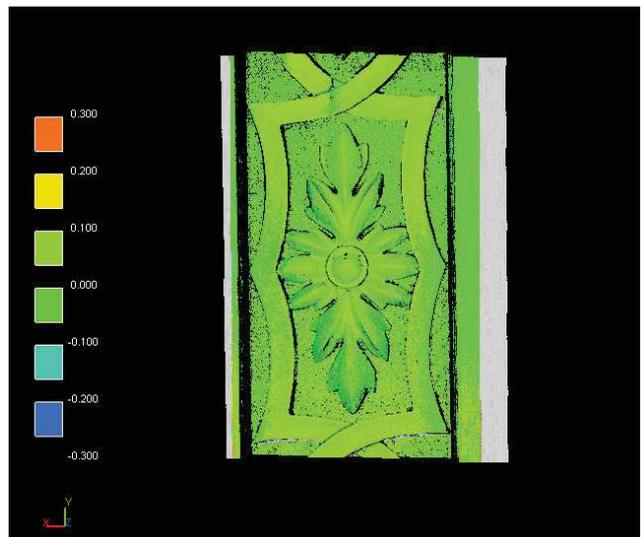
2013_03_2014_07_Oestl_Gobelin_75_sk_0-3.PNG



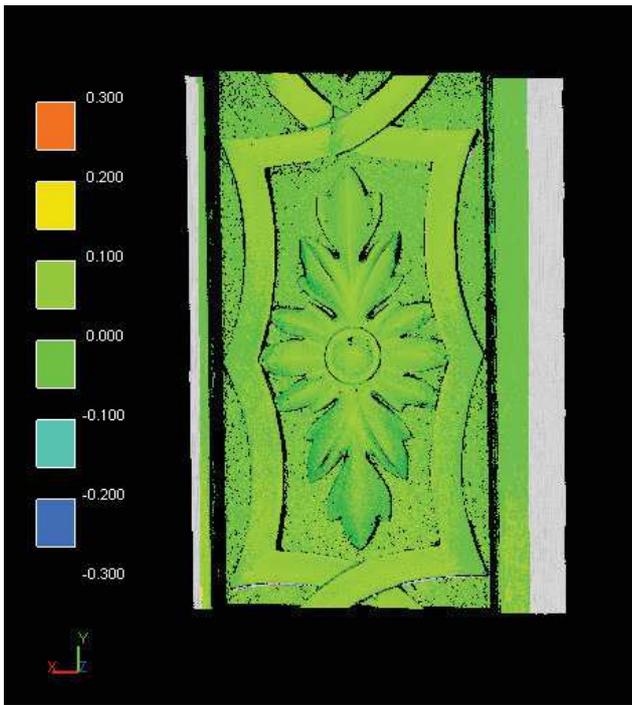
2013_12_2014_07_Oestl_Gobelin_75_sk_0-3.PNG



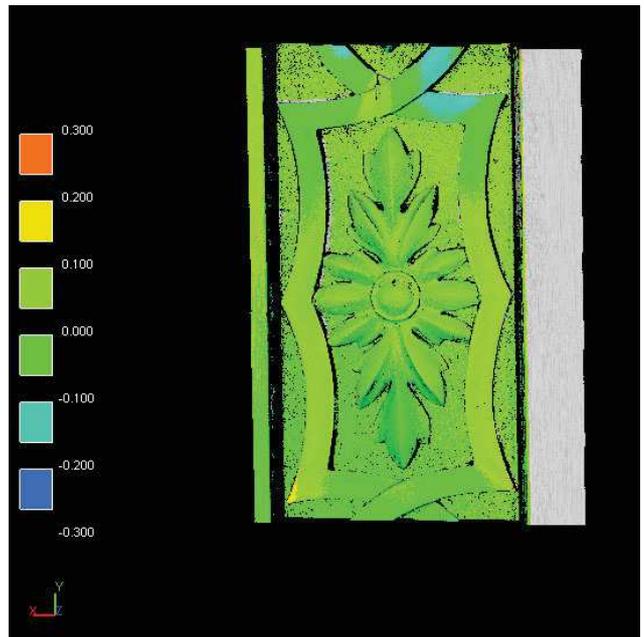
2013_03_2015_03_Oestl_Gobelin_75_sk_0-25.PNG



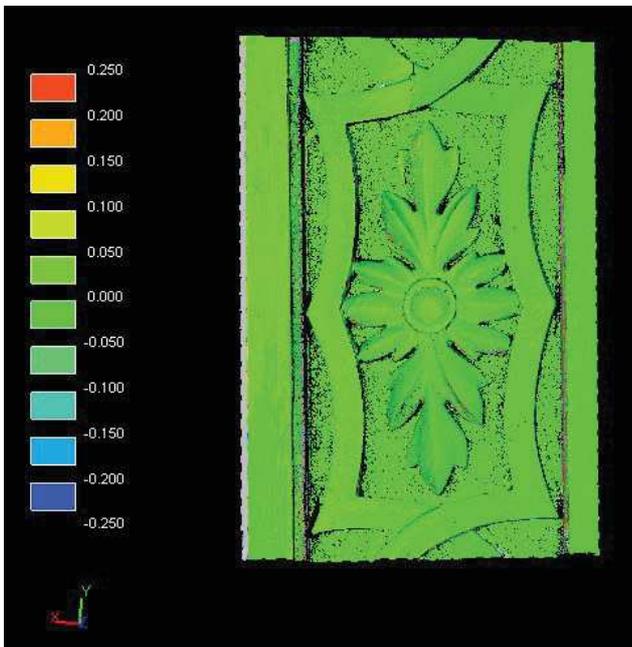
2015_03_2015_07_Oestl_Goebelin_75_sk_0-3.PNG



2015_03_2015_10_Oestl_Goebelin_75_sk_0-3.PNG

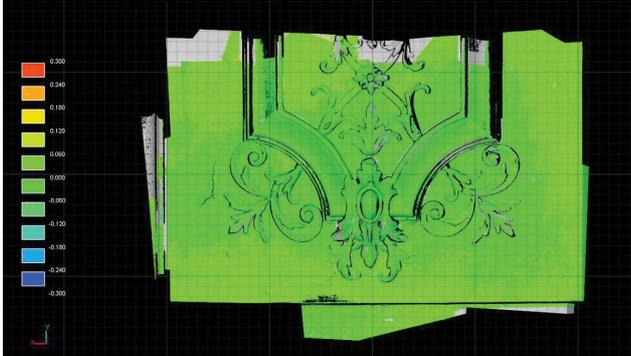


2015_07_2015_10_Oestl_Goebelin_75_sk_0-3.PNG

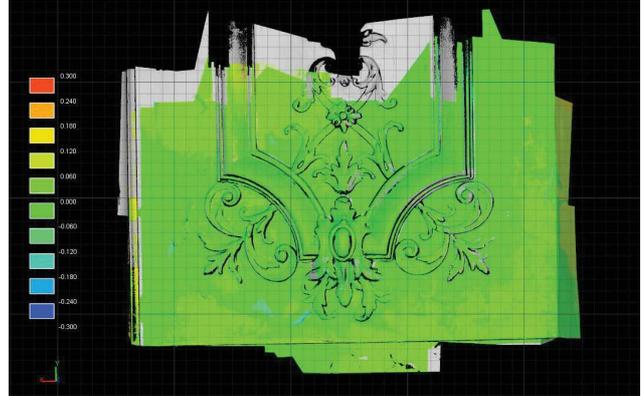


2017_06-07_oestl-Gob_75_sk_0-25.JPG

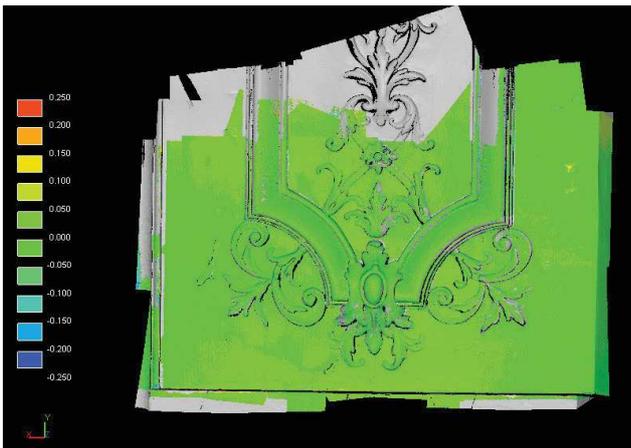
Treppenhaus



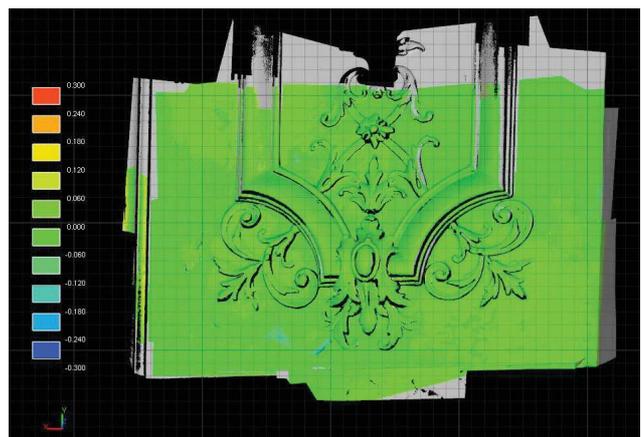
2013_03_2013_12_Treppenhaus_wand_250.JPG



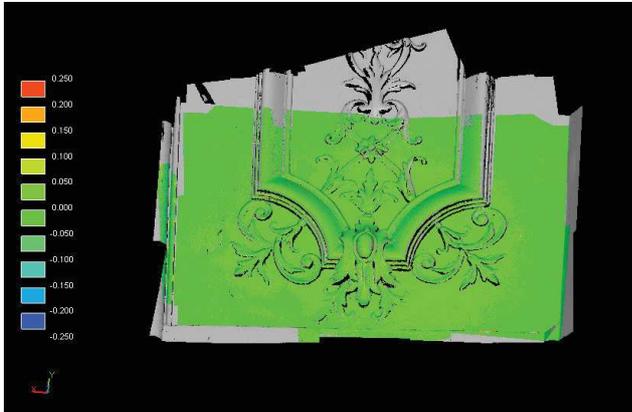
2013_03_2014_07_Treppenhaus_Wand_250.JPG



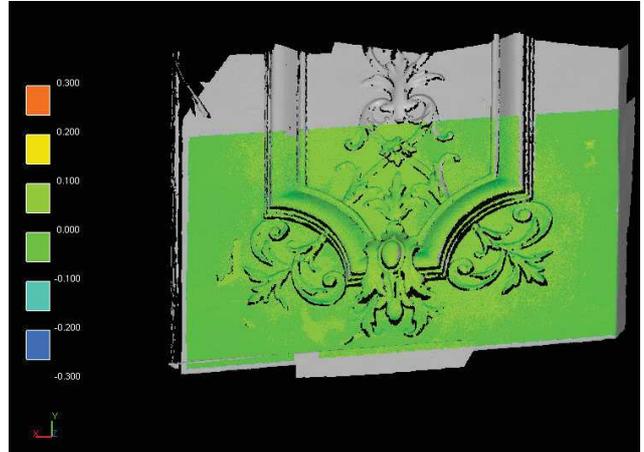
2013_03_2015_03_Treppenhaus_250_0-25Skala.PNG



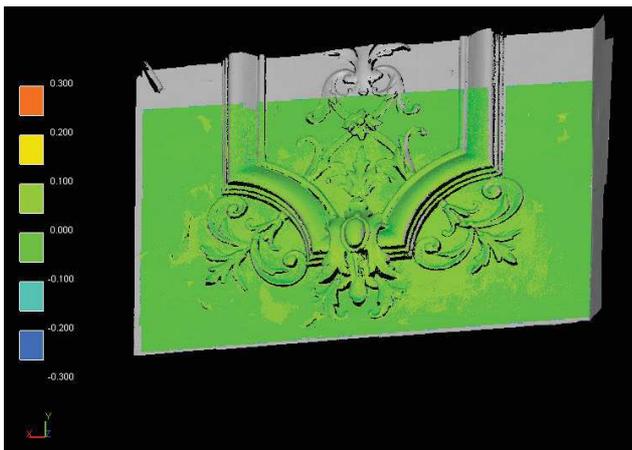
2013_12_2014_07_Treppenhaus_Wand_250.JPG



2013_12_2015_03_treppenhaus_wand_250.PNG



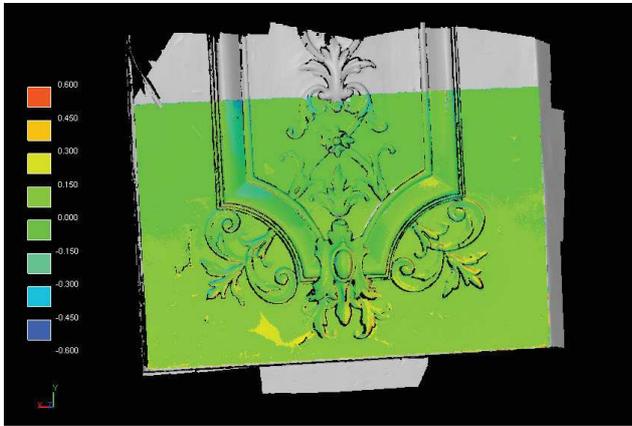
2013_12_2015_07_treppenhaus_Wand_250_0-3.PNG



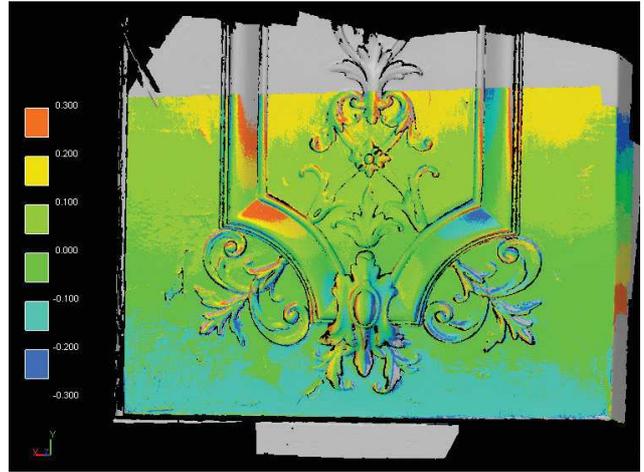
2013_12_2015_10_treppenhaus_wand_250_skala_0-3.PNG



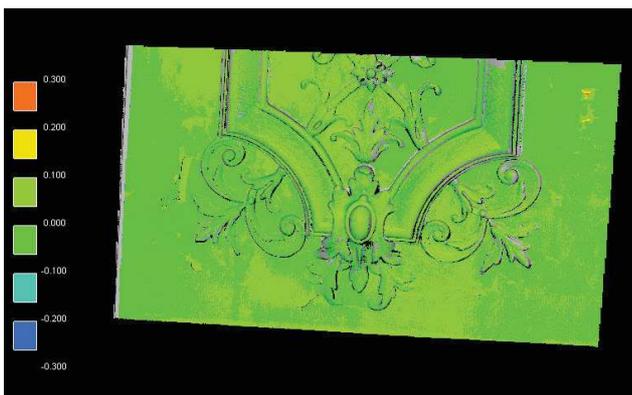
2014_07_2015_03_treppenhaus_wand_250.PNG



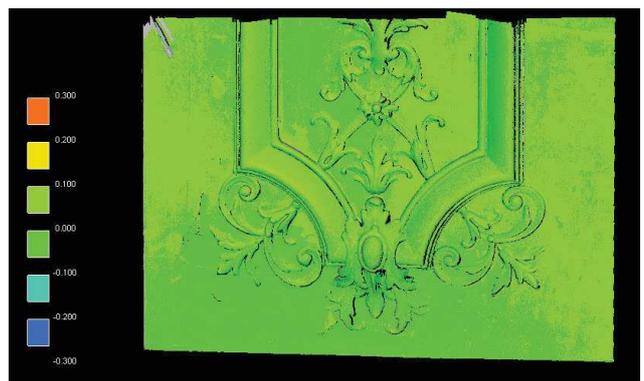
2014_07_2015_07_Treppenhaus_Wand_250.PNG



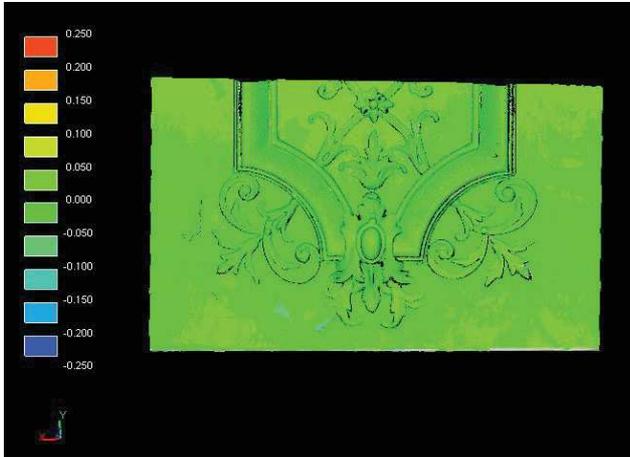
2015_03_2015_07_treppenhaus_Wand_250_0-3.PNG



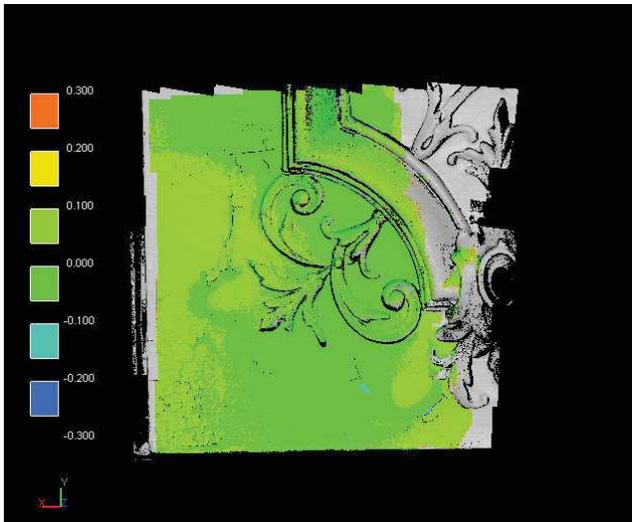
2015_03_2015_10_treppenhaus_Wand_250_0-3.PNG



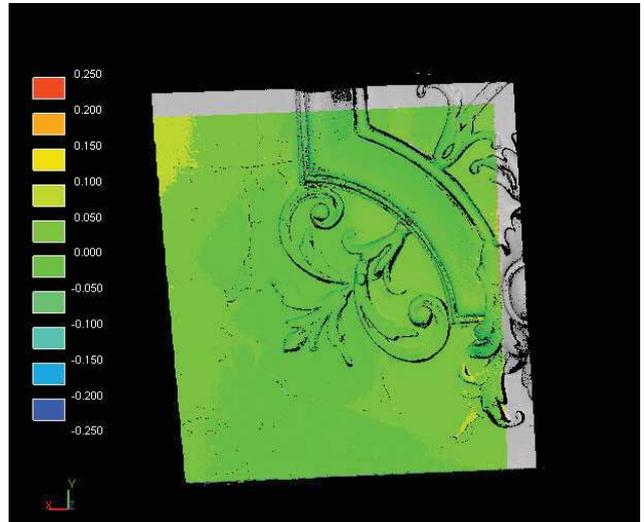
2015_07_2015_10_treppenhaus_Wand_250_0-3.PNG



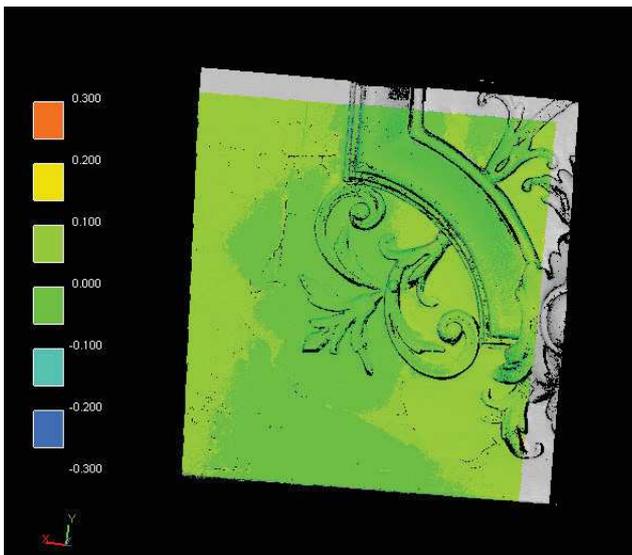
2017_06_2017_07_Treppenhaus_wand_250_sk_0-3.JPG



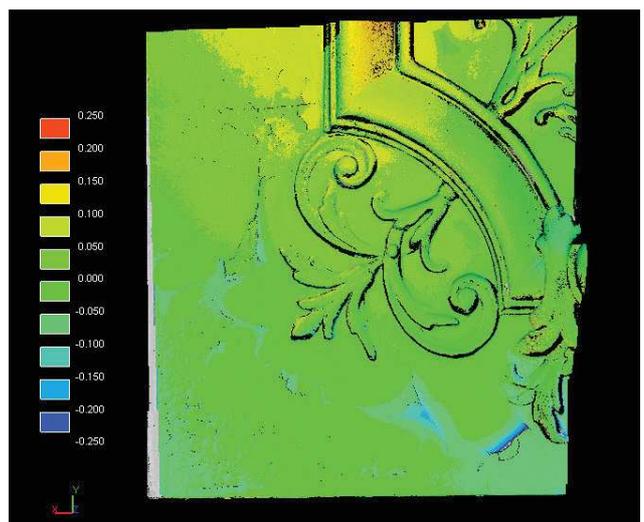
2013_03_2014_07_Treppenhaus_Wand_75_sk_0-3.PNG



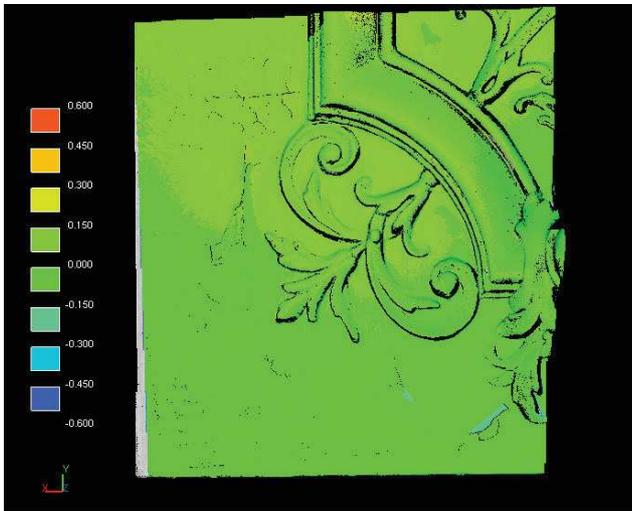
2014_07_2015_03_Treppenhaus_Wand_75_sk_0-25.PNG



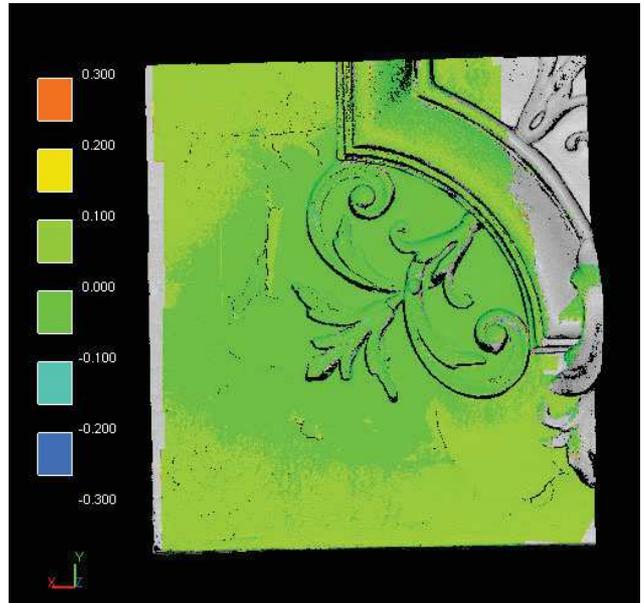
2014_07_2015_10_treppenhaus_Wand_75_0-3.PNG



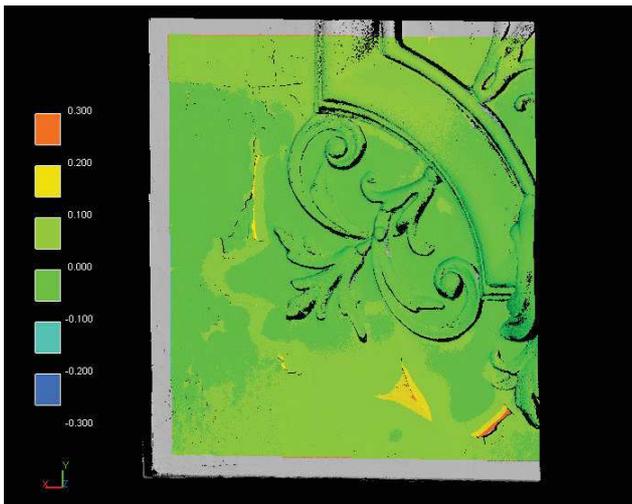
2015_03_2015_07_Treppenhaus_75_sk0-25.PNG



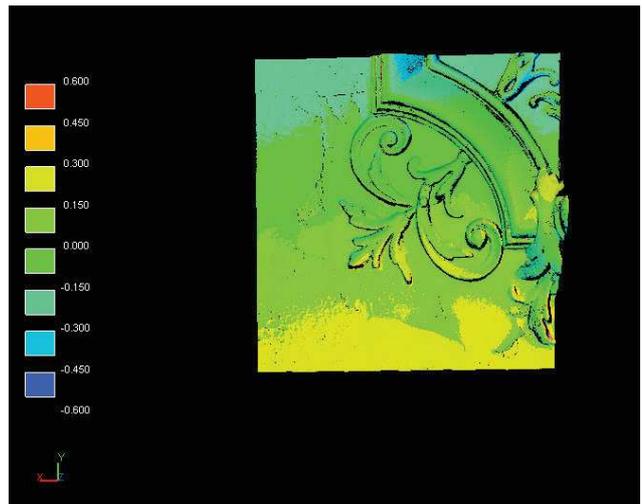
2015_03_2015_07_Treppenhaus_75.PNG



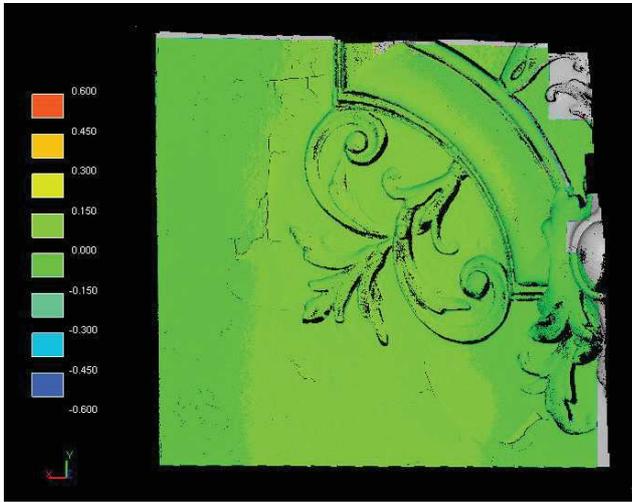
2015_03_2015_10_treppenhaus_Wand_75_0-3.PNG



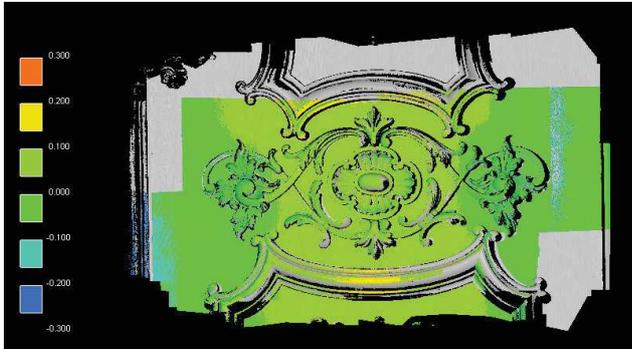
2015_07_2015_10_treppenhaus_Wand_75_0-3.PNG



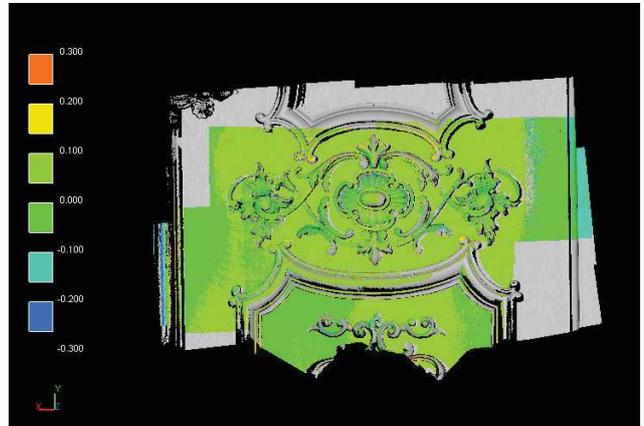
2013_03-2015_07_Treppenhaus_Wand_75_sk_0-6.PNG



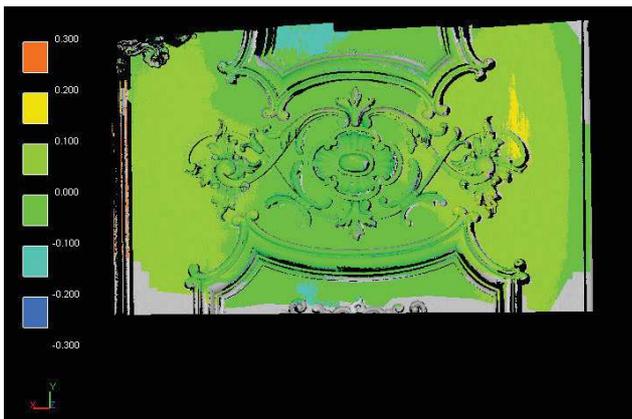
2017_06-07_Treppenhaus_Wand_75.JPG



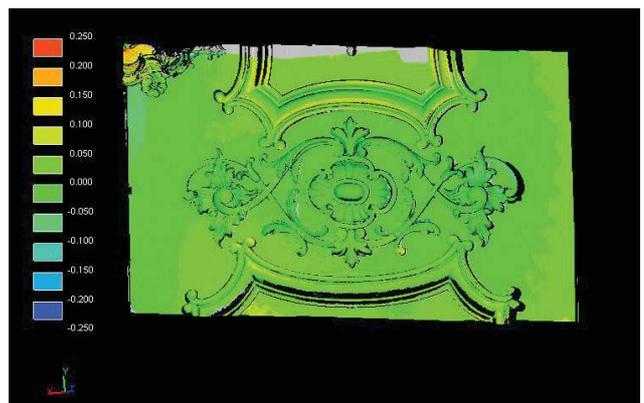
2013_03_2013_12_Treppenhaus_Tuere_250_sk_0-3.PNG



2013_03_2014_07_Treppenhaus_Tuere_250_sk_0-3.PNG



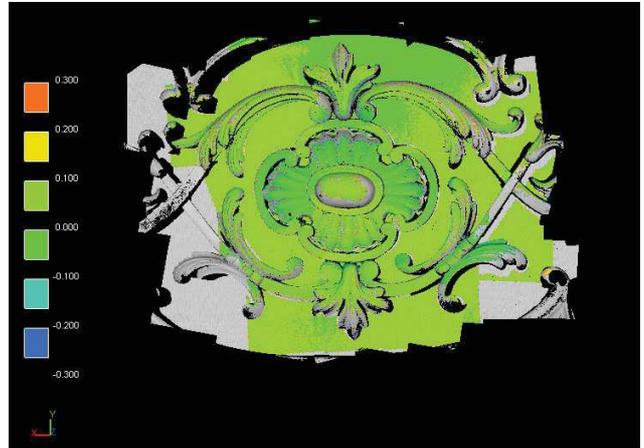
2013_12_2014_07_Treppenhaus_Tuere_250_sk_0-3.PNG



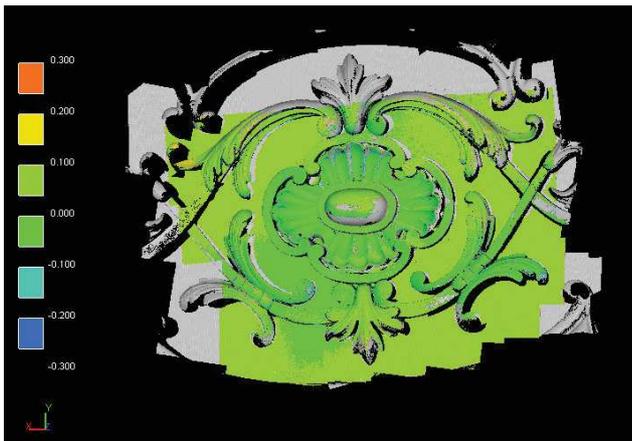
2017_06-07_Treppenhaus_Tuer_250_Sk0-25.JPG



2013_03_2013_12_Treppenhaus_Tuere_75_sk_0-3.PNG



2013_03_2014_07_Treppenhaus_Tuere_75_sk_0-3.PNG



2013_12_2014_07_Treppenhaus_Tuere_75_sk_0-3.PNG

Fraunhofer-Institut für Bauphysik IBP

Forschung, Entwicklung,
Demonstration und Beratung auf
den Gebieten der Bauphysik

Zulassung neuer Baustoffe,
Bauteile und Bauarten

Bauaufsichtlich anerkannte Stelle für
Prüfung, Überwachung und Zertifizierung

Institutsleitung

Prof. Dr. Philip Leistner

Prof. Dr. Klaus Peter Sedlbauer

IBP-Bericht HTB-003/2018

Bauphysikalische Begleitung der Pilot Lüftungs- anlage in Schloss Linderhof

Durchgeführt im Auftrag
Bayerische Schlösserverwaltung
Frau Dr. Katrin Janis
Schloss Nymphenburg
80638 München

Der Bericht umfasst
59 Seiten Text
4 Tabellen
58 Abbildungen

Auszugsweise Veröffentlichung nur mit
schriftlicher Genehmigung des Fraun-
hofer-Instituts für Bauphysik gestattet.

M.Eng. Stefan Bichlmair
Dr. Kristina Holl
Prof. Dr. Ralf Kilian
Prof. Dr. Martin Krus

Valley, 16. Februar 2018

Abteilungsleiter



Prof. Dr. Hartwig M. Künzel

Bearbeiter



Prof. Dr. Ralf Kilian

Bearbeiter



M.Eng. Stefan Bichlmair

Inhalt

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Hintergrund und Zielsetzung | 3 |
| 2 | Durchführung und Auswertung der messtechnischen Untersuchung (AP2 Messtechnische Begleitung) | 3 |
| 2.1 | Kurzbeschreibung Lüftungsanlage mit Entfeuchtung | 3 |
| 2.2 | Messkonzept | 5 |
| 2.2.1 | Messkonzept Lüftungsanlage mit Entfeuchtung | 5 |
| 2.2.2 | Messtechnik | 7 |
| 2.2.3 | Messkonzept Raumklima | 8 |
| 2.3 | Auswertemethodik und Messzeiträume | 10 |
| 2.4 | Betrieb Lüftungsanlage – Besucher und Kohlendioxidgehalt | 12 |
| 2.4.1 | Elektrische Leistungsaufnahme (Messposition 5, 6) | 12 |
| 2.4.2 | Volumenstrom (Messposition 3) | 13 |
| 2.4.3 | Kohlendioxidgehalt im Paradeschlafzimmer (Messposition 11) | 15 |
| 2.4.4 | Besucherzahlen | 16 |
| 2.4.5 | Besucher – Kohlendioxidgehalt – Lüftungsbetrieb | 17 |
| 2.5 | Auswertung Klima-Messdaten Lüftungsanlage | 19 |
| 2.5.1 | Außenluft am Ansaugturm (Messposition 1) | 19 |
| 2.5.2 | Abschnitt Erdkanal (Messposition 1 und 2) | 21 |
| 2.5.3 | Abschnitt Lüftungsanlage (Messposition 2 und 3) | 26 |
| 2.5.4 | Regeneration Sorptionsrad – Fortluft (Messposition 2, 7 und 8) | 32 |
| 2.5.5 | Auswirkungen der Zuluft auf das Raumklima im Paradeschlafzimmer, Messposition 9 (3) und 10 | 35 |
| 2.6 | Paradeschlafzimmer und angrenzende Räume | 41 |
| 2.6.1 | Raumklima Paradeschlafzimmer (Messposition 10) | 41 |
| 2.6.2 | Raumklimaverteilung im Paradeschlafzimmer | 44 |
| 2.6.3 | Raumklima Audienzzimmer (Messposition 15) | 45 |
| 2.6.4 | Raumklima Speisezimmer (Messposition 16) | 46 |
| 2.6.5 | Raumklima Ankleide, Aufstellort Lüftungsanlage (Messposition 12) | 47 |
| 2.6.6 | Vergleich Raumklima Paradeschlafzimmer – Audienzzimmer - Speisezimmer | 49 |
| 3 | Simulation von Malschichtoberflächen | 52 |
| 3.1 | Simulation eines Malschichtenaufbaus | 52 |
| 3.2 | Simulation Supraportengemälde mit und ohne Lüftungsanlage | 54 |
| 4 | Zusammenfassung und Ausblick | 56 |

1 Hintergrund und Zielsetzung

Für das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt DBU geförderte Projekt „Konservierungswissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof“ wird eine Pilot-Lüftungsanlage eingebaut. Zur konservierungswissenschaftlichen Beurteilung der Auswirkung dieser Maßnahme sind Messungen erforderlich sowie Untersuchungen mit moderner Simulationssoftware zur Analyse von Materialien, technischen Anlagen und Gebäudeteilen.

2 Durchführung und Auswertung der messtechnischen Untersuchung (AP2 Messtechnische Begleitung)

Die messtechnische Begleitung gliedert sich in zwei Teile, die Erfassung des Raumklimas (AP 2.1) und die Strömungsmessung (AP 2.2).

Die Messungen werden zum Teil mit Datenloggern als unabhängige „stand alone“ Lösung ohne Verkabelung durchgeführt. Für einen Teil der Messung ist auch ein Mehrkanal-Datenlogger erforderlich, der mit Dauerstrom versorgt werden muss. Alternativ zur Dauerstromversorgung wird eine batteriegestützte Lösung verbaut, die während der Nachtabstaltung den Datenlogger versorgt.

Die Messungen des lokalen Mikroklimas werden im Rahmen der konservierungswissenschaftlichen Untersuchungen durchgeführt. Zusätzlich erfolgen Messungen der relativen Feuchte und Temperatur des Raumklimas im Paradeschlafzimmer, lila und rosa Kabinett, Audienz- und Speisezimmer sowie als Vergleichsmessung im Spiegelsaal und Messungen des Aussenklimas mit relativer Feuchte und Temperatur. Eine Teillieferung von „stand alone“ Datenloggern und Aufstellung im Schloss ist zu Beginn des Projektes mit vier Datenloggern mit zusätzlichen acht externen Temperatur- und Kombisensoren erfolgt.

Zusätzlich werden nach dem Einbau der Lüftungsanlage die relative Feuchte und Temperatur am Luftansaugturm gemessen sowie nach dem Erdkanal (= vor dem Lüftungsgerät), nach dem Lüftungsgerät und vor dem Eintritt in den Raum. Es erfolgt außerdem eine kontinuierliche Messung des Zuluftvolumenstromes über die Luftgeschwindigkeit im Zuluftrohr.

Die Erfassung der elektrischen Leistung der Pilot-Lüftungsanlage erfolgt mit dem bauherrnseitig bereitgestellten und in das elektrische Leitungsnetz der Lüftungsanlage angeschlossenen elektrischen Leistungsmesser.

2.1 Kurzbeschreibung Lüftungsanlage mit Entfeuchtung

Die Lüftungsanlage wurde zur Belüftung des Paradeschlafzimmers zusammen mit den angrenzenden Räumen konzipiert. Ziel der Belüftung ist eine Raumklimastabilisierung der relativen Feuchte auf einem niedrigeren Jahresmittelwert. Die Höhe des angestrebten Jahresmittelwertes der relativen Feuchte orientiert sich dabei an dem Feuchteniveau im Spiegelsaal. Zur Verringerung der relativen

Feuchte im Paradeschlafzimmer wurde deshalb die Lüftungsanlage mit einer Sorptionsentfeuchtung ausgestattet. Bei der Entfeuchtung über Sorption erwärmt sich die Frischluft. Zur Vermeidung von zu hohen Lufttemperaturen, vor allem im Sommer, ist deshalb eine Kühlung der Luft erforderlich. Für die Vermeidung von zu tiefen Temperaturen im Winter wurde zusätzlich ein Luftvorerhitzer mit eingebaut.

Zur Regeneration des Sorbens des Entfeuchters wird ein Außenluftanteil abgezweigt und erhitzt. Die erhitzte Außenluft trocknet das Sorbens und wird als Fortluft über einen gesonderten Erdkanal, der parallel zum Außenluftkanal verläuft, nach außen wieder abgeführt. Bild 1 zeigt den Anlagenplan.

Zuluft zum Paradeschlafzimmer

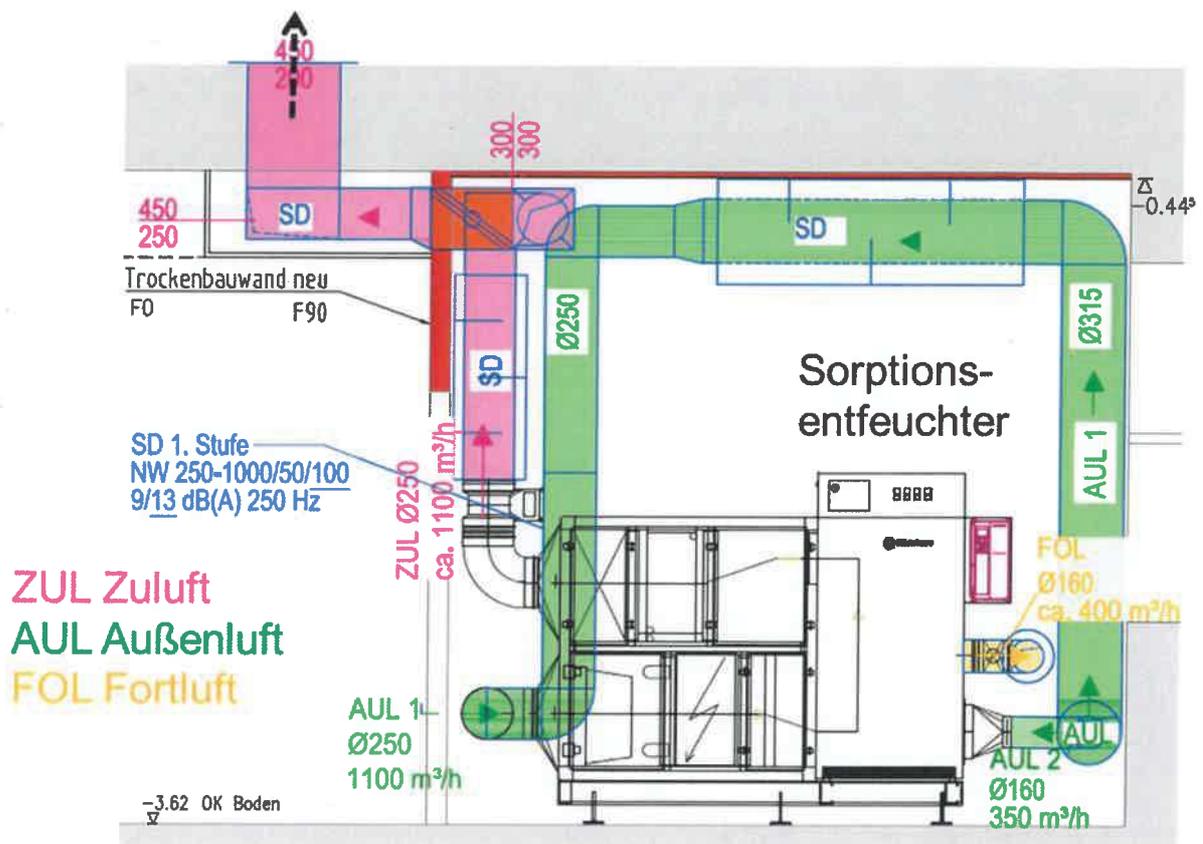


Bild 1: Anlagenplan im Gebäudeschnitt. Abgebildet ist die Lüftungsanlage mit Vorerhitzer, Sorptionsentfeuchter, Kühlmodul, Ventilator- und Erhitzermodul für Regenerationsluft sowie den Luftführungskanälen.

2.2 Messkonzept

2.2.1 Messkonzept Lüftungsanlage mit Entfeuchtung

Zur Bewertung der Wirkungsweise der Lüftungsanlage wird an mehreren Stellen der Luftzustand entlang der Luftführung erfasst. In Bild 2 und Bild 3 ist der Messplan schematisch abgebildet. Beginnend mit der Erfassung des Außenluftklimas (AUL) mit relativer Luftfeuchte und Lufttemperatur (r.F./T) am Ansaugturm, im Messplan als Messposition 1 gekennzeichnet, erfolgt an der Position 2 die Messung nach dem Erdkanal (r.F./T) und noch vor der Lüftungsanlage. An Position 3 wird die relative Feuchte und Temperatur nach der Lüftungsanlage erfasst sowie mit Position 4 die Luftgeschwindigkeit im Luftkanal. Nach wenigen Metern Luftkanal erreicht die Zuluft den Luftauslass am östlichen Kamin im Paradeschlafzimmer. Hier wird redundant zur Position 3 der Luftzustand (r.F./T) als Position 9 erfasst. Im Paradeschlafzimmer erfolgt die Messung des Raumklimazustandes (r.F./T) seitlich am östlichen Kamin bei Position 10. Zusätzlich wird der Kohlendioxidgehalt der Raumluft in diesem Bereich erfasst (Messposition 11).

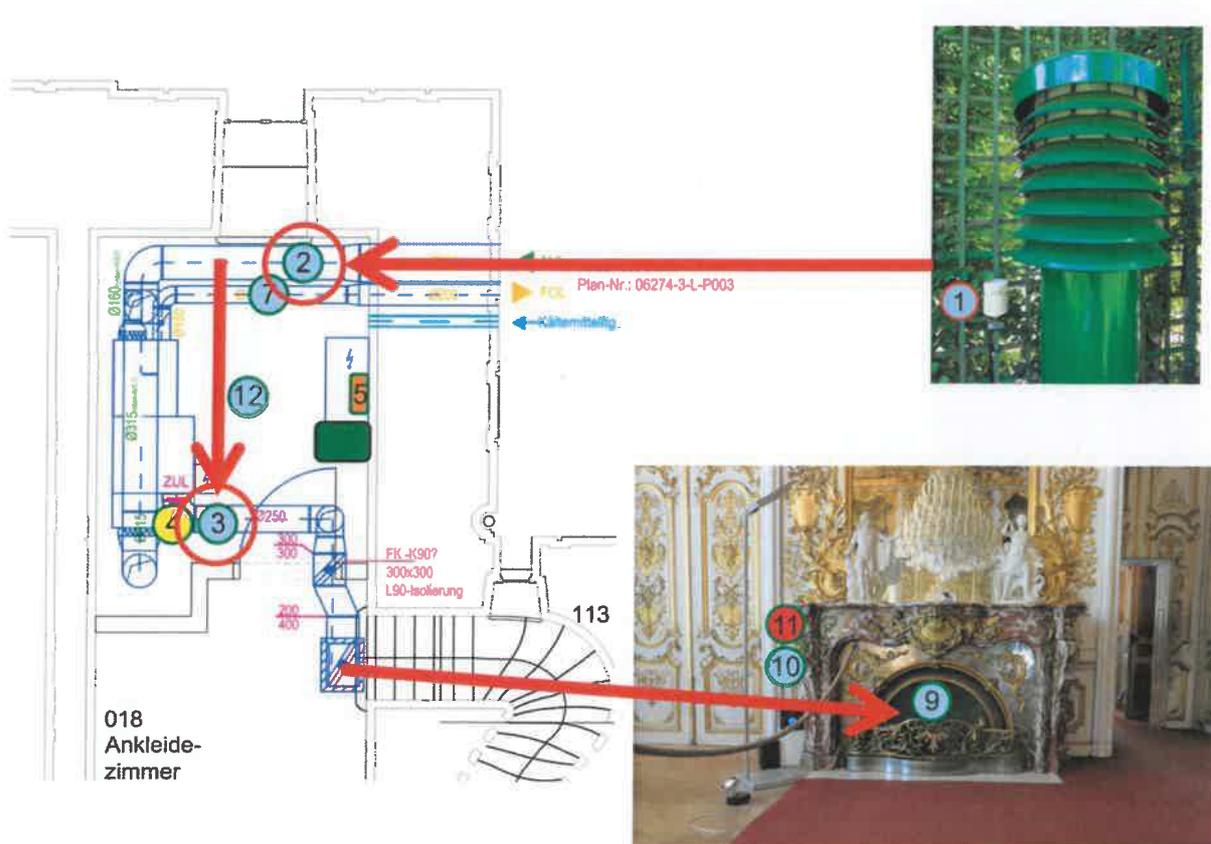


Bild 2:
Messplan Lüftungsanlage Übersicht der Hauptmesspositionen. Abgebildet sind zusätzlich der Ansaugturm mit Außenluftmessung sowie der östliche Kamin im Paradeschlafzimmer mit Messposition am Luftauslass (Nr. 9) und Raumklima (Nr. 10 und Nr. 11).

In der Fortluft des Regenerationsluftstroms des Sorptionsentfeuchters wird direkt nach dem Entfeuchter der Luftzustand mit relativer Feuchte und Temperatur erfasst (Messposition 7), sowie nach dem Erdkanal im Auslassturm (Messposition 8). Zusätzlich erfolgt die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage. Die elektrische Leistungsmessung ist aufgeteilt in Position 5 zur Erfassung der elektrischen Leistung der Anlagenteile im Schloss im Raum Ankleide (Erdgeschoss Souterrain) sowie den außen aufgestellten Anlagenteil (Rückkühleinheit) bei Messposition 6. Zusätzlich erfolgt die Messung des Raumklimas im Aufstellraum der Lüftungsanlage (Messposition 12).

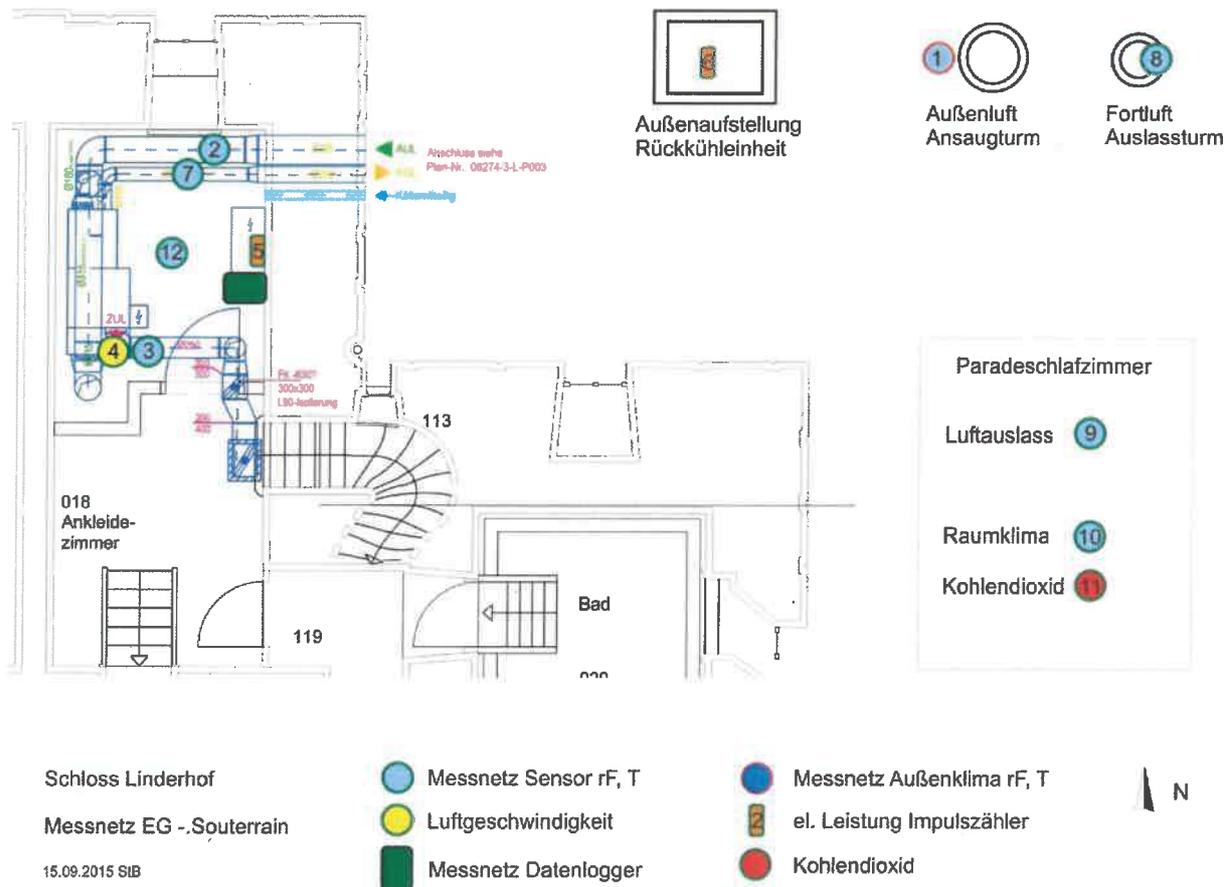


Bild 3: Messplan Lüftungsanlage Übersicht. Im Messplan sind die Messpositionen der Sensoren des Messnetzes, teilweise schematisch, eingezeichnet.

Messstellenliste

Tabelle 1:
Messstellenliste mit Nummerierung und Bezeichnung der Messposition, sowie der jeweiligen Messgröße für die Messungen an der Lüftungsanlage.

| Messnetz Nummer | Messposition | Messgröße |
|-----------------|---|-----------------|
| 1 | Außenklima am Ansaugturm | r.F./T |
| 2 | Luftzustand nach Erdkanal | r.F./T |
| 3 | Luftzustand nach Lüftungsanlage | r.F./T |
| 4 | Luftgeschwindigkeit im Zuluftrohr | m/s |
| 5 | Impulszähler Leistung Lüftungsanlage | Watt |
| 6 | Impulszähler Leistung Rückkühler | Watt |
| 7 | Luftzustand Fortluft nach Lüftungsanlage | r.F./T |
| 8 | Luftzustand Fortluft im Auslassturm nach Erdkanal | r.F./T |
| 9 | Luftzustand Zuluft Luftauslass | r.F./T |
| 10 | Raumklima Paradeschlafzimmer | r.F./T |
| 11 | Kohlendioxidgehalt Raumluft Paradeschlafzimmer | CO ₂ |
| 12 | Raumklima Ankleide (Aufstellraum Lüftungsanlage) | r.F./T |

2.2.2 Messtechnik

Die Erfassung der Messgrößen für die Untersuchungen an der Lüftungsanlage erfolgt mit einem kabelgebunden Messsystem der Firma Ahlborn. Die Datenerfassung benötigt eine kontinuierliche Stromversorgung. Wegen der erforderlichen Stromabschaltung im Schloss wurde zur Dauerstromversorgung des Datenloggers zusätzlich eine Batterie zwischengeschaltet. Dadurch ist es möglich, trotz nächtlicher Stromabschaltung eine kontinuierliche Messung durchzuführen.

Die Messdaten werden minütlich erfasst, zwischengespeichert und zweimal täglich über das Mobilfunknetz auf den Institutsserver des Fraunhofer IBP übermittelt. Die Daten werden in der IMEDAS®-Datenbank dauerhaft gespeichert und verwaltet.

Für die messtechnischen Untersuchungen der Lüftungsanlage werden folgende physikalische Größen erfasst:

- Lufttemperatur und relative Luftfeuchte
- Kohlendioxid

- Luftgeschwindigkeit (Volumenstrom)
- Elektrische Leistung

Kombisensoren für Lufttemperatur und relative Luftfeuchte

Es liegen im Allgemeinen gute Erfahrungen mit Feuchtesensoren vor, die auf dem kapazitiven Messprinzip basieren. In der Messanlage für die Lüftungsanlage sind die Sensoren Fabrikat Ahlborn (Hersteller Sensor Sensirion), Typ FHAD-46 mit einer Genauigkeit lt. Herstellerangaben von $\pm 2\%$ r.F. und ± 0.2 K für die Temperatur für den Messbereich von 10 % bis 90 % r.F. und 5 °C bis 60 °C.

Luftgeschwindigkeit (Volumenstrom)

Die Messung der Luftgeschwindigkeit im Luftkanal zur Ermittlung des Volumenstroms erfolgt mit einem Anemometer der Firma Schmidt Typ 20.260 mit einer Genauigkeit $\pm 5\%$ v. Messwert + 0,4 % vom Endwert; min. 0,02 m/s.

Kohlendioxid

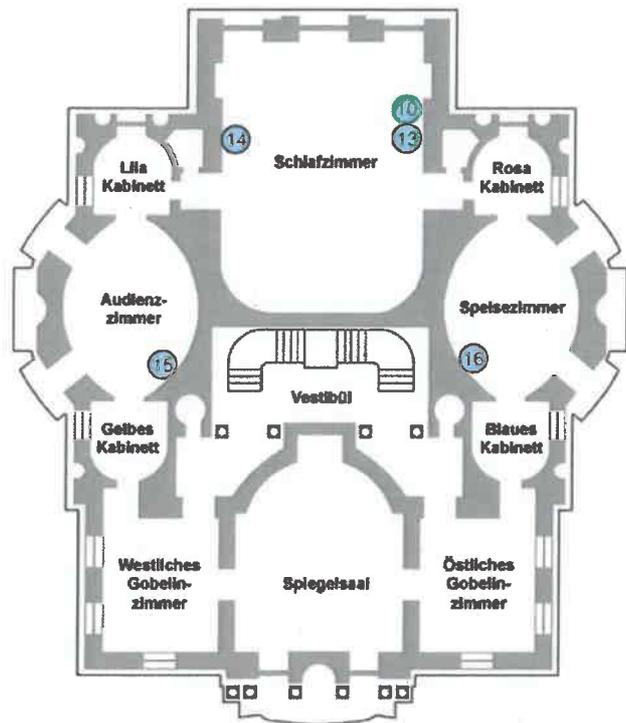
Die Messung des Kohlendioxid-Gehaltes der Raumluft erfolgt mit einem Sensor der Firma Ahlborn Typ FYAD 00-CO2B05 mit einer Genauigkeit von ± 50 ppm + 3 % vom Messwert. Erfasst wird ein minütlicher Mittelwert der in 15 Sekunden gemessenen Gaskonzentration.

Elektrische Leistung

Die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme erfolgt mit Drehstromzählern der Firma Eltako Typ DSZ12D und Firma EBA Typ Sinus Basis 65 jeweils mit Impulsausgang und einer Genauigkeit von $\pm 1\%$. (Genauigkeitsklasse B). Die Auflösung des Impulsausgangs beträgt 1000 Impulse/kWh (Messgerät Eltako) und 500 Impulse/kWh (Messgerät Sinus). Die Impulse werden über einen Ahlborn Impulszähler minütlich aufsummiert und das Summenergebnis je Minute gespeichert.

2.2.3 Messkonzept Raumklima

Zusätzlich zu den Messungen an der Lüftungsanlage mit Erfassung des angrenzenden Außen- und Raumklimas im Paradeschlafzimmer erfolgten weitere Raumklimamessungen im Aufstellraum der Lüftungsanlage (Raum Ankleide), Paradeschlafzimmer, Audienzzimmer und Speisezimmer. Die zusätzlichen Messungen im Paradeschlafzimmer erfolgen zur Beurteilung der horizontalen Raumklimaverteilung. Die Messungen in den vorgelagerten Räumen Audienz- zimmer und Speisezimmer dienen zum Vergleich der Auswirkungen der mechanischen Belüftung auf das Raumklima im Paradeschlafzimmer. Die Anordnung der Datenlogger ist in Bild 4 abgebildet. Die Bezeichnung und die Messpositionen sind in der Messstellenliste aufgeführt, siehe Tabelle 2.



Schloss Linderhof
Messnetz Obergeschoss

● Messnetz Sensor rF, T
● Datenlogger rF, T



Bild 4:
Messplan mit Übersicht der zusätzlichen Raumklimamessungen im Obergeschoss.

Messstellenliste

Tabelle 2:
Messstellenliste mit Nummerierung und Bezeichnung der Messposition, sowie der jeweiligen Messgröße für die Messungen der Raumklimata im Schloss.

| Messnetz Nummer | Messposition | Messgröße | Messgerät |
|-----------------|---|-----------|--------------|
| 10 | Paradeschlafzimmer (Kamin seitlich Ost) | r.F./T | Ahlborn |
| 13 | Paradeschlafzimmer (Kamin Ost) | r.F./T | Driesen&Kern |
| 14 | Paradeschlafzimmer (Kamin West) | r.F./T | Driesen&Kern |
| 15 | Audienz | r.F./T | Driesen&Kern |
| 16 | Speisezimmer | r.F./T | Driesen&Kern |

2.3 Auswertemethodik und Messzeiträume

Für die Auswertung, Darstellung und Bewertung der Lüftungsanlage werden aus den Messdaten weitere Größen berechnet.

Volumenstrom

Die Ermittlung des Volumenstromes erfolgt über die Messung der Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal der Lüftungsanlage, da die geräteinterne Volumenstrommessung nicht mit der installierten Messanlage ausgelesen werden kann. Mit der Luftgeschwindigkeit, der Kanalgeometrie und dem Formfaktor mit Annahme turbulenter Strömung wird der Volumenstrom berechnet. Wegen der Anordnung der Kanäle sind die erforderlichen Ein- und Ausströmlängen für ein homogenes Strömungsprofil im Luftkanal nicht gegeben. Für die korrekte Umrechnung des Volumenstromes wurde deshalb die geräteinterne Volumenstromanzeige bei unterschiedlichen Volumenströmen als Vergleichsgröße verwendet. Über eine Anpassungsfunktion kann aus der Messung der Strömungsgeschwindigkeit der Volumenstrom gemäß Geräteanzeige ermittelt werden, siehe Tabelle 3. Für die hier vorgenommenen Auswertungen und Bewertung der Lüftungsanlage wird diese Vorgehensweise als ausreichend genau angenommen. Die Abweichungen zum tatsächlichen Istwert des Volumenstroms wird mit $\pm 10\%$ vom Messwert abgeschätzt.

Tabelle 3:
Ermittlung des Volumenstroms anhand Rohrgeometrie Anpassungsfunktion und Messung der Luftgeschwindigkeit im Zuluftkanal.

| Nr. | Bezeichnung | Formel / Wert | Einheit |
|-----|-----------------------------|--------------------------------------|---------------------|
| 1 | Rohrquerschnitt $A =$ | 0,0491 | [m ²] |
| 2 | Formfaktor $f =$ | 0,8 | [-] |
| 3 | Luftgeschwindigkeit $v_L =$ | Messwert | [m/s] |
| 4 | Korrekturkurve $v_L' =$ | $0,1134 v_L^2 - 0,9842 v_L + 3,3249$ | [m ³ /h] |
| 5 | Volumenstrom $V =$ | $v_L' * A * f$ | [m ³ /h] |

Die Ermittlung des Volumenstroms erfolgt im Zuluftkanal, d. h. nach der Lüftungsanlage. Im Außenluftkanal (Erdkanal vor der Lüftungsanlage) wird eine um 400 m³ größere Außenluftmenge angesaugt. Die Luftmenge von 400 m³ wird für den Regenerationskreislauf benötigt und über die Fortluft wieder abgeführt. Für die Abschätzung der Massenströme im Erdkanal wird deshalb zu dem ermittelten Zuluftvolumenstrom 400 m³ als konstanter Wert addiert.

Absoluter Feuchtegehalt der Luft

Der absolute Feuchtegehalt der Luft wird für die Raumluft in g/m³ aus der gemessenen relativen Luftfeuchte und Lufttemperatur berechnet. Für die Ermitt-

lung der Massenströme ist die Berechnung der absoluten Feuchte in g/kg trockener Luft erforderlich. Die Unterscheidung der beiden Größen erfolgt mit der Kurzbezeichnung aF für die absolute Feuchte bezogen auf das Raumluftvolumen (m^3) in g/m^3 und mit xF für die absolute Feuchte bezogen auf den Massestrom (kg) in g/kg bzw. in kg/kg. Es werden die einschlägig bekannten Formeln für die Luftzustandsberechnung aus Recknagel/Sprenger [1] verwendet.

Ohne Entfeuchtung durch die Lüftungsanlage oder durch den Erdkanal kann sich der absolute Feuchtgehalt der Luft entlang der Lüftungskanäle nicht verändern. Dadurch ist es möglich den Messwert der absoluten Feuchte der Sensoren untereinander abzugleichen. Die festgestellten Abweichungen liegen deutlich unter der maximal möglichen Abweichung der angegebenen Genauigkeit der Sensoren. Die Werte der Sensoren wurden für die Ermittlung des Massestroms um die festgestellte Abweichung zueinander korrigiert. Die berechneten absoluten Feuchtwerte wurden um die in Tabelle 4 angegebenen Korrekturwerte angepasst.

Tabelle 4:

Messstellenliste mit Nummerierung und Bezeichnung der Messposition, sowie der jeweiligen Messgröße für die Messungen der Raumklimata im Schloss.

| Messnetz Nummer | Messposition | Korrektur absolute Feuchte xF [g/kg] | Korrektur Enthalpie der Feuchte xF [kJ/kg tr. Luft] |
|-----------------|--|--------------------------------------|---|
| 2 | Luftzustand nach Erdkanal | + 0,4 | + 1,0 |
| 3 | Luftzustand nach Lüftungsgerät | 0 | 0 |
| 7 | Luftzustand Fortluft nach Lüftungsanlage | + 0,6 | 0 |
| 8 | Luftzustand Fortluft im Auslassturm | 0 | 0 |
| 9 | Luftzustand Zuluft Luftauslass | 0 | 0 |
| 10 | Luftzustand Parade-schlafzimmer | 0 | 0 |

Massestrom

Die Angaben des Luftmassenstroms erfolgen in m^3/h Luftvolumen sowie in kg/h trockene Luft für die Berechnung des Energieinhalts der Luft. Es werden die bekannten Formeln für die Luftzustandsberechnung aus Recknagel/Sprenger bzw. VDI Wärmeatlas [1, 2] verwendet.

Enthalpie des Luftzustandes und Enthalpieänderung (Energieinhalt)

Die Berechnung der Zustandsänderung der Luft wird über den berechneten Energieinhalt (Enthalpie) der Luft an der jeweiligen Messstelle ermittelt. Die Differenz der Enthalpie der Luft z. B. vor der Lüftungsanlage und nach der Lüftungsanlage ergibt die Enthalpieänderung, die durch die Lüftungsanlage erreicht wird. Anhand der Enthalpieänderung und dem Massestrom wird die thermodynamische Leistung der Lüftungsanlage und des Erdkanals berechnet. Es werden die Formeln für die Luftzustandsberechnung aus Recknagel/Sprenger [1] verwendet.

Auswertbare Laufzeiten der Lüftungsanlage

Der erste Probelauf der Lüftungsanlage erfolgte im Oktober 2015. Ab dem 10. November 2015 bis zum 9. Juni 2016 wurde im Probetrieb eine Grundlüftung mit minimalem Luftvolumenstrom ohne Entfeuchtung durchgeführt. Die Lüftungsanlage nahm am 27. Juli 2016 den Regelbetrieb auf. Am 25. August 2016 trat eine Störung auf, die durch Wassereintritt im Erdkanal verursacht wurde. Nach Leerpumpen des Erdkanals, Behebung der Ursache und Einbau von Pumpen zur geregelten Beseitigung von anfallendem Wasser wurde der Betrieb erneut aufgenommen. Der zweite auswertbare Zeitraum begann am 1. Februar 2017 und endete mit dem Ausfall der Anlage aufgrund eines defekten elektrischen Bauteils am 13. Juni 2017, wobei die Kühleinheit gemäß Aufzeichnung der elektrischen Leistungsaufnahme bereits am 19. Mai 2017 ausfiel.

Dauer der Aufzeichnung der Messdaten

Die Messanlage hat ohne nennenswerte Messausfälle zuverlässig aufgezeichnet. Am 1. Februar 2017 und am 25. Februar 2017 ereignete sich ein Messausfall sowie im Zeitraum vom 3. bis 9. März 2017. Die im weiteren gezeigten Graphen mit Darstellung der Datenauswertung weisen zum Teil größere Lücken auf. Zu diesen Zeiten war die Lüftungsanlage außer Betrieb. Die Messanlage wurde am 10. September 2015 in Betrieb genommen und zeichnet seit dem die Messdaten auf. Die Messdaten werden in diesem Bericht in der Regel vom 1. Juli 2016 bis zum 1. Juli 2017 dargestellt. Für einzelne Messpositionen erfolgt die Darstellung vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 bzw. bis zum 1. November 2017.

2.4 Betrieb Lüftungsanlage – Besucher und Kohlendioxidgehalt

2.4.1 Elektrische Leistungsaufnahme (Messposition 5, 6)

Bild 5 zeigt die elektrische Leistungsmessung für die Lüftungsanlage mit Aufstellereinheit im Erdgeschoss (Souterrain) im Raum Ankleide sowie für den Aufstellort der Rückkühleinheit außerhalb des Schlosses. Beide Leistungsmessungen addiert, ergeben die gesamte elektrische Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage. Die im ersten Betriebszeitraum im August 2016 aufgenommene elektrische Leistung ist deutlich höher als im Zeitraum Februar bis Juni 2017.

Die maximale gesamte Leistungsaufnahme wurde am 30. Juli 2016 mit rund 16 kW erreicht. Außerhalb der Betriebszeiten ist die Stromaufnahme der Lüftungsanlage null. Lediglich bei Öffnung des Schlosses erfolgt mit der Stromaufschaltung eine kurze Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage im Erdgeschoss. Für die Rückkühleinheit mit Außenaufstellung erfolgt keine Stromabschaltung außerhalb der Öffnungszeiten des Schlosses. Die permanente Stromaufnahme im Bereitstellungsmodus des Rückkühlers liegt bei rund 0,16 kW.

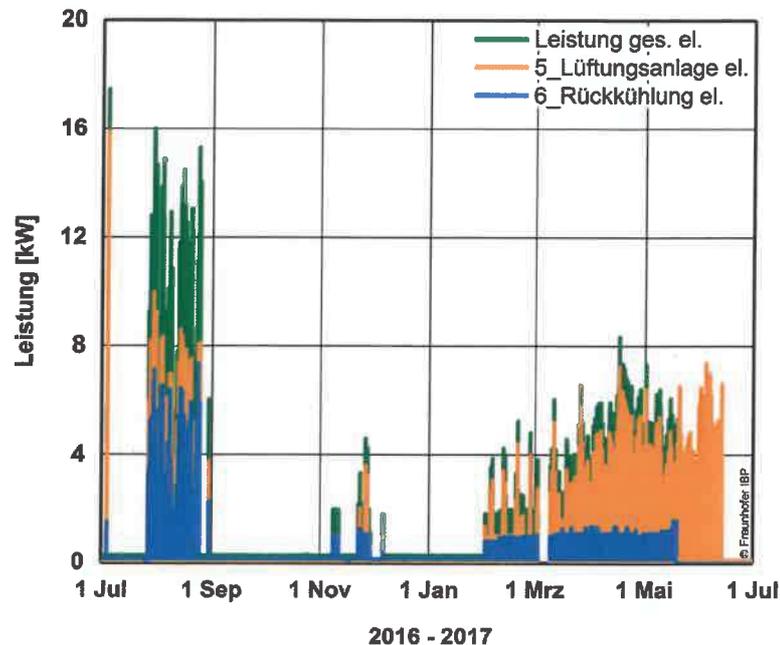


Bild 5:
Stundenmittelwerte der elektrischen Leistungsaufnahme der Lüftungsanlage und Rückkühleinheit für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

2.4.2 Volumenstrom (Messposition 3)

Die Übersicht in Bild 6 zeigt den Verlauf des Volumenstroms im Zuluftkanal, der anhand der gemessenen Luftgeschwindigkeit unter Berücksichtigung der Rohrgeometrie, für den Zeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 ermittelt wurde. Der Luftvolumenstrom zeigt dabei die tatsächlichen Betriebszeiten der Lüftungsanlage an. Im Zeitraum von November 2015 bis Anfang Juni 2016 wurde eine minimale Belüftung ohne Entfeuchtung der Frischluft durchgeführt. Die erste Inbetriebnahme mit geregelter Entfeuchtungsbetrieb erfolgte ab dem 27. Juli 2016 und endete am 26. August 2016. Nach der Behebung eines Wassereintrittes am Lüftungskanal durch undichte Abdeckungen und Einbau von Kondensatpumpen erfolgte die zweite geregelte Inbetriebnahme ab dem 1. Februar 2017 bis zum 13. Juni 2017. Bild 7 zeigt den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017. Der Luftvolumenstrom wird gemäß der Gerätesteuerung geregelt. Gut zu erkennen sind die am Wochenende erhöhten Luftvolumenströme sowie die saisonal angepassten Luftmengen entsprechend den Vorgaben.

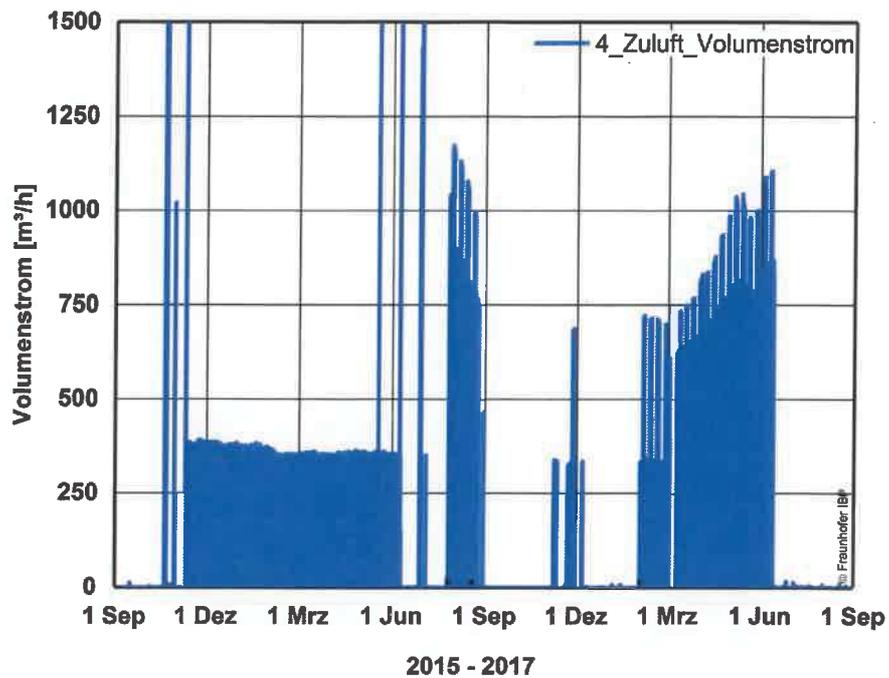


Bild 6:
 Aus der Luftgeschwindigkeitsmessung an der Messposition 4 für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 berechneter Volumenstrom mit stündlichen Mittelwerten.

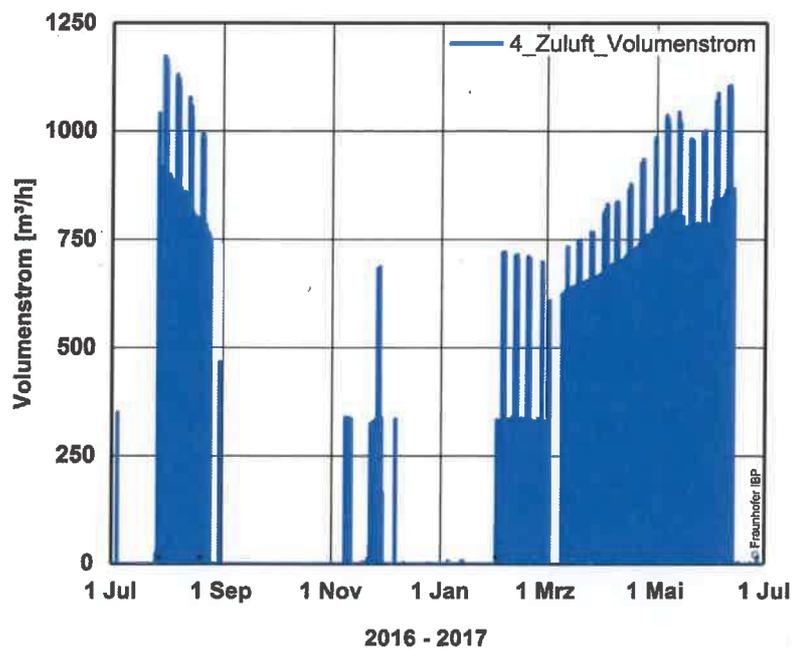


Bild 7:
 Aus der Luftgeschwindigkeitsmessung an der Messposition 4 für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 berechneter Volumenstrom mit stündlichen Mittelwerten.

2.4.3 Kohlendioxidgehalt im Paradeschlafzimmer (Messposition 11)

Der Kohlendioxidgehalt wird im Paradeschlafzimmer auf der Seite des östlichen Kamins auf einer Höhe von ca. 0,5 m gemessen. In Bild 8 ist der gesamte erfasste Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet. Bild 9 zeigt den Verlauf des Kohlendioxidgehaltes für den Jahreszeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017. In den Diagrammen sind die Zeiträume mit den Laufzeiten der Lüftungsanlage mit eingetragen. Durch Vergleich des Zeitraums zwischen 1. Februar und 13. Juni 2017 mit Betrieb der Lüftungsanlage mit der gleichen Vorjahresperiode ohne Lüftungsanlage wird ersichtlich, dass sich mit Betrieb der Lüftungsanlage im Mittel ein etwas niedriger Kohlendioxidgehalt der Raumluft einstellt. Die Senkung des Kohlendioxidgehaltes der Raumluft ist gegenüber der Feuchtestabilisierung jedoch nachrangig.

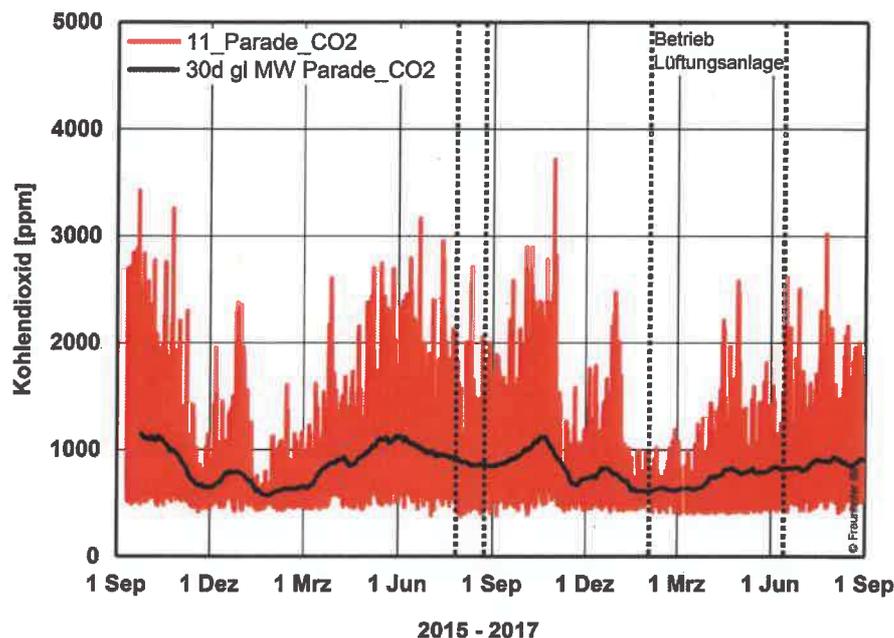


Bild 8:
Kohlendioxidgehalt im Paradeschlafzimmer an der Messposition 11 für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten und gleitendem Monatsmittelwert der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die beiden Laufzeiten der Lüftungsanlage.

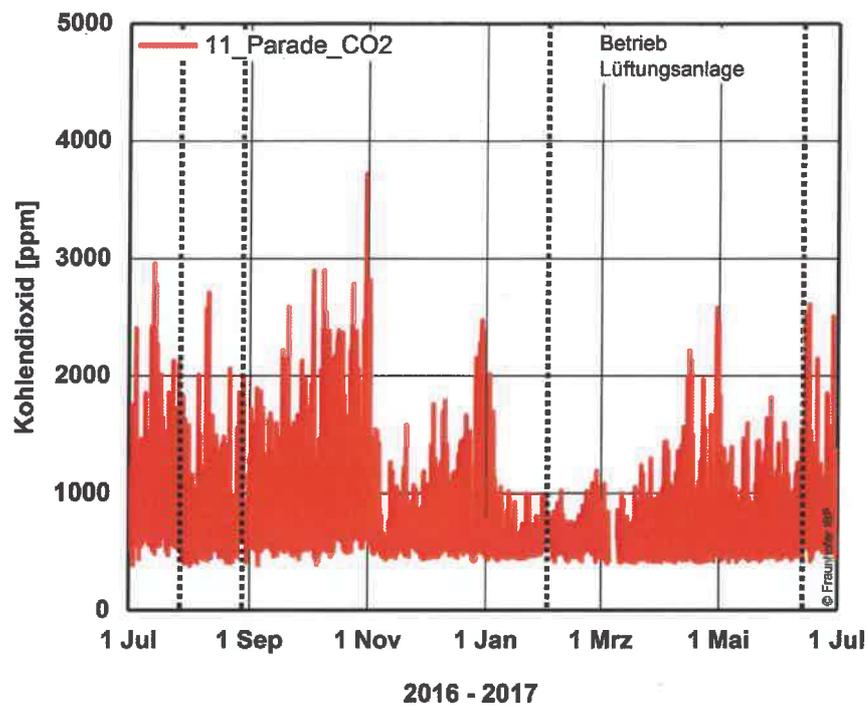


Bild 9:
Kohlendioxidgehalt im Paradeschlafzimmer an der Messposition 11 für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die beiden Laufzeiten der Lüftungsanlage.

2.4.4 Besucherzahlen

Der Einfluss der Besucher als Feuchte- und Wärmequelle auf das Raumklima wurde in vorangegangenen Untersuchungen [3, 4, 5] nachgewiesen und bewertet. Für die Auswertung der Messdaten werden teilweise die Besucherzahlen mit dargestellt. Bild 10 zeigt den Verlauf der täglichen Besucherzahlen für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017. Es zeigt sich für diesen Zeitraum ein typischer Verlauf mit den meisten Besuchern im August und den wenigsten Besuchern im Januar.

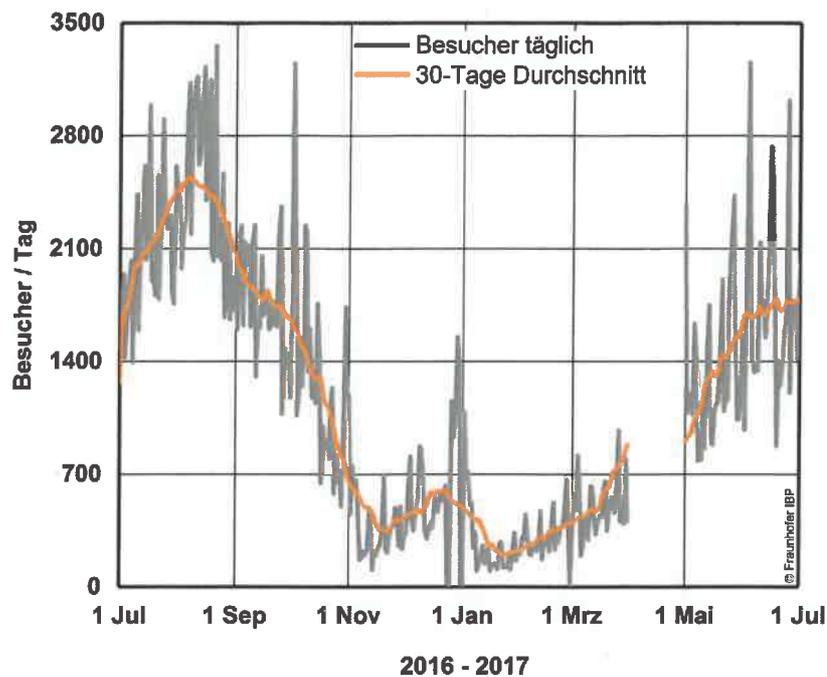


Bild 10:
Tägliche Besucherzahlen im Schloss Linderhof anhand der verkauften Tagestickets für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

2.4.5 Besucher – Kohlendioxidgehalt – Lüftungsbetrieb

In Bild 11 ist der Volumenstrom der Lüftungsanlage sowie der Kohlendioxidgehalt der Raumluft abgebildet. Mit der rechteckigen Markierung ist die erste Betriebsperiode umgrenzt. In Bild 12 ist aus dieser ersten Periode die Woche vom 7. bis 13. August 2016 mit zeitlich höherer Auflösung abgebildet. Zusätzlich sind die täglichen Besucherzahlen im unteren Diagramm mit eingetragen. Aus dem Volumenstrom der Lüftungsanlage ist die tägliche Laufzeit mit Einschalt- und Abschaltzeitpunkt erkennbar. Die senkrechten gepunkteten Linien verdeutlichen den Abschaltzeitpunkt um ca. 15.30 Uhr, der deutlich vor dem Ende der Besuchszeit um 18.00 Uhr liegt. Die Kohlendioxidkonzentration steigt nach dem Abschalten der Lüftungsanlage an zwei Tagen besonders stark an und an dem dritten markierten Tag etwas weniger stark. Die Besucherzahlen liegen nur als Tagessumme vor. Ob sich besonders viele Besucher in den Nachmittagsstunden im Schloss befinden, geht daraus nicht hervor. Anhand der stark ansteigenden Kohlendioxidgehalte kann aber vermutet werden, dass an diesen Tagen nachmittags mehr Besucher anwesend waren als an den anderen Tagen mit geringerem Anstieg der Besucherzahlen. Ein weiterer möglicher Einfluss auf den Kohlendioxidgehalt ist durch wechselnde Infiltrationsraten durch Außenluft bei unterschiedlichen klimatischen Außenbedingungen gegeben.

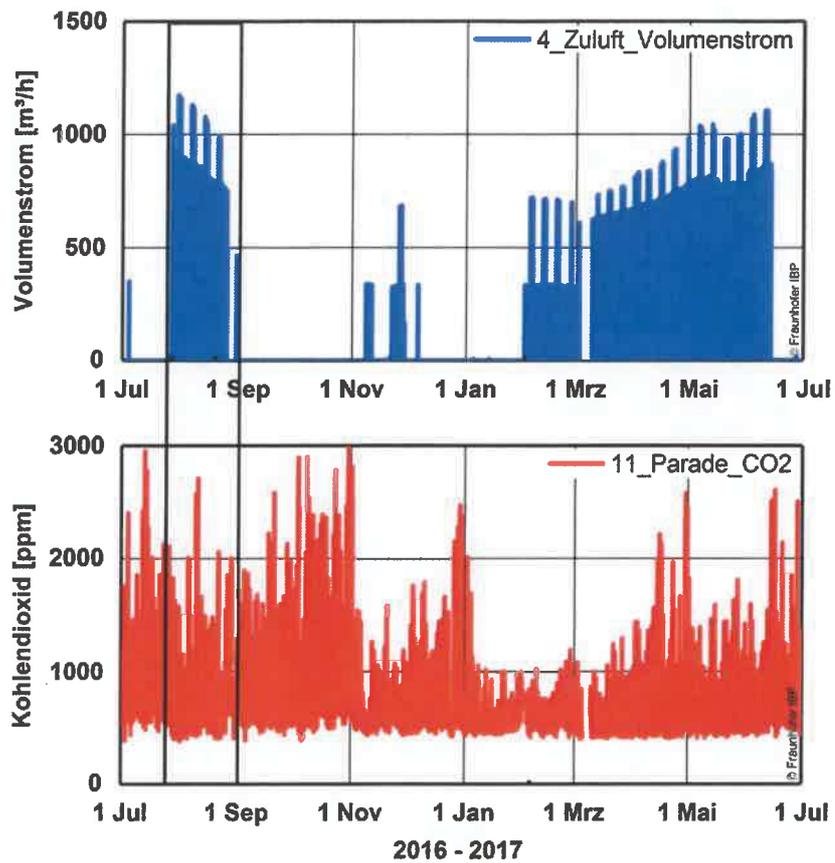


Bild 11:
 Volumenstrom der Lüftungsanlage (oben) sowie Kohlendioxidgehalt (unten) im
 Paradeschlafzimmer an der Messposition 11 für den Messzeitraum vom 1. Juli
 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte.

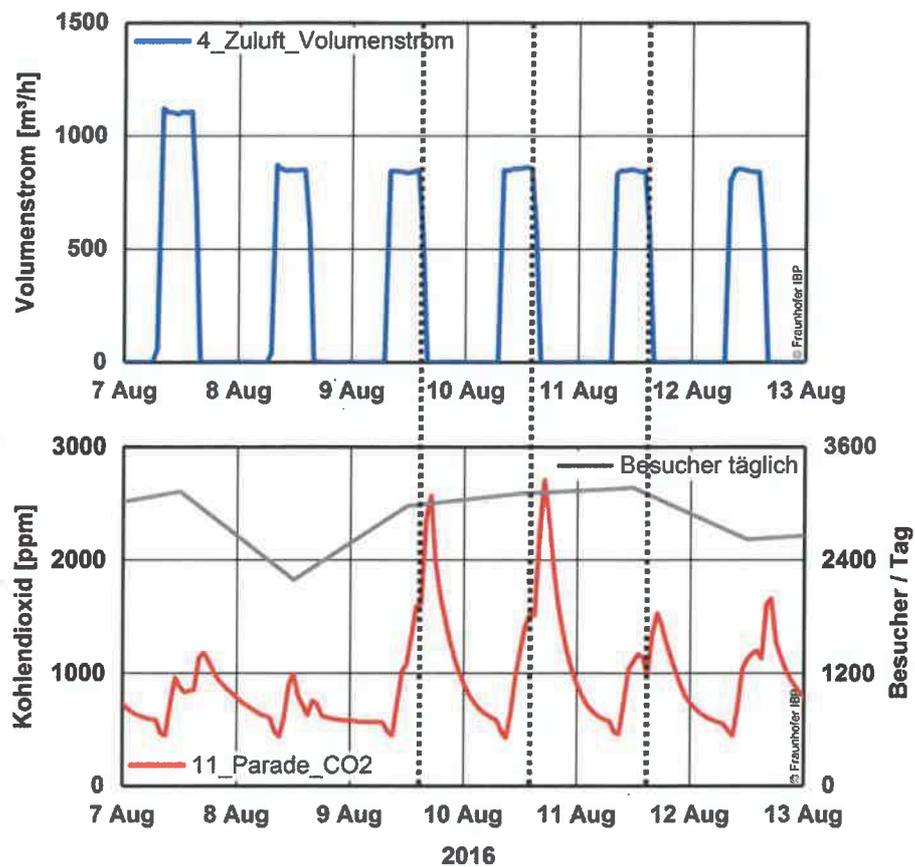


Bild 12:
Kohlendioxidgehalt (unten) im Paradeschlafzimmer an der Messposition 11 für den Messzeitraum vom 7. bis 13. August 2016 und Zuluft-Volumenstrom (oben) der Lüftungsanlage. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren exemplarisch jeweils die tägliche Abschaltung der Lüftungsanlage und damit einhergehend die Abschaltung des Volumenstroms.

2.5 Auswertung Klima-Messdaten Lüftungsanlage

2.5.1 Außenluft am Ansaugturm (Messposition 1)

Das Außenluftklima wird am Ansaugturm für die Lüftungsanlage auf einer Höhe von ca. 2,5 m gemessen. Erfasst werden die relative Feuchte und die Lufttemperatur. Mit im Diagramm dargestellt ist die berechnete absolute Feuchte. In Bild 13 ist der gesamte erfasste Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet. Bild 14 zeigt den Verlauf der Messwerte für den Jahreszeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

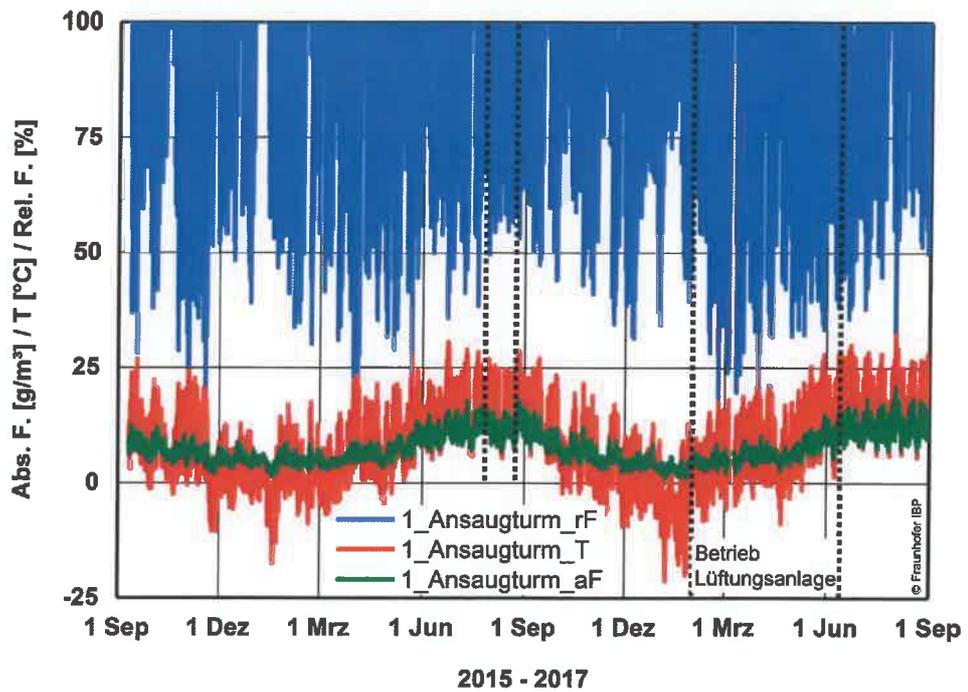


Bild 13:
Außenluft am Ansaugturm an der Messposition 1 für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

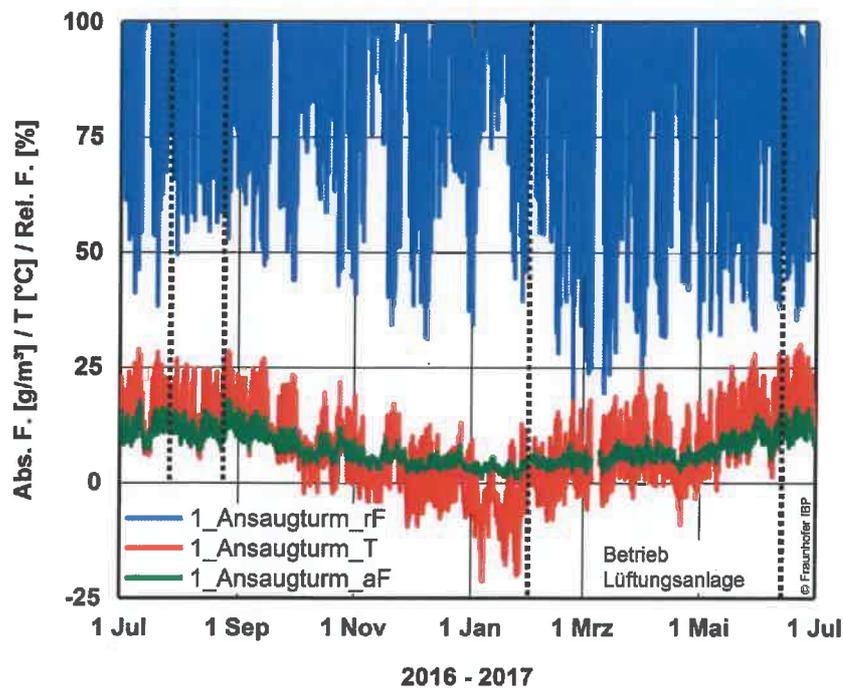


Bild 14:
Außenluft am Ansaugturm an der Messposition 1 für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

2.5.2 Abschnitt Erdkanal (Messposition 1 und 2)

An der Messposition 2 wird der Luftzustand nach dem Erdkanal (= vor der Lüftungsanlage) erfasst. Durch Vergleich des Luftzustandes an dieser Messposition mit dem der Außenluft kann die Wirkung des Erdkanals abgeschätzt werden. Bild 15 zeigt im oberen Diagramm den Temperaturverlauf im Rohr nach dem Erdkanal (der Rohrabschnitt ist bereits im Aufstellraum) sowie die Außenlufttemperatur am Ansaugstutzen. Im unteren Diagramm ist die Temperaturdifferenz mit Tagesmittelwert während des Betriebes der Lüftungsanlage abgebildet. Durch den Erdkanal wird die Außenluft teilweise um mehr als 10 °C erwärmt oder gekühlt. Im Tagesmittel wird die Lufttemperatur durch den Erdkanal über die tägliche Laufzeit um bis zu ca. 3 °C erwärmt oder um bis zu ca. 6 °C gekühlt. Im Ergebnis wird der stark schwankende Tagesgang der Lufttemperatur durch den Erdkanal deutlich gedämpft.

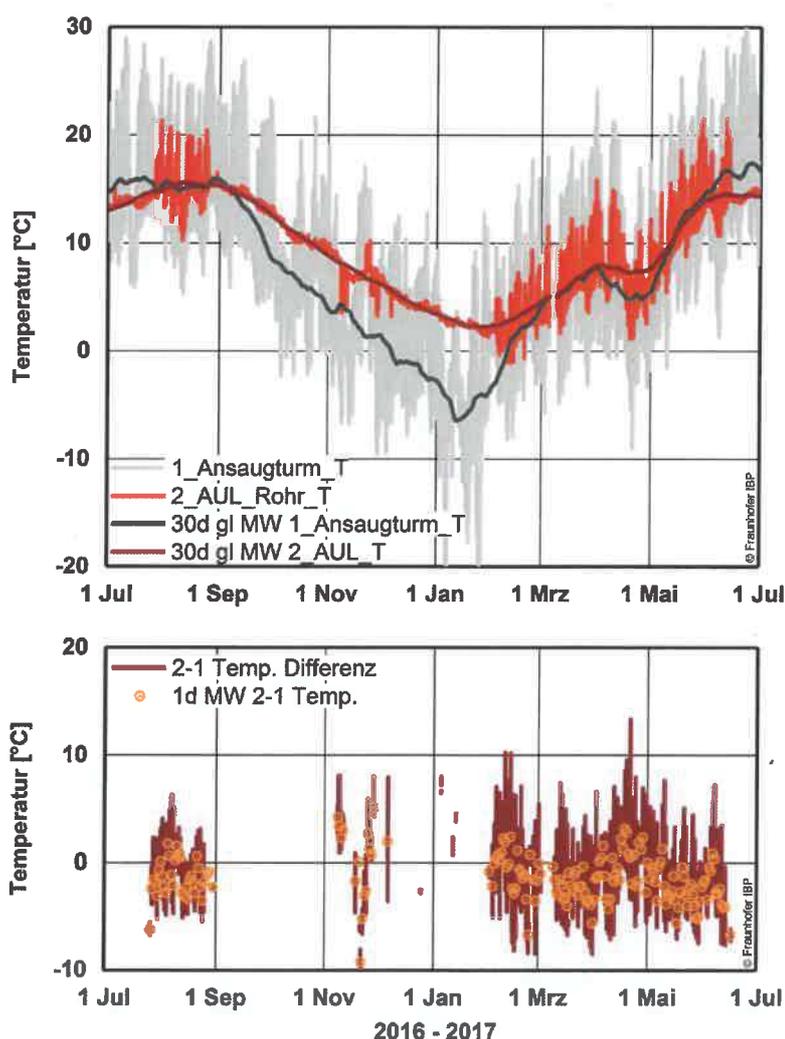


Bild 15:
Lufttemperatur außen und nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T) (oben) sowie die Temperaturdifferenz (unteres Diagramm). Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten, gleitendem Monatsmittel und Tagesmittelwert der Temperaturdifferenz.

In Bild 16 sind die Graphen zeitlich höher aufgelöst für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 abgebildet. Zusätzlich ist hier der Temperaturverlauf während des Anlagenbetriebes rot markiert. Die dämpfende Wirkung des Erdkanals gegenüber des Tagesganges der Außenlufttemperatur ist offensichtlich. Im unteren Diagramm ist der Differenzgraph zwischen der Prozessluft nach dem Erdkanal (2_AUL_T Betrieb) und der Außenluft (1_Ansaugturm) abgebildet. Der positive Bereich zeigt eine Erwärmung der Außenluft durch den Erdkanal an, der negative Bereich eine Kühlung der Außenluft. Durch den stark ausgeprägten Tagesgang der Außenluft sowie durch den intermittierenden Betrieb der Lüftungsanlage erwärmt sich die zunächst kühle Außenluft in den Morgenstunden durch das warme Erdreich. Mit Anstieg der Außentemperaturen im Verlauf des Tages wird die Außenluft durch das Erdreich gekühlt. An kühlen Tagen wie z. B. am 5. oder 10. August wird die Außenluft während der Betriebszeit nur erwärmt. Der Differenzgraph liegt für diesen Tag nur im positiven Zahlenbereich.

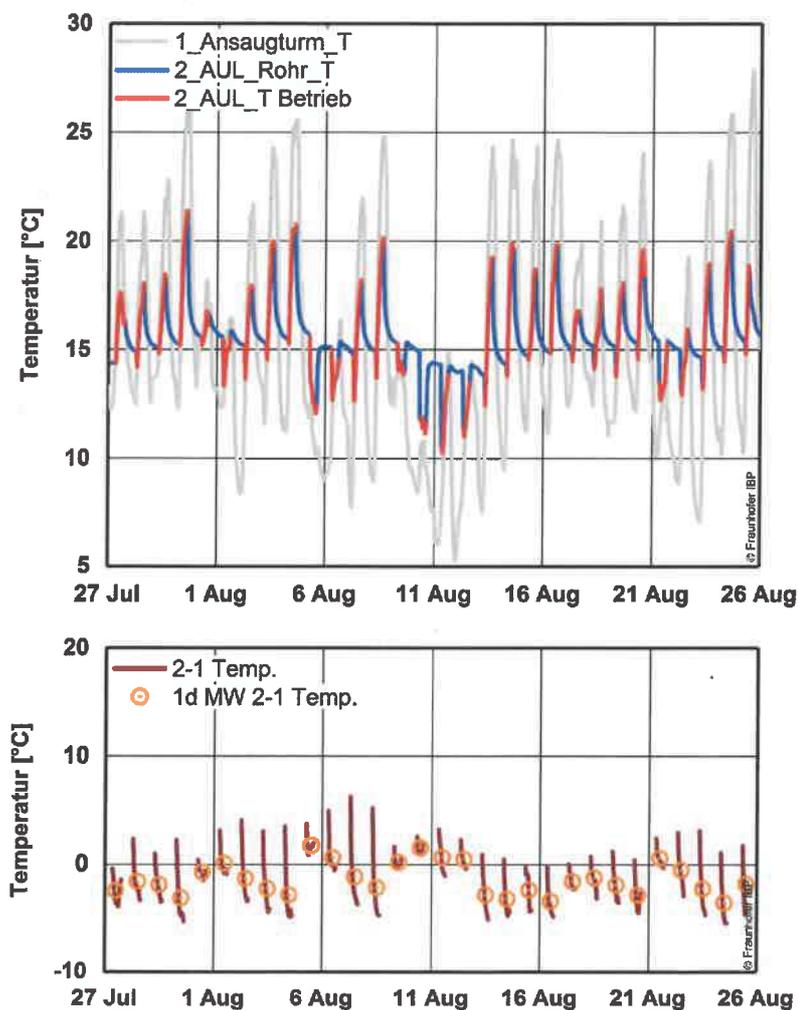


Bild 16:
 Lufttemperatur außen und nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T) (oben). Die Betriebszeiten der Anlage sind rot markiert. Im unteren Diagramm ist die Temperaturdifferenz der beiden Messstellen während der Betriebszeit abgebildet.

det. Messzeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten, gleitendem Monatsmittel und Tagesmittelwert der Temperaturdifferenz.

In Bild 17 ist die relative Feuchte an der Messstelle 2 nach dem Erdkanal für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 abgebildet. Die relative Feuchte ist für die Betriebszeiten an denen die Lüftungsanlage läuft hellblau markiert. Die dunkelblauen Verläufe geben den Zustand im Lüftungsrohr bei ruhender Luft (Volumenstrom Null) wieder. Im ersten Betriebszeitraum im August 2016 sind die relativen Feuchten auf einem höheren Niveau im Vergleich zum zweiten Betriebszeitraum ab Februar bis Juni 2017. Bild 18 zeigt den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 in höherer zeitlicher Auflösung. Der Tagesgang der relativen Feuchte schwankt um 15 % r.F. bis 30 % r.F. Die Werte reichen von etwas über 60 % r.F. bis 100 % r.F.

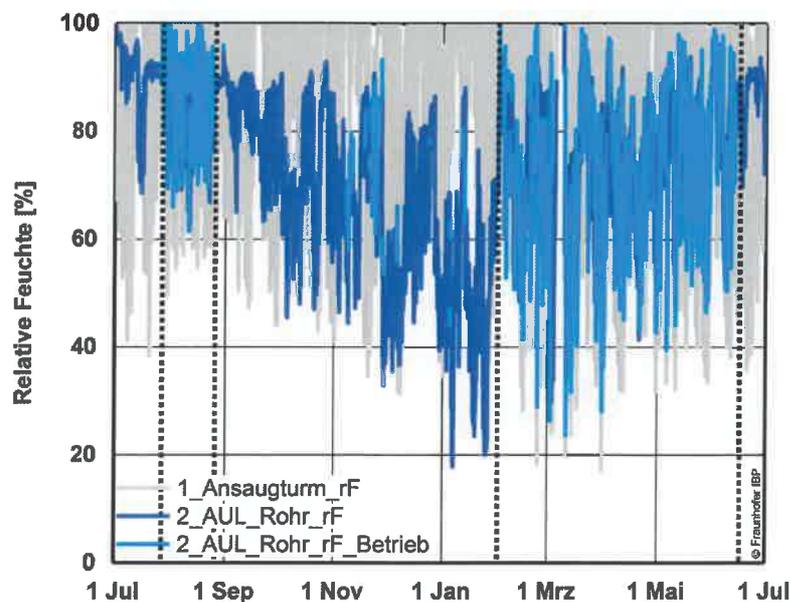


Bild 17:
Relative Feuchte nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T). Die Betriebszeiten der Lüftungsanlage sind hellblau markiert. Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

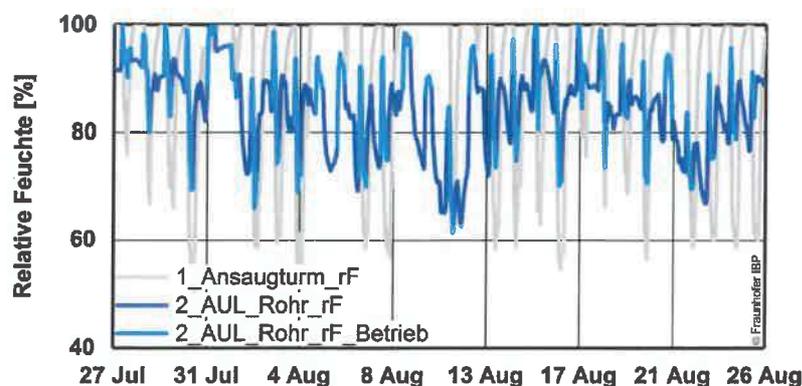


Bild 18:
Relative Feuchte nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T). Die Betriebszeiten der

Lüftungsanlage sind hellblau markiert. Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten.

Bild 19 zeigt den Verlauf der absoluten Feuchte nach dem Erdkanal und die der Außenluft sowie die Differenz der absoluten Feuchte für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 und Bild 20 für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016. Der Verlauf der absoluten Feuchte wird durch den Erdkanal etwas gedämpft. Mit Hochfahren der Lüftungsanlage wird die Luft durch den Erdkanal zum Teil etwas befeuchtet und wird dann mit Anstieg des Feuchtegehalts der Außenluft im Tagesgang etwas entfeuchtet.

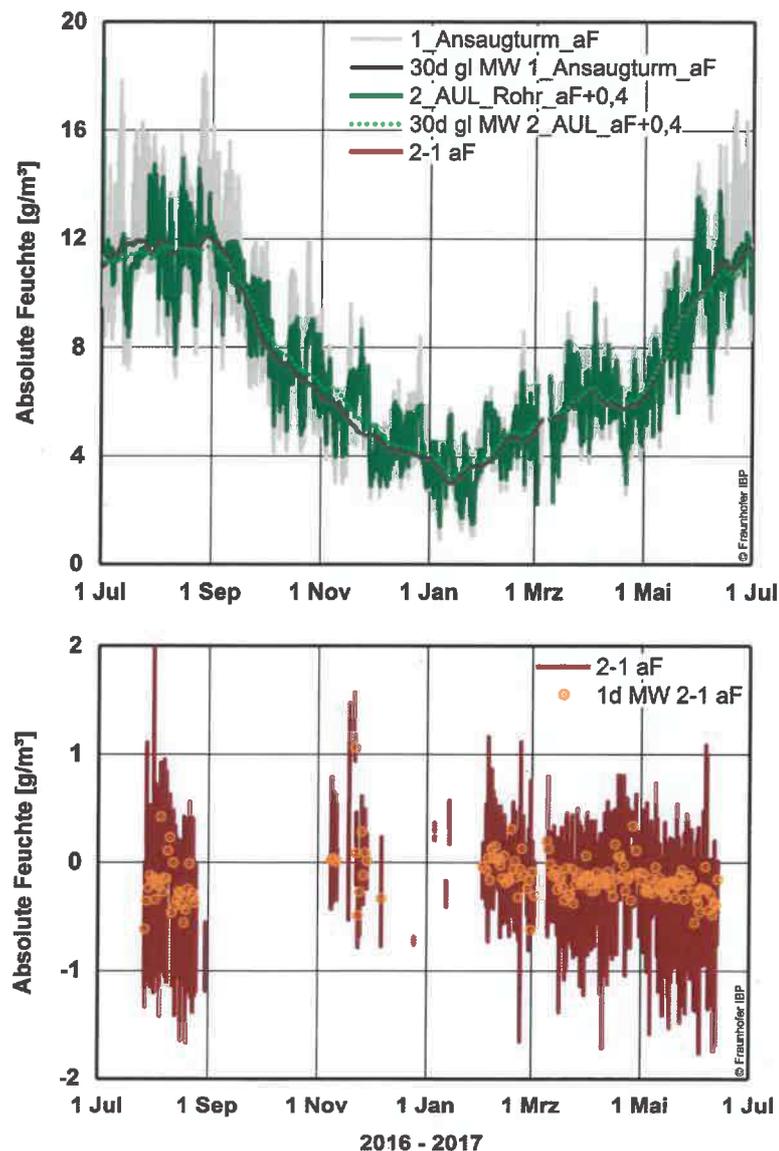


Bild 19:

Absolute Feuchte außen und nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T) (oben). Die Feuchtedifferenz zwischen den beiden Messstellen (2-1_aF) (unten) ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten, gleitendem Monatsmittel und Mittelwert der Feuchtedifferenz für die tägliche Laufzeit.

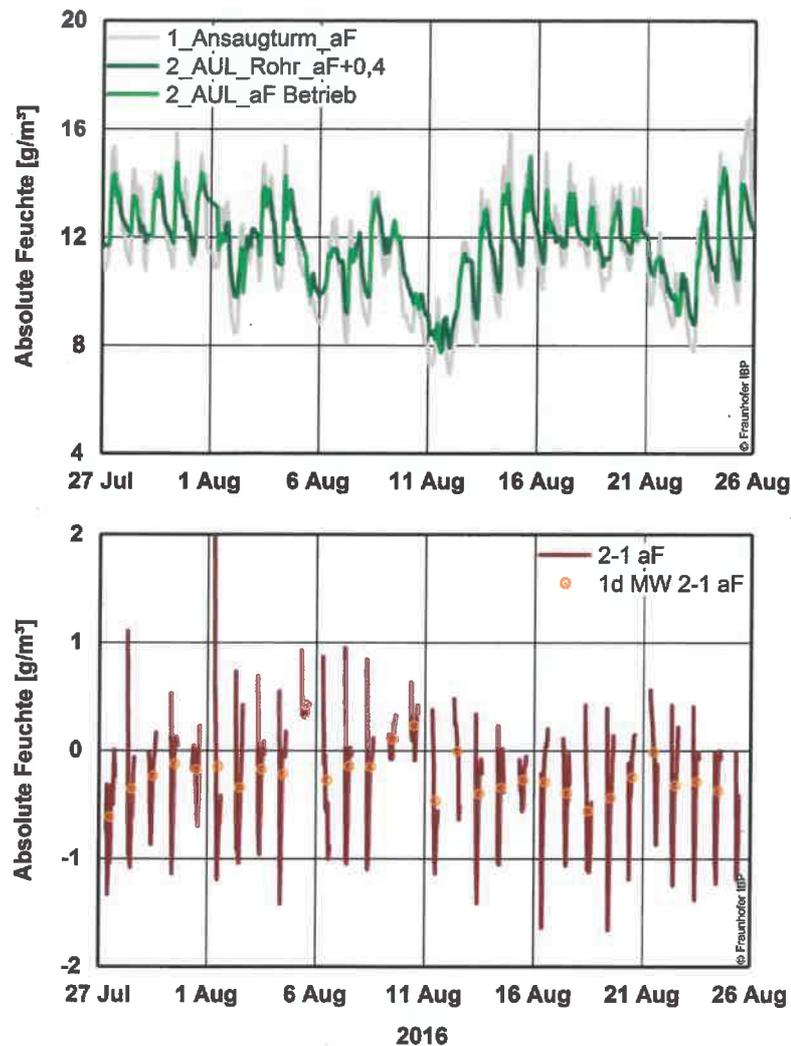


Bild 20:

Feuchtedifferenz außen und nach dem Erdkanal (2_AUL_Rohr_T) (oben). Die Betriebszeiten der Anlage sind hellgrün markiert. Die Feuchtedifferenz zwischen den beiden Messstellen (unten) ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten und Mittelwert der Feuchtedifferenz für die tägliche Laufzeit.

Der Erdkanal hat in der kalten Jahreszeit keine bis geringe luftentfeuchtende Wirkung, die in der warmen Jahreshälfte etwas zunimmt. In Bild 21 ist die Differenz des Feuchtestroms abgebildet. Dieser ergibt sich aus dem Massestrom der Luft multipliziert mit der Feuchtedifferenz der Außenluft zur Messstelle 2 nach dem Erdkanal, berechnet in kg Wasser pro Stunde. In dem unteren Diagramm ist der Massestrom der Feuchte kumuliert abgebildet. Für die Laufzeit der Lüftungsanlage ergibt sich eine Entfeuchtungsleistung für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 von ca. 66 kg Wasser und für den Zeitraum vom 1. Februar bis 13. Juni 2017 von ca. 156 kg Wasser.

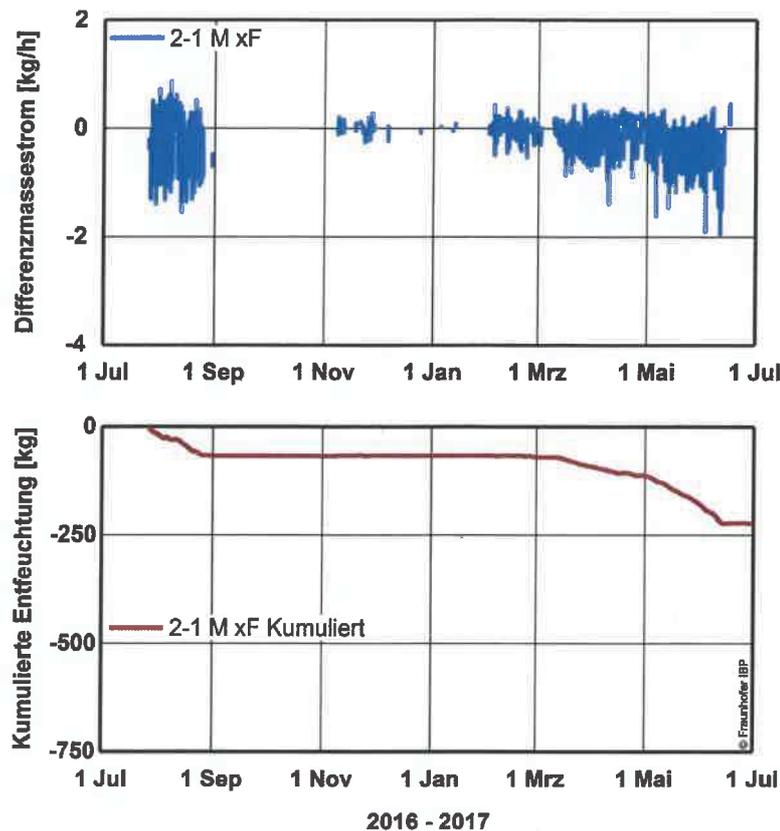


Bild 21:
Differenz-Massestrom der Feuchte durch den Erdkanal (oberes Diagramm). Der Differenz-Massestrom ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Im unteren Diagramm ist der Differenz-Massestrom kumuliert abgebildet. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

2.5.3 Abschnitt Lüftungsanlage (Messposition 2 und 3)

An der Messposition 3 wird der Luftzustand nach der Lüftungsanlage erfasst. Im Vergleich des Luftzustandes vor der Lüftungsanlage (Messposition 2) kann die Wirkung der Lüftungsanlage abgeschätzt werden. Bild 22 zeigt im oberen Diagramm den Temperaturverlauf im Rohr nach der Lüftungsanlage (3_Zuluft), vor der Lüftungsanlage (2_AUL) sowie die Außenlufttemperatur am Ansaugstutzen. Im unteren Diagramm ist die Temperaturdifferenz mit Tagesmittelwert während des Betriebes der Lüftungsanlage abgebildet. Durch die Lüftungsanlage wird die Außenluft (2_AUL) im August 2016 um ca. ± 4 °C erwärmt oder gekühlt, im Tagesmittel sind die Werte geringer mit bis zu 2 °C Abkühlung und bis zu 4 °C Erwärmung. Ab Februar bis Juni 2017 wird die Außenluft (2_AUL) nur noch um ca. 5 °C bis teilweise um 10 °C erwärmt. Im Tagesmittel ergeben sich geringere Werte zwischen ca. 1 bis 8 °C.

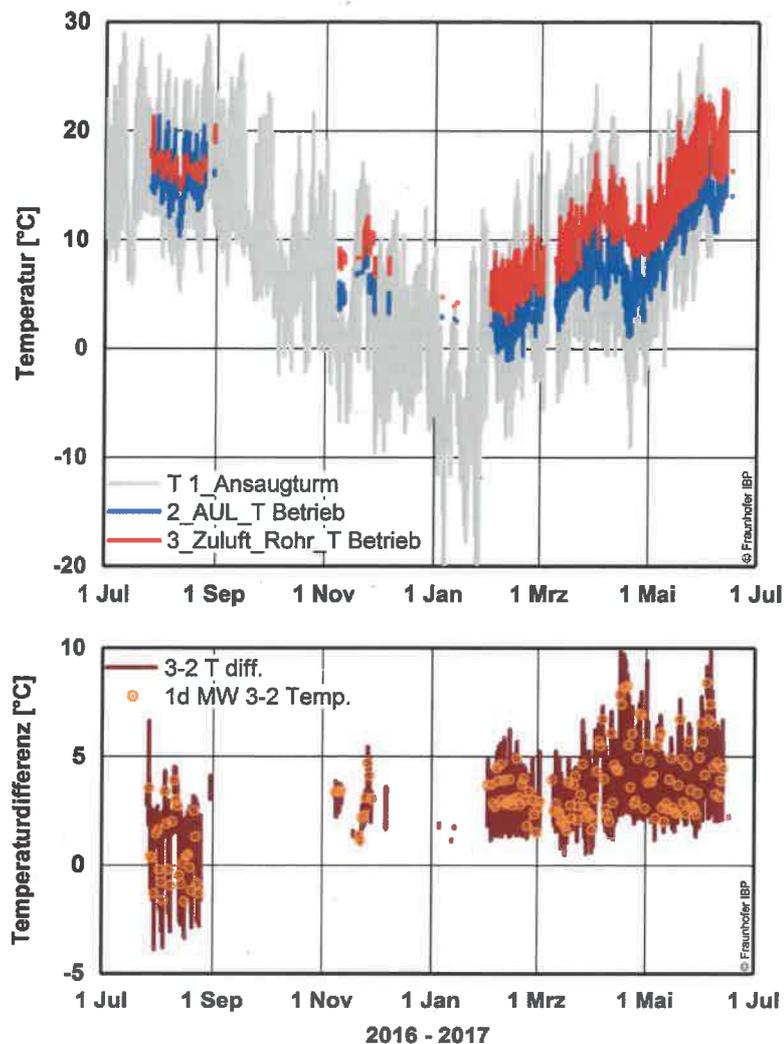


Bild 22:
 Lufttemperatur vor der Lüftungsanlage (2_AUL_Rohr_T) und nach der Lüftungsanlage (3_Zuluft) sowie die Außenlufttemperatur. Im unteren Diagramm ist die Temperaturdifferenz der beiden Messstellen während der Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten und Mittelwert der Temperaturdifferenz für die tägliche Laufzeit.

In Bild 22 sind die Graphen des Temperaturverlaufs zeitlich höher aufgelöst für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 abgebildet. Der Verlauf der Außenlufttemperatur wird durch den Erdkanal bereits gedämpft. Die Lüftungsanlage passt das Temperaturniveau auf das Raumklima entsprechend der Regelungsparameter an. Die Temperaturdifferenz zwischen der Außenluft nach dem Erdkanal (2_AUL_T Betrieb) und nach der Lüftungsanlage (3_Zuluft_Rohr_T Betrieb) ist im unteren Diagramm als Mittelwert für die tägliche Laufzeit abgebildet. In dem Differenzgraph wird bei negativen Werten die Luft gekühlt, bei positiven Werten erwärmt. Mit Beginn der Lüftungstätigkeit wird die Außenluft zunächst erwärmt (positiver Bereich im Differenzdiagramm). Im Tagesverlauf steigt meistens die Außenlufttemperatur an. Um die Lufttemperatur auf das gewünschte Niveau zu halten, kühlt die Lüftungsanlage die Prozessluft entsprechend um einige Grad Celsius ab (negativer Bereich im Differenzdiagramm).

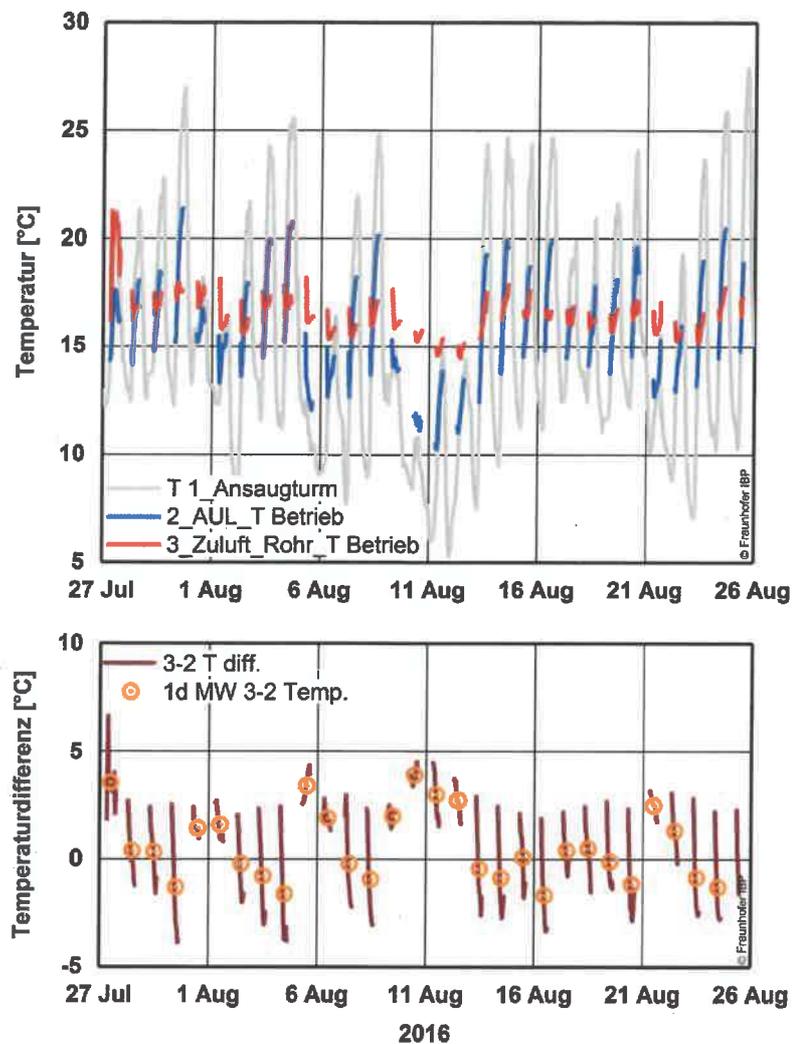


Bild 23:
 Lufttemperatur vor der Lüftungsanlage (2_AUL_Rohr_T) und nach der Lüftungsanlage (3_Zuluft) sowie die Außenlufttemperatur (oben). Im unteren Diagramm ist die Temperaturdifferenz der beiden Messstellen während der Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten und Mittelwert der Temperaturdifferenz für die tägliche Laufzeit.

Bild 24 zeigt den Verlauf der absoluten Feuchte vor der Lüftungsanlage (2_AUL_aF+0,4 Betrieb) und nach der Lüftungsanlage (3_Zuluft_aF Betrieb) sowie den Differenzgraphen der absoluten Feuchte für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 und Bild 25 für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016. Zusätzlich ist der Graph für die absolute Feuchte der Außenluft am Ansaugturm mit eingetragen. Negative Zahlen im Differenzgraphen zeigen die entfeuchtende Wirkung der Lüftungsanlage an. In den feuchteren Sommermonaten wird deutlich intensiver entfeuchtet als in der kalten Jahreszeit, ab 1. Februar 2017. Mit im Jahrgang zunehmender Feuchte in der Luft mit Betriebsbeginn der Anlage erhöht sich die Entfeuchtungsmenge der Lüftungsanlage entsprechend der Regelung.

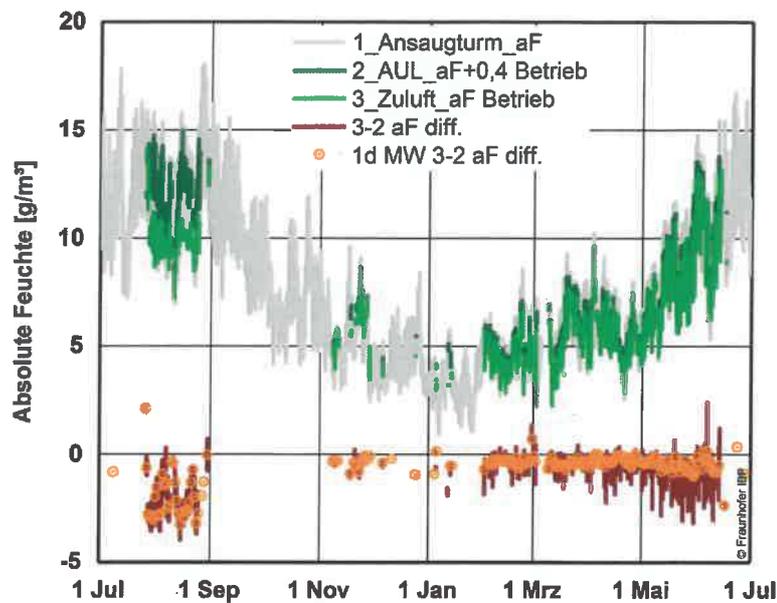


Bild 24:
 Absolute Feuchte am Ansaugturm, nach dem Erdkanal und nach der Lüftungsanlage sowie Feuchtedifferenz zwischen Erdkanal (2_AUL_aF) und nach der Lüftungsanlage. Die Betriebszeiten der Anlage sind hell- und dunkelgrün markiert. Die Feuchtedifferenz zwischen den beiden Messstellen ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten und täglicher Mittelwert der Feuchtedifferenz.

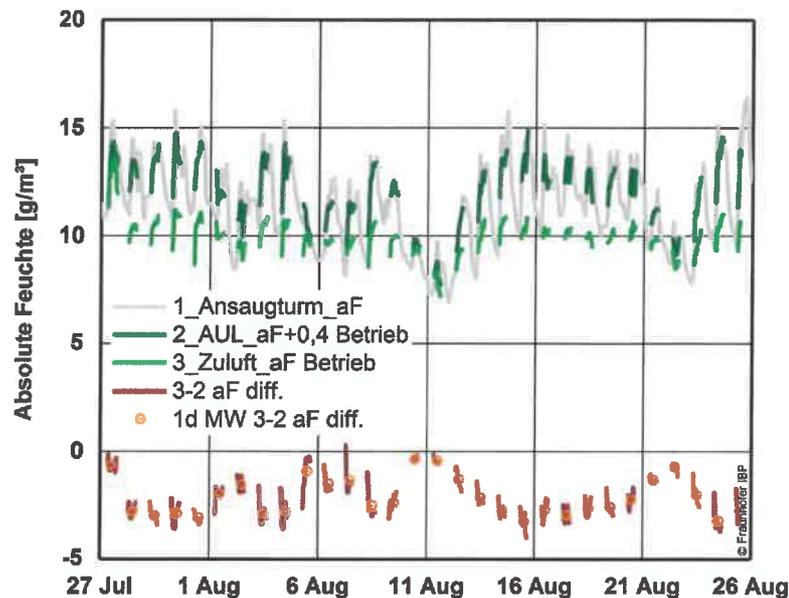


Bild 25:
 Absolute Feuchte am Ansaugturm, nach dem Erdkanal und nach der Lüftungsanlage sowie Feuchtedifferenz zwischen Erdkanal (2_AUL_aF) und nach der Lüftungsanlage. Die Betriebszeiten der Anlage sind hell- und dunkelgrün markiert. Die Feuchtedifferenz zwischen den beiden Messstellen ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Messzeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten und täglicher Mittelwert der Feuchtedifferenz.

Anhand der Differenz der absoluten Feuchte und des gemessenen Volumenstroms der Luftmenge, die durch die Lüftungsanlage transportiert wird, kann die durch die Entfeuchtung angefallene Wassermenge abgeschätzt werden. In Bild 26 ist die Differenz des Feuchtestroms abgebildet. Dieser ergibt sich aus dem Massestrom der Luft multipliziert mit der Feuchtedifferenz in kg Wasser pro kg trockenere Luft. Im Ergebnis erhält man so die entfeuchtete Wassermenge pro Stunde. Im August 2016 wird eine Entfeuchtungsleistung von bis zu rund 4 kg Wasser pro Stunde erreicht. Entsprechend der festgestellten geringeren Feuchtedifferenzen in der kalten Jahreszeit mit geringerem Lüftungsvolumen ist die Entfeuchtungsleistung entsprechend geringer. Teilweise findet auch keine Entfeuchtung statt, die Außenluft wird lediglich in der Temperatur konditioniert.

Im unteren Diagramm ist der Massestrom der Feuchte kumuliert abgebildet. Für die Laufzeit der Lüftungsanlage ergibt sich eine Entfeuchtungsleistung für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 von ca. 478 kg Wasser (im Mittel ca. 1,9 kg/h) und für den Zeitraum vom 1. Februar bis 13. Juni 2017 von ca. 239 kg Wasser (im Mittel ca. 0,3 kg/h).

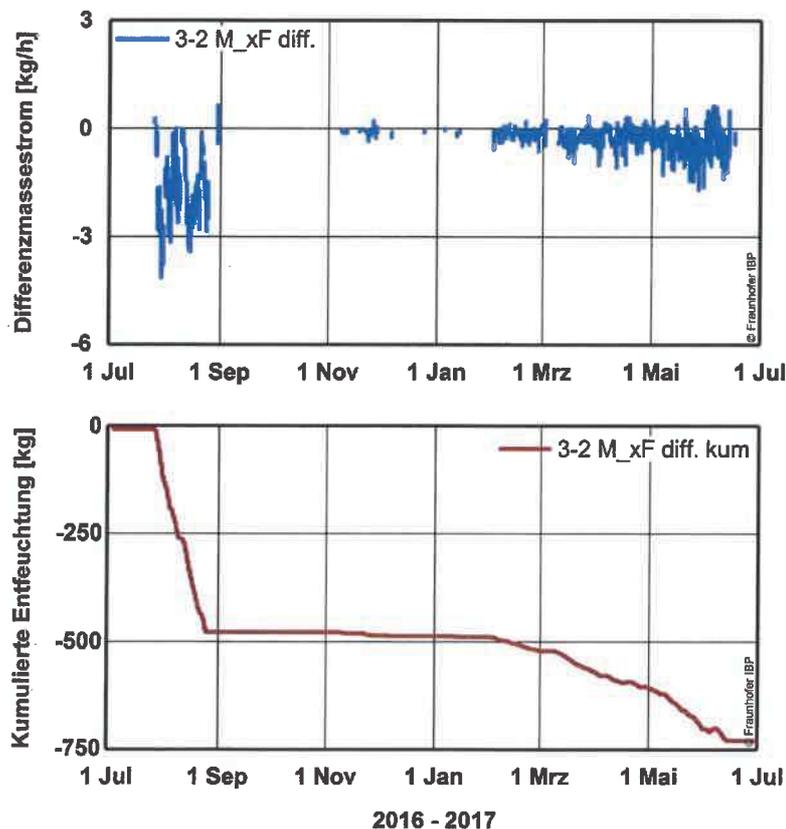


Bild 26: Differenz-Massestrom der Feuchte vor und nach dem Lüftungsgerät (oberes Diagramm). Der Differenz-Massestrom ist nur für die Betriebszeit abgebildet. Im unteren Diagramm ist der Differenz-Massestrom kumuliert abgebildet. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

Der Energieinhalt der Luft wird mit der Enthalpie beschrieben und kann anhand der Temperatur und des Feuchtegehaltes berechnet werden. Die Gesamtenthalpie der Luft setzt sich aus der Enthalpie des Feuchtegehaltes und der Enthalpie der Temperatur zusammen. Durch die Zustandsänderung der Luft verändert sich deren Energieinhalt. Die Differenzenergie wird durch die Zustandsänderung von der Prozessluft aufgenommen oder abgegeben. In Bild 27 sind die Enthalpieverläufe der Prozessluft an der Messstelle 2 vor der Lüftungsanlage und an der Messstelle 3 nach der Lüftungsanlage mit dem Differenzgraphen abgebildet. Im oberen Diagramm sind die Enthalpieverläufe für den Feuchtegehalt je kg trockene Luft dargestellt, im unteren Diagramm für die Lufttemperatur je kg trockene Luft. Der Außenluft (2_AUL_h_x) wird im Sommer am stärksten entfeuchtet, erkennbar an der größeren Enthalpiedifferenz der Feuchte (oberes Diagramm). Die Differenz der Temperaturenthalpie schwankt im August in etwa um den Nullwert. Die durch die Sorptionsentfeuchtung erwärmte Luft wird in etwa auf das Temperaturniveau wie vor der Entfeuchtung zurückgekühlt. In der kalten Jahreszeit wird die Zulufttemperatur etwas angehoben, erkennbar an der höheren Enthalpie der Zuluft im Vergleich zur Zuluft (2_AUL_h_tr_L) und an der positiven Enthalpiedifferenz (unteres Diagramm).

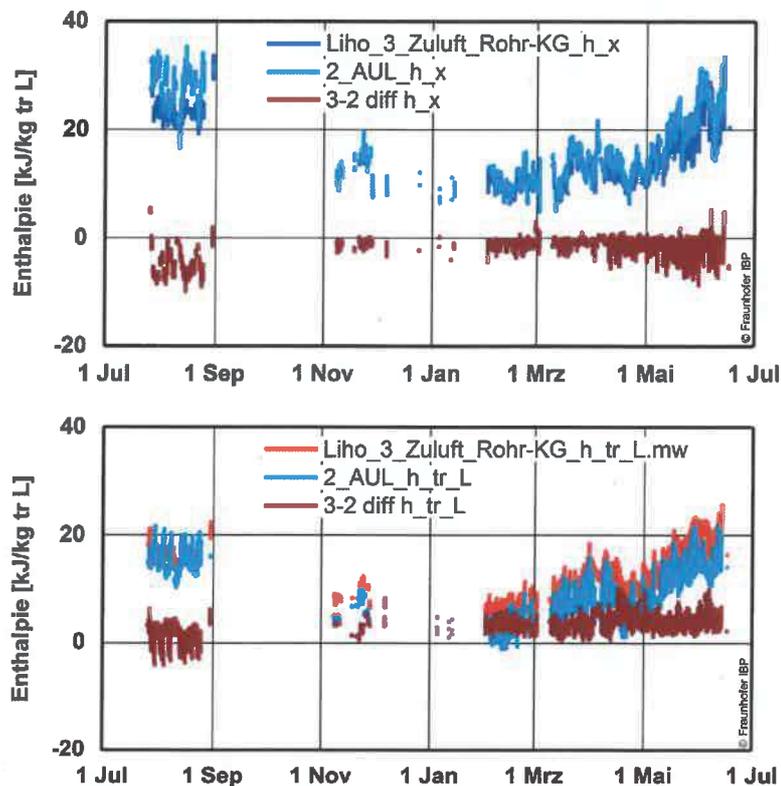


Bild 27:

Enthalpie der Prozessluft vor und nach der Lüftungsanlage sowie deren Differenz. Im unteren Diagramm ist die Enthalpie und Enthalpiedifferenz der Lufttemperatur pro kg trockene Luft abgebildet, im oberen Diagramm für die absolute Feuchte pro kg trockene Luft mit stündlichen Werten. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

Anhand der Enthalpiedifferenz je kg trockene Luft, multipliziert mit dem Massestrom, kann die Gesamtenergiedifferenz der Luftzustandsänderung pro Stunde berechnet werden. Die Gesamtenergiedifferenz wurde hier aus der Summe der Beträge der Enthalpiedifferenzen für die Feuchte und Temperatur gebildet. Der Effekt der Schleppwärme durch das Sorptionsrad wurde bei dieser vereinfachten Betrachtung nicht gesondert untersucht. In Bild 28 ist die berechnete Energiedifferenz als betragsmäßige Summe je Stunde in Kilowatt (kW) abgebildet. Für die Zustandsänderung der Prozessluft werden zum Teil mehr als 2,5 kW von der Prozessluft entzogen bzw. aufgenommen.

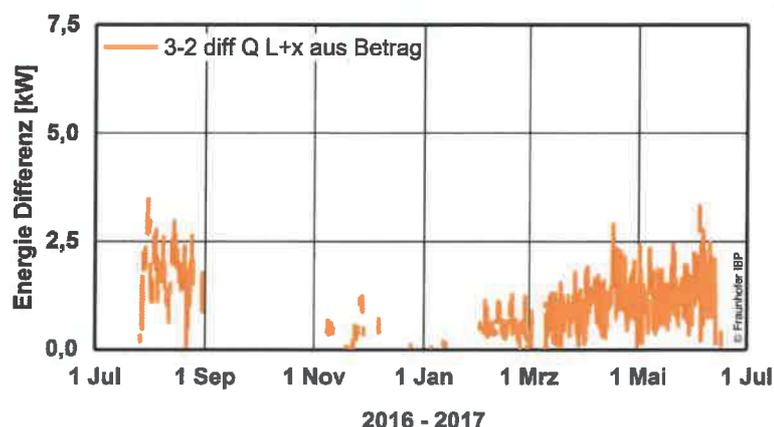


Bild 28:
Energieinhalt in kW der Prozessluft aus der betragsmäßigen Summe der Enthalpieänderungen der Temperatur- und Feuchteänderung vor und nach der Lüftungsanlage mit stündlichen Werten. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

2.5.4 Regeneration Sorptionsrad – Fortluft (Messposition 2, 7 und 8)

Die Regeneration (Trocknung) des Sorptionsmittels erfolgt über eine Erwärmung eines Teils der Außenluft, die nach dem Erdkanal in den Fortluftkanal abgeleitet wird. Mit der erwärmten Luft wird das aus dem Entfeuchtungsprozess aufgefuechtete Sorptionsmittel wieder getrocknet. Hierzu erfolgt ein Vergleich des Luftzustandes an der Messposition 2 mit der Messposition 7 (nach der Lüftungsanlage im Fortluftstrang und vor dem Erdkanal für Fortluft). Zusätzlich wird der Luftzustand der Fortluft im Auslassturm (Messposition 8) erfasst.

In Bild 29 ist der Temperaturverlauf für die Messposition 2 und 7 dargestellt. Die zur Regeneration des Sorbats abgezweigte Außenluft (Luftzustand bei Messposition 2) wird durch ein elektrisches Heizregister erwärmt und durch das aufgefuechtete Sorptionsmaterial geführt (Messposition 7). Da bei der Feuchteaufnahme Latentwärme aufgenommen wird und diese der sensiblen Wärme (Temperatur) der Regenerationsluft entzieht, wird diese damit gekühlt. Dadurch ist die an Position 7 (nach dem Durchströmen des Sorbats) gemessene Temperatur niedriger als vor dem Sorbat. Die Lufttemperatur vor dem Sorbat kann dadurch deutlich höher sein wie die Messwerte an der Position 7 anzeigen.

Die nun als Fortluft (FOL) bezeichnete Prozessluft wird über einen separaten Erdkanal nach außen geführt und der Luftzustand nach dem Erdkanal noch vor Verlassen des Auslassturms an der Messposition 8 gemessen. Im Erdkanal wird die Fortluft abgekühlt, siehe Bild 30.

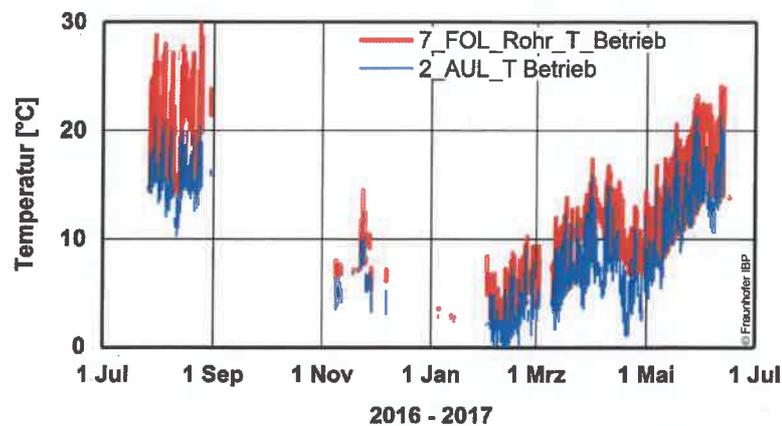


Bild 29:
Lufttemperatur vor der Lüftungsanlage (2_AUL_Rohr_T) und nach der Lüftungsanlage im Fortluftkanal (7_FOL_Rohr_T_Betrieb) vor dem Erdkanal. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten und Tagesmittelwert der Temperaturdifferenz.

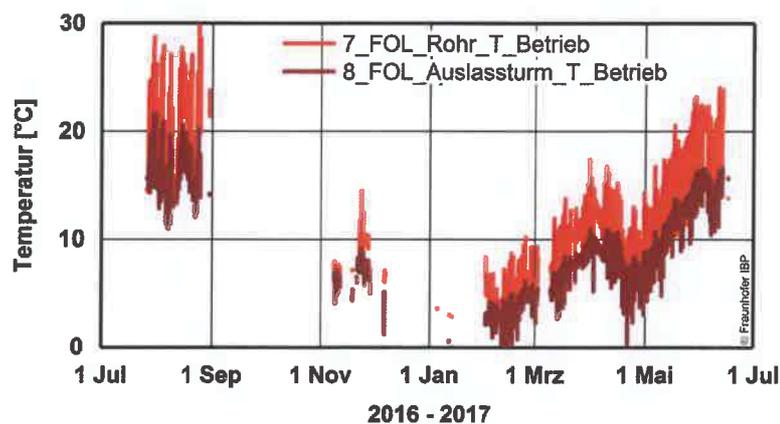


Bild 30:
Lufttemperatur nach der Lüftungsanlage (7_FOL_Rohr_T_Betrieb) im Fortluftkanal vor dem Erdkanal und im Auslassturm (8_FOL_Auslassturm_T_Betrieb) nach dem Erdkanal. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

In Bild 31 ist der Verlauf der absoluten Feuchte für die Regenerationsluft vor und nach dem Sorptionsrad abgebildet. Die Regenerationsluft nimmt vor allem in dem Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 bei hoher Entfeuchtungsleistung Feuchtigkeit aus dem Sorbat auf und trocknet (regeneriert) dieses. In dem Zeitraum ab Februar bis Juni mit geringer Entfeuchtungsleistung ist auch nur eine geringe Trocknung des Sorbats erforderlich. Die Regenerationsluft ist nach der Lüftungsanlage nur geringfügig feuchter als vor der Lüftungsanlage.

Die Fortluft wird ebenfalls durch einen Erdkanal nach außen geführt. Bild 32 zeigt den Verlauf des absoluten Feuchtegehaltes der Fortluft vor dem Erdkanal (Messposition 7) und nach dem Erdkanal (Messposition 8). In der ersten Betriebsperiode im August 2016 ist der absolute Feuchtegehalt nach dem Erdkanal deutlich niedriger. Wie aus Bild 30 hervorgeht, wird die Fortluft zusätzlich gekühlt. Dadurch kommt es zu einem Tauwasserausfall und die Fortluft entfeuchtet im Erdkanal. Im Zeitraum von Februar bis Juni 2017 verliert die Fortluft im Erdkanal kaum Feuchtigkeit.

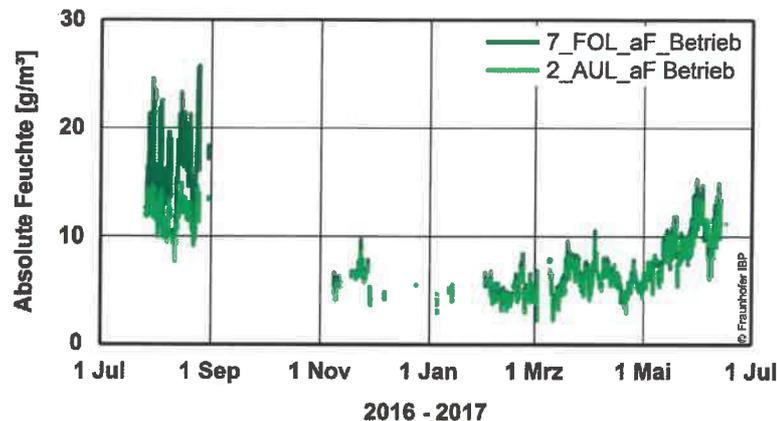


Bild 31:

Lufttemperatur vor der Lüftungsanlage (2_AUL_aF Betrieb) und nach der Lüftungsanlage im Fortluftkanal (7_FOL_Rohr_aF+0,6 Betrieb) vor dem Erdkanal. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

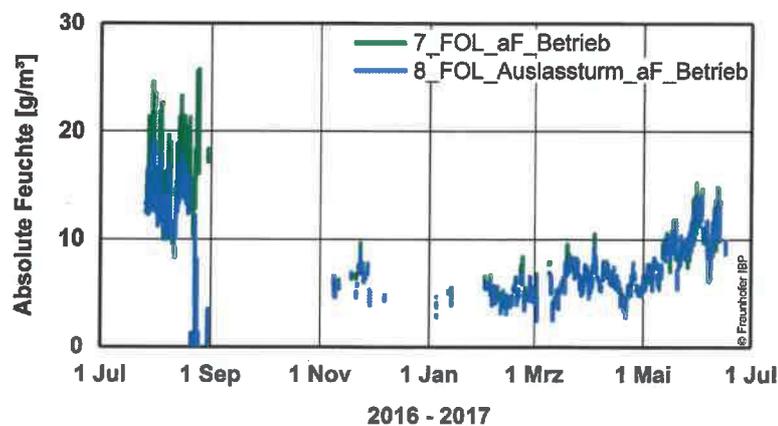


Bild 32:

Absolute Feuchte nach der Lüftungsanlage (7_FOL_Rohr_aF+0,6 Betrieb) im Fortluftkanal vor dem Erdkanal und im Auslassturm nach dem Erdkanal (8_FOL_Auslassturm_aF_Betrieb). Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

Über die Berechnung der Enthalpie der Luftzustände vor und nach der Lüftungsanlage an der Messposition 2 und 7 kann über den Massestrom der Energieaufwand für die Regeneration berechnet werden. Der Volumenstrom wird messtechnisch nicht erfasst. Nach Angaben der technischen Unterlagen zur Lüf-

tungsanlage wird ein konstanter Volumenstrom von 400 m³/h für die Regenerationsluft verwendet. Der Massestrom wird vereinfacht ganzjährig mit 400 kg/h trockener Luft angenommen. Im Diagramm in Bild 33 ist der abgeschätzte Verlauf der Energiedifferenz abgebildet. Im August 2016 wird eine Energiedifferenz von ca. 3 kW erreicht.

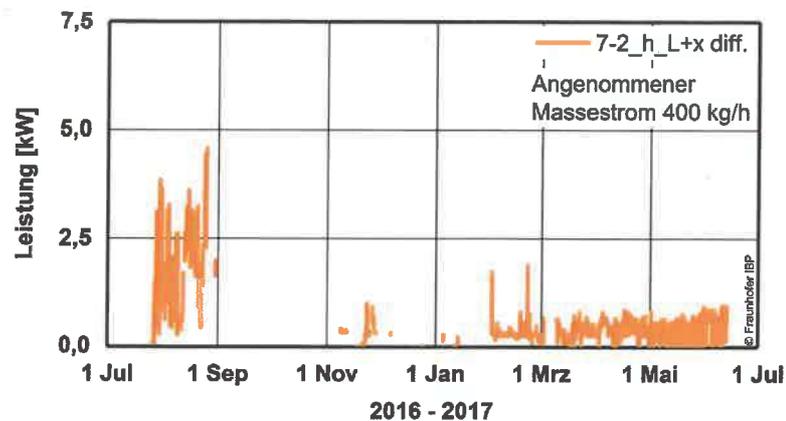


Bild 33:
Berechnete Energiedifferenz zwischen dem Luftzustand vor und nach der Lüftungsanlage (Messposition 2 und 7) im Fortluftkanal. Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

2.5.5 Auswirkungen der Zuluft auf das Raumklima im Paradeschlafzimmer, Messposition 9 (3) und 10

Die Messposition 9 ist in der Fortführung des Zuluftkanals von der Lüftungsanlage direkt am Luftauslass positioniert und entspricht damit der Messposition 3. Diese zusätzliche Messposition wurde zum einen als Redundanz zur Position 3 installiert, zum anderen als Dokumentation des tatsächlichen Luftzustandes an der Einblasöffnung zum Paradeschlafzimmer.

Die Zuluft an der Einblasöffnung sollte in einem vorgegebenen Klimakorridor liegen, um zu niedrige relative Feuchten und zu hohe oder zu niedrige Temperaturen zu vermeiden [6]. Bild 34 zeigt die Messwerte der relativen Feuchte im Paradeschlafzimmer mit den Werten am Luftauslass (Kamin Ost) während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage für den Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017. Mit eingezeichnet ist der untere Grenzwert von 40 % r.F., bei der die Lüftungsanlage abschalten soll. Der Grenzwert wird mehrfach unterschritten. Bild 35 zeigt den zugehörigen Verlauf der Lufttemperatur im Schlafzimmer und der Zuluft. Als Grenze wurde eine maximale Abweichung der Zulufttemperatur von ± 6 °C zur Raumtemperatur vorgegeben. In den Sommermonaten liegt die Zulufttemperatur unter der Raumlufttemperatur und in der kalten Jahreszeit über der Raumlufttemperatur. In der Übergangszeit gleitet die Zulufttemperatur entsprechend von höheren Temperaturen zu niedrigeren Temperaturen im Vergleich zur Raumlufttemperatur. Die Lüftungsanlage bleibt diesbezüglich innerhalb der vorgegebenen jahreszeitabhängigen Sollwertparameter. In Bild 36 ist die absolute Feuchte des Raumklimas und der Zuluft abgebildet. Die absolute

Feuchte der Zuluft ist dabei überwiegend niedriger als die der Raumlufte. Vereinzelt werden auch im Vergleich zur Raumlufte geringfügig höhere Feuchten in der Zuluft festgestellt.

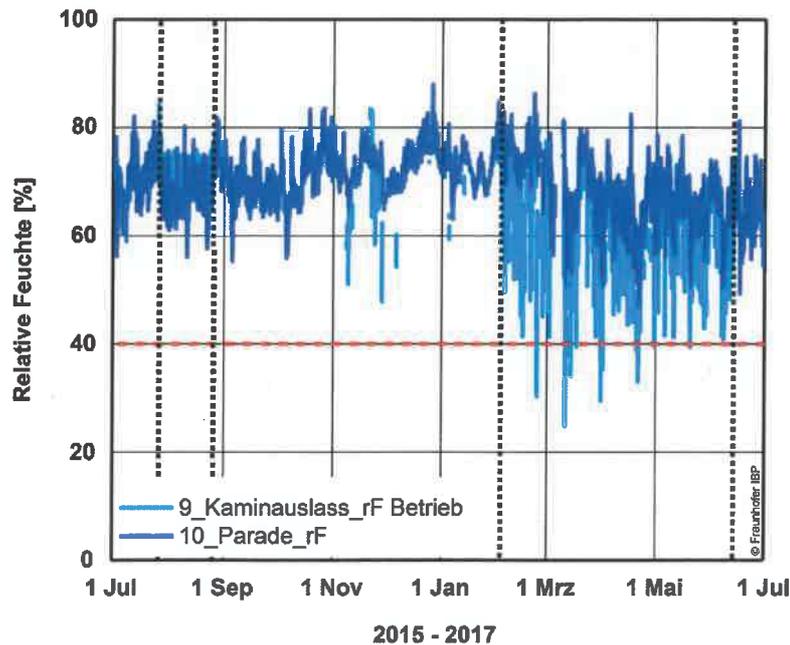


Bild 34: Relative Feuchte im Paradeschlafzimmer und in der Zuluft am Kaminauslass für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

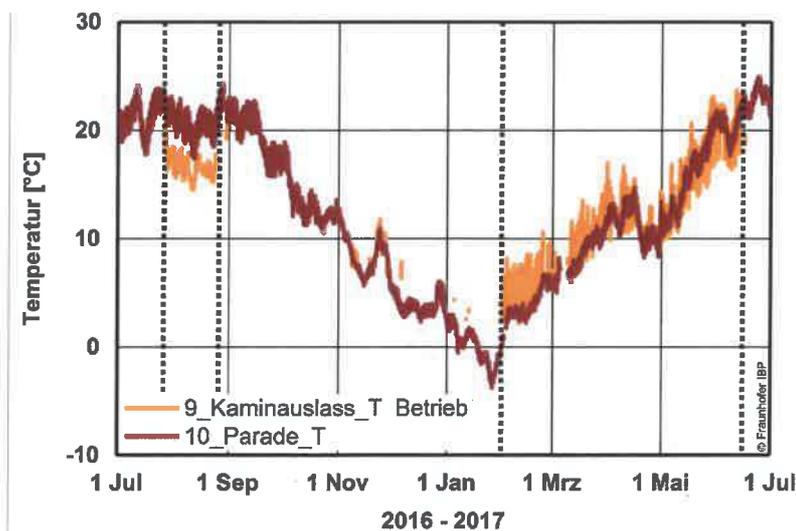


Bild 35: Temperatur im Paradeschlafzimmer und in der Zuluft am Kaminauslass (nur während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage) für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

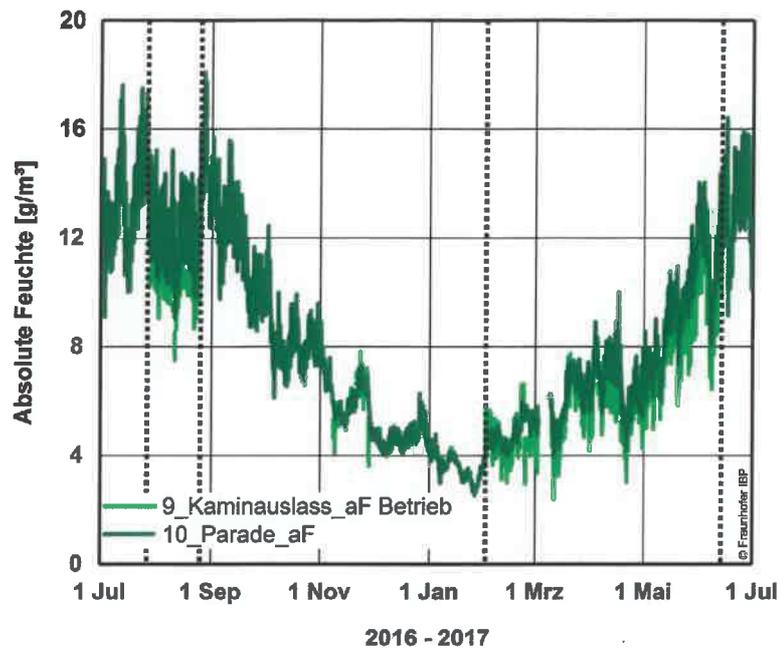


Bild 36:
Absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer und in der Zuluft am Kaminauslass (nur während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage) für den Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 mit stündlichen Mittelwerten.

In Bild 37 sind die Messdaten für das Raumklima und der Zuluft für den Zeitraum vom 27. Juli bis 26. August 2016 dargestellt. Durch die kühlere Zulufttemperatur ist trotz niedrigerer absoluter Feuchte die relative Feuchte der Zuluft auf dem Niveau des Paradeschlafzimmers.

Bild 38 zeigt das Raum- und Zuluftklima für den Zeitraum vom 7. bis 13. August 2016. Zusätzlich ist die Temperatur und absolute Feuchte der Außenluft mit eingetragen. Am 9. August ist eine hohe Spitze in der relativen Feuchte des Paradeschlafzimmers zu erkennen, markiert mit einer schwarz gestrichelten, senkrechten Linie. Die relative Feuchte steigt dabei während des Tages kontinuierlich an. Die Zuluft ist dabei trockener als die Raumluft, bleibt jedoch konstant. Die Lüftungsanlage reagiert dabei nicht auf die ansteigende relative Feuchte im Raum. Mit Abschalten der Lüftungsanlage um 15:42 Uhr erhöht sich die relative Feuchte im Raum nochmal deutlich bis 17:40 Uhr kurz vor Führungsende und sinkt dann mit abnehmenden Besucherzahlen bzw. mit Schließung um 18:00 Uhr.

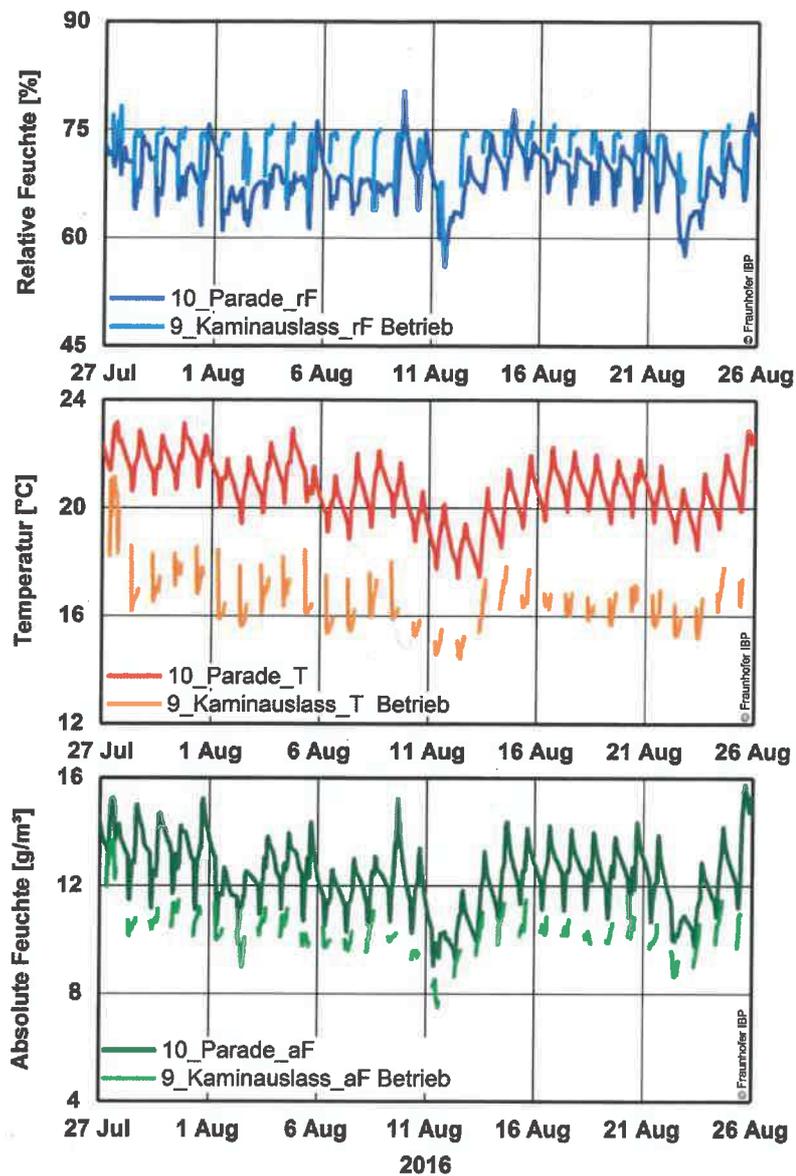


Bild 37:
 Luftzustand am Kaminauslass im Vergleich zum Paradeschlafzimmer im Zeit-
 raum vom 27. Juli bis 26. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten. Die
 Messdaten für die Zuluft am Kaminauslass sind nur während der Betriebszeiten
 der Lüftungsanlage abgebildet.

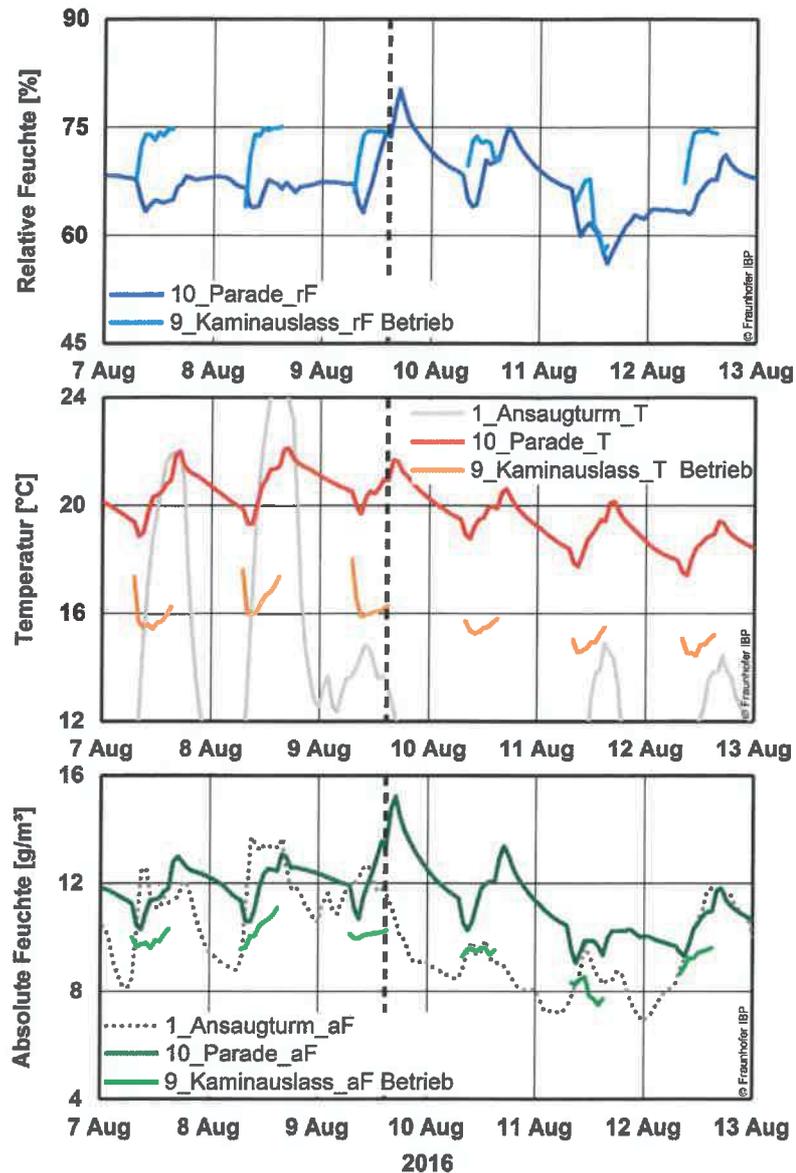


Bild 38:

Luftzustand am Kaminauslass im Vergleich zum Paradeschlafzimmer mit Außenklima im Zeitraum vom 7. bis 13. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten. Die Messdaten für die Zuluft am Kaminauslass sind nur während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage abgebildet. Die senkrechte gestrichelte Linie zeigt beispielhaft für den 9. August das zu frühe Abschalten der Lüftung an.

Bild 39 zeigt das Raumklima mit Zuluftklima für den Zeitraum vom 18. bis 22. Februar 2017. Das Niveau der relativen Feuchte im Raum ist allgemein etwas zu hoch und zum Teil knapp über der oberen Grenze des definierten Klimakorridors. Am 18., 21. und 22. Februar entfeuchtet die Lüftungsanlage zwar die Außenluft, bleibt aber über der absoluten Feuchte des Raumklimas. In der Folge steigt die relative Feuchte im Paradeschlafzimmer an. Eine intensivere Entfeuchtung würde dem Ansteigen der relativen Feuchte entgegenwirken. Der rote Kreis markiert eine Unterschreitung der unteren Grenze der relativen Feuchte für die Zuluft. Die absolute Feuchte der Zuluft befindet sich bereits auf

dem Niveau der Außenluft, es findet keine Entfeuchtung statt. Um eine zu trockene Zuluft zu vermeiden, sollte die Anlage, wie eigentlich vorgegeben abschalten. Alternativ wäre auch ein Absenken der Zulufttemperatur bis zur Raumlufttemperatur denkbar. Dies würde die relative Feuchte der Zuluft erhöhen.

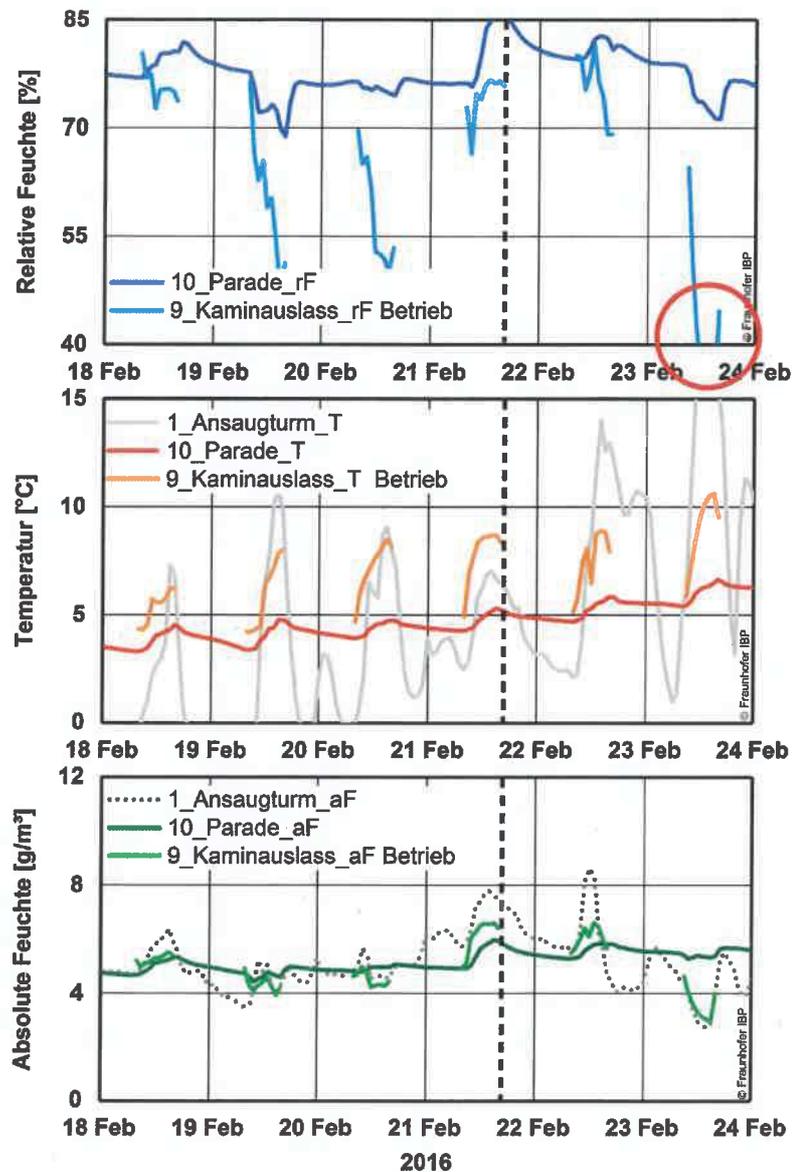


Bild 39:

Luftzustand am Kaminauslass im Vergleich zum Paradeschlafzimmer mit Außenklima im Zeitraum vom 7. bis 13. August 2016 mit stündlichen Mittelwerten. Die Messdaten für die Zuluft am Kaminauslass sind nur während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage abgebildet. Die relative Feuchte steigt im Raum zum Zeitpunkt bei der senkrechten gestrichelten Linie an, obwohl eine stärkere Entfeuchtung der Zuluft möglich wäre. Der rote Kreis markiert eine zu trockene Zuluft unter 40 % r.F..

Der Energieinhalt (Latentwärme und sensible Wärme) der Raumluft kann mit der Berechnung der Enthalpie je Kilogramm Luft und der geschätzten Luftmasse im Paradeschlafzimmer abgeschätzt werden, siehe Bild 40 oberes Diagramm. Im Vergleich zum Energieinhalt der Raumluft wird der Energieinhalt des Zuluftmassenstroms berechnet und als absolute Differenz zum Energieinhalt der Raumluft abgebildet, siehe Bild 40 unteres Diagramm. Die Zuluft wirkt mit in etwa 10 % bis 20 % des Energieniveaus des Raumklimas auf dieses ein.

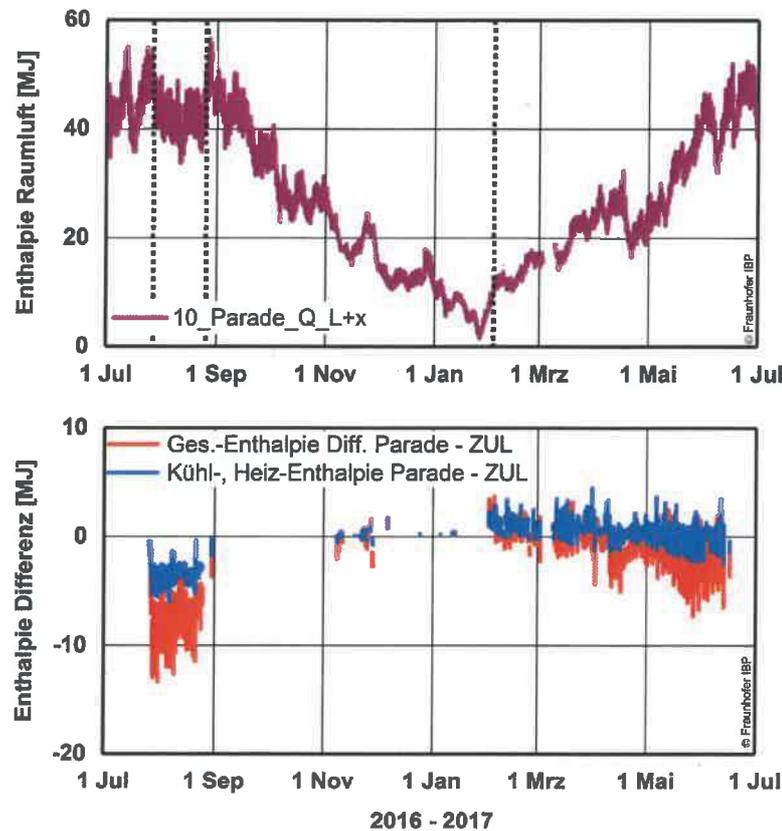


Bild 40:
Gesamtenergieinhalt der Raumluft und Energiedifferenz der Zuluft zur Raumluft in Megajoul im Messzeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017.

2.6 Paradeschlafzimmer und angrenzende Räume

Die Messdaten werden zunächst raumweise ausgewertet und mit dem Raumklima im Paradeschlafzimmer verglichen. Danach erfolgt der Vergleich der Raumklimata in mehreren Übersichten zur Darstellung der Auswirkungen der Lüftungsanlage auf das Raumklima der jeweiligen betrachteten Räume.

2.6.1 Raumklima Paradeschlafzimmer (Messposition 10)

In Bild 41 bis Bild 43 ist das Raumklima im Paradeschlafzimmer mit dem Außenklima für den Zeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet. Die Zeiträume während der Laufzeiten der Lüftungsanlage sind in den Diagrammen gekennzeichnet. Im Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 be-

trägt der Jahresmittelwert der relativen Feuchte 70,1 % r.F.. Die Temperatur sinkt in diesem Zeitraum auf $-3,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ab. Die absolute Feuchte liegt ganzjährig zum Teil deutlich über dem Niveau der absoluten Feuchte des Außenklimas. Jahreszeitlich verändert sich der Abstand der Monatsmittelwerte. Im Winter nähern sich die absoluten Feuchten an, während im Sommer der Abstand der Mittelwerte mit einer Differenz von bis zu $1,4\text{ g/m}^3$ am größten ist.

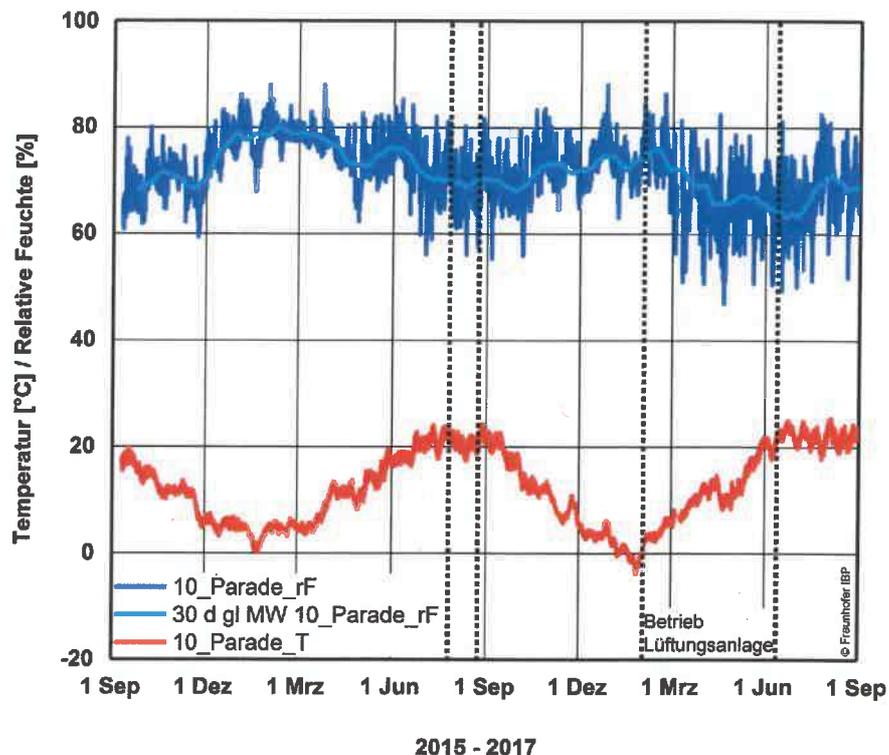


Bild 41:
Raumklima im Paradeschlafzimmer an der Messposition 10 für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

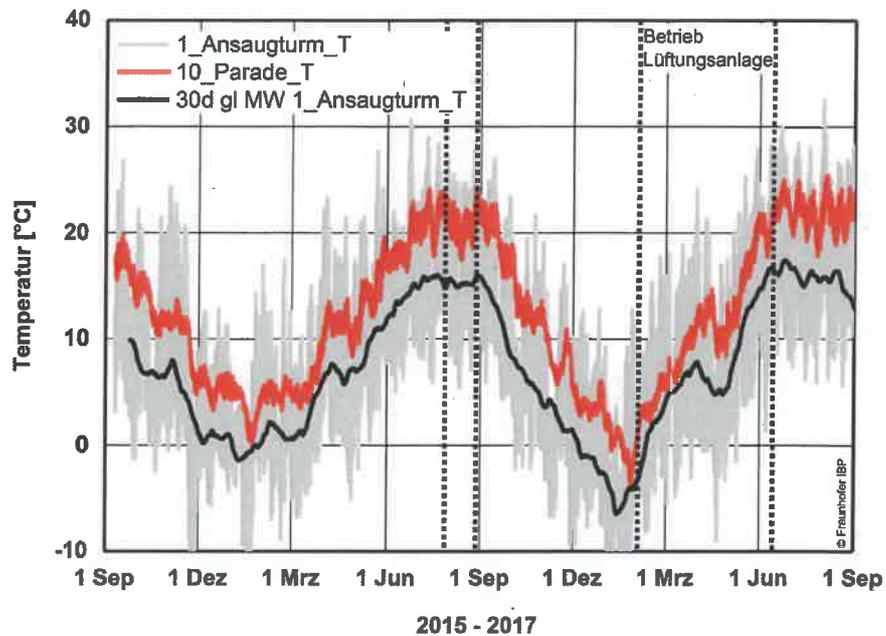


Bild 42:
 Lufttemperatur im Paradeschlafzimmer an der Messposition 10 sowie Außenlufttemperatur für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

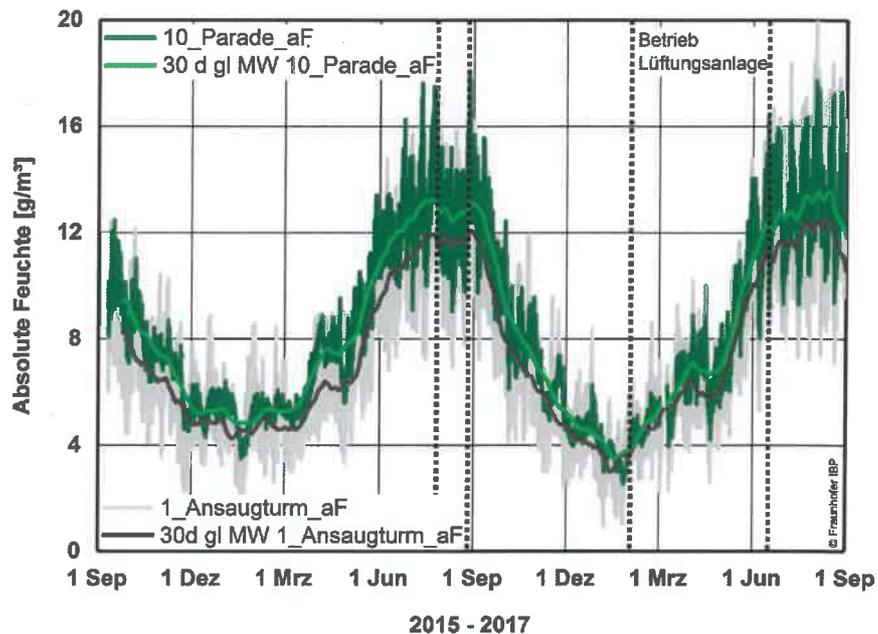


Bild 43:
 Absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer an der Messposition 10 sowie absolute Feuchte der Außenluft für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

2.6.2 Raumklimaverteilung im Paradeschlafzimmer

Im Paradeschlafzimmer wurde an drei verschiedenen Standorten das Raumklima aufgezeichnet. Zum einen seitlich auf einer Höhe von ca. 0,5 m Höhe am östlichen Kamin mit Zuluftauslass, auf dem östlichen Kamin auf einer Höhe von ca. 1,3 m sowie auf dem gegenüberliegenden westlichen Kamin. Die möglichen Auswirkungen der Zuluft auf die horizontale Raumklimaverteilung können damit beurteilt werden. Bild 44 zeigt die gemessene relative Feuchte und Temperatur in einer Übersicht für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017. Die Werte liegen eng zusammen. Bild 45 zeigt den Messzeitraum vom 7. bis 13. August 2016 mit Betrieb der Lüftungsanlage mit zum Teil maximalem Volumenstrom. Die Messwerte verlaufen trotzdem nahezu gleich mit geringfügiger Abweichung innerhalb der Messgenauigkeit. Durch die tägliche Stromfreischaltung bleibt die Lüftungsanlage in den Nachtstunden aus. Das nun unbeeinflusste Raumklima zeigt für diese Zeiten ebenfalls kaum einen Unterschied in der horizontalen Klimaverteilung.

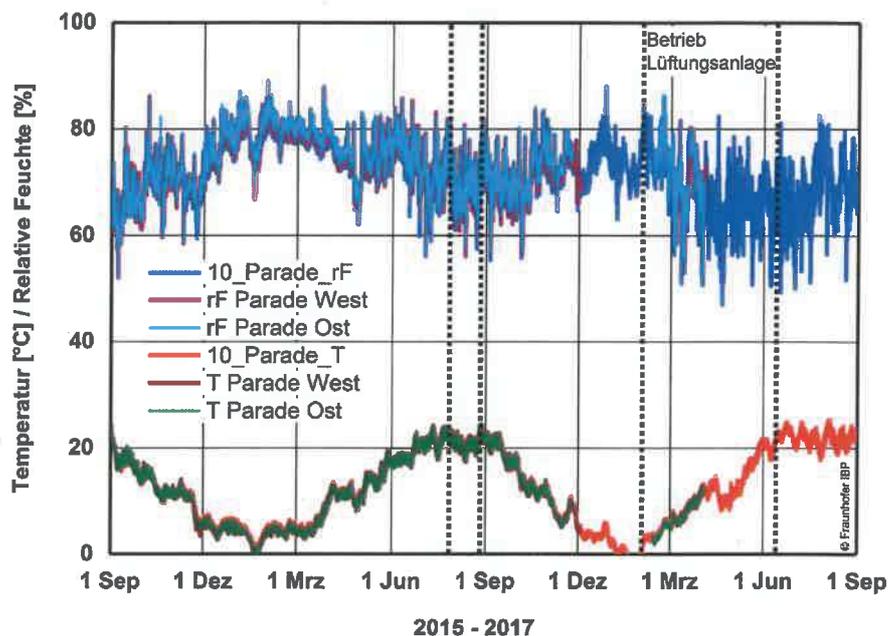


Bild 44:

Raumklima mit relativer Feuchte und Temperatur im Paradeschlafzimmer an der Messposition 10, 13 (Ost) und 14 (West) für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

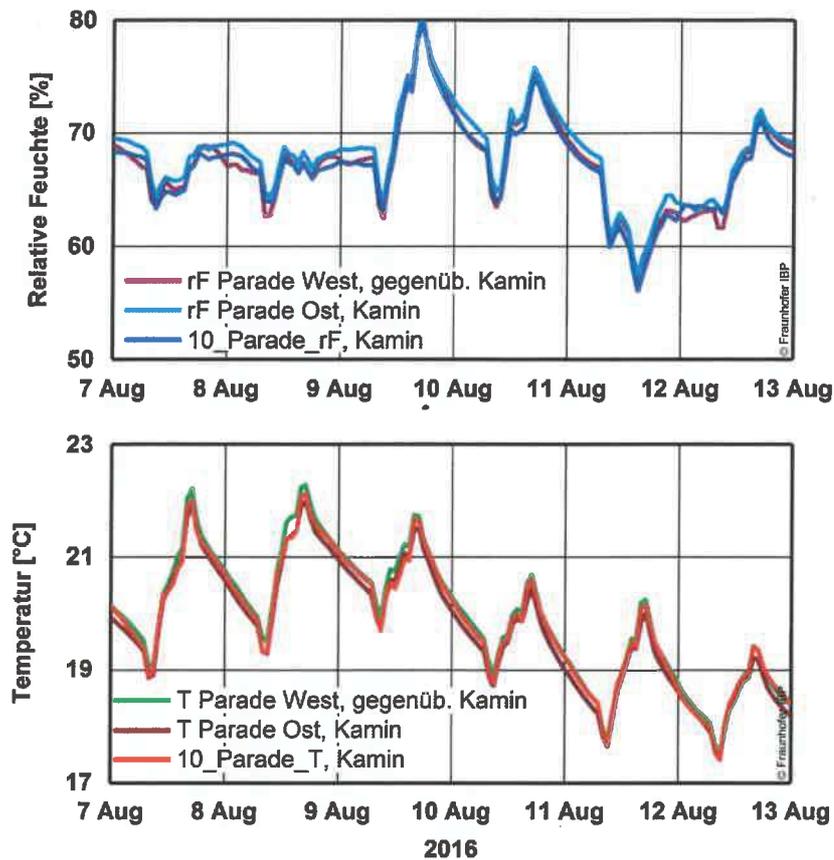


Bild 45:
Raumklima im Paradeschlafzimmer an der Messposition 10, 13 (Ost) und 14 (West) für den Messzeitraum vom 7. bis 13. August 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die Werte der relative Feuchte und Raumlufttemperatur liegen zwischen den unterschiedlichen Messstandorten sehr eng beieinander.

2.6.3 Raumklima Audienzzimmer (Messposition 15)

Das Raumklima im Audienzzimmer ist für den Zeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet, Bild 46. Im Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 beträgt der Jahresmittelwert der relativen Feuchte 67,1 % r.F.. Die Temperatur sinkt in diesem Zeitraum auf -3,9 °C ab.

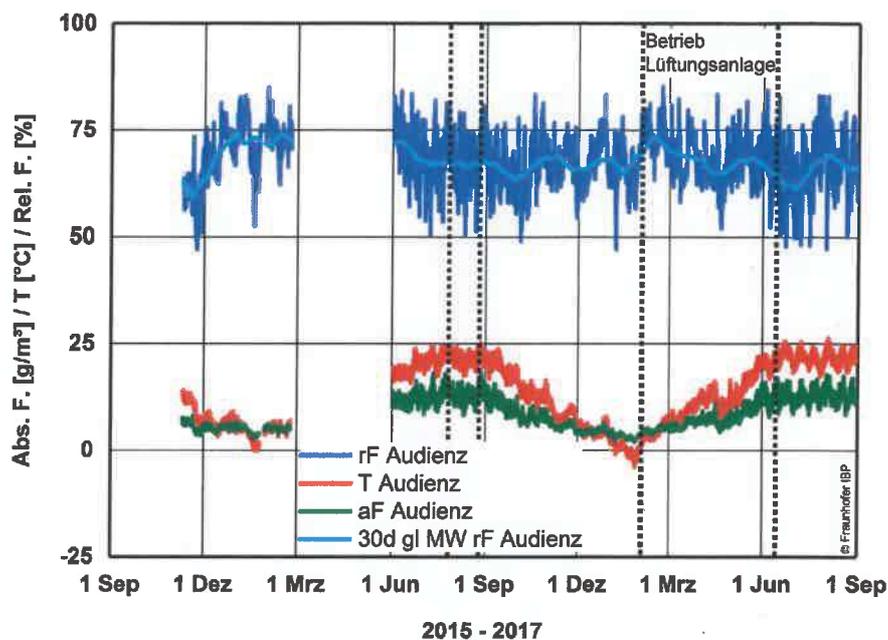


Bild 46:
Relative Feuchte, Temperatur und absolute Feuchte im Raum Audienzzimmer für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert und stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

2.6.4 Raumklima Speisezimmer (Messposition 16)

Das Raumklima im Speisezimmer ist für den Zeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet, siehe Bild 47. Im Zeitraum vom 1. Juli 2016 bis 1. Juli 2017 beträgt der Jahresmittelwert der relativen Feuchte 66,7 % r.F.. Dabei fehlen Messwerte von rund zwei Monaten in diesem Zeitraum.

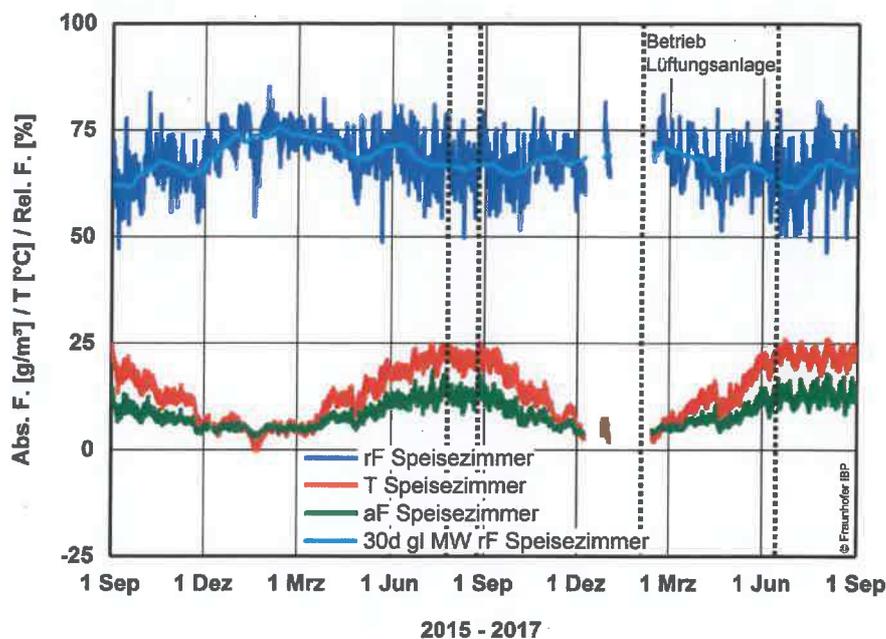


Bild 47:
Relative Feuchte, Temperatur und absolute Feuchte im Raum Speisezimmer für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert und stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

2.6.5 Raumklima Ankleide, Aufstellort Lüftungsanlage (Messposition 12)

Im Raum Ankleide (Souterrain) befindet sich der Aufstellort der Lüftungsanlage. Die relative Feuchte ist dort äußerst hoch (Bild 48). Die absolute Feuchte ist sehr deutlich erhöht gegenüber der der Außenluft, Bild 49. Mit der Aufstellung in diesem Raum wurde als positiver Nebeneffekt eine Reduzierung des Feuchte-niveaus erwartet. Wie aus den Diagrammen hervorgeht, sinkt die relative Feuchte in den Betriebszeiträumen der Lüftungsanlage ab und wirkt sich bereits auf das Monatsmittel der relativen Feuchte deutlich aus. Die absolute Feuchte sinkt während des Betriebes ebenfalls kurzfristig ab, das Niveau im gleitenden Monatsmittel hat sich im Vergleich zum Außenklima durch den Betrieb noch nicht verändert. Es wird erwartet, dass sich wegen des hohen Feuchtegehaltes im Mauerwerk ein Angleichen an die Außenluftfeuchte erst durch einen längeren (mehrjährigen) Betrieb einstellen wird. Die Raumlufttemperatur erhöht sich während der Betriebszeiten der Lüftungsanlage um etwa 2 bis 3 °C, teilweise um bis zu 4 °C.

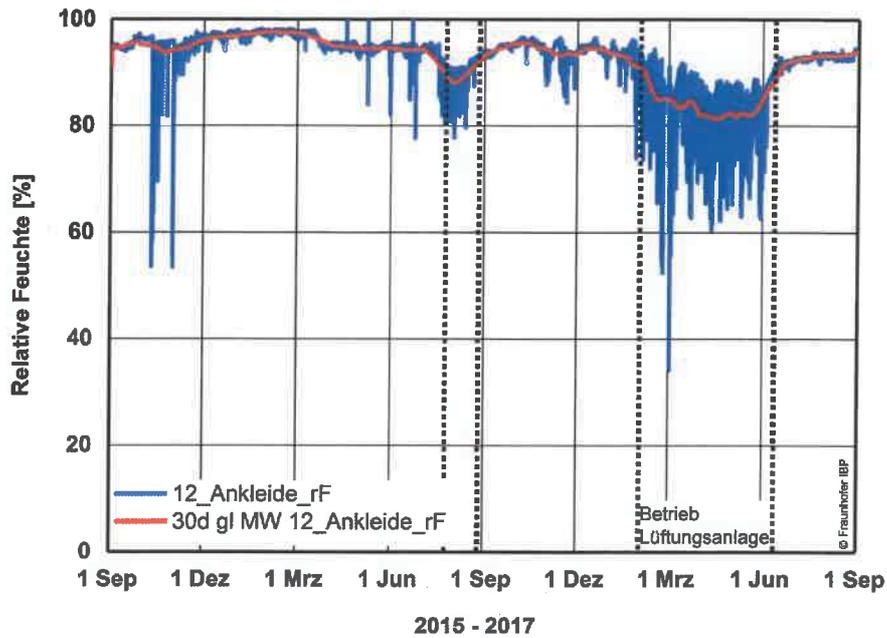


Bild 48:
Relative Feuchte im Raum Ankleide (Aufstellraum Lüftungsanlage) für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert und stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

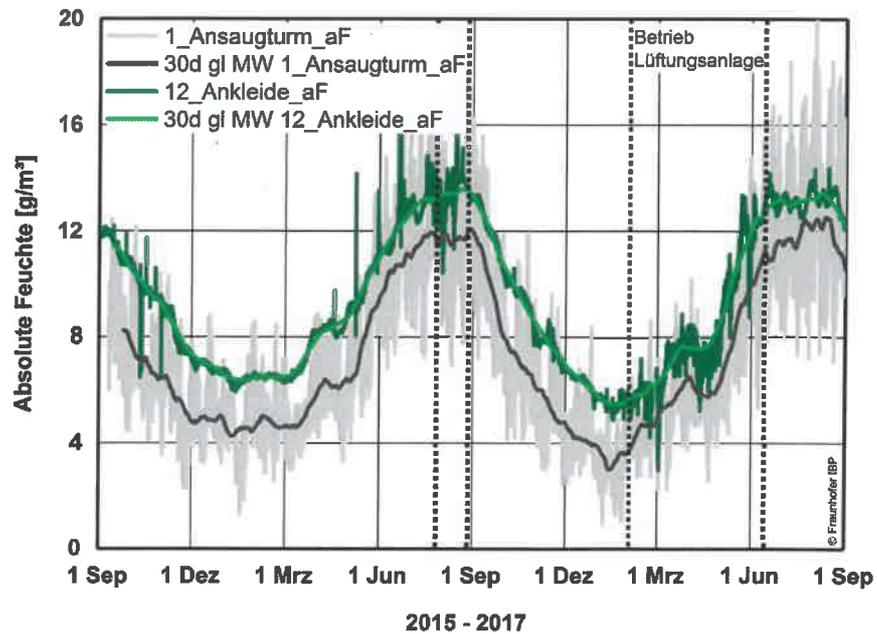


Bild 49:
Absolute Feuchte im Raum Ankleide (Aufstellraum Lüftungsanlage) und Außenluft für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

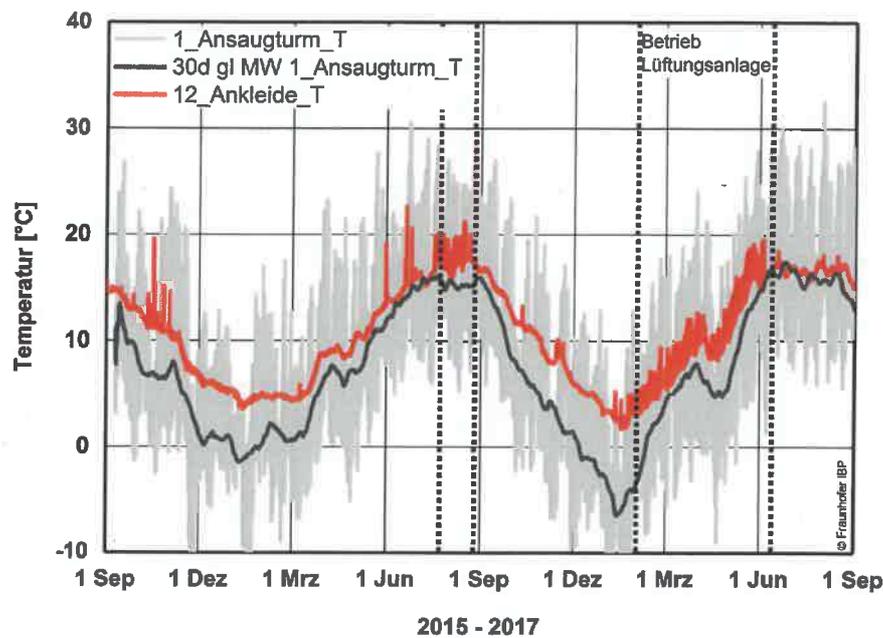


Bild 50:
Temperatur im Raum Ankleide (Aufstellraum Lüftungsanlage) und Außenluft für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 mit stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

2.6.6 Vergleich Raumklima Paradeschlafzimmer – Audienzzimmer - Speisezimmer

In Bild 51 ist die relative Feuchte im Paradeschlafzimmer, Audienzimmer und Speisezimmer mit stündlichen Mittelwerten sowie Monatsmittelwerten der Messwerte für den Zeitraum vom 1. September 2015 bis 1. September 2017 abgebildet. Der Monatsmittelwert im Paradeschlafzimmer ist ohne Betrieb der Lüftungsanlage deutlich höher, um ca. 4 bis 6 % r.F. im Monatsmittel im Vergleich zu den beiden angrenzenden Räumen, siehe Bild 52. Erst mit dem längerfristigen Betrieb der Lüftungsanlage im Zeitraum vom 1. Februar bis 13. Juni 2017 sinkt die relative Feuchte im Paradeschlafzimmer auf das Niveau der anderen Räume ab. Dabei stellen sich etwas höhere kurzfristige Schwankungen der relativen Feuchte in diesem Zeitraum ein. Ohne Betrieb der Lüftungsanlage steigt ab dem 13. Juni 2017 das Niveau der relativen Feuchte wieder an und erreicht nach ca. einem Monat eine um ca. 3 % r.F. höhere relative Feuchte im Monatsmittel.

Die Auswirkungen der Lüftungsanlage können auch anhand der absoluten Feuchte der Raumluft nachvollzogen werden, siehe Bild 53. Die absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer ist ohne Betrieb der Lüftungsanlage im Monatsmittel geringfügig höher im Vergleich zu den angrenzenden Räumen, z. B. ab Juni 2015. Mit Inbetriebnahme der Lüftungsanlage ab dem 27. Juli 2016 sinkt bzw. gleicht sich die absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer an das Niveau der angrenzenden Räume an, um ab dem 26. August 2016 wieder geringfügig über den Feuchtegehalt der anderen Räume anzusteigen. Mit Wie-

deraufnahme des Lüftungsbetriebes ab dem 1. Februar 2017 sind die Feuchteverläufe nahezu identisch. Nach dem Ausfall der Anlage am 14. Juni 2017 steigt der absolute Feuchtegehalt im Paradeschlafzimmer wieder deutlich über das Niveau im Audienz- und Speisezimmer an.

Die Lüftungsanlage hat nur geringe Auswirkungen auf die Raumtemperatur im Paradeschlafzimmer. Ohne Lüftungsanlage stellte sich im Monatsmittel ein in etwa gleicher Temperaturverlauf ein. Dabei sind die täglichen Temperaturschwankungen etwas geringer im Vergleich zu den angrenzenden Räumen. Mit Betrieb der Anlage verändern sich die Temperaturschwankungen nur geringfügig und bleiben deutlich niedriger im Vergleich zum Audienz- oder Speisezimmer. Durch die Kühlung der Zuluft im Sommer sinkt die Raumtemperatur im Paradeschlafzimmer geringfügig, im Monatsmittel um ca. 0,5 °C, im Vergleich zu den angrenzenden Räumen ab.

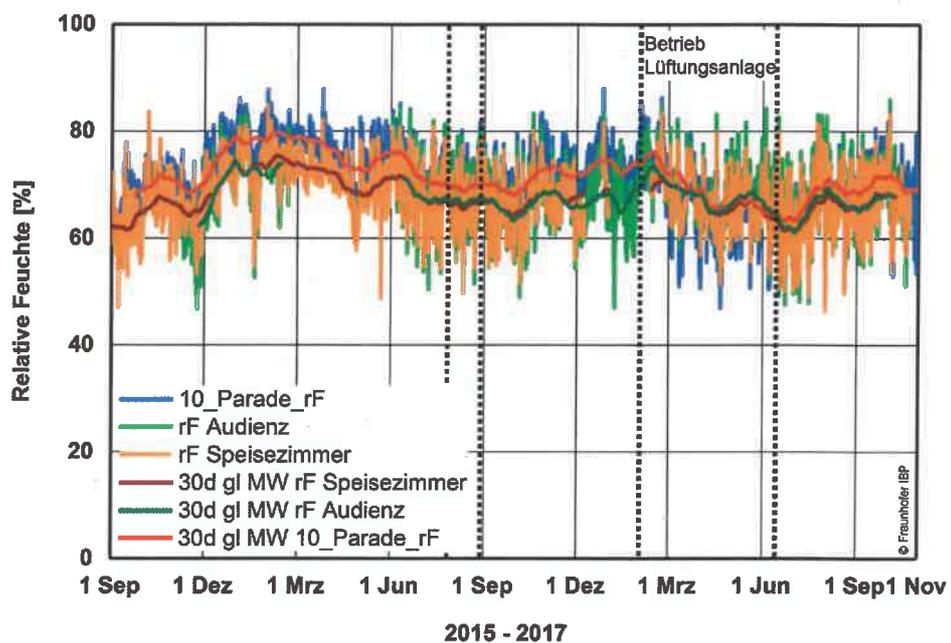


Bild 51:
Relative Feuchte im Paradeschlafzimmer, Audienzzimmer und Speisezimmer für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. November 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert und stündlichen Mittelwerten der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

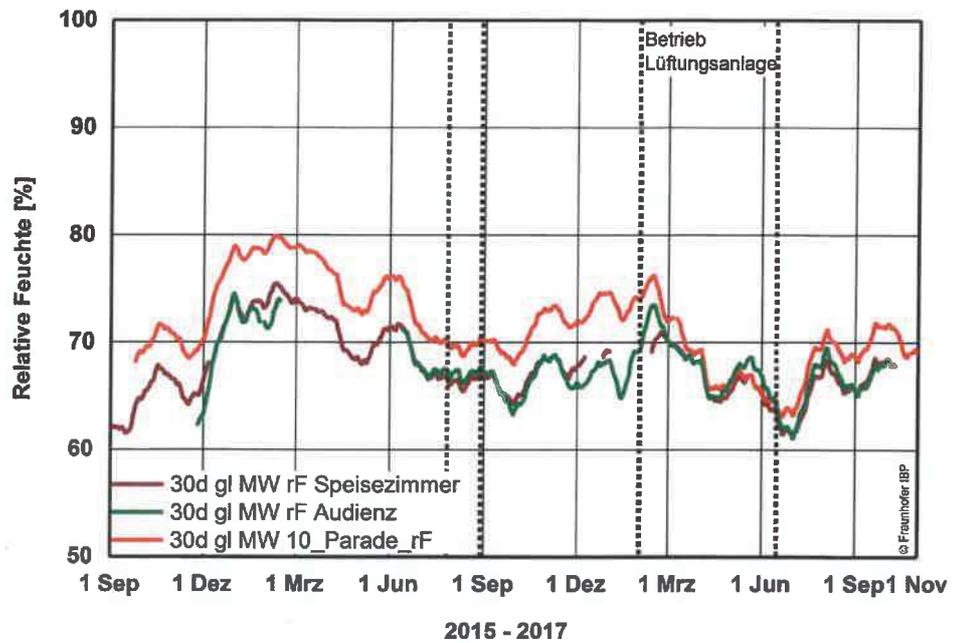


Bild 52:
Relative Feuchte im Paradeschlafzimmer, Audienzzimmer und Speisezimmer für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. November 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

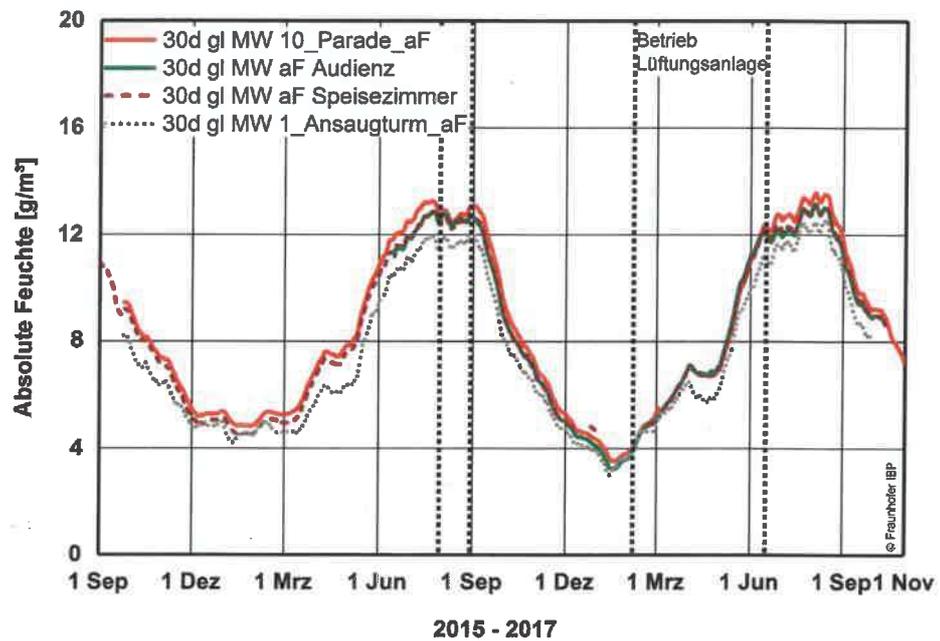


Bild 53:
Absolute Feuchte im Paradeschlafzimmer, Audienzzimmer und Speisezimmer für den Messzeitraum vom 1. September 2015 bis 1. November 2017 mit gleitendem Monatsmittelwert der Messwerte. Die senkrechten gepunkteten Linien markieren die Laufzeit der Lüftungsanlage.

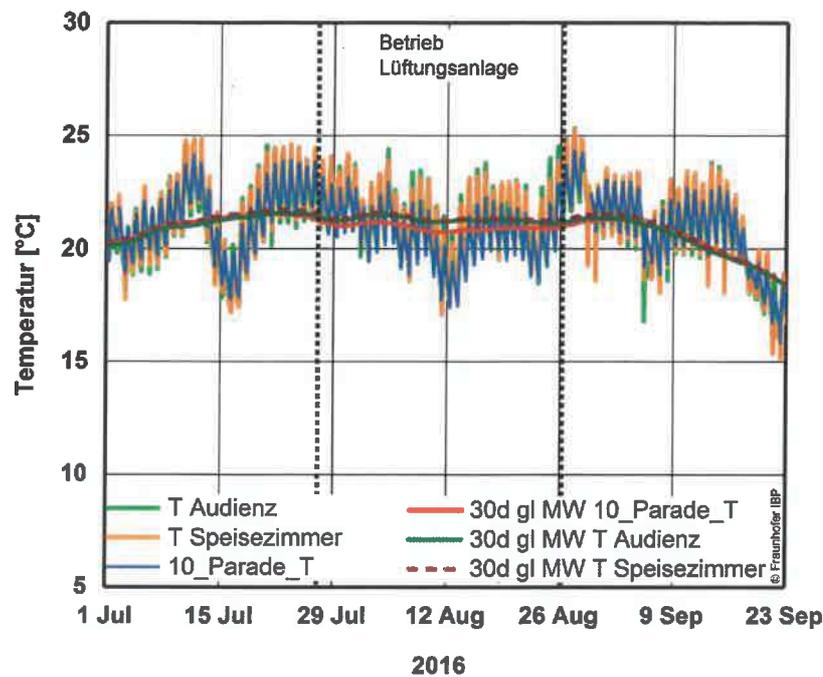


Bild 54:
Temperatur im Paradeschlafzimmer, Audienzzimmer und Speisezimmer für den Messzeitraum vom 1. Juli bis 23. September 2016 mit stündlichen Mittelwerten und gleitendem Monatsmittelwert der Messwerte.

3 Simulation von Malschichtoberflächen

3.1 Simulation eines Malschichtenaufbaus

Für die Entwicklung konkreter Klimavorgaben ist es sehr aufschlussreich, zu untersuchen, wie sich eine Temperatur- oder Feuchteschwankung auf die einzelnen Schichten im Materialverbund auswirkt. Auf diese Weise ist es möglich „ins Kunstwerk“ zu blicken und der Frage nachzugehen, was Klimaschwankungen bzw. auch die Änderung eines bestehenden Raumklimas an einer individuellen Materialkombination bewirken. Denn größere Abweichungen, die sich aufgrund von Feuchteschwankungen ergeben, können ein Indiz für ein Schadensrisiko sein.

Eine Möglichkeit zur Ermittlung dieser Daten ist die hygrothermische Simulation des Materialverbunds von Kunstwerken. Dafür sind Materialkenndaten (Sorptionsisotherme, μ -wert, Porosität, Dichte etc.) der einzelnen Schichten eines Kunstwerks notwendig. Im Rahmen der Doktorarbeit von Kristina Holl wurde eine Studie zur Reaktion unterschiedlicher Materialverbünde auf Feuchteschwankungen durchgeführt. Dazu wurde die historische Ausstattung von Schloss Linderhof als Fallstudie ausgewählt und an gefassten/vergoldeten Holzoberflächen und Leinwandgemälden vergleichende Simulationen mit und ohne Lüftungsanlage durchgeführt [7]. Bild 55 und Bild 56 zeigen anhand eines achtstündigen Feuchtesprungs von 70 auf 40 % r.F., wie abhängig die Reaktion vom Materialverbund ist. Das diffusionsoffene Leinwandgemälde

Bild 55 reagiert unmittelbar und sehr stark auf die klimatische Schwankung. Zwischen den einzelnen Schichten treten kaum Feuchtedifferenzen auf. Ca. fünf Stunden nach Reduzierung der relativen Luftfeuchte befindet sich der Verbund im neuen Gleichgewicht von 40 %, beim Anstieg zurück auf 70 % r.F. dauert es sechs Stunden bis zur Erlangung des erneuten Gleichgewichts. Gemäß Bild 56 reagiert der äußere Teil des Fichtenholzes (rot) auf die geänderten Klimabedingungen und sinkt bis auf 48 % r.F. ab, während die relative Luftfeuchte in der Mitte (orange) fast konstant bei 70 % r.F. bleibt und erst zeitverzögert nach Ende des Feuchtesprungs auf ca. 65 % absinkt. An der Innenseite des Trägers (türkis) sinkt sie bis auf 56 % r.F. ab. Der Schellacküberzug (grau) puffert von der Vorderseite her den restlichen Verbund, sodass die Fassungsschichten nur auf ca. 50 % r.F. absinken.

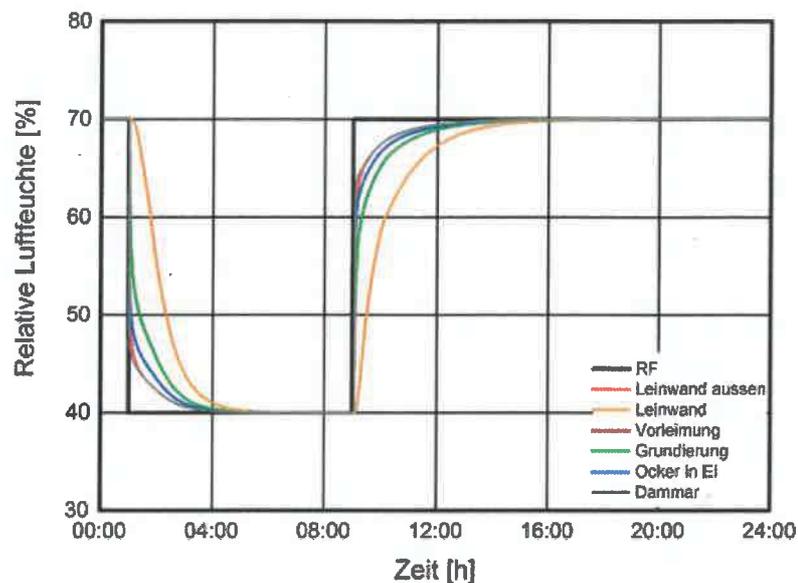


Bild 55:
Darstellung der einzelnen Schichten eines diffusionsoffenen Leinwandgemäldes auf einen achtstündigen Feuchtesprung von 70 % auf 40 % r.F. [7, S. 112/].

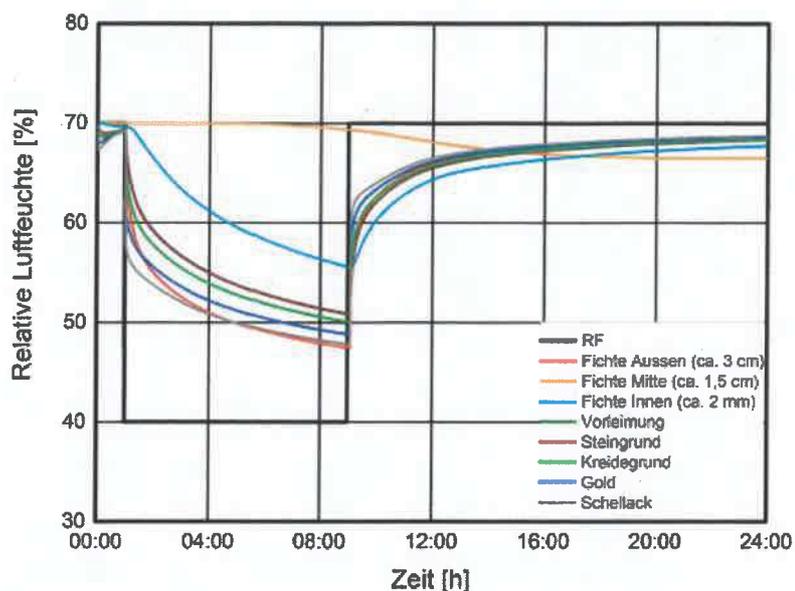


Bild 56:
Rechts: Darstellung der einzelnen Schichten eines diffusionshemmenden vergoldeten Holzpaneels auf einen achtstündigen Feuchtesprung von 70 % auf 40 % r.F. [7, S. 115].

3.2 Simulation Supraportengemälde mit und ohne Lüftungsanlage

Anhand des Vergleichs der Ausstattung von Schloss Linderhof mit und ohne Lüftungsanlage konnte die klimatische Veränderung, die durch die Anlage entstehen wird, in erster Näherung abgeschätzt werden. Dies ist hier am Beispiel der Supraportengemälde erläutert.

In Bild 57 und Bild 58 ist die Reaktion der einzelnen Schichten auf das Raumklima mit und ohne Lüftungsanlage in vierwöchigem Detail dargestellt. In beiden Szenarien ist die relative Luftfeuchte im Materialverbund sehr homogen. Es kommt lediglich bei sehr starken, kurzfristigen Klimaschwankungen z. B. durch Abfall der relativen Luftfeuchte am 2. Dezember von 85 % auf 70 % r.F. oder der Änderung des Raumklimas über mehrere Tage (Absinken der relativen Luftfeuchte zwischen 8. und 11. Dezember von 76 % auf 50 % r.F.) zu relevanten Differenzen zwischen den einzelnen Schichten. Der maximale Unterschied zwischen Firnis und Malschicht bzw. Malschicht und Grundierung beträgt ohne Klimatisierung 4,7 %, mit simulierter Lüftungsanlage 3 %. Trotzdem ist bei dem Szenario ohne Lüftungsanlage (siehe Bild 57) die Spreizung der Werte für die relative Luftfeuchte, insbesondere in den äußeren Schichten, hoch (Dammar: Maximum: 85 %, Minimum: 46 %; Ocker in Leinöl: Maximum: 81 %, Minimum: 49 % r.F.). Von den darüber liegenden Schichten gepuffert und durch den Schutz der Leinwandrückseite wegen des dahinter angebrachten Gemäldes, reagiert die Leinwand am geringsten auf die klimatischen Schwankungen. Die Lüftungsanlage reduziert vor allem extreme Ereignisse. In den einzelnen Schichten sind die Maxima der relativen Luftfeuchten um 10 % verringert (Dammar: Maximum: 75 %, Minimum: 48 % r.F.; Ocker in Leinöl: Maximum:

72 %, Minimum: 50 % r.F.). Der Mittelwert im Gemäldeverbund ändert sich hingegen nur um 1 % r.F.. Dies belegt das Konzept der Lüftungsanlage, dass lediglich die Feuchtespitzen, die zu abrupten Reaktionen in den angrenzenden Schichten führen, verhindert werden sollen. Die Gleichgewichtsfeuchte im Material bleibt unverändert.

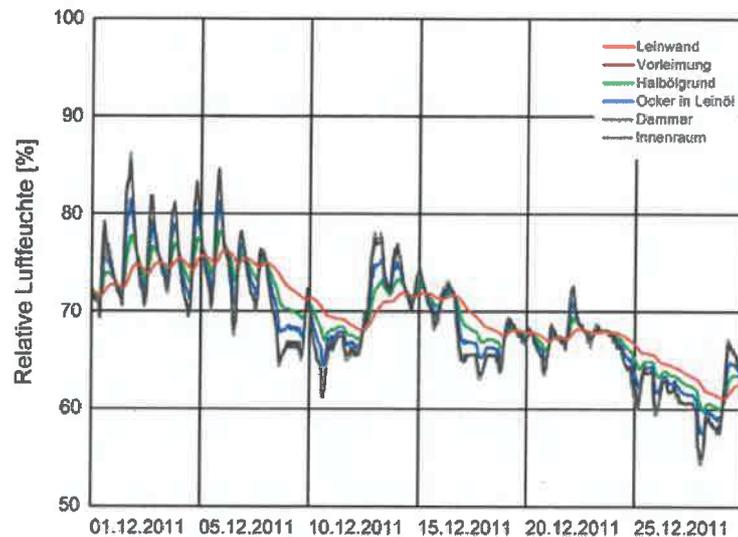


Bild 57:
Vergleich der relativen Luftfeuchte im Materialverbund eines Supraportengemäldes ohne Lüftungsanlage [7, S. 143].

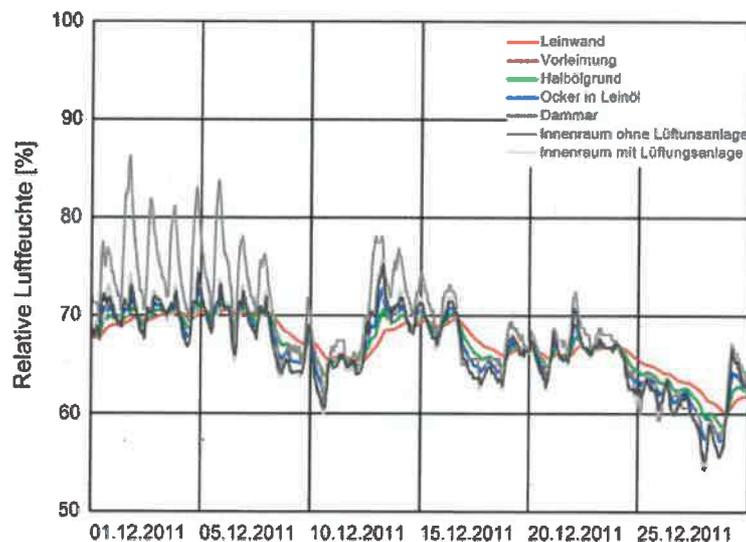


Bild 58:
Vergleich der relativen Luftfeuchte im Materialverbund eines Supraportengemäldes mit Lüftungsanlage [7, S. 143].

Anhand der unterschiedlichen Materialbeispiele und Szenarien konnte gezeigt werden, dass die Möglichkeit der Darstellung der Temperatur- und Feuchteverteilung im Materialverbund von Kunstwerken mit der hygrothermischen Simula-

tion hilfreich für das Verständnis der Vorgänge im Material ist. Wie individuell unterschiedliche Materialkombinationen auf dieselbe klimatische Schwankung reagieren wird damit nachvollziehbar.

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

4 Zusammenfassung und Ausblick

Zur Überprüfung der Wirkung der neu installierten Lüftungsanlage im Schloss Linderhof wurde eine umfangreiche Messanlage installiert. Die messtechnischen Untersuchungen gliedern sich in drei abgrenzbare Messaufgaben. Zum einen werden die Raumklimata im Paradeschlafzimmer sowie der angrenzenden Räume aufgezeichnet. Der Vergleich der Räume untereinander soll über die globale Auswirkung der Lüftungsanlage auf den Nordtrakt des Schlosses Auskunft geben. Der zweite Aspekt ist die Raumklimaverteilung im Paradeschlafzimmer mit und ohne Betrieb der Lüftungsanlage. Der dritte Aspekt ist die Messung der Betriebsweise und Luftzustandsänderung durch die Lüftungsanlage. Die Gesamtanlage unterteilt sich in den Anlagenteil Erdkanal für Frischluft sowie der Lüftungsanlage mit climatechnischen Komponenten Entfeuchtung, Erwärmung und Kühlung. Ein weiterer Anlagenteil ist der Erdkanal für Fortluft, der untergeordnet mitbetrachtet wurde.

Die Messungen im Erdkanal für die Frischluft ergeben durchwegs eine positive Unterstützung der Lüftungstechnischen Komponenten. Der intermittierende Betrieb der Lüftung erhöht die Wirkung des Erdkanals. Im Wesentlichen erfolgen die zu erwartende Kühlung der Außenluft in den Sommermonaten sowie eine Vorerwärmung in der kalten Jahreszeit. Der typische Tagesgang der Außenlufttemperatur wird durch den Erdkanal deutlich gedämpft. Dabei wird in den Sommermonaten in den Morgenstunden die noch kühle Außenluft zunächst erwärmt, um dann mit Anstieg der Außenlufttemperatur die Frischluft zu kühlen. Dies reduziert die erforderliche Kühlleistung der Lüftungsanlage. Dieser Effekt zeigt sich auch in den Wintermonaten, wobei hier die tageszeitliche Erwärmung nicht nachteilig wäre. Durch den intermittierenden Betrieb wird im Winter das Ansaugen besonders kalter Luft in den Nachtstunden vermieden. Der in den Wintermonaten geringe Volumenstrom führt zu einer höheren Vorerwärmung der Zuluft im Vergleich zum Sommer mit hohen Volumenströmen. Zum Teil wird auch eine geringe Entfeuchtungsleistung durch den Erdkanal festgestellt, die auf Taupunktunterschreitungen zurückzuführen ist.

Die Wirkung der Lüftungsanlage wird über die Messung der elektrischen Leistungsaufnahme, Erfassung der Luftgeschwindigkeit im Zuluftrohr sowie Änderung des Luftzustandes vor und nach dem Lüftungsgerät dokumentiert. Die festgestellte Entfeuchtungsleistung erreicht dabei im August 2016 in etwa die Hälfte der installierten Entfeuchtungskapazität. Die Kühlleistung zur Rückkühlung der durch die sorptive Entfeuchtung erwärmten Zuluft hat dementspre-

chend gleiche Reserven. Die festgestellte Entfeuchtungsmenge durch das Lüftungsgerät entspricht in etwa der durch die Besucher eingetragenen Feuchte für das Paradeschlafzimmer. Das Heizregister zur Erwärmung der Zuluft wird hingegen kaum beansprucht. Die halbe Leistung des Zuluftregisters hätte nach derzeitigem Stand mit ausreichenden Reserven ausgereicht.

Die Regelung der Lüftungsanlage wurde anhand von Vorgaben [6] programmiert. Im Wesentlichen entspricht das Verhalten der Lüftungsanlage den gestellten Anforderungen. Die Betriebszeit der Lüftungsanlage orientiert sich an den Öffnungszeiten des Schlosses. Wegen der aus Brandschutzgründen geforderten Stromlosschaltung des Schlosses wird die Anlage planmäßig abgeschaltet. Um ein sicheres Abschalten zu gewährleisten, erfolgt derzeit die Abschaltung deutlich vor dem Führungsende. An Tagen mit hohem Besucheraufkommen führt dies zu ungünstigen Auswirkungen auf das Raumklima, da nach dem Abschalten z. T. noch erhebliche Feuchtenmengen durch die Besucher eingetragen werden. Im Ergebnis kann ein Anstieg der absoluten Feuchte und in der Folge der relativen Feuchte um bis zu 7 % r.F. nach dem Abschalten beobachtet werden. Diese zusätzlichen Feuchtespitzen könnten mit längeren Laufzeiten vermieden bzw. abgemildert werden. Die zu frühe Abschaltung erschwert deshalb auch die Auswertung der Wirkungsweise der Lüftungsanlage auf das Raumklima, da die zusätzlich auftretenden Feuchtespitzen nicht aus dem Anlagenbetrieb stammen. Die Einhaltung der Vorgaben konnte auch während des Anlagenbetriebes nicht immer festgestellt werden. Bei einer Unterschreitung der vorgegebenen (einstellbaren) unteren Mindestgrenze der relativen Feuchte von 40 % r.F. der Zuluft (an der Einblasöffnung zum Paradeschlafzimmer) sollte die Anlage automatisch abschalten. Diese Luftzustände wurden mehrfach erreicht, ohne Abschaltung. Zudem wird festgestellt, dass eine noch mögliche Temperaturabsenkung der Zuluft zur Erhöhung der relativen Feuchte nicht genutzt wird (mit Absenken der Zulufttemperatur erhöht sich die relative Feuchte der Zuluft). Eine Überprüfung der Regelung und ggf. Optimierung erscheint hier erforderlich.

Die Lüftungsanlage wirkt sich positiv auf das Raumklima im Aufstellraum (Ankleide) aus. Der äußerst hohe Feuchtegehalt im Raum Ankleide wird durch die Sekundärwirkung der Lüftungsanlage langfristig gesenkt. Inwieweit sich eine Absenkung des Feuchteniveaus auf angrenzende Räume auswirkt, kann anhand der vorliegenden Daten nicht abgeschätzt werden. Insbesondere sollte langfristig das Raumklima im Bad auf Veränderungen durch den Anlagenbetrieb beobachtet werden.

Die horizontale Raumklimaverteilung im Paradeschlafzimmer ist erstaunlich gleichmäßig. Die horizontale Raumklimaverteilung mit niedrigeren oder höheren Zulufttemperaturen im Vergleich zur Raumtemperatur und hohen oder niedrigem Zuluft-Volumenstrom bleibt nahezu unbeeinflusst homogen.

Die Lüftungsanlage wirkt sich auf das Feuchteniveau im Paradeschlafzimmer positiv aus. Der gewünschte Effekt der Angleichung der relativen Feuchte auf das Niveau der angrenzenden Räume stellt sich ein. Durch die interzonalen

Luftströmungen beeinflusst das Raumklima im Paradeschlafzimmer das der angrenzenden Räume. Der Grad der gegenseitigen Beeinflussung kann wegen des unterbrochenen Betriebes mit dem zu frühen Abschalten nicht quantifiziert werden.

Durch späte Inbetriebnahme und Unterbrechungen des Anlagenbetriebes während der Messkampagne, kann die Wirkung der Anlage auf das Raumklima nur in begrenztem Umfang bewertet werden. Ebenso wird die Bewertung durch das frühe tägliche Abschalten der Anlage vor Führungsende eingeschränkt.

Die Regelung der Lüftungsanlage könnte optimiert werden. Eine Optimierung der Abschaltkriterien, des Abschaltzeitpunktes, der Regel-Antwortzeit (Dämpfung der Regelung) sowie eine Regelung des Volumenstroms anstatt fester Steuervorgaben können das Raumklima weiter verbessern und stabilisieren. Die Fortführung der messtechnischen Untersuchungen mit Bewertung der Wirkungsweise wird empfohlen, um die Auswirkungen eines langfristigen Anlagenbetriebes ohne größere Unterbrechungen überprüfen zu können. Insbesondere für die Optimierung der Regelung sollte die Messung und Überwachung der Anlage fortgeführt werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Schramek (Hg.) (2011): Recknagel, Sprenger, Schramek: Taschenbuch für Heizung + Klimatechnik. einschließlich Warmwasser- und Kältetechnik. 75. Aufl. München. Oldenbourg Verlag.
- [2] Verein Deutscher Ingenieure (Hg.) (2006): VDI-Wärmeatlas. 10. bearbeitete und erweiterte Auflage. Springer Verlag.
- [3] Bichlmair, Stefan (2010): Simulation und Analyse des Raumklimas in ausgewählten Räumen im Schloss Linderhof. Masterarbeit 2010, HS Rosenheim.
- [4] Bichlmair, Stefan; Kilian, Ralf; Krus, Martin (2012): Gebäudesimulation des Paradeschlafzimmers in Schloss Linderhof unter Berücksichtigung der Besucher. In: IPBSA Germany (Hg.): BauSIM., Paper ID 173, S. 407-415.
- [5] Kilian, Ralf (2013): Klimastabilität historischer Gebäude. Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der Präventiven Konservierung. Stuttgart: Fraunhofer Verlag (Forschungsergebnisse aus der Bauphysik, 15). Dissertation.
- [6] Bichlmair, Stefan, Kilian Ralf (2013): Planungsvorgaben für die Pilotlüftungsanlage Schloss Linderhof. Fraunhofer IBP, nicht veröffentlicht, 8.11.2013, Valley.
- [7] Holl, Kristina (2016): Der Einfluss von Klimaschwankungen auf Kunstwerke im historischen Kontext. Untersuchung des Schadensrisikos anhand von restauratorischer Zustandsbewertung, Laborversuchen und Simulation. Dissertation. TU München, Lehrstuhl für Restaurierung, Kunsttechnologie und Konservierungswissenschaft.



Leitfaden zur Entwicklung einer Methode zur Beurteilung von klimatisch bedingten Bewegungen an Kunstwerken

Vorwort

In Museen wird die Diskussion um das „richtige“ Klima für Kunstwerke nach wie vor sehr lebhaft geführt (IIC 2014). Oftmals bestehen gerade große Häuser auf engen Klimavorgaben (meist 20 °C, 50 ± 5 % rF, vgl. Eibl / Burmester 2013), lassen sich diese Anforderungen in mit Klimatechnik ausgestatteten Museumsgebäuden relativ leicht einhalten. In historischen Gebäuden hingegen sind diese nur schwer und mit einem hohen Risiko an Folgeschäden umzusetzen. Der Einbau von Klimatechnik erfordert massive Eingriffe in die Bausubstanz, es können bei Fehlfunktionen erhebliche Schäden, beispielsweise durch Kondenswasser auf den historischen Oberflächen, entstehen. Ein enger Klimakorridor wird meist durch einen enormen Technikeinsatz realisiert, der zudem einen hohen energetischen Aufwand bedeutet. Tatsächlich ist der Zustand von Kunstwerken – auf den ersten Blick und abhängig von der Materialgattung – in historischen Gebäuden ohne engen Klimakorridor oftmals überraschend gut. Im Sinne der Nachhaltigkeit und Risikominimierung ist daher die Frage zu stellen, welche Klimaschwankungen für Kunstwerke tolerabel sind. Diese Frage zu beantworten ist herausfordernd, berührt sie doch komplexe Zusammenhänge von Materialität, Kunsttechnologie, Alterungsprozessen, Analysemethoden sowie Nutzungs- und Rahmenbedingungen.

Kunstwerke reagieren sehr unterschiedlich auf klimatische Schwankungen. Sie hängt primär von den physikalischen Eigenschaften der vorhandenen Materialien/Materialkombinationen ab. So kann Pergament beispielsweise wesentlich schneller Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben, als ein diffusionshemmender Materialverbund, etwa ein Holzpaneel mit einem hydrophoben Farbanstrich. Auch der Erhaltungszustand und die individuelle Klimageschichte wirken sich hinsichtlich der Reaktionsgeschwindigkeit aus. Eine gealterte, craquelierte Oberfläche reagiert beispielsweise aufgrund des beschleunigten Feuchtetransports durch die Mikrorisse schneller auf kurzfristige Feuchteschwankungen als eine intakte Oberfläche.

Ziel des Leitfadens ist es, einen möglichen Weg für die Untersuchung der individuellen Reaktion von Kunstwerken und Ausstattungen in denkmalgeschützten Gebäuden hinsichtlich klimatischer Schwankungen zu beschreiben, um tolerierbare Klimaschwankungen festlegen zu können. Dazu wurde eine Herangehensweise entwickelt, die im Folgenden in einzelnen Schritten beschrieben ist.

Schritt 1: Beschreibung des Objektes und der Sachlage

Zunächst ist es notwendig, die Ausgangssituation eingehend zu beschreiben. Dazu gehören neben Informationen zum Standort und der Art des Gebäudes eine Beschreibung der Ausstattung und der Materialien, um die es sich handelt. Des Weiteren sind die relevante Sachlage und die daraus entstehende Problematik festzuhalten. Das Problem kann u.U. auch im Kontext liegen, etwa bei der Nutzung eines Raumes bei Veranstaltungen, und (noch) nicht beim Objekt.

Schritt 2: Untersuchung des Erhaltungszustands und Darstellung möglicher Ursachen für Verfallserscheinungen

In welchem Zustand befindet sich die Ausstattung oder das betroffene Objekt? Es erfolgt eine augenscheinliche restauratorische Zustandsuntersuchung der in den Räumlichkeiten befindlichen Kunstwerke. Ergänzende bauphysikalische Untersuchungen, wie z.B. die Untersuchung der Gebäudedichtigkeit und Feuchtebelastung, können nützliche Hinweise auf Schadenspotentiale geben. Eine begleitende Erfassung und Auswertung des Raumklimas hinsichtlich kurz- und langfristiger Temperatur- und Feuchteschwankungen ist ebenfalls für die Bewertung klimatisch bedingter Schäden erforderlich. Ist bereits bekannt, dass sich das Raumklima in Zukunft, z.B. durch den Einbau einer lokalen Heizung, Be- oder Entfeuchtung, ändern wird, sollten hier ebenfalls Prognosen (Klimaziellkorridor) vorgenommen werden, wie es sich ändern wird. Faktoren, die direkten oder indirekten Einfluss auf das Raumklima haben, etwa durch die Nutzung des Gebäudes (geöffnete Fenster, Tageslichteintrag), sollten ebenfalls in die Beschreibung einfließen.

Schritt 3: Formulierung einer Problemstellung

Aus der Ausgangssituation und der Analyse des Erhaltungszustands kann die Problemstellung formuliert werden.

Denkbar sind unterschiedliche Szenarien. Hier sind einige Beispiele genannt:

- a) Welche Klimaschwankungen sind schädlich für die im Raum befindliche, ggf. vorgeschädigte Ausstattung (z. B. Lockerung der Malschicht)?
- b) Welche Auswirkung hat die Änderung des Klima z. B. durch den Einbau einer Temperierung auf die Ausstattung?
- c) Welches Klima ist bei einer Wechselausstellung mit Leihgaben, die aus unterschiedlichen Klimata kommen (Kirche vs. Museum) anzustreben?

Schritt 4: Erarbeitung eines Monitoringkonzeptes

Die Fragestellung ist für die Entwicklung eines Monitoringkonzeptes unerlässlich, da diese die Methoden und die erforderlichen Messzeiträume, wie auch die Taktung vorgibt. Für das Konzept müssen außerdem die Randbedingungen erörtert werden. Beispielsweise muss der Zugang zu den zu untersuchenden Oberflächen gewährleistet sein, möglicherweise wird ein Gerüst o.ä. benötigt.

Festlegung der Testflächen

Bei der Wahl geeigneter Testflächen und -räume ist zum einen die Materialität zu berücksichtigen, aber auch die Aufstell- bzw. Hängeposition im Raum. Hier sind klimatisch kritische Positionen zu favorisieren, um die größte klimatische Belastung einfangen zu können. Der Erhaltungszustand eines Kunstwerks kann ebenfalls die Auswahl beeinflussen. Mit Hilfe der restauratorischen Untersuchung und in Absprache mit den Verantwortlichen vor Ort kann abgeschätzt werden, welche Objekte am empfindlichsten hinsichtlich Materialität oder Vorschädigung sind, ob eine klimatisch bedingte Schädigung vorliegt oder dies durch ein sich neu bildendes Mikroklima zu erwarten wäre.

Weiter gilt es bei der Wahl der Oberflächen abzuwägen, ob an der ausgewählten Position ein Monitoring erfolgen kann bzw. was notwendig ist, um dieses durchzuführen (beispielsweise Einschränkungen durch Besucherbetrieb).

Wahl der Monitoringmethode(n)

Je nachdem welche Methode für die jeweilige Fragestellung und Materialgruppe am geeignetsten ist, fällt die Wahl auf unterschiedliche Verfahren. Auch die Kombination von mehreren Methoden, etwa um unterschiedliche Zeiträume abzudecken, ist denkbar.

Vorab muss geklärt werden, ob das gewählte System vor Ort einsetzbar ist bzw. zu welchen Bedingungen (Stromzugang, Einschränkungen der Nutzung durch zu starke Glanzentwicklung bei Streifenlichtscans etc.). In Hinblick auf die Erhaltung der originalen Substanz sollte auch die Verträglichkeit der jeweiligen Oberfläche mit der Monitoringmethode sichergestellt sein. Beispielsweise kann der Einsatz von Laserstrahlen lichtempfindliche Objekte schädigen und es bestehen Schadensrisiken durch thermische Anregung bei IR-Kamera und Shearografie.

Weiter sollte gewährleistet sein, dass die jeweilige Methode mit der vorgesehenen Taktung auch technisch umgesetzt werden kann. Bei vielen Verfahren ist beispielsweise eine erschütterungsfreie Umgebung erforderlich (Streifenlichtscanner, Shearografie, Fotografie, etc.). Hier müssten die Messungen bei Bedarf in einem Zeitraum ohne Besucherbetrieb, z. B. nachts oder an einem Schließtag, durchgeführt werden.

Speziell bei Messaufbauten, die über einen längeren Zeitraum an einem Ort aufgestellt bleiben (3D-Mikroskopie, Zeitraffer-Aufnahmen mit SLR Kamera), muss die Möglichkeit zur Durchführung des Monitorings bei Besucherbetrieb berücksichtigt werden. Das Messequipment

sollte beispielsweise nicht in die ausgewiesenen Wege hinein ragen oder falls notwendig der Weg mit ausreichendem Abstand zum Messaufbau abgesperrt werden.

Neben der Auswahl der Verfahren und Versuchsflächen ist es auch notwendig, das *Mikroklima* an den festgelegten Oberflächen zu messen. Denn nur so können Klimaschwankungen und die Reaktion des Kunstwerks darauf in Zusammenhang gebracht werden. Die alleinige Ermittlung des Raumklimas (Temperatur, relative Feuchte) ist hier zu ungenau. Auch die Messung der Luftgeschwindigkeit kann helfen, Schadensursachen zu finden.

Im Folgenden ist eine Auswahl an möglichen Methoden zur Untersuchung der Reaktion von Kulturgut auf Klimaschwankungen zusammengetragen:

Streifenlichtscanner

Prinzip: Untersuchung von kurz- und langfristigen Schwankungen von Kunstwerken.
Anwendung: Untersuchung der Bewegung an historischen Oberflächen aufgrund von klimatischen Schwankungen.

Zeitgesteuerte Aufnahmen mit hochauflösender Fotografie / Mikroskopie

Prinzip: Dokumentation der Bewegung aufgrund von klimatischen Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchte.
Anwendung: Monitoring der Bewegung von vorgeschädigten Oberflächen bei kurzfristigen Schwankungen.

Digital Image Correlation

Prinzip: Dokumentation der Veränderung eines Kunstwerk durch Abgleich mehrerer Fotoaufnahmen im zeitlichen Verlauf.
Anwendung: Monitoring der Bewegung von Oberflächen in Abhängigkeit mit dem Raumklima.

Shearografie

Prinzip: Untersuchung von Hohlstellen und Materialveränderungen.
Anwendung: Detektion von (unsichtbaren) Lockerungen und Hohlstellen für die Auswahl vorgeschädigter Oberflächen.

Thermografie

Prinzip: Untersuchung der Oberflächentemperatur an Kunstwerken und Bauteilen.
Anwendung: Untersuchung der Auswirkung einer Wärmequelle auf historische Oberflächen.

Untersuchung der Gewichtsänderung

Prinzip: Dokumentation der Gewichtsänderung eines Kunstwerks bei Änderung des Klimas.
Anwendung: Indirekte Methode zur Beurteilung der Reaktion von Kunstgattungen auf Klimaschwankungen.

Glassensoren

Prinzip: Frühwarnsystem durch die beschleunigte Alterung imitierter historischer Gläser, die anfällig gegenüber Klimaschwankungen und Umwelteinflüssen sind.
Anwendung: Untersuchung des Raumklimas hinsichtlich der allgemeinen schädlichen Auswirkung auf Kunstwerke.

Wahl des Zeitraums

Abhängig von der Nutzung und der Klimatisierungsstrategie unterliegen Gebäude bestimmten Zeiträumen mit unterschiedlichen Klimaverhältnissen. In Hinblick auf das Monitoring sollten – in Abhängigkeit von der Fragestellung – die klimatisch interessantesten Zeiträume (witterungsbedingte Eisbildung an Wandoberflächen, Kondensationsprobleme im Frühling durch ungünstige Belüftung unbeheizter Räume etc.) untersucht werden. Zur Untersuchung des Einflusses der Besucher ist beispielsweise ein Vergleich in einem Zeitraum mit wenigen und vielen Besuchern anzuraten. Auch die Taktung, also die Anzahl an Wiederholungen der Messung zu bestimmten Zeiten richtet sich nach der eingangs festgelegten Fragestellung.

Schritt 5: Durchführung des Monitorings

Abhängig von der oder den gewählten Methode(n) und der Taktung finden mehrere Messungen über zwei oder mehrere Tage vor Ort statt. Standardmäßig sollte die Durchführung der Messungen fotografisch dokumentiert werden und die Positionen in einem Grundriss markiert werden.

Wichtig für die spätere Interpretation der Daten ist eine detaillierte Dokumentation des Raumklimas. Neben der Erfassung von Temperatur und relativer Luftfeuchte in unmittelbarer Nähe der Testflächen kann auch die Dokumentation des CO₂- Gehalts aufschlussreich und sinnvoll sein. Er ist ein Indikator für unzureichende Belüftung bei hohem Besucheraufkommen.

Schritt 6: Auswertung der Messungen / Analyse der Ergebnisse

Je nach gewähltem Verfahren kann meist eine zugehörige Software für die Auswertung der Messungen herangezogen werden. Ausnahme sind zeitgesteuerte Foto- oder Mikroskopaufnahmen. In Hinblick auf die Bewertung der Reaktion der Testflächen auf die Klimabedingungen ist es notwendig, das erhobene Klima vor, während und nach den Messungen für die Analyse einzubinden. Speziell Holz als Trägermaterial unterliegt häufig einer zeitlich verzögerten Reaktion auf Klimaschwankungen. Daher ist es wichtig für die Beurteilung von Bewegungen, auch das vergangene Klima, bestenfalls ein Jahreszyklus, mit zu berücksichtigen.

Die Darstellung der Ergebnisse variierte nach ausgewählter Methode und Taktung. Als Beispiel sei hier der Vergleich zweier Messungen mit dem Streifenlichtscanner gezeigt (Abbildung 1).

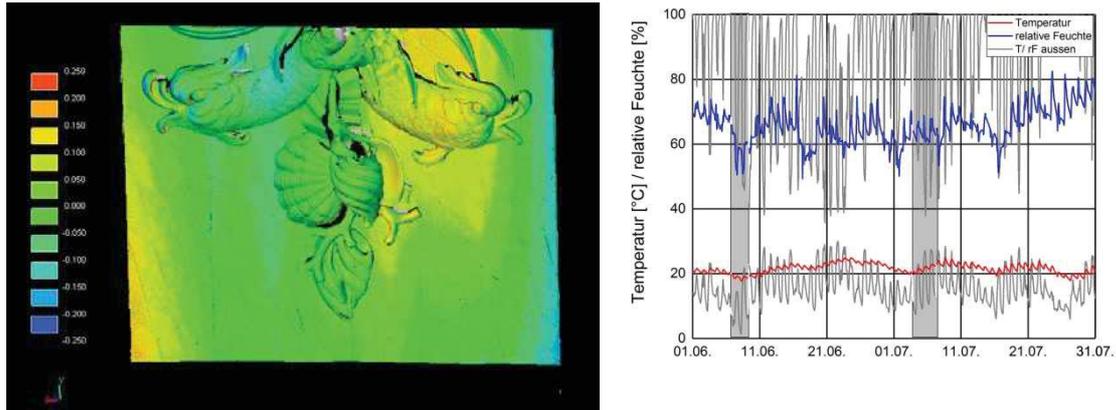


Abbildung 1:

Links: Darstellung der klimatisch bedingten Bewegung mit farbig codierter Darstellung nach vorne (gelb / orange/ rot) und nach hinten (dunkelgrün / blau) am Beispiel einer vergoldeten Holzszulpterei mit Hilfe eines Streifenlichtscanners.

Rechts: Grafische Darstellung des Mikroklimas an der Versuchsfläche im Zeitraum von Juni – Juli 2017 mit Markierung der Zeiträume der Messkampagnen (grau hinterlegt) (© Bayerische Schlösserverwaltung).

Schritt 7: Bewertung des Monitorings / Empfehlungen

Nach der Auswertung der Messungen erfolgt unter Berücksichtigung der Spezifik der jeweiligen Testflächen eine Einschätzung der Auswirkung des Klimas auf die Ausstattung oder das betroffene Kunstwerk. Je nach Fragestellung wird anhand der Daten eine individuelle Empfehlung zur Handhabung der Kunstwerke, zur Regulierung des Raumklimas oder zu weiterführenden Schutzmaßnahmen gegeben.

Das Monitoring ist eine Möglichkeit um abzuschätzen, inwieweit die Ausstattung aufgrund der derzeitigen oder künftigen klimatischen Bedingungen einem Risiko unterliegt oder sich die Situation durch die Umsetzung einer Maßnahme verbessert hat. Basierend auf dem Zeitraum, in dem das Monitoring durchgeführt wurde, wird eine Prognose für das künftige Verhalten gegeben.

Insbesondere die langfristige Änderung des Raumklimas durch einen Eingriff, wie die Installation einer Anlage zur Klimaregulierung, führt zu einer Veränderung der Konditionen, die über einen längeren Zeitraum (mehr als ein Jahr) zu Bewegungen innerhalb eines Kunstwerks führen kann. Daher sind Bewegungen, die innerhalb des Zeitraums der Änderung des Klimas detektiert werden nicht als final zu definieren. Weiter ist die Definition eines Schadens aufgrund der detektierten Bewegungen auszulegen.

Wichtig ist zu beachten, dass aufgrund der Natur der geschilderten Vorgehensweise keine absolut realistischen Aussagen getroffen werden können. Da es sich meist um punktuelle Untersuchungen handelt und somit nur ein kleiner Zeitraum in der Klimageschichte des Kunstwerks abgedeckt wird, und aufgrund der Vielfalt von Einflussfaktoren, besteht trotz sorgfältiger Arbeitsweise ein Risiko zu Fehleinschätzungen. Dieses kann durch zeitlich

ausgedehnte Untersuchungen minimiert werden. Trotz der Einschränkung stellt die vorgestellte Methode eine gute Basis für die Beurteilung von klimatisch bedingten Bewegungen dar.

Weiterführende Literatur

- | | |
|---|--|
| Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und archäologisches Landesmuseum 2010 | Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und archäologisches Landesmuseum (Hrsg): Zerstörungsfreie Oberflächenuntersuchungsverfahren: Beiträge des 4. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Landesmuseum 2010 Berlin/Brandenburg am 29. Oktober 2010 in Potsdam |
| Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und archäologisches Landesmuseum 2011 | Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und archäologisches Landesmuseum (Hrsg): Einfache, zerstörungsfreie Prüfverfahren: Beiträge des 5. Konservierungswissenschaftlichen Kolloquiums in Berlin/Brandenburg am 18. November 2011 in Potsdam |
| Eibl Burmester 2013 | Bauernfeind, Melanie (geb. Eibl), Burmester, Andreas: Stable is safe. Die Münchner Positionen zu Klima und Kulturgut, www.doernerinstitut.de/downloads/Stellungnahme_Doerner_Bizot_de.pdf , Stand 13.3.2018 |
| Hein 2015 | Hein, Niclas: Die materielle Veränderung von Kunst durch Transporte – Monitoring und Transportschadensbewertung an Gemälden durch das Streifenprojektionsverfahren, Dissertation Stuttgart 2015 |
| Holl Janis 2018 | Holl, Kristina, Janis, Katrin: Wissenschaftliche Begleitung einer Maßnahme zur Präventiven Konservierung in Schloss Linderhof, Abschlussbericht DBU-Projekt Linderhof AZ 31017, April 2018 |
| IIC 2014 | IIC announces declaration on Environmental Guidelines, https://www.iiconservation.org/node/5168 , Stand 14.3.2018 |