

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

DBU-Förderprojekt AZ 33881/01-45

www.dbu.de

Beseitigung und Vermeidung nutzungsbedingter anthropogener Umweltschäden am Beispiel der national bedeutenden Schlosskapelle in Celle



Niedersächsisches Landesamt
für Denkmalpflege

Abschlussbericht

**Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege (NLD) mit Beiträgen der
Projektpartner**

- **Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst/Hildesheim (HAWK),
Konservierung und Restaurierung**
- **Ingenieurbüro Dr. Berling, Braunschweig**
- **Staatliches Baumanagement Lüneburger Heide, Celle (SBLH)**
- **Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB)**

Laufzeit: Januar 2017 bis April 2020

Herausgeber:

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege

Präsidentin Dr.-Ing. Christina Krafczyk

Scharnhorststraße 1

30175 Hannover

Gesamtredaktion:

Christina Achhammer, Christoph Fiebiger, Dr. Klaus Püttmann, Dr. Erwin Stadlbauer (alle NLD)

Hannover, den 05.03.2021

Titelbild: Innenraum der Celler Schlosskapelle in Ostrichtung mit Blick auf den Altar, Foto Loeper, Celle 2012.

Inhalt

1. Einleitung.....	6
2. Projektthemen und Ergebnisse	7
2.1 Die Erhaltung des Celler Residenzschlosses als Langzeitaufgabe des Staatlichen Baumanagements	7
Burkhard Flügge, Helmut Matterne und Marten Meyer-Bothling	7
Schwerpunkte der aktuellen Bauarbeiten und Planungen	7
2.1.1.1 Denkmalverträgliches Nutzungskonzept	7
2.1.1.2 Vervollständigung der barrierefreien Erschließung und Eingänge	8
2.1.1.3 Sanierung veralteter und reparaturanfälliger technischer Anlagen	8
2.1.1.4 Sicherung bedeutender Bausubstanz	8
Interaktion als Chance	10
2.2 Frühere Nutzung und anthropogene Schäden.....	12
Christina Achhammer und Erwin Stadlbauer	12
2.2.1 Bestand und Zustand.....	12
2.2.2 Frühere Nutzung, Restaurierung und anthropogene Schäden	14
2.3 Nutzungsorientierte Erfassung von Bestand und Zustand	16
Michael von der Goltz, HAWK	16
2.3.1 Verlauf.....	16
2.3.2 Fazit.....	17
2.4 Raumklimauntersuchungen	18
Helmut Berling und Axel Büssing	18
2.4.1 Gebäude, Ausgangssituation und Aufgabenstellung.....	18
2.4.2 Raumklimauntersuchungen	18
2.4.2.1 Messorte	18
2.4.2.2 Messtechnik	20
2.4.3 Ergebnisse der Klimamessung	20
2.4.3.1 Lufttemperatur	20
2.4.3.2 Relative Luftfeuchte	21
2.4.3.3 Absolute Luftfeuchte	21
2.4.3.4 Oberflächentemperaturen.....	22
2.4.3.5 Taupunkttemperaturen	23
2.4.4 Nutzungserprobung.....	23
2.4.5 Technische Einrichtungen.....	25
2.4.5.1 Luftbehandlung.....	27
2.4.5.2 Steuerung (Funktionsprinzip)	27
2.4.6 Spezielle klimatische Bereiche	30
2.4.7 Zusammenfassung und Empfehlungen.....	31
Anhang: Klimadiagramme	33

2.5	Strömungssimulation mit einem bauphysikalischen 3D-Rechenmodell...	51
	Zaher Ramadan und Harald Garrecht	51
2.5.1	Verwendete Software	51
2.5.2	Erstellen des 3D-Raummodells	52
2.5.3	Stationäre Betrachtung	54
2.5.4	CFD-Simulation unter instationärer Betrachtung.....	55
2.5.4.1	Einfluss von Besucher auf das Raumklima der Schlosskapelle.....	55
	2.5.4.2 Durchführung der Simulationen.....	58
	2.5.4.3 Instationäre Betrachtungen mit „Solids“	65
	2.5.4.4 Verbesserung der Luftströmung unter den Bänken	66
2.5.5	Zusammenfassung und Ausblick.....	71
2.6	Untersuchungen zur mikrobiellen Belastung	72
	Karin Petersen, Ullrich Fritz und Gabriele Krüger	72
2.6.1	Einleitung	72
2.6.2	Zu den durchgeführten Untersuchungen	72
2.6.3	Die erzielten Ergebnisse	73
	2.6.3.1 Dokumentation der besiedelten Bereiche	73
	2.6.3.2 Nachweis von Adenosintriphosphat (ATP).....	74
	2.6.3.3 Identifizierte Arten.....	75
	2.6.3.4 Anzucht aus Kontaktproben	75
	2.6.3.6 Luftkeimmessung	80
2.6.4	Zusammenfassung.....	83
2.7	Referenzflächen-Monitoring	84
	Christina Achhammer und Christoph Fiebiger	84
2.7.1	Monitoring Staub.....	85
2.7.2	Monitoring des mikrobiellen Befalls	86
2.7.3	Monitoring Materialbewegung.....	88
2.7.4	Fazit.....	92
2.8	Erfassung bauphysikalischer Klimaparameter nach Inbetriebnahme der Raumluftkonditionierung und Optimierung der Luftströmungsverhältnisse	93
	Helmut Berling und Axel Büssing	93
2.8.1	Raumklimauntersuchungen	93
	2.8.1.1 Messorte	93
	2.8.1.2 Messtechnik.....	95
2.8.2	Ergebnisse der Klimamessung	95
2.8.3	Nutzungserprobung	96
2.8.4	Änderung der Luftführung.....	98
	2.8.4.1 Bereich Sitzbänke (Abluft)	98
	2.8.4.2 Chorbereich (Zuluft).....	99
2.8.5	Manuelle Aktivierung des Umluftbetriebes.....	100
2.8.6	Anpassung des Klimakorridors.....	101

2.8.7	Empfehlungen	101
	Anhang: Klimadiagramme	101
2.9	Präventive Konservierung und denkmalverträgliche Nutzung.....	107
	Erwin Stadlbauer, Christina Achhammer und Christoph Fiebiger	107
2.9.1	Das Leitbild der Nutzung - früher und heute	107
2.9.2	In Schritten zur präventiven Konservierung	108
2.9.2.1	Raumluftkonditionierung.....	108
2.9.2.2	Nutzungserprobungen	109
2.9.2.3	Konservierungswissenschaftliche Bewertungskriterien.....	110
2.9.2.4	Möglichkeiten der Nutzung im Rahmen der präventiven Konservierung	111
2.9.3	Schlussfolgerungen und Ausblick.....	113
3.	Kooperation, Kommunikation und Wissenstransfer.....	114
3.1	Projektbeteiligte Institutionen (alphabetisch) und Personen	114
3.2	Projektbegleitende Institutionen, Firmen und Personen	114
3.3	Kooperation und Dokumentation.....	115
3.4	Öffentlichkeitsarbeit, Medienecho, Vorträge und Publikationen.....	115
4.	Zusammenfassung und Ausblick	119
5.	Literatur	121
	Dank.....	123

1. Einleitung

Die Celler Schlosskapelle ist ein Gesamtkunstwerk von europäischem Rang. Die Übernutzung durch starken Besucherverkehr führte in den 1960er Jahren und von 1980 bis 1994 zu erheblichen anthropogenen Schäden. Die öffentliche Zugänglichkeit musste deshalb seit 1995 auf einen verglasten Besucherraum beschränkt werden. Dieses Schutzkonzept wurde in den letzten Jahren jedoch zunehmend hinterfragt und die frühere Zugänglichkeit gefordert.

Mit dem Modellvorhaben sollten daher die Möglichkeiten und die Grenzen der Nutzung ermittelt werden. Hauptziel war und ist jedoch die Beseitigung und Vermeidung anthropogener Umweltschäden infolge von zu häufigen und zu starken Klimaschwankungen. Für die besonders gefährdeten Holztafel- und Leinwandgemälde galt es, das konservatorische Optimum zu bestimmen, um zu trockene und zu feuchte Raumklimabedingungen ausschließen zu können.

Zu diesem Zweck wurde anhand von bauphysikalischen Voruntersuchungen für die Schlosskapelle eine Anlage entwickelt und realisiert, die zur automatischen Be- und Entlüftung sowie zur Entfeuchtung dient. Zur Programmierung und zur Prüfung ihrer Wirksamkeit wurden umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, insbesondere Klimamessungen und Zustandskontrollen ausgewählter Referenzflächen. Außerdem wurde in einem innovativen Projektansatz ein bauphysikalisches 3D-Rechenmodell der Schlosskapelle erstellt. Dadurch wurden Strömungssimulationen wie auch virtuelle Nutzungserprobungen ermöglicht.

Die Projektlaufzeit von Januar 2017 bis April 2020 setzt sich aus drei Phasen zusammen:

In der ersten Phase (1. bis 3. Quartal 2017) wurde das bauphysikalische 3D-Rechenmodell mittels Star-CCM+ erstellt (IWB, Universität Stuttgart). Dafür konnten die in einem Vorprojekt entstandenen FBX-Laserscandaten der Hochschule Hannover verwendet werden.

In der zweiten Phase (4. Quartal 2017 bis 1. Quartal 2019) wurde das Geometriemodell validiert und es wurden Simulationen in stationärer und instationärer Betrachtung durchgeführt. Das Rechenmodell wurde anhand von gemessenen Werten ständig überprüft und optimiert. Danach wurde mittels CFD-Simulation ein virtueller Funktionstest der geplanten und im 1. Quartal 2019 realisierten Anlage zur Be- und Entlüftung durchgeführt.

In der dritten Phase (2. Quartal 2019 bis 1. Quartal 2020) wurde mit der Strömungssimulation der Testbetrieb der Anlage begleitet.

In allen Projektphasen wurden die Klimadaten im Innenraum sowie auch im Nahfeld ausgewählter Referenzobjekte und -flächen erfasst und bewertet. Zudem wurden in diesen Bereichen ein restauratorisches und mikrobiologisches Monitoring durchgeführt.

Das Vorhaben basierte auf den Ergebnissen von mehreren Vorarbeiten, insbesondere

- dem EFRE-Projekt von 2014 bis 2015 zur Erfassung von Bestand und Zustand sowie zur Gefährdungsbeurteilung (Leitung durch HAWK und NLD);
- der Bau- und Sicherungsmaßnahmen von 2016 bis 2017, vor allem zur Reduzierung des unkontrollierten Luftwechsels (im Auftrag des SBLH und in Abstimmung mit NLD);
- der Erstellung eines Aufmaßes (im Auftrag des SBLH) und 3D-Erfassung des Innenraums mit Laserscan durch eine Projektgruppe der Hochschule Hannover im Auftrag der Stadt Celle und in Abstimmung mit dem NLD (2016).

2. Projektthemen und Ergebnisse

2.1 Die Erhaltung des Celler Residenzschlosses als Langzeitaufgabe des Staatlichen Baumanagements

Burkhard Flügge, Helmut Matteredne und Marten Meyer-Bothling

Das Celler Schloss wurde als „castrum“ im Jahre 1318 erstmals erwähnt. Zunächst nur eine einfache Burg, entwickelte es sich im Laufe der Jahrhunderte im stetigen Um- und Anbau zu einer herrschaftlich prächtigen und aufwändigen Vierflügelanlage. Baubetrieb ist also für das Schloss ein gewohnter Zustand.



Abb. 2.1-01: Schlossansicht Frühling 2020, Foto SBLH

Das Land ist Eigentümer des Residenzschlosses. Die Bausubstanz des Celler Schlosses wird vom Staatlichen Baumanagement Lüneburger Heide (SBLH) aus Finanzmitteln des Landes Niedersachsen erhalten und denkmalgerecht entwickelt. Durch den Landesliegenschaftsfonds (LFN) wird die Nutzung verwaltet, Mieter und Nutzer sind die Stadt Celle (Residenzmuseum und Schlosstheater) und die Deutsche Managementakademie. Die Bau- und Erhaltungsmaßnahmen führt das SBLH bereits seit vielen Jahren in enger Kooperation mit dem Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege (NLD) durch.

Schwerpunkte der aktuellen Bauarbeiten und Planungen

2.1.1.1 Denkmalverträgliches Nutzungskonzept

- Nutzungsbereiche sollen grundsätzlich der historischen Gebäudestruktur folgen z.B. Gliederung der vier Flügel und deren mittigen Treppenhäusern.
- Überprüfung der Nutzungsarten und damit verbundener heutiger technischer Anforderungen (z.B. gastronomische Versorgung mit notwendiger Küchenausstattung, Hygienezone und erforderlichen Lüftungsanlagen).
- Vereinfachung des Gebäudebetriebes und Verbesserung der Brandschutzsicherheit durch klar strukturierte Wegeführung und Gliederung (Brandabschnitte) zwischen Nutzungen über mehrere Geschosse und damit einhergehender Erhöhung der Verkehrssicherheit und Zugewinn einer flexibleren gemeinsamen Nutzung der historischen Räume und Funktionen.
- Reduzierung des finanziellen Aufwandes für die bauliche Unterhaltung bei gleichzeitiger Erhöhung der Betriebssicherheit.

2.1.1.2 Vervollständigung der barrierefreien Erschließung und Eingänge

Bisher ist nur ein Teil der hochwertigen Schlossräume barrierefrei erreichbar. Die Kapazitäten des einzigen vorhandenen Aufzugs führen regelmäßig zu „Besucherstau“. Ein zweiter Aufzug im gegenüberliegenden Schlossflügel könnte weitere Ebenen erschließen und auch gleichzeitige Veranstaltung von Residenzmuseum, Schlosstheater und Managementakademie unabhängiger voneinander ermöglichen. Das Museumsfoyer ist derzeit nur über Stufen erreichbar und zudem für den Besucher schwer auffindbar. Deshalb soll die Orientierung für die Besucher verbessert werden.

Ein Wechsel des derzeitigen Hauptzugangs im Nordportal auf das Südportal würde die Option bieten, dass alle Besucher über diesen Zuweg in den Schlossinnenhof gelangen und damit bereits einen ersten Eindruck vom Schloss bekommen. Erst dann orientiert sich der Besucher, welchen Nutzungsbereich er aufsuchen möchte. Durch Aufgabe der bisherigen Großküche im Erdgeschoss (unmittelbar vis-a-vis des historischen Einganges der Schlosskapelle) wäre ein neuer barrierefreier Eingang in das vorhandene Museumsfoyer möglich. Dieses könnte dann im Eingangsareal Information und Orientierung geben und gleichzeitig Zugang zu einem neuen Sonderausstellungsbereich bieten (z.B. zur Thematik der Schlosskapelle). Die historische Gotische Halle könnte aus dem Innenhof ebenfalls barrierefrei erreicht werden und böte neben der Funktionsweise als Ausstellungsraum der Kunstschaffenden die Chance, als ein vom Museumseingang separierter Zugang zum Schlosstheater zu dienen.

2.1.1.3 Sanierung veralteter und reparaturanfälliger technischer Anlagen

- Ersatz defekter Wasser- und Abwasserleitungen und Heizungsrohre (z.B. im Bereich oberhalb der Schlosskapelle und in historischen Räumen des Museums).
- Erweiterung der bewährten Form der Leitungsführung in einem unterirdischen Technikgang im Innenhofbereich außerhalb des sensiblen historischen Gebäudes (Unterbringung von Sicherheitstechnik für Brand- und Alarmierungsanlagen, Elektro- und Medienverteilung, Trink- und Abwasserversorgung, Heizungs- und Gebäudeleittechnik).
- Schaffung von Lagerbereichen für den Betrieb der unterschiedlichen Nutzungen und Optimierung der logistischen Aufwände durch funktionale Verknüpfung der Treppenhäuser in den vier Flügeln im Untergeschoss.

2.1.1.4 Sicherung bedeutender Bausubstanz

Das Schloss beherbergt das älteste, heute noch bespielte Barocktheater Europas sowie die Schlosskapelle, das einzige Gotteshaus nördlich der Alpen mit nahezu vollständig erhaltener Renaissance-Ausstattung. Baugrundsetzungen gefährdeten Ende des 20. Jahrhunderts den Erhalt des renommierten Kleinods, dessen Einsturz durch eine Pfahlgründung und Gewölbesicherung in den späten 1970er Jahren abgewendet werden konnte. Die seit den 1980er Jahren stetig wachsende Besucherzahl (bis etwa 1993 etwa 70.000 Besucher jährlich) löste aber einen massiven Anstieg des Feuchte- und Sporeneintrags aus und führte so zu gravierenden Schäden der wertvollen Holzeinbauten und der reichen Gemäldeausstattung der frühesten Reformationsgeschichte. Nach Analyse durch das Fraunhofer-Institut für Holzforschung (Wilhelm-Klauditz-Institut WKI Braunschweig) und des NLD musste 1995 eine schützende Gastrennwand unter der Empore eingebaut werden und der Besuch auf diese Besucherzone reduziert werden. Ebenfalls musste eine umfangreiche Restaurierung der geschädigten Holztafelgemälde erfolgen. Diese Maßnahmen vermochten die kunstreiche Ausstattung des 16. Jahrhunderts zu retten.

Seit 2013 wird durch das NLD unter Einbindung von Spezialisten renommierter Hochschulen (z.B. HAWK Niedersachsen) und anderer Experten in enger Kooperation mit dem SBLH, der Stadt Celle und der Landeskirche untersucht, ob und unter welchen Voraussetzungen wieder ein maßvoller und für das hochwertige Denkmal schadensfreier Besuch möglich sein könnte.

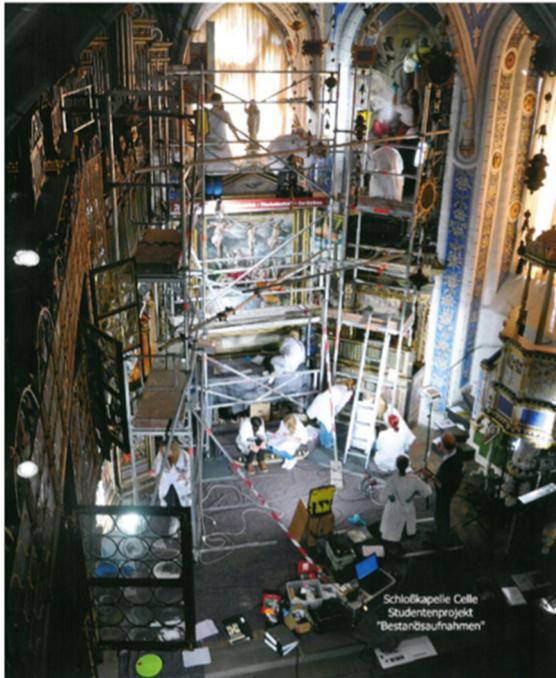


Abb. 2.1-02: Bestands- und Zustandserfassung durch Studierende der HAWK (EFRE-Projekt; Foto HAWK 2015)

Im Vorgriff auf das Reformationsjubiläumsjahr 2017 wurden die am dringendsten reparaturbedürftigen Bauteile der Schlosskapelle (Altar, Kanzel, Zugang, Kirchenfenster) instandgesetzt und die schadhafte Beleuchtungsanlage durch eine schonende LED-Beleuchtung ersetzt.



Abb. 2.1-03: Nutzungserprobung im Rahmen des Modellprojektes. (Foto SBLH 2019)

Diese Maßnahmen ermöglichten parallel zur Sonderausstellung „500 Jahre Reformation“ eine temporär erhöhte Besucherzahl. Das Monitoring darüber lieferte wertvolle Klimadaten für das anschließende Modellprojekt. Höhepunkt darin war die Eröffnung eines Reformationsgottesdienstes in der Schlosskapelle im Oktober 2017 mit Landesbischof Meister.

Parallel dazu wurde eine innovative Lüftungs- und Entfeuchtungsanlage mit sensorischer Steuerung installiert, die erkennbar eine Stabilisierung des differenzierten Klimagefüges bewirkt (im Sommer nicht zu feucht, im Winter nicht zu trocken).



Abb. 2.1-04: Neue Lüftungsanlage mit klimasensorischer Steuerung im Keller unter der Schlosskapelle, 2019 (Foto SBLH)

Die Außenfassaden des Schlosses bedürfen einer stetigen Erhaltung. Seit 2016 wurden die Fassaden des Südostturmes (Bereich Schlosskapelle) und nachfolgend die stadtseitige Panoramaseite saniert.

Durch die enge Abstimmung mit der Leitung des Bomann-Museums konnte erreicht werden, dass der ohnehin geplante und für die Sanierung unerlässliche Ausbau der Ausstellung 2018 vorgezogen werden konnte. Dieses stellte sich als Glücksfall heraus, da somit notwendige Reparaturarbeiten an der massiv geschädigten Holzbalkendecke des 2.Obergeschosses durchgeführt werden konnten.

Dieser Gebäudeteil wurde bereits im Spätmittelalter herrschaftlich genutzt. Er ist nun statisch und brandschutztechnisch ertüchtigt und damit für die 2021 geplante Neueröffnung der kulturhistorisch für die Landesgeschichte bedeutsamen neuen Ausstellung „Herrschaft und Landschaft“ bereit. Ebenfalls werden im Rahmen der neuen Ausstellung Teile des historischen Dachstuhls im Ostflügel für Besucher neu erschlossen und damit auch historische Bauweisen einsehbar, die bisher für die Öffentlichkeit verborgen war.

Interaktion als Chance

Die gute Kooperation zwischen allen Projektbeteiligten wie Gebäude- und Ausstellungsplanern, mit der Leitung und den Mitarbeiter des Residenzmuseums sowie der Stadt und den landesseitigen Projektverantwortlichen von SBLH, NLD und LFN ermöglicht eine sehr gute Verbindung baulicher Erfordernisse und kultureller Aufwertung. Dadurch wird es möglich, auch kritische Herausforderungen mit Zugewinn zu meistern - was in den letzten zehn Jahren gelungen ist, bleibt Ansporn auch für anstehende Aufgaben.

So wird es in den nächsten Jahren im Südflügel notwendig, das stark geschädigte Ziegeldach zu sanieren und dort befindliche haustechnische Anlagen zurück zu bauen. Mit der vorbereitenden Grundlagenermittlung (Bauvermessung und bauhistorische Dokumentation des historischen Dachstuhls) wurde eine Schadstoffbelastung durch Holzschutzmittel an den Hölzern des Dachstuhls aufgedeckt. Dieser Sachverhalt kann nun fachkundig in den Sanierungsprozess integriert werden. Der betroffene Dachraum wird nicht zu Aufenthaltszwecken genutzt werden. Vorsorglich erfolgen weitere Untersuchungen, um eine ungefährdete Aufenthaltsnutzung der dem Dachraum nahe gelegenen Räume zu gewährleisten.

Zur notwendigen Anpassung des Brandschutzes sind fortlaufend bauliche Ertüchtigungen unerlässlich. Der Zugang der Versammlungsstätte Rittersaal wurde über das innenhofseitige Laves-Treppenhaus bereits verbessert. Weitere Anpassungen an Brand- und Rauchabschnittstüren, der Sicherheitsbeleuchtung und Branderkennung werden weiterhin umgesetzt und werden bis in die nächsten Jahre andauern.

Die gesellschaftlich bedingten Wandlungen der Nutzungsbedarfe eines herausragenden Kulturortes werden stetig mit dem gültigen Brandschutzkonzept abgeglichen, woraus sich voraussichtlich weitere bauliche Maßnahmen ergeben. Es bleibt also eine Daueraufgabe für die Bauverwaltung des Landes, das Celler Residenzschloss intakt und nutzbar zu halten.

Durch die laufenden und geplanten Reparaturen wird man das Schloss zukünftig aber auch wesentlich besser und flexibler nutzen können. Gleichzeitig wird die Zugänglichkeit für die Besucher erheblich erleichtert und damit die Erfahrbarkeit der Geschichte, der Bedeutung und auch der Veränderung des Bau- und Kunstdenkmals Residenzschloss Celle nennenswert gesteigert.

Chronologie der wichtigsten Bauaktivitäten der letzten 30 Jahre:

<u>2021-2022</u>	Fassaden- und Dachsanierung Südflügel (ca. 500 T€)
<u>2020-2021</u>	Sanierung Innenhof-WCs (ca. 220T€)
<u>2017-2020</u>	Sicherung bauliche Substanz Schlosskapelle und Einbau Klimatechnik (240 T€)
<u>2018-2019</u>	Fassaden- und Deckensanierung Ostflügel (780 T€)
<u>2008-2018</u>	Div. Erneuerungen Brandschutz (730 T€)
<u>2017-2018</u>	Fassadensanierung West- und Nordflügel Flügel (940 T€)
<u>2016-2017</u>	Fassadensanierung Südflügel Bereich Kapelle (330 T€)
<u>2016</u>	Erneuerung Personenaufzug (260 T€)
<u>2015</u>	Sanierung Heizung (200 T€)
<u>2014</u>	Dach- und Fassadensanierung Nordflügel östliche Teil (350 T€)
<u>2012-2014</u>	Fassadensanierung des Innenhofs (1,2 Mio. €)
<u>2012-2014</u>	Sanierung und Modernisierung des Schlosstheaters im Nord-/Westflügel (12,8 Mio. €)
<u>seit 1990</u>	Div. Erhaltungsmaßnahmen (1,2 Mio. €)
<u>1990er</u>	Sanierung und Modernisierung des Schlosses im Ost- und Südflügel (u.a. Treppenhaus, Rittersaal mit Küche, Konferenzsäle, Unterbringungsmöglichkeiten für Gäste der damaligen Landesregierung) (15,3 Mio. €)

2.2 Frühere Nutzung und anthropogene Schäden

Christina Achhammer und Erwin Stadlbauer

2.2.1 Bestand und Zustand

Die Celler Schlosskapelle ist ein Gesamtkunstwerk aus Architektur und Ausstattung mit einer rund 500-jährigen Geschichte.¹ Die 1485 eingeweihte Kapelle wurde um 1570 mit hölzernen Einbauten und Gemälden aufwendig ausgestattet. Ergänzungen und Veränderungen brachten vor allem die Restaurierungen von 1837 bis 1866 und 1970 bis 1979.

Die Ausstattung des 16. Jahrhunderts stammt im Wesentlichen von dem Antwerpener Maler Marten de Vos und seiner Werkstatt. Es handelt sich um ein einzigartiges Bildprogramm im Sinne des protestantischen Glaubens sowie auch als Zeugnis von Macht und Frömmigkeit des Auftraggebers Herzog Wilhelm der Jüngere (Abb. 2.2-01):

- 78 Tafelgemälde und drei großformatige Leinwandgemälde
- zahlreiche Schrifftafeln über Altar, Prieche, Fürstenthron und Schrankorgel.



Abb. 2.2-01: Die Celler Schlosskapelle; Innenraum in nordöstlicher Blickrichtung (Foto Loeper, Celle 2012)

¹ Schmieglitz-Otten 2012 und 2017; Lass 2017.

Ergänzungen des 19. Jahrhunderts sind, neben der Einfügung des Leinwandgemäldes mit der Darstellung von Georg V., dem König von Hannover und seiner Gemahlin Marie, von Carl Oesterley, 1865, an der Südwand (Abb. 2.2-02), weitreichende Überarbeitungen und Überfassungen an der Innenraumfassung sowie an der Ausstattung.²



Abb. 2.2-02: Leinwandgemälde an der Südwand.
(Foto Loeper, Celle 2012)

Der gotisch gewölbte Innenraum der Schlosskapelle ist rund 10 m breit und misst in der Länge und Höhe rund 15 m. Im Chor befindet sich der Hochaltar mit wandelbaren Flügeln. Die drei großen Spitzbogenfenster weisen nach Osten, Südosten und Süden, ein weiteres, kleineres Südfenster bietet in der Westempore dezentes Tageslicht. Fehlender oder unzureichender Lichtschutz hat an mehreren Tafelgemälden der Nordseite deutliche Farbveränderungen verursacht. Der Zustand der Bildschicht der Holztafelgemälde ist im Erdgeschoss aufgrund der letzten Konservierung und Restaurierung von 1997 bis 1999 und der folgenden jährlichen Wartung und Pflege relativ gut und stabil. In den Emporen lässt die Stabilität nach – je höher umso mehr.

Die hölzernen gefassten Rahmen, Bauteile und Skulpturen, die seit 1999 nicht gewartet wurden, weisen ortsabhängig einen sehr unterschiedlichen Zustand auf. An vielen Partien des Trägermaterials wurden Spuren inaktiven Befalls holzerstörender Insekten festgestellt und vereinzelt war sogar aktiver Befall nachweisbar. Die Bewertung der Fassung reicht von relativ gut bis schlecht. Die Oberflächen sind unterschiedlich stark verstaubt und von Schimmel befallen. Nicht alle Teile des Gesamtkunstwerks sind gleichermaßen geschädigt und gefährdet.

Die stärkste Gefährdung weisen die Tafel- und Leinwandgemälde auf, da sie aus hygroskopischen Materialien bestehen, die sich bei Klimaschwankungen unterschiedlich verformen.³ An der Verwölbung der Holztafelgemälde sowie an vereinzelt Rissbildungen ist dies deutlich ablesbar. Besonders starke Verwölbungen weisen mehr als 20 wandnahe Tafelgemälde unterschiedlicher Formate an der Nord- und Südwand auf. Starke Verformungen weisen außerdem mehr als 20 weitere Gemälde mit kleineren Formaten auf, die im 19. Jahrhundert in konservatorischer Absicht auf circa 5 mm dünn gehobelt wurden.⁴

² Achhammer und von der Goltz 2016.

³ Hygroskopie bezeichnet die Stoffeigenschaft der Wasseraufnahme über die Luftfeuchtigkeit der Umgebung; zur Gefährdung und zum Schutz hygroskopischer Kulturobjekte vgl. DIN EN 15757.

⁴ Die gedünnten Tafeln wurden zur Stabilisierung „parkettiert“; die in guter Absicht ausgeführte Fixierung musste jedoch später wieder entfernt werden, weil dadurch bei Klimaschwankung die Rissbildung begünstigt wurde.

2.2.2 Frühere Nutzung, Restaurierung und anthropogene Schäden

Der Innenraum wirkt heute auf den ersten Blick und aus der Distanz des Besucherraums überraschend frisch und kaum gealtert. Bei näherer Betrachtung sind Alterung und Schädigung jedoch deutlich erkennbar. Die Analyse der rund 450-jährigen Kapellengeschichte hat ergeben, dass neben den Phasen der Nutzung und Pflege auch Abschnitte der Vernachlässigung und Schädigung vorkommen sowie auch der Instandsetzung und Restaurierung, zuletzt 1997-99, nach dem Einbau einer Glaswand zur Einrichtung des Besucherraums unter der Westempore im Jahr 1995.

Nutzungsphasen	Maßnahmen	Klimatechnische Merkmale	Konservatorische Merkmale
I Ende 16. Jh. - Mitte 20. Jh. Bis 1705 hofstaatliche Nutzung, danach zeitweise ohne Nutzung und Pflege sowie mit vernachlässigtem Bauunterhalt	Mitte 17. - Anf.18. Jh. Gewölbereparatur 1837 - 1866: Renovierung, Restaurierung, Neugestaltung 1930er Jahre Erhaltungsmaßnahmen und Veränderungen Ende der 1940er Jahre Restaurierung	Innenklima folgt gedämpft dem Außenklima: im Winter relativ trocken, im Sommer relativ feucht; verstärkte Klimaschwankung im 19. Jh. vermutlich infolge von schadhafte Fenstern	Klimaschwankung im Jahresgang vermutlich zu stark, insbesondere in der Phase der Vernachlässigung; vermutlich zeitweise zu kalt oder zu warm sowie zu trocken oder zu feucht
II 1960 - 1970; 1980 - 1995 Übernutzung	Mitte der 1960er Jahre Beheizung bei Abendgottesdiensten 1970 – 1979 Statische Sicherung von Gewölbe und Mauerwerk; Aus- und Wiedereinbau der Ausstattung zur Konservierung und Restaurierung; Neufassung der Decke und Wände	Nutzungsbedingter Feuchteintrag und verstärkte Klimaschwankung	Starke anthropogene Schädigung der hygroskopischen Ausstattung durch starke Verformung, Rissbildung der Holztafeln, Malschichtablösung und Schimmelbefall
III seit 1995 Publikumsverkehr nur im Besucherraum unter der Westempore	1997 - 1999 Konservierung und Restaurierung der Tafelgemälde	Reduzierte Klimaschwankung im Innenraum; Luftentfeuchtung im Besucherraum ab 50 % r. F.	Reduzierte Beanspruchung der Tafelgemälde; reduzierte mikrobiologische Aktivität

Tabelle 2.2-01.

Die frühere Nutzung der Schlosskapelle kann in drei Phasen unterteilt werden (vgl. Tabelle 2.2-01).⁵ Phase I ist durch eine relativ geringe Nutzung durch den Hofstaat gekennzeichnet sowie durch Zeiträume der Vernachlässigung, der Instandsetzung und der Restaurierung. Phase II ist der Zeitraum der intensivsten touristischen und kirchlichen Nutzung bzw. Übernutzung in der Zeit von 1980-95 mit mehr als 75.000 Besuchern im „Rekordjahr“ 1988.⁶ Phase III beginnt 1995 mit dem Einbau der Glaswand zur Schaffung des Besucherraums unter der Westempore. So konnte die Hauptursache der starken anthropogenen Feuchteschäden beseitigt und der Schimmelbefall reduziert werden.

Wichtige Aspekte der Bauphysik des unbeheizten Innenraums sind vor allem die Dichtigkeit der Gebäudehülle bzw. die Luftwechselrate sowie die Variation der Oberflächentemperaturen und deren Ursachen. Bauphysikalisch relevant sind auch alle Bauteile und Einbauten, die den Luftstrom beeinflussen wie die Emporen, die Priechen, die Anordnung der Bildtafeln entlang der Wände, die Butzenscheibenfenster des Fürstenthrons sowie auch die Schutzverglasung im Erdgeschoss unter der Empore. Die Luftströmung wird in diesen Bereichen behindert, abgelenkt oder unterbunden. Der Ausgleich von Temperaturunterschieden an den Oberflächen wird dementsprechend verzögert. Bei mangelnder Umlüftung kann „Klimastress“ für die hygroskopische Ausstattung entstehen, zum Beispiel durch Temperaturunterschiede an den Vorder- und Rückseiten der Gemäldetafeln. In den weniger umströmten Bereichen mit relativ niedrigen Oberflächentemperaturen ist außerdem mit erhöhter Luftfeuchte und Kondensat zu rechnen, was die Anlagerung von Staub und das Schimmelwachstum begünstigt. Die Schlosskapelle weist die für historische Bauwerke typischen Undichtigkeiten der Fenster und Türöffnungen auf. Der 2015 ermittelte Luftwechsel ergab bei sehr schwacher Außenluftbewegung den Wert 0,12/Stunde bei geschlossenen Türen und Fenstern, gegenüber 0,33/Stunde bei geschlossenen Türen und drei geöffneten Oberlichtfenstern. Selbst bei geschlossenen Fenstern und Türen bestand daher ein beträchtlicher unkontrollierter Luftwechsel, der das Innenklima beeinflusste.⁷

Die von 2014-2015 gemessene Lufttemperatur schwankte im Jahresgang meist zwischen 10-25 °C mit einer täglichen Schwankung von 1 K, die relative Luftfeuchte zwischen 45-65 % mit täglicher Schwankung bis zu zwei Prozentpunkten. Im Vergleich zu den Klimaschwankungen in der Übernutzungsphase II wurde zwar eine deutliche Verbesserung für die hygroskopischen Objekte festgestellt, aber mit weiter belastenden Bedingungen durch zu starke Trockenheit im Winter und zu hoher Feuchtigkeit im Sommer.⁸ Luftwechsel und Klima schwankten früher zeitweise vermutlich stärker als heute. Relativ undicht waren vermutlich seit jeher eine Bodenluke zur Kellertreppe unter der Westempore sowie die historische Holztür im Erdgeschoss zum Schlosshof. Weiter ist erkennbar, dass an den Fenstern im Zuge der Restaurierungen von 1837-66 und 1970-79 erhebliche Veränderungen vorgenommen wurden, vermutlich nicht nur aus Gründen der Gestaltung, sondern auch zur Beseitigung von Schäden.⁹

Relativ niedrige Oberflächentemperaturen und geringe Luftbewegung kennzeichnen die Problembereiche der Schlosskapelle. Es handelt sich um die Außenwandpartien mit Vorbauten, die den Luftstrom behindern, insbesondere im Umfeld der Fenster, vor allem an der Ostwand hinter dem Altar sowie die bodennahen Innenbereiche der Priechen im Umfeld der Fenster und die Unterseiten der Kapellenbänke, insbesondere im nicht unterkellerten südlichen Bereich zwischen der Emporentreppe und dem Choraufgang. Indikator für die nutzungsbedingten anthropogenen Umweltschäden ist der Schimmelbefall, der teils noch aktiv ist und der in den inaktiven Bereichen durch Feuchteeinwirkung stets reaktiviert werden kann.

⁵ Achhammer et al. 2017.

⁶ Die anthropogenen Schäden der Nutzungsphase II wurden durch das Fraunhofer Institut für Holzforschung in Zusammenarbeit mit der niedersächsischen Denkmalfachbehörde untersucht; Hauptursachen waren die nutzungsbedingten Feuchtebelastungen und die dadurch verstärkten Klimaschwankungen (Schwarz 1992; Schwarz und Gadesmann 1994).

⁷ Berling 2015 (b).

⁸ Berling 2015 (a); Von der Goltz et al. 2015; Achhammer et al. 2017.

⁹ Die heute vorhandene Verglasung mit Butzenscheiben stammt aus den 1970er Jahren und das Maßwerk besteht aus Kunststein des 19. Jahrhunderts. Archivbilder belegen eine Rautenverglasung in der Zeit vor 1970, die zusammen mit dem Maßwerk der Restaurierung von 1837 - 66 zugerechnet wird.

2.3 Nutzungsorientierte Erfassung von Bestand und Zustand

Michael von der Goltz, HAWK

2.3.1 Verlauf

Im ersten Halbjahr 2017 wurde eine Arbeitsgruppe aus drei studentischen Hilfskräften (2. und 4. Semester) unter Leitung des Autors eingerichtet, welche die Ergebnisse der Vorgängerprojekte (EFFRE) unter dem Aspekt der Nutzung sichtet und vereinheitlichte.

In zweimal zweiwöchigen Aufenthalten von Studierendengruppen (2. und 3. Semester einmal unter Leitung von Prof. von der Goltz, einmal unter Leitung von Johanna Fuchs MA und Dipl. Rest. Kerstin Wäcken) wurde der Bestand und Zustand speziell auf Auswirkungen früherer Nutzungen und Gefährdungen kommender Nutzung untersucht. Hierfür wurde ein spezielles Dokumentationsblatt erarbeitet und angewendet. Innerhalb dieser insgesamt vierwöchigen Arbeitsaufenthalte vor Ort wurde die gesamte Ausstattung des Kirchenschiffs erfasst. Im Vergleich mit vorherigen Untersuchungen ließ sich an weiteren Partien mikrobieller Befall feststellen sowie an mindestens zwei Holztafelgemälden Schäden in Form von klaffenden Sprüngen bis zum Zerreißen einer Holztafel.

Im Wintersemester 2017/18 wurde die nutzungsbedingte Zustandsuntersuchung und -kartierung abgeschlossen und erste Handlungsanweisungen entwickelt. Erstmals wurde als Großversuch eine Gottesdiensteröffnung zugelassen und dokumentiert (am 23.10.2017 im Zusammenhang mit dem 500-jährigen Reformationsjubiläum). Ein massiv auftretender aktiver Schimmelbefall in Teilen der Kapelle veranlasste uns zu punktuellen Klima- und Oberflächentemperaturen- sowie Holzfeuchtemessungen, zusätzlich zu der Dauerklimaerfassung durch das Ing.-Büro Dr. Berling. Die Messungen ergaben extreme Temperatur- und Feuchteunterschiede in der Kapelle, je nach Umfeldbebauung und Nutzung der umgebenden Gebäudeteile. Diese Unterschiede müssen zukünftig in Bezug auf mikrobiellen Befall und die Verformung der hölzernen Gemäldetafeln bei der Untersuchung stärker berücksichtigt werden.

Im Herbst 2018 wurde einerseits der Zusammenhang zwischen Wandtemperatur, Abstand von Holztafeln zur jeweiligen Wand mit und ohne Rückseitenschutz und Verwölbungsverhalten weiter untersucht. Zudem wurden nutzungsbedingte physische Gefährdungen rekonstruiert und dokumentiert. Hieraus und aus den Erfahrungen des Großversuchs ergaben sich Konsequenzen bezüglich der Nutzungskonzepte.

Im Januar 2019 wurden nochmal abschließende Messungen und Untersuchungen zu möglichen Veränderungen durchgeführt.

Im April 2019 wurde vor der Inbetriebnahme der Lüftungsanlage die Anbringung eines prophylaktischen Rückseitenschutzes am Altartafelgemälde empfohlen. Die Ausführung erfolgte durch die Herren Dipl.-Rest. Fiebigler/NLD und Dipl.-Rest. Wellmer.

2.3.2 Fazit

Die systematischen Untersuchungen konnten nutzungs- und klimabedingte Veränderungen und Schäden insbesondere an Holzobjekten nachweisen. Gleichzeitig zeigten sich, als bislang noch wenig berücksichtigt, starke Temperaturunterschiede entlang der umfassenden Wände der Kapelle. Diese sind bedingt durch Außentemperaturen, gerade auch in Verbindung mit nicht isolierten Fenstern, und durch beheizte angrenzende Räume. Ob sich die Folgen dieser Temperaturunterschiede ausschließlich durch den Einbau der Lüftungsanlage vermeiden lassen, darf bezweifelt werden (u.a. Austrocknung und Schrumpfung der Tafelrückseiten, Feuchtigkeitsanstieg mit mikrobieller Gefährdung durch Kleinklima an den Tafelrückseiten entlang der kalten Wände oder - als besonders prekär - die Situation der sogenannten "Kinderprieche" zwischen warmer Wand und kaltem Fenster mit Folgen massiver Holzrisse). Dringend empfohlen wird, auch das hinterste, kleinere Fenster der Südwand entsprechend der anderen Fenster mit einem Vorhang auszustatten und die Wände und ehemaligen Türrdurchgänge der angrenzenden beheizten Räume zur Kapelle hin zu isolieren.

Kapellennutzung

Die Kapelle zeichnet sich einerseits durch die hohe Qualität der historischen Ausstattung und Kunstwerke aus, andererseits durch eine bemerkenswerte räumliche Enge. In der Kombination bedeutet dies, dass grundsätzlich auch bei achtsamen Umgang, die Gefahr mechanischer Schäden an den Werken des 16. Jahrhunderts als sehr hoch eingeschätzt werden muss. Die Verkehrswege, insbesondere von der Glastür bis zum Chor, sind zu zweit ohne Berührung der Bänke oder Priechenwände kaum zu bewältigen. Die Einstiege in die Kirchenbänke erfordern Gelenkigkeit und ein limitiertes Bodymass. Zudem ist die Verwendung von Kerzen und Blumen aus Gründen des Brandschutzes und der Gefahr von Schadinsekten ausgeschlossen. Daher ist im Sinne einer denkmalgerechten Nutzung der Kapelle von Gottesdiensten und insbesondere Trauungen Abstand zu nehmen.

Bei Führungen muss die Zahl des Aufsichts- und Führungspersonal die Gruppengröße der Besucher/innen berücksichtigen. Die Nutzung der Emporen sollte ausgeschlossen bleiben.

Basierend auf der Auswertung der Nutzungserprobungen definierte eine 2020 dafür gebildete Arbeitsgruppe (Achhammer, Fiebiger, von der Goltz) die daraus resultierenden Rahmenbedingungen zur denkmalverträglichen Nutzung der Celler Schlosskapelle (vgl. 2.9 „Denkmalverträgliche Nutzung und präventive Konservierung“).

Monitoring

Die bisherigen Vorgaben zur jährlichen Wartung und Pflege, die sich ausschließlich auf die Tafelmalerei bezogen und nur einmal im Jahr stattfinden sollten, müssen grundsätzlich, aber auch im Rahmen zukünftiger Nutzungen deutlich inhaltlich auf die Gesamtausstattung erweitert und zeitlich enger getaktet werden. Im Rahmen des DBU Projekts wurden die Untersuchungsprotokolle der letzten Jahre digitalisiert und stehen somit jetzt als Hilfs- und Kontrollmittel für das Monitoring zur Verfügung. Diese Datengrundlage sollte zukünftig mit den Monitoring-Protokollen fortgeschrieben werden, um Entwicklungen in der Kapelle besser kontrollieren zu können.

2.4 Raumklimauntersuchungen

Helmut Berling und Axel Büssing

2.4.1 Gebäude, Ausgangssituation und Aufgabenstellung

Zu den bedeutendsten Bauwerken der Renaissance in Norddeutschland zählt die Kapelle des Celler Schlosses. Ihr Inventar ist fast vollständig erhalten, wozu auch eine umfangreiche Gemäldesammlung mit den sehr dünnen Eichenholztafeln als Bildträger zählt. In den letzten Jahrzehnten wurden einige Baumaßnahmen durchgeführt. Das Deckengewölbe und das Mauerwerk wurden stabilisiert sowie die Ausstattung der Kapelle restauriert. Im nicht beheizbaren Kapellenraum finden seit den 80'er Jahren aus klimatischen Gründen keine Andachten und Gottesdienste mehr statt. Die Nutzung erfolgt fast ausschließlich nur noch museal. Weitere Untersuchungen in den 90'er Jahren führten zu dem Ergebnis, dass die Besucher den Kapellenraum nur noch durch eine Glaswand betrachten können. Zu diesem Zweck wurde für die Besucher ein Vorraum unterhalb der westlichen Emporen geschaffen, der durch eine Teilverglasung vom Kapellenraum getrennt ist. Somit ist ein direktes Betreten der Kapelle nicht mehr möglich. Mit Hilfe einer Entfeuchtungseinheit in diesem Vorraum sollte bis zum Sommer 2018 dort das Raumklima so beeinflusst werden, dass sich die relative Luftfeuchte um 60 % bewegt. Außerdem soll durch die Teilverglasung der Luftaustausch zwischen Vorraum und Kapelle reduziert werden, so dass in der Kapelle konstantere Raumklimakomponenten vorliegen. Ab dem 5. Juni 2018 befindet sich ein Entfeuchter direkt innerhalb der Schlosskapelle, um direkter auf das Raumklima einwirken zu können.

Durch diese Maßnahmen sollten tägliche, sprunghafte Klimawechsel unterbunden werden, da festgestellt wurde, dass für den Schadensmechanismus die Luftfeuchte und ihre Schwankungen verantwortlich sind.

In der Folge wird die Belastung der Raumausstattung durch Quell- und Schwindprozesse des Holzes und die Relativbewegung zwischen den mehrschichtigen Materialien reduziert und dem mikrobiellen Befall werden die Lebensbedingungen entzogen.

Anhand der aktuellen messtechnischen Untersuchungen sollen sowohl der Istzustand der klimatischen Situation als auch die Auswirkungen einer versuchsweisen, weiterhin sehr eingeschränkten Nutzung des Raumes für Führungen und Andachten ermittelt und beurteilt werden. Ferner dienen die registrierten Klimadaten als Grundlage zur Verifikation der im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten 3D-Klima- und Strömungssimulation.

Die Ergebnisse sind Grundlage für evtl. weitere Untersuchungen und Entscheidungen im Hinblick auf die Nutzungserweiterung der Kapelle und für die Erarbeitung von notwendigen weitergehenden gebäudespezifischen Maßnahmen.

2.4.2 Raumklimauntersuchungen

2.4.2.1 Messorte

Im nachfolgenden Grundriss sind die verschiedenen Messorte hinsichtlich ihrer Lage dargestellt. Die kontinuierliche messtechnische Erfassung des Klimas (Lufttemperatur und Luftfeuchte) sowie einiger Oberflächentemperaturen erfolgt in verschiedenen Bereichen und Höhen der Schlosskapelle.

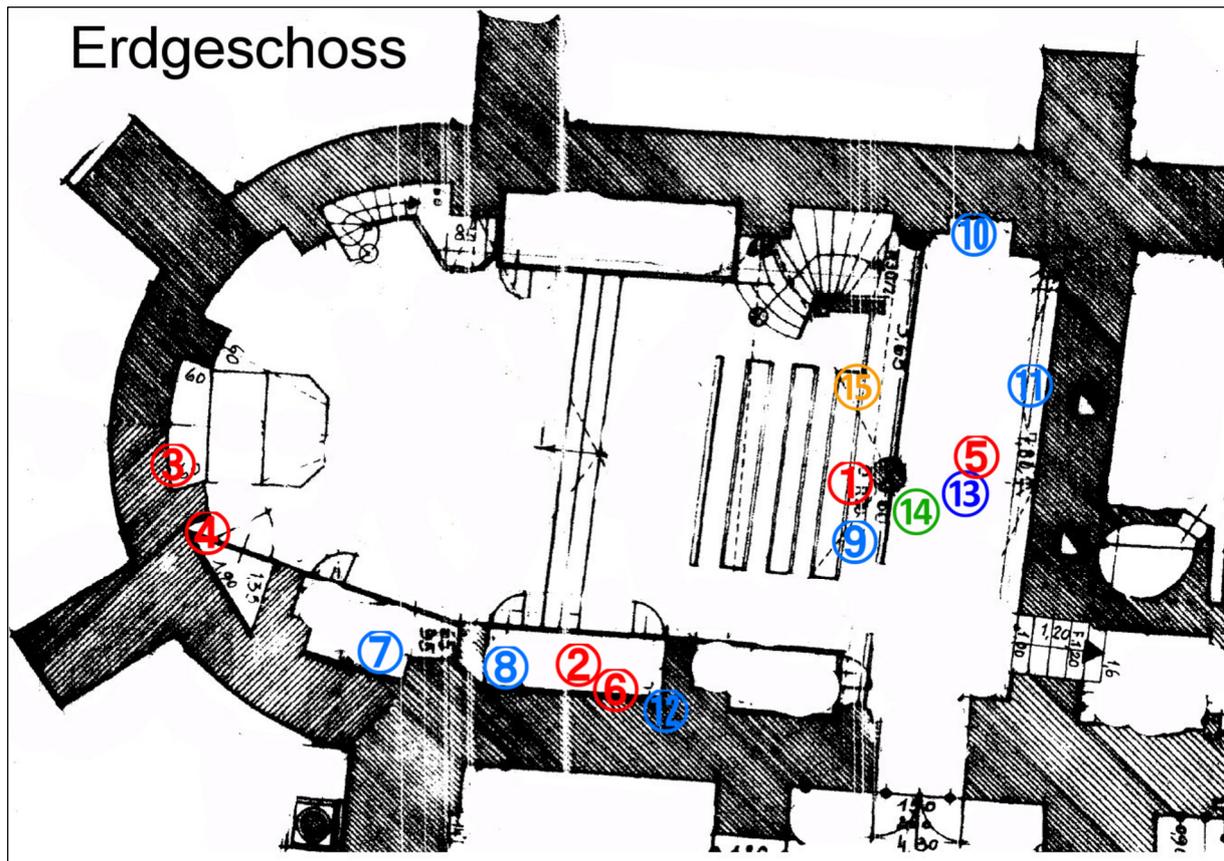


Abb.: 2.4-01: Grundriss der Schlosskapelle mit Messorten

- Messort 1: Vertikales Profil (Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte) Höhe ü. FB 2,00m / 4,80m / 7,40m / 9,20m (Abb. A3, A4, A13, A14, A23, A24)
- Messort 2: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte auf der Empore vor der Bildtafel (Abb. A5, A6, A15, A16, A25, A26)
- Messort 3: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte hinter dem Altar (Abb. A1, A2, A11, A12, A21, A22)
- Messort 4: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte in der Nische links vom Altar (Abb. A5, A6, A15, A16, A25, A26)
- Messort 5: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte unterhalb der Decke (Abb. A3, A4, A13, A14, A23, A24)
- Messort 6: Lufttemperatur im Hohlraum zw. Bildtafel und Wand der Empore (Abb. A5, A15, A25)
- Messort 7: Oberflächentemperatur Nordwand außerhalb des Tores (Abb. A9, A19, A29)
- Messort 8: Oberflächentemperatur Nordwand zur Durchfahrt (Abb. A10, A20, A30)
- Messort 9: Oberflächentemperatur des Fußbodens unter letzter Bank im unterkellerten Bereich (Abb. A10, A20, A30)
- Messort 10: Oberflächentemperatur Südwand, Kinderprieche (Abb. A9, A19, A29)
- Messort 11: Oberflächentemperatur Westwand zur DMAN (Abb. A10, A20, A30)
- Messort 12: Oberflächentemperatur Nordwand zum Rittersaal (Abb. A9, A19, A29)
- Messort 13: Lufttemperatur unter der Decke über der ersten Westempore (Abb. A7, A17, A27)

Messort 14: Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte im Besucherraum (Abb. A1, A2, A11, A12, A21, A22)

Messort 15: Lufttemperatur, rel. Luftfeuchte und Oberflächentemperatur des Fußbodens unter letzter Bank im nicht unterkellerten Bereich (Abb. A7, A8, A17, A18, A27, A28)

Es werden insgesamt 27 Messgrößen registriert und gespeichert.

2.4.2.2 Messtechnik

Als Messwertaufnehmer für die klimatischen Größen werden kapazitive Feuchte- und Widerstandstemperatursensoren eingesetzt.

Alle Fühler wurden vor der Installation kalibriert. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt mit Hilfe von Messmodulen, die Bestandteile eines Messbusses sind. Sie werden in der Nähe der jeweiligen Messstelle platziert und dienen der Übernahme der Messwerte, der Digitalisierung und Zwischenspeicherung. Alle Messgrößen werden als fünfzehnminütige Minimal-, Maximal- und Mittelwerte über den Messbus von einem Computer aufgenommen und gespeichert. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe spezieller Programme.

Neben den messtechnisch gewonnenen Größen können weitere Werte auf rechnerischem Wege ermittelt werden. Hierzu zählt die Bestimmung der absoluten Luftfeuchten.

2.4.3 Ergebnisse der Klimamessung

Die während der Messkampagne von Februar 2017 bis September 2019 gewonnenen Daten der Innen- und Außenklimata sowie der Oberflächentemperaturen sind für den kompletten Zeitraum im Anhang dargestellt (Bezeichnung der Abb. im Anhang mit A). Hierbei erfolgt die Aufteilung des zweieinhalbjährigen Messzeitraums in jeweils drei Abschnitte, einmal von Februar 2017 bis Februar 2018, anschließend von März 2018 bis Februar 2019 und zuletzt von März 2019 bis September 2019.

Zur Verdeutlichung einzelner Beobachtungen und Feststellungen sind im Text zusätzlich Messergebnisse repräsentativer Zeitabschnitte dargestellt. Dies gilt auch für die aus den Messdaten rechnerisch ermittelten Größen wie absolute Luftfeuchten und Taupunkttemperaturen.

2.4.3.1 Lufttemperatur

Die Lufttemperaturen in der Schlosskapelle im Höhenprofil vor den Westemporen liegen im untersuchten Zeitraum zwischen 6°C (März 2018, unterster Messpunkt) und knapp 27°C (August 2018, Messung in 7,60 m Höhe, siehe Abb. A3, A13 und A23). Dabei treten tägliche Schwankungen von bis zu 2 K auf. Die stärksten Bewegungen ergeben sich beim Messpunkt in 7,60 m Höhe. Die übrigen registrierten Lufttemperaturen differieren lageabhängig geringfügig von diesen Werten. Hinter dem Altar sinkt die Lufttemperatur infolge des Fenstereinflusses im Februar/März 2018 bis auf 1°C ab. Im abgetrennten Besucherraum führt der Einfluss der beheizten Schlossküche während der Öffnungszeiten zu stärkeren täglichen Schwankungen bis zu über 3 K/d (Abb. A1, A11, A21).

Der tendenzielle jährliche Innentemperaturverlauf wird vorwiegend durch das Außenklima bestimmt. Das ermittelte Höhenprofil zeigt, dass ein vertikaler Temperaturgradient von ca. 1 bis 2 K vorliegt.

Das Klima auf der nördlichen Empore weist ähnliche Werte und Verläufe auf wie das an den anderen Messorten in der Kapelle (Abb. A5, A15, A25).

Die Temperatur hinter der Bildtafel auf der nördlichen Empore liegt durchgehend höher als die vor der Bildtafel. Die Differenz ist von der Jahreszeit abhängig und weist den höchsten Wert (1 – 2 K) in den Wintermonaten auf. In der Nische rechts vom Altar liegt dagegen ganzjährig eine etwas geringere Lufttemperatur vor (Abb. A5, A15, A25). Diese Beobachtung korrespondiert mit dem vor den Westemporen ermittelten Höhenprofil.

2.4.3.2 Relative Luftfeuchte

Die relativen Luftfeuchten im Innenraum verhalten sich im Bereich des Höhenprofils entsprechend den Lufttemperaturverläufen und bewegen sich während der gesamten Messperiode zwischen knapp 42 % (Anfang März 2018, unter der Raumdecke) und einmalig 70 % (Oktober 2017, obere Messpunkte (Abb. A4, A14 und A24).

Die täglichen Schwankungsbreiten betragen bei den oberen beiden Messpunkten bis zu 5 Prozentpunkte. Bei den beiden unteren Fühlern werden Schwankungen nur selten über 2 Prozentpunkten pro Tag registriert und sind hier als gering zu bezeichnen. Die höheren Wertebewegungen im oberen Bereich werden durch größere Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Der vertikale Gradient beträgt bis zu 15 Prozentpunkte aufgrund der nach oben ansteigenden Temperatur.

Mit der Installation des Luftentfeuchters im Sommer 2018 (5. Juni) innerhalb der Kapelle werden Feuchtespitzen oberhalb von 60 Prozent verhindert, die Kurven zeigen insgesamt einen stetigeren Verlauf. Der Unterschied zwischen dem untersten und obersten Messpunkt liegt meistens nur noch bei maximal 7 Prozentpunkten.

Innerhalb des durch die Messwerte im Höhenprofil aufgespannten Wertebereichs bewegen sich auch die Werte der relativen Feuchte vor der Bildtafel auf der Nordempore (Abb. A6, A16 und A26). In der Nische links neben dem Altar liegt ein 2 bis 5 Prozentpunkte höheres Niveau vor (Abb. A6, A16 und A26). Ebenfalls höhere Werte werden unter der letzten Bank über dem nicht unterkellerten Bereich registriert, diese liegen im Sommer bis zu 8 Prozentpunkte oberhalb des Feuchtwertes am niedrigsten Punkt des Höhenprofils, im Winter dagegen nur 2 bis 4 Prozentpunkte (Abb. A8, A18 und A28).

Hinter dem Altar liegt ein insgesamt höheres Niveau vor. Im Winter 2017/2018 gab es einen mehrmonatigen Zeitraum, in dem die Feuchte nicht unter 70 % fiel. Die Installation des Entfeuchters im Kapellenraum und eines Querstromlüfters vor dem Fenster sorgten im zweiten Winter für einen im Durchschnitt um rund 10 Prozentpunkte niedrigeren Kurvenverlauf (Abb. A2, A12 und A22). Dieser Querstromlüfter sorgt immer dann für einen Austausch der Luft hinter dem Altar mit Raumluft, wenn die gemessene Differenz zu groß wird. Die Schaffung von Zuluftöffnungen im unteren Bereich am 10. Juli 2019 hat die Effizienz geringfügig verbessert.

Im Besucherraum sorgt die Temperierung der benachbarten Schlossküche für geringere Werte der relativen Luftfeuchte. Sie sinkt im Februar und März 2018 mehrfach bis auf unter 40 % ab (Abb. A2, A12 und A22).

2.4.3.3 Absolute Luftfeuchte

Ein Vergleich der Verläufe absoluter Feuchten der Außen- und Innenluft lässt Rückschlüsse darüber zu, wie schnell ein Luftaustausch der Raumluft durch Außenluft erfolgt. Tendenziell identische Verläufe weisen auf einen hohen Luftwechsel hin. Außerdem liefert der Vergleich einen Hinweis darauf, wie effektiv der Luftfeuchtegehalt der Innenluft durch einen erzwungenen Austausch mit Außenluft beeinflusst werden kann. In der nachfolgenden Abb. 2.4-02 sind die absoluten Luftfeuchten außen und innen am Messort 1 in 4,80 m Höhe für den Monat Mai 2018 (vor der Aufstellung des Luftentfeuchters im Kapellenraum) dargestellt.

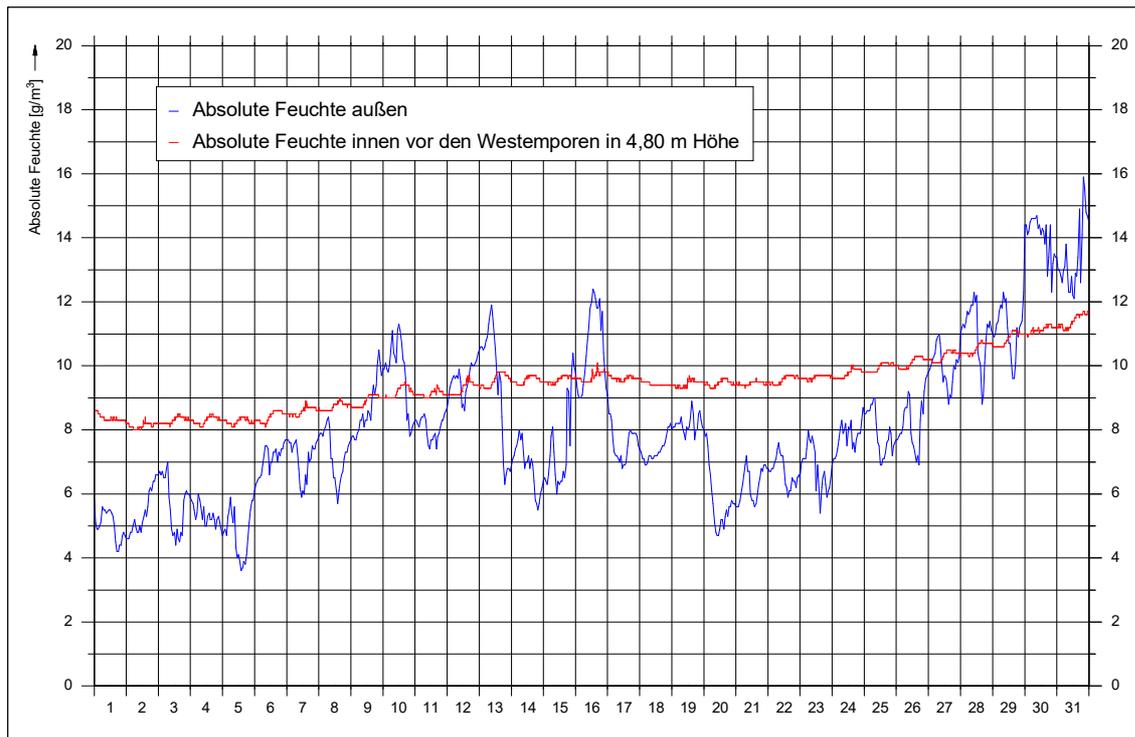


Abb. 2.4-02: Absolute Luftfeuchte außen und innen im Mai 2018

Die absolute Feuchte der Innenraumluft bewegt sich im dargestellten Monat in einem Bereich von 8 bis knapp 12 Gramm Wasserdampf pro Kubikmeter Luft. Sie folgt tendenziell zwar der absoluten Feuchte außen, besitzt aber einen deutlich gedämpften, und gleichmäßigeren und leicht verzögerten Verlauf. Langfristig wird der Mittelwert der Außenluft nur unwesentlich überschritten. Dies bedeutet, dass die Luftfeuchte innen weitestgehend allein aus dem Feuchteangebot der Außenluft resultiert.

Gleichzeitig wird deutlich, dass es über mehrere Tage andauernde Phasen gibt, in denen der absolute Wasserdampfgehalt der Außenluft über dem der Innenraumluft liegt. Dies unterstreicht die Möglichkeit, mit einem geregelten Luftaustausch gezielt auf den Feuchtegehalt innerhalb der Kapelle einwirken zu können. Diese Annahme verdeutlicht auch der zeitliche Verlauf der absoluten Luftfeuchten in Abb. A31.

2.4.3.4 Oberflächentemperaturen

An insgesamt sieben Messorten werden Wand-/Fußbodenoberflächentemperaturen innerhalb der Schlosskapelle protokolliert (vgl. Abb. 1, A7, A9, A10, A17, A19, A20, A27, A29 und A30).

Aus den Kurvenverläufen ist zu entnehmen, dass sich die höchsten Wandoberflächentemperaturen erwartungsgemäß an Wänden zu benachbarten beheizten Räumen sowie im Sommer an der südlichen Außenwand ergeben. Niedrige Werte werden an der nördlichen Außenwand zur Durchfahrt hin und auf dem Fußboden gemessen.

Die Oberflächentemperaturen des Fußbodens im unterkellerten und nichtunterkellerten Bereich differieren nur minimal voneinander. Oberhalb des Kellers liegen im Sommer etwa ein Kelvin höhere Temperaturen vor, im Winter ergeben sich nahezu deckungsgleiche Verläufe.

2.4.3.5 Taupunkttemperaturen

Die Taupunkttemperatur lässt sich rechnerisch aus der Lufttemperatur und der relativen Feuchte ermitteln. Sie gibt diejenige Temperatur an, bei der der Sättigungsdampfdruck erreicht ist und deren Unterschreitung zum Ausfall von Tauwasser an entsprechend kalten Oberflächen führt.

Für einen beispielhaften Nachweis wird die kälteste protokollierte Oberflächentemperatur (Nordwand Erdgeschoss im Bereich der Durchfahrt außen vor dem Tor, Messort 7) der in der Nähe (Messort 4, Prieche links neben Altar) rechnerisch ermittelten Taupunkttemperatur im März 2018 in der folgenden Abb. 2.4-03 gegenübergestellt. Die Kurvendarstellung belegt, dass selbst in dem Monat mit den niedrigsten registrierten Oberflächentemperaturen immer noch ein deutlicher Abstand zum Verlauf der Taupunkttemperatur besteht und deshalb eine Unterschreitung bzw. ein Kondensatausfall sicher ausgeschlossen werden kann.

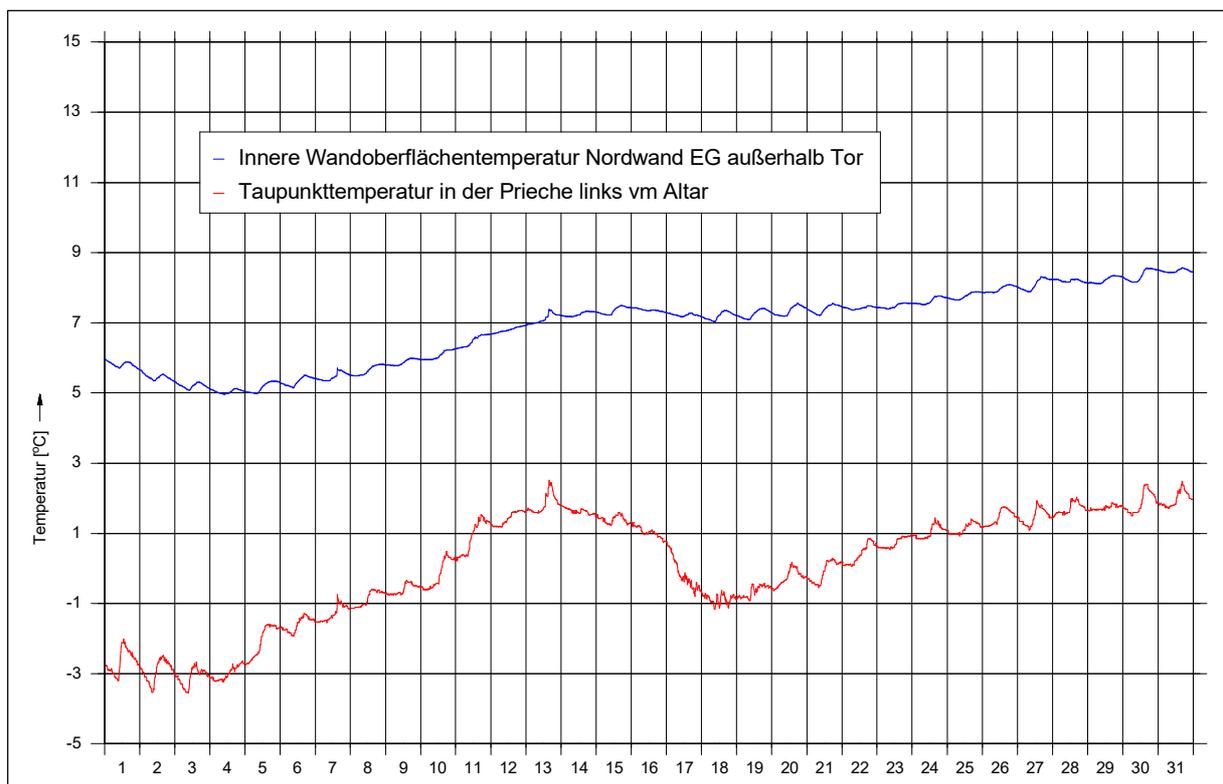


Abb. 2.4-03: Gegenüberstellung der Oberflächentemperatur und Taupunkttemperatur

2.4.4 Nutzungserprobung

Wie bereits erwähnt, konnten die Besucher des Schlossmuseums den Kapellenraum bis zum Oktober 2018 nicht mehr betreten. Abgesehen von studentischen Gruppen der HAWK Hildesheim, die sich während durchgeführter Projektwochen in der Kapelle aufhielten und einer Andacht anlässlich des Reformationsjubiläums lagen aus den Vorjahren keine Erfahrungen und Raumklimaaufzeichnungen für einen direkten Aufenthalt von Gruppen innerhalb der Kapelle vor.

Aus diesem Grund sollte ab dem letzten Quartal 2018 versuchsweise einzelnen Besuchergruppen an vorher festgelegten Terminen der Zutritt in die Kapelle gewährt werden. Die Gruppengröße war zunächst auf 25 Personen beschränkt und wurde im Verlauf dann noch einmal geringfügig reduziert. Um einen unnötig hohen Feuchteeintrag zu vermeiden, sollte in Vorfeld der Führung nasse Bekleidung in der Schlossküche abgelegt werden.

Gruppengröße, Außenklima und Verweildauer innerhalb der Kapelle sowie besondere Umstände/Ereignisse während der Führungen wurden von Mitarbeitern des Landesamts für Denkmalpflege protokolliert. Neben diesen Führungen wurde am 23.10.2019 auch eine Andacht im Zusammenhang mit einer Führung mit rund 15 Personen abgehalten.

Die Datenaufzeichnungsrate der Klimamessanlage wurde für einige dieser Termine auf eine bzw. drei Minuten verringert, um auch kurzzeitige Extremwerte messtechnisch erfassen zu können.

Die von den Hausmeistern jeweils protokollierte Wassermenge, die am Folgetag beiden Entfeuchtern (im Vorraum und der Kapelle selbst) entnommen wurde, sollte Aufschluss über die zusätzlich eingebrachte Feuchtigkeitsmenge liefern.

Es ergibt sich jedoch kein deutlicher Zusammenhang zwischen den Gruppengrößen und den in beiden Entfeuchtern angefallenen Wassermengen. Bei sämtlichen Nutzungserprobungen im Oktober und November kann nach 5 Terminen gar kein Wasser und sonst nur in sehr geringen Mengen (einmal 0,25 l und einmal 0,6 l) festgestellt werden. Hierfür kann theoretisch jedoch auch das Außenklima ursächlich gewesen sein.

Für die Führungen an den aufeinanderfolgenden Tagen am 6. und 7. Dezember sind nachfolgend die Klimaverläufe im Besucherraum und innerhalb der Kapelle (Messort 1 vor den Westemporen in 2,00 m und 7,40 m Höhe) für einen sechstägigen Zeitraum, in dem die beiden ausgewählten Führungen stattfanden, dargestellt. Zusätzlich ist in den Diagrammen die Wassermenge eingetragen, die zusammen aus beiden Entfeuchtern (in der Kapelle und im Vorraum) entnommen wurde. Hierbei ist zu beachten, dass die zu einem Zeitpunkt entnommene Wassermenge innerhalb der 24 Stunden zuvor von den Geräten der Raumluft entzogen wurde. Eine genaue zeitliche Zuordnung, wann die Entfeuchter in Betrieb waren, ist nicht möglich. Es ist jedoch teilweise aus den Kurvenverläufen der relativen Feuchte zu erkennen, wann der Entfeuchtungsbetrieb einsetzte, weil die Kurven dann jeweils um ein bis drei Prozentpunkte abfallen.

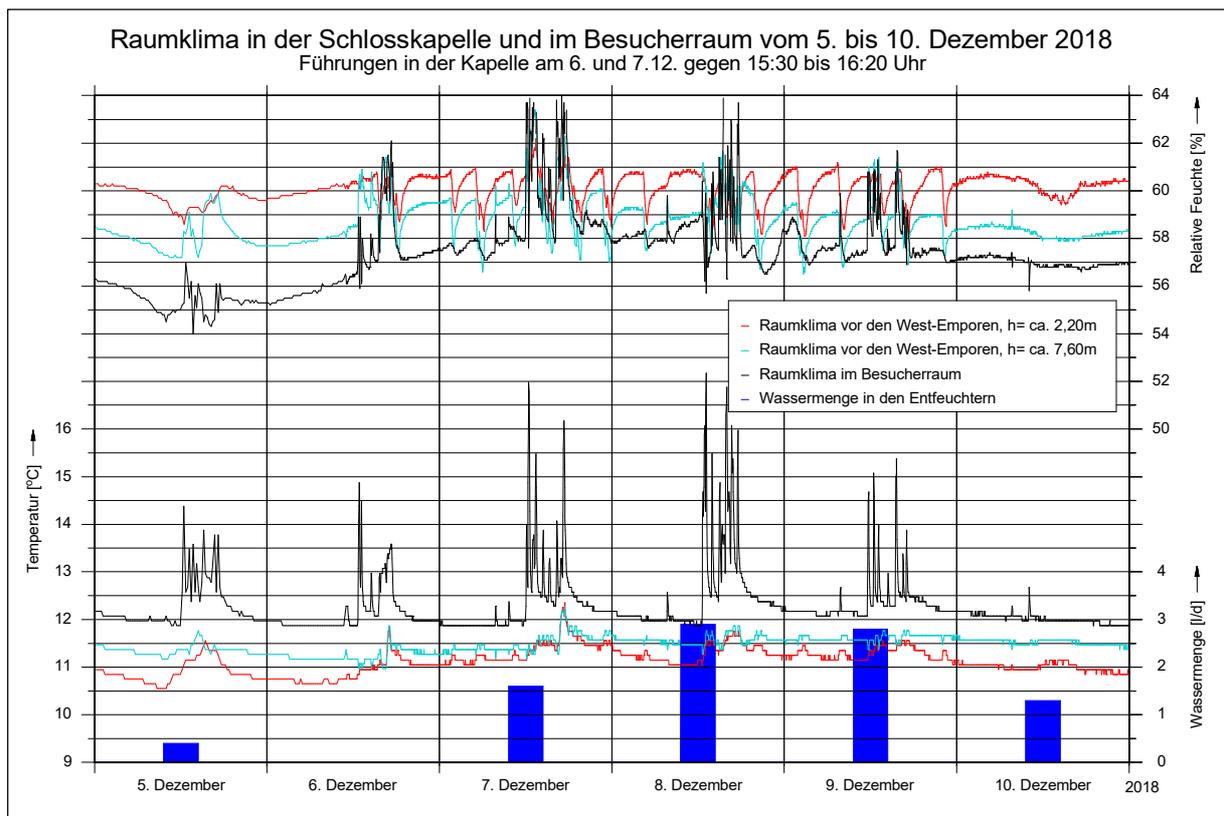


Abb. 2.4-04: Klimaverläufe und Wassermengen in den Entfeuchtern im Vorfeld und Nachgang der Führungen am 6. Dezember (15:40 - 16:25 Uhr, 21 Personen) und am 7. Dezember 2018 (15:35 - 16:15 Uhr, 22 Personen)

Es zeigt sich, dass auch ohne Führung am 4. Dezember eine geringe Menge (0,4 l) Wasser im Entfeuchter gesammelt wird, die am 5.12. entnommen wird. Wie der Kurvenverlauf der relativen Feuchte in der Kapelle am Nachmittag des 6. Dezembers zeigt, springt während der Führung der Entfeuchter in der Schlosskapelle an, ebenso noch einmal in der folgenden Nacht, den frühen

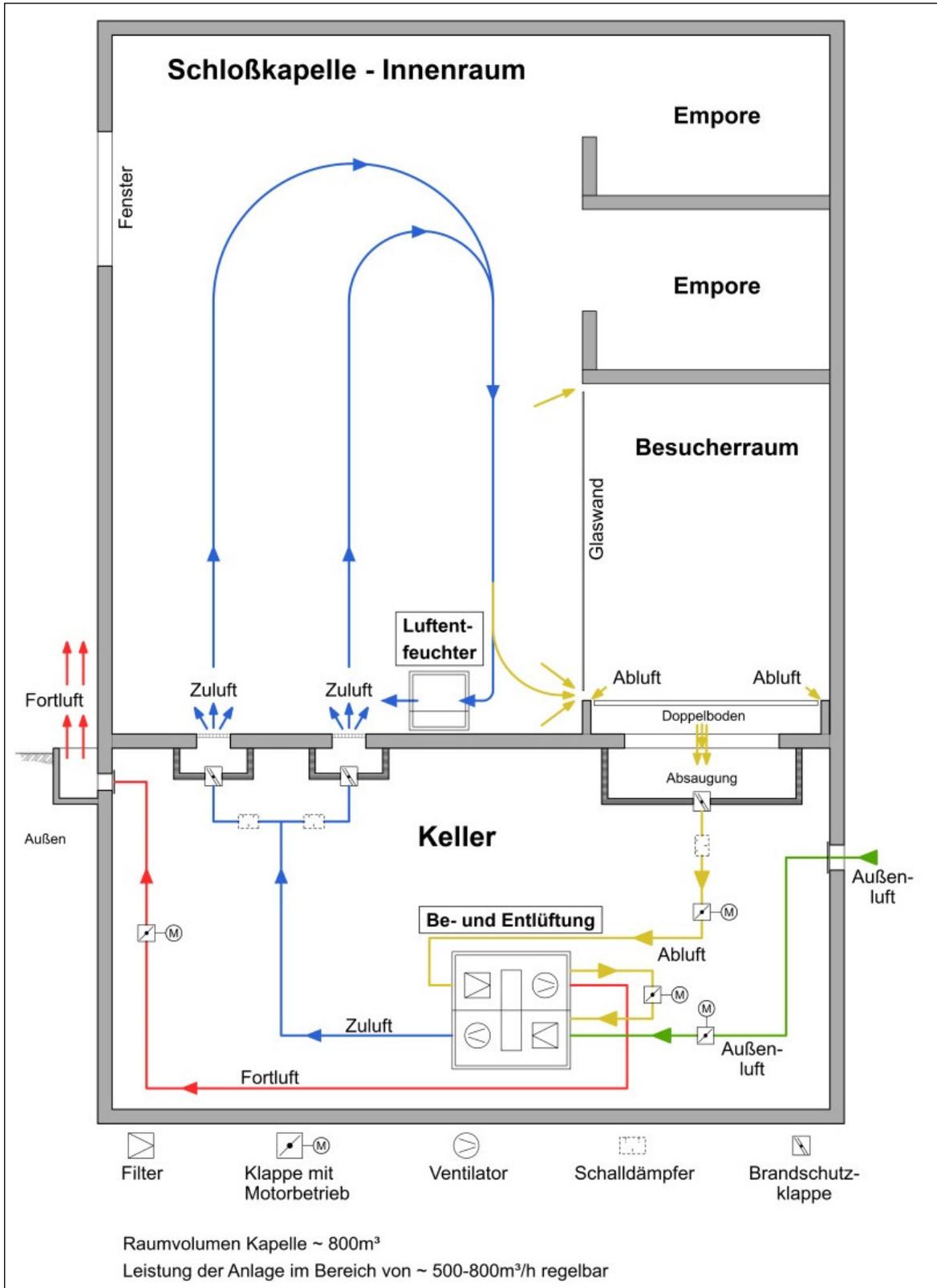


Abb. 2.4-06: Funktionsprinzip der Luftbehandlung

Anhand der aus den Untersuchungen gewonnenen Erkenntnisse wurden gebäude- und nutzungsspezifische Maßnahmen ergriffen, die ungünstige klimatische Verhältnisse verhindern, so dass im Jahresverlauf vor allem Maximalwerte nicht überstiegen, Minimalwerte nicht unterschritten werden und insgesamt somit auch eine möglichst geringe Schwankungsbreite vorliegt. Die Messergebnisse der jahreszeitlichen Verläufe zeigen, dass die Zahl und Höhe der Luftfeuchtespitzen deutlich verringert werden muss. Dies bedeutet eine Reduktion der derzeitigen Werte um ca. 10 Prozentpunkte. Durch die Reduzierung des Luftfeuchteniveaus wird außerdem die Gefahr der Wasserdampfkondensation an kalten Oberflächen erheblich reduziert und somit die Wasserverfügbarkeit für das Pilzwachstum stark gemindert.

Bei der Schlosskapelle werden folgende Maßnahmen zur Verstetigung der Luftfeuchte herangezogen:

Reduzierung (Vermeidung von Feuchtespitzen)

- Verringerung des Wasserdampfgehalts der Luft durch Austausch der Innenraumluft mit trockenerer Außenluft (Be- u. Entlüftung).
- Verringerung des Wasserdampfes mittels Entfeuchtungseinheit.

Erhöhung

- Erhöhung des Wasserdampfgehalts der Luft durch Austausch der Innenraumluft mit feuchterer Außenluft (Be- u. Entlüftung).

Lokaler Ausgleich

- Lokale Luftfeuchteunterschiede in der Kapelle werden mittels Luftumwälzung im Umluftbetrieb unterbunden.

2.4.5.1 Luftbehandlung

Das Prinzip der Beeinflussung des Feuchtehaushaltes der Kapelle mittels der o.g. Maßnahmen zeigen die Abb. 2.4-05 und 2.4-06. Alle technischen Geräte und Komponenten werden im Keller installiert, der sich direkt unterhalb der Kapelle befindet. Die Beeinflussung der rel. Luftfeuchte erfolgt durch Austausch der Raumluft mit Außenluft mithilfe einer Be- und Entlüftungseinheit. Die Außenluft wird im Bereich des Durchgangs zum Schlossinnenhof ca. 2,5 m oberhalb des Geländes angesaugt, gefiltert und über ein im Keller verlaufendes Rohrsystem der Kapelle im Altarbereich durch den Fußboden zugeführt (Zuluft). Die Entlüftung (Abluft) erfolgt ebenfalls mit Hilfe der Be- und Entlüftungseinheit. Die Abluft wird über den aufgedoppelten Fußboden des Besucherraumes entnommen und auf der Südseite der Schlosskapelle nach außen geführt.

Besucherraum und Kapelle stehen lufttechnisch miteinander in Verbindung. Der lufttechnische Anschluss des Rohrsystems an den aufgedoppelten Fußboden erfolgt durch den vorhandenen Treppenabgang, der direkt mit dem Hohlraum des Fußbodens verbunden ist. Die Zu- und Abluftöffnungen sind so angeordnet, dass eine Querdurchströmung der Kapelle gewährleistet ist.

2.4.5.2 Steuerung (Funktionsprinzip)

Die Aktivierung der entsprechenden Anlage (Entfeuchtungseinheit bzw. Be- u. Entlüftungsanlage) hinsichtlich der Einhaltung der Sollwerte und die Regelung beider Anlagen erfolgt zentral.

Als Kontroll- und Programmeinheit ist eine speicherprogrammierbare Steuerung (SPS) eingesetzt worden. Diese SPS ist die Kommunikations- und Schaltstelle des Gesamtsystems. Sie ermittelt alle benötigten Werte (messtechnisch und rechnerisch). Fehlermeldungen bzw. Istwerte werden angezeigt und ggf. weitergeleitet (Abb. 2.4-07).

Sensoren innen und außen messen Lufttemperatur und relative Feuchte, die absolute Feuchte wird auf rechnerischem Wege ermittelt. Die sich im Rohrnetz befindenden Brandschutzklappen, Rauch- und Differenzdruckmelder sind regelungstechnisch integriert. Eine Taupunktüberwachung verhindert die Bildung von Kondensat im Rohrnetz.

In Abhängigkeit der Werte und Vorgaben wird hinsichtlich der Einhaltung der Sollwerte der entsprechende Betrieb an- oder abgeschaltet. Außerdem sind mittels Fernzugriff alle Daten der Anlagen einsehbar sowie Anpassung von Parametern vorzunehmen.

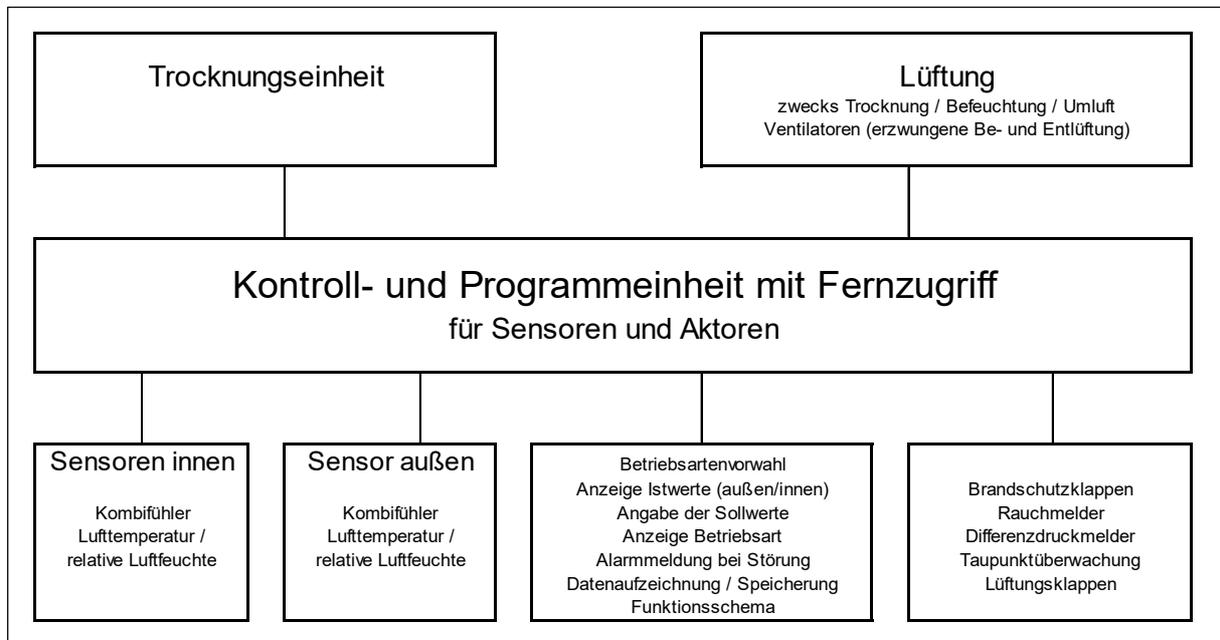


Abb. 2.4-07: Schematische Darstellung der Regelungstechnik

Die Schaltlogik für die unterschiedlichen Betriebszustände und den Einsatz der Geräte in Abhängigkeit von den Ausgangsparametern ist in Abb. 2.4-08 dargestellt. Generell soll aus konservatorischen Gründen eine relative Raumluftfeuchte angestrebt werden, die sich in einem Bereich von 60 bis 65 Prozent bewegt. Für die Regelung der klima-beeinflussenden Einrichtungen hat dies zur Folge, dass keinerlei Aktionen unternommen werden, wenn sich die Raumluftfeuchte in diesem Bereich bewegt. Befindet sich die relative Luftfeuchte in der Kapelle außerhalb des o.g. Bereiches, so wird zuerst ermittelt, mit welcher Maßnahme die Einhaltung der Sollwerte zu erreichen ist. Vorrang hat immer - schon aus energetischen Gründen - die Be- und Entlüftung. Weiter soll beachtet werden, dass bei Raumlufttemperaturen unterhalb von 18 °C der Luftaustausch nur stattfindet, wenn die Außenluft Temperatur mindestens 5 °C beträgt und nicht mehr als drei Kelvin kälter ist als die Innenlufttemperatur. Oberhalb von 18° C darf auch Außenluft zugeführt werden, die beliebig kälter ist. Bei einem Anstieg der relativen Raumluftfeuchte über 63 Prozent wird, sofern die Außenluft eine geringere absolute Feuchte als die Innenluft aufweist, durch Luftaustausch eine Absenkung der relativen Luftfeuchte angestrebt. Die zuvor genannten Temperaturbedingungen gelten auch hier. Steigt trotzdem die relative Luftfeuchte in der Kapelle auf 65 Prozent, soll die Trocknungseinheit alleine den Betrieb übernehmen und somit den Feuchteanstieg verhindern.

Temperatur T innen rel. Feuchte F innen		5 °C < T ≤ 18 °C	5 °C < T ≤ 18 °C	
	T ≤ 5 °C	UND ≤ (außen+3)	UND > (außen+3)	T > 18 °C
F < 60 %		vorrangig L1, sonst L3	L3	vorrangig L1, sonst L3
60 % ≤ F < 63 %		L3	L3	L3
63 % ≤ F < 65 %		vorrangig L2, sonst L3	L3	vorrangig L2, sonst L3
F ≥ 65 %	E	E, L2	E	E, L2

Abb. 2.4-08: Schaltlogik

E ⇒ Entfeuchten

L1 ⇒ Lüften, Befeuchten mit Außenluft (**aber nur dann**, wenn die **absolute** Luftfeuchte außen **größer** ist als innen)

L2 ⇒ Lüften, Trocknen mit Außenluft (**aber nur dann**, wenn die **absolute** Luftfeuchte außen **kleiner** ist als innen)

L3 ⇒ **Umluftbetrieb**, wenn die Differenz zwischen geringster und höchster relativer Feuchte innerhalb der Kapelle (OHNE Vorraum und hinter dem Altar) größer als 3 %-Punkte ist.

Fällt die Feuchte unter den niedrigeren Grenzwert (60 %), so soll durch einen aktiven Luftaustausch von Innen- durch Außenluft die Feuchte angehoben werden. Dieser Vorgang setzt allerdings voraus, dass die absolute Luftfeuchte außen höher ist als innen.

Erreicht die rel. Luftfeuchte den Maximalwert (65 %) und erlauben die klimatischen Randbedingungen keine Einflussnahme durch Luftaustausch, so wird ebenfalls die Entfeuchtungseinheit aktiviert.

Befindet sich der Mittelwert der rel. Luftfeuchte im vorgegebenen Bereich, jedoch weisen die Fühler untereinander mehr als 3% Punkte auf, wird eine Luftumwälzung im Umluftbetrieb vorgenommen. Hiermit soll ein einheitlicheres Feuchteniveau in der Kapelle erzielt werden.

2.4.6 Spezielle klimatische Bereiche

Innerhalb der Kapelle liegen konstruktiv bedingt Bereiche mit geringer Luftbewegung bzw. mit geringem Luftaustausch vor. Hiermit verbunden sind in diesen Bereichen erhöhte lokale Luftfeuchten.

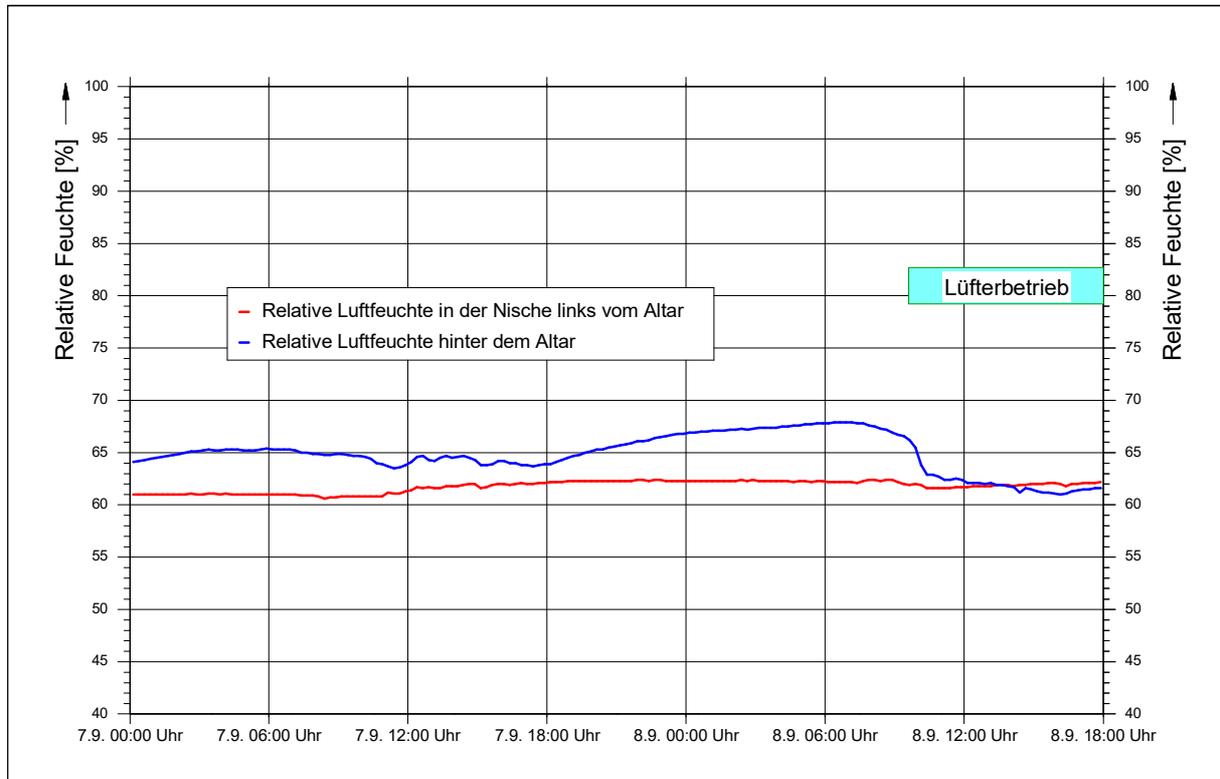
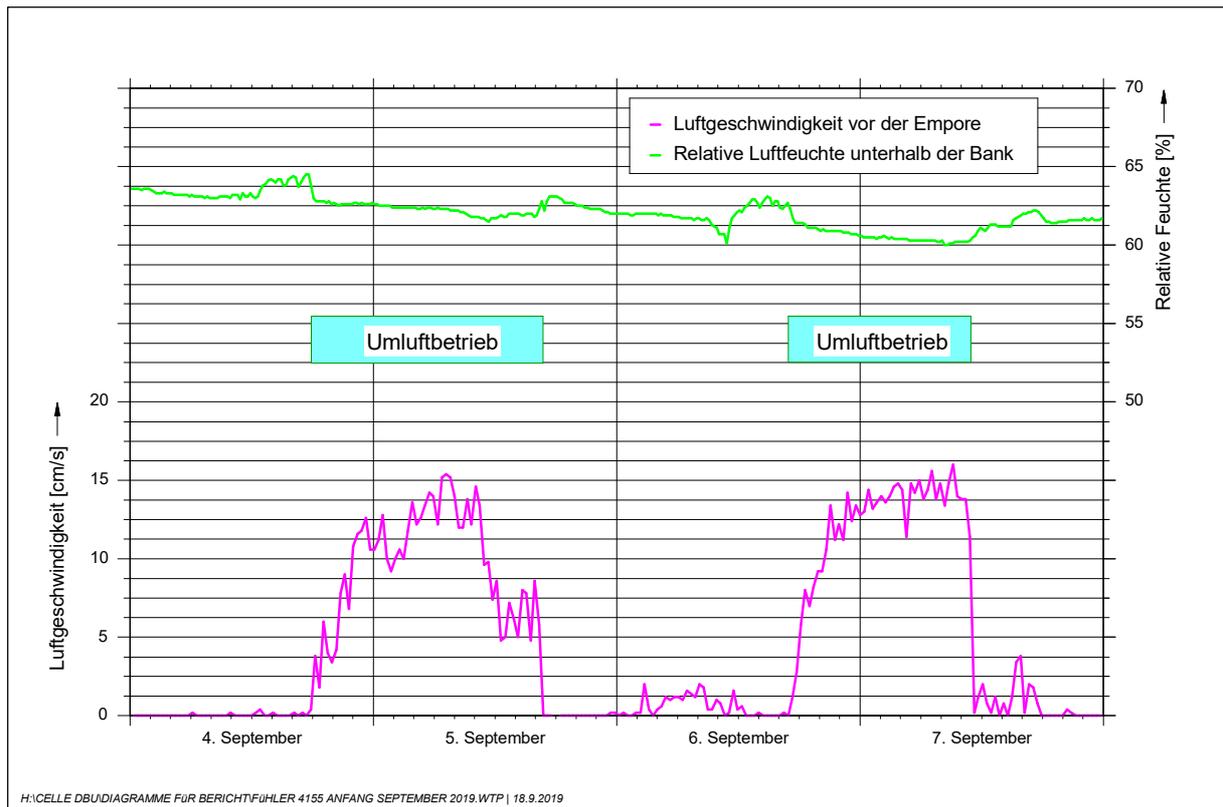


Abb. 2.4-09: Einfluss des Lüfterbetriebs auf die relative Luftfeuchte hinter dem Altar

Zwischen Altar und Außenwand (Ostwand) befindet sich z.B. ein nach oben hin geöffneter Hohlraum. Diese bauliche Situation stellt eine besondere klimatische Situation dar, die vorwiegend durch den Einfluss der Außenwand und des Fensters bestimmt wird. Um identische Klimata im Zwischenraum und in der Kapelle zu erhalten (rel. Luftfeuchte 60 – 65 %) muss eine lufttechnische Ankopplung an den Kapellenraum erfolgen. Bei Überschreiten des Grenzbereiches erfolgt aus diesem Grund automatisch ein erzwungener Luftaustausch. Dabei wird der Hohlraum mit Kapellenluft durchströmt, wobei die Ansaugung im unteren Bereich erfolgt. Aus Abb. 2.4-09 ist zu entnehmen, dass mit Hilfe des Luftaustausches die klimatischen Verhältnisse vor und hinter dem Altar annähernd identisch sind. Die rel. Luftfeuchtigkeit bewegt sich somit im angestrebten Schwankungsbereich. Ein weiterer kritischer Bereich liegt unterhalb der Sitzbänke vor. Dieser kennzeichnet sich ebenfalls durch eine erhöhte relative Luftfeuchte gegenüber dem Kapelleninnenraum aus. Die Abb. 2.4-10 zeigt recht deutlich, dass ein durch einen Umluftbetrieb vorgenommenen Luftwechsel und damit verbundene höhere Luftbewegungen eine Anpassung an die rel. Luftfeuchte in der Kapelle bewirkt, in diesem Fall durch eine Absenkung.

Um diesen Einfluss noch zu optimieren, muss die Luftabsaugung (Abluft) flächendeckender und die Luftzuführung (Zuluft) richtungsgezielter erfolgen.



H:\CELLE DBUDIAGRAMME FÜR BERICHTFÜHLER 4155 ANFANG SEPTEMBER 2019.WTP | 18.9.2019

Abb. 2.4-10: Einfluss einer Luftumwälzung durch Umluftbetrieb auf die Luftfeuchte des schlecht durchlüfteten Raumes unter den Sitzbänken und auf die Luftbewegung im Raum

2.4.7 Zusammenfassung und Empfehlungen

In der Schlosskapelle wurden erhebliche Feuchteschäden (u.a. Verwölbung der Bildtafeln) und Schimmelbefall festgestellt. Die öffentliche Zugänglichkeit wurde daher (ca. 1995) stark eingeschränkt und die kirchliche Nutzung eingestellt. Seit diesem Zeitpunkt ist die Besichtigung nur noch vom Besucherraum aus möglich, der sich unterhalb der Westempore befindet und durch eine Glaswand vom Innenraum abgetrennt ist.

Ziel dieser Arbeit ist es, mit Hilfe messtechnischer und bauphysikalischer Untersuchungen die aktuelle klimatische Belastung des unbeheizten Raumes zu ermitteln und Maßnahmen zur Klimastabilisierung und zur präventiven Konservierung zu entwickeln und zu realisieren. Die Wirksamkeit der Maßnahmen soll anschließend u.a. durch Nutzungserprobung unter messtechnischer Begleitung festgestellt werden. Im Zuge dieser Untersuchung sollen auch die Möglichkeit und die Grenzen einer touristischen und kirchlichen Nutzung unter Einhaltung der Grenzwerte geprüft werden.

Außerdem bilden die messtechnisch ermittelten Daten die Grundlage zur Verifikation der im Rahmen dieses Forschungsprojektes entwickelten 3D-Klima- und Strömungssimulation.

Der Wärme- und Feuchtehaushalt der Oberflächen resultiert u.a. aus den Ausgleichsvorgängen mit den Klimakomponenten. Die Baustoff- bzw. Materialfeuchte kann durch ständig wechselnde Luftfeuchten in den oberflächennahen Zonen beeinflusst werden. Alle bauphysikalischen und biologischen Vorgänge (z.B. Kristallisation, Pilzbildung, Schrumpf- und Dehnungsprozesse) sind u.a. vom Raumklima abhängig und können z.B. bei Nichteinhaltung von Grenzwerten eine Gefahr für die Gemälde und die übrige Ausstattung darstellen.

Die messtechnischen Untersuchungen zeigen, dass das Innenraumklima vom Außenklima infolge einer natürlichen Be- und Entlüftung (z.B. Undichtigkeiten, Öffnen der Türen) stark beeinflusst wird. Die Messergebnisse diesbezüglich verdeutlichen anhand der absoluten Luftfeuchte, dass die Klimata in der Kapelle dem Außenklima zwar folgen, jedoch mit deutlich gedämpften und zeitlich versetzten Amplituden und einem gleichmäßigeren Verlauf.

Das Klima in der Kapelle weist Lufttemperaturen zwischen 6 und 27 °C (tägliche Schwankungen etwa 2 K) und relative Luftfeuchten zwischen 42 und 70 % (tägliche Schwankungen 2 - 5 Prozentpunkte) auf. Der vertikale Luftfeuchtegradient beträgt allerdings bis zu 15 Prozentpunkte aufgrund der deutlich höheren Lufttemperatur im oberen Bereich.

Das Klima auf der nördlichen Empore fügt sich in das klimatische Verhalten des Raumes ein. Hinter den Bildtafeln aus der nördlichen Empore ist es wärmer als vor den Bildtafeln. Der Temperaturgradient beträgt ca. 2 – 3 K. Die Ursache hierfür liegt in der Beheizung der an die Kapelle angrenzenden Räumlichkeiten begründet.

Der Vergleich der Oberflächentemperaturen mit den Taupunkttemperaturen zeigt, dass ein deutlicher Abstand zwischen den Kurvenverläufen besteht und somit ein Kondensatausfall in den betrachteten Bereichen ausgeschlossen werden kann.

Im Vorfeld weiterer Maßnahmen wurde im Sommer 2018 innerhalb der Kapelle ein Entfeuchter installiert, um Feuchtespitzen oberhalb von (zunächst) 60 % zu verhindern und Erkenntnisse über die Wirkung äußerer Einflüsse zu erhalten.

Aktuell können die Besucher den Kapellenraum nicht direkt betreten. Im letzten Quartal 2018 wurde jedoch an festgelegten Terminen Besuchergruppen bis max. 25 Personen der Zutritt gewährt. Die Auswertung der Klimaaufzeichnungen und der anfallenden Wassermenge hat ergeben, dass von den Besuchern in dieser Anzahl nur eine geringe Belastung ausgeht, die die gleiche Größenordnung wie eine witterungsbedingte Belastung bewirkt.

Nach gemeinsamer Festlegung mit dem NLD Hannover sollte hinsichtlich der Erhaltung der Kapelle die relative Luftfeuchte einen konstanteren Verlauf aufweisen, der sich zwischen 60 und 65 % bewegt. Diese Bedingung ist nur durch zusätzliche Maßnahmen zu erfüllen.

Zu diesem Zweck wurde eine automatisch gesteuerte Anlage konzipiert, die folgende Funktionen ausführt:

- Die Luftentfeuchtung wird nach Überschreiten des vorgegebenen Grenzwertes entweder mit Hilfe von Außenluft oder durch Einschaltung eines in der Kapelle installierten Entfeuchters eingeleitet.
- Nach Unterschreitung des Grenzwertes erfolgt eine Befeuchtung mit Außenluft. Ist dieser Vorgang nicht möglich, entfällt eine Befeuchtung.
- Treten lokale Luftfeuchteunterschiede in der Kapelle auf, erfolgt eine Anpassung durch Luftaustausch im Umluftbetrieb.

Die klimatischen und anlagentechnischen Aufzeichnungen zeigen, dass sich das Raumklima infolge des technischen Eingriffes im vorgegebenen Bereich (60 bis 65 %) bewegt und dass die dazu notwendigen Korrekturen vorwiegend mit Außenluft erledigt werden.

Empfehlungen

Um im gesamten Innenraum ein einheitlicheres Klimaniveau zu erhalten und somit keine lokalen Feuchteunterschiede aufkommen zu lassen, sollte die Luftströmung in der Kapelle noch optimiert werden. Ein besonderes Augenmerk ist dabei auf Bereiche zu richten, wo ein verminderter Luftaustausch stattfindet bzw. äußerst geringe Luftbewegungen vorliegen (z.B. Bank- u. Priechenbereiche). Sie sind infolge der damit verbundenen höheren Luftfeuchte stark gefährdet.

Um dieses zu verhindern, könnte z.B. die Führung der Abluft im Fußboden des Besucherraumes optimiert und der Einbausituation mehr angepasst werden, so dass eine direktere Entnahme der Luft aus der Kapelle erfolgen kann.

Auch der Einfluss des Austrittswinkels und der Luftmenge des Zuluftstroms aus dem Fußboden im Altarbereich auf die Strömungsverhältnisse im Kapelleninnenraum sollte untersucht werden.

Stellt sich heraus, dass dadurch ein Luftaustausch erzwungen werden kann, wäre wahrscheinlich die klimatisch kritische Situation behoben.

Außerdem sollte die messtechnische Ermittlung der klimatischen Verhältnisse im Winterhalbjahr erfolgen, um eine Beurteilung des Klimas hinsichtlich der einzuhaltenden Grenzwerte vornehmen sowie die Einflussnahme der Anlage auf klimatische Veränderungen bzw. Einflussgrößen beurteilen zu können.

Anhang: Klimadiagramme

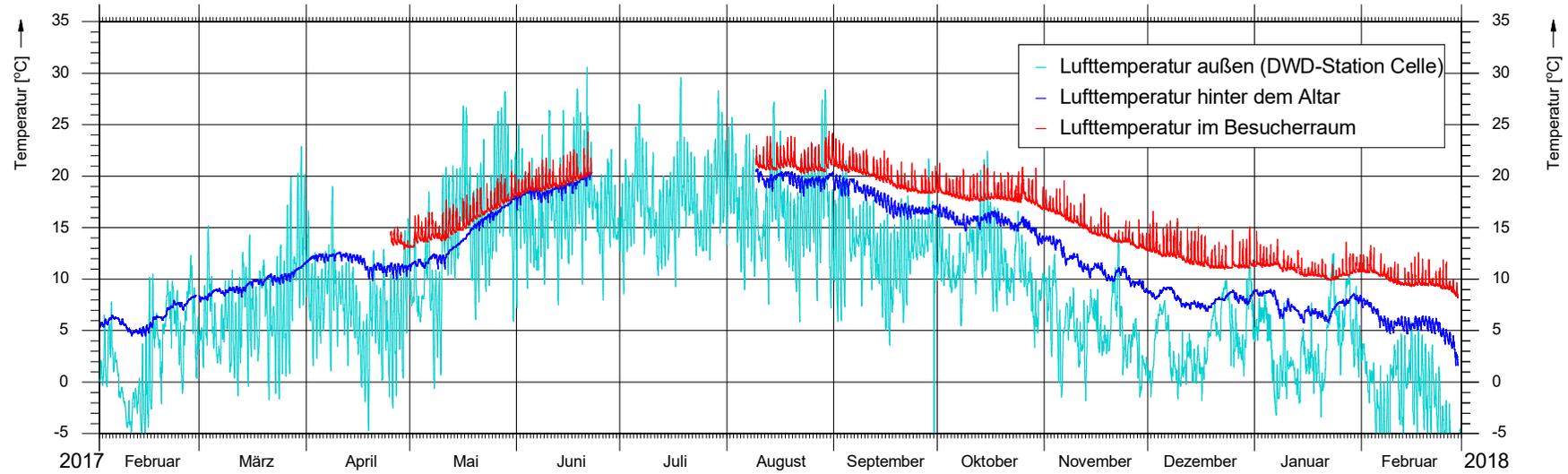


Abbildung A1: Lufttemperaturen außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

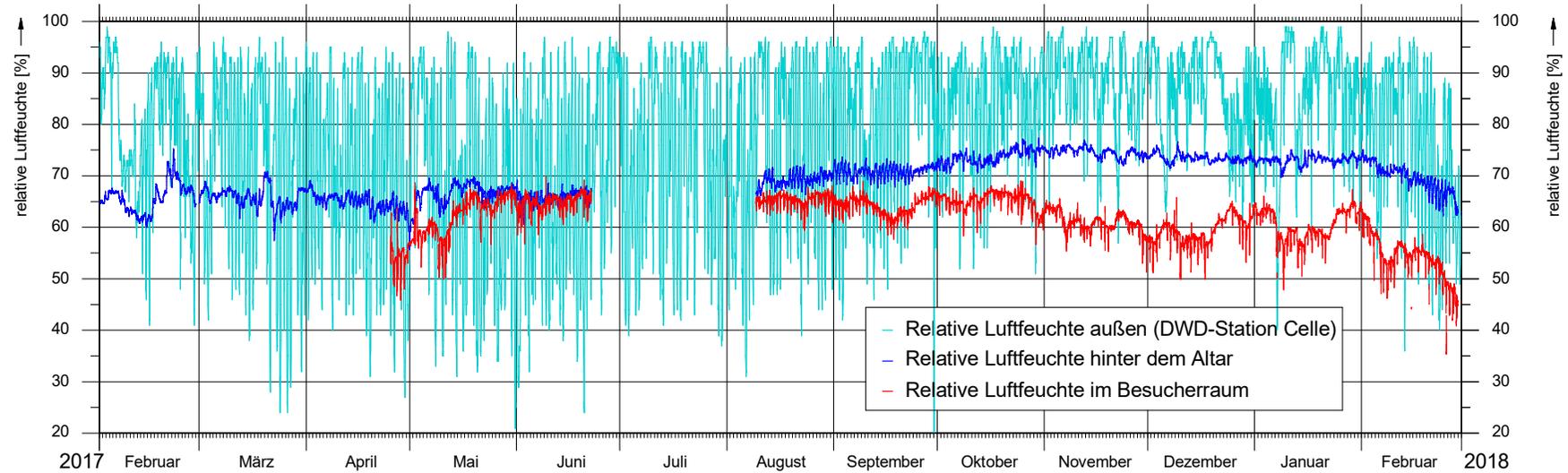


Abbildung A2: Relative Luftfeuchten außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

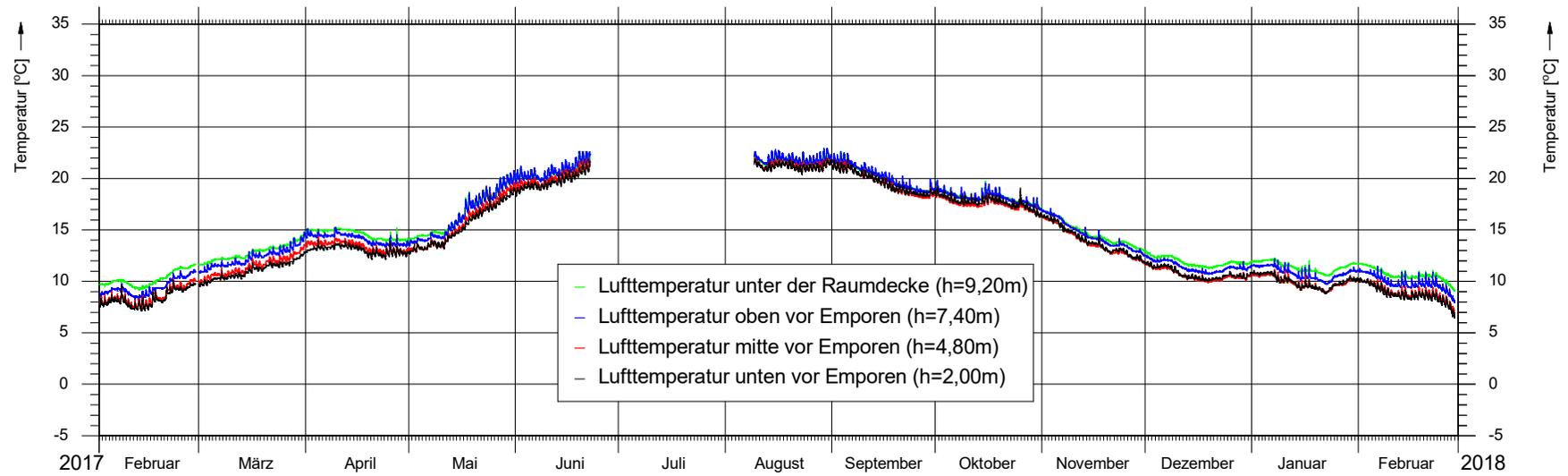


Abbildung A3: Lufttemperaturen - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

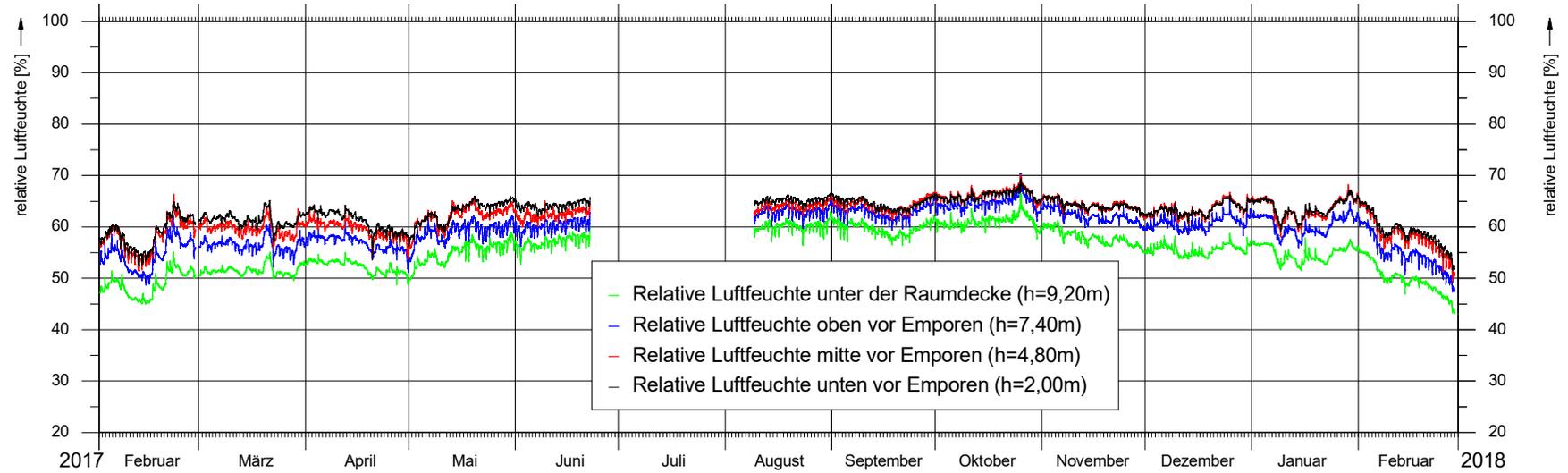


Abbildung A4: Relative Luftfeuchten - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

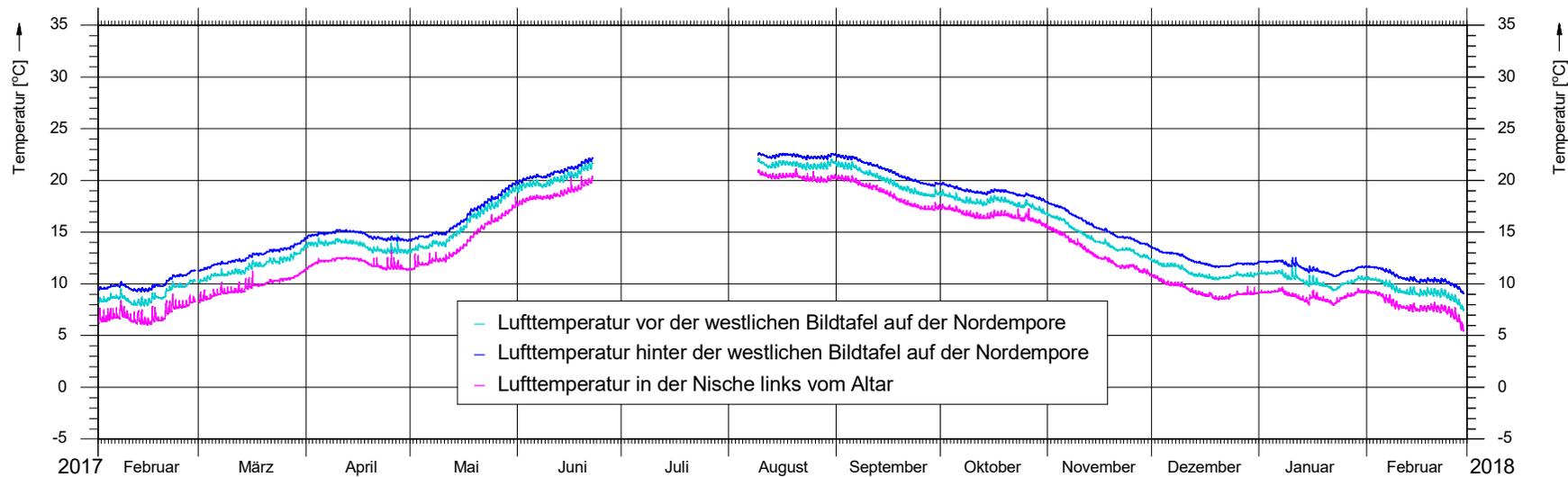


Abbildung A5: Temperaturen im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

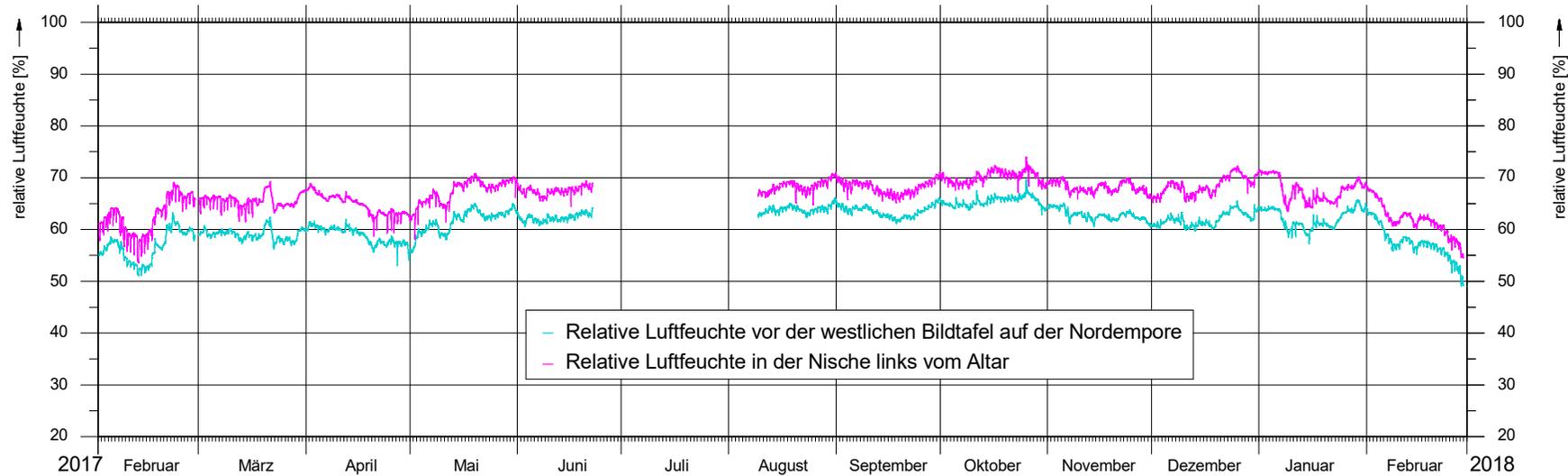


Abbildung A6: Relative Luftfeuchten im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

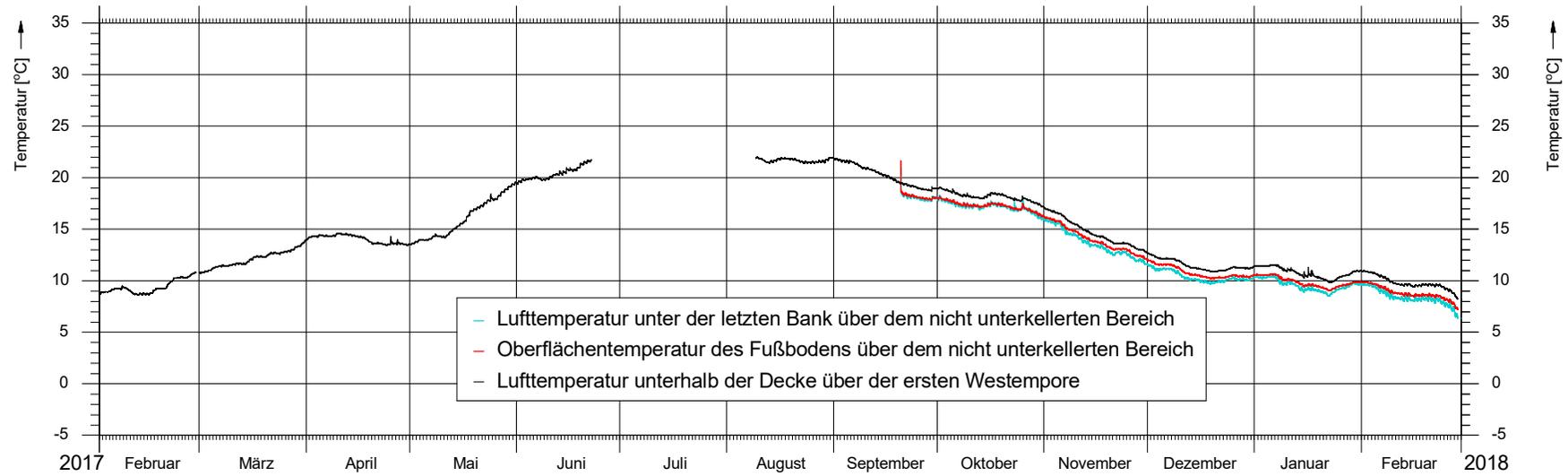


Abbildung A7: Temperaturen unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich) und unter der Decke der ersten Westempore

Celle, Schlosskapelle

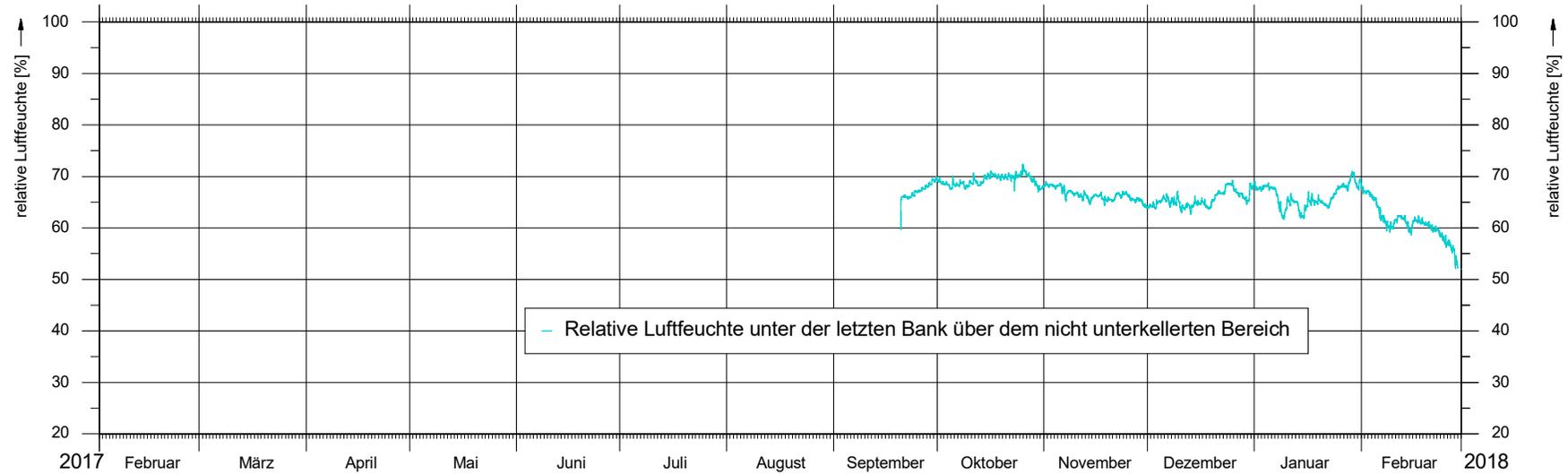


Abbildung A8: Relative Luftfeuchte unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich)

Celle, Schlosskapelle

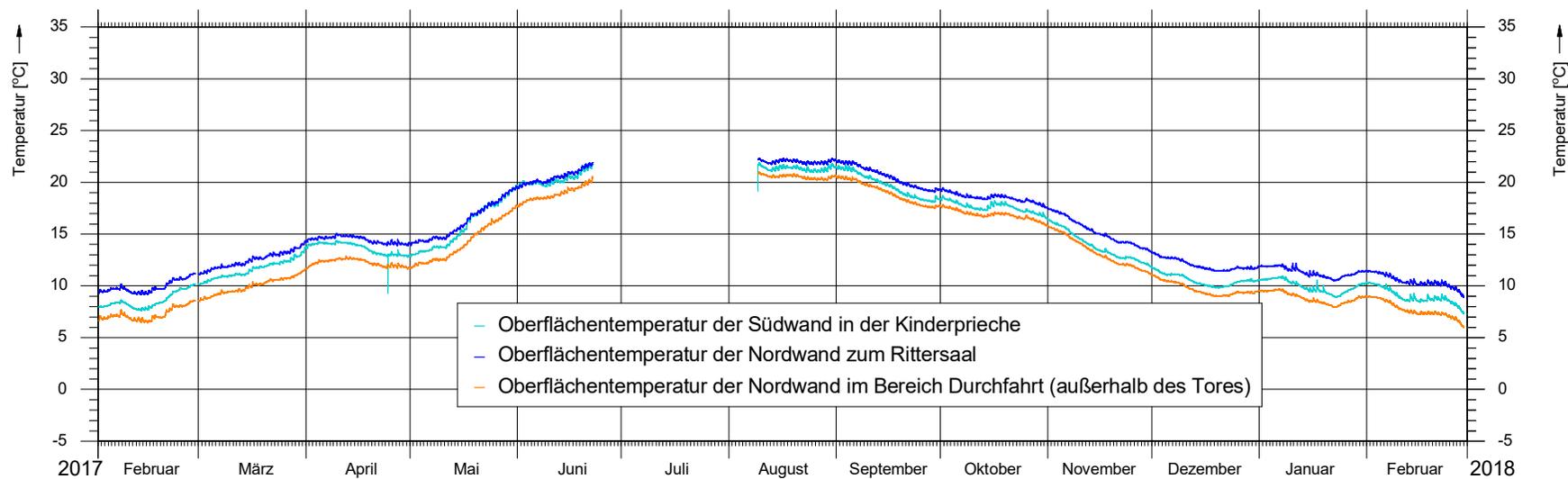


Abbildung A9: Oberflächentemperaturen I

Celle, Schlosskapelle

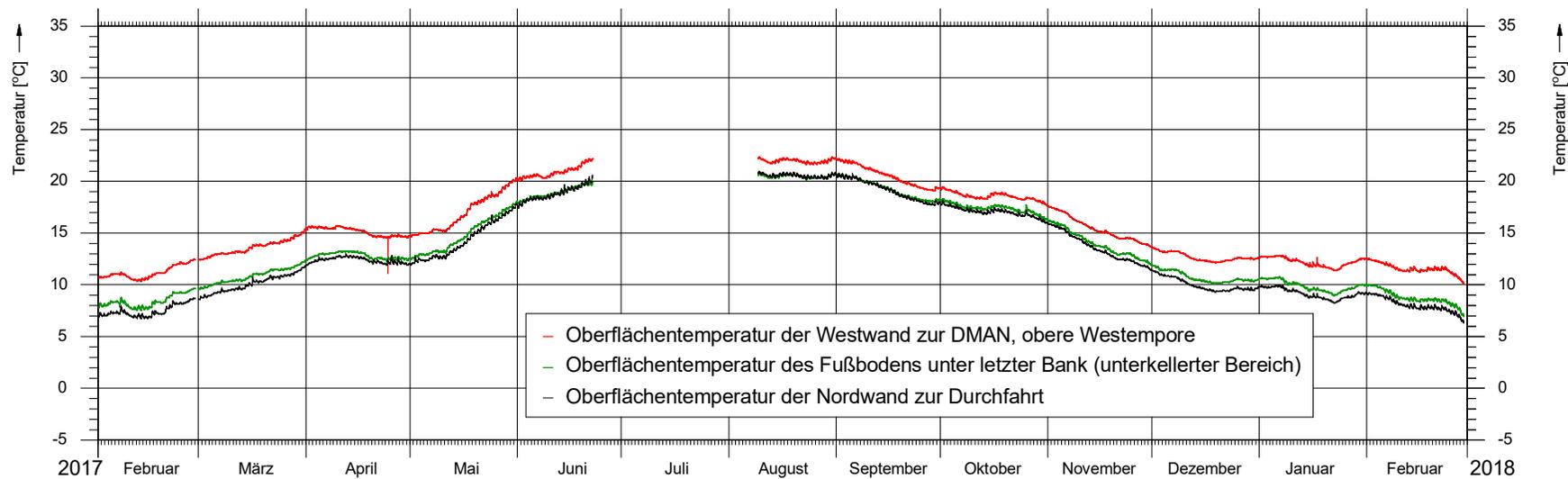


Abbildung A10: Oberflächentemperaturen II

Celle, Schlosskapelle

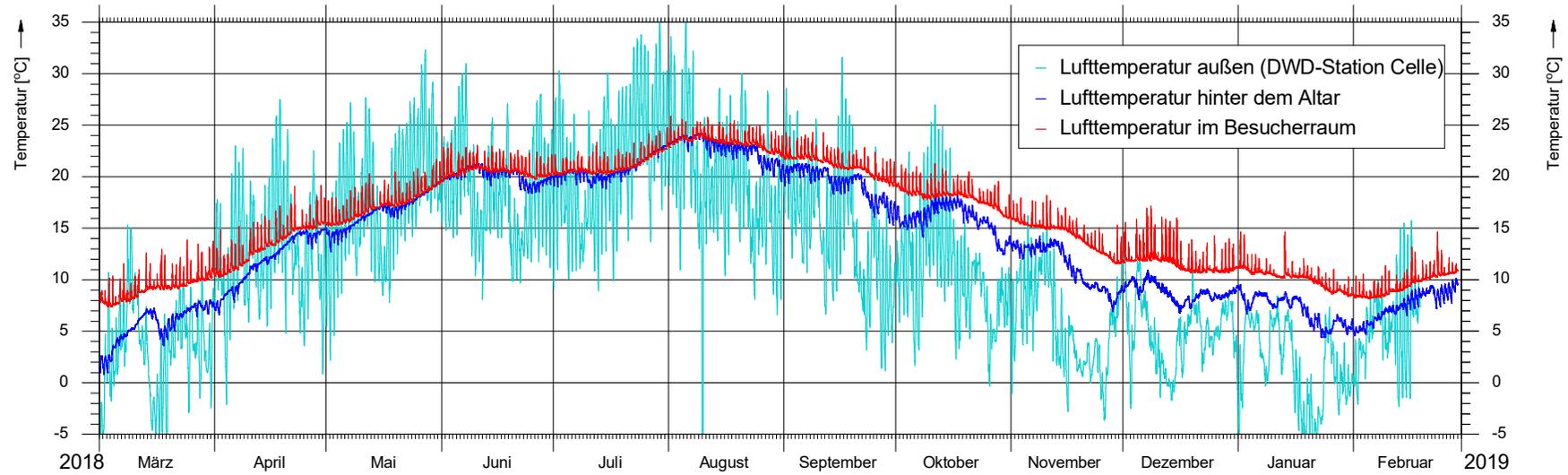


Abbildung A11: Lufttemperaturen außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

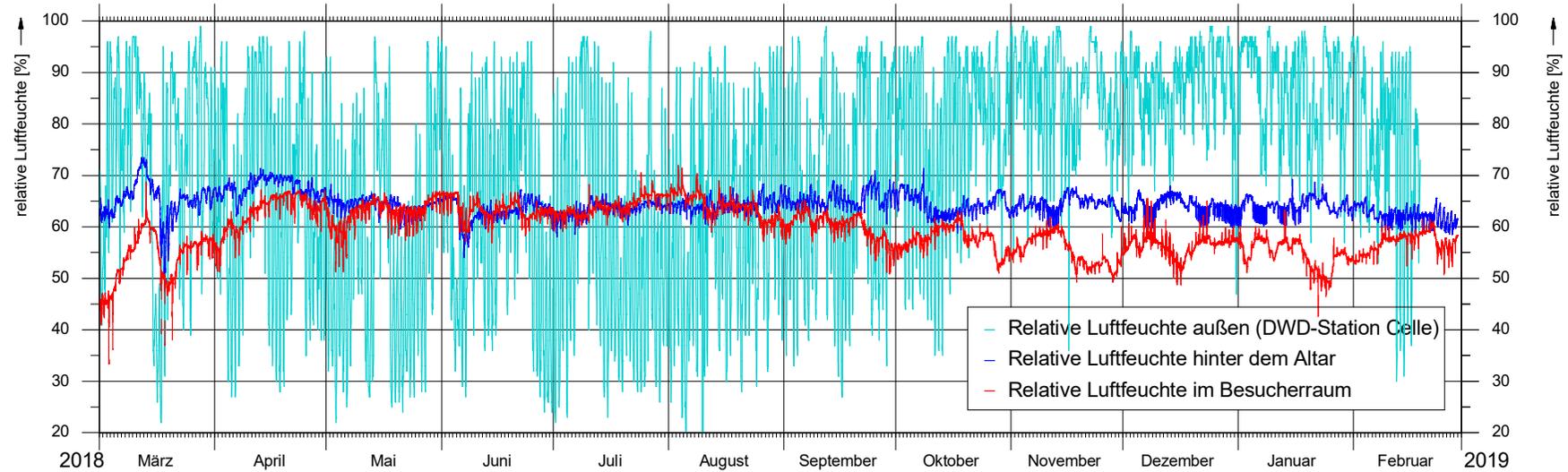


Abbildung A12: Relative Luftfeuchten außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

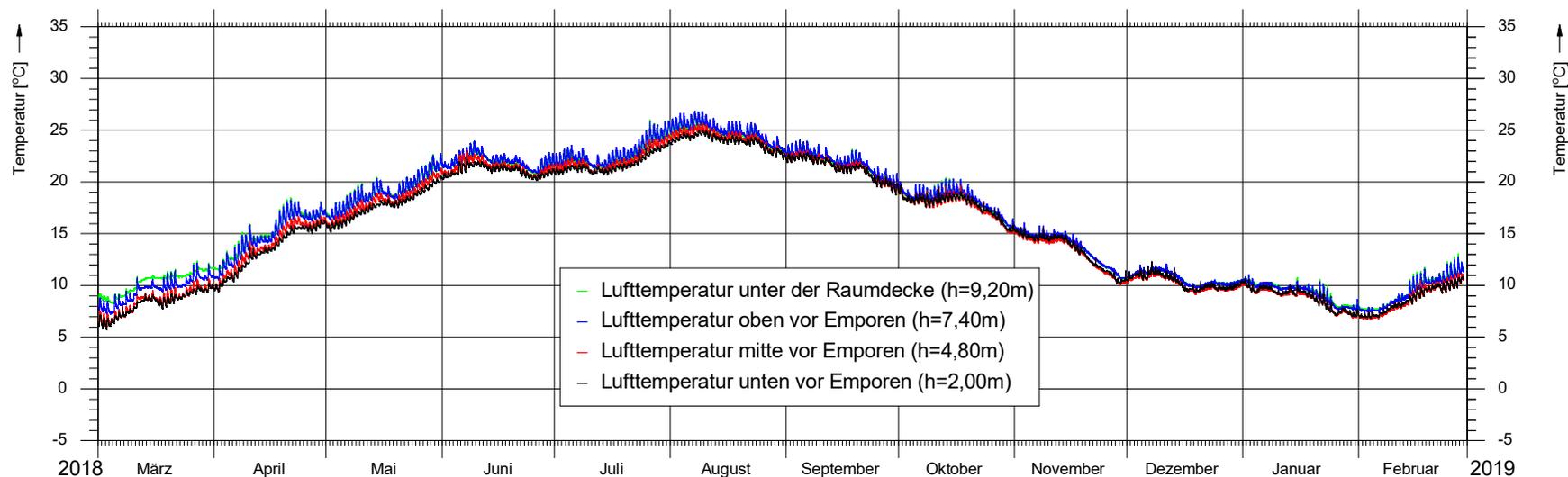


Abbildung A13: Lufttemperaturen - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

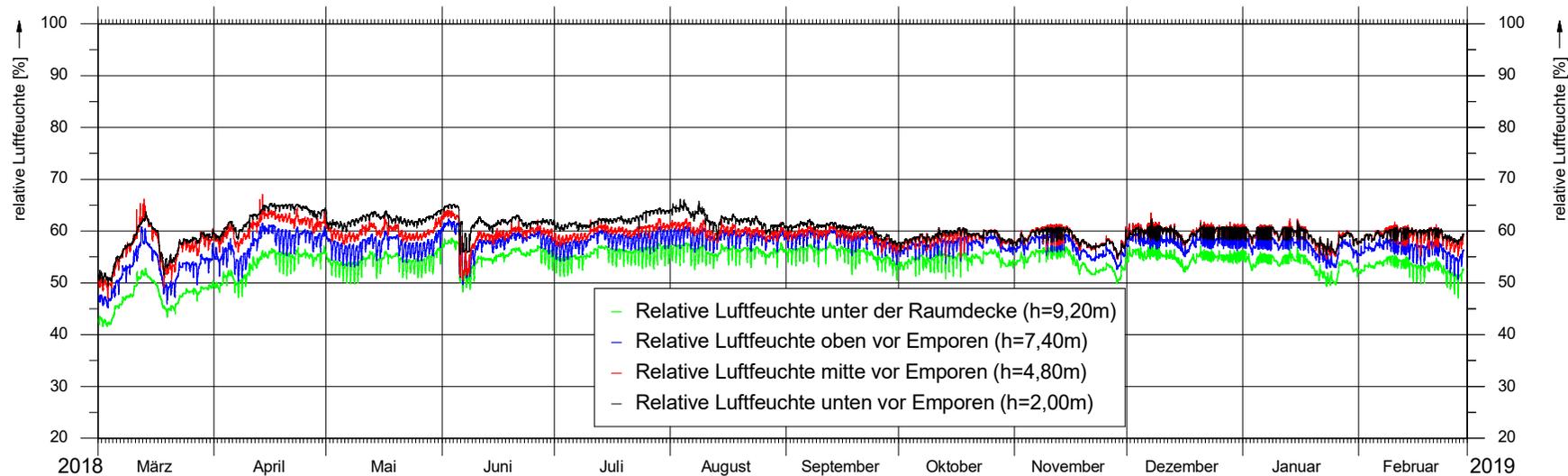


Abbildung A14: Relative Luftfeuchten - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

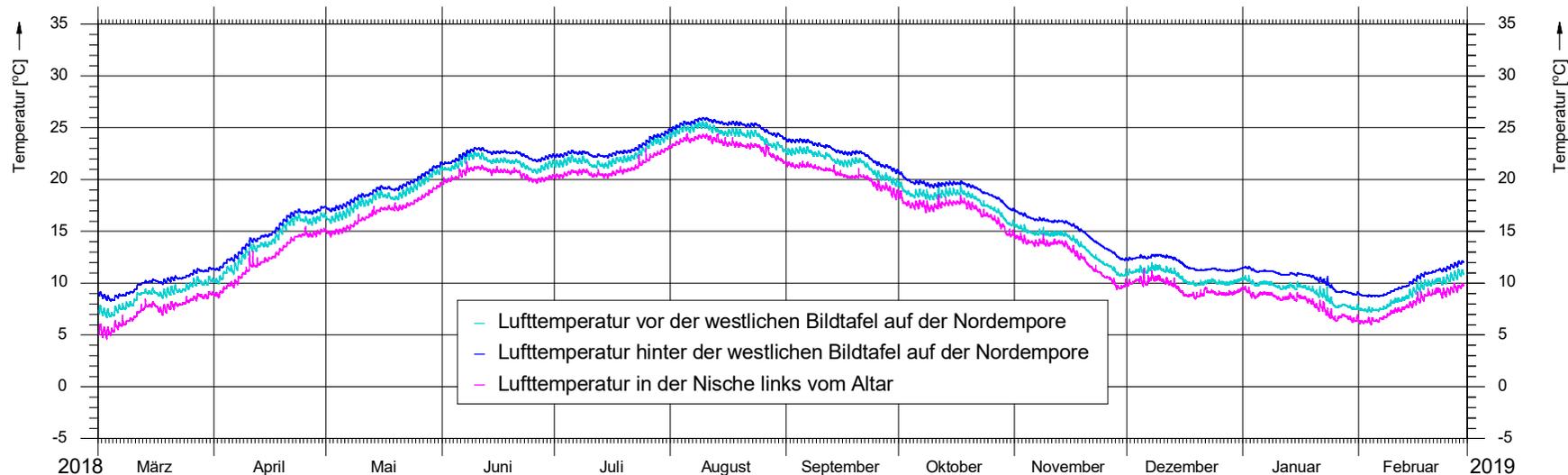


Abbildung A15: Temperaturen im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

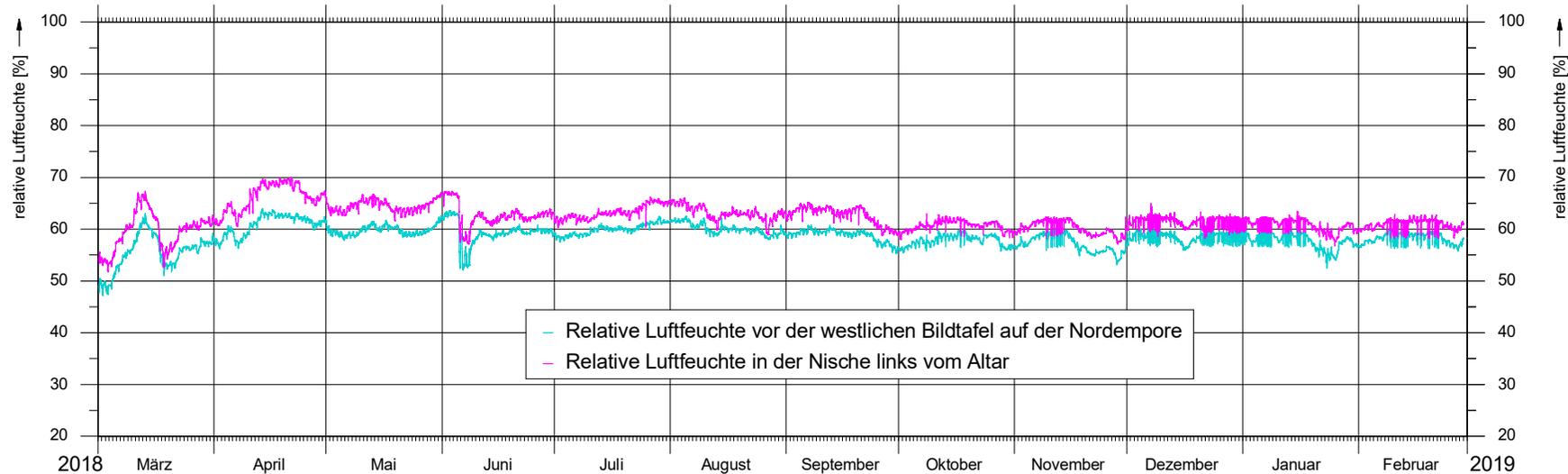


Abbildung A16: Relative Luftfeuchten im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

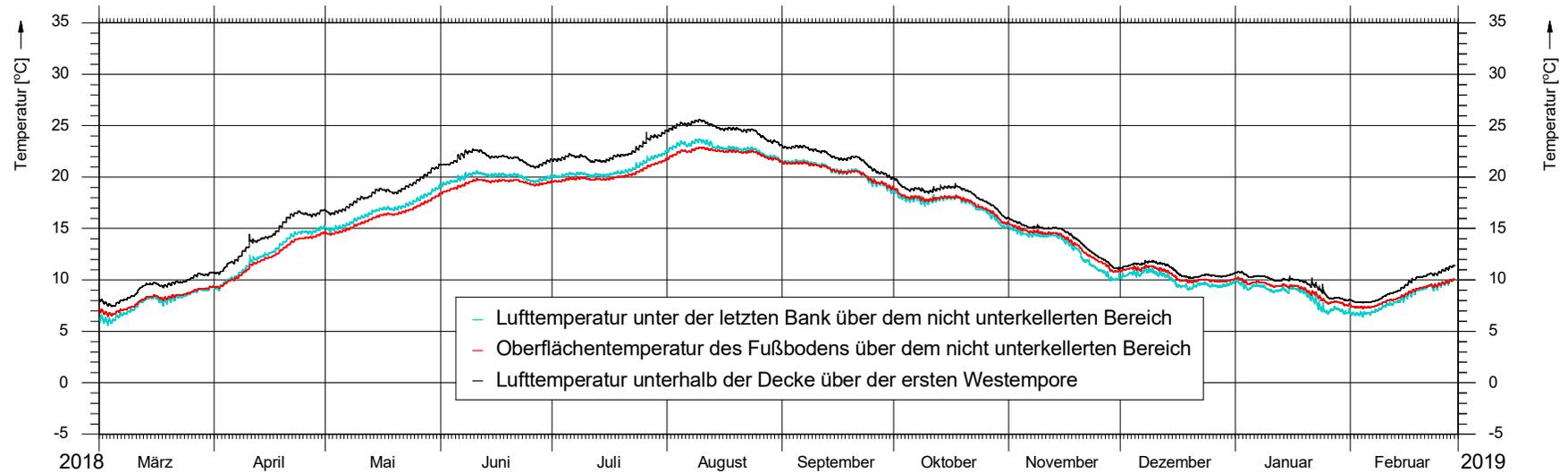


Abbildung A17: Temperaturen unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich) und unter der Decke der ersten Westempore Cella, Schlosskapelle

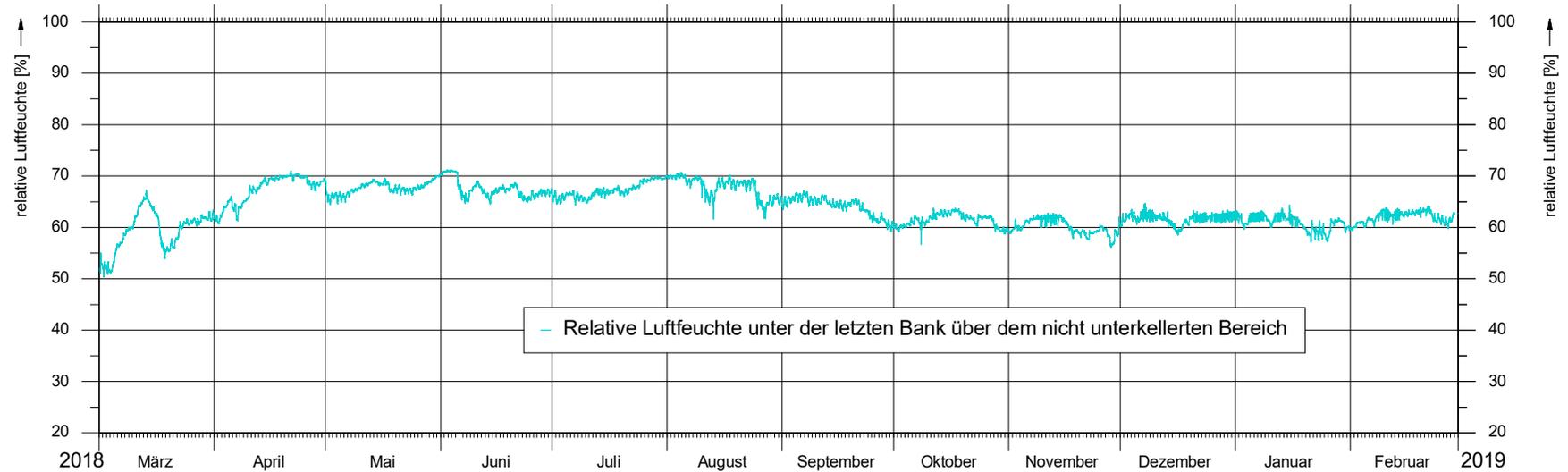


Abbildung A18: Relative Luftfeuchte unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich) Cella, Schlosskapelle

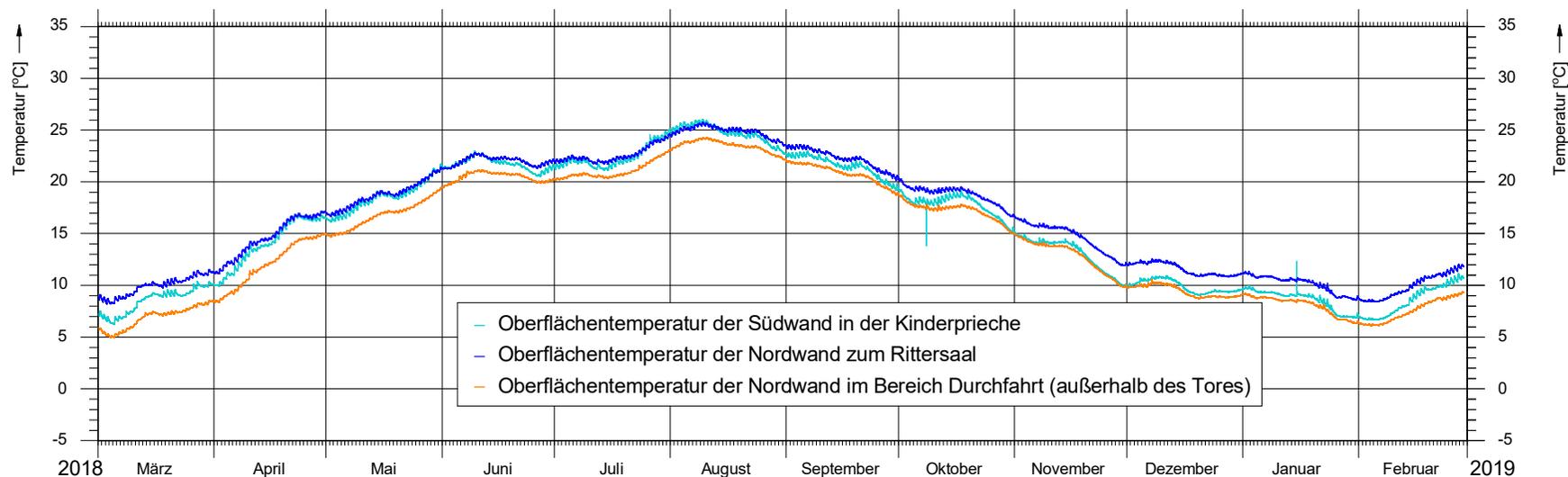


Abbildung A19: Oberflächentemperaturen I

Celle, Schlosskapelle

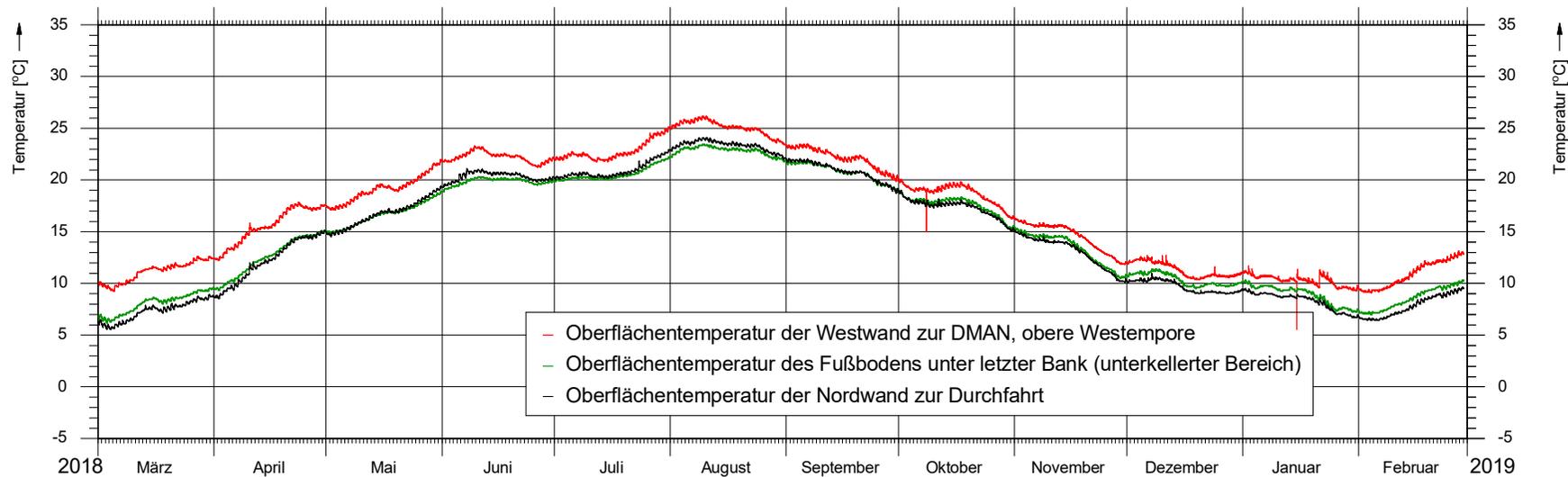


Abbildung A20: Oberflächentemperaturen II

Celle, Schlosskapelle

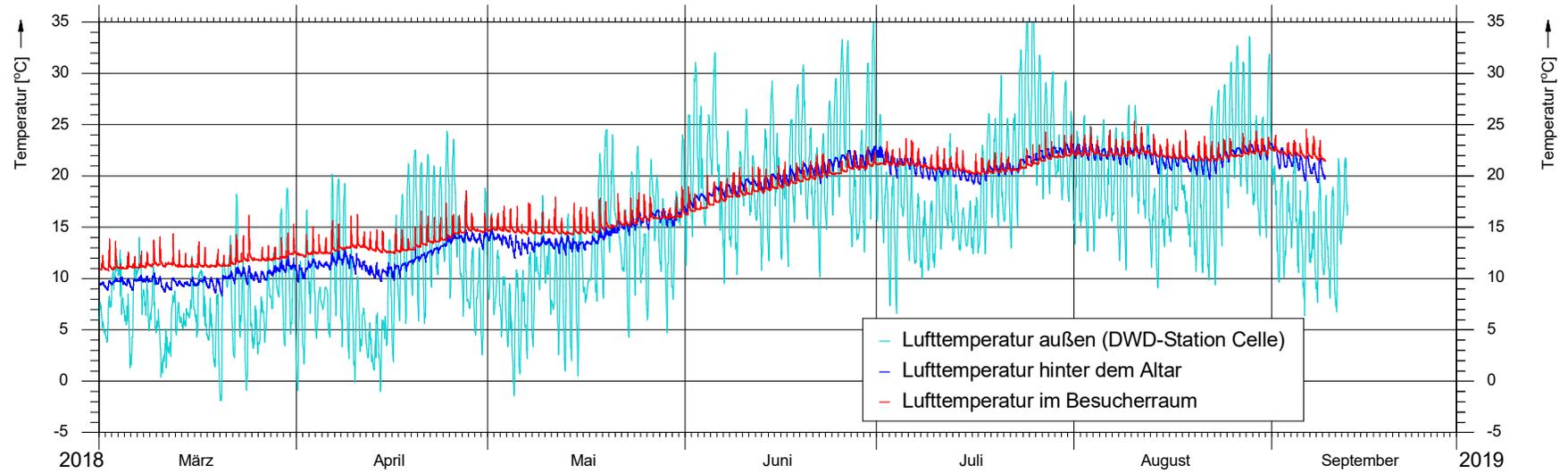


Abbildung A21: Lufttemperaturen außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

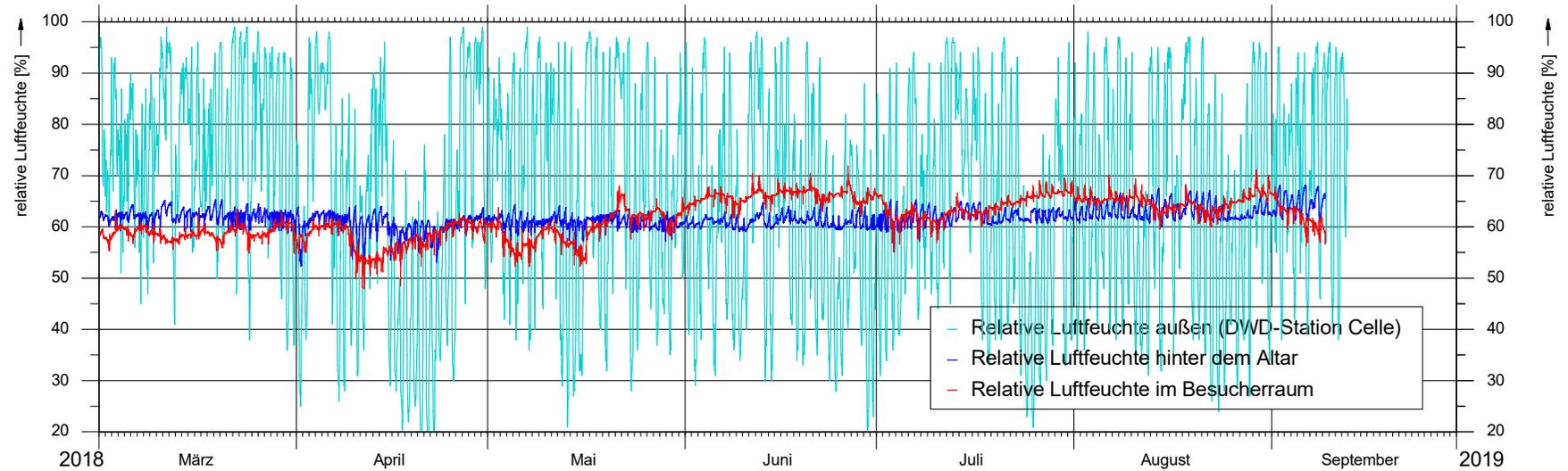


Abbildung A22: Relative Luftfeuchten außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

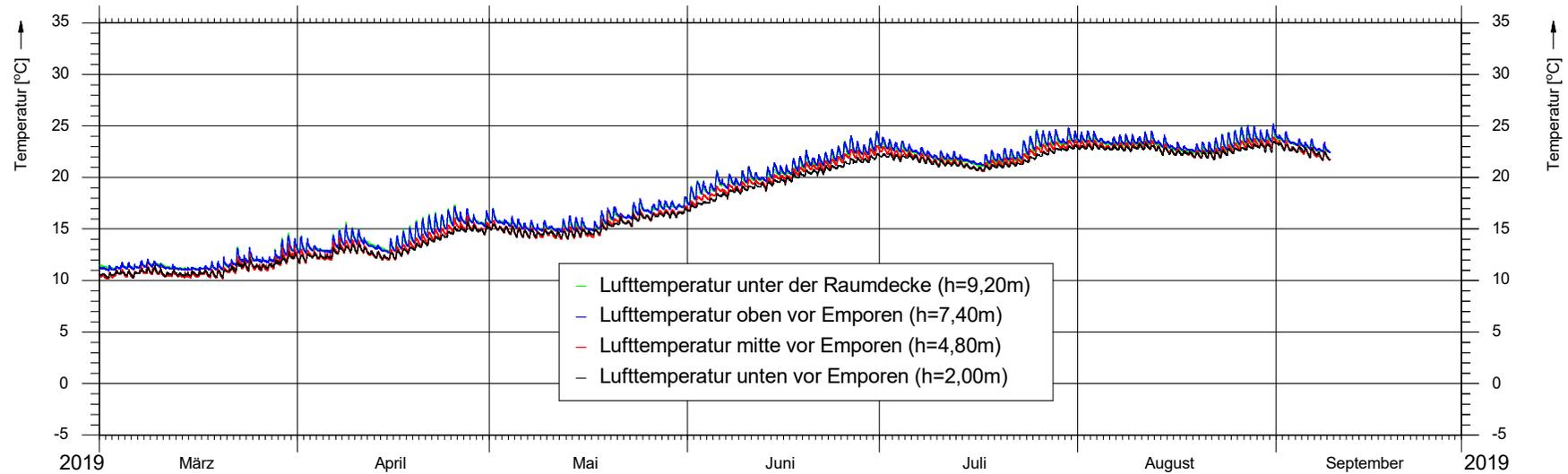


Abbildung A23: Lufttemperaturen - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

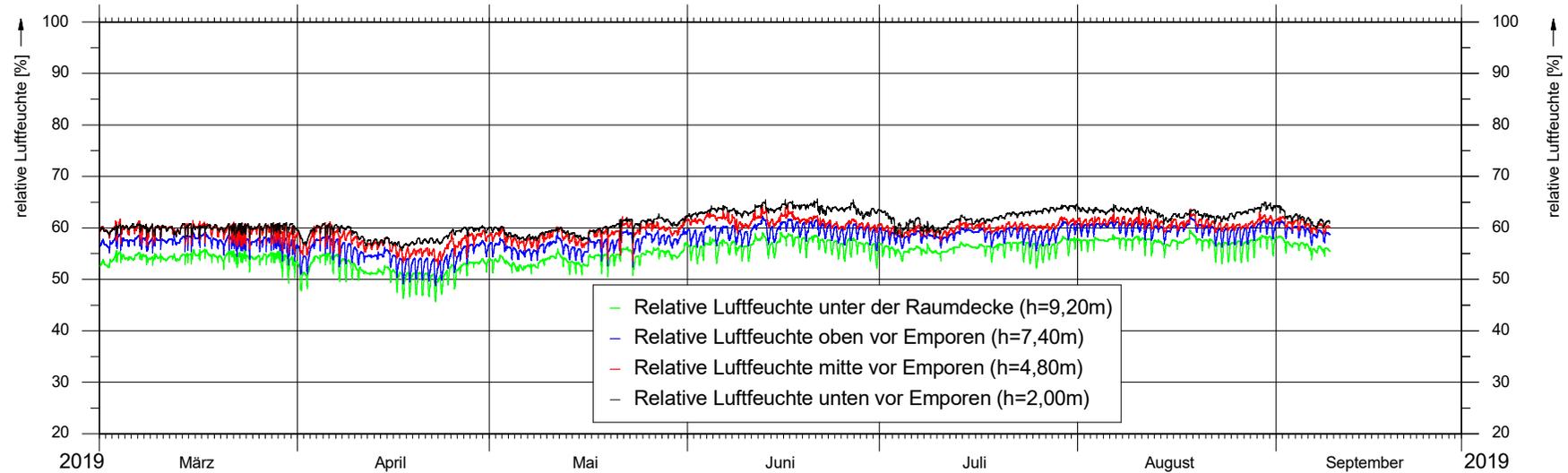


Abbildung A24: Relative Luftfeuchten - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

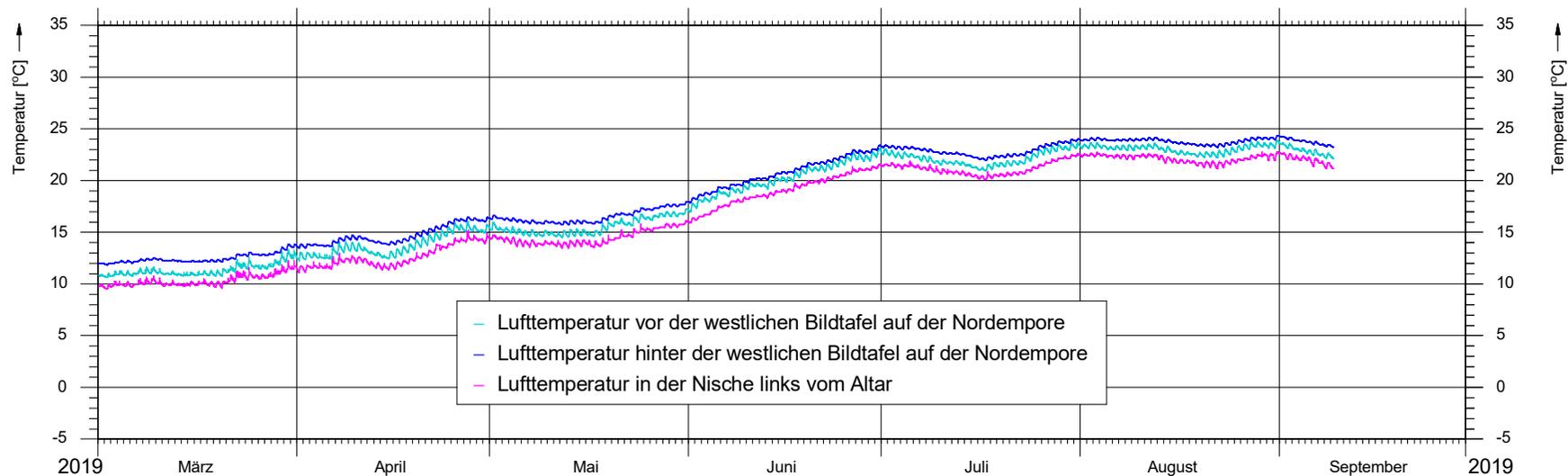


Abbildung A25: Temperaturen im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

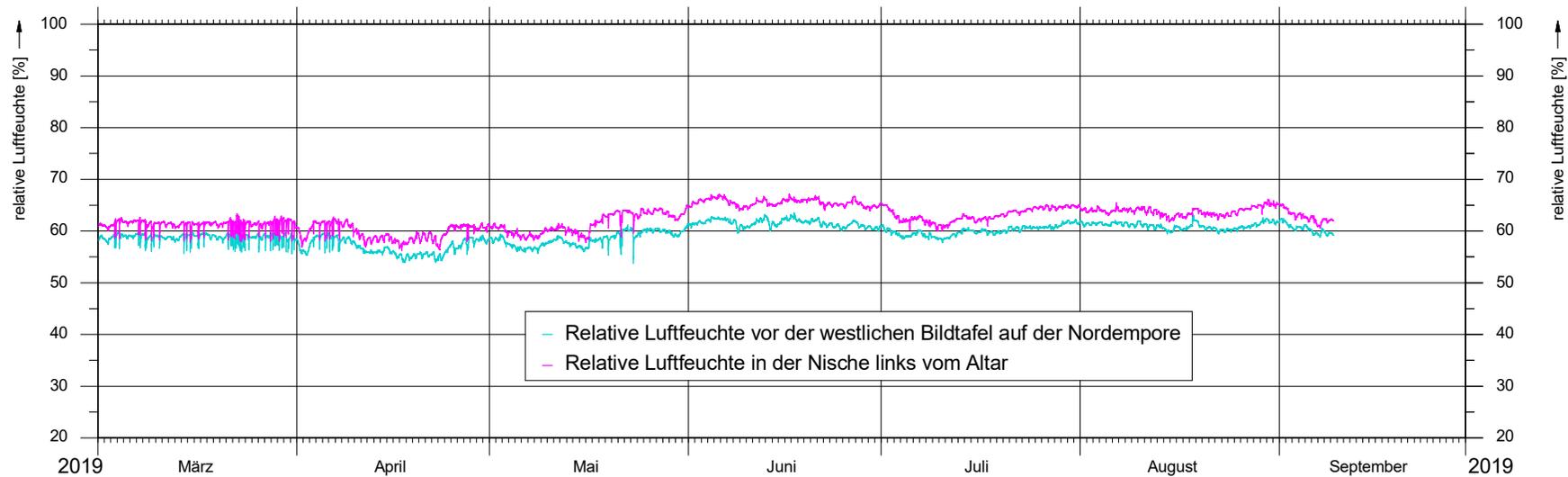


Abbildung A26: Relative Luftfeuchten im Bereich der Bildtafel auf der Nordempore und der Nische links neben dem Altar

Celle, Schlosskapelle

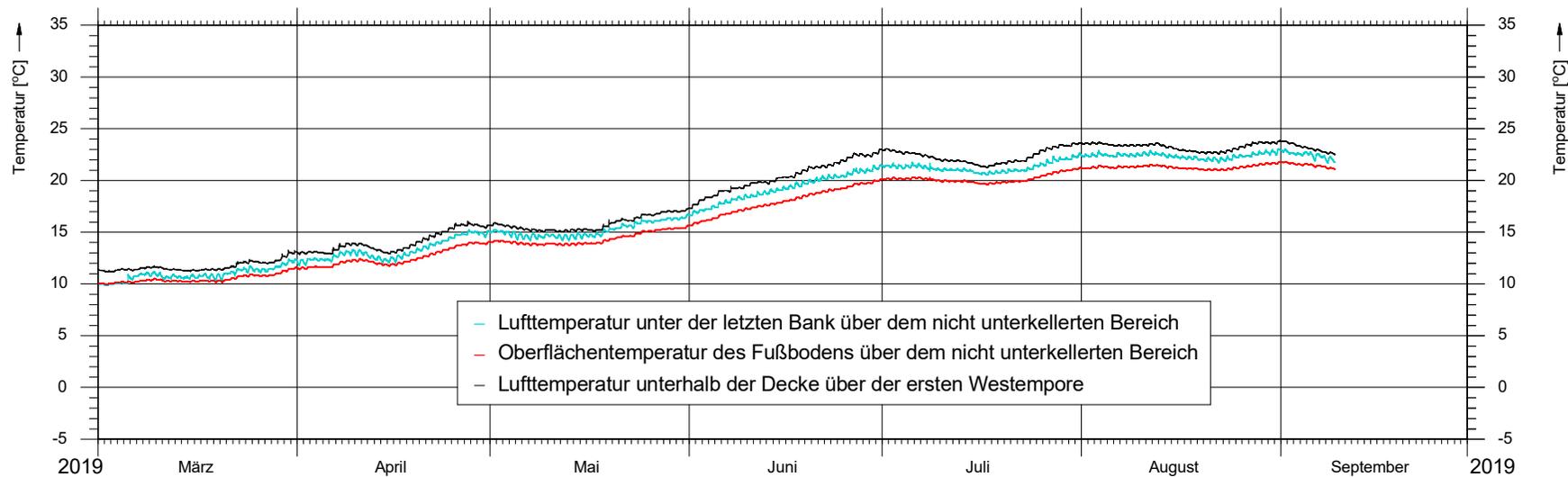


Abbildung A27: Temperaturen unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich) und unter der Decke der ersten Westempore

Celle, Schlosskapelle

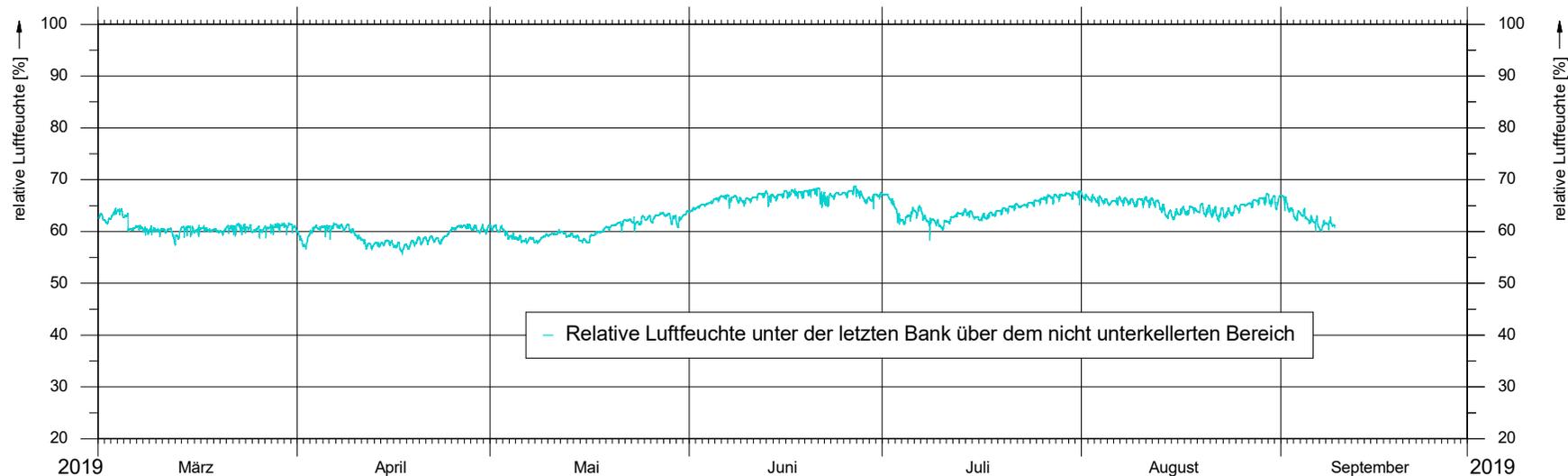


Abbildung A28: Relative Luftfeuchte unter der letzten Bank (nicht unterkellertes Bereich)

Celle, Schlosskapelle

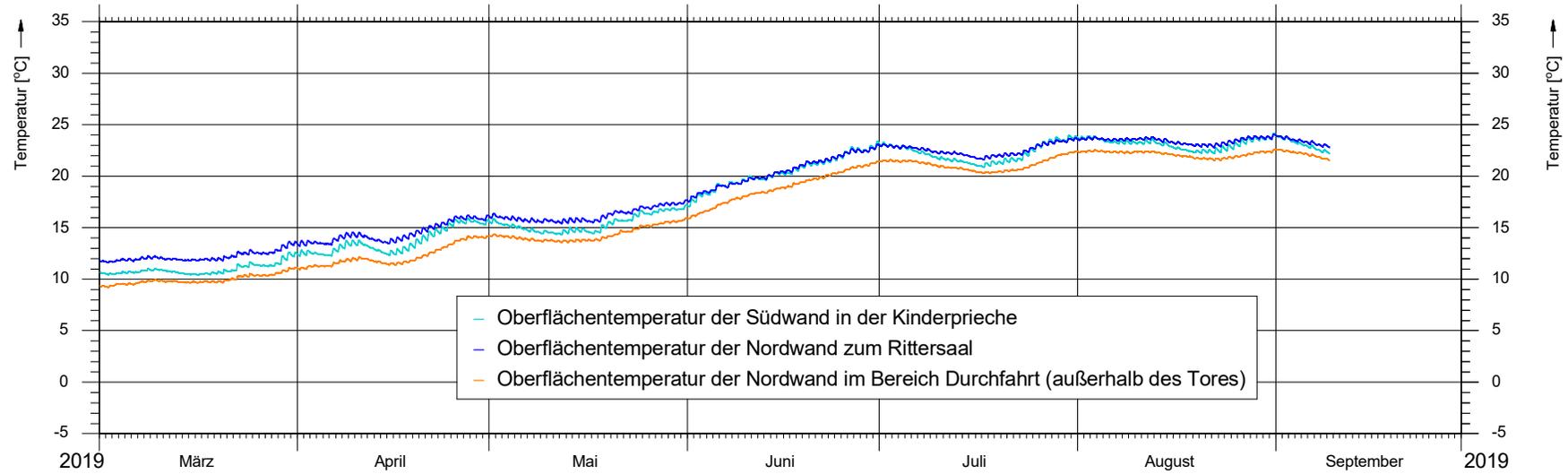


Abbildung A29: Oberflächentemperaturen I

Celle, Schlosskapelle

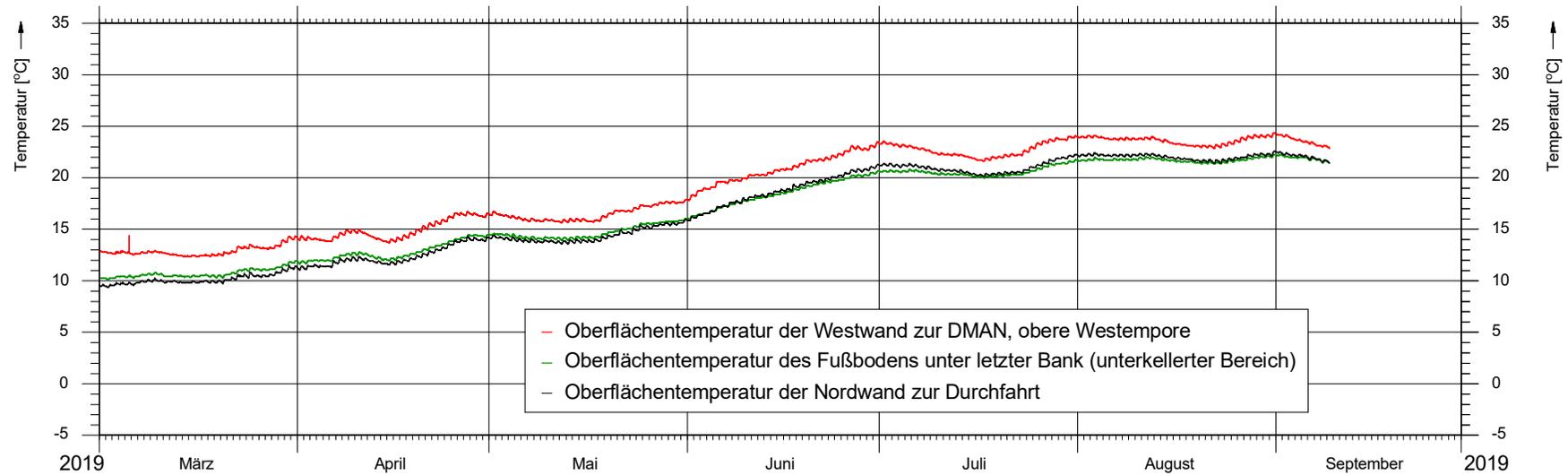


Abbildung A30: Oberflächentemperaturen II

Celle, Schlosskapelle

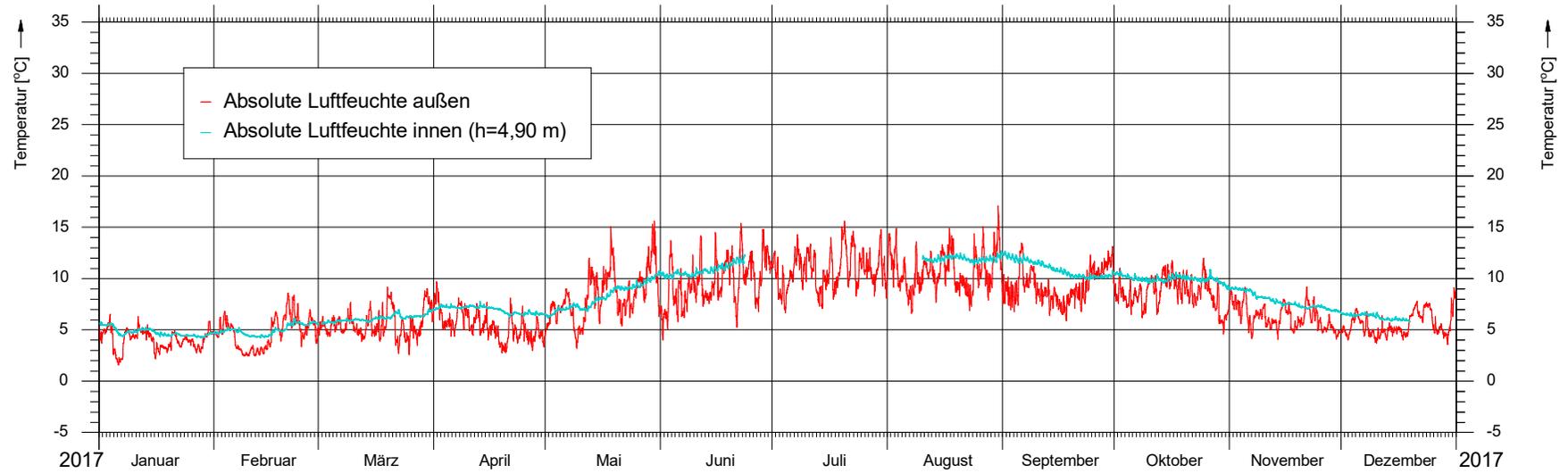


Abbildung A31: Vergleich der absoluten Luftfeuchten außen und innen

Celle, Schlosskapelle

2.5 Strömungssimulation mit einem bauphysikalischen 3D-Rechenmodell

Zaher Ramadan und Harald Garrecht

Zunehmend finden Strömungssimulationen Eingang in die Betrachtung bauphysikalischer Problemstellungen, da sie bei hinreichender Validierung als leistungsfähiges Berechnungsverfahren zur Bewertung komplexer ebener und räumlicher Fragestellungen herangezogen werden können. Die Ergebnisse der Strömungssimulationen erlauben, vielfältige Aussagen zu den von der Raumgeometrie abhängigen physikalischen Verhältnissen wie Temperatur, relative Luftfeuchte, richtungs- und geschwindigkeitsabhängige Luftströmung, Konzentration von Gasen etc. vornehmen zu können. Daher geben die Berechnungsergebnisse von sogenannten CFD-Strömungssimulationen¹⁰ gerade bei der Bewertung raumklimatischer Problemstellungen, wie sie im Modellprojekt Schlosskapelle analysiert werden, wichtige raum aufgelöste Informationen zu den thermischen und hygrischen Verhältnissen innerhalb des Betrachtungsraumes. Im Kontext der vielfältigen Fragen der vom Raumklima abhängigen Beanspruchung wertvoller Fassungsflächen bietet die CFD-Simulation die Möglichkeit, die im unmittelbaren Umfeld historischer Oberflächen der baugebundenen und beweglichen Ausstattung vorherrschenden Mikroklimaverhältnisse zu analysieren. Auf diese Weise lassen sich Bewertungen im Sinne der präventiven Konservierung vornehmen, wie es nachfolgend am Beispiel der Anlagentechnik im Modellprojekt zur Verbesserung der Raumluftverhältnisse aufgezeigt werden soll.

2.5.1 Verwendete Software

Für die Simulationsstudien wurde das Softwarepaket STAR-CCM+ von der Firma Siemens eingesetzt. STAR-CCM+ ist eine CAE-Software¹¹ zur Lösung multidisziplinärer Probleme in der Strömungs- und Festkörper-Kontinuumsmechanik, die eine integrierte Benutzeroberfläche bereitstellt. Das Preprocessing von STAR-CCM+ erlaubt freie Geometrien zu erstellen oder diese aus anderen CAD- und Grafikprogrammen zu importieren, den eigentlichen Berechnungsprozess der Strömungssimulation durchzuführen und die aufbereiteten Ergebnisse dann mittels Postprocessing zu visualisieren.

Die Software nutzt für das Preprocessing ein FE-Modul¹², mit dem die 3D-Geometrie der inneren Raumschale abgebildet und das innere Raumvolumen in viele kleine sog. Volumenzellen unterteilt wird. In den späteren Simulationen werden in diesen Zellen die zur Lösung angesetzten Differentialgleichungen gelöst. Die Zellengröße wird dabei so gewählt, dass diese in den physikalisch und mathematisch für die Lösungsfindung kritischen Bereichen kleiner gewählt werden als in den Bereichen, in den infolge vergleichsweise gleichbleibenden Strömungsverhältnissen keine großen Veränderungen eintreten. Entsprechend lässt sich für das gesamte Volumenmodell des abgebildeten Raumbereichs die Anzahl der Zellen optimieren. Dieses Vorgehen ermöglicht, die Rechenzeit bzw. den Rechenaufwand zu minimieren, schließlich ist die Rechenzeit proportional zur Zellenzahl. Im Solver werden die Lösungsparameter zwischen den Zellen ausgetauscht. Bei der Lösungsfindung wird für jeden Zeitschritt eine vorgegebene Iterationszahl die Lösung stufenweise verbessert, in dem für jeden Iterationsschritt sämtliche Gleichungen, so je nach voreingestelltem physikalischen Modell die Bernoulli- und Navier-Stokes-Gleichungen, mit speziellen näherungsweise Algorithmen zeitschrittweise gelöst werden.

¹⁰ CFD ist die Abkürzung für Computational Fluid Dynamics; vgl. Klein, M. und Garrecht, H (2010); D'Agostino, D. und Maria Congedo, P. 2014.

¹¹ CAE steht für Computational Aided Engineering.

¹² FE steht für Finite Elemente.

Die im DBU-Vorhaben für die Schlosskapelle in Celle durchgeführten Simulationen beruhen auf der Anwendung des k - ε -Turbulenzmodells. In diesem wird die Entwicklung der turbulenten kinetischen Energie k und der isotropen Dissipationsrate ε beschrieben, um die Reynolds-gemittelten Navier-Stokes-Gleichungen zu lösen.

2.5.2 Erstellen des 3D-Raummodells

Um Analysen zu den Raumlufthverhältnissen mittels CFD-Simulationen vornehmen zu können, musste in einem ersten Schritt der Betrachtungsraum, also der Innenraum der Schlosskapelle, mit all seiner baugebundenen und beweglichen Ausstattung in einem realitätsgetreuen Geometriemodell abgebildet werden. Für die Celler Schlosskapelle konnten die hierfür erforderlichen Rohdaten von der Hochschule Hannover übernommen werden.¹³ Die Daten, die nach der Formatänderung in die Simulationsumgebung STAR-CCM+ importiert wurden, beinhalten unverbundene Flächen, die die innere Hüllfläche der Schlosskapelle abbilden. Um hieraus ein 3D-Modell zu generieren, mussten die Hüllflächen zunächst vereinfacht, untereinander verbunden und dann elementweise geschlossen werden. Die Vereinfachung der Geometrie des komplexen 3D-Modells ist von großer Bedeutung, um Strömungssimulationen in angemessener Berechnungsdauer mit leistungsfähigen Rechnersystemen erfolgreich mit einer Lösungsfindung durchführen zu können. Zum einen wird mit der Modellvereinfachung die Zellenzahl verringert und damit die Rechenzeit deutlich reduziert. Zum anderen können Vernetzungsprobleme vermieden werden, die sich insbesondere bei kleinen Zellgeometrien bei der präzisen Abbildung von Bauteil-Details einstellen können. Zur Modellvereinfachung werden z. B. die Flächenelemente bzw. Bauteile, die die Luftströmung und die thermische Übertragung nicht bzw. minimal beeinflussen, vereinfacht abgebildet oder sogar teilweise aus dem Modell entfernt. Dies trifft z.B. auf Deckenlampen, Fensternuster, Geländer und Wanddekorationen zu. Abb. 2.5-01 vermittelt einen Eindruck von der aufwändigen Arbeit, die anspruchsvollen 3D-Geometrien eines komplexen Raumes wie der Schlosskapelle in Celle abzubilden. Nach erfolgreicher Vernetzung konnte für die Schlosskapelle ein 3D-Geometriemodell mit insgesamt 5,8 Millionen Volumenzellen fertiggestellt werden.

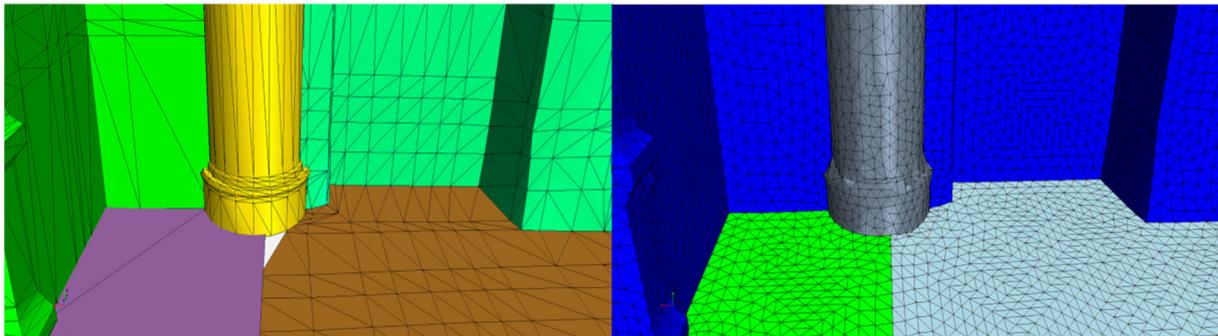


Abb. 2.5-01: Erstellen des Modells; Verbindung und Vernetzung der Flächen

Nach der Modellbildung müssen dem CFD-Programm alle Randbedingungen und alle relevanten Materialkenngrößen und alle weiteren für die Durchführung der Berechnungen erforderlichen Parameter, Kenngrößen und Funktionen übergeben werden. Erst dann ist es möglich, die numerischen Berechnungen zu den sich im Raum einstellenden Strömungen und zur Ermittlung der sich durch die Raumlufthströmungen, Strahlungsaustauschvorgänge etc. einstellenden Raumlufthzustände durchzuführen. Entsprechend bedarf es zunächst, die für die relevanten Materialkenngrößen zu ermitteln und über das Eingabedatendeck der Simulation bereitzustellen.

¹³ Die 3D-Laserscan-Raumgeometriemodell-daten wurden 2014 unter Leitung von Herrn Prof. Fischmann in der Hochschule Hannover in Kooperation mit der Stadt Celle und dem NLD Hannover erstellt.

Auch müssen alle strömungstechnisch maßgebenden thermischen und hygri-schen Systemrandbedingungen ermittelt und dem Programm übergeben werden. Da im Modell der Betrachtungsraum von den inneren Hüllflächen der Schlosskapelle begrenzt wird, müssen die Eigenschaften der festen Hüllflächenbauteile, als sogenannte „Solids“ in Form von Wänden, von gewölbten Deckenelementen und von Bodenbereichen mit ihren jeweils spezifischen Eigenschaftendefiniert werden. Anstelle der Eingabe aller thermischen und stofflichen Parameter reicht es auch aus, die sich abhängig der jeweiligen Bauteileigenschaften einstellenden Wärmeflüsse als thermische Randbedingung zu benennen. Hierzu müssen zunächst die U-Werte¹⁴ aller Hüllflächenbauteile und die raumseitig an den Bauteiloberflächen vorherrschenden Oberflächentemperaturen ermittelt werden.¹⁵

Damit sich die Hüllflächen des Modells entsprechend der raumumschließenden Bauteile realistisch abbilden lassen, mussten die gesamte Hüllfläche in kleinere definierte Bereiche unterteilt werden. Dabei unterscheiden sich die verschiedenen Wände, Decken und Böden sowohl in ihrer jeweiligen geometrischen Bauteilzusammensetzung wie auch hinsichtlich der sich im Bauteil befindlichen Materialien. Abb. 2.5-02 stellt die verschiedenen „Randbedingungen (Boundaries)“ der Hüllflächenbauteile der Celler Schlosskapelle dar.

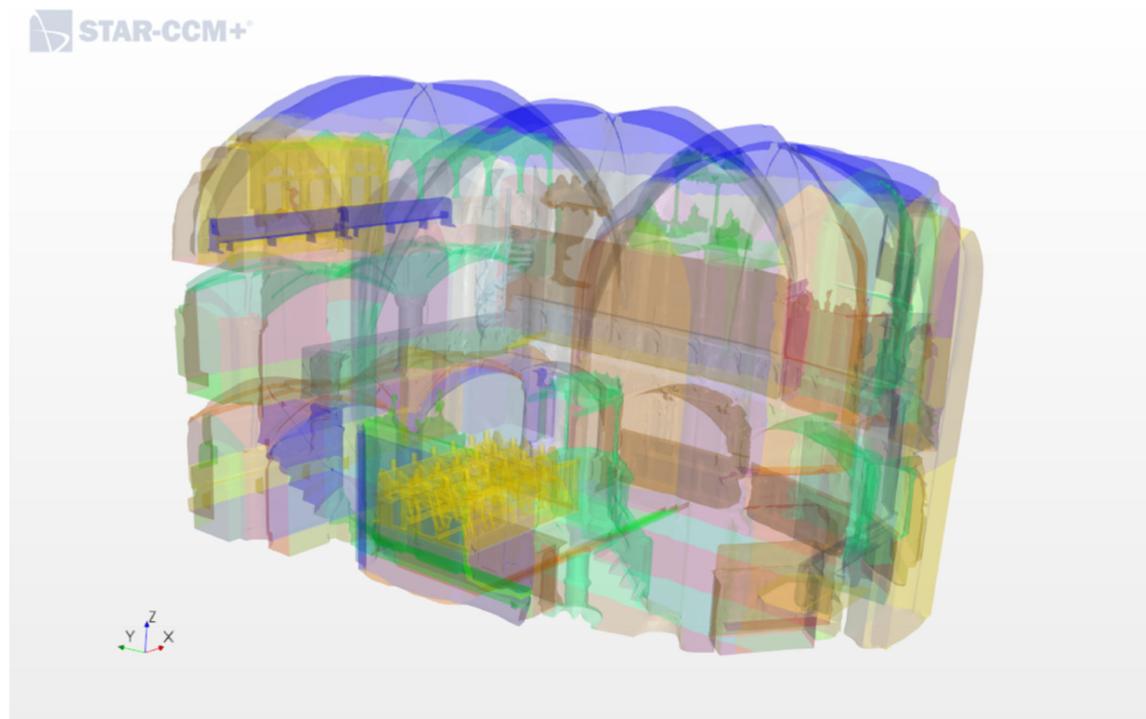


Abb. 2.5-02: Visualisierung des 3D-Modell der Schlosskapelle mit Darstellung der Hüllfläche

So ist z.B. der Boden in mehrere Segmente unterteilt. Grund dafür ist, dass der Zwischenboden zwischen Kapelle und Keller verschiedene Dicken hat, also unterschiedliche Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Werte) aufweist. Zudem ist nahezu ein Drittel des Bodens der Schlosskapelle nicht unterkellert. Entsprechend der unterschiedlichen U-Werte alleine am Beispiel des Bodens der Schlosskapelle müssen in der Modellbildung verschiedene Bodenbereiche gewählt werden, um dem unterschiedlichen Verhalten der Bereiche Rechnung zu

¹⁴ U-Wert: Der Wärmedurchgangskoeffizient U ist ein wichtiger bauphysikalischer Kennwert. Der U-Wert ist materialspezifisch. Maßgebend sind im Wesentlichen die Wärmeleitfähigkeit und die Dicke des Materials sowie die Wärmestrahlung und Konvektion an den Oberflächen.

¹⁵ Die für das Schlosskapellen-Modell verwendeten Werte stammen von Herrn Dr.-Ing. Berling, wobei die Oberflächentemperaturen gemessen und die U-Werte berechnet wurden.

tragen. Das gleiche gilt für die Wände. Neben den Wänden der Außenschale finden sich in der Schlosskapelle auch teilweise Innenwände, die auch unterschiedliche Dicken besitzen. Hier muss berücksichtigt werden, dass die angrenzenden Räume im Winter teilweise geheizt werden. Demgegenüber ist die Decke bzw. das Gewölbe der Kapelle in zwei Hauptbereiche unterteilt. Einen Randbereich und einen Mittenbereich. Da die Decke aus einem Gewölbe besteht, findet sich im Randbereich eine Zwischenschicht bzw. ein luftgefüllter Hohlraum. Diese Luftschicht ist im Mittenbereich nicht gegeben. Da die Luftschicht den Wärmestrom zwischen den oberhalb und unterhalb der Decke gelegenen Räumen maßgeblich beeinflusst, muss der Randbereich gesondert betrachtet werden.

In den CFD-Strömungssimulationen wurden die hygrischen Eigenschaften der verschiedenen Bauteile nicht berücksichtigt. Schließlich sind die vorherrschenden relativen Feuchten der Raumluft bei der Durchführung von Strömungssimulationen verzichtbar.¹⁶ Allerdings wurden im Modell die Solarstrahlungseffekte berücksichtigt, indem der mit der Besonnung der Bauteiloberflächen einhergehende solare Wärmeeintrag abhängig der Strahlungseigenschaften der Bauteiloberflächen rechnerisch analysiert wurde. Für das Strahlungsmodul von STAR-CCM+ ist die Angabe der baustoff- und bauteilbezogenen Emissions- und Transmissionsgrade besonders wichtig, schließlich werden die Reflexionsgrade automatisch aus den Emissions- und Transmissionsgraden ermittelt. Das Azimut (die Ausrichtung) der Kapelle wurde im Modell entsprechend angepasst. Mit Hilfe der in Celle beobachteten Klimadaten¹⁷ konnten die durchschnittlichen direkten und diffusen Strahlungsintensitäten für die Winter- und Sommerperiode ermittelt werden und in der CFD-Strömungssimulationssoftware eingegeben werden. Diese Werte sind abhängig vom Jahrestag sowie vom Sonnenscheinfaktor. Beide Werte können abhängig des gewünschten Simulationstags angepasst werden. Dabei kann die Software die erforderlichen Daten für die Solarstrahlung wie auch für die Sonnenposition, die Auf- und Untergangzeitpunkte- abhängig der angegebenen Breiten- und Längengrade bestimmt werden.

Entsprechend den Messergebnissen des Ingenieurbüros Dr. Berling beträgt die Luftwechselrate der Kapelle – bei geschlossenen, nicht abgedichteten Fenstern und Türen – circa 0,12/Stunde. Die mit dem Luftwechsel einhergehende Infiltration wurde im Berechnungsmodell mit einem kleinen Spalt zwischen den Öffnungen an der Hüllfläche „Wand“ durch die Fenster und Türen und den Wänden betrachtet. Entsprechend wurde die Zielluftwechselrate mit diesen Öffnungen analysiert.

2.5.3 Stationäre Betrachtung

Nach der Validierung des Geometriemodells wurden erste Simulationen für eine real gemessene Klimasituation in der Schlosskapelle durchgeführt. Zur Vereinfachung wurden die Berechnungen für den stationären Betrachtungsfall durchgeführt. Als Betrachtungszeitraum wurde ein kalter Wintertag gewählt: 14. Dezember 2017 um 13:00 Uhr. Zu diesem Zeitpunkt herrschte eine stabile Wetterlage mit 4 °C Außentemperatur und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 80 % vor. Abb. 2.5-03 verdeutlicht, dass die mittels CFD-Simulation berechneten Temperaturen und relativen Feuchten der Raumluft sehr gut mit den Messdaten übereinstimmen. Die Abweichungen betragen für die Temperatur etwa 0,2 K und für die relative Luftfeuchte etwa 3 %. Mit der Kurzbezeichnung „OF“ handelt es sich um eine Oberflächenmessstelle.

Da die relative Luftfeuchte der Raumluft von der jeweiligen Temperatur bei einem gegebenen Feuchtegehalt der Luft abhängt, lassen sich Abweichungen zwischen der gemessenen und gerechneten relativen Luftfeuchte immer dann gegeben, wenn sich Temperaturveränderung einstellen. In den Untersuchungen des DBU-Vorhabens konnte festgestellt werden, dass der Bereich hinter dem Altar im Modell größer als der reale Bereich ist. Dies erklärt, weshalb in der

¹⁶ Die Berücksichtigung der hygrischen Eigenschaften hätte außerdem eine erhebliche Verlängerung der Rechenzeit verursacht.

¹⁷ Die Daten wurden von ASHRAE IWEC 2 der Firma EQUA übernommen.

Modellbetrachtung der Einfluss des Bodens und der Außenwand groß ist. Zudem lassen sich so die kühleren gerechneten Temperaturen an Messstelle 3 erklären. Die Abweichung bei Messstelle 14 (Besucherraum) ist drauf zurückzuführen, dass in diesem Messzeitraum ein Entfeuchtungsgerät im Besucherraum im Einsatz war. Dieses Gerät war nicht für die neue Bewertung der Situation in der Kapelle vorgesehen, da das Gerät aus dem Betrieb genommen werden soll. Entsprechend wurde für die weiteren Überlegungen das Gerät im Modell nicht integriert. Das Gerät gibt eine gewisse Wärme an ihre Umgebung (Besucherraum) ab, die im Modell nicht berücksichtigt wurde.

Um das Modell auch unter anderen Klimarandbedingungen zu erproben und zu validieren, wurde ein anderer Betrachtungszeitpunkt im Sommer ausgewählt: 10. Juni 2017 um 16:00 Uhr. In diesem Zeitraum herrschten im Freien eine Außentemperatur von 21,5 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 41 % r.F. vor. Der Vergleich zwischen gerechnetem und den an dem Zeitpunkt gemessenen Daten ist in Abb. 2.5-04 dargestellt. Wie im Winterfall stimmen die gerechneten und gemessenen Werte von Temperatur, relativer Feuchte und Luftgeschwindigkeit weitgehend überein. Die etwas größeren Abweichungen der Messstellen 3 und 14 lassen sich auf die vorgenannten Gründe zurückführen.

2.5.4 CFD-Simulation unter instationärer Betrachtung

Instationäre Berechnungen werden vorgenommen, um die mit der Zeit veränderlichen Randbedingungen zu berücksichtigen. Als Beispiel soll der Einfluss von Besuchern auf das Raumklima in der Kapelle im Weiteren gezeigt werden. Aber auch Analysen, ob geplante und entsprechend ausgelegte Be- und Entfeuchtungsanlagen ihre gewünschte Wirkung entfalten, lässt sich mit instationären Betrachtungen analysieren und überprüfen.¹⁸ Entscheidend für die Simulation ist der Strömungsverlauf, der mithilfe von Stromlinien visualisiert werden kann. Um ein Beispiel zur Überprüfung der Leistungsfähigkeit und daraus resultierender Wirkung von Be- und Entfeuchtungsanlagen zu zeigen, wird die Entfeuchtungsfunktion einer Lüftungsanlage nachfolgend vorgestellt.

2.5.4.1 Einfluss von Besucher auf das Raumklima der Schlosskapelle

Jeder Mensch gibt eine bestimmte Menge an Wärme und Feuchte an seine Umgebung ab. Die Wärme resultiert zum einen aus dem Überschuss körperlicher Verbrennungsprozesse (Lebensfunktionen) und zum anderen aus der aktuellen Schwere der Tätigkeit einer Person (kinetische Energie). Zur Vermeidung einer deutlichen Aufwärmung des menschlichen Körpers, die gesundheitliche Folgen für den Menschen hätte, lässt der Körper mit seinem Temperaturregelsystem überschüssige Wärme auf dem Weg der Konvektion, Leitung und Strahlung an seine Umgebung abfließen. Die abgegebene Wärme wird als trockene Wärme bezeichnet. Der menschliche Körper gibt jedoch auch feuchte Wärme ab, die durch Atmung und durch Verdunstung von Wasser an der Hautoberfläche infolge von Verdunstungsenthalpie, also Wärme die zur Verdunstung von Wasser aufzubringen ist, freigesetzt wird.

¹⁸ Vgl. Nadler 2005; Kosak et al. 2014; Flieger et al. 2014.

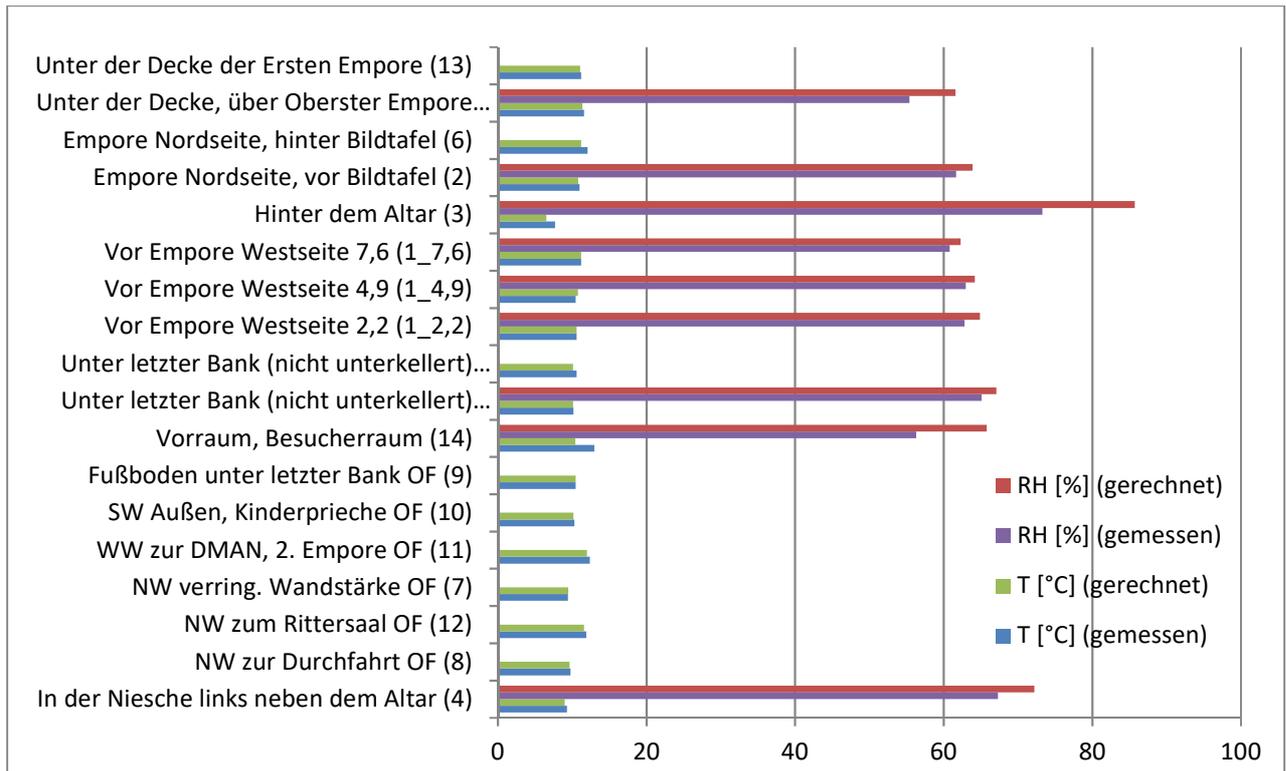


Abb. 2.5-03: Vergleich der gemessenen und der berechneten Werte von Temperatur und relativer Feuchte für winterliche Verhältnisse

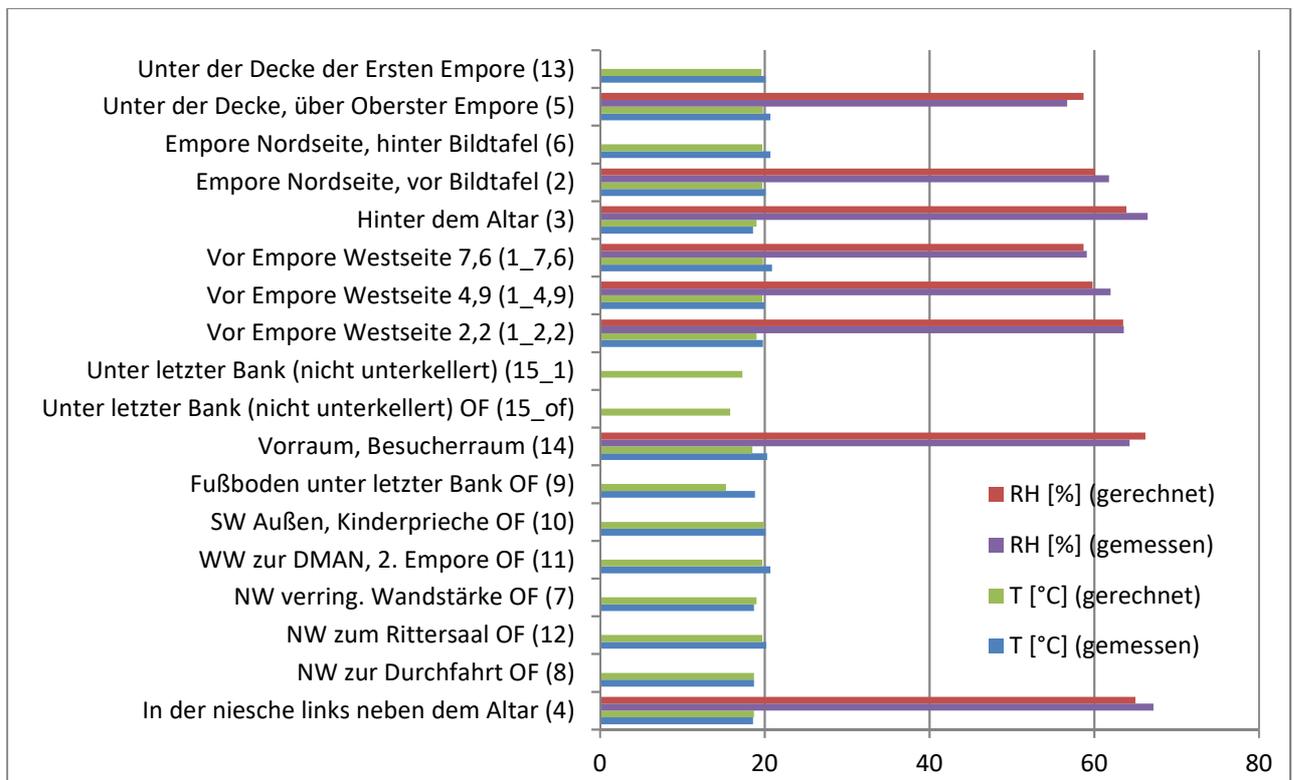


Abb. 2.5-04: Vergleich der gemessenen und berechneten Werte von Temperatur und relativer Feuchte der Raumluft für sommerliche Verhältnisse

Mit der Abgabe von feuchter Wärme werden Wasserdampfmoleküle vom Menschen an die umgebene Raumluft abgegeben. Die Wasserdampfabgabe des Menschen ist folglich als Quelle der Zunahme der Wasserdampfmenge in der Raumluft zu sehen. Die relative Feuchte der Raumluft im Umfeld des Menschen steigt somit an und die hinzugekommenen Wasserdampfmoleküle verteilen sich im Raum.

Sowohl die vom Menschen stetig abgegebene „Trockenwärme“ wie auch die „Feuchtwärme“ hängen vom Aktivitätsgrad des Menschen und von den klimatischen Bedingungen in seiner Umgebung ab (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit). Der Aktivitätsgrad ist ein Maß für den Energieumsatz des Menschen. So zeigt Tabelle 2.5-01 die Energieumsätze eines Menschen abhängig seiner Aktivität. Die in der Tabelle angeführte „met“-Einheit bezieht sich auf „metabolic rate“ (metabolische Einheit) und nimmt einen Wert von 85 W/m² an. In der VDI 2078 wird die abgegebene feuchte und trockene Wärme in Abhängigkeit der Raumtemperatur und Aktivitätsgrad mit den in Tabelle 2.5-02 aufgezeigten Werte untergliedert.

Der Aktivitätsgrad der Besucher der Schlosskapelle dürfte vornehmlich dem ersten ggf. dem zweiten Grad an körperlicher Arbeit entsprechen (laufen bzw. sitzend ist zwischen keiner bis leichter aktiver Tätigkeit zuzuordnen). Daher wird in den folgenden Simulationen angenommen, dass jeder Besucher 35 g Wasser und 120 W Wärme pro Stunde abgibt (diese Werte wurden für Temperaturwerte in der Kapelle von 20 °C angesetzt). Die Wärme, die von Besuchern abgegeben wird, führt zu einem Anstieg der Raumlufttemperatur. Zudem lässt die von den Personen abgegebene Feuchte die relative Luftfeuchtigkeit der Raumluft in der Kapelle zunehmen.

Körperliche Tätigkeit	Energieumsatz		
	W/m ²	met	W (Für eine 1,8 m ² Menschenoberfläche)
Angelehnt	46	0,8	83
Sitzend, entspannt	58	1,0	104
Sitzende Tätigkeit	70	1,2	126
Stehende, leichte Tätigkeit (Einkaufen, Labor, leichte Industriearbeit)	93	1,6	167
Stehende, mittelschwere Tätigkeit (Verkaufstätigkeit, Hausarbeit, Maschinenbedienung)	116	2,0	209
Gehen auf der Ebene:			
2 km/h	110	1,9	198
3 km/h	140	2,4	252
4 km/h	165	2,8	297
5 km/h	200	3,4	360

Tabelle 2.5-01: Energieumsätze des Menschen nach DIN EN ISO 7730:2003¹⁹

¹⁹ A. Dental und U. Dietrich, Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden, Dokumentation Primero-Komfort, 2006.

Tätigkeit	Wärmeabgabe	Raumlufthtemperatur						
		18	20	22	23	24	25	26
Körperlich nicht tätig bis leichte Arbeit im Stehen (Aktivitätsgrad I und II nach DIN 1946-2)	Gesamt [W]	125	120	120	120	115	115	115
	Trocken [W]	100	95	90	85	75	75	70
	Feucht [W]	25	25	30	35	40	40	45
	Wasserdampfabgabe [g/h]	35	35	40	50	60	60	65
Mäßig schwere nach körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad III nach DIN 1946-2)	Gesamt [W]	190	190	190	190	190	190	190
	Trocken [W]	125	115	105	100	95	90	85
	Feucht [W]	65	75	85	90	95	100	105
	Wasserdampfabgabe [g/h]	95	110	125	135	140	145	150
Schwere körperliche Tätigkeit (Aktivitätsgrad IV nach DIN 1946-2)	Gesamt [W]	270	270	270	270	270	270	270
	Trocken [W]	155	140	120	115	110	105	95
	Feucht [W]	115	130	150	155	160	165	175
	Wasserdampfabgabe [g/h]	165	185	215	225	230	240	250

Tabelle 2.5-02: Wärmeabgabe des Menschen in Abhängigkeit von der Raumlufthtemperatur und des Aktivitätsgrads nach VDI 2078²⁰

Dadurch, dass wärmere Luft mehr Wassermoleküle aufnehmen kann, führt die Anwesenheit von Besuchern in der Kapelle zunächst zu keinem Anstieg der relativen Luftfeuchtigkeit im Raum. Schließlich nimmt mit der abgegebenen Wärme der Besucher die Raumlufthtemperatur zu. Erst wenn die Besucher die Kapelle verlassen und die Temperatur der Raumlufthtemperatur in der Kapelle wieder in Richtung Ausgangstemperatur abfällt, steigt die relative Luftfeuchtigkeit in der Kapelle an. Dieser physikalisch beschreibbare Verlauf des Einflusses von Menschen auf die relative Luftfeuchte im Raum konnte auch anhand der durchgeführten Messreihen und den dabei erfassten Raumklimadaten belegt werden. Um diesen Effekt messtechnisch zu untersuchen hat das Niedersächsische Landesamt für Denkmalpflege NLD gezielte Raumnutzungen initiiert und die dabei erfassten Einflüsse der Nutzung der Schlosskapelle durch Besucher in einer Nutzungserprobungstabelle dokumentiert. In der Dokumentation sind sämtliche Informationen der spezifischen Nutzungserprobung wie Datum, Klimadaten (außen und innen), Nutzungsformat, Personenzahl und Aufenthaltsdauer schriftlich festgehalten.

2.5.4.2 Durchführung der Simulationen

Als Beispiel soll nun die Wirkung des Besuchs einer Gruppe an Menschen in der Schlosskapelle mit der CFD-Simulation nachgebildet werden. Am Tag der realen Erprobung, diese fand am 25. Oktober 2018 ab 12:00 Uhr statt, herrschte im Freien eine Außentemperatur von 16,5 °C und eine relative Luftfeuchtigkeit von 75 % r.F. vor. Insgesamt wurden 18 Besucher in den Raum hineingelassen. In der Berechnung wurde zudem der Betrieb der Lüftungsanlage betrachtet, um die Wirkung der Zu- und Ablufführung unter gleichzeitiger Anwesenheit der Besucher zu untersuchen. Ziel war es, ggf. auch Vorschläge für die Verbesserung der Zu- und Ablufführung auszuarbeiten²¹.

Zunächst wurde die Lüftungseinrichtung mit einer Anlagenleistung von 322 m³/h (entspricht 400 kg/h) gerechnet. Abb. 2.5-05 verdeutlicht, dass die Luft die Lüftungsanlage mit einer niedrigen relativen Feuchtigkeit verlässt und durch zwei Öffnungen im Fußboden des Chorraums einströmt. Die Abluff wird über den aufgedoppelten Boden im Besucherraum abgesaugt. Es wird deutlich,

²⁰ A. Dental und U. Dietrich, Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden, Dokumentation Primero-Komfort, 2006.

²¹ Als diese Simulationen durchgeführt wurden, war die Anlage noch nicht eingebaut.

dass die Luftströmung dabei nicht in allen Bereichen des Innenraums wirksam wird. In den von der Strömung nicht erfassten Bereichen wird die berechnete relative Luftfeuchtigkeit dementsprechend nicht reduziert. Abb. 2.5-05 zeigt die Luftströmung, die von den beiden Einlässen kommend in Richtung der Absaugöffnung führt und die Bankreihen rechts, links und oberhalb umströmt.

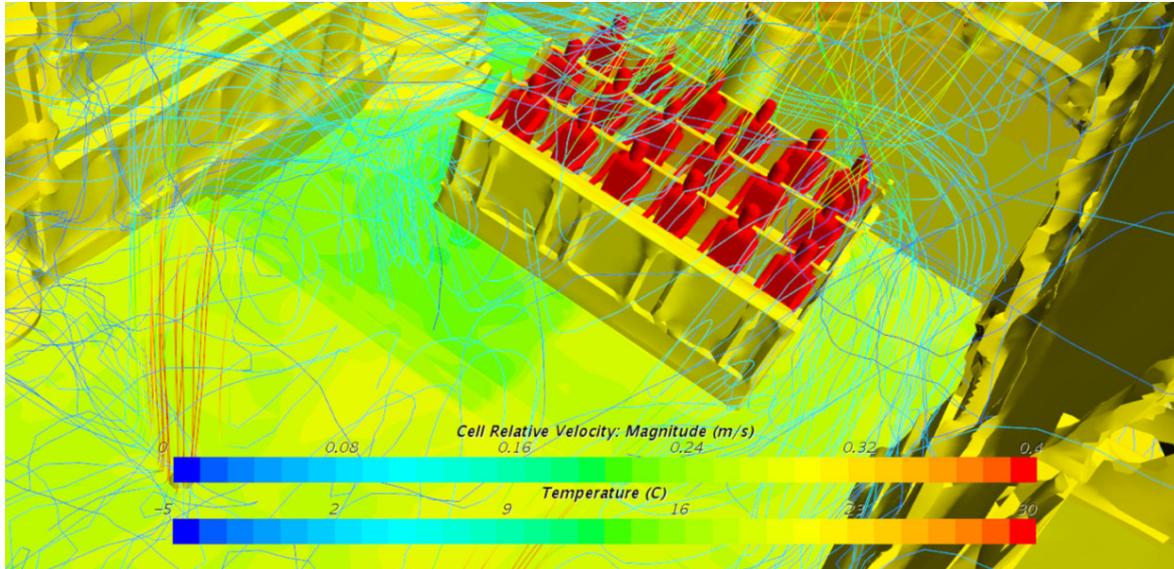


Abb. 2.5-05: Ablenkung der Stromlinien um die Sitzbankgruppe

Die Analyse der berechneten Luftströmungen verdeutlicht, dass im Bankraum und unterhalb der Bänke die Luft kaum bewegt ist. Da der Boden in diesem Bereich auch zu circa 50 % nicht unterkellert ist, herrschen im nicht unterkellerten Bodenbereich auch niedrigere Oberflächentemperaturen am Boden vor. Folglich herrschen hier auch etwas höhere relative Luftfeuchten als am etwas wärmeren Boden inmitten des Raumes vor. Um eine Belüftung auch innerhalb des Bankbereiches sicherzustellen, muss hier unter den Bänken eine gesonderte Belüftung vorgesehen werden. Im Simulationsmodell wurde daher versucht, eine Luftführungsklappe über der ersten Bankreihe anzuordnen, die mit Hilfe zweier seitlicher Beine auf dem Boden aufstellen zu können. Mit der Führungsklappe sollte untersucht werden, ob die Luft die von vorne zur Bankreihe strömt und hier nach oben geführt wird durch die luftführende Umlenkstruktur in der ersten Bankreihe wieder nach unten geführt werden kann, um unter den Sitzbänken im offenen Fußbereich die Bankreihen zu durchströmen. Abb. 2.5-06 zeigt die Luftströmung in zweidimensionaler Darstellung in einem durch die Bänke laufenden Kapellenlängsschnitt. Die Berechnungen konnten aber zeigen, dass die durch die Klappe Richtung Besucher bewegte Luft bereits in der ersten Bankreihe infolge der Oberflächenwärme der Besucher wie auch der von den Besuchern freigesetzten Wärme direkt wieder nach oben bewegt wird. Damit verpufft die Wirkung, die Luft unterhalb geschlossenen Sitzflächen in den offenen Fußbankbereichen von der ersten bis zur letzten Bankreihe zu unterströmen. Folglich liefert der Einsatz der Klappe keinen Vorteil für den Bereich unter den Bänken, für den Fall in der Schlosskapelle befindlichen Besucher. Da die umfassenden Strömungsanalysen verdeutlichten, dass der Fall der Anwesenheit von Besuchern in der Schlosskapelle den kritischen Fall darstellt, konnte mit der instationären Betrachtung gezeigt werden, dass die Anordnung einer Luftführungsklappe keine Maßnahme darstellt, mit der die Raumluftverhältnisse im Bankbereich verbessert werden können.

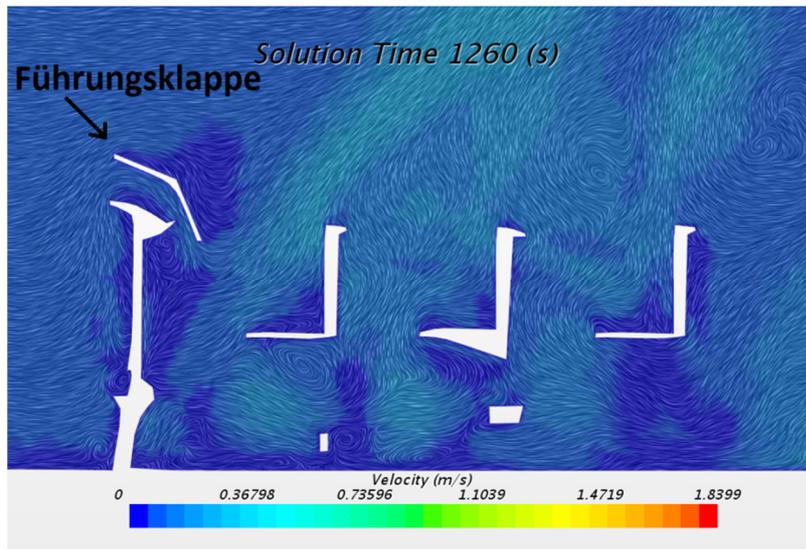


Abb. 2.5-06: Luftströmungsverhältnisse im Bankreihenbereich mit der Installation einer Luftführungsklappe

Die Lüftungsanlage kann eine Luftförderleistung von bis zu 800 m³/h erbringen. In den Simulationsstudien wurden unterschiedliche Leistungen der Lüftungsanlagen erprobt. Nachfolgend wird die Wirkung auf die Luftströmung im Raum für unterschiedliche Betriebsweisen aufgezeigt. Abb. 2.5-07 stellt einen Vergleich des sich im Kapellenraum einstellenden Strömungsfelds bei einer Luftzuführung von 322 m³/h (rechts) und 644 m³/h (links) dar. Bei einem Lufteintritt von 644 m³/h führt die einströmende Luft zu einer intensiven Bewegung bis in das Gewölbe und sorgt damit für eine bessere Durchmischung. Allerdings reicht diese immer noch nicht aus, um auch den Bereich unter den Bänken zu belüften. Als einen Grund kann dabei auch die konvektiv aufsteigende leicht erwärmte Luft, die von 18 Personen abgegeben wird, genannt werden. Die dem Raum mit der Lüftungsanlage zugeführte entfeuchtete Zuluft folgt dabei dem Konvektionsstrom nach oben. Die Luft unter den Bänken bleibt somit unbeeinflusst.

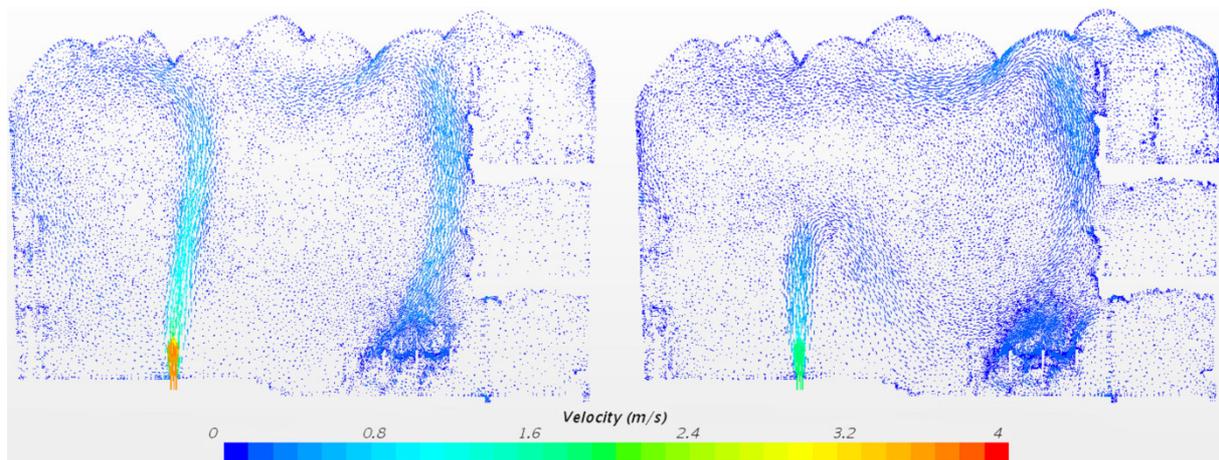


Abb. 2.5-07: Vergleich der Luftströmungen bei einer Luftzuführung von 322 m³/h (rechts) und 644 m³/h (links)

Außer dem Fußbereich der Bankreihen zeigen die Simulationsergebnisse keine weiteren kritischen Bereiche auf, die von der Luftströmung infolge der kontrolliert zugeführten Zuluft nicht von der Luftbewegung erfasst werden. Auch hinter dem Altar und in den Priechen bewegt sich die Luft, auch wenn hier in deutlich abgeschwächter Form. Abb. 2.5-08 zeigt die Verteilung der relativen Luftfeuchte in der Kapelle im Längs- wie im Querschnitt. Die kritischen Bereiche sind dabei gut erkennbar, so unter den Bänken und in einer Prieche.



Abb. 2.5-08: Kritische Bereiche mit hoher relativer Luftfeuchtigkeit.

Abb. 2.5-09 und 2.5-10 zeigen die gerechneten Temperaturen und relativen Luftfeuchten an verschiedenen Messpunkten zehn Minuten nach dem Eintritt der Besucher. Die Simulation wurde zwei Mal durchgeführt, einmal mit und einmal ohne Anlagenbetrieb. Die Anlage wurde bei letzterem mit einer Luftleistung von 644 m³/h betrieben. Durch den Anlagenbetrieb konnte die mittlere relative Luftfeuchtigkeit in der Kapelle von 67 % r.F. auf ca. 55 % r.F. abgesenkt werden. Erstaunlich war, dass ohne den Betrieb der Anlage die mittlere relative Luftfeuchte auch auf 56 % r.F. abgesunken ist. Abb. 2.5-09 zeigt, dass an den meisten Messstellen die relative Luftfeuchte beim Anlagenbetrieb gesunken ist. Außer an Messstelle 3 und 10. Hier hat das Außenklima einen großen Einfluss, schließlich befindet sich der Messpunkt 3 vor der Außenwand. Auch hinter dem Altar wird der unter dem Ostfenster befindliche Raumbereich von der äußeren Witterung beeinflusst. Gleichermaßen befindet sich auch Messpunkt 10 an der südlichen Außenwand und neben dem kleinen Südfenster. Hier steigt die mittlere Lufttemperatur durch den Anlagenbetrieb von 17,6 °C auf 20,6 °C an. Ohne die Anlage ist sie von 17,6 °C auf 20,3 °C gestiegen. Auch in Abb. 2.5-10 lässt sich die Sondersituation der Punkte 3 & 10 auf die vorgenannte Weise erklären. Der unerwartete geringe Unterschied der Wirkung des Anlagenbetriebs auf die Raumluftverhältnisse hinsichtlich der relativen Feuchte lässt sich damit erklären, dass die relative Feuchte in den diversen Raumbereichen weniger vom Feuchteintrag der Besucher als vielmehr von der steigenden Temperatur im Raum infolge der von den Besuchern freigesetzten Wärme beeinflusst wird. Eine durchaus bemerkenswerte Erkenntnis für wenig genutzte Räume, da in der Literatur doch meist von einem deutlichen Anstieg der relativen Feuchte durch Besucher ausgegangen wird.

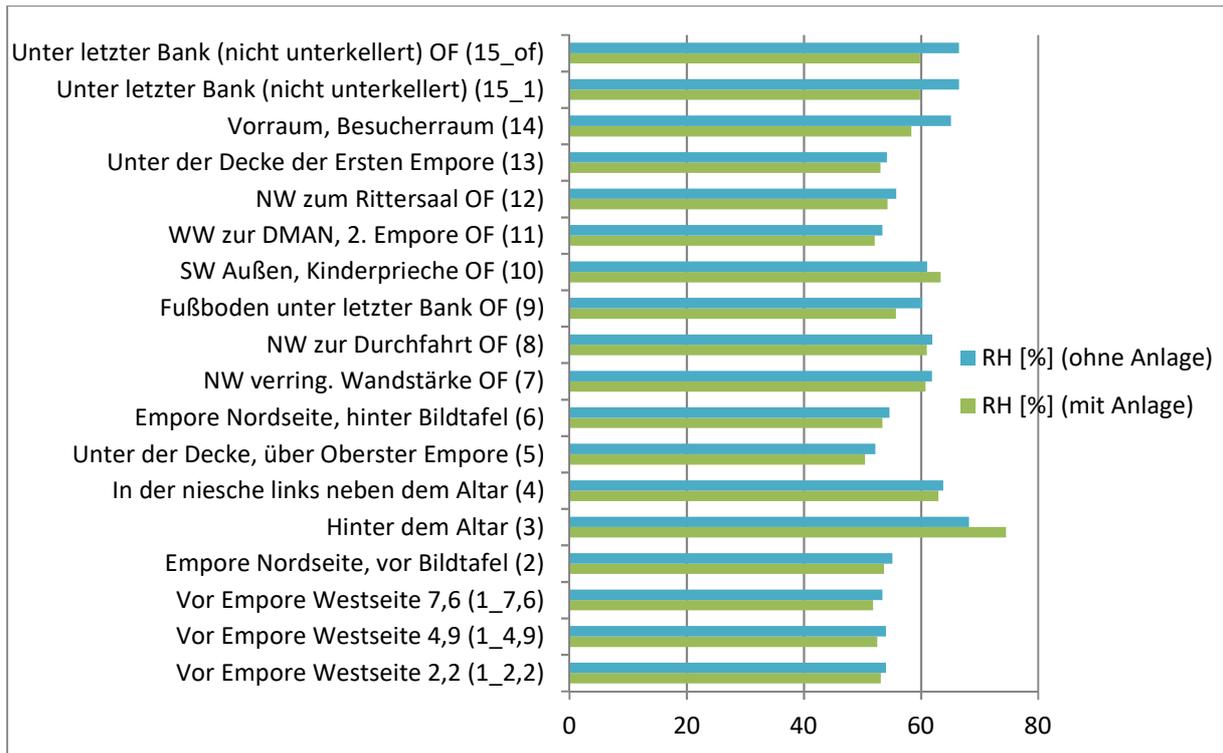


Abb. 2.5-09: Relative Luftfeuchte an verschiedenen Messpunkten nachdem Besucher zehn Minuten im Raum sind

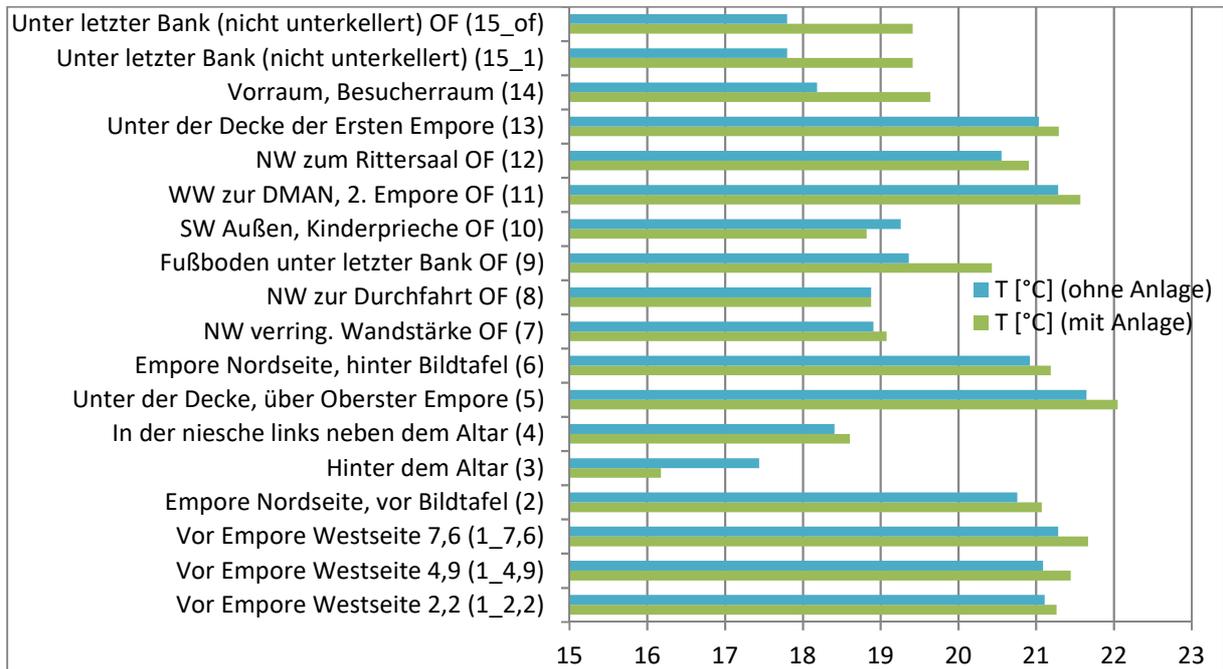


Abb. 2.5-10: Temperaturen an verschiedenen Messpunkten nachdem Besucher zehn Minuten im Raum sind

Gegenüber den auf wenige Messstellen beschränkten Zugriff auf Messdaten zur Verteilung von Temperatur und relativer Feuchte im Raum kann mit der Simulation für aller Raumbereiche der Kapelle eine Aussage zur jeweils vorherrschenden Raumluftsituation infolge des Einflusses der Besucher gegeben werden. Zunächst wurde aber ein Abgleich der gemessenen und an den Messstellen mittels CFD-Simulation berechneten Raumluftverhältnisse vorgenommen. Die im Folgenden herangezogenen Messdaten gehen auf eine Nutzungserprobung der Kapelle zurück,

die am 11. Oktober 2018 stattfand. An diesem Tag herrschte am Nachmittag um 16:00 Uhr außen eine Temperatur von 20,6 °C und eine relative Luftfeuchte von 50 % r.F. vor. Abb. 2.5-11 und Abb. 2.5-12 geben für die Orte, an denen Messsonden verfügbar sind, die an diesem Tag gemessenen und berechneten Werte von Temperatur und relativer Feuchte wieder.

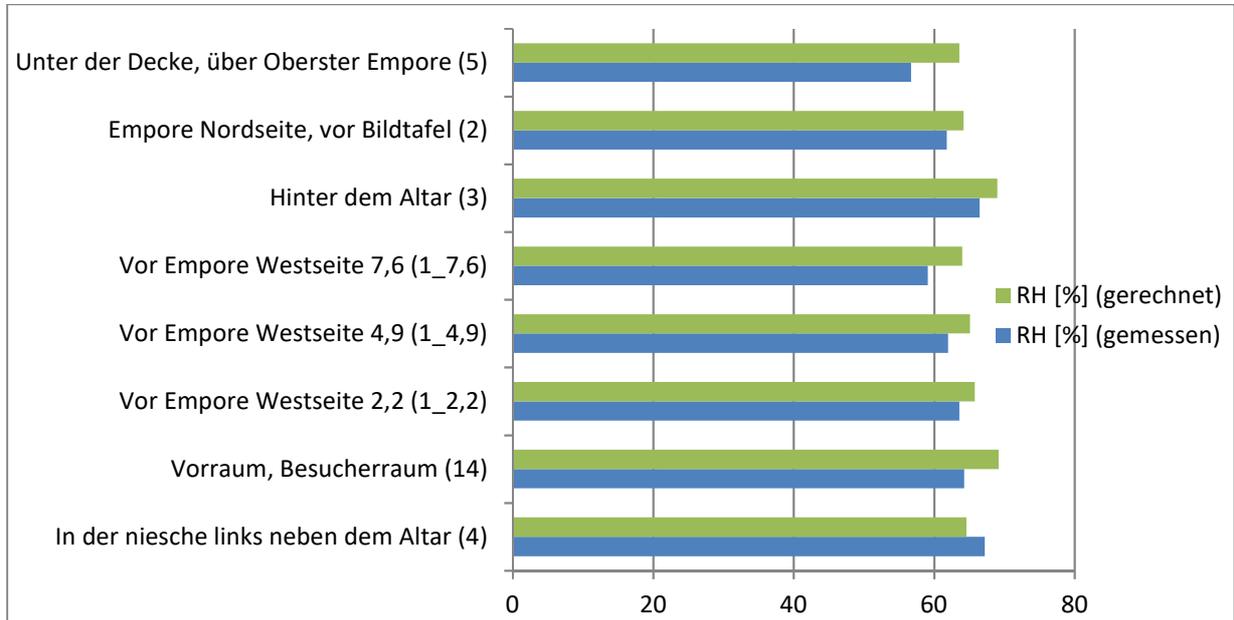


Abb. 2.5-11: Relative Luftfeuchtigkeit an den Messpunkten nach zehn Minuten (mit Besuchern)

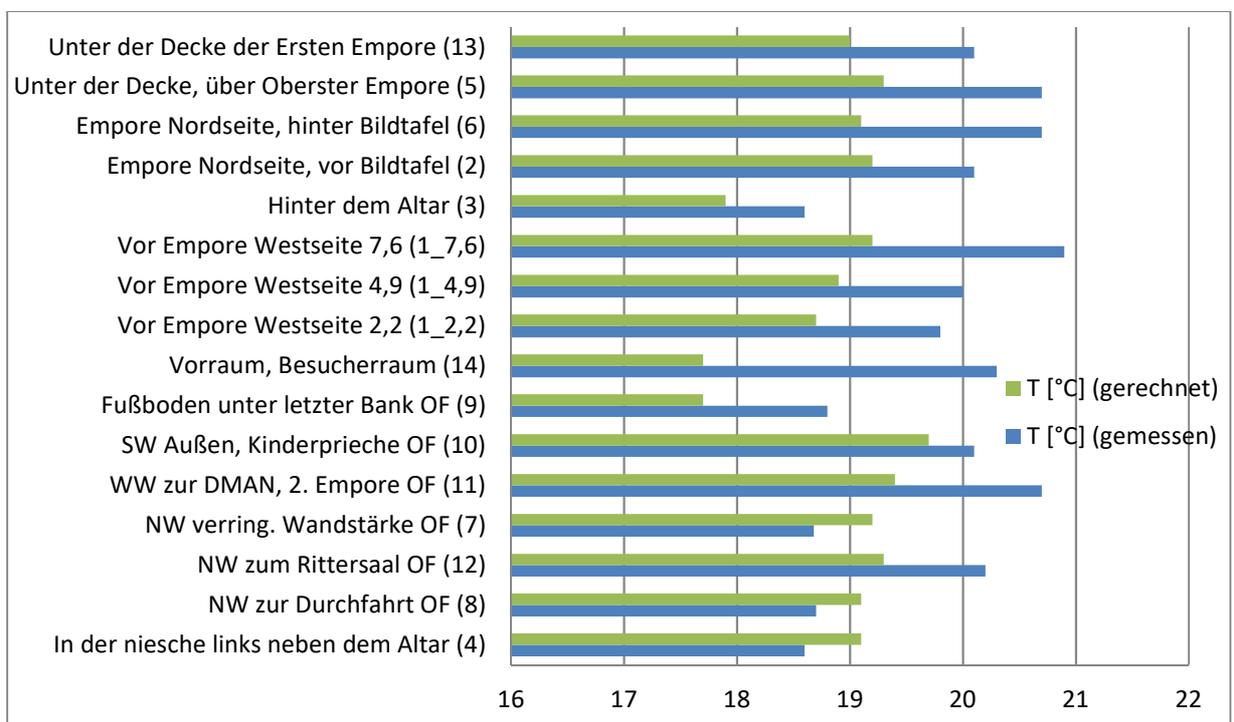


Abb. 2.5-12: Temperaturen an den Messpunkten nach zehn Minuten (mit Besuchern)

Die Ergebnisse verdeutlichen, dass die Berechnung der Temperaturen unter Berücksichtigung der Besucherlasten abweichende Ergebnisse liefert. Infolge abweichender Temperaturen weichen auch zwangsläufig die entsprechenden relativen Luftfeuchten ab, da diese von der jeweils vorherrschenden Temperatur abhängig sind.

Um das für die instationären Betrachtungen angesetzt Rechenmodell validieren zu können, wurde der Betrachtungsfall vom 11. Oktober auch mit der thermischen Gebäudesimulations-Software IDA-ICE analysiert. Hier konnte eine deutlich bessere Annäherung der berechneten Werte erzielt werden. Der Grund hierfür ist, dass in der CFD-Simulation die Hüllflächenbauteile als „Solids“ (Wände, Decke und Boden) angesetzt sind, deren thermische Speicherwirkung zunächst aber nicht berücksichtigt wurde. Tatsächlich wird aber in der Raumschale Wärme von den Wand-, Decken- und Bodenbauteilen, den „Solids“ aufgenommen, umverteilt und kurzfristig gespeichert. Danach wird diese Wärme langsam sowohl an die Kapelle abgegeben oder aber nach außen abgeführt.

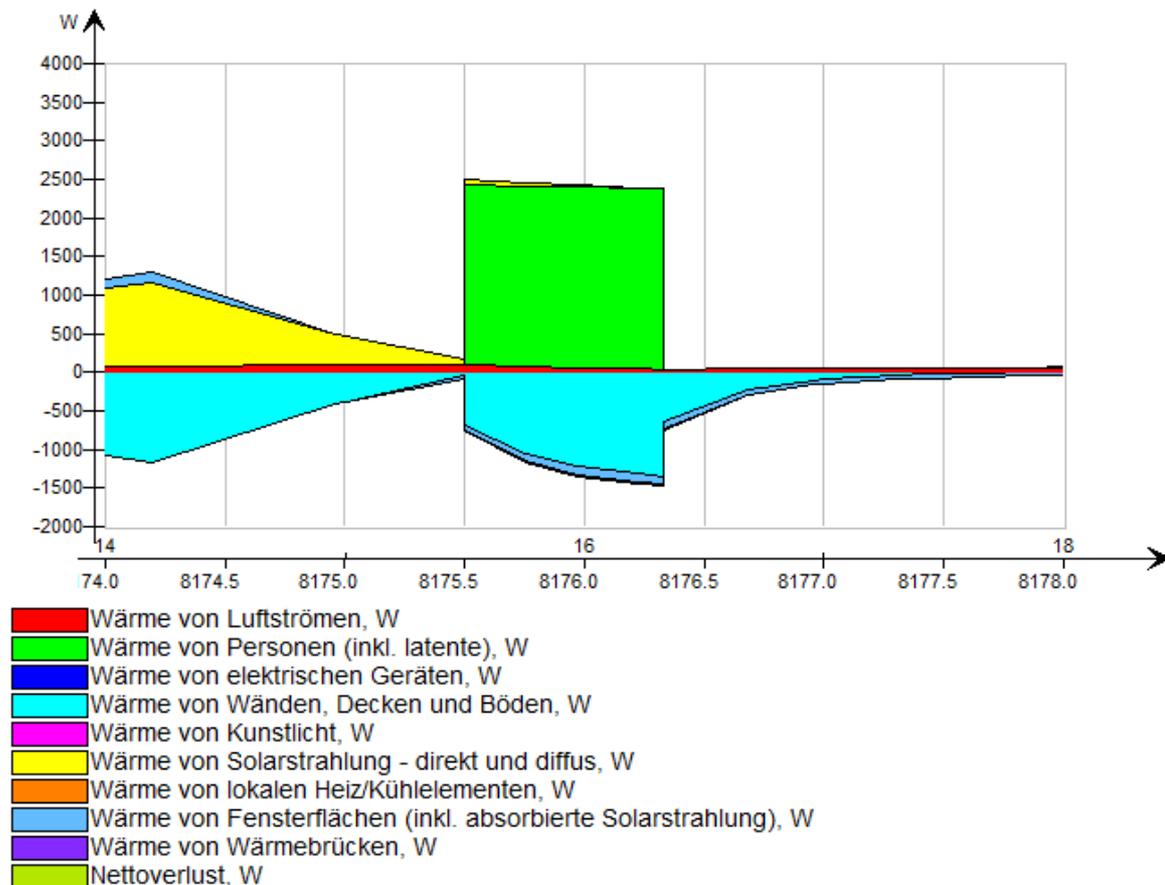


Abb. 2.5-13: Wärmeströme bei den verschiedenen Modellelementen

Abb. 2.5-13 zeigt die mit IDA-ICE berechneten Wärmeströme in dem zuvor mit STAR-CCM+ betrachteten Zeitraum. So haben die Besucher die Kapelle um 15:30 Uhr betreten und um 16:30 Uhr die Kapelle wieder verlassen. Die von den Personen verursachten Wärmelasten sind in Abb. 2.5.-13 mit dem in grüner Farbe gekennzeichneten Wärmeeintrag aufgezeigt. In hellblauer Farbe sind die Wärmemengen dargestellt, die von den Wänden, Decken und Böden infolge des Wärmeeintrags aufgenommen werden. Es stellt sich ein Wärmestrom bis ca. 1500 W ein. Dies entspricht nahezu zweidrittel der Wärmemenge, die von den Personen abgegeben werden (ca. 2300 W). Die massiven Bauteilflächen, die „Solids“ beeinflussen somit die instationären Betrachtungen immer dann, wenn Wärmequellen (in diesem Fall die eintretenden Personen) in der Kapelle vorhanden sind. Daher müssen bei instationären Betrachtungen die Wärmewechselwirkungen die Wärmespeicherwirkungen der Hüllflächenbauteile in den „Solids“ berücksichtigt werden.

2.5.4.3 Instationäre Betrachtungen mit „Solids“

Aufgrund der Feststellung, dass die Wärmespeicherwirkung der Hüllflächenbauteile in den instationären Betrachtungen zwingend zu berücksichtigen sind, wurde das Rechenmodell entsprechend bei den „Solids“ erweitert. Zunächst musste die Geometriegenerierung²² entsprechend angepasst und dann das gesamte Modell erneut vernetzt werden. Die daraus resultierende Anzahl der Zellen wird infolge der modifizierten Hüllflächenbauteile zwangsläufig größer. Um aber ein drastisches Ansteigen der Zellenanzahl zu vermeiden, werden die neuen Bauteile etwas gröber vernetzt. Die Zellengröße nimmt dann Werte von fünf bis zehn Zentimetern ein. In den „Solids“ wird die Wärme durch Leitung übertragen. An den außen- und raumseitigen Oberflächen wird die Wärme durch Konvektion und Strahlung übertragen. Daher wirkt sich die grobe Vernetzung der „Solids“ nicht negativ auf die Qualität der Ergebnisse aus. Außerdem wurden einige Details des vorherigen Modells nicht weiter betrachtet. Hierbei wurde darauf geachtet, dass diese Vereinfachungen die Raumlufstromungsverhältnisse in der Kapelle nicht beeinflussen. Entsprechend wurden einzelne Bildtafeln und auch Details der Geländer nicht in der bisherigen Präzision im Modell abgebildet. Die eingesparten Zellen führen aber zu einer deutlichen Reduzierung der Rechenzeit. Nach der so vorgenommenen Vernetzung weist das Modell der Schlosskapelle nur noch ca. 2,2 Mio. Zellen auf. Dies entspricht etwa 38 % der ursprünglichen Anzahl an Zellen. Das neue Modell ist in Abb. 2.5-14 dargestellt.

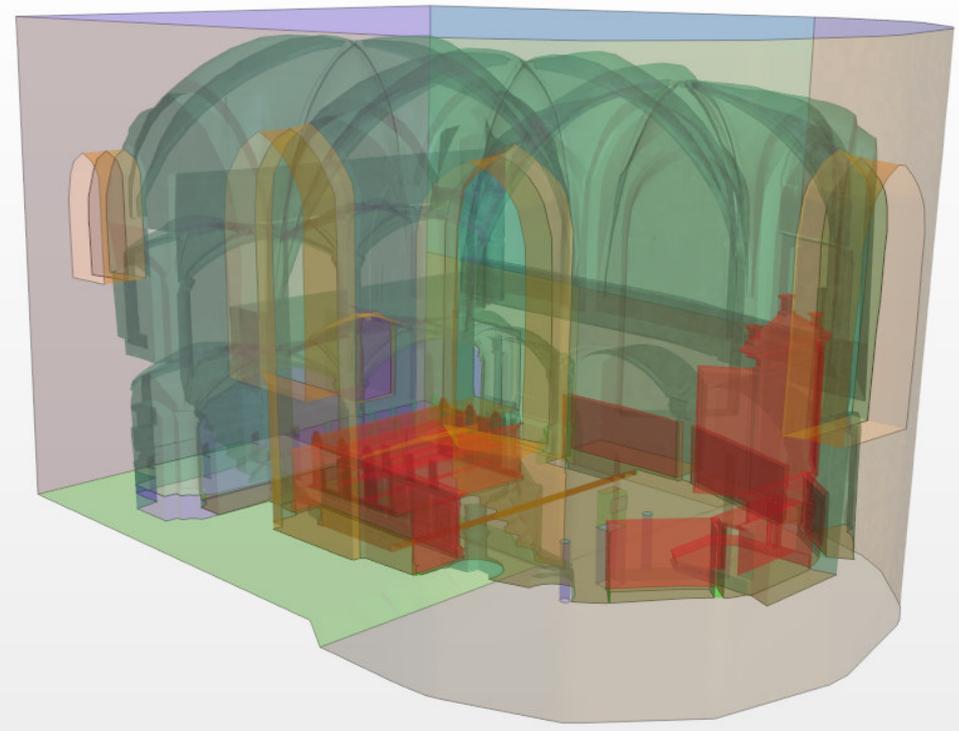


Abb. 2.5-14: Geometrie des neuen Modells mit "Solids", die die Wärmespeicherwirkung der Hüllflächenbauteile berücksichtigen

In Abb. 2.5-14 kennzeichnen die Farben die jeweiligen Randbedingungen. Anders als im ersten Modell, sind der inneren Oberfläche keine Eigenschaften eines opaken Bauteils zugeordnet, d. h. die Randbedingungen werden nicht mehr durch U-Werte und äußere Klimabedingungen definiert. Vielmehr weist nun jedes Bauteil seine charakteristischen Materialkennwerte wie Dichte, spezifische Wärmekapazität und Wärmeleitfähigkeit auf. Die äußeren Klimarandbedingungen bleiben unverändert, werden nunmehr aber der äußeren Bauteiloberfläche zugewiesen. Die

²² Bestandsaufnahme, Büro Bergmann GmbH, Pfaffenhofen an der Ilm, 2016 im Auftrag des SBLH (SBLH 2016).

Software berechnet sich bei dem nun gewählten Modellansatz das instationäre Wärmeverhalten und damit die im Bauteil sich einstellende Temperaturverteilung wie auch die sich über den Bauteilquerschnitt einstellenden Wärmeströme. In manchen Bereichen, wo die Wand bzw. der Boden unterschiedliche Dicken aufweisen, wurde ein Mittelwert der gegebenen Bauteildicken vereinfachend angesetzt, um die Komplexität des Modells zu verringern. Die Wanddicke wurde mit einem mittleren Wert von 120 cm angesetzt. Der nicht unterkellerte Boden wurde mit einer einheitlichen Dicke von 34,5 cm berücksichtigt. Für den unterkellerten Boden wurde die Dicke wie folgt berechnet:

25% des Bodens weist eine Dicke von 43 cm auf, 55% besitzt 80 cm und in den restlichen 20% wird eine Bodendicke von 60 cm angesetzt. Draus errechnet sich ein Dickenmittelwert von 66,75 cm.

Auf den Außenseiten der „Solids“ nehmen die Randbedingungen wie in den vorausgegangenen Betrachtungen die im Betrachtungsfall vorherrschenden Witterungsverhältnisse an.

2.5.4.4 Verbesserung der Luftströmung unter den Bänken

Da die Luftströmung in der Kapelle von kleinen Änderungen in ihrem Strömungsverlauf beeinflusst werden kann, wurden Untersuchungen vorgenommen, die Luftströmung so zu steuern, dass die kritischen Bereiche – insbesondere in den Bereich unter den Bänken - besser angeströmt werden. Hierzu wurden verschiedene Modell-Varianten untersucht und die Ergebnisse mit dem Referenzmodell verglichen. Als Referenzmodell wurde eine stationäre Betrachtung mit einer Anlagenleistung von 680 m³/h ohne Besucherlasten ausgewählt. Bei dieser Modellbetrachtung wurde von einer Außentemperatur von 12 °C und einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 % ausgegangen. Folgende Varianten wurden gewählt:

1. Verkleinerter Auslassbereich (unter dem Besucherraumboden)
2. Öffnung in der ersten Bankreihe
3. Öffnung in der ersten Bankreihe mit einem verkleinerten Auslassbereich.
4. keine Glaswand
5. keine Glaswand und ein verkleinerter Auslassbereich
6. Ohne Be- und Entlüftungsanlage

Wie Abb. 2.5-15 verdeutlicht, wird mit einem verkleinerten Auslassbereich die geometrische Reduzierung des Auslassbereichs unter dem Besucherraumboden bezeichnet, der sich auf den Bereich hinter den Bänken beschränkt. Infolge des kleineren Auslasses wird die Luftströmungsgeschwindigkeit am Auslass größer. Entsprechend wird die Luft gezwungen, den Bereich unter den Bänken anzuströmen.

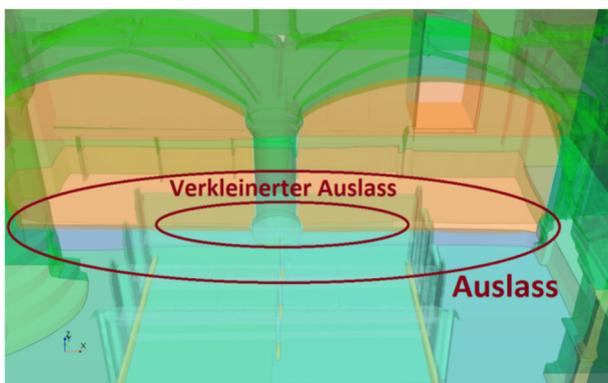


Abb. 2.5-15: Darstellung des verkleinerten Auslassbereiches

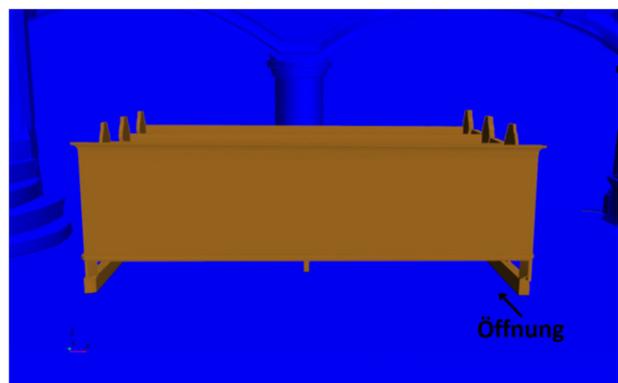


Abb. 2.5-16: Öffnung bei der ersten Bankreihe

Abb. 2.5-16 soll demzufolge die Wirkung der oben genannten Öffnung im Bereich der ersten Bankreihe verdeutlichen. So wird durch diese Öffnung vermieden, dass die Luftströmung gegen die Bänke stößt und anschließend seitlich links und rechts aus den Bankreihen entweicht. Da die Bänke unten bis auf die erste Reihe geöffnet sind, reicht eine Öffnung in der ersten Bankreihe, um den gewünschten Effekt zu erzielen.

Der Vergleich mit dem Referenzmodell kann belegen, dass eine Verkleinerung des Auslasses keine Vorteile bringt. Die Berechnungsergebnisse zeigen, dass die Luft dann nicht von der Kapelle her, sondern vom Besucherraum her angesaugt wird. Infolge des großen Druckunterschieds zwischen Auslass und Besucherraum wird sich die Luft strömungstechnisch bevorzugt vom Besucherraum her anstelle von der Kapelle angesaugt. Diese Verhältnisse sind in Abb. 2.5-17 aufgezeigt. Hier wird die Luft unter den Bänken wie zuvor minimal bewegt.

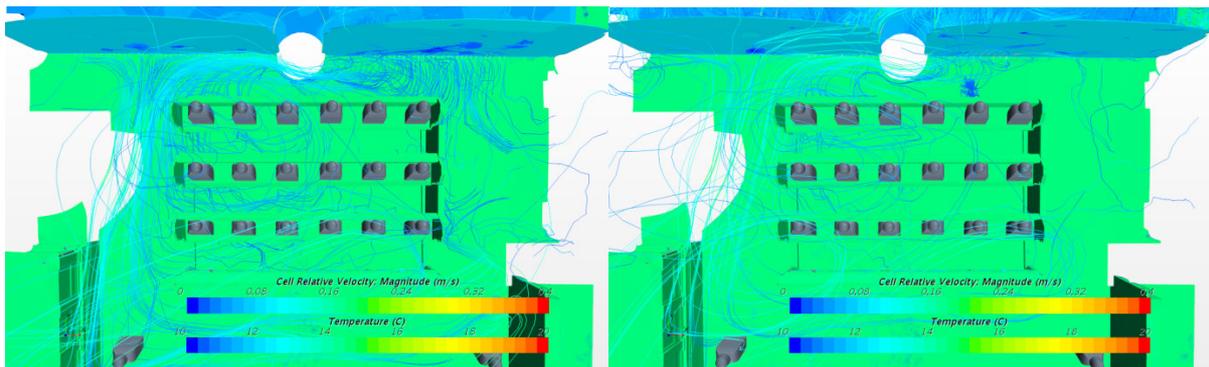


Abb. 2.5-17: Einfluss des verkleinerten Auslasses (rechts verkleinert)

Wird hingegen auf die Glaswand verzichtet, verbessern sich die Strömungsverhältnisse unter den Bänken. Dies insbesondere für den Fall, dass gleichzeitig der Auslass verkleinert wird. Abb. 2.5-18 stellt den Vergleich anhand von Stromlinien für die beiden Varianten dar. Wird auf die Glaswand verzichtet, gleicht sich der Druck zwischen der Kapelle und dem Besucherraum aus. Der verkleinerte Auslass sorgt dann dafür, dass die Luft vom Besucherraum als auch von der Kapelle Luft angesaugt wird. Für die Kapelle ist die über die Einlässe einströmende Luft von Vorteil, wenn diese in Richtung des verkleinerten Auslasses geführt werden kann. Mit der besseren Durchströmung der Bankreihen wird zudem eine leicht höhere Temperatur und damit auch eine etwas eine niedrigere relative Luftfeuchtigkeit erreicht. Mit einer kleinen Öffnung in der ersten Bankreihe lassen sich zudem die Bereiche unter den Bänken gleichmäßiger durchströmen. Doch lassen sich so kaum Verbesserungen hinsichtlich einer Verringerung der relativen Luftfeuchtigkeit unter den Bänken erreichen. Dies kann nur mit einer Verkleinerung des Auslassbereichs bewirkt werden.

Abb. 2.5-19 zeigt die Stromlinien unter den Bänken für die beiden erläuterten Betrachtungsfälle. Aufgrund des Druckausgleichs, den die neue Öffnung bewirkt, bilden sich homogene Stromlinien unter den Bänken aus. Mit der Verkleinerung des Auslasses wird die Druckdifferenz zwischen dem Auslass und der Kapelle höher. Dies führt dazu, dass sich die Luft mit höherer Geschwindigkeit Richtung Auslass bewegt. Mit der größeren Bewegung der Luft können die klimatischen Verhältnisse unter den Bänken verbessert werden.



Abb. 2.5-18: Einfluss des Verzichts auf die Glaswand (rechts ist der Auslassbereich verkleinert)

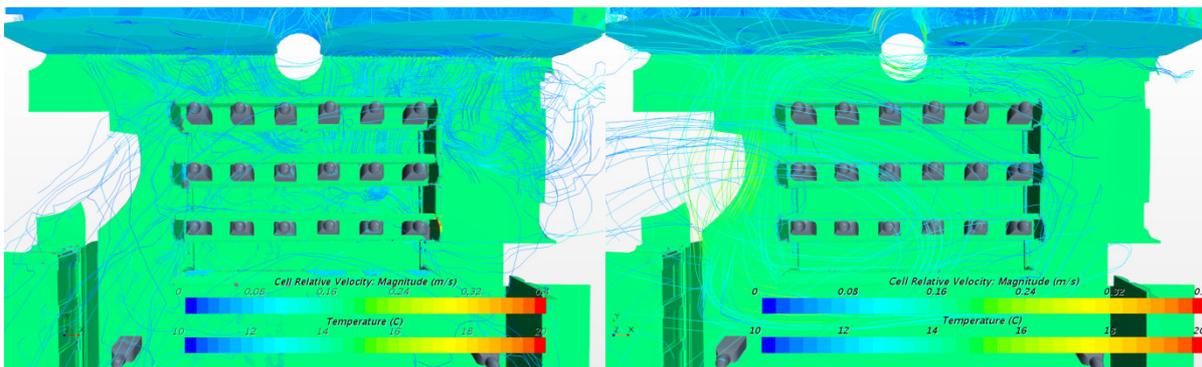


Abb. 2.5-19: Einfluss der Öffnung unter der ersten Bankreihe (rechts ist der Auslassbereich verkleinert)

Die nachfolgenden zwei Varianten führen entsprechend der instationären Strömungsanalysen zu einer klimatischen Verbesserung der kritischen Bereiche unter den Bankreihen:

1. Verzicht auf die Glaswand mit einem kleineren Auslassbereich
2. Anbringung einer Öffnung in der ersten Bankreihe mit einem verkleinerten Auslassbereich

Beide Modelle wurden mit dem Referenzmodell „Normaler Zustand“ sowie mit dem Referenzmodell ohne den Betrieb der Be- und Entlüftungsanlage verglichen. So zeigen Abb. 2.5-20 und Abb. 2.5-21 die Strömungsverhältnisse und die relativen Luftfechtigkeiten, die sich entsprechend der Simulationen an den verschiedenen Messpunkten des Monitorings einstellen.

Somit ergibt sich, dass mit dem Betrieb der Lüftungsanlage eine deutliche Steigerung der Strömungsgeschwindigkeiten hinter dem Altar (Messstelle 3) erzielt wird. Die relative Luftfeuchtigkeit sinkt dementsprechend um ca. 10% ab. Eine ähnliche Verbesserung wird unter den Bänken (Messstelle 15) erreicht. Doch ist die Verbesserung hier nur geringfügig. Bei den anderen Modellvarianten lassen sich keine klaren Vorteile erkennen. Bei manchen Messstellen gibt es für die eine oder andere Variante einen Vorteil, doch fallen die Ergebnisse an anderen Messstellen für die gleiche Variante schlechter aus. Doch verdeutlicht die Betrachtung der relativen Luftfeuchtigkeit, dass die Feuchtesituation im ganzen Raum verbessert wird.

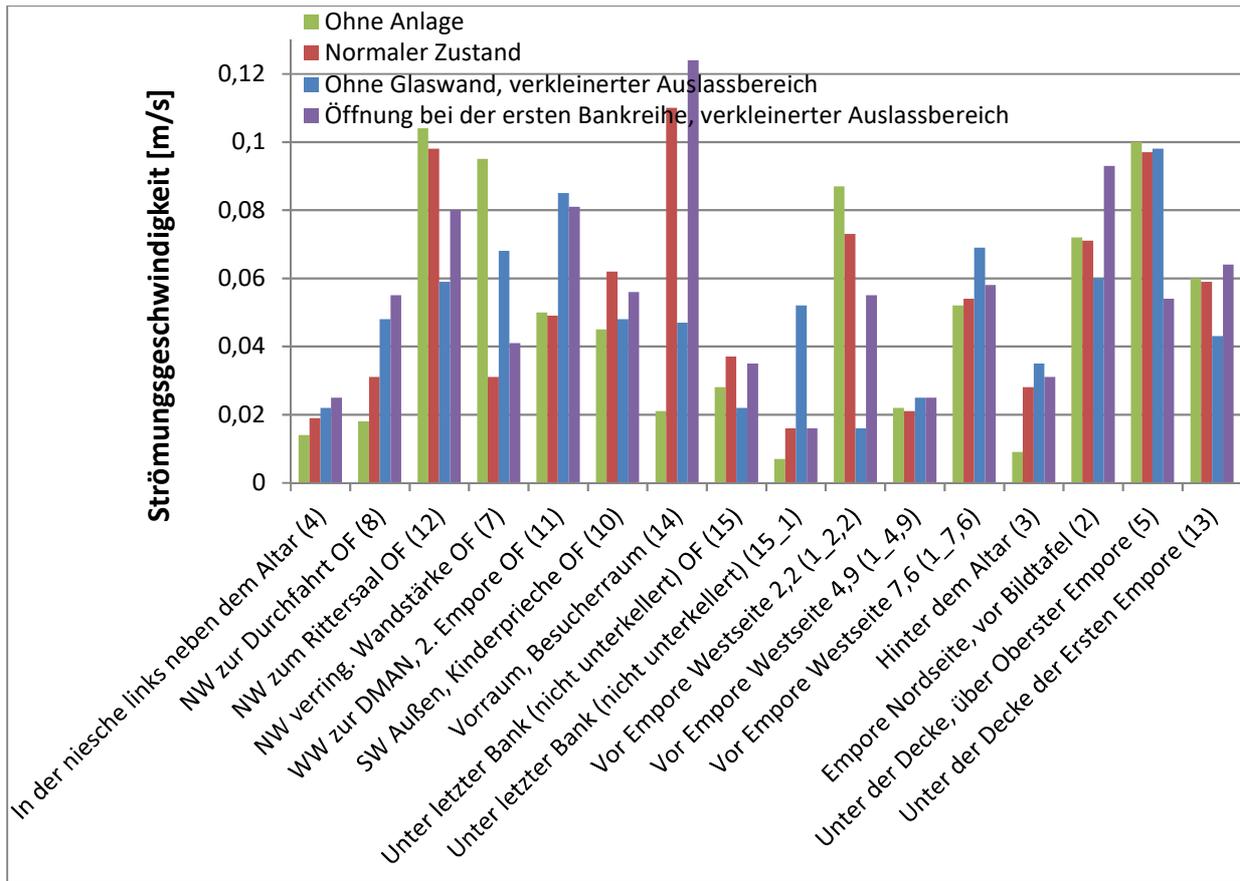


Abb. 2.5-20: Strömungsgeschwindigkeiten bei den verschiedenen Referenzpunkten im Vergleich

Entsprechend sollen Abb. 2.5-22 und Abb. 2.5-23 die Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Kapelle aufzeigen. So lässt sich eine Senkung der relativen Luftfeuchtigkeit durch den Betrieb der Be- und Entlüftungsanlage erkennen. Vor allem unter den Bänken und hinter dem Altar ist eine deutliche Verbesserung zu beobachten. Dabei trägt der Betrieb der Lüftungsanlage den größten Anteil zur Klimaverbesserung in den kritischen Bereichen bei. Die Verbesserung durch die anderen Maßnahmen, wie den Verzicht auf die Glaswand oder die Schaffung einer Öffnung in der ersten Bankreihe, ist vergleichsweise gering, weshalb diese Maßnahmen als vergleichsweise wenig effizient erscheint.

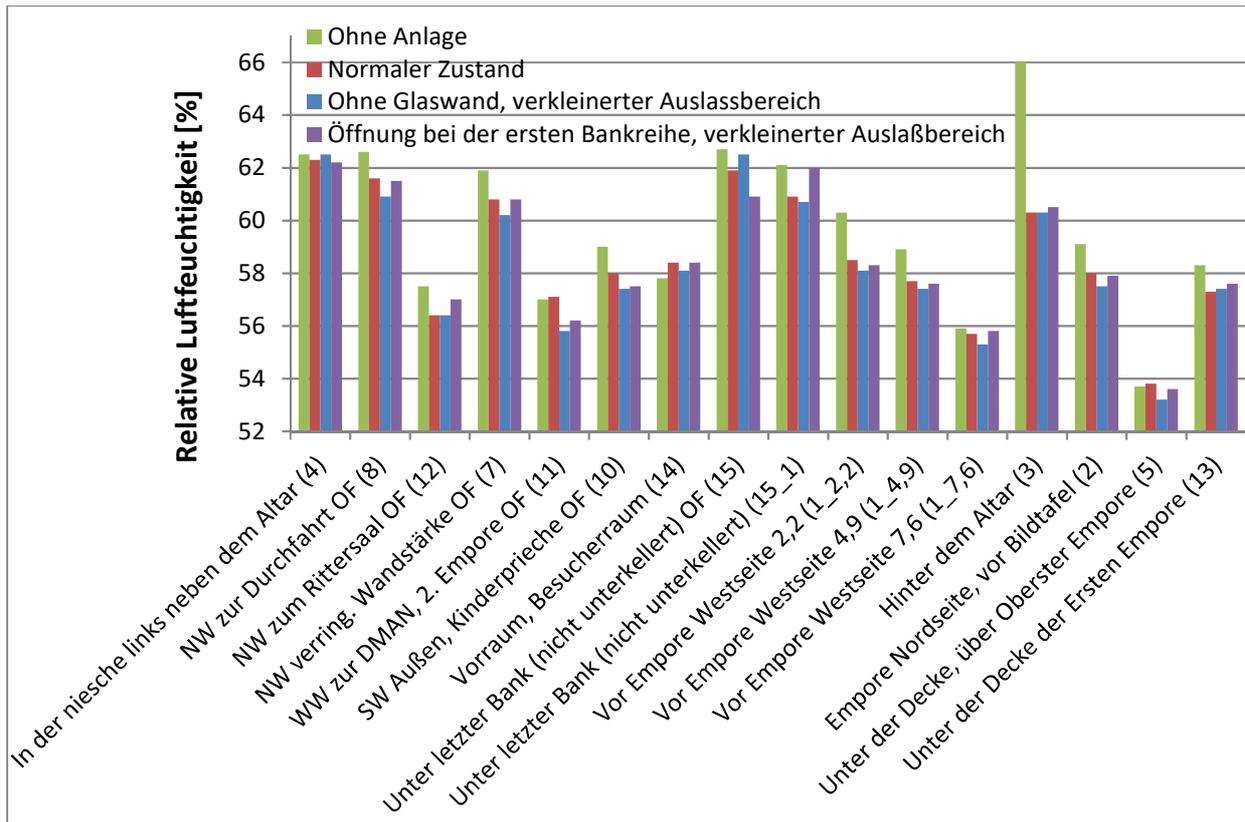


Abb. 2.5-21: Relative Luftfeuchtigkeit bei den verschiedenen Referenzpunkten im Vergleich

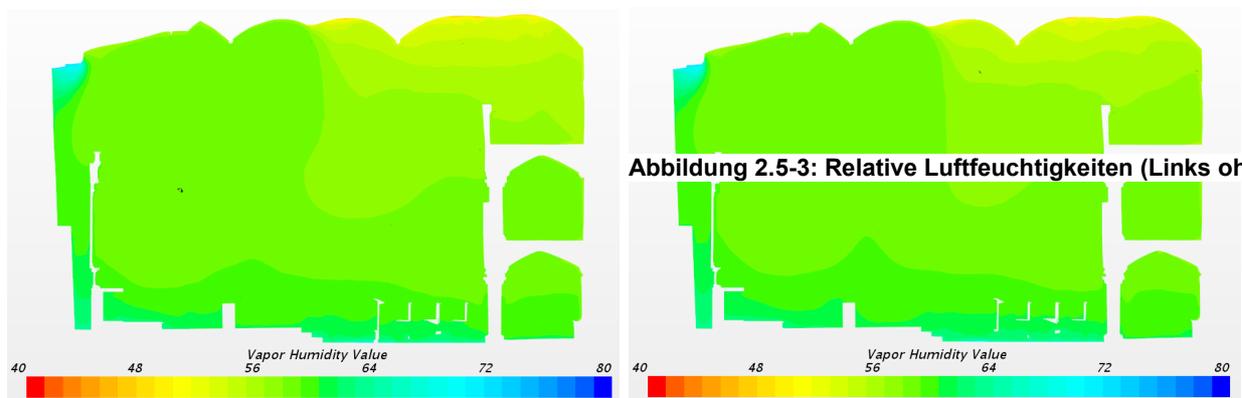


Abb. 2.5-22: Relative Luftfeuchtigkeit bei einem verkleinerten Auslassbereich (links ohne Glaswand, rechts sind die Bänke geöffnet)

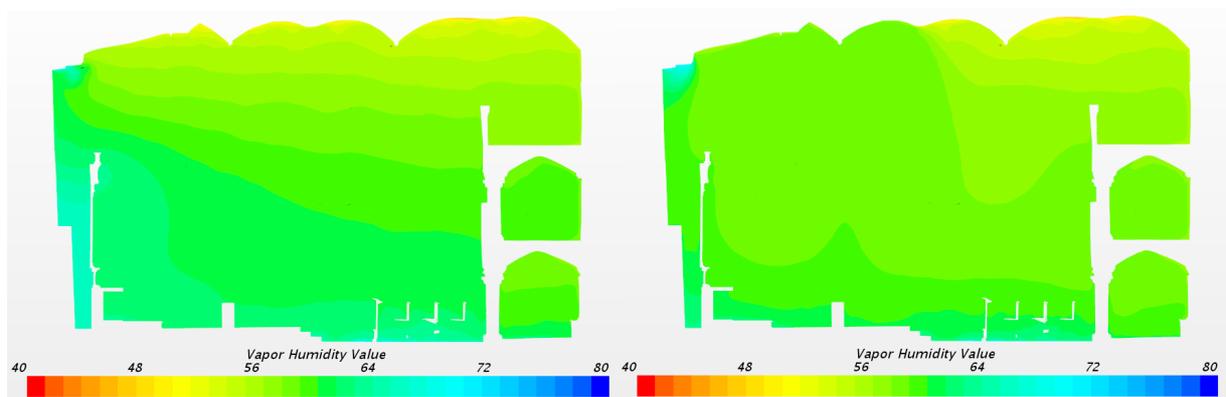


Abb. 2.5-23: Relative Luftfeuchtigkeit (Links ohne Anlage, rechts Referenzmodell)

2.5.5 Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe der Strömungssimulationen wurden die klimatischen Verhältnisse in der Schlosskapelle abhängig der einwirkenden Witterungsverhältnisse und der Nutzung analysiert. Dabei konnte festgestellt werden, dass die raumklimatischen Verhältnisse in der Kapelle durch den Betrieb der Be- und Entlüftungsanlage verbessert werden. Die CFD-Strömungsanalysen des 3D-Modells können folglich belegen, welche Wirkung anlagentechnische Maßnahmen wie auch sonstige bauliche Eingriffe zur Optimierung der Raumluftverhältnisse zur Folge haben. Im Rahmen des DBU-Verbundforschungsvorhabens konnten dabei Berechnungsergebnisse mit den durch das Monitoring erfassten Klimadaten abgeglichen werden. Dies ermöglichte eine Validierung der Modellbetrachtungen.

Rechnerisch kann nachgewiesen werden, dass bei maximaler Leistung der Lüftungsanlage die über die Bodenöffnungen in die Kapelle einströmende Luft bis zum Gewölbe gelangen. Dabei wird die Durchmischung der Luft in der Kapelle erheblich verbessert.

Für die instationären Betrachtungen reicht die Berechnung mit den üblichen Hüllflächenbetrachtungen in CFD-Simulationen nicht aus, um die Raumluftverhältnisse in der Schlosskapelle hinreichend beschreiben zu können. Der Abgleich der Messdaten mit den Simulationsstudien verdeutlichte, dass es unverzichtbar ist, das Wärmespeichervermögen aller Hüllflächenbauteile des Modells zu berücksichtigen. Für alle kritischen Bereiche, in denen trotz der im DBU-Verbundvorhaben in Betracht gezogenen Maßnahmen die Klimabedingungen nach wie vor bedenklich sind, so in den Priechen und unter den Bänken, müssen noch weitere Maßnahmen erarbeitet werden, um auch hier die Luftströmungsverhältnisse im Sinne einer präventiven Konservierung zu verbessern. Dabei konnten die CFD-Strömungsanalysen zeigen, dass sich auch solche Maßnahmen mittels 3D-Modell überprüfen und bewerten lassen.

Um den Testbetrieb der Be- und Entlüftungsanlage abzubilden, wurden in den Simulationen die berechneten Temperaturen, relativen Luftfeuchtigkeiten und Luftgeschwindigkeiten mit den mittels Monitoring messtechnisch erfassten Raumklimazuständen verglichen. Dies erlaubte, das bauphysikalische 3D-Modell der Schlosskapelle mit der integrierten Lüftungs- und Be- und Entfeuchtungsanlage zu validieren und gegebenenfalls zu korrigieren. Die Messdaten²³ haben gezeigt, dass mit Hilfe einer Entfeuchtungseinheit die Klimaverhältnisse (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) spätestens einen Tag nach einer Veranstaltung²⁴ wieder auf das gleiche Niveau geführt werden können, wie diese vor der Veranstaltung vorherrschten. Für die Nutzungsmodelle bedeutet dies, dass es nicht erforderlich ist, den ganzen Monat mit den verschiedenen Veranstaltungen zu simulieren, was einen unpraktikablen Rechenaufwand erfordert hätte. Vielmehr genügte es, die Simulationsstudien zu einzelnen vordefinierten Veranstaltungen mit wenigen Vorlaufzeiten in den Ausgangszustand zu führen, so dass die Kapelle eine nahezu konstante Klimabedingung aufwies und die Klimaparameter innerhalb tolerierter Grenzwerte liegen. Das Bauphysikalische 3D-Modell bietet umfangreiche Möglichkeiten, die verschiedenen Randbedingungen bzw. bauliche und anlagentechnische Veränderungen in der Kapelle zu simulieren. Mit Hilfe dieses Modells können bei Bedarf neue Maßnahmen zur Verbesserung der Luftströmungsverhältnisse in der Kapelle analysiert werden, so z.B. die Wirkung eines Querstromlüfters oder Lamellen, die die Luftströmung in eine bevorzugte Richtung führt. Gleichmaßen können neue Belastungsfälle (Nutzungserprobungen) mit den entsprechenden Randbedingungen simuliert werden.

²³ Gemessen vom Ingenieurbüro Dr. Berling für den Zeitraum, wo eine Entfeuchtungseinheit mitten in der Kapelle stand.

²⁴ Kapellennutzung wie z. B. Andacht oder Führung.

2.6 Untersuchungen zur mikrobiellen Belastung

Karin Petersen, Ullrich Fritz und Gabriele Krüger

2.6.1 Einleitung

Einer der Gründe für die im Rahmen des Forschungsprojektes geplanten mikrobiologischen Untersuchungen bestand in der augenfälligen Besiedlung in der Kapelle durch Schimmelpilze. Diese war auf verschiedenen Materialoberflächen in sehr unterschiedlicher Intensität ausgebildet und betraf sowohl die Gemälde aber auch die weitere Ausstattung, einige der Sitzbänke auch von der Unterseite sowie auch die Architekturoberflächen.

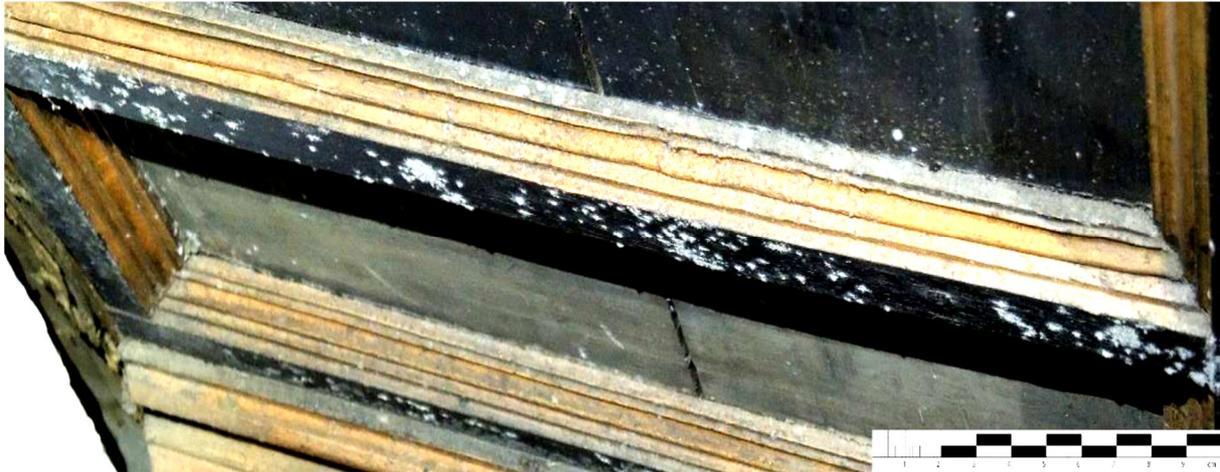


Abb. 2.6-01: Schlosskapelle Celle, linke Priechenwand Prieche 06 im EG, weißes kreisrundes Luftmyzel des Schimmelbefalls

Zunächst erfolgte die Erfassung und Dokumentation der Besiedlungsverteilung, um daraus im Zusammenhang mit den Ergebnissen der anderen Projektbeteiligten die Ursachen für die unterschiedliche Intensität herauszuarbeiten und darüber hinaus die Erfassung der an der Besiedlung beteiligten Schimmelpilzarten. Im Anschluss wurden die Bedingungen für die Entwicklung des Schimmels untersucht, um daraus Empfehlungen für einen präventiven Ansatz, aber auch eine Bewertung des Einflusses verschiedener Materialien auf die Besiedlungsintensität abzuleiten und eine mögliche Gesundheitsgefährdung zu erkennen.

2.6.2 Zu den durchgeführten Untersuchungen

Im Verlauf mehrerer Untersuchungskampagnen wurde die Ausbreitung der Besiedlung erfasst und so dokumentiert, dass auch Veränderungen während der Projektlaufzeit nachvollzogen werden konnten. Diese Dokumentation erlaubt auch eine Ausdehnung des Monitorings über das Ende des Forschungsprojektes hinaus.

Letzteres erweist sich durch zu Projektbeginn nicht vorherzusehende Verzögerungen als dringend erforderlich, da die Umsetzung von Maßnahmen zur Regulierung des Klimas erst kurz vor Ende des Projektes ausgeführt werden konnten und sich deren Auswirkungen auf die mikrobielle Aktivität derzeit noch nicht endgültig beurteilen lassen.

Zur Erfassung der Ausgangssituation erfolgten bei mehreren Ortsbegehungen auch ausschließlich zerstörungsfreien Probenahmen zur Identifizierung und weiteren Charakterisierung des Befalls. Untersucht wurde zunächst makroskopisch die Ausbreitung des Schimmels.

Die aktuelle Aktivität der Besiedlung konnte durch die Messung des Energie konservierenden Moleküls Adenosintriphosphat beurteilt werden, das in allen aktiven Zellen nachzuweisen ist.

Durch mikroskopische Untersuchungen von Kontaktproben wurden die an der Besiedlung tatsächlich beteiligten Organismen identifiziert, hier wurden ausschließlich Schimmelpilze nachgewiesen.

Diese Organismen wurden auf geeigneten Nährmedien in Kultur gebracht und isoliert. An den Isolaten konnten im Anschluss in Laborversuchen die Lebensbedingungen der relevanten Mikroben insbesondere im Hinblick auf die Ansprüche an das Klima erforscht werden, um damit den Korridor festzulegen, der in der Kapelle unbedingt vermieden werden sollte, da unter diesen Bedingungen ein Wachstum dieser Pilze einsetzen könnte.

Selbstverständlich sind für die Festlegung eines derartigen Klimakorridors auch die aus den jeweiligen Materialeigenschaften resultierenden Einschränkungen zu berücksichtigen.

Folgende Untersuchungen wurden teils in Form wiederholten Monitorings durchgeführt:

1. Makroskopisch und unter Einsatz geeigneter Vergrößerungsmöglichkeiten wie Lupe, Technoskop, Digitalmikroskop oder Makrofotografie wurden die besiedelten Bereiche im Objekt dokumentiert
2. Nachweis des Energiegehalts (ATP) auf den Oberflächen
3. Kontaktproben aus besiedelten Bereichen wurden entnommen, um die an der Besiedlung beteiligten Arten unter stärkerer Vergrößerung (400 x) zu identifizieren
4. Oberflächenproben der aufliegenden Besiedlungsanteile wurden unter aseptischen Bedingungen abgenommen, auf geeignete Nährmedien übertragen und zum Wachstum gebracht
5. Die relevanten Arten wurden isoliert und in weiterführende Untersuchungen zu Wachstumsbedingungen im Hinblick auf das Klima einbezogen
6. Untersuchungen der Kolonie bildenden Einheiten in der Raumluft ermöglichten es u. a. die Auswirkung von Besuchern in der Kapelle auf die hygienische Belastung zu beurteilen.

2.6.3 Die erzielten Ergebnisse

2.6.3.1 Dokumentation der besiedelten Bereiche

Von den insgesamt 22 Referenzflächen für das Monitoring des mikrobiellen Befalls auf den Objektoberflächen in der Schlosskapelle Celle, waren neun Flächen bereits am 13. März 2018 durch die Verantwortlichen des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege festgelegt worden. Ergänzend wurden während der Projektarbeiten von Studierenden der HAWK während des Untersuchungszeitraumes elf weitere Flächen in der ersten und zweiten Empore ausgewählt, die von nachfolgenden Studierenden zukünftig ebenfalls beprobt werden sollten.

Durchgeführt wurden an diesen Referenzflächen ausschließlich zerstörungsfreie Oberflächenkontaktproben, wie Klebefilmpräparate und Samtstempelproben. Zur Einschätzung der mikrobiellen Aktivität wurden zudem ATP (Adenosintriphosphat)-Messungen vorgenommen.

Es wurden Isolate, der auf den Objektoberflächen siedelnden relevanten Schimmelpilzarten *Aspergillus glaucus* (hier die Art *Eurotium chevalieri*) und *Aspergillus restrictus* für weitere Untersuchungen hergestellt.

Rein makroskopisch betrachtet, zeichnet sich der Schimmelbefall auf den Objektoberflächen in der Schlosskapelle Celle durch kreisrundes weißes Luftmyzel im Durchmesser von ca. 0,5 bis 1,5 cm aus (Abb. 2.6-01). Die Verteilung des auftretenden Luftmyzels ist dabei unterschiedlich ausgeprägt. So tritt auf den Objektoberflächen vor allem an den Außenwänden und in den einzelnen Nischen im Erdgeschoss ein deutlich stärkerer Befall auf, als bei den Wänden und Priechen in den beiden Emporen.



Abb. 2.6-02: Fotocollage: Schlosskapelle Celle, Prieche 12 im 1. OG, Referenzfläche 1.Empore1; links: Probeentnahmestelle im Zwickel; rechts: hell fluoreszierende Schimmelpilzkolonien bei UV-Anregung

Bei Überprüfung der Oberflächen unter UV-Anregung konnte z.B. im Kreuzrippengewölbe der Prieche 12 in der ersten Empore zwar festgestellt werden, dass nahezu an allen Oberflächen ein massiver und flächig ausgebreiteter Schimmelfall auftritt. Dieser ist offenbar jedoch überwiegend nicht aktiv (Abb. 2.6-02).

2.6.3.2 Nachweis von Adenosintriphosphat (ATP)

Um festzustellen zu können, ob es sich bei dem vorliegenden mikrobiellen Befall in der Schlosskapelle Celle um einen aktiven Schimmelfall handelt, wurden ATP-Messungen vorgenommen. Adenosintriphosphat (ATP) ist eine chemische Verbindung, die für fast alle Stoffwechselfvorgänge in lebenden Zellen verwendet wird und als Indikator für einen aktiven lebenden Befall gilt. Der Energiegehalt, also der ATP-Wert aktiver Zellen kann über eine Lumineszenz Reaktion gemessen werden. Da die absoluten Werte stark vom jeweils eingesetzten Testkit und Messgerät abhängig sind, werden sie als relative Lumineszenzeinheiten (RLU) angegeben, Vergleichen lassen sich nur Werte, die mit demselben System erzielt wurden, die Angabe erfolgt flächenbezogen.

Für die Durchführung der ATP-Messungen an den Referenzflächen in der Schlosskapelle Celle wurden zuvor gefertigte Kunststoffschablonen auf die ausgewählten Bereiche aufgelegt und diese für eine Wiederholung der Messungen fotografisch festgehalten.

Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgestellt werden, dass auf nahezu allen besiedelten Oberflächen in der Schlosskapelle Celle ein aktiver Befall vorliegt. Vor allem bei der Prieche 03, 04, 06, 08 und am Gestühl 11 im Erdgeschoss der Schlosskapelle Celle wurden hohe Werte von 1612 bis 10827 RLU/ cm² gemessen. Sehr wenig bis keine Befallsaktivität hingegen lässt sich mit Werten unter 35 RLU/ cm² bei der Prieche 01 und 02 im Erdgeschoss der Schlosskapelle feststellen. Für die Emporen ergaben die ATP-Messungen geringe Werte zwischen 23 bis 380 RLU/ cm².

Die ATP-Messergebnisse entsprechen somit dem optischen Eindruck und den voran gegangenen Ergebnissen der Klebefilmpräparate.

Die geringen Messergebnisse von 23 bis 209 RLU/ cm² in der Prieche 12 auf der ersten Empore lassen sich vermutlich damit erklären, dass der Schimmelpilzbefall unter der obersten Farbschicht des Wand- und Deckenanstriches liegt und somit mittels Oberflächenabstrich nicht erfassbar ist.

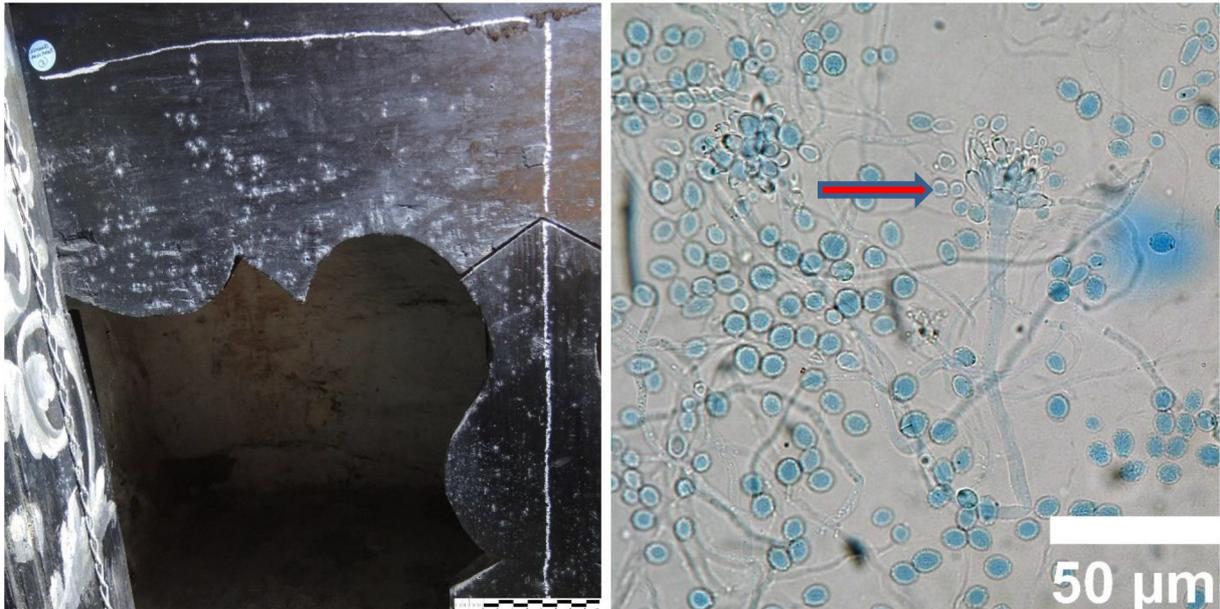


Abb. 2.6-03: Fotocollage: Schlosskapelle Celle, Prieche 06 im EG, Referenzfläche EG 11; links: Referenzfläche mit Schimmelbefall; rechts: Klebefilmpräparat mit teils optisch frischem Myzel, Konidien und Konidiophor von *Aspergillus restrictus* (→) und *Aspergillus glaucus*

2.6.3.3 Identifizierte Arten

Auf den Objektoberflächen wurden zwei siedelnde Schimmelpilzarten identifiziert, die zur Gattung *Aspergillus* gehören, ein Vertreter der Schimmelpilzgruppe *Aspergillus glaucus*, hier die Art *Eurotium chevalieri* sowie *Aspergillus restrictus* (Abb. 2.6-03). Beide Schimmelpilze gehören zu den xerotoleranten Arten und können Substrate mit geringem Wassergehalt besiedeln. Diese Schimmelpilzarten wachsen aufgrund ähnlicher Lebensbedingungen und benötigter Nährstoffe oft vergesellschaftet, wie auch in diesem Fall.

Der optische Eindruck von starkem mikrobiellem Befall auf den Oberflächen, insbesondere auf den Priechen 03, 04 und 06 im Erdgeschoss der Schlosskapelle, wird durch diese Proben bestätigt. Die Mikroskopiepräparate aus dem Erdgeschoss zeigen überwiegend ein gut ausgebildetes Myzel mit Hyphen, das einen optisch frischen Eindruck macht. Es sind auch zahlreiche Konidien bildende Konidiophoren beider Schimmelpilze vorhanden. Punktuell ist dieses Myzel sehr dicht ausgebildet (Abb. 2.6-03). Deutlich weniger Befall ist in der ersten und zweiten Empore festzustellen. Dort erscheint das Myzel zudem überwiegend eingetrocknet.

2.6.3.4 Anzucht aus Kontaktproben

Auf den Referenzflächen in der Schlosskapelle Celle wurden die aussagekräftigsten Bereiche mit Schimmelbefall für die Beprobung ausgewählt (Abb. 2.6-04), und für eine Wiederholung zudem fotografisch festgehalten. Die belasteten Objektoberflächen wurden mit sterilem Samt abgestempelt und das aufgenommene Material anschließend auf geeignete Nährböden übertragen.

Beim Abstempeln werden Schimmelpilzzellen und Konidien von den Objektoberflächen abgenommen. Für die Kultivierung von keimfähigen Zellen wurden zum einen Malzextrakt-Agar Nährmedien (MEA) und zum anderen Dichloran-Glycerin-Agar Nährmedien (DG 18) verwendet. Nach einer Inkubationszeit von 7 Tagen wurden die kultivierten Schimmelpilzkolonien ausgezählt und identifiziert

Bei dieser Methode ist zu berücksichtigen, dass auch Schimmelpilzarten kultiviert werden, die als Sporen in der Staubschicht auf den Objektoberflächen enthalten sind, aber unter den am Objekt herrschenden Bedingungen nicht wachsen können.

Auf den so beimpften Nährmedien wuchsen insgesamt bis zu neun verschiedene Mikroorganismen heran, darunter drei *Aspergillus* und mehrere *Penicillium* Arten, aber auch *Cladosporien* und Bakterien. Insgesamt wurden 19 Referenzflächen beprobt.

Die Ergebnisse der Samtstempelproben bestätigen die bislang gemachten Beobachtungen, dass im Erdgeschoss der Schlosskapelle, vor allem auf der Prieche 06, ein besonders starker mikrobieller Befall auftritt.

Auf der Probe EG7 von der Holzabdeckung der Lüftungsbohrung sind zudem zahlreiche Schimmelpilze der Gattungen *Cladosporium* und *Penicillium* angewachsen. Dieser Bereich kann jedoch nicht als typisch für die Belastung in der Kapelle angesehen werden.

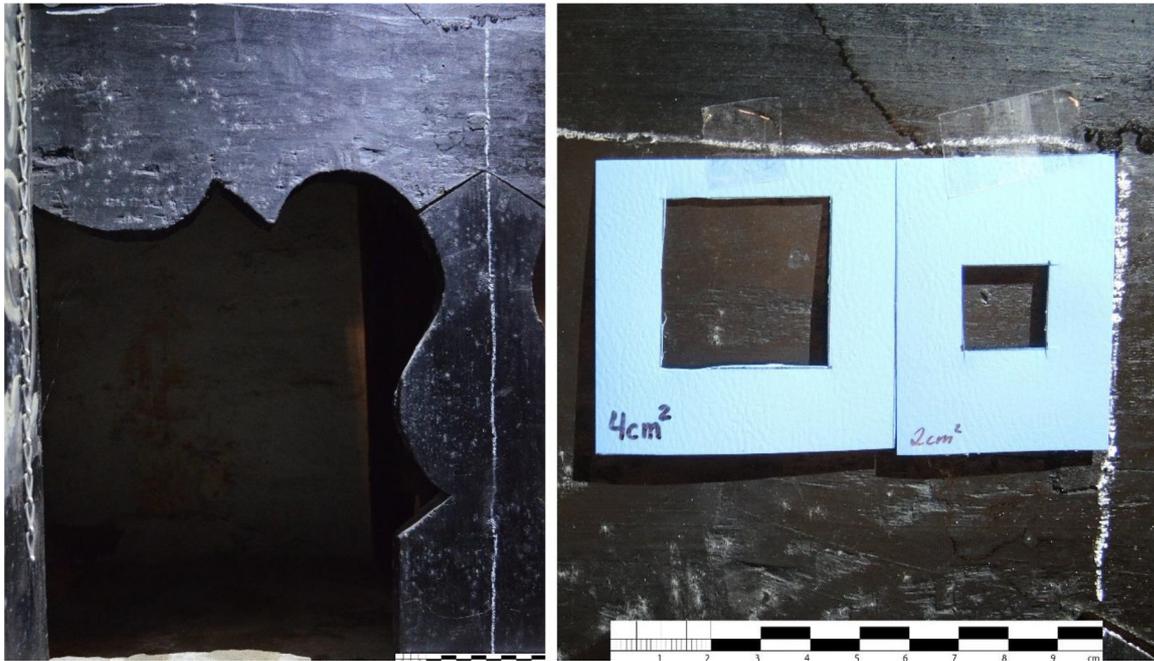


Abb. 2.6-04: Fotocollage: Schlosskapelle Cella, Prieche 06 im EG; links: Referenzfläche EG11; rechts: aufgelegte Schablonen mit Beprobungsflächen für die Samtstempelprobe (4 cm²) und die ATP-Messung (2 cm²)

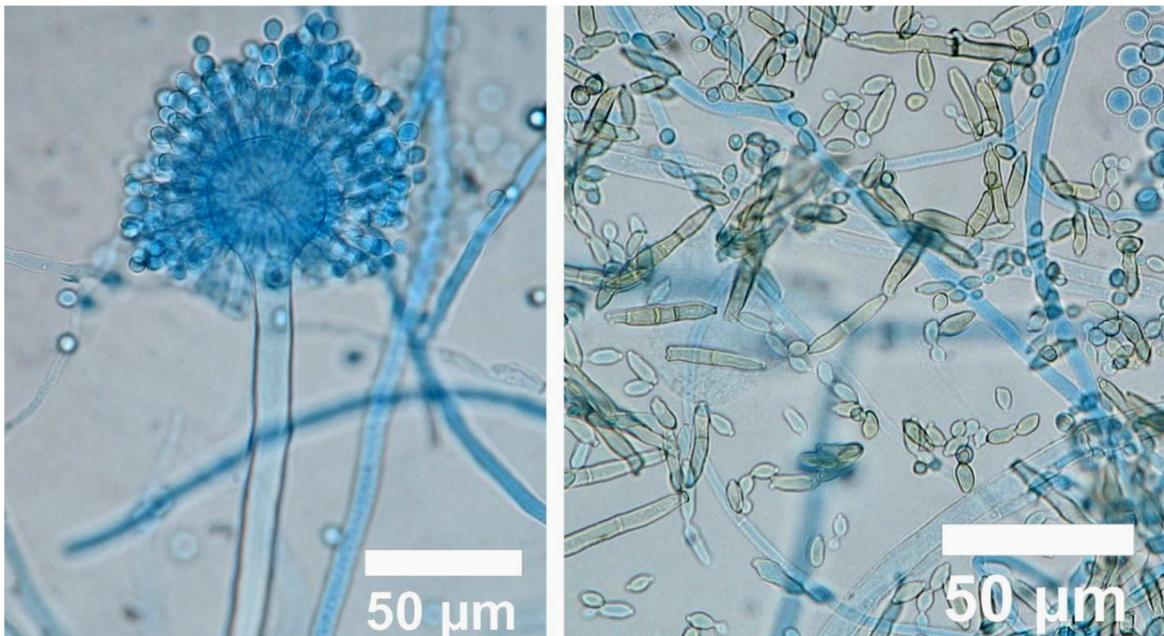


Abb. 2.6-05: Fotocollage: gewachsene Mikroorganismen auf dem DG18 Nährmedium der Samtstempelprobe EG7 (Holzabdeckung Lüftungsbohrung); links: *Aspergillus glaucus* Konidiophor; rechts: *Cladosporium* sp. Myzel und Konidien

2.6.3.5 Weiterführende Untersuchungen zu Wachstumsbedingungen Untersuchungen zu Klimabedingungen

Für die beiden in der Schlosskapelle siedelnden Schimmelpilzarten wurden Laborversuche ausgeführt mit dem Ziel deren Ansprüche an das Klima zu erfassen als Grundlage zur Festlegung zu vermeidender Klimasituationen im Objekt.

Hierzu erfolgte die Anzucht der Isolate auf Nährböden mit unterschiedlicher Wasseraktivität (dieser sogenannte a_w -Wert stellt ein Maß für die Feuchteverfügbarkeit von Materialien dar) und bei unterschiedlicher Temperatur. Über einen Zeitraum von 56 Tagen wurde der Koloniedurchmesser als Maß für das Wachstum des jeweiligen Isolats erfasst. Diese Methode kann gewählt werden, da alle Einzelansätze mit jeweils derselben Menge an Keimen beimpft worden waren.

Unter diesen Bedingungen stellt sich für *E. chevalieri* bei einem a_w -Wert von 0,753 erst ab einer Temperatur von 22 °C Wachstum ein, am günstigsten für das Wachstum wurde ein a_w -Wert von 0,933 festgestellt, allerdings konnte auch hier unterhalb einer Temperatur von 10 °C kein Wachstum erzielt werden.

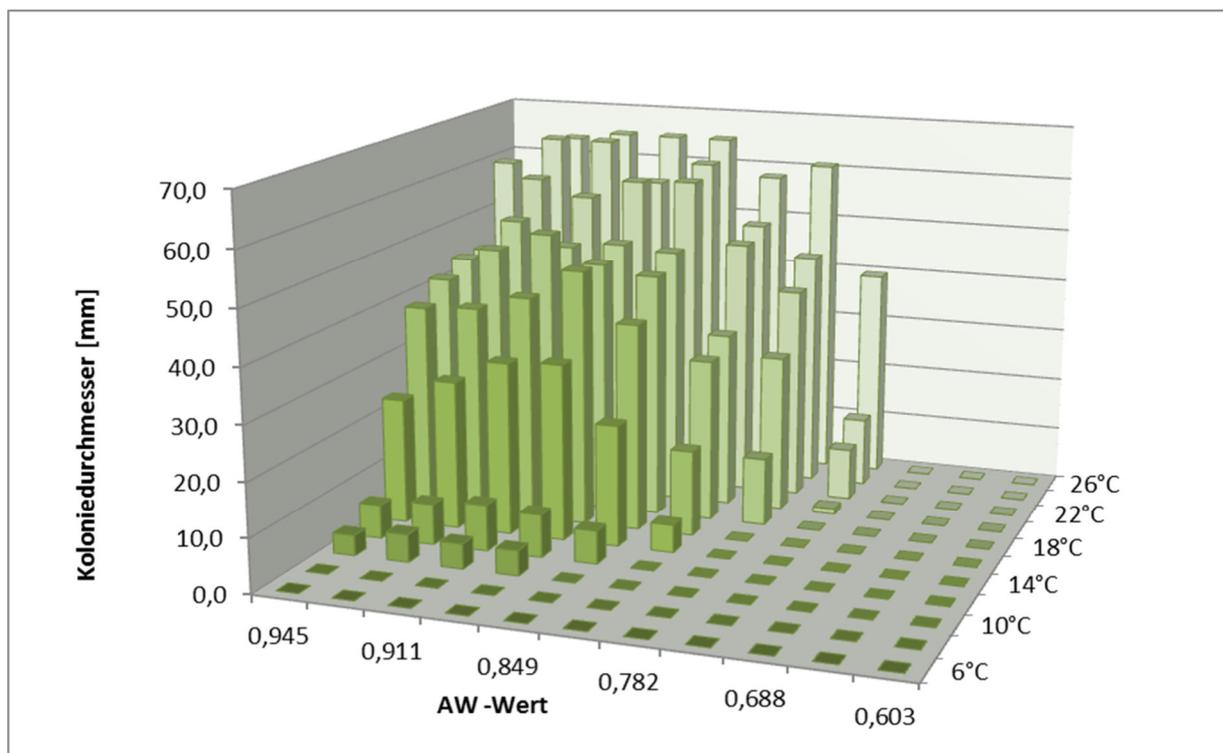


Abb. 2.6-06: Wachstum von *E. chevalieri* nach 56 Tagen Kulturdauer

Für das *A. restrictus* Isolat ergab sich eine etwas abweichende Situation. Zunächst einmal konnte hier Wachstum bereits bei 6 °C erzielt werden. Allerdings setzte das Wachstum erst ab einem a_w -Wert von 0,782 ein und auch dies nur bei einer Temperatur von 26 °C. *Aspergillus restrictus* stellt also höhere Anforderungen an die verfügbare Feuchte, wächst aber im Gegensatz zu *Eurotium chevalieri* bereits bei niedrigerer Temperatur.

Die Entwicklung des Wachstums im Laborversuch ist jedoch nicht vollständig auf das Verhalten in situ übertragbar. Im Labor konnten diese Untersuchungen nur bei gleichbleibender Temperatur und gleichbleibender Feuchte durchgeführt werden. Jede Klimaänderung im Objekt kann jedoch dazu führen, dass das besiedelte Material entweder aus der Umgebungsluft Feuchte aufnimmt oder aber Feuchte an die Luft abgibt, was letztlich von der Material- und Lufttemperatur und den jeweiligen Feuchteverhältnissen abhängt. Beide Prozesse führen dazu, dass Feuchtigkeit an den besiedelten Oberflächen vorbeistreicht. Diese erreicht somit die Schimmelpilze und kann von

diesen genutzt werden. Daher erfolgt in situ bereits Wachstum unter Bedingungen, die im Laborversuch, bei dem dieser Feuchtetransport nicht erreicht wird, nicht zum Wachstum führt.

Für den im Objekt erlaubten Klimakorridor bedeutet diese Tatsache, dass die im Laborversuch als wachstumsfördernd und damit kritisch erkannten Klimawerte in jedem Fall unterschritten werden müssen. Gleichzeitig wird die gegenseitige Beeinflussung die sich aus der Wechselwirkung zwischen Temperatur und Feuchte ergibt verdeutlicht.

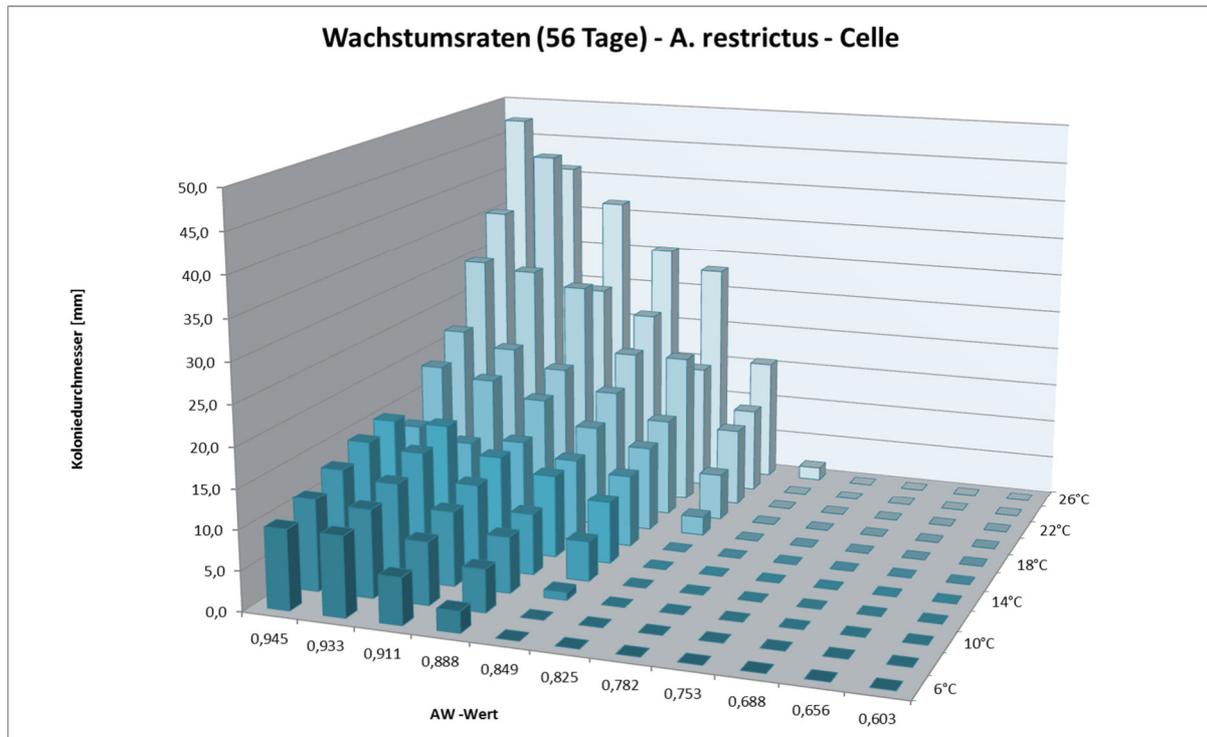


Abb. 2.6-07: Wachstum von *A. restrictus* nach 56 Tagen Kulturdauer

Darstellung der Oberflächentemperaturen über Thermografien

Um die Temperaturunterschiede im Kapellenraum zu verdeutlichen wurden mit Hilfe der Infrarotthermografie die Wärmestrahlung, genauer gesagt die Wärmeemission, von Oberflächen im Infrarotbereich (> 790 nm) erfasst und in Form eines Bildes mit Temperaturprofil (Falschfarbenbild) dargestellt. Im Kappellenraum wurde am 10. April 2018 an insgesamt 50 Punkten im Erdgeschoss, sowie auf den Emporen Thermografien aufgenommen. Zum Zeitpunkt der thermografischen Untersuchung am Vormittag des 10. April 2018 herrschten in der Schlosskapelle Cella Temperaturen von 13,1 °C im Erdgeschoss, 13,7 °C im Besucherraum hinter der Glaswand, bis 13,9 °C auf der Empore im 2. Obergeschoss. Die relative Luftfeuchtigkeit betrug im Erdgeschoss 52,5 %, im Besucherraum 53,4 % und in der zweiten Empore 55,4 %. Diese Werte zeigen bereits, dass die Temperatur der Raumluft im Erdgeschoss Richtung Nordosten, Osten und Südosten tendenziell niedriger ist und Richtung Westen ansteigt, sowie auf der zweiten Empore die höchsten Werte zeigt. Genauso verhält es sich auch mit der relativen Luftfeuchtigkeit.

Die gemessenen Oberflächentemperaturen in den erstellten Thermografien bestätigen diese Beobachtungen. So sind die Wandtemperaturen im Nordosten, Osten und Südosten am niedrigsten, vor allem bei der Wand hinter der Prieche 04 mit nur 9 °C, die Wand hinter dem Altar 05 im Osten mit 10,5 °C und die Wand hinter der Prieche 06 im Südosten mit 10 °C (Abb. 2.6-08). Die Wandtemperaturen der Nord- und Südwand der Kapelle steigen Richtung Westen weiter an und erreichen ihren höchsten Punkt an der Westwand des zweiten Obergeschosses. An dieser Stelle wurden 15,3 °C gemessen und an dem zugemauerten ehemaligen Durchgang zum dahinterliegenden Konferenzraum des Schlosses sogar 16,3 °C (Abb. 2.6-09).

Die Aussage, dass die wärmsten Oberflächen an den Wänden zu benachbarten beheizten Räumen und die niedrigsten dagegen an der nordöstlichen Außenwand auftreten, kann mit Sicherheit getroffen werden. So grenzt die Schlosskapelle in Höhe der ersten Empore mit der Nordwand an den großen Festsaal des Schlosses an. An dieser Stelle wurde eine Wandtemperatur von ca. 13,1 °C gemessen. Im Erdgeschoss bildet die Nordwand die Außenwand, wobei diese in Höhe der Prieche 01 bis 03 nach außen hin durch die Schlosseinfahrt geschützt ist, als hinter der Prieche 04. Dort ist die Außenwand stärker den äußeren klimatischen Einflüssen ausgesetzt. Im Westen grenzt die Kapelle im Erdgeschoss- und der ersten Empore an die Küche, sowie in der zweiten Empore an den Konferenzsaal des Schlosses an. Die Südwand bildet auf der gesamten Länge die Außenwand.

Die Oberflächentemperaturen der Priechen, die sich zum größten Teil fast direkt an der Wand befinden, sind sehr unterschiedlichen Temperaturen und Temperaturschwankungen ausgesetzt. Dies ist abhängig davon, ob es sich um eine Außenwand handelt, diese Wand durch die Schlosseinfahrt teilweise geschützt ist, oder ob diese Wand an die teilweise beheizten Räumlichkeiten angrenzt. So betragen die Oberflächentemperaturen z.B. bei der Prieche 03 im Erdgeschoss an der Nordwand 12,5 °C bis 13,5 °C und bei der Prieche 14 eine Empore höher an derselben Wand 13,1 °C bis 14,2 °C.

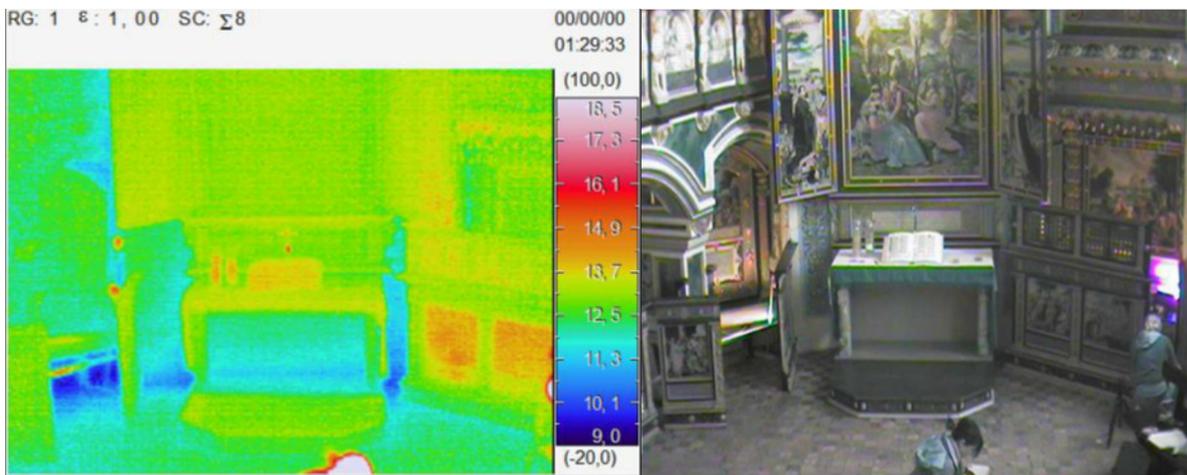


Abb. 2.6-08: Fotocollage: Schlosskapelle Celle, Messpunkt 28, 28b, Ostseite Erdgeschoss mit Prieche 03, 04, Altar 05 und Prieche 06, links: Thermografie, rechts: Farbaufnahme, die Aufnahme belegt die Temperaturverteilung, die somit auch die intensive Besiedlung der kritischen Bereiche erklärt

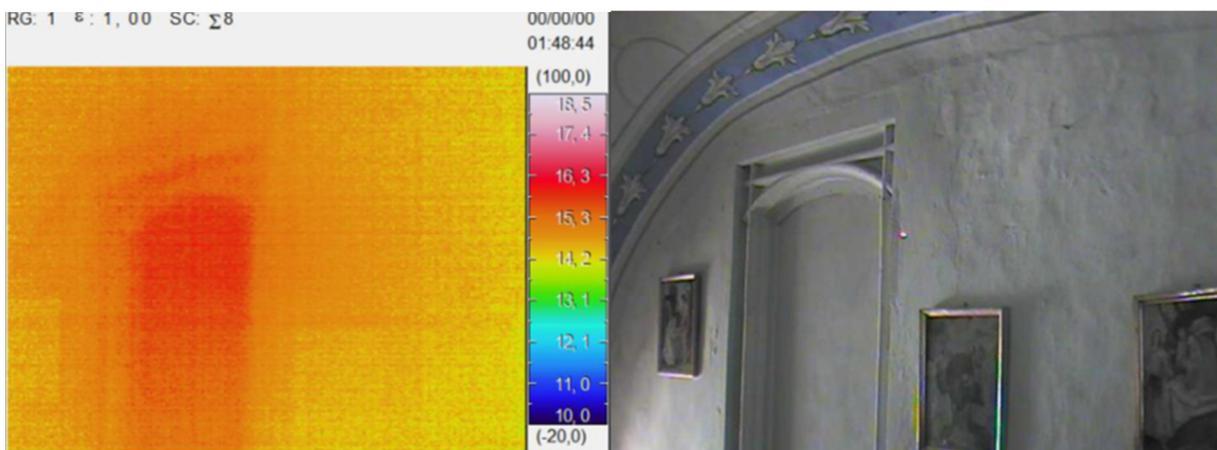


Abb. 2.6-09: Fotocollage: Schlosskapelle Celle, Messpunkt 8, 8b, Westwand 2. Empore ehemaliger Durchgang zum Konferenzraum (zugemauert), links: Thermografie, rechts: Farbaufnahme

2.6.3.6 Luftkeimmessung

Die Luftkeimmessung wurde u. a. im Innenraum der Schlosskapelle Celle vor und nach einer Veranstaltung mit Besuchern am 25. 10. 2017 durchgeführt. Durch die Messungen sollte einerseits festgestellt werden, ob innerhalb des Kapellenraumes aufgrund der Schimmelpilzbelastung eine potentielle Gefährdung für die Gesundheit von Besuchern besteht und ob sich die Keimzahl in der Luft auch im Vergleich zu früheren Messungen z. B. durch die Anwesenheit von Besuchern verändert.

Da die Keimzahl in der Außenluft saisonalen und regionalen Schwankungen unterworfen ist, werden Referenzmessungen im Außenbereich durchgeführt. Die Artenvielfalt differiert ebenfalls zwischen Innenräumen und der Außenluft, weshalb das dort befindliche Artenspektrum in die abschließende Bewertung miteinbezogen werden muss. Die angegebenen Werte für die Kolonie bildenden Einheiten (KbE), also keimfähigen Zellen wurden jeweils pro Kubikmeter Luft berechnet.

Bei dieser quantitativen Methode werden die kultivierbaren Pilzsporen mittels Luftkeimsammler auf geeigneten Nährmedien abgeschieden und anschließend im Labor kultiviert. Verwendet werden als Nährböden Malzextrakt-Agar (MEA) und Dichloran-Glycerin-Agar (DG18).

Die Außenluftkeime setzten sich zu diesem Zeitpunkt hauptsächlich aus *Cladosporium species* und *Geotrichum candidum* zusammen. Im Besuchervorraum (Werte hier nicht angezeigt) hinter der Verglasung beinhaltete die Raumluft vor allem Keime aus *Cladosporium species* und *Aspergillus fumigatus*. Die höhere Anzahl an Keimen in diesem „Besucherraum“ im Vergleich zum restlichen Kapellenraum hängt vermutlich mit der Nähe zum Eingangsbereich zusammen. Durch das Öffnen der Türen bei Führungen können mit der Außenluft auch Keime in den Besuchervorraum gelangen.

Ein Einfluss der Besucher auf die Keimbelastung der Luft in der Kapelle lässt sich aufgrund der Messungen nicht belegen. Die geringfügigen Veränderungen (Abb. 2.6-10 a-e) sind bei der hier erfassten Veranstaltung nicht als signifikant einzuordnen.

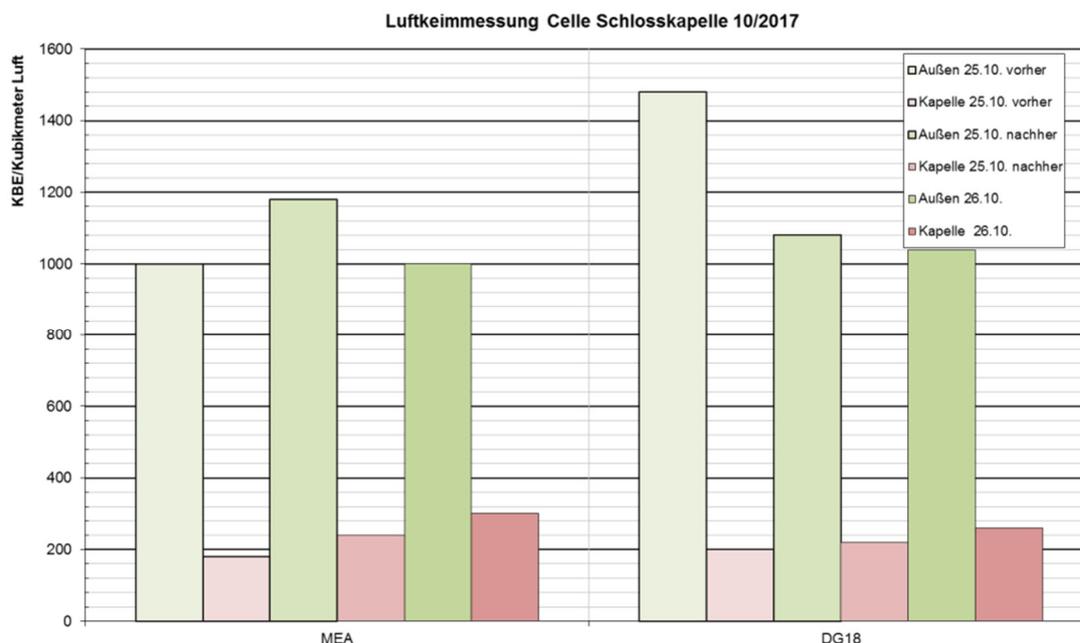


Abb. 2.6-10 a: Keimbelastung der Luft am 25./26.10.2017

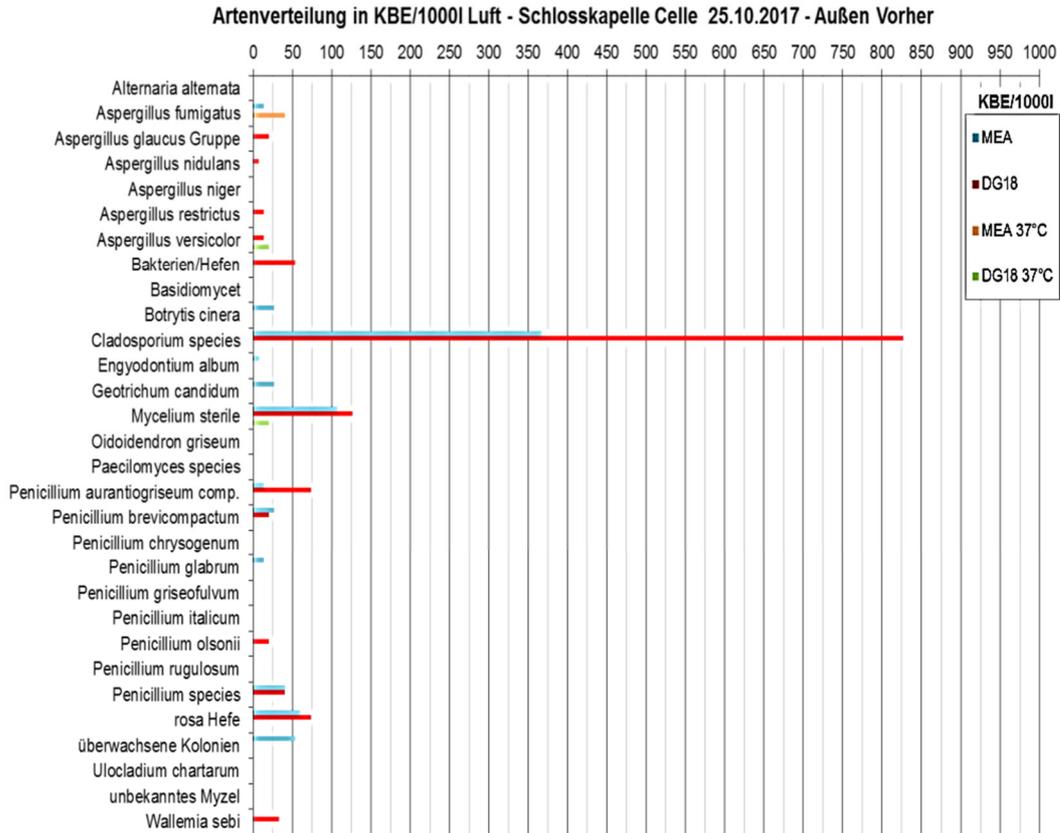


Abb. 2.6-10 b: Artenverteilung in der Außenluft vor der Veranstaltung

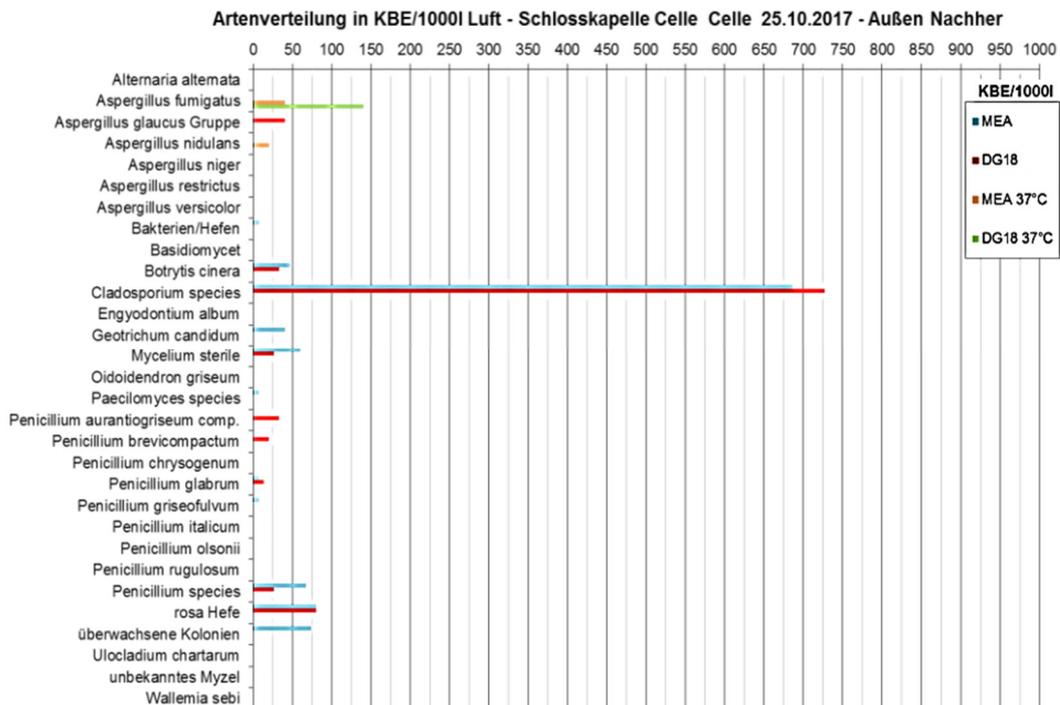


Abb. 2.6-10 c: Artenverteilung in der Außenluft nach der Veranstaltung

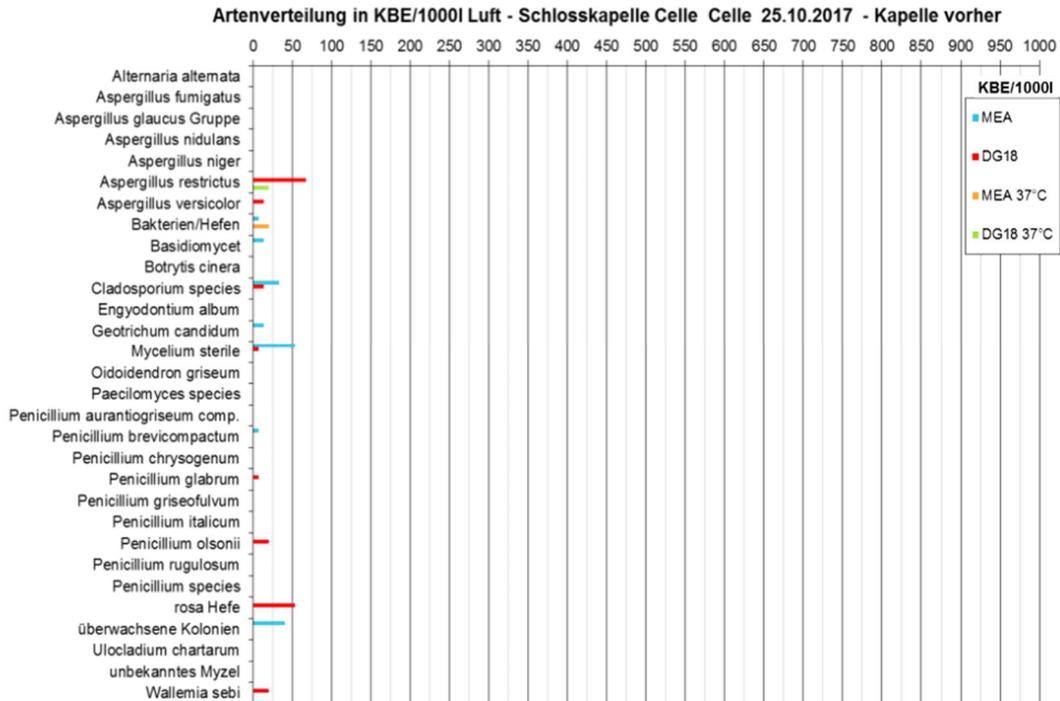


Abb. 2.6-10 d: Artenverteilung in der Kapelle vor der Veranstaltung

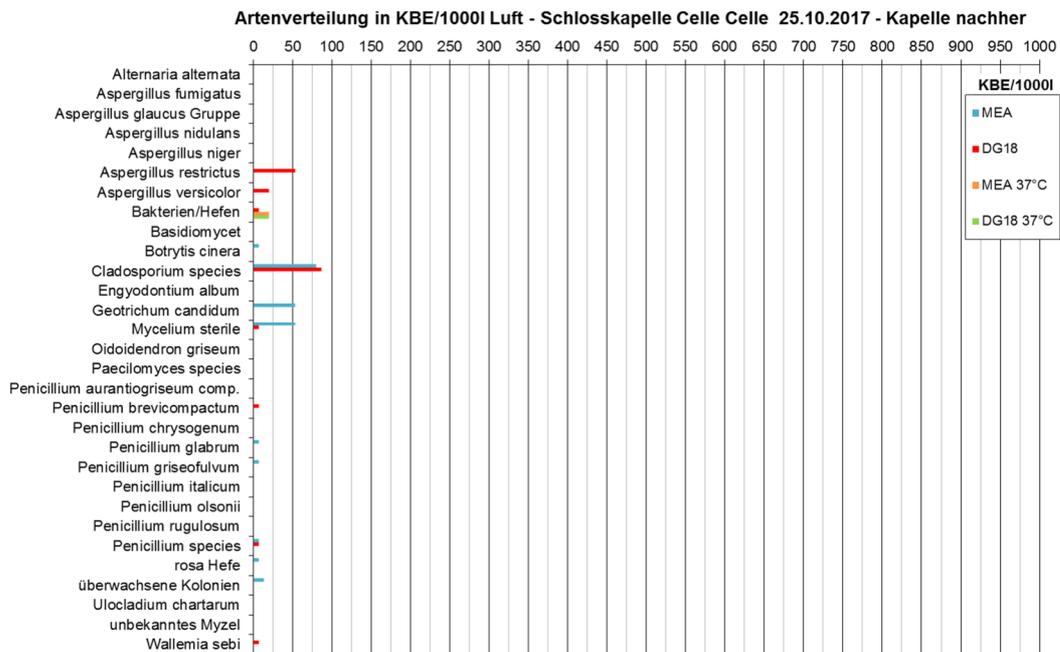


Abb. 2.6-10 e: Artenverteilung in der Kapelle nach der Veranstaltung
Abb. 2.6-10 a-e: Luftkeime im Zusammenhang mit einer Veranstaltung

2.6.4 Zusammenfassung

Während des Messzeitraums vom 10. und 11. April 2018 stieg die rel. Luftfeuchtigkeit bei konstanter Temperatur in der Kapelle um 3-9 % an. Teilweise wurde im Innenraum eine rel. Luftfeuchte von über 61 % erreicht. Grund dafür war vermutlich die ungewöhnlich hohe Anzahl an Menschen die sich zu den Messzeiten im Raum aufhielten. Es zeigten sich auch deutliche Temperaturunterschiede in unterschiedlichen Bereichen im Innenraum. Besonders warm war es im Erdgeschoss im Besuchervorraum und an der Westwand, aber auch auf der zweiten Empore in Richtung Westen. Hier befinden sich angrenzend im Erdgeschoss die Konferenzräume und auf der Empore der Festsaal des Schlosses. Am kältesten war es an der Süd- und Ostwand. An diesen befindet sich kein angrenzender Raum. Somit sind diese der Witterung und dem Außenklima ausgesetzt. Hier zeigte sich, dass die angrenzenden Räume oder Bauelemente an den Außenräumen der Schlosskapelle einen Einfluss auf das Raumklima haben.

Die Oberflächentemperatur der Raumausstattungen wies eine Differenz von 2-6 °C im Vergleich zur Umgebungstemperatur auf.

Im Projektverlauf wurden in den identifizierten kritischen Bereichen wiederholt Messungen des ATP Gehalts durchgeführt, die Auskunft über die Aktivität der Besiedlung im Jahresverlauf und einen Vergleich zur weiteren Entwicklung insbesondere auch nach den inzwischen erfolgten Eingriffen in das Raumklima ermöglichen.

Nach den erzielten Ergebnissen zur mikrobiellen Besiedlung konnte ein Klimakorridor unter Einbeziehung materialtechnischer Einschränkungen und der bauphysikalischen Ergebnisse definiert werden. Die Auswirkungen der Eingriffe in das Raumklima sollten zunächst in kurzen Intervallen (max. 6 Monate) verfolgt werden. Zu einem späteren Zeitpunkt können diese Intervalle ausgedehnt werden. Der Bedeutung des Objektes geschuldet sollte jedoch auch langfristig ein Monitoring weiter sichergestellt werden.

Wegen der Corona bedingten Einschränkungen konnte bisher an den gemeinsam festgelegten Monitoring-Testflächen lediglich eine Nachuntersuchung zur mikrobiellen Aktivität erfolgen. Die erzielten Ergebnisse wiesen keine nennenswerte Aktivität auf, was auf eine im Sinne des Vermeidens mikrobieller Schädigung erfolgreiche Klimaregelung hinweist.

Allen Beteiligten, insbesondere den Studierenden sei an dieser Stelle für die hervorragende Arbeit gedankt.

2.7 Referenzflächen-Monitoring

Christina Achhammer und Christoph Fiebiger

Das Monitoring ist in der präventiven Konservierung ein wesentlicher Punkt und beinhaltet die Erfassung, Beschreibung und langfristige Beobachtung der Kunstobjekte und ihrer Umgebungsbedingungen, um langfristig Veränderungen und Risiken abschätzen und vermeiden zu können. Mit dem projektbegleitenden Referenzflächen-Monitoring wurden die Staubentwicklung, der mikrobielle Befall und die klimabedingten Materialschäden optisch erfasst, dokumentiert und bewertet. Die vorhandenen nutzungsbedingten anthropogenen Umweltschäden wurden dabei hinsichtlich der verwendeten vielfältigen Materialien differenziert betrachtet sowie auch in Bezug auf Veränderungen fotografisch und messtechnisch dokumentiert. Grundlage waren neben den Schadenskartierungen von 1991, 1996 und 2014²⁵, die konservierungswissenschaftlichen Untersuchungen des Fraunhofer Instituts für Holzforschung und des NLD in den Jahren 1990 bis 1994 zu Holzfeuchtemessungen²⁶.

Außerdem flossen Erkenntnisse und Erfahrungen der unter Punkt 2.2 eingehend beschriebenen verschiedenen Nutzungsphasen, von geringer Nutzung mit Vernachlässigung über Übernutzung mit massiven Schäden bis hin zum Einbau der Schutzverglasung 1995 mit jährlicher Wartung und Pflege, mit ein.

Seit April 2017 wurden vier Monitoringpunkte zur Entwicklung von Staubablagerungen und vier weitere zum sichtbaren Wachstum mikrobiellen Befalls beobachtet. An siebzehn materiell unterschiedlichen Bereichen wurde klimabedingte Bewegung an Verwölbungen, Rissen und Ausbrüchen erfasst. Die Referenzbereiche werden seitdem regelmäßig überprüft. In diesem Zeitraum fanden verschiedene Maßnahmen, 16 Nutzungserprobungen und eine Testandacht mit jeweils bis zu 20 Personen.

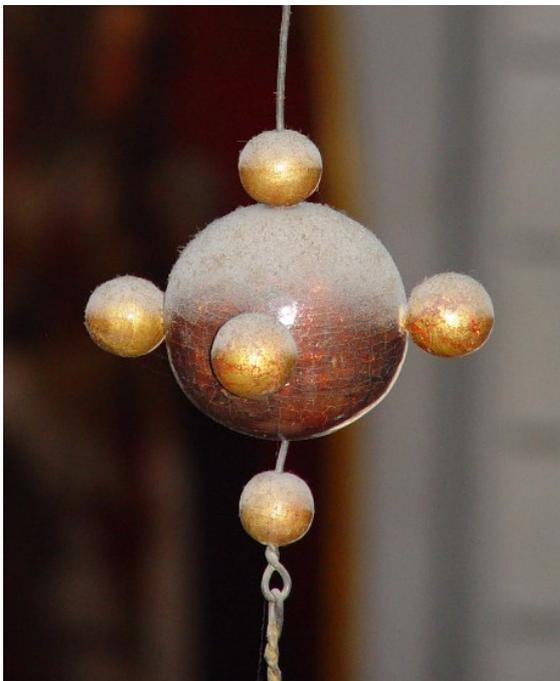


Abb. 2.7-01: Detail eines an der Decke hängenden Objektes, das ohne Gerüst nicht zu erreichen und von einer dicken Staubschicht bedeckt ist. (Foto Achhammer, NLD, 2019)

²⁵ Die Schäden kartierten 1991 und 1996 das NLD und 2014 die HAWK.

²⁶ Die Untersuchungen von 1990 bis 1994 wurden vom NLD und Fraunhofer WKI durchgeführt (Schwarz 1992; Schwarz und Gadesmann.1994).

2.7.1 Monitoring Staub

Staub ist nicht nur eine optische Beeinträchtigung, sondern ist aus konservatorischer Sicht gefährlich, da er bei hohen Raumfeuchten einen perfekten Nährboden für mikrobiellen Befall bietet, wodurch die Bindemittel der Bildschicht abgebaut werden.

Die letzte Teilreinigung der Kapelle im Rahmen der jährlichen Wartung fand im Frühjahr 2017 statt. Dabei konnten nur die Bereiche vom Staub befreit werden, die ohne Gerüststellung erreichbar sind. Das bedeutet, es gibt auch Oberflächen, auf denen sich vermutlich seit dem Wiedereinbau des Inventars in den 1970er Jahren, Staub abgelagert.

Eine einfache Methode Staubablagerungen optisch und quantitativ einschätzen zu können, ist über dunkle glatte Fläche, hier schwarz glasierte, flache Teller mit einem Durchmesser von 22 cm. Aufgestellt im Februar 2017 sollten sie Tendenzen zu Menge und Verteilung von Staub erkennbar machen. Die Aufstellungspunkte wurden nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- ms01 und ms02: Prieche 03 und 06 im Erdgeschoss, je Nord- und Südseite, mit wenig Luftzirkulation in Sitzhöhe
- ms03: Treppenaufgang zwischen Erdgeschoss und Westempore auf der Südseite mit freier Luftzirkulation
- ms04: Orgelbank im 1. Obergeschoss auf der Nordseite, leicht eingeschränkte Luftzirkulation durch Brüstung und Brüstungsaufsatz.

Die Monitoringflächen wurden in regelmäßigen Abständen jeweils zur Hälfte vom Staub gereinigt, die andere Hälfte seit der Aufstellung belassen wurden.

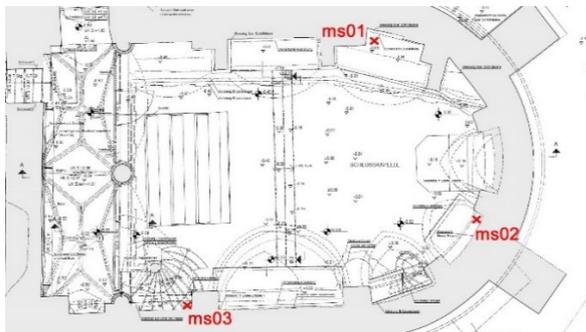


Abb. 2.7-02 Referenzflächen im Erdgeschoss
(Grundrisspläne SBLH 2016)

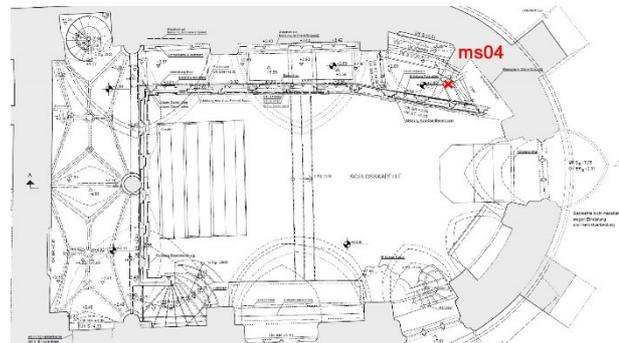


Abb. 2.7-03 Referenzflächen im 1. OG

Die Staubverteilung nahm von unten nach oben ab. Die geringste Staubansammlung war auf der Monitoringfläche ms04 auf der Emporenebene zu beobachten, die nur im Rahmen des Referenzflächen - Monitorings von den Autoren betreten wurde, kaum bei Maßnahmen und nicht für Nutzungserprobungen.

Auf den Tellern ms01 und ms02 in den Priechen waren die Staubschichten, die sich im selben Zeitraum dort abgesetzt hatten, geringfügig dichter. Zwar ist die Luftbewegung in den Priechen durch den rückversetzten Einbau und die Brüstung gebremst, aber in der Erdgeschosebene fand mehr Aktivität statt: Arbeiten an Kanzel, Gestühl, etc. und Nutzungserprobungen.

Als eingeschränkt vergleichbar erwies sich die Monitoringfläche ms03, hier lagerte sich neben feinem Staub auch herabrieselnde Wandfarbe ab. Gegenüber den anderen Probestellen scheint die Staubentwicklung hier dennoch am höchsten zu sein. Der Aufstellungsbereich ist freistehend und auch hier trägt die Aktivität von Menschen zur Erhöhung des Staubaufkommens bei. Ob die

Nähe zur Schutzverglasung mit ihrer randseitigen Luftzirkulation zum Besucherraum den Staubeintrag durch die regelmäßigen Besuchergruppen erhöhen, ist noch zu hinterfragen.

Jahreszeitlich bedingte Mengenveränderungen von Stäuben konnten nicht beobachtet werden. Eine qualitative Auswertung der Stäube steht noch aus. Neben neu eingebrachtem Staub wurde sicherlich auch alter Staub sowohl durch den natürlichen Luftwechsel als auch durch die Aufwirbelung aufgrund von Aktivitäten in der Kapelle im Raum verteilt. In der Konsequenz wird zeitnah eine Grundreinigung der gesamten Schlosskapelle angestrebt. Wie, wo und in welchem Ausmaß sich Stäube durch die Be- und Entlüftungsanlage sowie eine personenbegrenzte Anzahl von Besuchern auf die Staubentwicklung zukünftig auswirken werden, ist im Rahmen der Wartung und Pflege weiterhin zu beobachten, zu bewerten und zu regulieren.

2.7.2 Monitoring des mikrobiellen Befalls

Wie unter Punkt 2.7.1 bereits erwähnt, ist aktiver mikrobieller Befall eine Gefahr für das Inventar, weil hier organische Materialien, wie zum Beispiel Bindemittel, abgebaut werden. In größeren Mengen kann er auch für den Menschen gesundheitsschädlich sein.

Zum Teil großflächig auftretender Schimmel ist in der Schlosskapelle bereits zu Zeiten der Übernutzung ein konservatorisches Problem für Inventar und Raumschale gewesen. Mit dem Einbau der Schutzverglasung 1995 und der Unterbindung des direkten Besucherverkehrs wurde das Wachstum der vorhandenen Schimmelarten *Aspergillus restrictus* und *Aspergillus glaucus*²⁷ nicht mehr durch den Feuchteintrag durch Personen, aber weiterhin durch das Außenklima beeinflusst. Betroffen sind vor allem schlecht durchlüftete Bereiche, z.B. die Innenseiten der Priechen und die Unterseiten des Gestühls.



Abb. 2.7-04: ms03 am 06.02.2018

Linke Referenzfläche: Staubablagerung und Wandfarbenpartikel vom 07.02.2017 bis 06.02.2018.
Rechte Referenzfläche: Am 23.10.2017 gereinigt; vom 23.10.2017 bis 06.02.2018 leichte Staubzunahme und wenig Wandfarbenpartikel.



Abb. 2.7-05: ms03: Aufnahme vom 08.07.2019

Linke Referenzfläche: Staubablagerung und Wandfarbenpartikel vom 07.02.2017 bis 08.07.2019; Gesamtzunahme von Staub und Wandfarbenpartikel.
Rechte Referenzfläche: 06.02.2018 bis 08.07.2019; Zunahme von Staub und Wandfarbenpartikel.

²⁷ Siehe Kapitel 2.6, Beitrag Karin Petersen, Ullrich Fritz, Gabriele Krüger: Untersuchung zur mikrobiellen Belastung in der Schlosskapelle Celle.

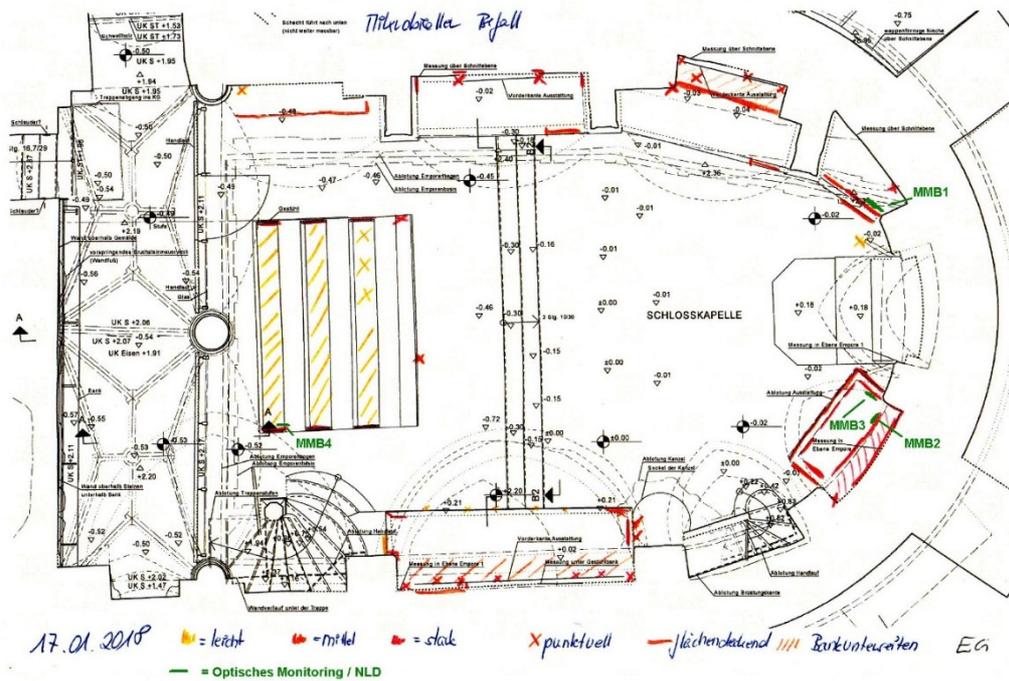


Abb. 2.7-06
Kartierung der Monitoringstellen
(Grundrissplan Staatliches Baumanagement Lüneburger Heide, 2016)

Im März 2018 wurden elf schimmelbefallene Bereiche zur umfassenden Beprobung durch die HAWK ausgewählt, vier davon zusätzlich für das Referenzflächen - Monitoring. Nach der ersten Untersuchungsrunde sind alle Bereiche trocken und mit einem Spezialsauger gereinigt worden, bei den vier Sonderreferenzflächen ist jeweils ein definierter Teilbereich ungereinigt verblieben.

Seit Juli 2018 wurden diese vier Referenzen von den Autoren regelmäßig optisch beurteilt, fotografisch dokumentiert und verglichen. Bis Sommer 2019 kam es auf den vorab gereinigten Bereichen bei wetterbedingten Feuchteerhöhungen wieder zu kreisrundem weißem Myzel mit einem Durchmesser bis zu ca. 0,5 cm, während an den ungereinigten Bereichen eine weniger optisch signifikante Ausbreitung in der Fläche zu beobachten war. Mit Verringerung der Raumfeuchte verkleinerte sich der weiße Schimmelflaum auch wieder.

Seit dem Einbau der Be- und Entlüftungsanlage im Mai 2019 mit einer einprogrammierten Klimagrenze von 68% r.F., und nachfolgender Optimierung der Luftstromführung sowie der Nachjustierung des Klimakorridors auf 55 - 60% r.F. verringerte sich das Wachstum optisch, vor allem unter dem Gestühl.

Die Beobachtungen werden fortgeführt, ggf. müssen noch weitere kleine Querstromlüfter in den Priechen und schlecht durchlüfteten Bereichen nachgerüstet werden. Es kann aber davon ausgegangen werden, dass eine Reaktivierung des mikrobiellen Befalls durch die Be- und Entlüftungsanlage nachhaltig unterbunden wird, sofern die Vorgaben der denkmalverträglichen Nutzung eingehalten werden.



Abb. 2.7-07 und Abb. 2.7-08: Referenzfläche MMB4, Innenseite der südlichen Gestühlwange unten am 04.09.2018 (links) und am 08.07.2019 (rechts): Verblässende Myzelflecken deuten auf eine tendenziell abnehmende mikrobiologische Aktivität (Fotos Fiebiger, NLD)

2.7.3 Monitoring Materialbewegung

Organische Materialien sind hygroskopisch und reagieren mit Volumenveränderungen und damit verbundener Materialbewegung auf Klimaschwankungen. Insbesondere die Quell- und Schwindbewegungen hölzerner und textiler Bildträger stellen ein großes Schadenspotential für die Materialgefüge der Gemälde und der gefassten Rahmungen dar. Es kann zu Schichtentrennungen innerhalb der Bildschicht bis hin zu substantiellen Verlusten und im Extremfall zum Reißen der Träger führen. Aber auch an mineralischem Material führt vor allem Feuchte zu Ablätterungen oder Abspregungen durch Korrosion eingearbeiteter Eisenteile.

Im Zeitraum von April 2017 bis Juni 2020 wurden Veränderungen an Referenzflächen der verschiedenen Materialgruppen mit einfachen Mitteln vorwiegend beobachtet, zum Teil auch gemessen. Die Längen- und Breitenveränderungen von Rissen in gefassten hölzernen und mineralischen Ausstattungsbereichen konnte über die Spannungsbewertung aufgeklebter Japanpapierstreifen beobachtet werden. Es wurden Spannungsveränderungen erfasst, diese führten aber an keiner Stelle zu einer signifikanten Auffaltung oder zum Zerreißen der Monitoringpapiere.

An der Rückseite des Tafelgemäldes „Abraham“ ist sowohl die Veränderung der Rissbreite an drei Stellen als auch die Bewegung in der Risstiefe zusätzlich mit einer digitalen Schieblehre gemessen worden. Für die Rissbreite konnte ein Durchschnittswert von 0,78 mm Bewegung ermittelt werden, für die Risstiefe 0,49 mm. Eine weitere Vergrößerung des Risses konnte innerhalb des Messzeitraumes nicht festgestellt werden. Die Bewegung dieser Gemäldetafel scheint daher in einem tolerierbaren Bereich zu liegen.

An einem mineralischen Ausbruch am Treppenaufgang zur Westempore vergrößerte sich eine vorhandene Fehlstelle zwischen Juli 2017 und Februar 2018 um ein Vielfaches, ausgelöst durch Korrosion eines Armierungseisens. In den folgenden Messmonaten konnten an dieser Stelle keine weiteren Veränderungen des Klebestreifens oder Ausbrüche beobachtet werden. Dies gilt auch für alle anderen Bereiche mineralischer Materialien.



Abb. 2.7-09: Tafelgemälde „Abraham“ am Gestühl mit durchlaufendem Riss vorne und hinten (Foto Loeper, Celle 2012)



Abb. 2.7-10: Detailaufnahme: Riss mit Versatz (Foto Achhammer, NLD, 2019)

Das größte Schadenspotential bergen die Tafelgemälde, die bei einer Restaurierung 1907 auf bis zu 0,5 cm gedünnt und parkettiert wurden. Da eine rückseitige Versteifung Klimaschwankungen nicht unterbindet, sondern Spannungen im Gefüge eher fördert, entfernte man die Parkettierungen bei der Restaurierung 1978. Die irreversible Dünnung der Tafeln hat klimaabhängige konvexe Verwölbungen zur Folge, bei denen sich die verschiedenen, gealterten und daher weniger elastischen Materialien, Holz, Grundierung, Malschicht, Öllasur, unterschiedlich schnell und nur schwer im Verbund bewegen. Für die Einschätzung der Bewegung sind fünf gedünnte Tafelgemälde unterschiedlicher Formate ausgesucht und jeweils der Abstand der vier Gemäldeeckpunkte sowie der Abstand der mittigen Randpunkte oben und unten zum Rahmen mit einer digitalen Schieblehre gemessen worden. Mit dieser Methode konnten Bewegungstendenzen, aber ohne 100%ige Messgenauigkeit dokumentiert werden. Bei über 1000 Messungen konnte immer Bewegung registriert werden, in einem Fall mit bis zu drei Millimetern. Anzumerken ist, dass es innerhalb des Messzeitraumes zu keiner extremen Klimasituationen kam.

Über die Schieblehrenmessung kann kein unmittelbarer zeitlicher Zusammenhang zu klimatischen Ereignissen hergestellt werden. Da aber mit der Inbetriebnahme der Be- und Entlüftungsanlage Feuchtespitzen gekappt werden, sollten extreme Materialbewegungen künftig ausgeschlossen sein.

Mehr Aufschluss über Reaktionszeiten von klimaausgelösten Bewegungen kann eine für den Holztafelbereich neue Untersuchungstechnik liefern, die zurzeit in Zusammenarbeit mit der Materialprüfanstalt (MPA) der Universität Stuttgart an einem gedünnten Tafelgemälde (Abb. 2.7-11) in der Schlosskapelle erprobt wird. Dafür wurden Dehnmessstreifen auf der Tafelrückseite in Längs- und Querrichtung des Holzfaserverlaufes geklebt (Abb. 2.7-12), die mit einem Notebook und einer Messeinheit verbunden sind. So wird jede Klima bedingte Bewegung des Tafelgemäldes in Echtzeit aufgezeichnet und über Diagramme lesbar gemacht (Abb. 2.7-13).

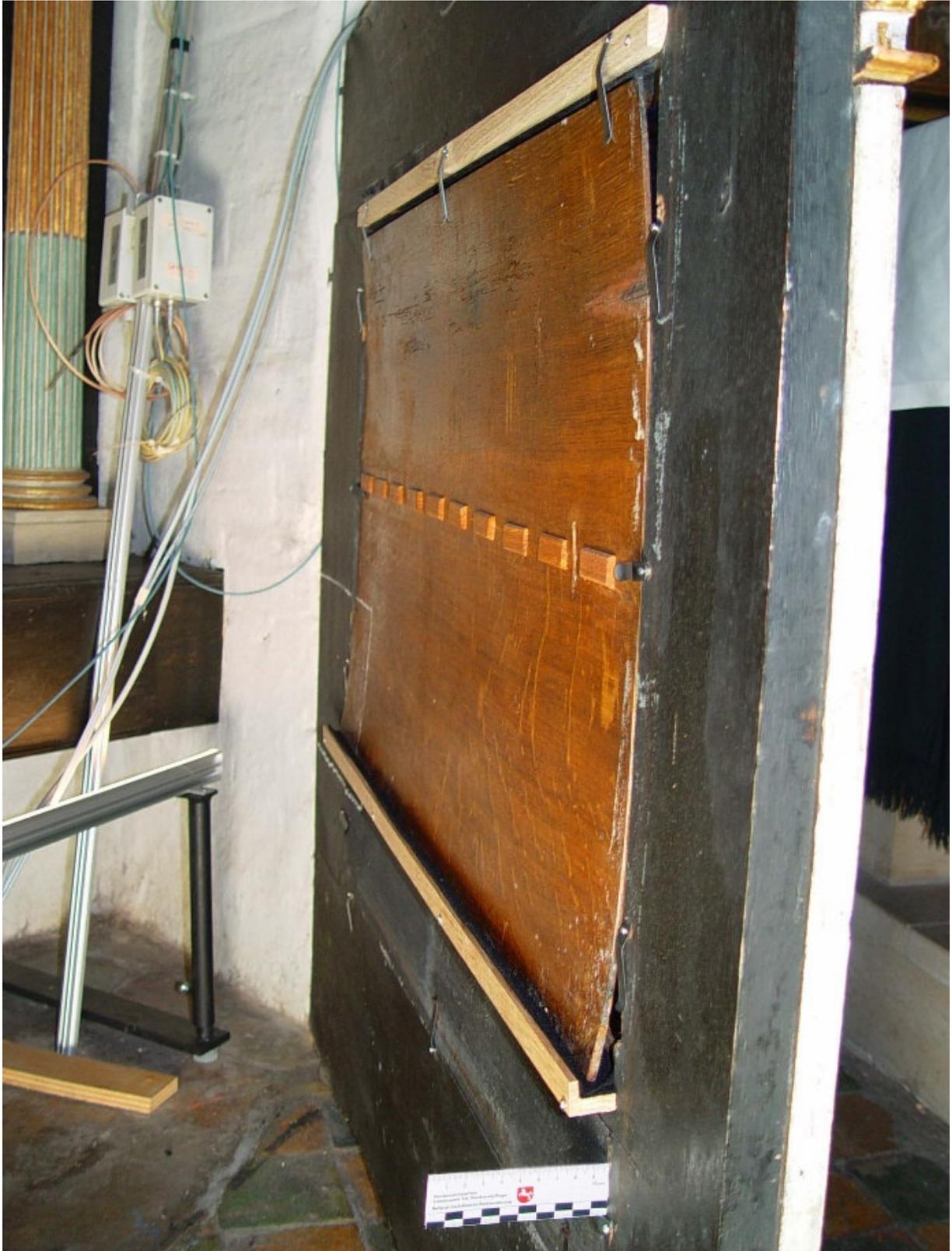


Abb. 2.7-11:
Rückseite des Tafelgemäldes „Abendmahl“ in der Tür der Prieche 04. Das gedünnte Tafelgemälde hat eine konvexe Verwölbung quer zur Holzfaser.
(Foto Achhammer, NLD, 2020)

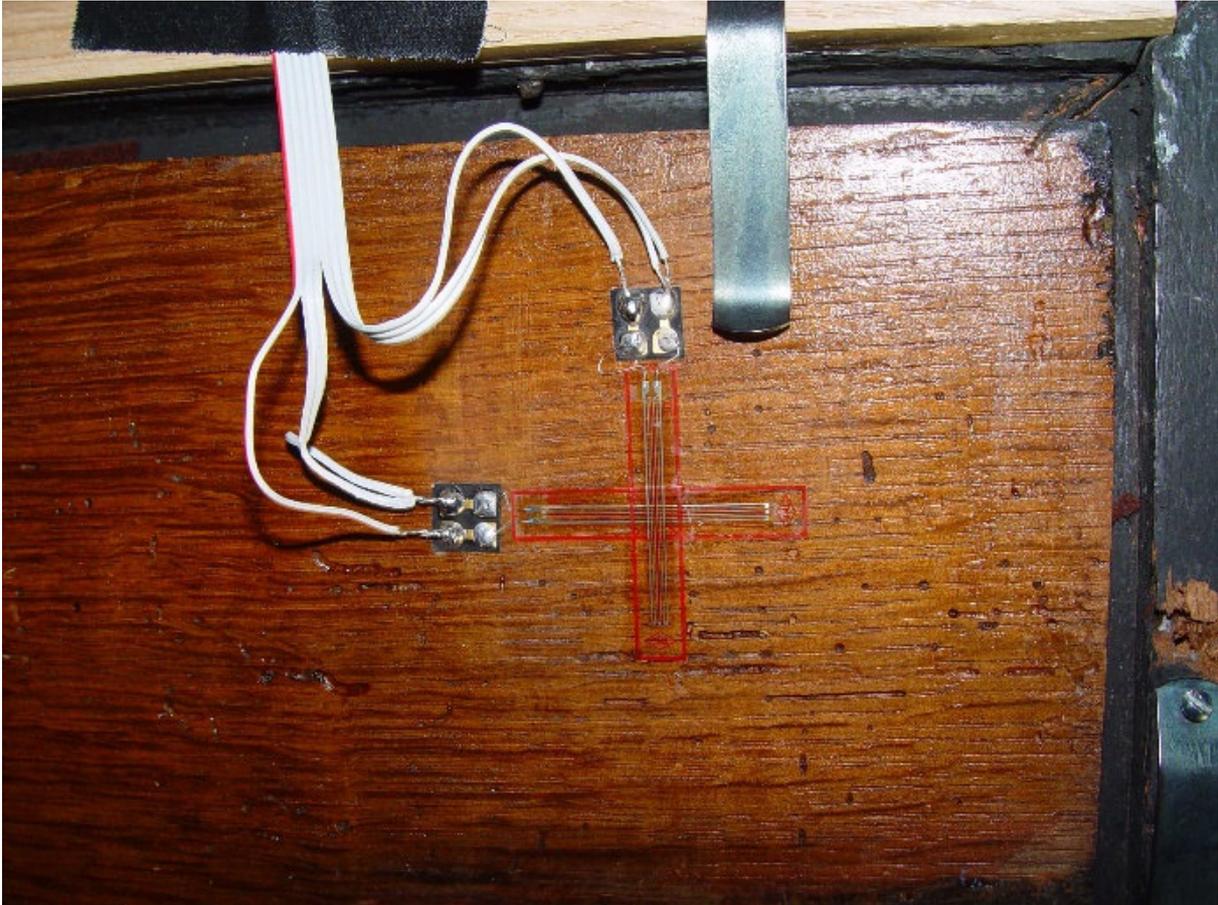


Abb. 2.7-12: Detail des Tafelgemäldes Abendmahl; die verkabelten und über Kreuz gelegten Dehnmessstreifen wurden rückseitig in der oberen rechten Ecke des Gemäldes aufgeklebt. (Foto Achhammer, NLD, 2020)

Zum Vergleich wurde eine aus historischem Eichenholz gefertigte Holzplatte im Eckbereich gleichfalls mit Dehnmessstreifen ausgestattet und in der Nähe der Bildtafel platziert. Die nicht gekrümmte Holzplatte wurde, um den Einfluss von Feuchte zu verringern, in Folie eingepackt, und spannungsfrei freistehend aufgestellt.

Auch wenn diese Messmethode noch in der Testphase ist, konnte bereits eindeutig bewiesen werden, dass die auf 0,5 Zentimeter gedünnte Tafel direkt und ohne Zeitverzögerung auf Feuchte- und/oder Temperaturschwankungen hauptsächlich quer zur Holzfaser reagiert. Selbst geringfügige Klimaschwankungen, die einzelne Personen in der Nähe des Gemäldes auslösen, bewirken Materialbewegungen, die mit den Messstreifen sofort erfasst werden. Die größte Dehnung in Querrichtung wurde mit 0,07 Millimeter pro Meter am 17.01.2020 zwischen 16 und 17:30 Uhr aufgezeichnet.²⁸ Ursache war eine Nutzungserprobung im Innenraum der Schlosskapelle mit zwei aufeinander folgenden Besuchergruppen mit je 17 und 15 Personen.

Ziel dieses Versuchsaufbaues ist die Einrichtung eines dauerhaften Monitorings mit Online-Zugriff auf die Messwerte. Der Ursache-/Wirkungszusammenhang der klimabedingten Holzverformung wird zurzeit in einem Forschungsprojekt der MPA Stuttgart untersucht. Beabsichtigt ist dabei auch die Erstellung von Bewertungskriterien zur Schadensrelevanz der Verformungsdaten.

²⁸ Vgl. Frick 2020: Zwischenbericht der MPA Stuttgart.

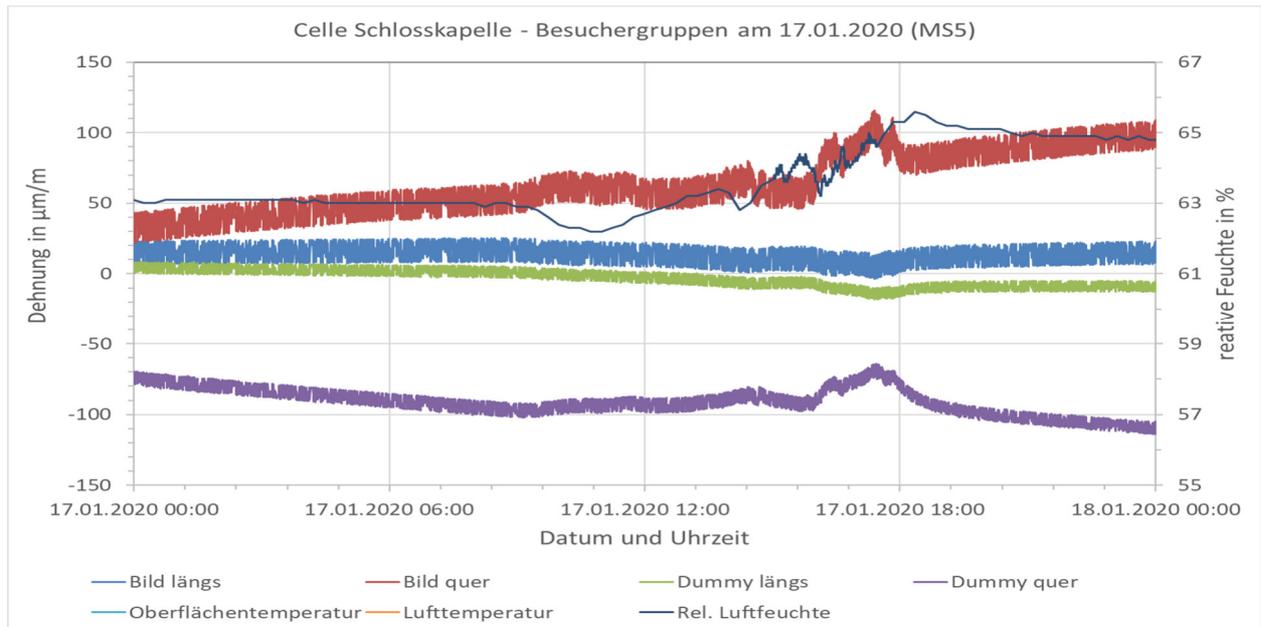


Abb. 2.7-13:

Messung der Holzverformung mit Dehnmessstreifen am 17.01.2020: Zwischen 16 und 17:30 Uhr findet eine konvexe Verwölbung um ca. 0,07 Millimeter pro Meter mit gleichzeitigem Anstieg der relativen Luftfeuchte statt. Da auch die Feuchte nach der Nutzererprobung erhöht bleibt, geht die Verformung nicht sofort wieder in ihre Ursprungshaltung zurück. (Diagramm aus: Frick, MPA Stuttgart, 2020)

2.7.4 Fazit

Der Erhaltungszustand der ausgewählten Referenzflächen war im Beobachtungszeitraum von April 2017 bis Juni 2020 in weiten Teilen stabil, der mikrobielle Befall ist optisch zurückgegangen, auch wenn dort mikrobiologische Aktivität nachgewiesen wurde²⁹. Sowohl der Einbau der gläsernen Schutzscheibe 1995 als auch die Inbetriebnahme der Be- und Entlüftungsanlage 2019 wirken sich konservatorisch positiv auf den Raum und sein Inventar aus. Das bisher vom Außenklima beeinflusste Raumklima kann unter 60% r.F. gehalten und Feuchtespitzen unterbunden werden. In der Folge werden insbesondere die gedünnten Tafelgemälde weniger klimabedingten Bewegungen ausgesetzt sein.

Das Monitoring zu den Themen Staub, mikrobieller Befall sowie Klima und Materialbewegung wird in Zusammenarbeit von NLD und HAWK fortgesetzt. Die Untersuchungen sind im Rahmen der präventiven Konservierung erforderlich und sie sind auch dazu geeignet, die Denkmalverträglichkeit einer zukünftig möglichen Nutzung zu kontrollieren.

²⁹ Siehe Kapitel 2.6. Beitrag Karin Petersen, Ullrich Fritz, Gabriele Krüger: Untersuchung zur mikrobiellen Belastung in der Schlosskapelle Celle.

2.8 Erfassung bauphysikalischer Klimaparameter nach Inbetriebnahme der Raumluftkonditionierung und Optimierung der Luftströmungsverhältnisse

Helmut Berling und Axel Büssing

2.8.1 Raumklimauntersuchungen

2.8.1.1 Messorte

Die kontinuierliche messtechnische Erfassung des Klimas (Lufttemperatur und Luftfeuchte) sowie einiger Oberflächentemperaturen erfolgt in verschiedenen Bereichen und Höhen der Schlosskapelle. Die detaillierte Beschreibung der Messorte enthält Kapitel 2.4 Abschnitt 2.4.2.1 auf Seite 18 bis 20.

Ab Mitte November erfolgte ein Umbau/eine Ergänzung der Anlage an drei Bereichen des Mikrobiologie-Monitorings:

- In der Prieche links vom Altar werden die rückseitige Oberflächentemperatur des Rahmens des Holztafelgemäldes sowie im Nahfeld die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur gemessen (im Bereich des Monitoring-Feldes), Abb. 2.8-01.
- In der Prieche rechts vom Altar erfolgt die Messung der Oberflächentemperatur der Bankvorderseite sowie im Nahfeld der relativen Luftfeuchte und der Lufttemperatur (im Bereich des Monitoring-Feldes), Abb. 2.8-02.
- An der südlichen Wange der hintersten Sitzbank werden die Oberflächentemperatur der Bank sowie im Nahfeld die relative Luftfeuchte und die Lufttemperatur gemessen (im Bereich des Monitoring-Feldes), Abb. 2.8-03.

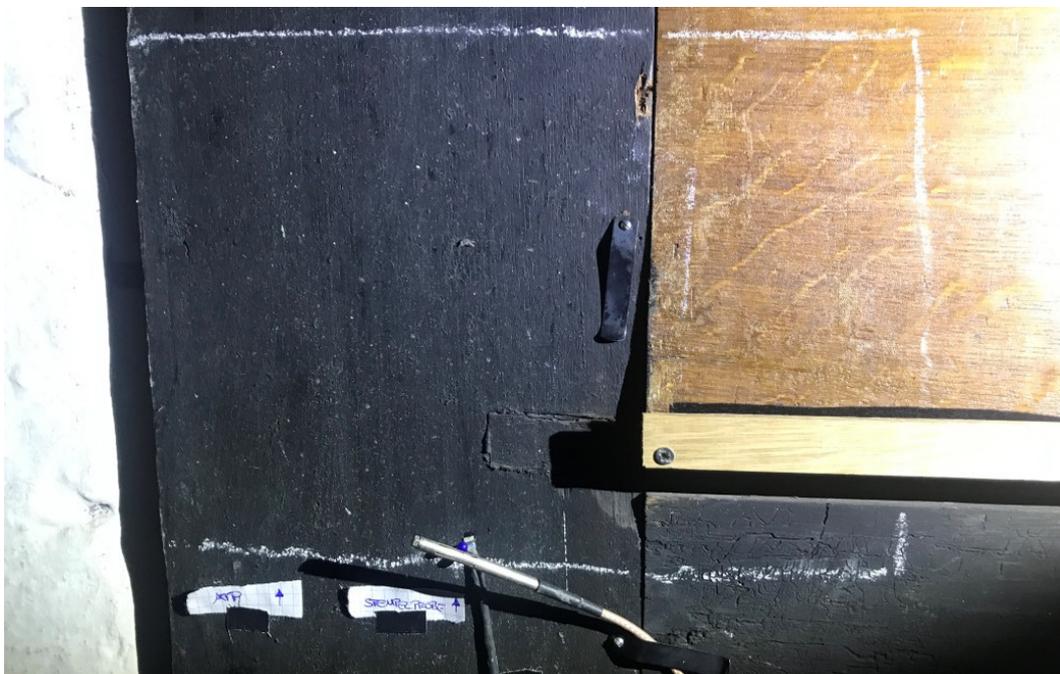


Abb. 2.8-01: Monitoringfläche in der Prieche links vom Altar (Rückseite Tafelbild)³⁰

³⁰ Die Abbildungen 2.8-01 bis 2.8-03 wurden vom NLD zur Verfügung gestellt.



Abb. 2.8-02: Monitoringfläche in der Prieche rechts vom Altar (Stirnseite Bank)



Abb. 2.8-03: Mikrobiologie-Monitoringfläche an der Wange einer Besucherbank

Es werden insgesamt 24 Messgrößen registriert und gespeichert.

2.8.1.2 Messtechnik

Als Messwertaufnehmer für die klimatischen Größen werden kapazitive Feuchte- und Widerstandstemperatursensoren eingesetzt.

Alle Fühler wurden vor der Installation kalibriert. Die Aufnahme der Messwerte erfolgt mit Hilfe von Messmodulen, die Bestandteile eines Messbusses sind. Sie werden in der Nähe der jeweiligen Messstelle platziert und dienen der Übernahme der Messwerte, der Digitalisierung und Zwischenspeicherung. Alle Messgrößen werden als fünfzehnminütige Minimal-, Maximal- und Mittelwerte über den Messbus von einem Computer aufgenommen und gespeichert. Die Auswertung erfolgt mit Hilfe spezieller Programme.

Neben den messtechnisch gewonnenen Größen können weitere Werte auf rechnerischem Wege ermittelt werden. Hierzu zählt die Bestimmung der absoluten Luftfeuchten.

2.8.2 Ergebnisse der Klimamessung

Die während der Messkampagne von Oktober 2019 bis März 2020 gewonnenen Daten der Innen- und Außenklimata sowie der Oberflächentemperaturen sind für den kompletten Zeitraum im Anhang dargestellt (Bezeichnung der Abbildungen im Anhang mit A).

Zur Verdeutlichung einzelner Beobachtungen und Feststellungen sind im Text zusätzlich Messergebnisse repräsentativer Zeitabschnitte dargestellt. Dies gilt auch für die aus den Messdaten rechnerisch ermittelten Größen wie absolute Luftfeuchten und Taupunkttemperaturen.

Lufttemperatur

Die Lufttemperaturen in der Schlosskapelle im Höhenprofil vor den Westemporen liegen im untersuchten Zeitraum (siehe Abb. A3) zwischen 11,3°C (Januar 2020, unterster Messpunkt) und 21,2°C (Anfang Oktober, Messung direkt unter der Decke in etwa 9,20 m Höhe) Dabei treten tägliche Schwankungen von bis zu 1,5 K auf, die üblicherweise jedoch geringer ausfallen.

Die übrigen registrierten Lufttemperaturen differieren lageabhängig geringfügig von diesen Werten. Hinter dem Altar sinkt die Lufttemperatur infolge des Fenstereinflusses im Winter bis auf 8°C ab.

Im abgetrennten Besucherraum führt der Einfluss der beheizten Schlossküche während der Öffnungszeiten zu stärkeren täglichen Schwankungen bis zu über 5 K/d (Abb. A1).

Die Temperaturen in den Nahbereichen der Mikrobiologie-Monitoringflächen weichen nicht wesentlich von den Werten des nahezu höhengleichen unteren Fühlers im Höhenprofil der Kapelle ab (Abb. A5, A7, A9).

Der tendenzielle jährliche Innentemperaturverlauf wird vorwiegend durch das Außenklima bestimmt. Das ermittelte Höhenprofil zeigt, dass ein vertikaler Temperaturgradient von ca. 2 bis 3 K vorliegt.

Im Vergleich zu den Wintern der Vorjahre sinken infolge der vergleichsweise milden Außenklimaperiode 2019/2020 die Innenlufttemperaturen weniger stark ab.

Relative Luftfeuchte

Die relativen Luftfeuchten im Innenraum verhalten sich im Bereich des Höhenprofils entsprechend den Lufttemperaturverläufen und bewegen sich während der gesamten Messperiode zwischen knapp 41 % (zweite Hälfte März 2020, unter der Raumdecke) und 63 % (Oktober 2019, untere Messpunkte), siehe Abb. A4. Der einmalige Peak Mitte März wurde durch gezielte Wasserdampfeinleitung zum Test provoziert.

Die täglichen Schwankungsbreiten betragen jeweils bis zu 5 Prozentpunkte. Die höheren Wertebewegungen im oberen Bereich werden durch größere Temperaturdifferenzen hervorgerufen. Der vertikale Gradient beträgt bis zu 10 Prozentpunkte aufgrund der nach oben ansteigenden Temperatur.

Seit der Installation des Luftentfeuchters im Sommer 2018 innerhalb der Kapelle sowie der Feuchtebeeinflussung durch geregelten Luftaustausch seit dem Frühjahr/Sommer 2019 werden Feuchtespitzen **oberhalb von 65 Prozent sicher verhindert**. Der gezielte Luftaustausch bei zu hoher relativer Feuchte innen und niedrigerer absoluter Feuchte außen führt dazu, dass im **gesamten dargestellten Zeitraum die Feuchte nicht über 62 % steigt** (abgesehen vom erwähnten provozierten Peak im März 2020). Eine Phase sehr trockenen Außenklimas in der zweiten Märzhälfte 2020 führt zu relativen Feuchten im Innenraum, die sich deutlich unterhalb des angestrebten Wertekorridors befinden. Mit der installierten Technik ist in diesem Fall jedoch kein **Gegensteuern** möglich.

Weitestgehend innerhalb des durch die Messwerte im Höhenprofil aufgespannten Wertebereichs bewegen sich auch die Werte der relativen Feuchte im **Besucherraum**. Die Feuchte hinter dem **Altar** liegt wegen des Außenklimaeinflusses im Mittel etwa 5 bis 7 Prozentpunkte höher.

Im Bereich der **Monitoring-Testflächen** ergeben sich **geringfügig höhere relative Feuchten** (Abb. A6, A8, A10). Die Ursache liegt in der niedrigeren Lufttemperatur begründet.

Absolute Luftfeuchten und Taupunkttemperaturen

Der Einfluss des natürlichen, nicht kontrollierbaren Luftwechsels hat sich gegenüber den Voruntersuchungen nicht verändert. Hinsichtlich der Betrachtung der absoluten Luftfeuchte wird daher auf die Vorberichte verwiesen. Gleiches gilt für die Betrachtung der Taupunkttemperaturen im Vergleich zu den Oberflächentemperaturen. Aufgrund des geringeren relativen Feuchteniveaus hat sich die mögliche Tauwassergefährdung weiter verringert. Auch für die Monitoring-Testflächen kann wegen der annähernd deckungsgleichen Verläufe der Oberflächen- sowie der jeweiligen Lufttemperatur in unmittelbarer Umgebung eine Tauwassergefährdung ausgeschlossen werden (Abb. A5, A7, A9).

2.8.3 Nutzungserprobung

Wie bereits erwähnt, konnten die Besucher des Schlossmuseums den Kapellenraum bis zum Oktober 2018 nicht mehr betreten. Ausgenommen waren studentische Gruppen der HAWK Hildesheim, eine Andacht anlässlich des Reformationsjubiläums und versuchsweise erste Führungen einzelner Besuchergruppen an vorher festgelegten Terminen im letzten Quartal 2018.

Um abschätzen zu können, wie sich mehrere aufeinander folgende Führungen auf das Raumklima auswirken und in welchem Maß die installierte Klimatechnik in der Lage ist, der kurzfristig zugeführten Feuchte entgegen zu wirken, wurden am 17.01. und am 21.02.2020 Nutzungserprobungen durchgeführt.

Hierzu wurden jeweils nacheinander zwei Besuchergruppen von jeweils 14 bis 18 Personen (inkl. Führungs- und Überwachungspersonal) in die Kapelle geführt und diesen im Chorraum Erläuterungen zur Kapelle gegeben. Die Verweildauer betrug je Gruppe etwa 30 bis 55 Minuten, die Pause zwischen den beiden Gruppen betrug rund 10 Minuten.

Nachfolgend (Abb. 2.8-04 und 2.8-05) sind die Kurvenverläufe der Lufttemperatur (untere Diagrammhälfte) und der relativen Feuchte (obere Diagrammhälfte) im Höhenprofil in einem Dreitages-Zeitraum rund um die Führungen dargestellt.

Abweichend vom sonst üblichen Datenaufzeichnungsintervall von 15 Minuten wurden während der Nutzungserprobung die Klimadaten alle 30 Sekunden protokolliert.

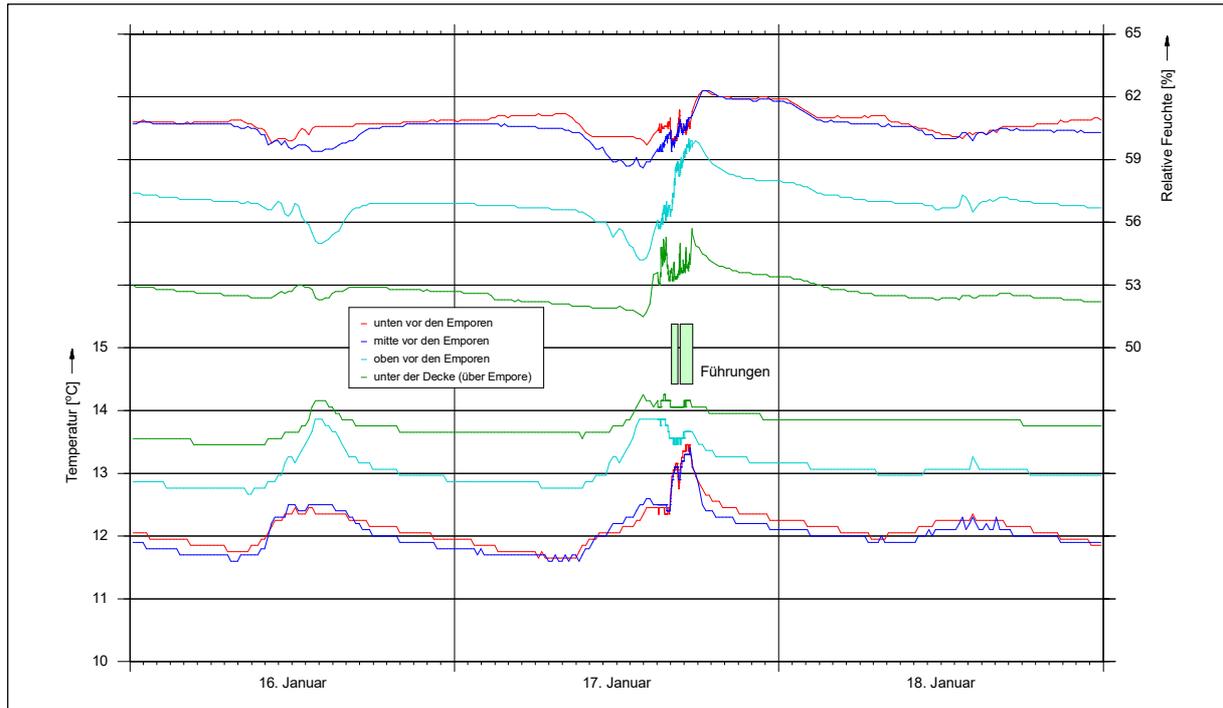


Abb. 2.8-04: Raumklima im zeitlichen Umfeld der Nutzungserprobung am 17.01.2020

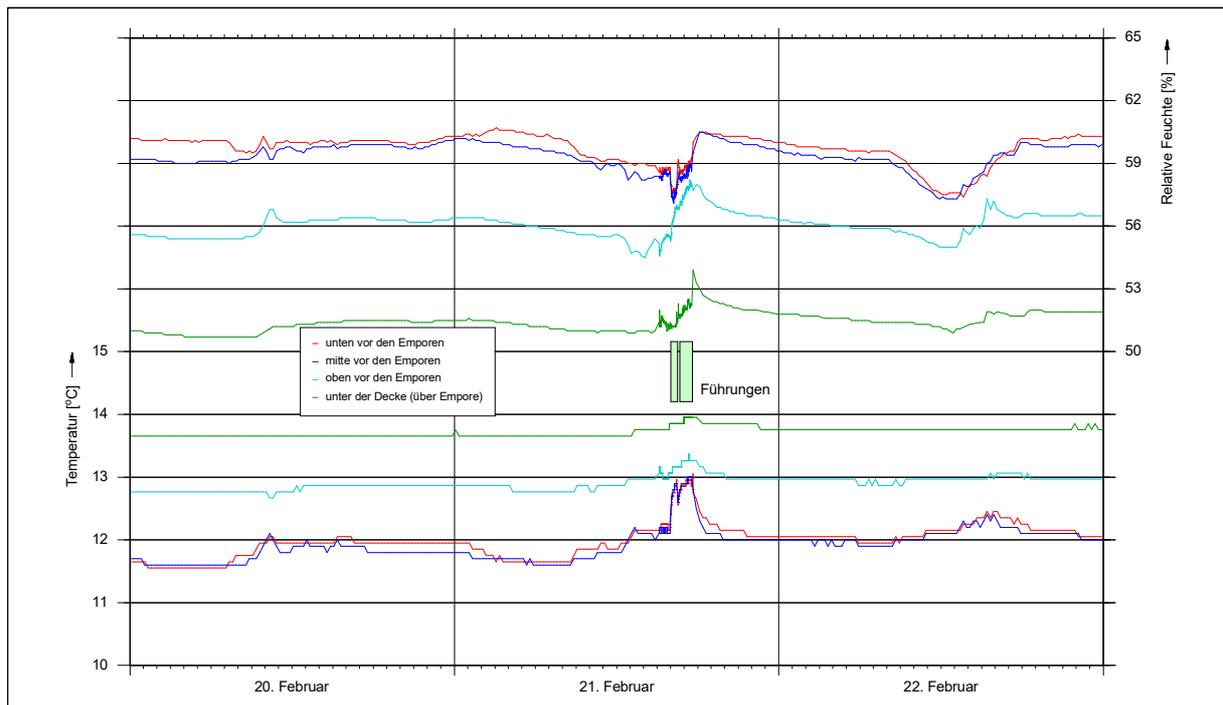


Abb. 2.8-05: Raumklima im zeitlichen Umfeld der Nutzungserprobung am 21.02.2020

Gruppengröße, Außenklima und Verweildauer innerhalb der Kapelle sowie besondere Umstände/Ereignisse während der Führungen wurden von Mitarbeitern des Landesamts für Denkmalpflege protokolliert.

Die Zeitpunkte der Führungen lassen sich durch plötzliche Werteveränderungen einzelner Kurven erkennen. Die Temperaturen verändern sich besonders stark an den unteren beiden Messpunkten ca. 1K). Die relative Feuchte verändert sich an diesen Orten um ca. 3 Prozentpunkte, aber auch an den beiden höher gelegenen Stellen.

Generell lässt sich erkennen, dass die Temperaturen verhältnismäßig schnell auf das Ausgangsniveau zurückfallen (nach ca. 4 Stunden), die relativen Feuchten benötigen einige Zeit länger. Zu berücksichtigen sind hierbei allerdings auch die natürlichen Schwankungen im Tagesverlauf, die jeweils zu diesem Zeitpunkt am Tag davor und danach zu erkennen sind.

2.8.4 Änderung der Luftführung

2.8.4.1 Bereich Sitzbänke (Abluft)

Die Kapelle und der Besucherraum werden durch eine Glaswand voneinander getrennt. Sie stehen jedoch lufttechnisch miteinander über den umlaufenden offenen Randbereich der Trennverglasung miteinander in Verbindung.

Die Ablufführung ist aus diesem Grund so aufgebaut, dass Luft über den aufgeständerten Fußboden mit seinen seitlichen Luftschlitzen sowohl aus dem Besucherraum als auch aus der Kapelle infolge der lufttechnischen Verbindung beider Räumlichkeiten abgesaugt wird (Abb. 2.8-06, zum Prinzip siehe zusätzlich Abb. 2.4-06).



Abb. 2.8-06: Unterer Abschluss der Glaswand

Bei dieser Anordnung wurde eine zu geringe Luftansaugung aus der Kapelle im Fußbodenbereich festgestellt. Der damit verbundene geringe Luftaustausch führte zu einem Feuchteniveau, das Schimmelbildung unterhalb der Sitzbänke verursachte.

Um einen höheren Luftaustausch und somit eine Absenkung der Luftfeuchte zu erhalten, wurde die Luftansaugung aus der Kapelle so verlagert, dass vorwiegend nur der Schlitz unterhalb der Glaswand als Ansaugöffnung dient (Abb. 2.8-07).



Abb. 2.8-07: Schlitz unterhalb der Glaswand zwischen Kapelle und Besucherraum

Zu diesem Zweck wurde ein spezieller Luftansaugkanal im aufgeständerten Fußboden des Besucherraumes installiert sowie die Verschließung der seitlichen Abluftschlitze des Fußbodens im rückwärtigen Bereich des Besucherraumes vorgenommen.

Messungen der Luftgeschwindigkeit während eines aktiven Umluftbetriebes (ab 17.2.2020) ergaben, dass durch diese Maßnahmen der Luftstrom erhöht wurde und die Luftgeschwindigkeit in Bodennähe vor der Glasscheibe in der Kapelle von 0,02 m/s auf 0,18 m/s erhöht werden konnte.

Die Ergebnisse belegen zwar die Erhöhung der Absaugleistung in diesem Bereich, aber der Einfluss auf den Feuchtehaushalt unterhalb der Sitzbänke kann aus den Klimaaufzeichnungen nicht festgestellt werden. Die Ursache dafür liegt in den zu diesem Zeitpunkt zu gering differierenden Luftfeuchten.

2.8.4.2 Chorbereich (Zuluft)

Am 20.02 2020 wurden die bislang freien Ausblasöffnungen im Chorbereich durch Abdeckgitter versehen. Diese Gitter sind so gestaltet, dass die Stege einer Hälfte senkrecht stehen (die Luft wird also senkrecht nach oben geleitet) und auf der anderen Hälfte um ca. 40 Grad geneigt sind, wodurch der in der Kapelle einströmenden Luft eine Richtung vorgegeben wird (Abb. 2.8-08).

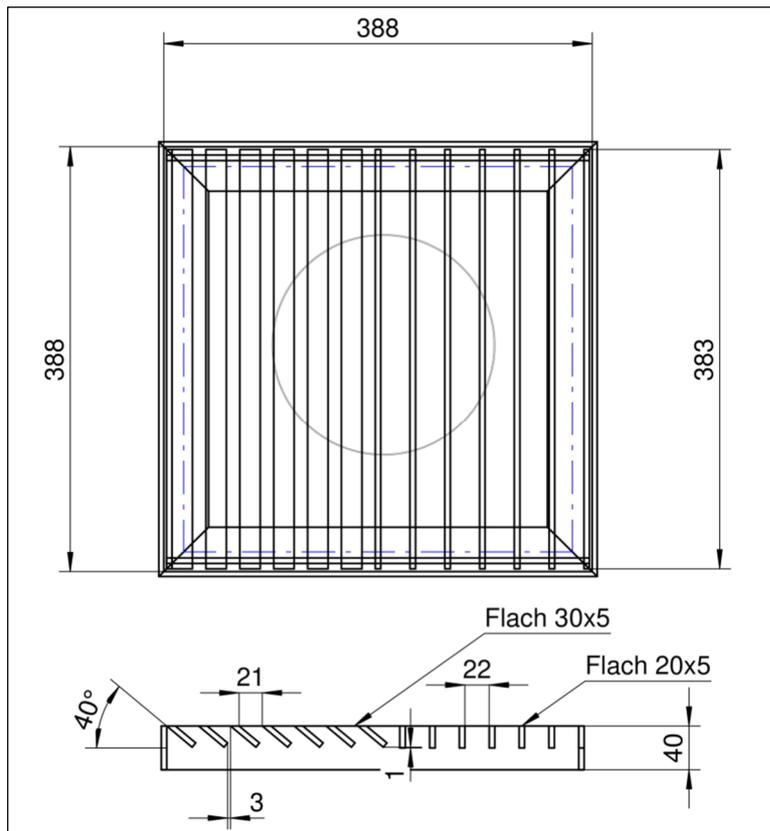


Abb. 2.8-08: Abdeckgitter der Zuluftschächte

Die Gitter können bei Bedarf manuell gedreht werden, um die Luft gezielt zu unterschiedlichen Orten strömen zu lassen. Zunächst wurde auf beiden Seiten die Luft seitlich zu den Priechen geleitet, um hier einen Luftaustausch zu erzwingen und somit ein stetigeres Raumklima zu erzeugen.

Am 25.03.2020 wurde das nördliche Gitter so gedreht, dass ein Teil der Luft zu der Ost-Prieche geleitet wird. Der gerichtete Luftstrom bewirkt in Strömungsrichtung nach ca. 0,5 m Entfernung in 1 m Höhe eine Anhebung der Luftgeschwindigkeit von 0,08 m/s auf 0,55 m/s. Die Ergebnisse zeigen, dass bei der Positionierung der Gitter in sogenannten Totzonen (Bereiche ruhender Luft) ein Luftaustausch erreicht werden kann.

Leider konnte ein Klimaausgleich in den Messkurven nicht festgestellt werden, da während dieses Zeitraumes ein zu einheitliches Klima in der Kapelle vorlag.

2.8.5 Manuelle Aktivierung des Umluftbetriebes

Vom 10. bis 30. März 2020 wurde die Umluftfunktion der Lüftungsanlage, die üblicherweise immer dann aktiviert wird, wenn zwischen den Feuchtefühlern innerhalb der Kapelle Differenzen von mehr als 3 Prozentpunkten auftreten, dauerhaft aktiviert. Hiermit soll überprüft werden, ob sich die Klimata im Bereich der drei Mikrobiologie-Monitoringflächen, die jeweils räumlich etwas abgetrennt vom Kirchenraum liegen, verbessern lassen (bzw. sich die Klimata in der Kapelle aneinander angleichen). Infolge des extrem milden und trockenen Winterhalbjahres und des damit verbundenen ausgeglichenen Raumklimas in der Kapelle, konnte der Umluftbetrieb auch bei zusätzlichen Maßnahmen diesbezüglich nicht beitragen.

2.8.6 Anpassung des Klimakorridors

Tendenziell weist die rel. Luftfeuchte in der Schlosskapelle im Winter sehr niedrige Werte auf, die infolge der Nichtbeeinflussbarkeit vom angestrebten ganzjährigem Feuchteniveau erheblich abweichen. Da ein ganzjähriger stetiger Verlauf der rel. Luftfeuchte angestrebt wird, muss diesbezüglich eine Anpassung erfolgen.

Zu diesem Zweck werden die im Abschnitt 2.1 in der Schaltlogik dargestellten Feuchtwerte ab dem 30.03.2020 um jeweils 5 Prozentpunkte reduziert. Die Auswirkung auf das Raumklima wird erst erkennbar sein, wenn das Feuchteniveau insgesamt wieder etwas ansteigt.

2.8.7 Empfehlungen

In der Kapelle sind lufttechnisch einige Veränderungen vorgenommen worden, um einheitliche klimatische Verhältnisse zu erreichen. Dieses setzt eine gute Luftzirkulation in allen Bereichen der Kapelle voraus, so dass sogenannte „tote Zonen“ nicht entstehen. Diese führen, wie bislang, zu nicht erwünschten hohen lokalen Luftfeuchten und sind insofern zu verhindern (u.a. durch dauerhaft geöffnete Türen zu den Priechen).

Der Einfluss einiger Maßnahmen auf die Luftströmung in klimatisch kritischen Bereichen (Priechen, Sitzbänke) zeigt sich zwar messtechnisch durch Erhöhung der Luftbewegung, aber eine Auswirkungen auf die Klimakomponenten konnte infolge des zu kurzen Beobachtungszeitraumes nicht ermittelt werden.

Aus diesem Grund sollten diese Orte messtechnisch überwacht und hinsichtlich der weiteren Entwicklung des Pilzbefalls beobachtet werden.

Der Luftentfeuchter, der sich zzt. in der Schlosskapelle befindet, sollte aus verschiedenen Gründen (z.B. technisch, praktisch, optisch) in die Be- und Entlüftungsanlage im Keller unterhalb der Schlosskapelle integriert werden.

Weiter sind die technischen Anlagen und die Einhaltung des vorgegebenen Klimakorridors zu beobachten und gegebenenfalls Änderungen vorzunehmen.

Anhang: Klimadiagramme

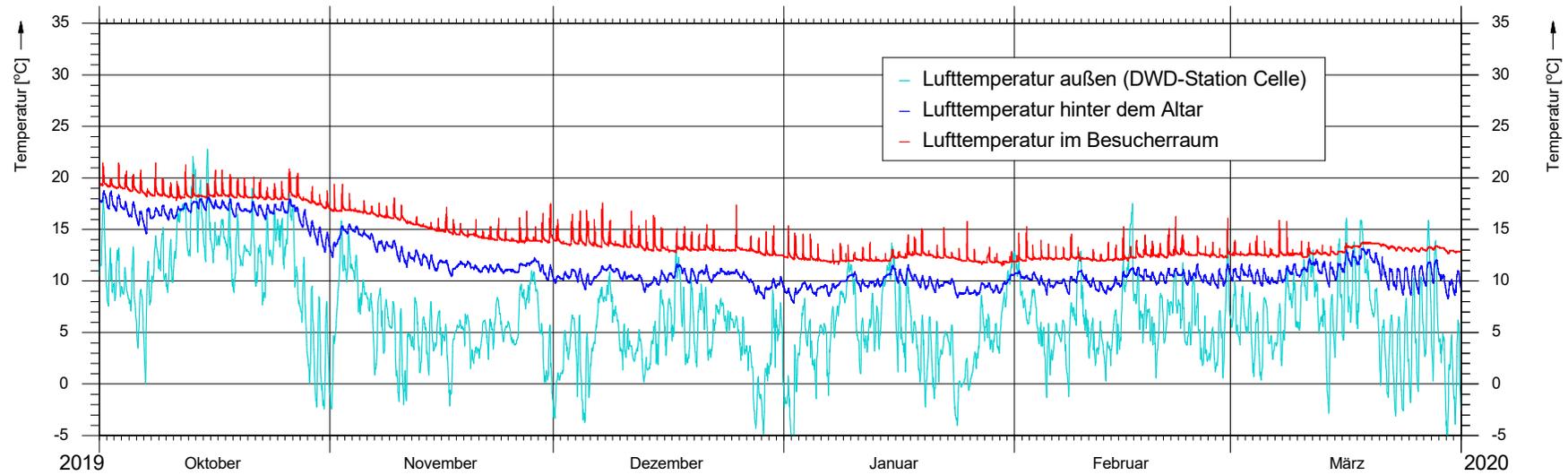


Abbildung A1: Lufttemperaturen außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

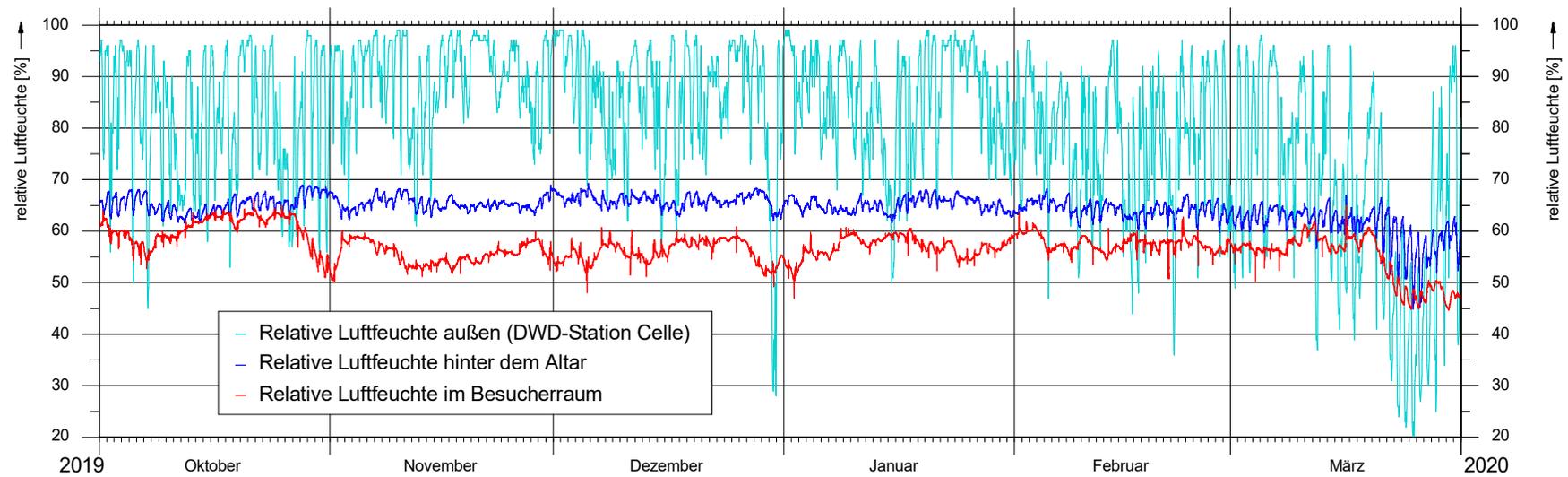


Abbildung A2: Relative Luftfeuchten außen, hinter dem Altar und im Besucherraum

Celle, Schlosskapelle

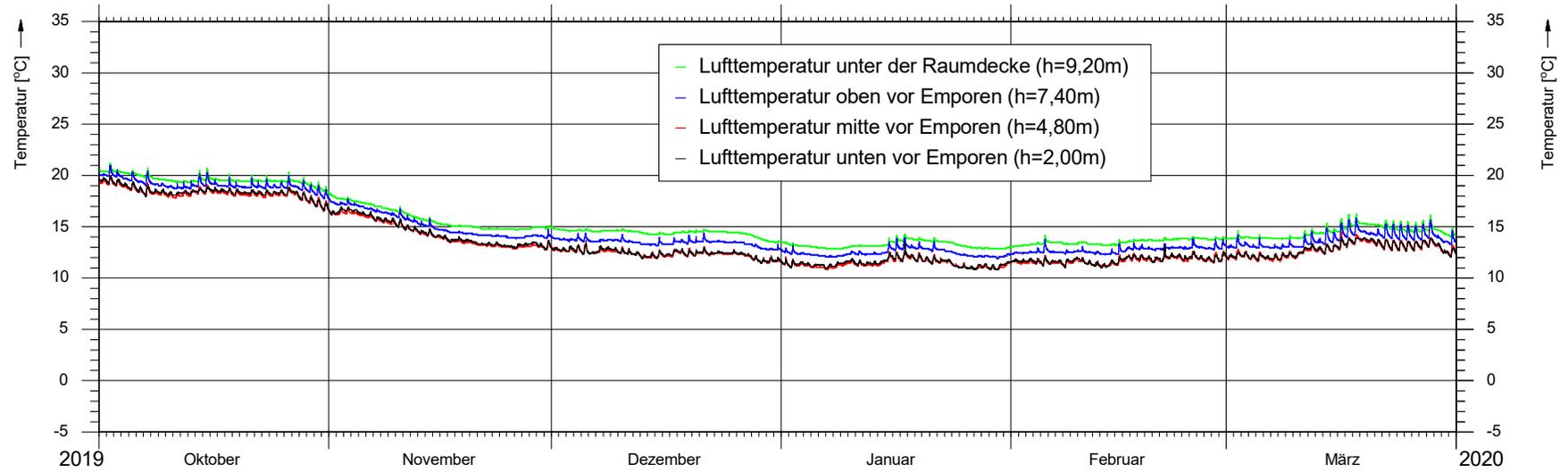


Abbildung A3: Lufttemperaturen - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

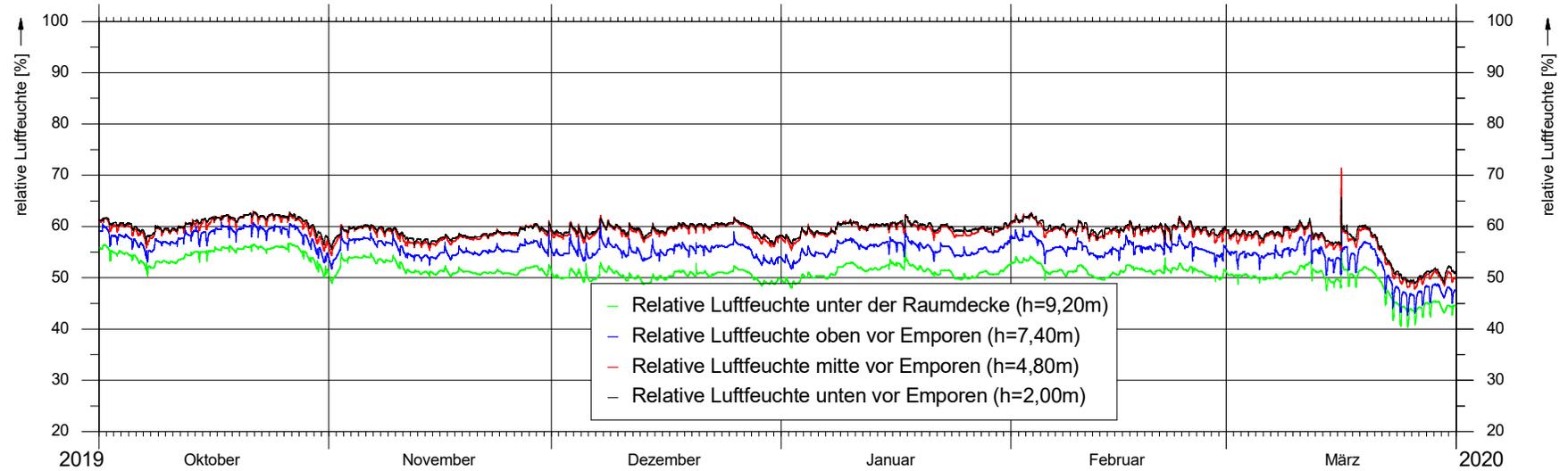


Abbildung A4: Relative Luftfeuchten - Höhenprofil vor/über den Westemporen

Celle, Schlosskapelle

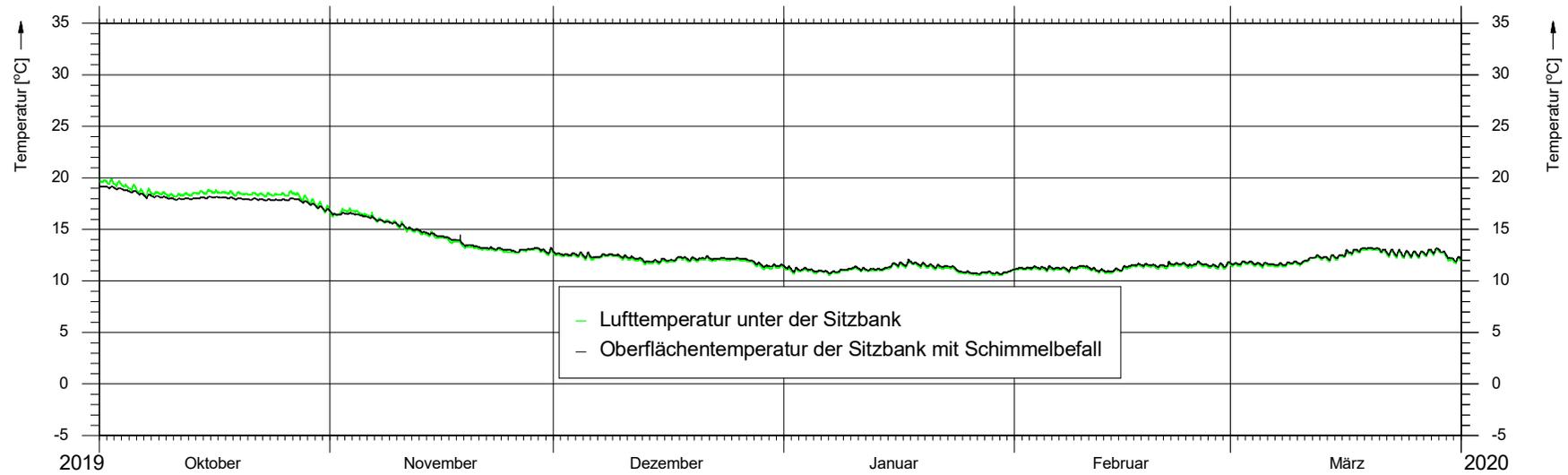


Abbildung A5: Luft- und Oberflächentemperatur - Testfeld Mikrobiologie unter den Bänken

Celle, Schlosskapelle

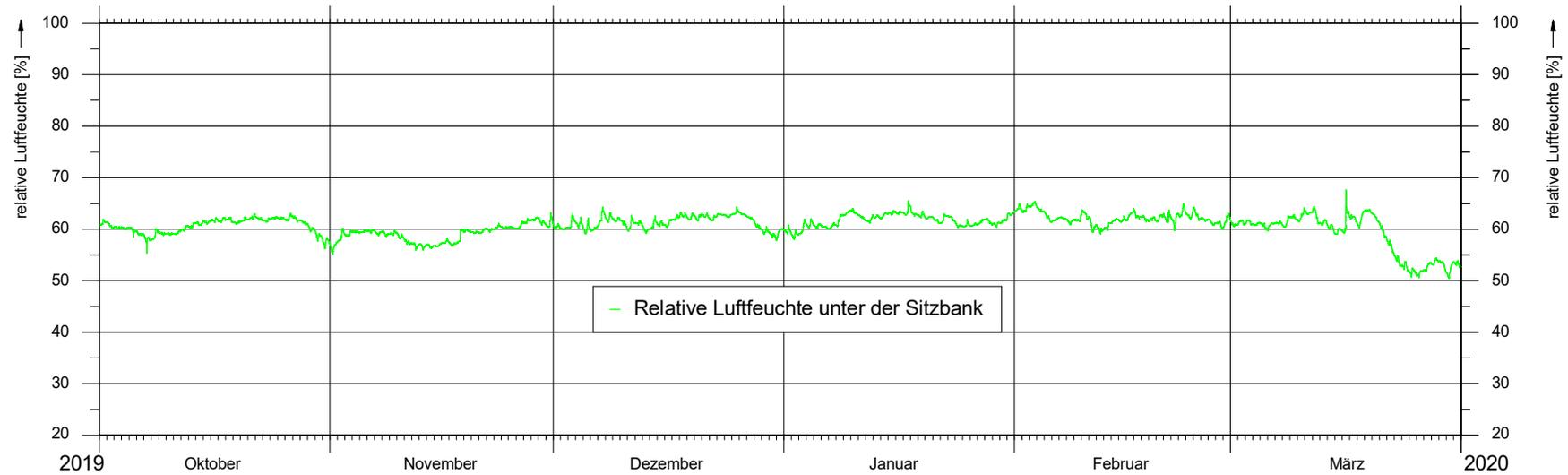


Abbildung A6: Relative Luftfeuchte - Testfeld Mikrobiologie unter den Bänken

Celle, Schlosskapelle

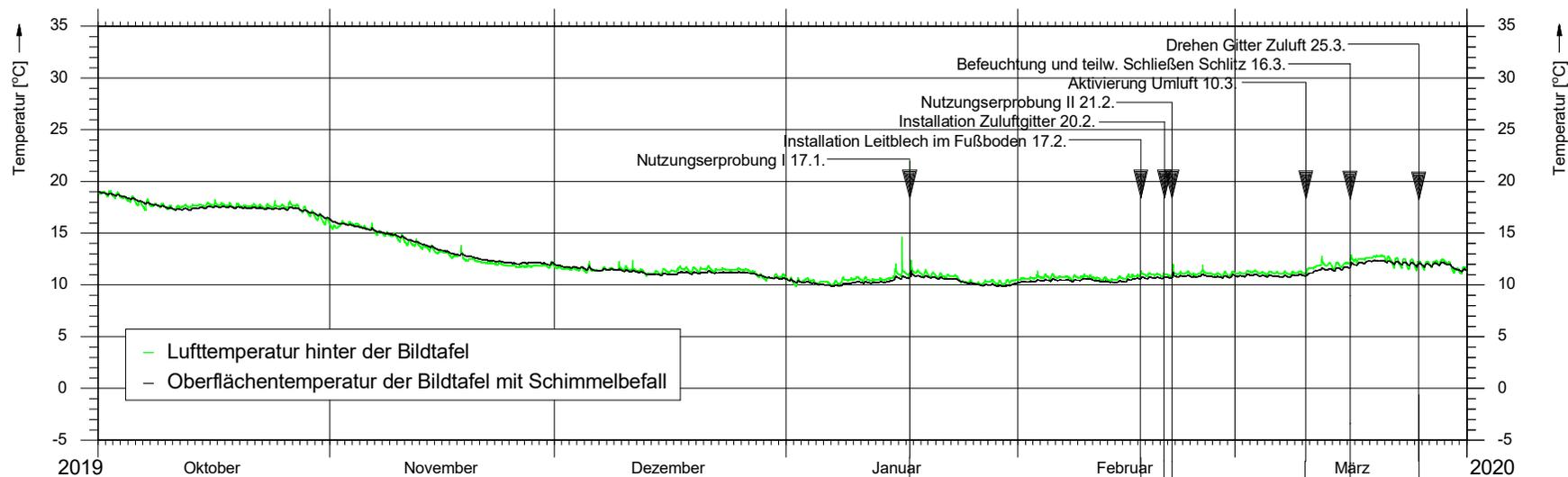


Abbildung A7: Luft- und Oberflächentemperatur - Testfeld Mikrobiologie in der Prieche links vom Altar

Celle, Schlosskapelle

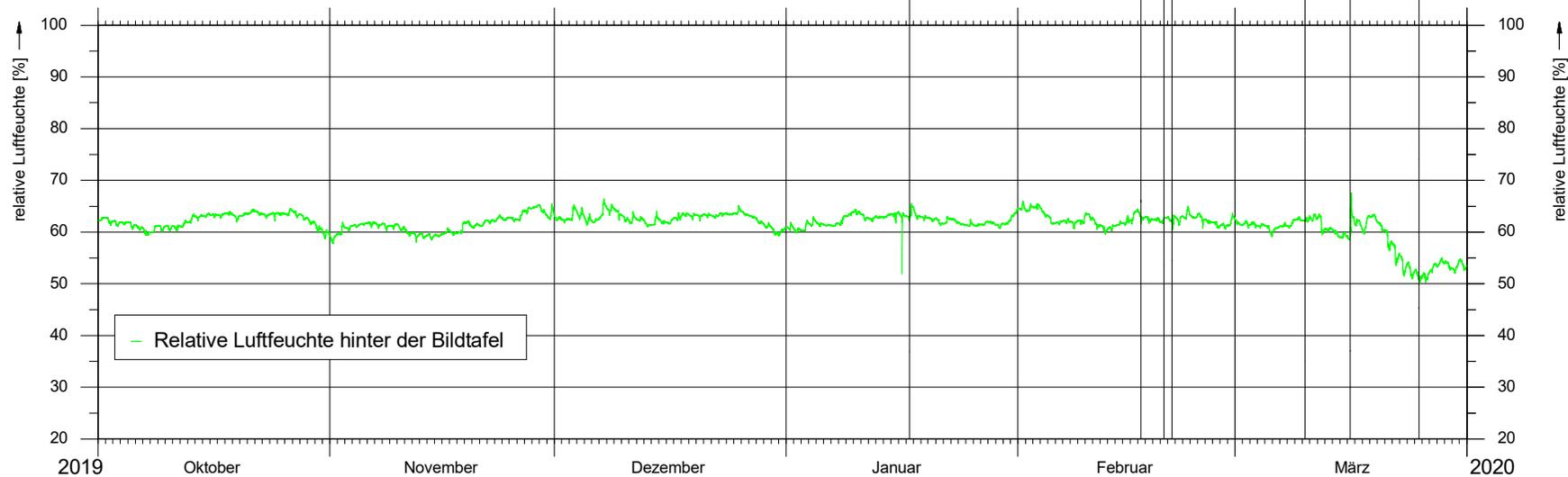


Abbildung A8: Relative Luftfeuchte - Testfeld Mikrobiologie in der Prieche links vom Altar

Celle, Schlosskapelle

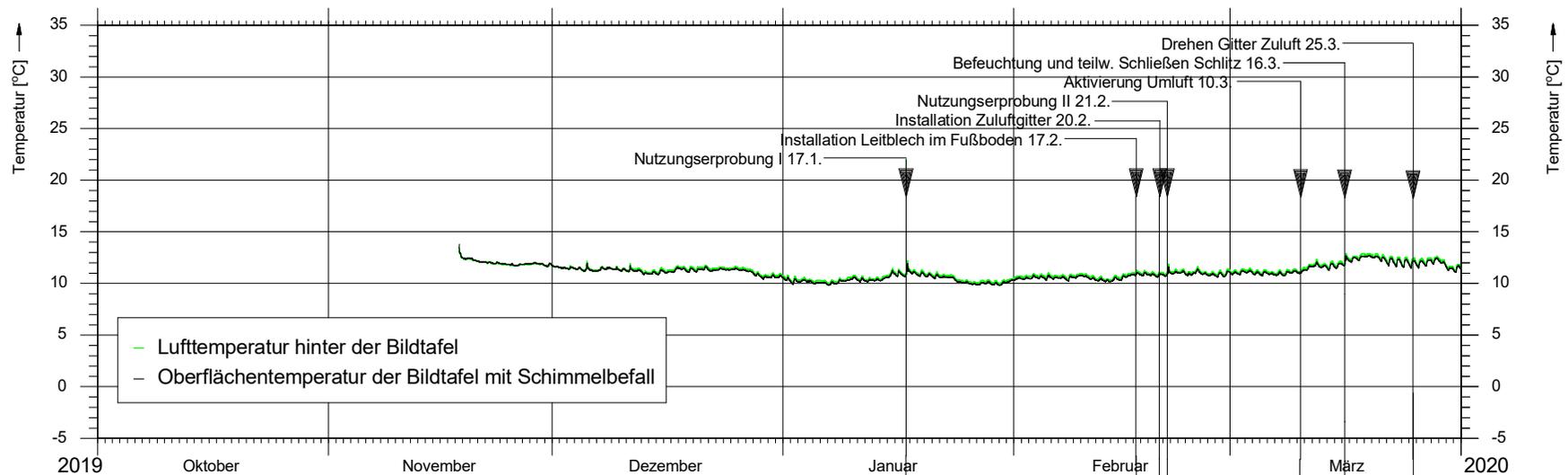


Abbildung A9: Luft- und Oberflächentemperatur - Testfeld Mikrobiologie in der Prieche rechts vom Altar

Celle, Schlosskapelle

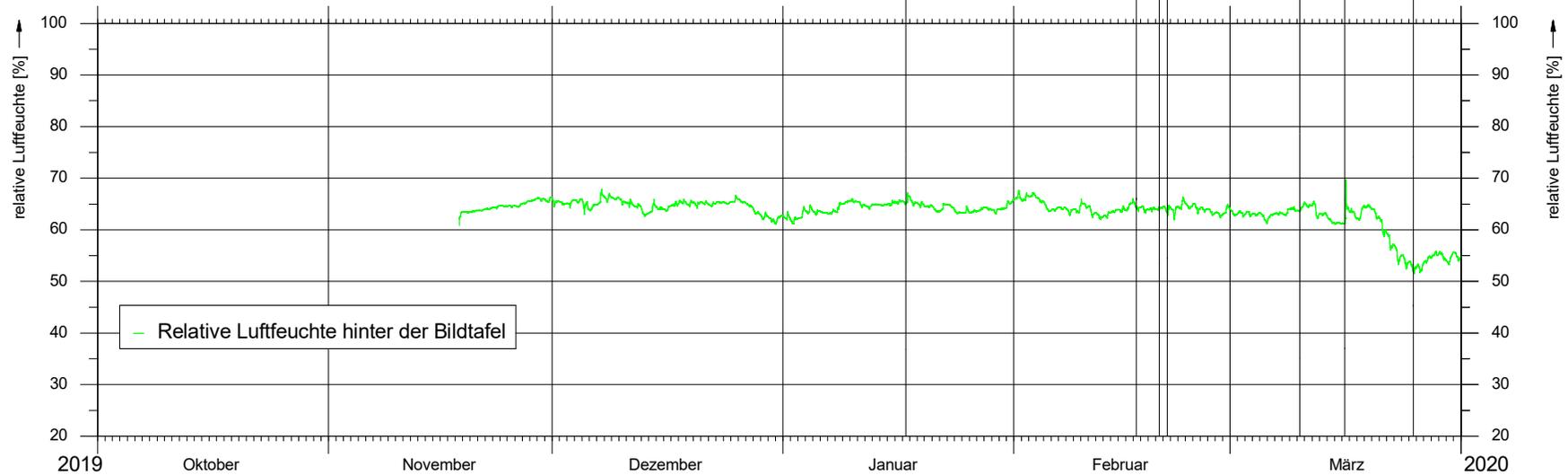


Abbildung A10: Relative Luftfeuchte - Testfeld Mikrobiologie in der Prieche rechts vom Altar

Celle, Schlosskapelle

2.9 Präventive Konservierung und denkmalverträgliche Nutzung

Erwin Stadlbauer, Christina Achhammer und Christoph Fiebiger

In Anbetracht der Wertigkeit und Bedeutung hätte die Celler Schlosskapelle in ihrer rund 500-jährigen Geschichte eigentlich eine maßvolle Nutzung bei regelmäßiger Wartung und Pflege verdient gehabt. In Wirklichkeit waren Nutzung und Pflege im Laufe der Zeit jedoch wechselvoll, bis hin zu extremen Phasen der Übernutzung und Vernachlässigung. Dass die Schlosskapelle mit ihrer einzigartigen Ausstattung die Zeit dennoch relativ gut überdauert hat, ist vor diesem Hintergrund erfreulich, aber nicht selbstverständlich.

2.9.1 Das Leitbild der Nutzung - früher und heute

„Für Baudenkmale ist eine Nutzung anzustreben, die ihre Erhaltung auf Dauer gewährleistet“ (NDSchG §9, Abs. 1). Nimmt man die „Pflicht zur Erhaltung“ (NDSchG §6) hinzu, dann entspricht das Denkmalschutzgesetz dem Leitbild der nachhaltigen Nutzung, die das Ziel der Substanzerhaltung und der Schadensvorsorge einschließt. Die ursprüngliche hofstaatliche Nutzung von Schloss und Schlosskapelle hatte andere Ziele. Die Residenz war der prunkvolle Ort zur Repräsentation von Macht und Frömmigkeit des Landesherrn, der in Celle schon seit 1524 gleichzeitig auch protestantisches Kirchenoberhaupt war. Die Nutzungsbedingungen folgten der hofstaatlichen Ordnung und die Kapelle mitsamt ihrer Ausstattung war ein Gebrauchsgegenstand zum Zweck des Gottesdienstes und weiterer liturgischer Handlungen (fürstliche Hochzeiten, Taufen). So wurden zum Beispiel bedeutende Teile der bemalten hölzernen Einbauten früher als Sitzmöbel benutzt (Fürstenstuhl, Prieche und Bankreihen) und es war selbstverständlich, dass Abnutzung, Schädigung und Erneuerung dabei unvermeidlich waren. Mit dem Beginn der Weimarer Republik endete die feudale Nutzungsbeschränkung und die Kapelle wurde daraufhin für die Kirchengemeinde und für die Öffentlichkeit zugänglich und nutzbar gemacht. In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts kam die starke touristische Nutzung hinzu. Der Publikumsverkehr wurde allerdings so groß, dass die dadurch entstandenen Schäden den „schleichenden hofstaatlichen Verschleiß“ bei weitem übertrafen.

Auf Initiative der Denkmalfachbehörde wurde die Schadenssituation in Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer Institut für Holzforschung untersucht.³¹ Die Schäden reichten von Fassungsabhebungen bis hin zu -verlusten, Rissen in den Trägermaterialien und mikrobiellem Befall. Als Hauptursachen wurden nutzungsbedingte Feuchtebelastungen und Klimaschwankungen festgestellt. Im Jahr 1995 wurde im Auftrag der Bauverwaltung des Landes unter der Westempore der Kapelle ein Besucherraum mit einer Glaswand geschaffen, um den Einblick in das Innere weiterhin zu ermöglichen und gleichzeitig einen Hauptschadensfaktor zu beseitigen. Außerdem wurde die öffentliche Zugänglichkeit und auch die kirchliche Nutzung des Innenraums bis auf weiteres untersagt. Nach einer „Ruhephase“ wurde die geschädigte Ausstattung 1998 konserviert und restauriert sowie gewartet und gepflegt.

Mit Blick auf das Reformationsjubiläum im Jahr 2017 wurde seitens der Stadt Celle und der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers der Rückbau der Glaswand und die erneute Innenraumnutzung gefordert. Auf Initiative von SBLH und NLD wurde im Jahr 2012 eine Projektgruppe gegründet, um in Abstimmung mit der Stadt und der Landeskirche den Zustand zu erfassen und zu evaluieren sowie zu klären, ob und in welchem Umfang eine denkmalverträgliche Nutzung möglich ist, die dem Leitbild der Nachhaltigkeit entspricht.

³¹ Schwarz 1992; Schwarz und Gadesmann 1994.

2.9.2 In Schritten zur präventiven Konservierung

Ausgangspunkt ist die Schadensdiagnose und Gefährdungsbeurteilung, die in den Jahren 2015 bis 2020 erarbeitet und verifiziert wurde. Das Gesamtkunstwerk ist demnach nicht nur gealtert, sondern es hat in Teilen bleibende Schäden erlitten. Die wichtigsten Schadensursachen sind natürliche und nutzungsbedingte Klimaschwankungen, wodurch die gealterte und vorgeschädigte Substanz auf Dauer gefährdet ist. Zur langfristigen Erhaltung der Schlosskapelle sind daher besondere Maßnahmen erforderlich, die den Schadensfortschritt verhindern und die der Vorsorge dienen. Diese präventive Konservierung betrifft nicht nur die gefährdete Substanz selbst, sondern auch ihr Umfeld. An erster Stelle steht dabei die Klimastabilisierung sowie die Wartung und Pflege im Sinne eines Frühwarnsystems.

2.9.2.1 Raumluftkonditionierung

Die hygroskopische Ausstattung, insbesondere die Holztafel- und Leinwandgemälde, ist schon allein aufgrund von natürlichen Klimaschwankungen gefährdet. Die Klimastabilisierung ist deshalb in jedem Fall erforderlich, unabhängig davon, ob und in welchem Umfang die Kapelle für die Öffentlichkeit zugänglich gemacht wird. Im Rahmen der Machbarkeitsstudie „Klimatechnik“, die durch das SBLH beauftragt und aus Landesmitteln finanziert wurde, hat das Ingenieurbüro Dr. Berling das Konzept einer Anlage zur Raumklimakonditionierung entwickelt (vgl. 2.8). Die konservatorische Wirksamkeit und Notwendigkeit wurde im Rahmen des Modellprojektes untersucht und bestätigt. Das bauphysikalische Rechenmodell und die Strömungssimulation des IWB waren dabei sehr hilfreich (vgl. 2.5). Der aus Mitteln des Landes Niedersachsen finanzierte Einbau einer Lüftungs- und Entfeuchtungsanlage erfolgte im Kontext der präventiv-konservierenden Bauunterhaltung. Dabei wurde insbesondere der unkontrollierte Luftwechsel durch Fenster- und Türöffnungen reduziert und der hofseitige Zugang zum Besucherraum mit einem Windfang ausgestattet. Nach dem Probetrieb (von Mai 2019 bis März 2020) wurde die Anlage in Bezug auf die Temperatur und relative Raumlufftfeuchte (r.F.) mit den Sollwerten +5 bis +18 °C und 55 bis 60 % r.F. folgendermaßen programmiert:

- Die Einhaltung des Sollwertbereichs wird durch Ansaugen von Außenluft erzielt, soweit dies aufgrund der Außenlufttemperatur und -feuchtigkeit möglich ist.
- Die apparative Luftentfeuchtung setzt ein, wenn innen und außen 60 % r.F. überschritten werden und die Entfeuchtung mit Außenluft deshalb nicht möglich ist.
- Die Anlage sorgt außerdem für eine kontrollierte Luftbewegung und Durchmischung, falls sich im Innenraum eine Temperaturdifferenz von 3 K einstellen sollte.³²

Zur Bestimmung der Sollwerte mussten die wichtigsten Schadensfaktoren „Feuchtigkeit“ und „Trockenheit“ konservierungswissenschaftlich bewertet werden, um den „Klimakorridor“ zu definieren, in dem es für die besonders gefährdeten und vorgeschädigten Tafel- und Leinwandgemälde der Schlosskapelle weder zu feucht noch zu trocken ist. Zudem wurde die Anlage so programmiert, dass die relative Luftfeuchte sogar innerhalb des Korridors gestuft geregelt wird, um Klimaschwankungen zu minimieren.³³ Die Anlage wurde bewusst nicht mit einer Luftbefeuchtung ausgestattet, um das Risiko von lokalen Feuchtebelastungen im Bereich von Wärmebrücken auszuschließen, insbesondere in den mit Schimmel befallenen Bereichen. Im Gegensatz zum oberen Sollwert des Klimakorridors von 60 % r.F. kann deshalb der untere Wert von 55 % r.F. nicht „erzwungen“ werden. Dieser Wert kann von der Anlage nur dann erreicht oder gehalten werden, wenn die Außenluft eine Feuchtigkeit von mindestens 55 % r.F. aufweist.

³² Das Raumvolumen beträgt rund 800 m³ und die Lüftungsanlage ist im Bereich von 500-800 m³/h regelbar.

³³ Bei steigender relativer Luftfeuchte wird oberhalb von 58 % r.F. wenn möglich mit Außenluft entfeuchtet.

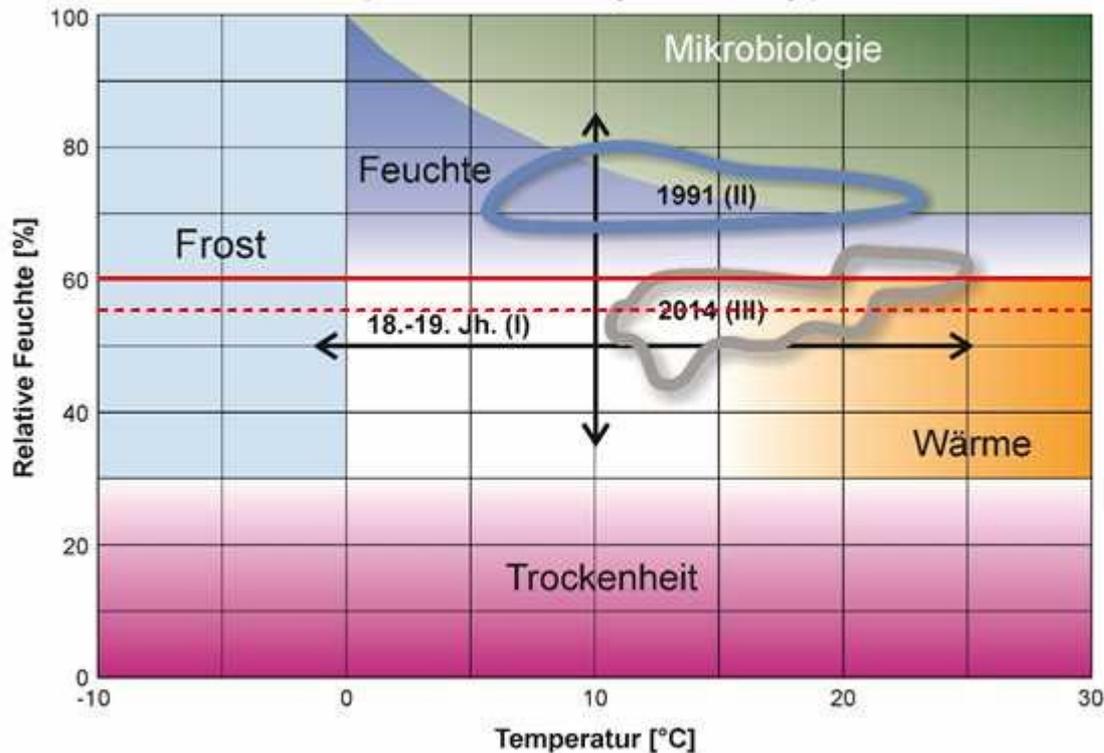


Abb. 2.9-01: Klimadiagramm Celler Schlosskapelle mit den Bereichen der Gefährdung durch Feuchte, Mikrobiologie etc. (nach Angaben des Fraunhofer IBP); Klimaschwankungsbereiche der früheren Nutzungsphasen I, II und III (vgl. Tabelle 2.2-01 mit Erläuterungen auf Seite 14); automatische Klimakontrolle seit April 2020 im Sollbereich von 55 - 60 % r.F. (Erläuterung im Text; Abb. Behrens, Achhammer/NLD).

2.9.2.2 Nutzungserprobungen

In den Jahren 2017 bis 2020 sind zwei Nutzungsformate organisiert, erprobt und ausgewertet worden. Zum einen die „geführte Gruppe“ und zum anderen die kirchliche Andacht bzw. der Gottesdienst. Es gab insgesamt 15 Termine mit geführten Gruppen unter gemeinsamer Leitung von Frau Schmieglitz-Otten und den Vertreter*innen des NLD mit bis zu 23 Personen und einer Dauer von ca. 30 bis 45 Minuten. Außerdem fanden eine Andacht (ca. 30 Minuten mit 15 Personen) und eine Gottesdiensteröffnung statt. In die Auswertung eingeflossen sind zudem Klimamessdaten von insgesamt 10 Projekttagen mit bis zu 16 Studierenden der HAWK. Die Aufenthaltsdauer lag dabei jeweils zwischen 4 und 6 Stunden, um notwendige Untersuchungen und Zustandskontrollen durchzuführen.

Das Besuchsprogramm der geführten Gruppen war nicht nur auf den Kapelleninnenraum beschränkt. Zur Vorbereitung des Kapellenbesuchs wurden die Teilnehmer*innen zuerst in der Schlosskapellen-Ausstellung umfassend informiert, nicht nur über die Geschichte und Bedeutung, sondern auch über den Zustand, die Gefährdung und das Modellprojekt. Die in der Ausstellung gezeigten 3D-Filme waren dabei besonders attraktiv und lehrreich.

Es zeigte sich, dass dieser Ablauf von den Teilnehmer*innen durchweg positiv bewertet wurde und dass der Kapellenbesuch aufgrund der Vorinformation zeitsparender gestaltet werden konnte. Zudem wurde eine größere Sensibilisierung und Achtsamkeit erreicht, einerseits, damit die Besucher*innen in der Enge und Unebenheit des teils halbdunklen Raumes sich sicher bewegen konnten, und andererseits, um den erforderlichen Sicherheitsabstand zu den Gemälden zu gewährleisten. Zur exemplarischen Betrachtung von Ablauf und Besonderheiten sind die Nutzungserprobungen am 25.10.2017 sowie am 17.01. und 21.02.2020 besonders gut geeignet.

Die Termine am 25.10.2017 sowie am 17.01. und 21.02.2020

Aus Anlass des 500. Reformationsjubiläums wurde am 25.10.2017 in der Celler Stadtkirche ein Gottesdienst gefeiert, den der Landesbischof Meister in der Schlosskapelle feierlich eröffnet hat. Bei der 50-minütigen Feier waren insgesamt 38 Personen anwesend, 24 Personen im Kapelleninnenraum und 14 Personen im Besucherraum hinter der geschlossenen Glaswand. Die Planung und Durchführung dieser Veranstaltung war mit relativ hohem Aufwand verbunden, angefangen beim Auswahlverfahren zur Bestimmung des Teilnehmerkreises, bis zur Begleitung der zum Teil betagten Personen beim Eintritt und Verlassen des Raums über die Treppen und Unebenheiten, um Unfälle und Gemäldeschäden zu vermeiden. Aufgrund der Live-Übertragung in die Stadtkirche musste außerdem ein Kamerateam mit Aufnahmetechnik betreut werden, um den Auf- und Abbau möglichst achtsam zu gestalten.

Am 17.01. und 21.02.2020 wurden zwei Besuchergruppen von jeweils 14 bzw. 18 Personen kurz nacheinander in die Kapelle geführt, einschließlich des dreiköpfigen Führungs- und Sicherungspersonals. Die Verweildauer betrug je Gruppe 30 bzw. 50 Minuten mit einer rund 10-minütigen Pause zwischen der ersten und zweiten Gruppe. Im Gegensatz zu den anderen Erprobungen war die Raumklimakonditionierung im Jahr 2020 schon vorhanden und aktiv.

Auswertung der Klimamessdaten

Am 25.10.2017 lagen die Lufttemperatur und die Luftfeuchtigkeit im Innenraum vor Beginn der Veranstaltung bei Werten um +17 °C und 67 % r.F.. Während der Veranstaltung stieg die Lufttemperatur auf etwa +20 °C und die relative Luftfeuchte über 70 % r.F.. Die Luftfeuchtigkeit war aufgrund der Wetterlage schon über mehrere Tage vor der Veranstaltung relativ hoch und sie wurde anthropogen vorübergehend weiter erhöht. Der Rückgang bis zum Ausgangswert erfolgte innerhalb von etwa 24 Stunden. Derartig hohe Feuchtebelastungen, die das Schimmelwachstum fördern, werden im Innenraum seit April 2020 durch die automatische Luftentfeuchtung verhindert, wenn die relative Luftfeuchtigkeit 60 % übersteigt.

Bei den Nutzungserprobungen am 17.01. und 21.02.2020 hat die Temperaturänderung etwa 1K betragen und die relative Feuchte wurde um ca. 3 Prozentpunkte erhöht. Die hier festgestellte Entwicklung von Temperatur und Luftfeuchte entspricht dem für das Nutzungsformat „geführte Gruppe“ charakteristischen Muster: Nach Eintritt der Personen steigt die Lufttemperatur relativ schnell an. Gleichzeitig sinkt die relative Luftfeuchtigkeit ab, um danach bis über das Ausgangsniveau anzusteigen. Während die Lufttemperatur innerhalb weniger Stunden auf das Ausgangsniveau zurückfällt, dauert die Absenkung der relativen Luftfeuchte erheblich länger (vgl. 2.8.3).

2.9.2.3 Konservierungswissenschaftliche Bewertungskriterien

Bei der konservierungswissenschaftlichen Bewertung der Beobachtungen und der Messdaten wurden hinsichtlich der denkmalverträglichen Nutzbarkeit der Schlosskapelle mehrere Faktoren einzeln und auch im Zusammenhang betrachtet. Aufgrund der besonderen Wertigkeit und Gefährdung des Gesamtkunstwerks wird als selbstverständlich vorausgesetzt, dass Besucher*innen nicht nur beaufsichtigt, sondern auch geführt werden müssen. Als limitierend hinsichtlich der Personenzahl und der Aufenthaltsdauer müssen vor allem die folgenden Aspekte bewertet werden:

- Die Enge des Raums und der Sicherheitsabstand zum Schutz der Gemälde sowie die Unebenheiten und Stolpergefahren;
- Der maximale anthropogene Feuchteeintrag und die resultierende Klimaschwankung, die als verantwortbar erachtet werden;
- Das Schadenspotenzial anthropogener Klimaschwankungen, das im Vergleich zu den natürlichen täglichen und jahreszeitlichen Schwankungen höher einzustufen ist.

Aus bauphysikalischer Sicht erscheint der Aufenthalt von 25 Personen für die Dauer von einer Stunde pro Tag vertretbar.³⁴ Dieser Einschätzung liegen die Annahmen zugrunde, dass

- der Feuchteintrag von 25 Personen/Stunde rund einem Liter Wasser entspricht;
- der Feuchteintrag von einem Liter Wasser zum Anstieg der relativen Luftfeuchte von etwa 3 Prozentpunkten führt;
- die um 3 % r.F. erhöhte Luftfeuchtigkeit innerhalb von 12 bis 24 Stunden wieder ausgeglichen wird (s.o.).³⁵

Bei der konservierungswissenschaftlichen Bewertung wurde außerdem die Messung der klimaabhängigen Holzverformung berücksichtigt. Die Messung mittels Dehnungsmessstreifen ergab zum Beispiel während der Anwesenheit der geführten Gruppe am 17.01.2020 am Tafelgemälde „Abendmahl“ Werte bis 0,07 mm/m (vgl. 2.7.3). Wenngleich dieser Wert gering erscheint, so ist er dennoch schadensrelevant. Die hygroskopischen Materialien Holz, Leinwand und die Bildschichten quellen und schwinden klimaabhängig unterschiedlich stark, wodurch Spannungen entstehen, die zur Materialermüdung und Schädigung beitragen.³⁶ Im Gegensatz zu den natürlichen Klimawechseln, die den Innenraum verzögert und abgeschwächt erreichen, ist die Gefährdung durch anthropogene Schwankungen höher zu bewerten, denn sie werden sofort wirksam.³⁷

2.9.2.4 Möglichkeiten der Nutzung im Rahmen der präventiven Konservierung

Zweck der präventiven Konservierung ist, den Verfall zu verhindern. Durch Beeinflussung der Umgebungsbedingungen gilt es, Schäden und invasive Maßnahmen zu vermeiden, mindestens aber zu minimieren.³⁸ Im Falle der schon vorgeschädigten Schlosskapelle muss sichergestellt werden, dass keine neuen nutzungsbedingten Schäden entstehen können. Außerdem müssen Nutzungsbedingungen so definiert werden, dass den schon bzw. noch vorhandenen Mikroorganismen die Lebensgrundlage dauerhaft entzogen wird.³⁹

Die Schadensfaktoren und Bewertungskriterien wurden in der Projektgruppe eingehend erörtert.⁴⁰ Auf dieser Grundlage wurde die denkmalverträgliche Nutzung der Schlosskapelle unter folgenden Bedingungen für möglich erachtet:

- Das Nutzungsformat „geführte Gruppe“ ist auf 12 Personen zu beschränken (10 Besucher*innen und 2 Begleitpersonen) und die Aufenthaltsdauer auf 20 Minuten/Tag;
- das konservatorisch und sicherheitstechnisch bevorzugte Format ist die „geführte Kleingruppe“ mit geringerer Personenzahl, z.B. eine 6-er Gruppe (5 Besucher / 1 Begleitperson) mit einer Aufenthaltsdauer von 40 Minuten/Tag oder zwei 6-er Gruppen mit je 20 Minuten/Tag;
- die Art der Nutzung muss dokumentiert und mit Monitoring begleitet werden;
- jährliche Auswertung und Evaluierung der Daten und Erkenntnisse.

³⁴ Expertise von Herrn Dr. Berling dokumentiert im Projektprotokoll der Sitzung am 12.06.2020 im NLD im Kreise von Frau Achhammer, Herren Fiebiger, Prof. Dr. von der Goltz und Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer (NLD 2020/a).

³⁵ Der Ausgleich erfolgt durch die automatische Be- und Entlüftung sowie den natürlichen Luftwechsel.

³⁶ Vgl. Kilian et al. 2019.

³⁷ Vgl. 2.9.2.2: Die Holzverformung infolge anthropogener Klimaschwankung erfolgt fast zeitgleich mit dem Eintritt einer Besuchergruppe in den Innenraum, was z.B. anhand der Messdaten vom 21.02.2020 nachweisbar ist.

³⁸ Vgl. z.B. VDI 3798 Blatt 1 (2020).

³⁹ Vgl. Petersen et al. (Kapitel 2.6); Sedlbauer 2001.

⁴⁰ Dokumentiert in den Projektprotokollen der Sitzungen am 07.07.2020 (NLD 2020/b) und am 01.09.2020 (NLD 2020/c).

Am 23.11.2020 wurden die Projektergebnisse und die Nutzungsmöglichkeiten seitens des SBLH und NLD für Vertreter*innen der Stadt Celle und der Ev.-luth. Landeskirche präsentiert.⁴¹ Die Diskussion ergab, dass das Nutzungsinteresse weiter reichen könnte, als die Vorgaben es zulassen. Es wurde außerdem festgestellt, dass vor Beginn jeglicher Nutzung Vorbereitungen zu treffen wären, sowohl konzeptionell, als auch konservatorisch-restauratorisch und baulich. Für das Jahr 2021 wurde vereinbart, das Nutzungskonzept und den Zeitplan zur Umsetzung gemeinsam auszuarbeiten.

Die Planung für die weiteren Schritte können folgendermaßen skizziert werden:

- 2021 - Unbefristete Fortsetzung des Monitorings mit Klimamessung (NLD und HAWK)
 - Grundreinigung des Innenraums (NLD)
 - Ausarbeitung des Wartungs- und Pflegekonzepts (NLD in Abstimmung mit SBLH)
 - Ausarbeitung des Nutzungskonzepts (Stadt, Landeskirche, NLD, SBLH und LFN)
- 2022 - Kapellennutzung baulich und technisch vorbereiten
- 2023 - Beginn der Nutzungsphase mit dem Format der geführten Kleingruppe
- 2024 - Evaluierung
 - Anpassungen bei Bedarf: Nutzungs- und Erhaltungskonzept mit Monitoring.

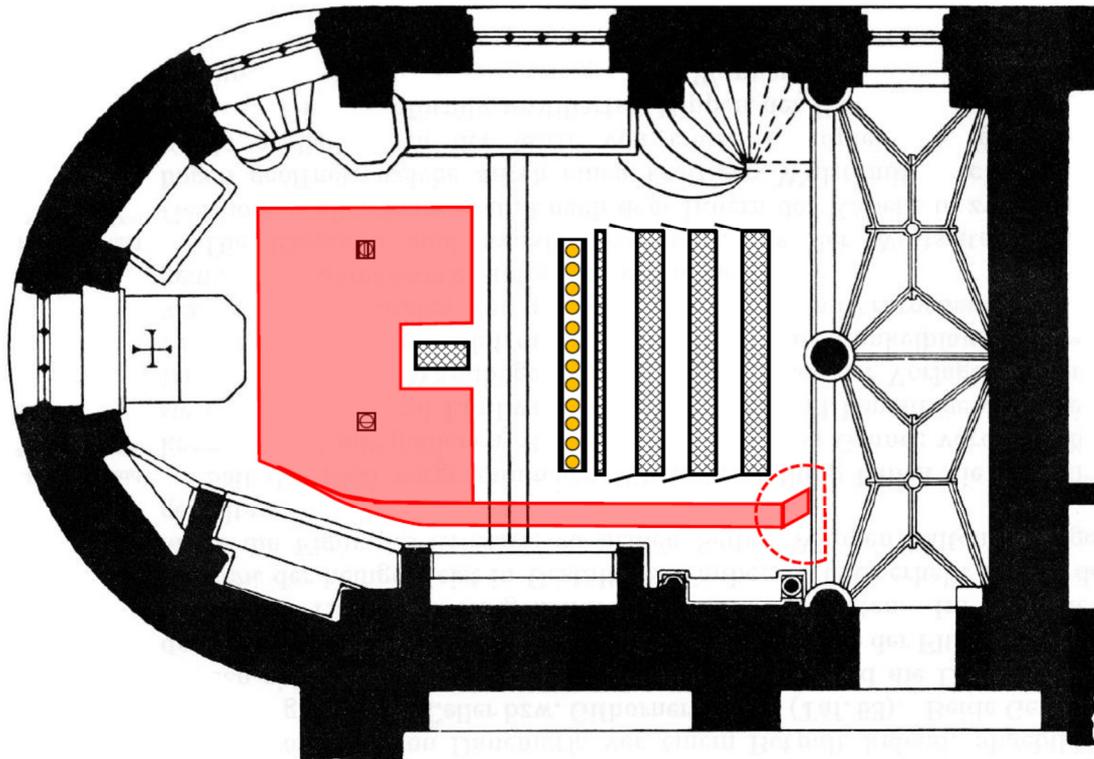


Abb. 2.9-02: Grundriss der Schlosskapelle: Rotmarkierung der Verkehrsfläche, die zur Nutzung durch „geführte Gruppen“ aus konservatorischer Sicht geeignet ist (aus: Kunstdenkmäler Celle 1937; bearbeitet von Achhammer/NLD 2020).

⁴¹ Teilnehmer*innen: Frau Herda, Herr Flügge, Herr Meyer-Bothling, Frau Groß (SBLH), Frau McDowell, Frau Lohmann, Herr Dr. Meiners, Frau Schmieglitz-Otten (Stadt Celle), Frau Dr. Springer, Frau Dr. Burgk-Lempart (Ev.-luth. Landeskirche und Kirchenkreis Celle), Frau Dr. Krafczyk, Herr Dr. Püttmann, Frau Achhammer, Herr Fiebiger, Herr Dr. Stadlbauer (NLD).

Bei der Ausarbeitung des Nutzungskonzepts müssen die folgenden Aspekte berücksichtigt werden:⁴²

- Ausweisung und Abgrenzung von Schutzzonen und zugänglichen Bereichen;
- Barrierefreiheit bzw. -unfreiheit, Beleuchtung und Sicherheit von Zu-/Ausgang und Wegführung;
- Bereitstellung von Raum zur Ablage und Aufbewahrung von Gegenständen wie Kleidung, Taschen, Rucksack, etc.;
- das Gestühl ist partiell mit toxischen Holzschutzmitteln kontaminiert; es ist Bestandteil der zu schützenden Ausstattung, insbesondere auf Grund der Gemälde in der Brüstung der vorderen Bankreihe;
- die bei kirchlicher Nutzung üblichen Utensilien, wie Blumenschmuck und Echkirchen, die konservatorisch schädliches Getier, Ruß und Staub eintragen, müssen ausgeschlossen werden;
- Qualifikation/Schulung des Führungs- und Aufsichtspersonals für die Besuchergruppen;
- jede Nutzung bedarf der qualifizierten Aufsicht;
- vor jeglicher Nutzung steht die Klärung aller Haftungsfragen, des Versicherungsschutzes sowie die Festlegung sämtlicher Verantwortungen;
- es sind grundsätzlich nur Nutzungen im Umfang des festgelegten zeitlichen und personellen Rahmens möglich.

2.9.3 Schlussfolgerungen und Ausblick

Mit den Projektergebnissen liegen ausreichend Daten und Erkenntnisse vor, um die Hauptziele des Modellprojektes zu erreichen: die Beseitigung und Vermeidung nutzungsbedingter anthropogener Umweltschäden. Die Projektlaufzeit war dafür zwar nicht ausreichend, aber in vertrauensvoller Zusammenarbeit der objektverantwortlichen Institutionen des Schlossherrn Land (SBLH, LFN und NLD) mit der Stadt Celle und der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers kann und sollte dies in nächster Zukunft gelingen.

Der erste Schritt ist getan. Die Ausarbeitung der Konzepte zur präventiven Konservierung und Nutzung wurde vereinbart. Im Weiteren wird es darauf ankommen, strukturiert und dokumentiert vorzugehen. Orientierungshilfen und Fachliteratur sind vorhanden und zu nutzen, z.B. die VDI-Richtlinie 3798, DIN EN 16853, DIN EN 15757, die Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung (VDL 2016) und der aktuelle Kenntnisstand zur präventiven Konservierung bzw. zur Schadensvorsorge mit Monitoring (vgl. z.B. Drachenberg 2019, Hg.; Morr et al. 2015; Reeb und Garrecht 2019).

⁴² Detaillierte Angaben zu den einzelnen Punkten enthält der Vermerk „Rahmenbedingungen der denkmalverträglichen Nutzung der Celler Schlosskapelle“, der von Frau Achhammer und den Herren Fiebiger und Prof. Dr. von der Goltz erstellt wurde (NLD 2020/d).

3. Kooperation, Kommunikation und Wissenstransfer

3.1 Projektbeteiligte Institutionen (alphabetisch) und Personen

HAWK Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst,

Hildesheim/Holzminde/Göttingen, Fakultät Bauen und Erhalten, Konservierungs- und Restaurierungswissenschaften,

Herr Prof. Dr. von der Goltz, Fachgebiet Gemälde und gefasste Holzobjekte, Renatastraße 11, 31134 Hildesheim

Frau Prof. Dr. Petersen, Fachgebiet Mikrobiologie, Bismarckplatz 10/11, 31135 Hildesheim

Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege (NLD), Scharnhorststr.1, 30175 Hannover

Frau Dipl.-Rest. Achhammer, Herren Dipl.-Rest. Fiebiger und Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer (NLD-Abteilung Fachdienste), Herr Dr. Rüsck (Abteilung Bau- und Kunstdenkmalpflege)

Projektleitung sowie denkmalfachliche, konservatorische und restauratorische Beratung

Ing.-Büro Dr. Berling, Kollwitzstr. 17, 38106 Braunschweig

Forschungskoooperationspartner des NLD in den Fachgebieten Bauphysik und Klimamessung sowie Auftragnehmer des SBLH (Machbarkeitsstudie Klimatechnik)

Staatliches Baumanagement Lüneburger Heide (SBLH), Fuhsestr.11, 29221 Celle

Baugruppe 3: Herren Dipl.-Ing. Matteredne und Meyer-Bothling, Frau Dipl.-Ing. Groß

Betriebstechnik: Herren Dipl.-Ing. Flügge, Bürke und Harnisch

Baufachliche Projektleitung und Beratung

Universität Stuttgart, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB),

Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart

Herr Prof. Dr.-Ing. Garrecht, Herr Dipl.-Ing. Ramadan

Fachgebiete Bauphysik, 3D-Modellrechnung, Ingenieurwissenschaft

3.2 Projektbegleitende Institutionen, Firmen und Personen

Ev.-luth. Landeskirche Hannovers (Ev.-luth. LKH)

Ev.-luth. Kirchenkreis Celle, Wensestr. 1, 29223 Celle

Superintendentin Frau Dr. Burgk-Lempart und Herr Schmidt-Seffers

Landeskirchenamt, Rote Reihe 6, 30169 Hannover

Präsidentin Frau Dr. Springer, Herr Baudirektor Dipl.-Ing. Lemke, Herr Hon.-Prof. Dr. Albrecht

Niedersächsisches Landesamt für Bau- und Liegenschaften, Landesliegenschaftsfonds (LFN/Fiskuserbschaften), Lünertorstraße 8, 21335 Lüneburg

Herr Dr. Guthke, Frau Bertram

Stadt Celle, Neues Rathaus, Am Französischen Garten 1, 29221 Celle

Frau Stadträtin McDowell, Herr Stadtbaurat Kinder, Herr Dr. Meiners, Frau Schmieglitz-Otten/Residenzmuseum, Herr Dipl.-Rest. Lühning-Reger, Herren Dipl.-Ing. Prietzel und Bellgardt, Herren Hausmeister Bloom, Friedrich und Heidemann

Wellmer-Restaurierungen, Herr Dipl.-Rest. Wellmer, Strother Weg 1a, 29584 Himbergen

Hille Regelungstechnik GmbH, Herr Jörg Hille, Im Meierort 8, 30826 Garbsen

Universität Stuttgart, Materialprüfanstalt (IWB),
Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart
Herr Dr. Frick
Bauwerkserhaltung / Klima, Komfort, Schadstoffbelastung

3.3 Kooperation und Dokumentation

Die Zusammenarbeit der Projektbeteiligten erfolgte auf der Grundlage von Kooperationsvereinbarungen mit dem das Projekt leitenden NLD. Zur Präsentation und Diskussion der Zwischenergebnisse und zur Projektsteuerung dienten insgesamt 9 protokollierte Sitzungen der Projektgruppe am 21.04. und 05.09.2017, am 07.03., 02.07. und 04.09.2018 sowie am 24.05. und am 23.10.2019.

Die am 28.05.2020 im Celler Schloss geplante Fachtagung musste aufgrund der Corona-Pandemie abgesagt werden und soll nach Möglichkeit im Laufe des Jahres 2021 durchgeführt werden.

Außerhalb der genehmigten Projektlaufzeit wurde am 07.07.2020 eine Videokonferenz der Projektgruppe durchgeführt (technische Organisation durch das SBLH in Celle, Gesprächsleitung und Protokoll durch das NLD). Zusätzlich beteiligt waren Frau Bertram und Herr Dr. Guthke vom Landesliegenschaftsfonds (LFN). Dabei wurden zunächst die wichtigsten Projektergebnisse zusammengefasst und erörtert. Außerdem wurden die Messwerte und Erfahrungen aus den Nutzungserprobungen diskutiert, um die Rahmenbedingungen einer möglichen zukünftigen Nutzung der Schlosskapelle abzuleiten.

Mehr als 20 monatliche Jour-Fixe-Termine dienten während der Projektlaufzeit zur Steuerung und Begleitung der praktischen Arbeiten in und um die Schlosskapelle, z.B. zum Einbau der Lüftungs- und Entfeuchtungsanlage und zur Kontrolle des Testbetriebs. Die Organisation dieser ebenfalls protokollierten Termine erfolgte durch das Staatliche Baumanagement (meist unter Federführung von Herrn Dipl.-Ing. Meyer-Bothling/SBLH) in Abstimmung mit dem NLD. Der Teilnehmerkreis bestand dabei in der Regel aus Herrn Dr. Berling und den je nach Aufgabenstellung benötigten Fachleuten des SBLH und des NLD.

3.4 Öffentlichkeitsarbeit, Medienecho, Vorträge und Publikationen

Die Celler Schlosskapelle wurde in den Medien seit dem Jahr 2012 verstärkt thematisiert. Zum einen aufgrund ihrer kulturhistorischen Bedeutung und andererseits auch wegen ihrer eingeschränkten öffentlichen Zugänglichkeit. Seitens der Stadt Celle und der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers sowie des Kirchenkreises Celle wurde die weitestgehende touristische und kirchliche Nutzbarkeit der Schlosskapelle gefordert, zumindest in dem Umfang, der bis 1995 möglich war. In einer Schlagzeile der Celler Zeitung wurde die Forderung am 01.10.2012 zugespitzt formuliert: „Die Scheibe muss weg – Schlosskapelle soll für Besucher im Reformationsjahr 2017 wieder unmittelbar erlebbar sein“.

Ziel der denkmalfachlichen Öffentlichkeitsarbeit war die Information, insbesondere über die Gefährdung der Schlosskapelle sowie auch über die Notwendigkeit der Schadensvorsorge zur Vermeidung nutzungsbedingter anthropogener Schäden. Die Inhalte des DBU-geförderten Modellprojektes sowie der Machbarkeitsstudie „Klimatechnik“ wurden mit den Vertreter*innen der Stadt Celle und der Ev.-luth. Landeskirche erörtert und es wurde vereinbart, die Nutzung im Rahmen der Projektlaufzeit zu erproben und mittels Klimamessung und Modellrechnung zu evaluieren.

Auf dieser Grundlage konnte die Kommunikation zunehmend versachlicht werden. Zudem ist es gelungen, die Projektziele und -inhalte in die städtische und kirchliche Öffentlichkeitsarbeit rund um das Reformationsjubiläumsjahr 2017 zu integrieren, insbesondere im Rahmen der Ausstellung „ZEICHEN SETZEN“ von Mai bis November 2017. Die Schlosskapelle wurde dabei in unterschiedlicher Weise thematisiert:

- Mit einer Sonderausstellung im Celler Schloss (mit großformatigen Fotos, 3D-Filmen und Exponaten), wobei auch über das Forschungsprojekt und über die Gefährdung informiert wurde;
- als schutzbedürftiges Originalexponat, das die Besucher aufgrund der zuvor erläuterten Gefährdung nur durch die Glaswand des Besucherraums besichtigen konnten;
- mit der Buchpublikation „Die Celler Schlosskapelle“ und mehreren Beiträgen im Begleitband zur Ausstellung „ZEICHEN SETZEN“.⁴³

Das zweite große medienwirksame Ereignis im Rahmen des Jubiläumjahres 2017 war der Reformationsgottesdienst am 25. Oktober mit Landesbischof Meister, der in der Schlosskapelle eröffnet und in der Stadtkirche fortgesetzt wurde. Dieser Termin wurde in einer gemeinsamen Pressekonferenz der Stadt Celle, der Ev.-luth. Landeskirche und des Landes Niedersachsen, vertreten durch das SBLH und das NLD, am 11.10.2017 angekündigt. Im Einvernehmen aller Beteiligten wurde dabei neben der außerordentlichen Bedeutung der Reformation für Celle auch die Bedeutung der Schlosskapelle erläutert, als Zeugnis der Reformationszeit und als Kulturerbe von europäischem Rang, das es zu bewahren gilt.

Medienecho 2017

Die besondere Aufmerksamkeit für die Schlosskapelle (einschließlich ihrer Zugänglichkeit und auch ihrer digitalen Präsentation mittels 3D-Film in der Ausstellung) spiegelt sich im Medienecho zum Reformationsjubiläum wider:

- „Reformation wichtigste Zeit Celles“ mit Info zur Ausstellung ZEICHEN SETZEN (CZ/Cellesche Zeitung 19.01.2017)
- Zahlreiche Veranstaltungsreihen und Einzelveranstaltungen des Residenzmuseums zu verschiedenen kunst- und kulturhistorischen sowie theologischen Aspekten der Schlosskapelle
- „Himmel auf Erden – Schlosskapelle wird mit 3D-Technik wiederbelebt“ (CZ 27.01.2017)
- „Schlosskapelle aus Dornröschenschlaf wecken – Lutherbeauftragte plant Gottesdienst mit Landesbischof“ (CZ 18.02.2017)
- „Celle ist Reformationsstadt Europas“ (CZ 18.05.2017)
- „Celle lässt Herz höher schlagen – Staatsministerin besucht Ausstellungen“ (CZ 07.06.2017)
- Reformation erleben mit allen Sinnen – 3D-Filme ermöglichen Eintauchen in gigantische Bilderwelt der Schlosskapelle“ (CZ 08.06.2017)
- Pressemitteilung der Ev.-luth. Landeskirche zum Pressegespräch am 11.10.2017
- „Gottesdienst zum Reformationsjubiläum wird Teil einer Studie“ (Celle-heute 11.10.2017)
- „Öffnet die Schlosskapelle auf Dauer für die Öffentlichkeit?“ (Celler Presse 11.10.2017)
- „Celler Schlosskapelle öffnet zum Reformationsjubiläum“ (Focus-online 11.10.2017)
- „Celler Schlosskapelle öffnet nach über 20 Jahren“ (www.ndr.de/nachrichten/11.10.2017)

⁴³ Vgl. Schmieglitz-Otten 2012 sowie die Beiträge von Schmieglitz-Otten 2017, Steiger 2017 sowie Achhammer, von der Goltz und Stadlbauer 2017 in: Meiners (Hg.) 2017: ZEICHEN SETZEN – 500 Jahre Reformation in Celle.

- „Celler Schlosskapelle öffnet zum Reformationsjubiläum“ (Neue Presse/dpa und www.welt.de 11.10.2017; HAZ 12.10.2017)
- „Testlauf für Schlosskapelle – 25 CZ-Leser können an exklusivem Reformations-Gottesdienst teilnehmen“ (CZ 12.10.2017)
- „Wieviel Mensch verträgt die Kunst?“ (HAZ 26.10.2017)
- „Schlosskapelle ist erwacht – 18 ausgewählte Celler durften gestern für einige Minuten in die Schlosskapelle ... Mit der Veranstaltung beginnt eine zweijährige Testphase. Wissenschaftler werden bei einzelnen Veranstaltungen Daten sammeln. Diese sollen Auskunft geben, wie die Schlosskapelle künftig genutzt werden kann.“ (CZ 26.10.17)
- „Am Feiertag ab ins Museum? 70.000 Besucher bisher in Reformationsausstellung“ (CZ 28.10.2017)
- Ausstellung als Publikumsmagnet – Celler wollen riesige Bilder der Schlosskapelle dauerhaft erhalten. Stadt sucht nach geeignetem Ort.“ (CZ 16.11.2017)
- „Juwel der Reformationszeit – Hofkapelle im Celler Residenzschloss soll 2018 wieder zugänglich werden“ (Weserkurier 26.11.2017)

Der Abbau der Schlosskapellen-Ausstellung in der Gotischen Halle im November 2017 wurde in Celle und darüber hinaus bedauert. Umso größer war die Freude, als die Ausstellung am 27.09.2018 in aktualisierter Form wiedereröffnet werden konnte. Der Raum im 3. Obergeschoss des Nordostturms war zwar etwas kleiner und weniger gut zugänglich, jedoch vom Grundriss genau passend, weil er direkt oberhalb der Schlosskapelle lag. Der Standort war im Rahmen einer Umbauphase des Residenzmuseums bis 2020 befristet nutzbar. Die wichtigsten Informationen zum DBU-geförderten Modellprojekt „Schlosskapelle“ konnten die Besucher in drei MP4-Filmen an einem eigens installierten Monitor abrufen: a) Beteiligte, Aufgaben und Ziele; b) Schadensfaktor Klimaschwankung; c) das bauphysikalische 3D-Rechenmodell zur Strömungs- und Nutzungssimulation.

Medienecho 2018 bis 2020

- „Neue Erkenntnisse zur Celler Schlosskapelle“, Pressemitteilung des NLD und des SBLH: Einladung zur Informationsveranstaltung und Ausstellungseröffnung am 27.09.2018 im Celler Schloss (19.09.2018)
- **RTL-Filmbericht „Zu Besuch im Celler Schloss“; online seit 14.09.2018**
- <https://www.rtl nord.de/nachrichten/facettenreich-und-wunderschoen-wir-haben-das-schloss-celle-besucht.html>
- „Wenn die Klimaampel auf rot springt. Nur hinter einer Glaswand kann man die Schlosskapelle bewundern. Experten arbeiten daran, dass schon bald wieder Besucher den Zugang bekommen – wenn auch in begrenztem Umfang“ (CZ 27.09.2018)
- „Langeweile gibt es hier nicht. Drei Hausmeister koordinieren im Schloss Bauarbeiten und kontrollieren diverse Lämpchen“ (CZ 12.07.2019)
- „Im August wird Gerüst abgebaut. Sanierungsarbeiten am Schloss ziehen sich in die Länge / Nach Ostflügel ist Südflügel dran“ (CZ 13.07.2019)
- „Sensoren für das Kirchenklima. Ein Modellprojekt untersucht, wie die Kapelle besucht werden kann“ (Ev. Zeitung 22.03.2020).

Vorträge und Publikationen

Im Rahmen der folgenden Veranstaltungen wurden Vorträge gehalten, um über die Ziele und Zwischenergebnisse des Modellprojektes zu informieren:

- Publikation 2017a: „Die Celler Schlosskapelle im Spannungsfeld zwischen Nutzung und Bewahrung“⁴⁴
- Publikation 2017b: „Denkmalverträgliche Nutzung planen und erproben - das Modellprojekt Celler Schlosskapelle“⁴⁵
- Vorträge von NLD-Präsidentin Frau Dr. Krafczyk und Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer als Grundlage für das Pressegespräch am 11.10.2017 in der Gotischen Halle im Schloss
- Vortrag von Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer: „Neue Erkenntnisse zur Celler Schlosskapelle“ als Beitrag zur Informationsveranstaltung und Ausstellungseröffnung am 27.09.2018 im Celler Schloss
- Publikation 2018: „Update zur Celler Schlosskapelle: Das Modellprojekt zur denkmalverträglichen Nutzung und Bewahrung“⁴⁶
- Vortrag von Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer: „Das Modellprojekt Celler Schlosskapelle oder: Wieviel Mensch verträgt das Denkmal?“ als Beitrag zur Fachtagung „Klimazone Kirche“, HAWK Hildesheim am 17.-18.01.2019 mit Publikation.⁴⁷
- Vorträge von Frau Schmieglitz-Otten (Residenzmuseum Celle), Herrn Dipl.-Rest. Fiebiger und Hon.-Prof. Dr. Stadlbauer: "Die Celler Schlosskapelle - Geschichte und Bedeutung sowie Nutzung und Bewahrung" in der Reihe der Montagsvorträge am 02.12.2019 im NLD Hannover

⁴⁴ Achhammer, Von der Goltz, Stadlbauer 2017.

⁴⁵ Stadlbauer in NLD (Hg.): Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 1, 2017.

⁴⁶ Achhammer, Fiebiger, Stadlbauer in: NLD (Hg.): Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 1, 2018.

⁴⁷ Stadlbauer et al. in Birkenbeul (Hg, 2019): Klimazone Kirche.

4. Zusammenfassung und Ausblick

Die Projektgruppe war von Januar 2017 bis April 2020 in sieben Schwerpunkten tätig:

- Klimamessung und Erfassung bauphysikalischer Kennwerte (Ing.-Büro Dr. Berling)
- Bauphysikalische 3D-Modellierung und Strömungssimulation (IWB, Universität Stuttgart)
- Klimastabilisierung (Konzept Ing.-Büro Dr. Berling, Realisierung im Auftrag des SBLH)
- Präventiv konservierende Bauunterhaltung (SBLH und NLD)
- Mikrobiologisches und restauratorisches Monitoring (HAWK und NLD)
- Denkmalverträgliche Nutzung: Nutzungserprobung (Stadt Celle, Ev.-luth. LkH, Ing.-Büro Dr. Berling, NLD, SBLH) sowie Definition der Rahmenbedingungen zur Beseitigung und Vermeidung anthropogener Umweltschäden (Projektgruppe, Federführung NLD)
- Wissenstransfer und Öffentlichkeitsarbeit (Projektgruppe, Federführung NLD)

Zur Beseitigung und Vermeidung anthropogener Umweltschäden wurden vielfältige Untersuchungen und Maßnahmen durchgeführt. Umfangreiche Klimamessdaten und Kennwerte bildeten die Grundlage für den innovativen Projektansatz zur Erarbeitung und Validierung eines bauphysikalischen 3D-Rechenmodells der Schlosskapelle, das der Strömungssimulation diente. Das Konzept der Klimastabilisierung und Raumluftkonditionierung durch eine Anlage zur automatischen Be-/Entlüftung und Entfeuchtung wurde außerhalb des Modellprojektes entwickelt (Machbarkeitsstudie Klimatechnik). Die Prüfung und Bestätigung ihrer konservatorischen Wirksamkeit und Notwendigkeit waren bedeutende Projektarbeiten, bei denen das 3D-Rechenmodell und die Strömungssimulation mit Erfolg zum Einsatz gekommen sind.

Der aus Mitteln des Landes Niedersachsen finanzierte Einbau der Lüftungs- und Entfeuchtungsanlage erfolgte im Kontext der präventiv-konservierenden Bauunterhaltung. Dabei wurde insbesondere der unkontrollierte Luftwechsel durch Fenster- und Türöffnungen reduziert und der Zugang zum Besucherraum mit einem Windfang ausgestattet. Nach dem problemlosen Probetrieb (von Mai 2019 bis März 2020) wurde die Anlage in Bezug auf die Temperatur und relative Raumluftfeuchte (r.F.) mit den Sollwerten +5 bis +18°C und 55 bis 60 % r.F. folgendermaßen programmiert:

- Die Einhaltung des Sollwertbereichs wird durch die Ansaugung von Außenluft erzielt, soweit dies aufgrund der Außenlufttemperatur und -feuchtigkeit möglich ist.
- Die apparative Luftentfeuchtung setzt ein, wenn innen und außen 60 % r.F. überschritten werden und die Entfeuchtung mit Außenluft deshalb nicht möglich ist.
- Die Anlage sorgt außerdem für eine kontrollierte Luftbewegung und Durchmischung, falls sich im Innenraum eine Temperaturdifferenz von 3 K einstellen sollte⁴⁸.

Zur Bestimmung der Sollwerte mussten die wichtigsten Schadensfaktoren „Feuchtigkeit“ und „Trockenheit“ konservierungswissenschaftlich bewertet werden, um den „Klimakorridor“ zu definieren, in dem es für die besonders gefährdeten und vorgeschädigten Tafel- und Leinwandgemälde der Schlosskapelle weder zu feucht noch zu trocken ist. Zudem wurde die Anlage so programmiert, dass die relative Luftfeuchte sogar innerhalb des Korridors gestuft geregelt wird, um Klimaschwankungen zu minimieren⁴⁹. Die Anlage wurde bewusst nicht mit einer apparativen Luftbefeuchtung ausgestattet, um das Risiko von lokalen Feuchtebelastungen im Bereich von Wärmebrücken auszuschließen. Im Gegensatz zum oberen Sollwert des Klimakorridors kann der untere 55 % r.F.-Wert deshalb nicht „erzwungen“ werden. Dieser Wert kann von der Anlage nur dann erreicht oder eingehalten werden, wenn die Außenluft mindestens 55 % r.F. aufweist.

⁴⁸ Das Raumvolumen beträgt rund 800 m³ und die Lüftungsanlage ist im Bereich von 500-800 m³/h regelbar.

⁴⁹ Bei steigender relativer Luftfeuchte wird oberhalb von 58 % r.F. wenn möglich mit Außenluft entfeuchtet.

Indikator der früheren nutzungsbedingten anthropogenen Umweltschäden ist ein zum Teil noch aktiver Schimmelbefall, der vor allem in den Jahren der stärksten Übernutzung zwischen 1980 und 1994 entstanden ist. Die mikrobiologische Untersuchung von insgesamt 19 Referenzflächen ergab den Nachweis von drei Aspergillus und mehreren Penicillium Arten sowie auch von Cladosporien und Bakterien. Mittels Referenzflächenmonitoring konnte bisher noch kein nennenswerter Rückgang des mikrobiellen Befalls festgestellt werden. Jedoch ist dies aufgrund des Anlagenbetriebs mit Luftentfeuchtung und -bewegung in Zukunft auch dort zu erwarten, wo bisher problematische Mikroklimata mit erniedrigten Oberflächentemperaturen vorherrschten.

Die denkmalverträgliche Nutzung der Schlosskapelle wurde mit unterschiedlichen Formaten erprobt. Das konservatorisch und sicherheitstechnisch bevorzugte Format ist die „geführte Gruppe“ mit höchstens 12 bzw. zweimal 6 Personen bei einer Aufenthaltsdauer von 20 Minuten/Tag. Die bauphysikalisch definierten Grenzwerte (25 Personen und 60 Minuten/Tag) werden im Sinne der präventiven Konservierung deutlich unterschritten, um eine erneute anthropogene Substanzgefährdung mit Sicherheit ausschließen zu können. Die detaillierte Ausarbeitung eines Nutzungskonzeptes war im Rahmen der Projektlaufzeit nicht vorgesehen.⁵⁰ Zu berücksichtigen sind dabei insbesondere die Abgrenzung von Schutzzonen und Sicherheitsvorkehrungen in Bezug auf die Wegführung, Barrierefreiheit bzw. -unfreiheit, Beleuchtung sowie die Aufbewahrung von (regennasser) Kleidung. Außerdem ist die Nutzung des Gestühls nur sehr eingeschränkt möglich.⁵¹

Die Bedeutung der Schlosskapelle mit ihrer reformatorisch geprägten Ausstattung wurde im Jahr 2017 aus Anlass des Reformationsjubiläums in den Medien in besonderer Weise thematisiert. Die Projektgruppe hat in diesem Kontext zur Öffentlichkeitsarbeit und zum Wissenstransfer wesentlich beigetragen, insbesondere im Rahmen der Ausstellung „Zeichen Setzen“ und mit den Presseterminen rund um den Reformationsgottesdienst am 23.10.2017 (vgl. 3.4). Der anfangs emotionale Diskurs über die öffentliche Zugänglichkeit und die Gefährdung der Schlosskapelle konnte dadurch zunehmend versachlicht werden. Bei den Nutzungserprobungen mit geführten Gruppen hat sich außerdem gezeigt, dass der Aufenthalt im Innenraum in Verbindung mit dem vorherigen Ausstellungsbesuch nicht nur besonders informativ gestaltet werden konnte, sondern auch effektiv und zeitsparend.

Mit den Ergebnissen des Modellprojektes und der Inbetriebnahme der Anlage zur Raumluftkonditionierung wurden wichtige Voraussetzungen geschaffen, das Gesamtkunstwerk Schlosskapelle auf Dauer zu erhalten und denkmalverträglich zu nutzen. Die erforderliche Grundlage in Form eines detaillierten Nutzungs-, Wartungs- und Pflegekonzeptes ist noch zu schaffen. Die Vereinbarung zur Ausarbeitung im Jahr 2021 ist jedoch getroffen.

Geplant sind außerdem die folgenden weiteren Schritte:

- 2021 - Fortsetzung des Monitorings mit Klimamessung (NLD und HAWK)
 - Grundreinigung des Innenraums (NLD mit Restaurator*in freiberuflich)
- 2022 - Kapellennutzung baulich und technisch sowie rechtlich/vertraglich vorbereiten
- 2023 - Möglicher Beginn der Nutzungsphase mit geführten Gruppen
- 2024 - Evaluierung
 - Anpassungen (Nutzungs- und Erhaltungskonzept sowie Klimatechnik), wenn nötig.

⁵⁰ Vgl. 2.9.2.4: Am 23.11.2020 wurde vereinbart, im Jahr 2021 ein Nutzungs-, Wartungs- und Pflegekonzept mit Zeitplan für die Umsetzung zu erarbeiten. Beteiligt waren Vertreter*innen der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers, der Stadt Celle sowie des SBLH und des NLD.

⁵¹ In der Brüstung der vorderen Bankreihe befinden sich Tafelgemälde, die vor Berührung und Erschütterung geschützt werden müssen. Zudem ist das Gestühl mit toxischen Holzschutzmitteln behandelt worden; Hautkontakt sollte daher vermieden werden.

5. Literatur

Achhammer C., von der Goltz M.: Fakten – Fragen – Thesen: Die Celler Schlosskapelle im Spiegel neuer Untersuchungen. In: Niederdeutsche Beiträge zur Kunstgeschichte, Band 2, Seite 131-155, Petersberg 2016.

Achhammer C., von der Goltz M., Stadlbauer E.: Die Celler Schlosskapelle im Spannungsfeld zwischen Nutzung und Bewahrung. In: Meiners J. (Hg.): ZEICHEN SETZEN – 500 Jahre Reformation in Celle. S. 174-193, Petersberg 2017.

Achhammer C., Fiebiger C., Stadlbauer E.: Update zur Celler Schlosskapelle: Das Modellprojekt zur denkmalverträglichen Nutzung und Bewahrung. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen, Heft 1/2018, S. 189.

Berling H. (a): Schlosskapelle Celle – Messung und Beurteilung raumklimatologischer Daten. Auftraggeber: NLD Hannover, Braunschweig 2015 (unveröffentlicht).

Berling H. (b): Schlosskapelle Celle – Bestimmung des natürlichen Luftwechsels. Auftraggeber: Staatliches Baumanagement Lüneburger Heide, Braunschweig 2015 (unveröffentlicht).

D'Agostino D., Maria Congedo P.: CFD modeling and moisture dynamics implications of ventilation scenarios in historical buildings, Building and Environment, Elsevier 2014.

Dental A. und Dietrich U.: Thermische Behaglichkeit – Komfort in Gebäuden, Dokumentation Primero-Komfort, 2006.

DIN EN ISO 7730 (2003): Ergonomie des Umgebungsklimas - Analytische Bestimmung und Interpretation der thermischen Behaglichkeit durch Berechnung des PMV- und des PPD-Indexes und der lokalen thermischen Behaglichkeit (ISO/DIS 7730:2003); Deutsche Fassung prEN ISO 7730:2003.

DIN EN 15757 (2010): Erhaltung des kulturellen Erbes – Festlegungen für Temperatur und relative Luftfeuchte zur Begrenzung klimabedingter mechanischer Beschädigungen an organischen hygroskopischen Materialien, Berlin 2010.

DIN EN 16853 (2017): Erhaltung des kulturellen Erbes - Erhaltungsprozess - Entscheidungsprozesse, Planung und Umsetzung; Deutsche Fassung EN 16853:2017.

Drachenberg T. (Hg.): Schützen, pflegen und erhalten – Entwicklungen in der präventiven Konservierung. Arbeitsheft 55, Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum, Imhoff Verlag Petersberg 2019.

Flieger B., Jin M., Steinhoff P., Schmidt M., Müller D. und Chen Q.: Modellierung von Innenraumströmungen in der Gebäudesimulation, fünfte deutsch-österreichische IBPSA Konferenz, Proceedings S. 437-445, RWTH Aachen, Deutschland: BauSIM 2014.

Frick J.: Dehnungsmessungen in der Schlosskapelle Celle. Materialprüfanstalt der Uni Stuttgart, unveröffentlicher Zwischenbericht, 2020.

Kilian R.: Klimastabilität historischer Gebäude – Bewertung hygrothermischer Simulationen im Kontext der präventiven Konservierung. Dissertation. Universität Stuttgart 2013.

Kilian R., Holl K., Bichlmair S., Naumović T.: Klimastabilität historischer Gebäude. Einflussfaktoren und Rückschlüsse für die präventive Konservierung am Beispiel von Schloss Linderhof. RESTAURO 8/2012, S. 34-38, München 2012.

Kilian R., Bichlmair S., Brandl H.: Raumklima und Klimawirkungen in Kirchen – Bewertung des Schadenspotentials. Birkenbeul I.; Weyer A. (Hg.): Klimazone Kirche, S. 76 – 93, Hildesheim 2019.

Klein M. und Garrecht H.: CFD-Strömungssimulation zur Sicherstellung eines behaglichen und energieeffizienten Schwimmbadbetriebs, dritte deutsch-österreichische IBPSA Konferenz, Proceedings S. 316-323, Technische Universität Wien, Österreich: BauSIM 2010.

Kosak W., Gritzki R., Perschk A., Rösler M. und Felsmann C.: Simulation der Raumklimatischen Zustände in der Umgebung einer Person bei verschiedenen Lüftungssystemen, fünfte deutsch-österreichische IBPSA Konferenz, Proceedings, RWTH Aachen, Deutschland: BauSIM 2014.

Lass H.: Frühe Schlosskapellen in Niedersachsen am Beispiel der Schlosskirchen in Celle und Bückeburg. In (Paulus, H.-E., Bearb.): Schlosskirchen und Protestantismus. Die protestantische Schlosskirche und ihr Verhältnis zum Schlossbau. Jahrbuch der Stiftung Thüringer Schlösser und Gärten 2016, Band 20, S. 44-54, Regensburg 2017.

Morr O. F., Garrecht H., Reeb S.: Monitoring – Von Klima bis Schädigung. RESTAURO 5/2015, S. 18-21, München 2015.

Nadler N.: Zur Personenwärme bei der Kühllastberechnung nach VDI 2078. In: Heizung, Lüftung, Haustechnik, Nr. 7, S. 36-40, HLH Bd. 56, VDI 2005.

NDSchG Niedersächsisches Denkmalschutzgesetz, 2011
(<https://www.mwk.niedersachsen.de/startseite/kultur/denkmalpflege/denkmalpflege/denkmalpflege-18885.html>).

NLD 2020/a-c: Protokolle der Projektgruppensitzungen. Schriftensammlung der Abteilung Fachdienste/Restaurierung.

NLD 2020/d: Auswertung der Nutzungserprobungen und Definition der daraus resultierenden Rahmenbedingungen zur denkmalverträglichen Nutzung der Celler Schlosskapelle. Unveröffentlichter Vermerk, Schriftensammlung der Abteilung Fachdienste/Restaurierung.

Reeb S. und Garrecht H.: Was ist Klima-Monitoring? In: Birkenbeul I.; Weyer A. (Hg.): Klimazone Kirche, S. 71 - 75, Hildesheim, 2019.

Schmieglitz-Otten J. (Bearb.), Residenzmuseum im Celler Schloss und Landschaft des vormaligen Fürstentums Lüneburg (Hg.): Kunstwelten – Politikwelten – Glaubenswelten. Die Celler Schlosskapelle, München 2012.

Schmieglitz-Otten J.: Zwischen Macht und Frömmigkeit. Die Celler Schlosskapelle als „Gesamtkunstwerk“ der Reformationszeit. In: Meiners J. (Hg.): Zeichen setzen – 500 Jahre Reformation in Celle, 139-157, Petersberg 2017.

Schwarz A.: Das Klima eines unbeheizten historischen Raums. Untersuchungsergebnisse aus der Celler Schlosskapelle. RESTAURO 5/92, S.314-317, München 1992.

Schwarz A., Gadesmann D.: Holzfeuchtemessungen an Tafelgemälden. Untersuchungen aus der Celler Schlosskapelle. RESTAURO 4/94, S. 256-261, München 1994.

Sedlbauer K.: Vorhersage von Schimmelpilzbildung auf und in Bauteilen. Dissertation Universität Stuttgart 2001.

Siebern H., Lütgens H. (Bearb.): Die Kunstdenkmäler der Provinz Hannover, Stadt Celle, Heft 21 des Gesamtwerks, S. 117, Hannover 1937.

SBLH 2016: Aufmaßpläne erstellt durch Büro Bergmann GmbH, Pfaffenhofen im Auftrag des Staatlichen Baumanagement Lüneburger Heide.

Stadlbauer E.: Denkmalverträgliche Nutzung planen und erproben – Das Modellprojekt Celler Schlosskapelle. In: Berichte zur Denkmalpflege in Niedersachsen. Heft 1/2017, S.190-192, Hameln 2017.

Stadlbauer et al 2019: Stadlbauer E., Achhammer C., Berling H., Fiebiger C., Garrecht H., v. d. Goltz M., Meyer-Bothling M., Petersen K., Ramadan Z.: Das Modellprojekt Celler Schlosskapelle oder: Wieviel Mensch verträgt das Denkmal? In: Birkenbeul I.; Weyer A. (Hg.): Klimazone Kirche, S. 111 - 131, Hildesheim, 2019.

Steiger A.: Die Heilige Schrift im Raum zur Ausstattung der Schlosskapelle in Celle. In: Meiners, J. (Hg.): Zeichen setzen – 500 Jahre Reformation in Celle, S. 158 - 173, Petersberg 2017.

von der Goltz M., Achhammer C., Stadlbauer E.: Sachbericht zum EFRE-Projekt „Gefährdungsbeurteilung der Celler Schlosskapelle“. Niedersächsisches Landesamt für Denkmalpflege Hannover 2015 (unveröffentlicht).

VDI 2078: Berechnung der thermischen Lasten und Raumtemperaturen (Auslegung Kühllast und Jahressimulation). 2015.

VDI 3798 Blatt 1: Materielles Kulturerbe - Erfassung, Untersuchung und Erhaltung unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse. 2020.

Vereinigung der Landesdenkmalpfleger in der Bundesrepublik Deutschland und Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (VdL, Hg.): Vorsorge, Pflege, Wartung, Empfehlungen zur Instandhaltung von Baudenkmalern und ihrer Ausstattung. VdL 2016 (www.vdl-denkmalpflege.de)

Dank

Das Modellprojekt wurde aus Mitteln der Deutschen Bundesstiftung Umwelt gefördert. Die Projektleitung und die Beteiligten danken für die Bewilligung der Fördermittel sowie auch für die fachliche Begleitung durch Frau Fuhrmann und Herrn Dr. Bellendorf (DBU-Förderschwerpunkt 12: Bewahrung und Sicherung national wertvoller Kulturgüter vor schädlichen Umwelteinflüssen).



Zur Finanzierung des Projektes „Celler Schlosskapelle“ einschließlich der Machbarkeitsstudie Klimatechnik wurden im Zeitraum von 2014 bis 2020 weitere Mittel bereitgestellt, die zur Erfassung, Erforschung und Erhaltung des Gesamtkunstwerks wesentlich beigetragen haben. Der Stadt Celle und der Tansey-Stiftung, dem Landeskirchenamt der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers und dem Kirchenkreis Celle sowie dem Land Niedersachsen und dem Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) sei dafür ausdrücklich gedankt. Weiterer Dank gilt der Projektgruppe für die ausgezeichnete Zusammenarbeit sowie allen Personen und Institutionen, die das Projekt unterstützt und begleitet haben.