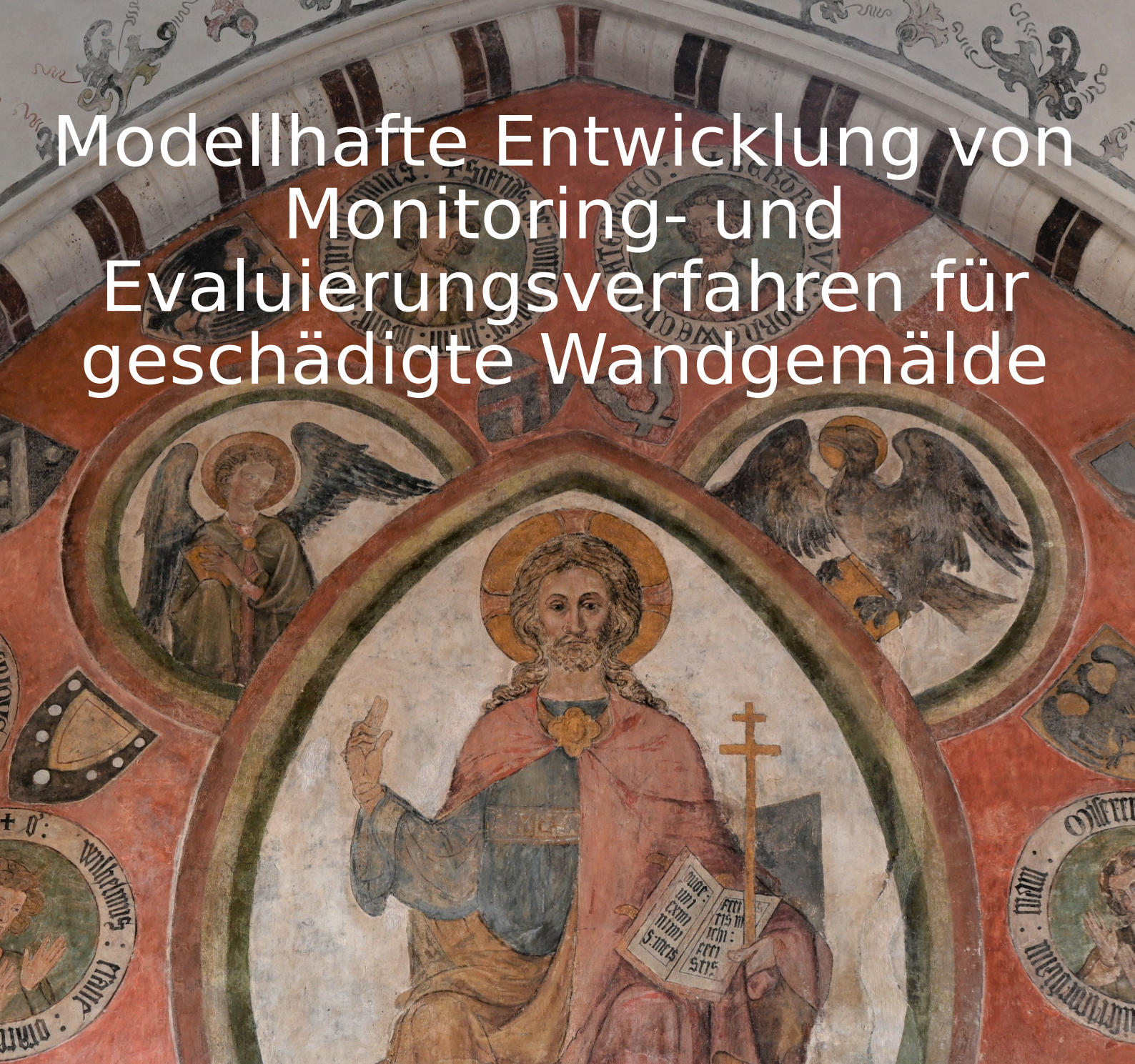


# Modellhafte Entwicklung von Monitoring- und Evaluierungsverfahren für geschädigte Wandgemälde



# Modellhafte Entwicklung von Monitoring- und Evaluierungsverfahren für vor mehr als 25 Jahren untersuchte und restaurierte, durch anthropogene Umwelteinflüsse geschädigte Wandgemälde

H. Berling, H. Juling, K. Petersen, A. Stahlbuhk, M. Steiger, S. Taubert

Mit Textbeiträgen von:

J. Klocke, P. Möhlenhoff, J. Schultz, H.-J. Schwarz

**Antragssteller:**

Karin Petersen  
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK)  
Fakultät Bauen und Erhalten  
Hohnsen 4  
31134 Hildesheim  
karin.petersen-intox@t-online.de

**Projektpartner:**

Michael Steiger, Amelie Stahlbuhk  
Universität Hamburg (UHH)  
Fachbereich Chemie – Institut für anorganische und angewandte Chemie  
Martin-Luther-King-Platz 6  
20146 Hamburg  
michael.steiger@uni-hamburg.de; amelie.stahlbuhk@uni-hamburg.de

Helmut Berling  
Ingenieurbüro  
Kollwitzstr. 17  
38106 Braunschweig  
h.berling@t-online.de

Herbert Juling, Frank Schlütter  
ehem. MPA Bremen  
Paul-Feller-Straße 1  
28199 Bremen  
herbert.juling@uni-bremen.de; schluetter@mpa-bremen.de

Sven Taubert  
Büro STENZEL & TAUBERT  
Restaurierung und Restaurierungsplanung  
Altkaditz 23a  
01139 Dresden  
sven.taubert@st-denkmal.de

# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	<b>5</b>
1.1	Mikrobiologie	8
1.1.1	Mikroorganismen	8
1.1.2	Forensische Fotografie als Untersuchungsmethode an Kunst- und Kulturgut	25
1.1.3	Biochemische Untersuchungsmethoden	29
1.2	Salze	33
1.3	Klima	38
1.3.1	Schädigungspotential	38
1.3.2	Klimatische und bauphysikalische Einflussgrößen	39
1.3.3	Ursachen und Auswirkungen beheben	41
<b>2</b>	<b>AXIEN</b>	<b>42</b>
2.1	Rückschau und heutiger Zustand	42
2.1.1	Ausgangssituation 2019	42
2.1.2	Wie stellt es sich heute dar, visuelle Bewertung des Objektes	43
2.1.3	Fazit 2022	45
2.2	Mikrobiologie	46
2.3	Salze	54
2.4	Klima	56
2.4.1	Beurteilung und Bewertung des Istklimas im Jahre 1993 – Dorfkirche Axien	56
<b>3</b>	<b>EILSUM</b>	<b>58</b>
3.1	Rückschau und heutiger Zustand	58
3.2	Mikrobiologie	62
3.3	Salze	71
3.4	Klima	75
3.4.1	Reduzierung des Feuchtehaushaltes in der ev.-ref. Kirche in Eilsum/Krumhörn	75
<b>4</b>	<b>HEILIGEN-GEIST-HOSPITAL LÜBECK</b>	<b>77</b>
4.1	Rückschau und heutiger Zustand	77
4.1.1	Empfehlungen aus dem Forschungsprojekt	80
4.1.2	Umsetzung Konservierung und Restaurierung	81
4.1.3	Visuelle Wahrnehmung 2022	82
4.1.4	Bewertung	82
4.1.5	Visuelle Untersuchung und fotografische Detailaufnahmen	83
4.1.6	Sofortmaßnahmen Januar 2022	84
4.1.7	Empfehlungen	84
4.2	Mikrobiologie	86
4.2.1	Durchgeführte Untersuchungen	86
4.2.2	Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen	88
4.3	Salze	90
4.4	Klima	95

4.4.1	Klimatologische und bauphysikalische Untersuchungen hinsichtlich der thermisch/hygrischen Belastung der Wandmalerei – Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck	95
<b>5</b>	<b>IDENSEN</b>	<b>97</b>
5.1	Rückschau und heutiger Zustand	97
5.2	Mikrobiologie	100
5.3	Salze	104
5.4	Klima	107
5.4.1	Optimierung des Raumklimas in der Sigwardskirche Idensen	107
<b>6</b>	<b>SÜDERENDE</b>	<b>110</b>
6.1	Rückschau und heutiger Zustand	110
6.2	Mikrobiologie	112
6.2.1	Ergebnisse der mikrobiologischen Nachkontrolle im März 2020	114
6.3	Salze	116
6.4	Klima	120
6.4.1	Optimierung des Raumklimas infolge starker Salzbelastung der Raumumschließungsfläche – Kirche St. Laurentii in Süderende/Föhr	120
<b>7</b>	<b>ABSCHLIEßENDE BEWERTUNG UND EMPFEHLUNGEN</b>	<b>123</b>
<b>8</b>	<b>LITERATUR</b>	<b>130</b>

# 1 Einleitung

Im Jahre 1988 startete im Rahmen des vom BMFT<sup>1</sup> finanzierten Förderprogramms „Forschung für den Denkmalschutz“ ein erstes Projekt mit dem Ziel, die Schädigungsprozesse an historischen Wandmalereien zu untersuchen und Lösungen für eine nachhaltige Restaurierung zu finden. Auch in Folgeprojekten wurden etliche Objekte mit unterschiedlichen Umwelt- und Umfeldbedingungen untersucht. Offiziell endeten die BMFT-Projekte 1998.

Im Zuge dieser damaligen Förderprogramme des BMFT konnte eine Vielzahl von derartigen Wandmalereien durch ein interdisziplinäres Forscherteam, dem sowohl erfahrene Restauratoren als auch auf dem Gebiet tätige Naturwissenschaftler aus den Bereichen Bauphysik, Baustoffmikroskopie, Chemie, Mineralogie und Mikrobiologie und auch Kunsthistoriker angehörten, untersucht werden.

Von allen Objekten liegen umfangreiche Untersuchungsergebnisse vor, die in den Archiven der damaligen koordinierenden Stellen und/oder der beteiligten Forschungsinstitute und -laboratorien noch weitestgehend vorliegen. Eine Gesamtzusammenstellung oder gar umfassende Ergebnisübersicht liegt aber nicht vor.

Für diese untersuchten Objekte mit durchaus unterschiedlichen Schadensbildern mündeten die Ergebnisse in konkreten Handlungsempfehlungen. Nicht in allen Fällen ist bekannt, ob und wann diese Empfehlungen restauratorisch umgesetzt wurden und ob sie zum erhofften Ziel geführt haben. Von den damals Koordinierenden und restauratorisch Verantwortlichen sowie den beteiligten Forschungsinstituten sind heute noch einige verfügbar, so dass eine erneute Bewertung und Untersuchung dieser Objekte und Erkenntnisse zur weiteren Entwicklung möglich sind. Es ist äußerst zielführend, nach 25-30 Jahren eine Aufarbeitung mit folgenden **Fragestellungen** durchzuführen.

- Welche Untersuchungen wurden damals durchgeführt und zu welchen Ergebnissen kamen diese?
- Welche Handlungsempfehlungen und Konservierungskonzepte wurden damals vorgeschlagen?
- Welche Maßnahmen wurden dann umgesetzt und
- haben die vorgeschlagenen Konzepte zum Erfolg geführt?

Genau solche Reflektierungen fehlen in den allermeisten Fällen, könnten sie doch die damaligen Forschungsprojekte und -ergebnisse evaluieren und wichtige Erkenntnisse über die Nachhaltigkeit der vorgeschlagenen Sanierungskonzepte bringen. In einigen Fällen besteht darüber hinaus die Möglichkeit, mit mittlerweile etablierten neuen Untersuchungsmethoden, die damals noch nicht zur Verfügung standen, ergänzende oder erweiterte Ergebnisse zu erzielen. Zum Beispiel könnten heute mit den mittlerweile bekannten thermodynamischen Gleichgewichtszuständen von Salzgemischen (anstatt der Einzelsalze) Nachberechnungen der Ausgleichsfeuchten erstellt und mit dem heutigen Zustand verglichen werden.

---

<sup>1</sup> Bundesministerium für Forschung und Technologie

Neben dieser Rückschau auf die damaligen Verhältnisse der einzelnen Objekte veränderten sich im Inneren der untersuchten Gebäude u. a. die Nutzungsbedingungen und damit einhergehend auch die Heizungskonzepte, sowohl anlagentechnisch als auch im Hinblick auf die zur Steuerung festgelegten Klimaparameter. Aber auch Dämmmaßnahmen und der Austausch von Fenstern und Türen spielen hier eine wichtige Rolle. Hiervon sind erhebliche Einflüsse auf bestimmte Schadensverläufe zu erwarten.

Die seinerzeit erkannten **Schäden** lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Direkte Feuchteschäden verschiedenen Ursprungs (aufsteigende Feuchte, unregelmäßige Wasserläufe und Wassereintritt durch Schadstellen in der Gebäudehülle, Kondensation durch Kältebrücken und Klimastau),
- Salzschiäden (im Klimawechsel periodische Kristallisation und wieder in Lösung gehen unter und auf der Maleroberfläche und einhergehende Schädigung, Salzausblühungen) einschließlich bauschädlicher Salze aus ungeeigneten Sanierungsmaterialien oder Umgebungsbelastungen,
- Mikrobiologische Besiedlung (Schimmel, Bakterien, Algen).

Die dadurch häufig in Kombination auftretenden Schäden wurden damals diskutiert, und im Rahmen der Gebäudeanamnese wurden Handlungsempfehlungen ausgesprochen, wobei eben gerade das Zusammentreffen mehrerer Faktoren in einem Objekt häufig zu Problemen führte. Beispielsweise könnten bei schädigenden Salzausblühungen die wiederholten Kristallisationszyklen durch ein feuchteres Klima weitgehend vermieden werden. Liegt jedoch gleichzeitig eine mikrobielle Belastung vor, so wird diese bei feuchterem Klima begünstigt. Hier muss ein enger, objektspezifischer Klimakorridor eingerichtet werden, der beiden Schadensprozessen Rechnung trägt.

Die Fragestellungen der einzelnen Schädigungsfaktoren können beispielhaft an damals untersuchten Objekten nachvollzogen werden.

### **Direkte Feuchteschäden**

In St. Petri, Eilsum-Krummhörn wurden Probleme bei Regenwassereintrag über die Schallöffnungen im Glockenturm beobachtet. Nach einem Starkregenereignis traten innerhalb von wenigen Tagen massives Algen- und Schimmelpilzwachstum im Bereich der Kalotte auf. Die Schallöffnungen wurden noch im Projektverlauf mit Holzlamellen geschlossen. An der gesamten Kirche wurden Maßnahmen zur Ableitung von Regenwasser neu installiert oder erneuert, schadhafte Fugen im Ziegelmauerwerk wurden geschlossen, Musterflächen für eine dünne Außenschlämme wurden angelegt, im Weiteren aber nicht ausgeführt.

In der Dorfkirche Axien wurde extrem aufsteigende Feuchte festgestellt. Ein Abtrag des umgebenden, über die Jahrhunderte angestiegenen Bodenniveaus infolge von Überschwemmungsereignissen wurde hier empfohlen. Hinzu kamen massive Feuchteschäden, u. a. aufgrund von nicht instandgesetzten Wasserableitungssystemen.

### **Salzschiäden, Salzausblühungen**

Salzbelastung und damit einhergehende Schadensprozesse wurden auch in der auf der Insel Föhr befindlichen Kirche St. Laurentii, Süderende festgestellt. Zudem wurden erhöhte Feuchtigkeit und

massive Klimaschwankungen durch das damalige Heizungsverhalten nachgewiesen, die zwingend besser eingestellt werden sollten. Mit Sanierungsmaßnahmen eingebrachten Salze erhöhen neben den weiteren Schäden, die durch Salzkristallisationszyklen verursacht werden, den pH-Wert und ermöglichen es somit alkaliphilen Bakterienarten der Gattung Halalkalicoccus, sich in den belasteten Bereichen anzusiedeln. Auffällige rosa Verfärbung heben diese besiedelten Flächen störend hervor.

### **Festigungsmittel**

Organische Festigungsmaterialien unterliegen bei entsprechendem Klima einem mikrobiellen Abbau. Schadensprozesse, die durch Mikroorganismen induziert oder zumindest beeinflusst werden, können durch derartige Substrate verstärkt werden. Dies gilt nicht nur für Naturstoffe wie tierische Leime oder Naturstoffderivate wie die neuzeitlicheren Materialien auf Zellulosebasis, sondern auch für synthetische Produkte wie Acrylate, Polyvinylalkohol oder Polyvinylacetat.<sup>[1]-[4]</sup> Starke mikrobielle Besiedlungen wurden in Eilsund in Kaseinhinterspritzungen sowie ebenfalls dort und in Idensen in Acrylatfixierungen nachgewiesen.



## **1.1 Mikrobiologie**

### **1.1.1 Mikroorganismen**

Hohe Feuchtigkeit einhergehend mit mikrobieller Besiedlung sowohl durch Algen als auch durch Bakterien und sogar unter der Oberflächenfixierung durch Schimmelpilze konnten in der Sigwardskirche, Idensen, nachgewiesen werden.

Für Objekte für die bei hoher Salzbelastung gleichzeitig eine starke mikrobielle Besiedlung erkannt wurde, lässt sich eine zumindest weitgehende Reduzierung der Schadensprozesse nur unter sehr scharf eingegrenzten Klimakorridoren sicherstellen. In einigen dieser Objekte erschien daher eine Hemmstoffanwendung als unverzichtbar. Diese Maßnahmen liegen inzwischen mehr als 20 Jahre zurück, auch hier sollte daher die Nachhaltigkeit kontrolliert werden. Als Beispiele können nach derzeitigem Kenntnisstand die Malereien in St. Petri, Eilsum dienen.

Letztlich erfolgte die Anwendung eines Biozids auf Basis eines quartärnären Ammoniumsalzes.

#### **Nachweis mikrobieller Besiedlung<sup>[5]-[10]</sup>**

In der Projektphase erfolgte der Nachweis einer mikrobiellen Besiedlung ganz überwiegend durch die Entnahme von Probenmaterial („Mikrostoffproben“) und im Anschluss durchgeführte Anzuchtversuche auf verschiedenen Nährmedien, im Idealfall konnten diese durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchungen ergänzt werden.

Grundsätzlich ist zu sagen, dass die Akzeptanz zur Entnahme von Materialproben in den letzten Jahrzehnten drastisch zurückgegangen ist und somit andere Methoden erprobt und etabliert wurden.

#### **Nachweis durch Anzucht im Labor**

Unabhängig davon, ob die Anzucht aus Objektmaterial – bei Wandgemälden ungefähr 5 bis 50 mg – oder aus zerstörungsfrei entnommenem, der Malerei aufliegendem Material (z. B. Stäuben) erfolgt, sind hier bei der Bewertung der Ergebnisse Einschränkungen zu berücksichtigen.

#### **Proben zur Anzucht von Keimen**

Hierzu wurden die entnommenen Materialproben je nach verfügbarer Materialmenge entweder anteilig oder vollständig unter aseptischen Bedingungen auf verschiedene Nährmedien aufgebracht, um die in den Proben enthaltenen Keime zum Wachstum zu bringen und diese im Anschluss anhand der makroskopisch sichtbaren Kolonien zu analysieren. Wurden die Proben feingemörsert und in steriler Flüssigkeit (i. d. R. physiologische Kochsalzlösung mit geringem Detergenzgehalt (Tween 80) zur besseren Ablösung der Keime) gleichmäßig verteilt und eine definierte Menge dieser die Keime enthaltenden Suspension ausplattiert, so konnte auf die auf die verschiedenen Arten bezogene Keimbelastung durch sogenannte Kolonie bildende Keime pro Gramm Probenmaterial zurückgerechnet werden. Erfasst werden mit dieser Methode nur die keimfähigen Zellen, die sich auf dem jeweiligen Nährboden entwickeln konnten.

Inzwischen erfolgt die Probenentnahme eher zerstörungsfrei durch Abstriche mit sterilen Wattestäbchen, wobei die oberflächlichen Keime vorsichtig mit einem sterilen trockenen

Wattestäbchen abgenommen werden. Anschließend können diese im Labor unter aseptischen Bedingungen auf Nährböden kultiviert werden. Wurde der Abstrich in einem definierten Bereich vorgenommen, können die keimbildenden Einheiten (KBE) quantifiziert werden. Ebenso ist es möglich diese Keime am Objekt mit sterilem Baumwollsaat abzunehmen und diese in einem zweiten Schritt direkt von dem Saat auf Nährböden zu übertragen. Auch hier kann über die beprobte Oberfläche die Belastung auf die Fläche bezogen erfasst werden. Eine Bestimmung der überwiegenden Keime kann auf Gattungs- oder Artebene erfolgen. Der Vorteil dieser Form des „Abklatschpreparates“ gegenüber dem üblichen Verfahren (das Objekt direkt mit dem Nährboden abzustempeln) liegt darin, dass es nicht zur Anreicherung verwertbarer organischer Substanzen auf der Objektoberfläche kommen kann. Außerdem ist es auf diesem Wege besser möglich, die abgenommenen Keime zu lagern (dies ist zum Beispiel notwendig, wenn das Labor erst nach ein paar Tagen erreicht werden kann). Die Nährböden werden anschließend für mindestens zwei Wochen im Labor inkubiert und das Wachstum beobachtet.

Man geht hier also davon aus, dass jede keimfähige Zelle, die sich auf dem beimpften Nährboden entwickeln kann, auch zu einer Kolonie anwächst und somit für weitere Untersuchungen genutzt werden kann.

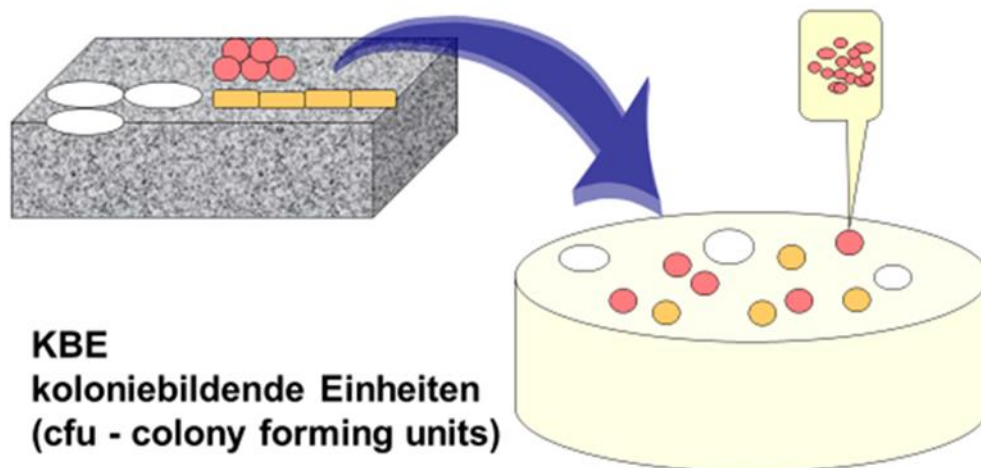


Abb. 1-1: Nachweis von Mikroorganismen durch Anzucht.

Für den unten dargestellten Ansatz (Abb. 1-2) wurden 8 verschiedene Pilzarten jeweils in derselben Keimzahl auf drei unterschiedlich zusammengesetzte Nährmedien - in dem Fall Fertignahrmedien auf verschiedenen farbigen Trägern - aufgeimpft, um zu zeigen, wie sehr das Nährstoffangebot die Entwicklung der Kolonien beeinflusst. Somit wird deutlich, dass sich alle lebensfähigen Zellen, die auf einen für sie geeigneten Nährboden aufgebracht werden, zu Kolonien entwickeln können, völlig unabhängig davon, ob sie unter den am Objekt herrschenden Lebensbedingungen – besonders im Hinblick auf das Klima und die Nährstoffversorgung – überhaupt zum Wachstum gelangen könnten.

Diese Einschränkungen gelten ebenso, wenn die Keime für die Anzucht ohne Entnahme von Objektmaterial, also zerstörungsfrei, direkt auf Nährböden übertragen werden, indem die

Nährböden auf die zu beurteilende Oberfläche aufgedrückt werden (z. B. Rhodac-Platten oder Hy-lite), oder ob die Keime von den Oberflächen mittels steriler Wattestäbchen abgenommen werden und diese in Suspension gebracht werden, die dann in definierter Menge auf die Nährböden aufgebracht wird, oder ob die Abnahme der Keime von der Oberfläche mit sterilisiertem Baumwollsaat erfolgt, der dann auf die Nährböden aufgedrückt wird.

In jedem Fall eignet sich als Bezugsbasis zur Bewertung der Verkeimung die beprobte Fläche, was ebenfalls einen Vergleich zwischen verschiedenen Situationen ermöglicht.

Einschränkend muss für diese und die weiteren beschriebenen zerstörungsfreien Techniken aber gesagt werden, dass so nur die Keime erfasst werden können, die auf der Oberfläche zugänglich sind. Durchaus auch denkbare Anteile, die unter der Malschicht ausgebildet sind, werden so nicht nachgewiesen.

Gegen Ende der damaligen Förderungsphase wurde es daher als zwingend erforderlich erkannt, dass auch in Situationen, die eine Materialentnahme für die Untersuchung im Mikroskop nicht ermöglichten, ebenfalls die am Objekt tatsächlich die Besiedlung aufbauenden Arten zu analysieren und diese von den zufällig auf den Oberflächen abgelagerten Anflugkeimen zu unterscheiden. Dieser Notwendigkeit konnte mit der Klebefilmuntersuchung Rechnung getragen werden.

### **Klebefilmpräparat zur direkten Mikroskopie**

Das Mikroskopie-Präparat dient der Identifizierung des gegebenenfalls am Objekt vorliegenden mikrobiellen Befalls.

Bei der Erstellung eines solchen Präparates wird ein handelsüblicher durchsichtiger Klebefilmstreifen sehr vorsichtig auf die Oberfläche des zu beprobenden Objektes aufgebracht. Die auf der Oberfläche ausgebildeten Besiedlungsanteile bleiben dabei an der Klebeschicht haften und können abgehoben werden.

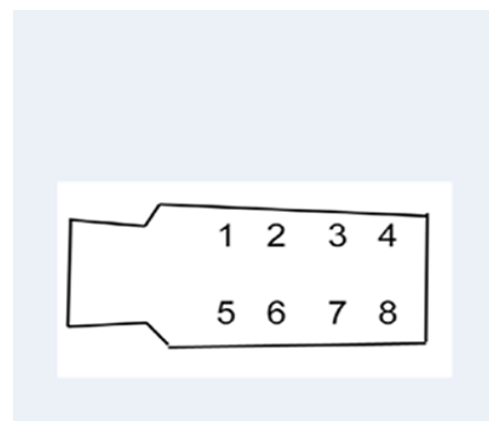


Abb. 1-2: Wachstum verschiedener Arten auf unterschiedlichen Nährmedien.<sup>[8]</sup>

Das am Klebefilm anhaftende Probenmaterial wird im Mikroskop auf mikrobiologische Strukturen hin untersucht. Je nach Art und Häufung der Zellen kann eine Aussage darüber getroffen werden, ob am Objekt ein Befall vorliegt oder nicht. Gegebenenfalls kann anhand der Morphologie eine Identifizierung von Organismen erfolgen. In der Regel lässt sich eine Gattungsbestimmung für Schimmelpilze vornehmen.

Um auch vorliegendes farbloses Zellmaterial sichtbar zu machen, werden die Proben vor der Analyse mit Cotton Blue angefärbt. Bei Cotton Blue handelt es sich um eine Färbemethode, mit deren Hilfe u. a. Chitin und Cellulose angefärbt werden kann.

In den folgenden Beispielen (Abb. 1-3 bis 6) wird durch das Vorhandensein von Hyphen verdeutlicht, dass hier eine Besiedlung und nicht nur Anflugkeime nachgewiesen wurden.

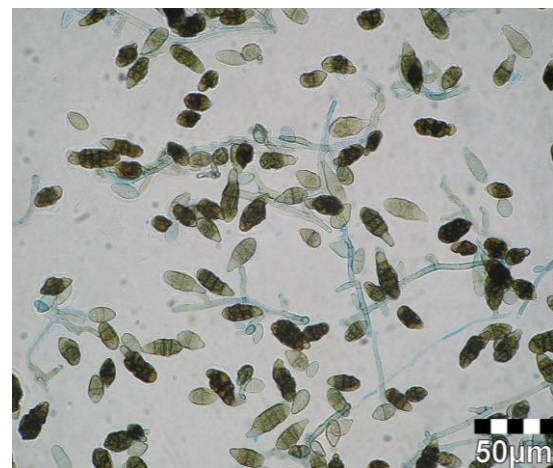
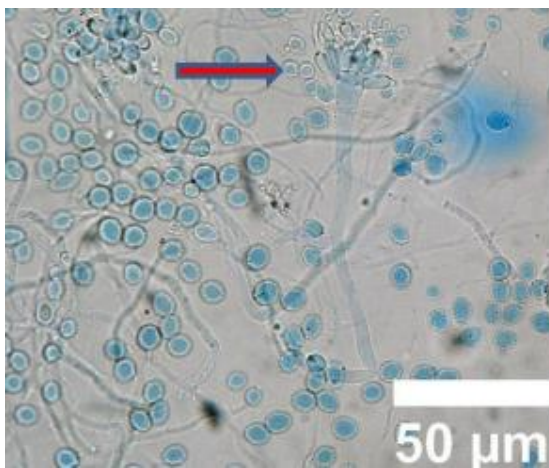


Abb. 1-3 und Abb. 1-4: *Aspergillus* sp. und *Alternaria* sp.

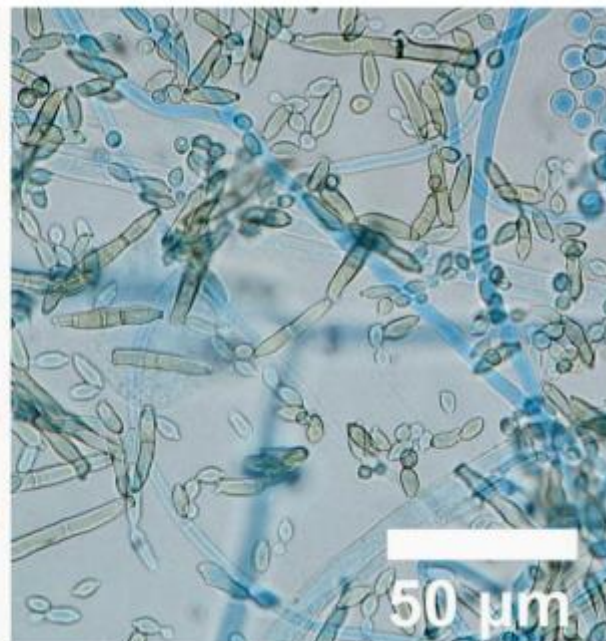


Abb. 1-5 und Abb. 1-6: *Aspergillus* sp. und *Alternaria* sp.

In jüngster Zeit sind auf dem Markt auch sehr leistungsstarke Digitalaufsetzmikroskope verfügbar. Mit diesen Geräten kann am Objekt in ausreichender Qualität eine bis zu 200-fache Vergrößerung erreicht werden, die Übertragung erfolgt direkt auf einen Computerbildschirm und ermöglicht es somit, die Befunde direkt am Objekt zu diskutieren, auch wenn die Sicherheit der Analyse nicht mit einer mikroskopischen Untersuchung der angesprochenen Filme bei mindestens 400-facher Vergrößerung zu vergleichen ist.

Auch eine dauerhaft Anfärbung der Strukturen in situ ist selbstverständlich nicht möglich. Allerdings sind diese digitalen Mikroskope inzwischen durch die Nutzung verschiedener LEDs auch in der Lage, durch verblassende Fluoreszenzfarbstoffe (z. B. Calcofluorwhite) markierte Strukturen hervorzuheben (Abb. 1-7).

Der Einsatz dieser Geräte war im hier beschriebenen Projekt noch nicht möglich, da die Entwicklung der mit verschiedenen LED-Leuchten ausgerüsteten Digital-Mikroskope erst gegen Ende der Laufzeit abgeschlossen war und diese nicht rechtzeitig verfügbar waren. Die weitere Entwicklung dieser Technik sollte unbedingt weiterverfolgt werden.

### **Eigenfluoreszenz**

Besonders einige Schimmelpilze – keineswegs jedoch alle Arten – zeigen bei Anregung unter UV-Strahlung eine auffällige Fluoreszenz, die es u. a. ermöglicht, in diesen Fällen die Ausbreitung einer etablierten Besiedlung deutlich abzugrenzen und so die Bereiche für eine Probenahme/Untersuchung sicher festzulegen.

Die physiologische Bedeutung derartiger Stoffwechselprodukte ist in den meisten Fällen bisher nicht bekannt, jedoch ist darauf hinzuweisen, dass eine Vielzahl von Mykotoxinen zu einem derartigen Phänomen führt.

Ohne Hinzufügen eines Fluoreszenzfarbstoffs kann so z. B. im Verlauf von Monitoring-Untersuchungen auch eine weitere Ausbreitung eines Befalls dokumentiert werden. Die Ausmalung der Kuppel in St. Joseph, Osnabrück, wäre hier ein vielversprechendes Beispiel, da die Besiedlung in dem hier gezeigten Schriftband auch bei nicht optimalen Aufnahmen ein punktgenaues Wiederfinden der Kolonien und somit sogar ein Auszählen ermöglicht, das dann eine Veränderung eindeutig und quantifizierbar belegt (Abb. 1-8 bis Abb. 1-9).

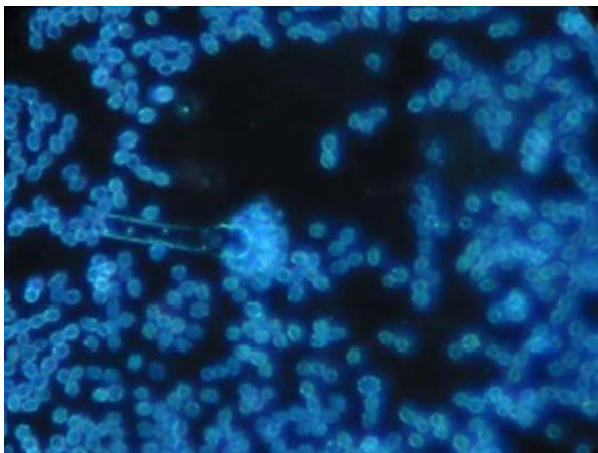


Abb. 1-7: *Aspergillus* sp., Calcofluorwhite-Anfärbung unter UV-Anregung.



Abb. 1-8: Spruchband in Osnabrück vom Hubsteiger aus ohne Einrüstung zugänglich (Bild Jakobs).



Abb. 1-9 und Abb. 1-10: Fluoreszierende Kolonien und Detailaufnahme.

Es folgen weitere Beispiele für eine derartige Eigenfluoreszenz unter UV-Anregung (Abb. 1-11 bis Abb. 1-15).



Abb. 1-11: Schlosskapelle Celle, Tageslicht.

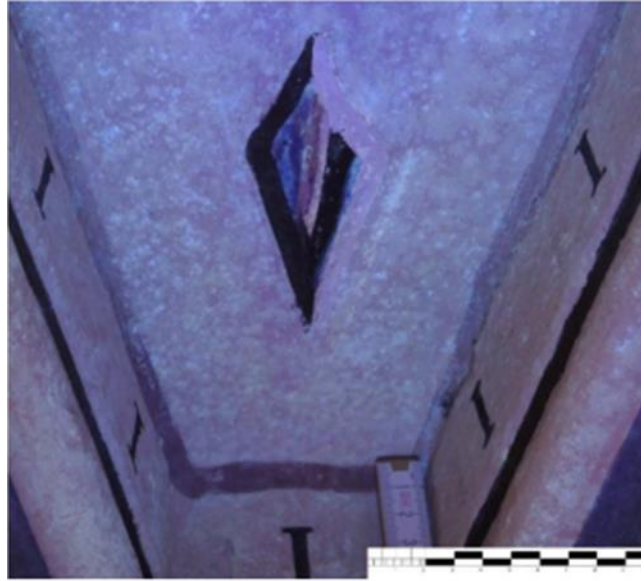


Abb. 1-12: Schlosskapelle Celle, UV-Aufnahme.



Abb. 1-13: St. Martin, Greene, UV-Anregung.



Abb. 1-14: Dellingsen, Kapitel mit Schimmel, UV-Anregung.

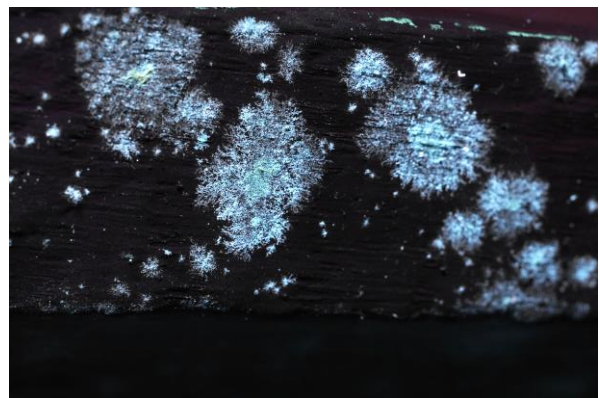


Abb. 1-15: Detail aus Abb. 1-14.

## Beispiel Wies

Allerdings ist auch bei dieser Untersuchungsform zunächst sicherzustellen, dass die Fluoreszenz auf Schimmelkolonien zurückzuführen ist. Im Zusammenhang mit Untersuchungen an dem Deckengemälde in der Wies Kirche in Steingarden wurde auch belegt, dass von Fliegen auf dem

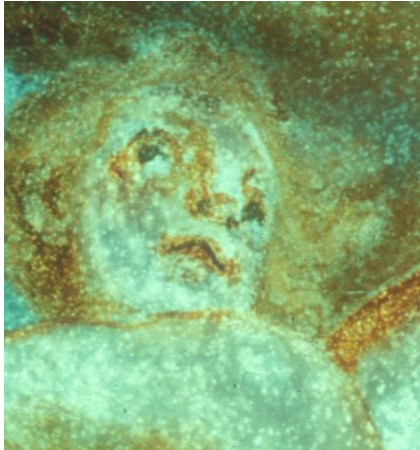


Abb. 1-16: Deckengemälde, UV-Anregung (Foto Butz, Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, BLfD).



Abb. 1-17: Isolat zeigt UV-Fluoreszenz.



Abb. 1-18: Auflagerung und Hyphen im Rasterelektronen-mikroskop.

Gemälde abgesetzte Exkremete ebenfalls eine Eigenfluoreszenz aufweisen. Diesem Phänomen wurde inzwischen in mehreren Abschlussarbeiten an verschiedenen Hochschulen nachgegangen.<sup>[11],[12]</sup> Im Fall der Wies konnten jedoch aus den betroffenen Bereichen zudem unter UV-Anregung fluoreszierende Isolate kultiviert werden.

Zusammenfassend muss betont werden, dass es sich bei den hier beschriebenen Techniken um reine Strukturanfärbungen handelt, weder lässt sich hieraus auf den Vitalitätszustand (lebend/tot) noch auf eine Aktivität der markierten Zellen schließen.

### **Differenzierende Färbungen<sup>[13]</sup>**

Abweichend davon sind jedoch auch Farbstoffe in Gebrauch gekommen, die es ermöglichen, lebende von toten Zellen zu unterscheiden, wobei hier keine Aussage über die Aktivität der lebenden Zellen getroffen werden kann.

Eine solche Möglichkeit der Differenzierung lebender und toter Zellen stellt das sogenannte „*Live-Dead BacLight Bacterial Viability Kit*“ dar, das mit Einschränkungen auch für Schimmelpilze genutzt werden kann (Abb. 1-19). Auch hier erfolgt die Beurteilung unter UV-Anregung. Der rote Farbstoff (Propidiumiodid) des Gemischs dringt nur in tote Zellen mit defekten Membranen ein. Auch Kombinationen mit Calcofluorwhite sind hier möglich.



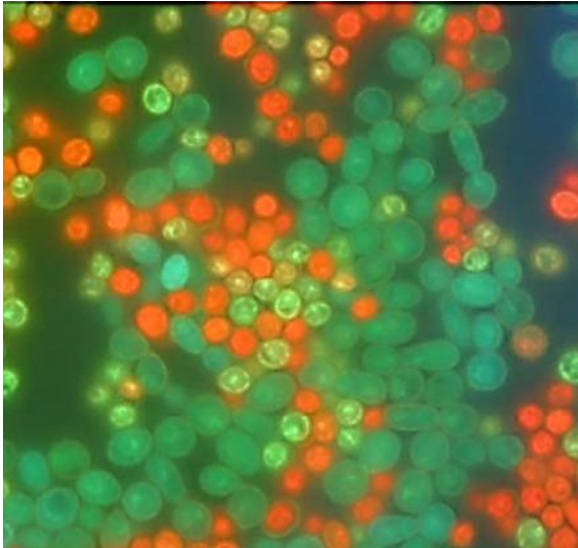


Abb. 1-19: Lebende grüne und tote rot markierte Hefezellen nach BacLight Färbung.

### **Markierung aktiver Mikroorganismen**

Aktivitätsanfärbungen sind inzwischen ebenfalls ausgearbeitet worden. Hier bietet sich die Analyse aus mittels Wattestäbchen entnommenem Oberflächenbewuchs an. Durch aktive Zellen wird zugesetztes Fluoresceindiacetat enzymatisch (durch in den Zellen enthaltene Esterasen) gespalten, das so gebildete Fluorescein fluoresziert unter UV-Anregung wie in Abb. 1-20 gezeigt.

### **Luftkeimmessungen**

Um die Frage nach einer möglichen Gesundheitsgefährdung der i. R. Kirchenbesucher sowie der in der Kirche beschäftigten Personen im Falle eines massiv ausgebildeten Schimmels zu beantworten, erfolgen die Untersuchung der Keimbelastung im Objekt.

Mit der Luftkeimmessung ist es möglich, eine Keimbelastung in Räumen und eine daraus resultierende mögliche Gesundheitsgefährdung zu erfassen. Die Methode wird genutzt, um die Belastung

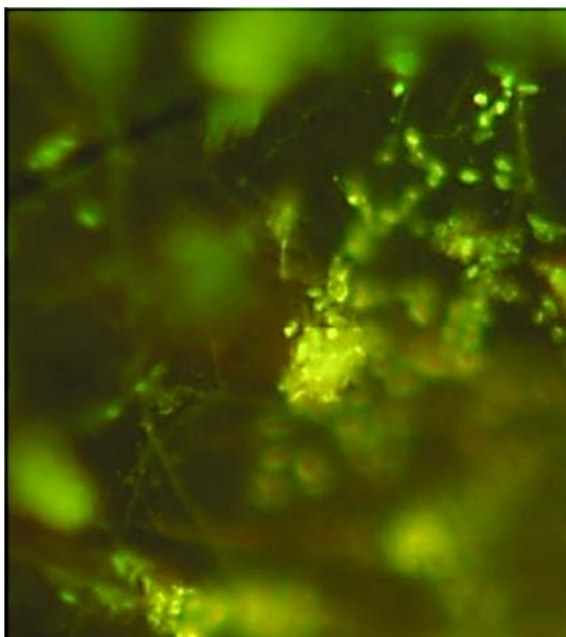


Abb. 1-20: Pilzhyphen und Konidien mit markierter Esteraseaktivität.

vom Objekt ausgehend, bzw. für die Objekte in dem jeweiligen Raum aufzudecken. Auch im Falle eines versteckten Befalls kann eine Luftkeimmessung hilfreich sein.

Die Raumluft wird dafür auf ihre Keimbelastung pro Kubikmeter Luft (KBE / m<sup>3</sup>) hin untersucht. Hierfür wird mit einem geeigneten Luftkeimsammler ein definiertes Luftvolumen über einen Nährboden oder in eine Suspensionsflüssigkeit geführt. Als Nährböden kommen Malzextrakt-Agar (MEA, Standard-Nährboden für Pilze) und Dichloran-Glycerin-Agar (DG 18, Standard-Nährboden für Pilze, die weniger Feuchtigkeit benötigen) zum Einsatz. Die Nährböden werden im Labor sowohl bei Raumtemperatur (25 °C) als auch im Klimaschrank bei 37 °C (Körpertemperatur) inkubiert.

Die lebensfähigen Keime wachsen dort an und bilden Kolonien. Erstmals nach drei Tagen, bis zu drei Wochen Inkubationszeit (je nach Wachstum der Organismen) wird der Versuch ausgewertet, hierzu werden die koloniebildenden Einheiten (KBE) nach Gattung oder Art und Anzahl bestimmt. Zu beachten ist, dass mit dieser Methode nur die keimfähigen Zellen erfasst werden, es ist durchaus möglich, dass darüber hinaus eine Belastung mit nicht keimfähigem Zellmaterial vorliegt. Bezüglich der Gesundheitsgefährdung ist zu sagen, dass eine Infektionsgefahr durch diese „*non-viable*“ Sporen auszuschließen ist, Allergien oder Gefährdungen durch Sekundärmetabolite wie zum Beispiel Mykotoxine jedoch möglich wären.

Um eine aussagekräftige Messung der Luftkeime durchführen zu können, sollte der Raum mindestens acht Stunden vor Durchführung geschlossen bleiben, außerdem ist es notwendig, eine Gegenmessung der Außenluft durchzuführen, um den Belastungsgrad gegenüber der zum Untersuchungszeitpunkt in der Außenluft enthaltenen Anzahl und Art der Keime beurteilen zu können.

Das Umweltbundesamt gibt in seinem Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelwachstum in Innenräumen an,<sup>[14]</sup> dass ab einer Gesamt-Konzentration von über 150 KBE / m<sup>3</sup> Luft (abzüglich der Konzentration in der Außenluft) ein Befall im Innenraum nicht auszuschließen ist, bei einer Abweichung von über 500 KBE / m<sup>3</sup> ein Befall wahrscheinlich sei. Überwiegt eine Gattung in der Innenraumluft gegenüber der Außenluft über das 0.7-fache, bzw. liegen von einer Art mehr als 50 KBE / m<sup>3</sup> Luft mehr vor, ist ebenfalls ein Befall zu vermuten. Die Gesundheitsgefährdung für den Menschen ist stark von der Art der Belastung abhängig.

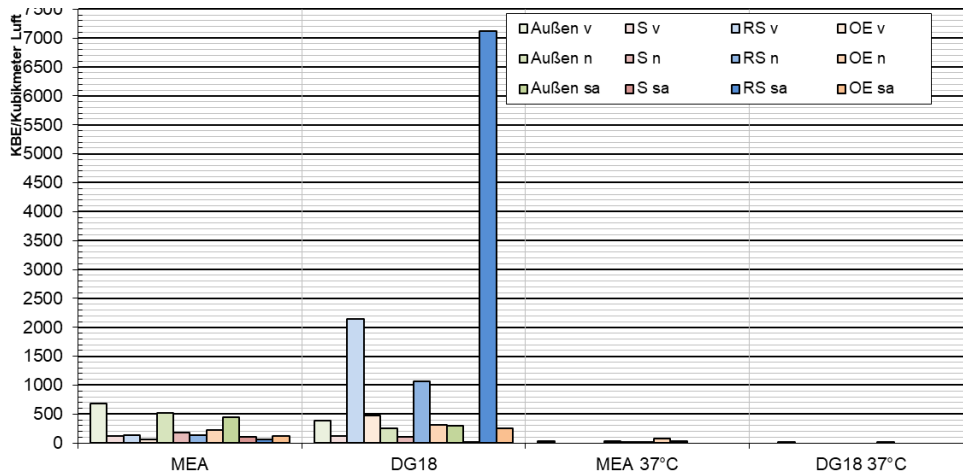


Abb. 1-21: Beispielhafte Auswertung Luftkeimmessung vor und nach einem Konzert, sowie am folgenden Morgen Summenparameter. S: Kirchenschiff / RS: Taufkapelle / OE: Orgelempore; jeweilige vor (v) dem Konzert, nach (n) dem Konzert und am folgenden (Samstag) Morgen (sa).

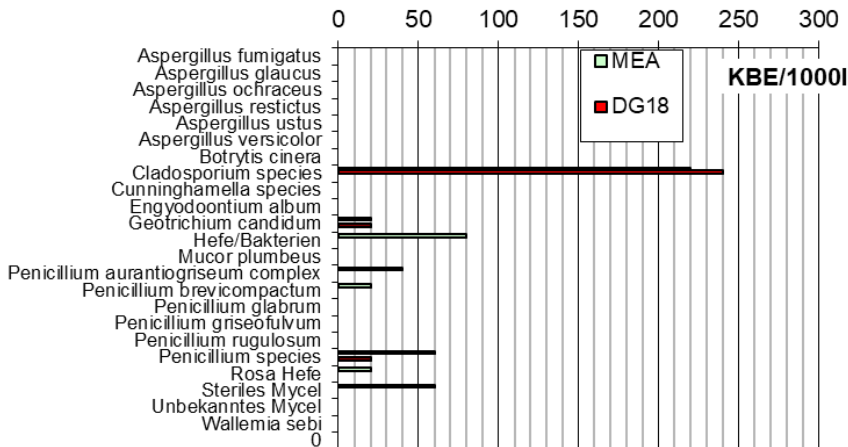


Abb. 1-22: Artenverteilung vor dem Konzert, Außenluft.

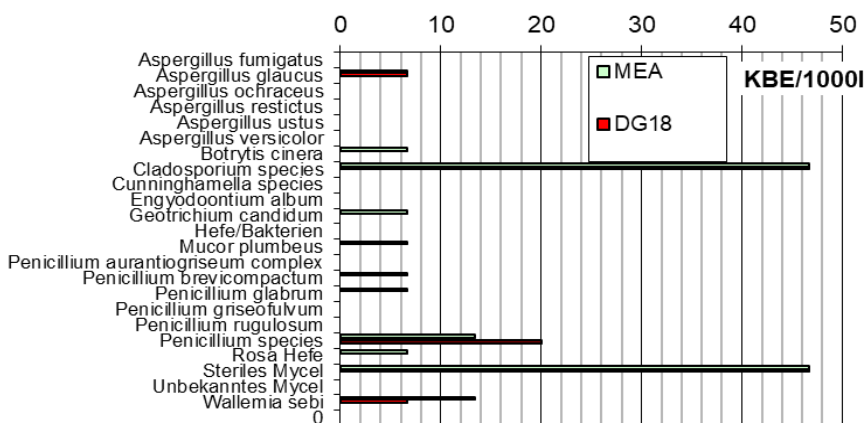


Abb. 1-23: Abweichende Artenverteilung vor dem Konzert Taufkapelle.

Es wird deutlich, dass in der Kapelle eine Belastung durch *Aspergillus restrictus* auftritt, die in der Außenluft nicht auftritt, während dort *Cladosporium species* überwiegen, die im Innenraum fast völlig fehlen.

## Aktivität

Eine weitere Entwicklung von Untersuchungstechniken liegt in der inzwischen etablierten Bestimmung mikrobieller Aktivität in situ.

Diese kann einerseits erfolgen, um deren mögliche Veränderung bei Klimaschwankungen im Jahresverlauf oder vor bzw. nach Eingriffen zu erfassen, aber auch um Reinigungserfolge zu beurteilen.

Um feststellen zu können, ob ein vorliegender Schimmelbefall aktiv ist, sind ATP-Messungen aus dem Bereich der Hygieneüberwachung weiter entwickelt worden. 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 eines wiederholten Monitorings der ATP-Messungen an Referenzflächen können Kunststoffschablonen auf die ausgewählten Bereiche aufgelegt und diese für eine Wiederholung der Messungen fotografisch festgehalten werden. Als Ergebnis dieser Untersuchung kann festgestellt werden, ob auf den untersuchten Oberflächen ein aktiver Befall vorliegt und wie dieser sich im Jahreszyklus entwickelt.

Da diese Methode nur eingesetzt werden kann, wenn die zu beurteilende Malschicht ausreichend stabil ist, kann die Untersuchung nicht an puderden oder andersartig gefährdeten Bereichen ausgeführt werden – eine Einschränkung, die auch im Projektverlauf an einigen Malereien gegeben war. Das Messprinzip ist in Abb. 1-24 dargestellt.

Aktive Zellen enthalten Adenosin-Triphosphat als das die Energie speichernde Molekül. In dem Verfahren werden die Zellen zunächst lysiert, das enthaltene ATP wird frei und im weiteren Testverlauf durch das zugesetzte Enzym Luciferase unter Umsetzung von Luciferin und Sauerstoff zu Adenosinmonophosphat abgebaut, wobei u. a. Lichtblitze entstehen, die in einem geeigneten Luminometer quantifiziert werden.

Messung der Aktivität ATPGehalt auf einer definierten Oberfläche

Energie konservierendes Molekül (Adenosin-Tri-Phosphat)

Messprinzip:

$$\text{ATP} + \text{Luciferin} + \text{O}_2 \xrightarrow[\text{Mg}^{2+}]{\text{Luciferase}} \text{AMP} + \text{PP} + \text{CO}_2 + \text{Oxyluciferin} + \text{Licht}$$


Abb. 1-24: Prinzip und Durchführung ATP Test.<sup>[8]</sup>

Es ist zu berücksichtigen, dass die Aktivität in den Proben nach Entnahme je nach Lagerungsbedingungen deutlichen Veränderungen unterliegt und diese Form der Analyse daher zwingend direkt nach Entnahme am Objekt erfolgen muss.

Beschränkt sich die Fragestellung nur auf die Bewertung eines Reinigungserfolgs, so kann dieser auch für einen nicht aktiven Befall, der zwar kein ATP aber immer noch AMP enthält durch die Nutzung entsprechend modifizierter Testkits nachvollzogen werden.

### **Vernebelungsversuche<sup>[15]</sup>**

Um die Luftbewegung in einem Raum zu verdeutlichen und deren Einfluss auf Wandgemälde aber auch andere Objekte im Raum zu verdeutlichen, lassen sich sogenannte Nebelversuche einsetzen, auch diese Möglichkeit ist inzwischen etabliert. Besonders geeignet ist diese Technik auch, um vor einem Eingriff in die Lüftungssituation dessen Auswirkung zu erfassen. Soll z. B. eine geregelte Querlüftung eingerichtet werden, so wäre durch entsprechendes manuelles Öffnen der fraglichen Fenster zu überprüfen, welche Auswirkungen auf die Luftbewegung zu erwarten sind.

Im Beispiel der Ausmalung in der Kuppel von St. Joseph, Osnabrück zeigt sich, dass sich auch durch Öffnen der fraglichen Fenster keine Luftbewegung im Bereich der Kuppel und somit an der dort ausgeführten Malerei einstellt (Abb. 1-25 und Abb. 1-26).

Die Bewegung des künstlich erzeugten „Nebels“ verdeutlicht, dass die Malerei in der Kuppel von der Luftbewegung nicht beeinflusst wird, was auch bei eingeschalteter Lüftung so bleibt. Die Auswirkung einer Zwangslüftung über die Fenster dürfte daher kaum zur Verbesserung der Situation in der Kuppel beitragen. Diese Form der Untersuchung kann vorab klären, ob Investitionen zur Beeinflussung der Luftbewegung überhaupt zielführend sein können und im Zweifelsfall Eingriffe mit erheblichen Folgen für das Objekt und entsprechenden Kosten vermeiden.

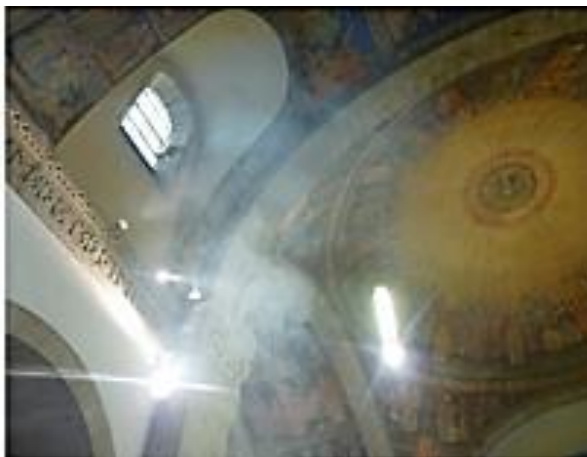


Abb. 1-25: Nebelversuch bei eingeschalteter Lüftung belegt, dass der „Nebel“ nicht in die Kuppel gelangt (a).



Abb. 1-26: Nebelversuch bei eingeschalteter Lüftung belegt, dass der „Nebel“ nicht in die Kuppel gelangt (b).

## Wachstumsbedingungen für Mikroorganismen, Ansprüche an das Klima

Mikrobielles Wachstum ist stark von den jeweiligen Klimabedingungen abhängig. Aus diesem Grund wurde für eine Vielzahl von Situationen mit Schimmelbefall in Laborversuchen erforscht, wie sich Veränderungen der Klimabedingungen im Hinblick auf Temperatur und relative Feuchte auf die Wachstumsintensität auswirken. Dazu wurden die Isolate im Bereich von 6 bis 26 °C jeweils in 2 °C Schritten und bei unterschiedlichen Feuchten (Wasseraktivität der Nährböden) für mindestens 28 Tage kultiviert (Abb. 1-27). Auch die minimale für das Einsetzen der Keimung erforderliche Zeit bei den unterschiedlichen Klimabedingungen kann so untersucht werden.

Wichtig sind diese Daten auch dann, wenn in der Kirche Schäden durch Salzkristallisationszyklen belegt oder zu erwarten sind.

Hier sei auf die Ausführungen zur Berechnung der erforderlichen Feuchte zur Vermeidung einer Schädigung durch Unterschreiten dieser Feuchten (Vgl. Kapitel 1.2 Salze) hingewiesen. Wünschenswert wäre es hier, ein Klima anzustreben, das feucht genug ist, die Salzkristallisation zu vermeiden aber gleichzeitig für mikrobielles Wachstum noch zu trocken ist. Dieser Abgleich wurde im auslaufenden Projekt nicht erforderlich, da bisher keine mikrobielle Besiedlung erfasst wurde, abgesehen von den Algen in Eilsum.

## Thermografieaufnahmen

Interessante Ergebnisse liefern auch Thermografieaufnahmen der Oberflächen. Obwohl diese nur eine Momentaufnahme darstellen, können sie doch in vielen Fällen auch Abweichungen, Inhomogenitäten des Untergrunds/Gebäudehülle und kältere Bereiche, die als Wärmebrücken fungieren, kenntlich machen.

Als Beispiel sei hier eine Aufnahme der Wandmalerei in St. Martin, Greene gezeigt (Abb. 1-28), die inhomogene Bereiche der Westwand zeigen, die gegebenenfalls hier mit einer erfolgten Verpressung im Zusammenhang stehen könnten. Ebenso markieren sich in der Schlosskapelle in Celle – hier allerdings für die Ausstattung – kühlere Bereiche, die in dem Fall die stärkere Schimmelentwicklung erklären (Abb. 1-29).

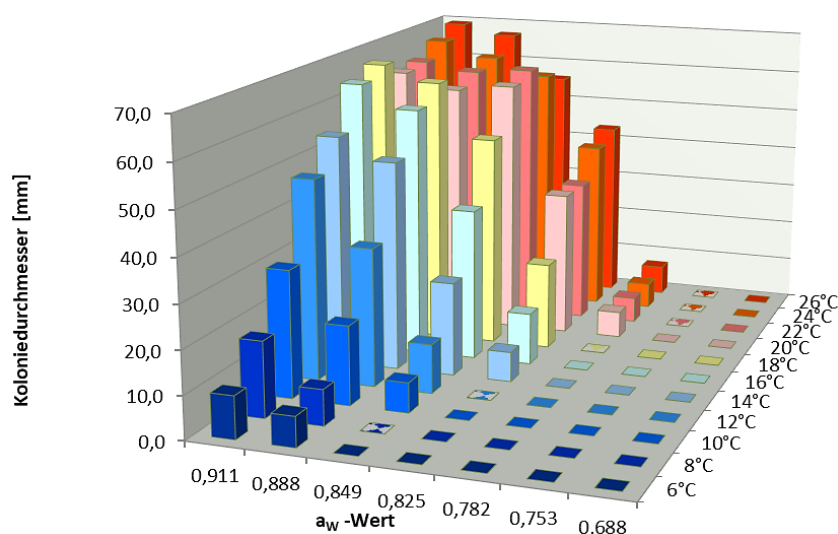


Abb. 1-27: Beispiel für Wachstumsintensität Koloniedurchmesser (mm) in Abhängigkeit von Temperatur und Wasseraktivität nach 28 Tagen.

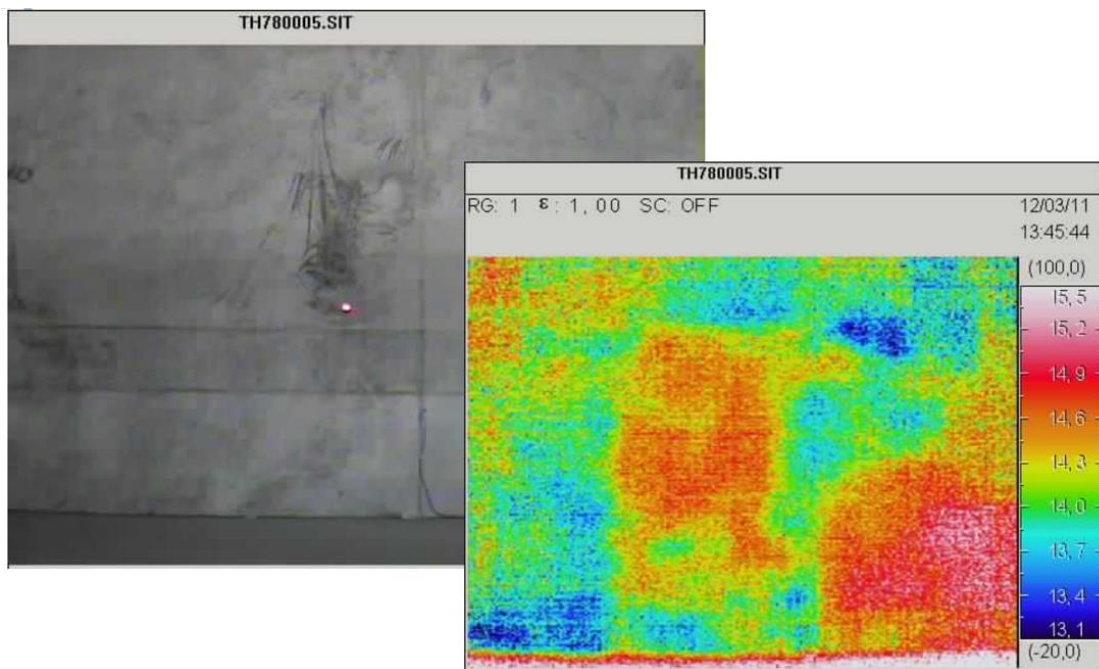


Abb. 1-28: Thermografieaufnahme abweichender Obeflächentemperaturen St. Petri, Greene.

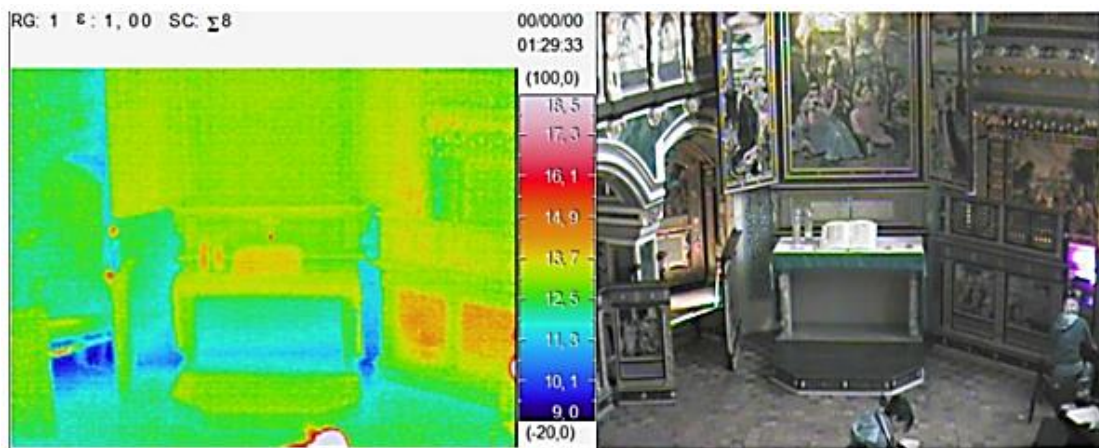


Abb. 1-29: Schlosskapelle, Celle Thermografieaufnahme verdeutlicht die kälteren Bereiche mit ausgeprägter Besiedlung.

Im Projektrahmen wurde diese berührungsfreie Methode in St. Petri, Eilsaum, eingesetzt. Es sollte versucht werden hierdurch die unterschiedliche Verteilung der Algenentwicklung in der Apsiskalotte zu erklären. Die Ergebnisse zeigen jedoch eine eher homogene Oberflächentemperatur, eine Erklärung für die unterschiedliche Besiedlung lässt sich hier mittels Thermografie nicht ableiten.

### **Einsatz, Möglichkeiten und Grenzen der Anwendung molekularbiologischer Methoden im restauratorischen Kontext von den Anfängen bis Heute: Dr. Petra Möhlenhoff, HAWK Hildesheim<sup>[16]</sup>**

Die Molekularbiologie beschäftigt sich mit Fragen rund um die Erbsubstanz (Nukleinsäuren) und den Proteinen von Organismen, folglich also mit Molekülen auf denen das Leben basiert.<sup>[17]</sup> Dabei handelt es sich um eine relativ junge Wissenschaftsdisziplin. Wenn man die Molekularbiologie im engeren Sinne als molekulare Genetik versteht, besteht dieser Forschungszweig seit ungefähr

fünfzig Jahren. Nach der Entdeckung der Doppelhelix-Struktur der DNA (Desoxyribonukleinsäure) durch Watson & Crick im Jahre 1953 stellt die Entwicklung der PCR (polymerase chain reaction) -Analytik durch Kary Mullis (1985) einen entscheidenden Meilenstein in der Geschichte der Molekularbiologie dar. In Zusammenhang mit parallel aufkommenden DNA-Sequenzierungstechniken zur Entschlüsselung des genetischen Codes, bot diese Methode die beste Voraussetzung für das schnelle Voranschreiten dieses Wissenschaftsgebietes.

Die PCR-Technik fand in kürzester Zeit Einzug in viele Bereiche der biologischen Forschung und angrenzenden Bereichen, wie der medizinischen Diagnostik (z.B. Corona-Tests), Forensik oder auch populationsbiologischen Untersuchungen. Auf die Anwendung dieser Methode in den 1990er Jahren basieren zudem die bahnbrechenden Forschungsarbeiten des Nobelpreisträgers Svante Pääbo, dem Begründer der Paläogenetik. Paläogenetiker befassen sich mit den Genomen altertümlicher Organismen. So sind neben ausgestorbenen Tierarten, auch der Neandertaler sowie altägyptische Mumien Forschungsgegenstand seines Wirkens. Auch für die Klärung diverser Fragestellungen im breiten Themenfeld der Restaurierung wurde diese sensitivste Methode zum Nukleinsäurenachweis in den letzten Jahren herangezogen.<sup>[16],[18],[19]</sup> Neben der Charakterisierung mikrobieller Besiedlungen von Kunst- und Kulturgut stehen dabei auch materialanalytische Aspekte, wie z.B. Tierartidentifizierungen von organischen Bindemitteln für Pigmente in Wandmalereien oder anderen organischen Materialien im Fokus.

Bei der PCR-Analytik handelt es sich um ein in-vitro Verfahren zur Vervielfältigung (Amplifikation) definierter Nukleinsäureabschnitte aus der Erbsubstanz (DNA) eines Lebewesens.<sup>[20]</sup> Die DNA ist das „Trägermolekül“ der Gene, in denen die Informationen für den Bauplan mit den damit verbundenen Lebensfunktionen eines Organismus gespeichert sind. Sie ist ein doppelsträngiges, schraubenförmiges Makromolekül (Doppelhelix) bestehend aus drei verschiedenen chemischen Grundeinheiten, wobei das Rückgrat aus einer alternierenden Abfolge aus Phosphatresten und Zuckermolekülen (Desoxyribose) besteht, an denen eine der vier stickstoffhaltigen Basen (Adenin, Guanin, Cytosin oder Thymin) angefügt ist. Als Nukleotid bezeichnet man den Grundbaustein aus einer der organischen Basen, der Desoxyribose und dem Phosphatrest. Die Informationsspeicherung in der DNA erfolgt über die spezifische Abfolge der vier unterschiedlichen Basen im Strang. Dabei sind die beiden Einzelstränge des Moleküls von der Basenabfolge her komplementär (gegenläufig) aufgebaut, sodass beide Einzelstränge den gleichen Informationsgehalt besitzen.

Im Zusammenhang mit molekularbiologischen Untersuchungen ist eine weitere Nukleinsäure von Interesse, die sogenannte RNA (Ribonukleinsäure), insbesondere eine spezielle Variante, die mRNA (Messenger RNA). Ihre Funktion in der biologischen Zelle ist die Umsetzung der in der DNA gespeicherten genetischen Information in Proteine. Strukturell ist sie sehr ähnlich der DNA aufgebaut, aber einzelsträngig und sehr kurzlebig, was sie für Untersuchungen im Hinblick auf aktive, lebende mikrobielle Besiedlungen prädestiniert.

Sowohl DNA als auch RNA (z. B. mittels RT (reverse Transcriptase) -PCR) können mit der PCR-Analytik untersucht werden. Die PCR ist eine enzymatische Technik mit deren Hilfe Kopien eines vorher ausgewählten DNA-Abschnittes hergestellt werden. Sie ähnelt vom Ablauf der Verdopplung der DNA (Replikation) in der lebenden Zelle. Für die PCR wird jedoch ein hitzestabiles Enzym



(Taq-DNA-Polymerase) eingesetzt, da Temperaturen um 95 °C während des PCR-Laufs erreicht werden. Durch die Verwendung kurzer spezifischer Nukleotidstränge (Primer) können definierte Abschnitte der Ausgangs-DNA gezielt vervielfältigt (amplifiziert) werden. Da die Amplifikation exponentiell erfolgt, kommt es während der 30 bis 40 PCR-Zyklen zu einer starken Anreicherung der gewünschten DNA-Fragmente, die nachfolgend weiter durch verschiedene Analyseverfahren (wie z.B. Gelelektrophorese, Sequenzierungen, Microarray-Techniken u. a.) charakterisiert werden können. Eine neuere PCR-Variante, die Real-Time-PCR, bei der die Bildung der PCR-Produkte während des PCR-Laufs photometrisch in Echtzeit gemessen werden, bietet zudem die Möglichkeit einer genauen Quantifizierung der eingesetzten Ausgangs-DNA. Im Hinblick auf gesundheitsrelevante Keime auf Oberflächen oder in der Luft bietet dieses Verfahren die Gelegenheit zur Beurteilung potenzieller Gesundheitsrisiken. Da auch tote Organismen identifiziert werden, können auch allergieauslösende abgestorbene Problemkeime quantitativ erfasst werden. Untersuchungen an RNA im Zuge der RT-Real-Time-PCR kann zum Beispiel Auskunft über die Veränderung der mikrobiellen Besiedlungsaktivität während einer Klimaregulierung oder nach anderen restauratorischen Eingriffen geben. Die DNA-Chiptechnologie (Microarray-Verfahren), die in den 1990er Jahren entwickelt wurde, bietet in Zusammenarbeit mit der PCR, neben vielen anderen Anwendungen, die Möglichkeit mehrere Organismen gleichzeitig und zudem Mischproben mit unterschiedlichen Organismen in einem Analysedurchlauf zu identifizieren. So waren in der Vergangenheit DNA-Chips zur Identifizierung holzzerstörender Pilze (ca. 30 Arten) kommerziell erhältlich.

Ausgangsmaterial für die PCR können alle organischen Materialien sein, die amplifizierbare Nukleinsäurebereiche enthalten. Es sollte außerdem geprüft werden, ob das Probenmaterial potenzielle PCR-Hemmstoffe enthält, die die PCR inhibieren könnten. Im restauratorischen Arbeitsgebiet ist die Zusammensetzung des historischen Materials meistens nicht genau bekannt. Die Malschicht von Wandmalereien könnte zum Beispiel schwermetallhaltige Pigmente wie Bleiweiß, Mennige, Azurit u.a. enthalten, die zur Hemmung der bei der PCR verwendeten DNA-Polymerase führen könnten. Als Folge würde keine Amplifikation der DNA möglich sein und ein falsch-negatives Ergebnis generiert werden, obwohl die Ziel-DNA in der Probe vorhanden war.

Für materialanalytische Anwendungen zur Charakterisierung organischen Materials (Pergamente, Bindemittel, Knochen, Zähne u.a.) ist die Intaktheit des DNA-Stranges von entscheidender Bedeutung.<sup>[21]</sup> Gealtertes Probenmaterial stellt deshalb bei der PCR eine besondere Herausforderung dar. Bei der Untersuchung von „alter“ (ancient) DNA ist die Lagerungssituation über die Zeit oft ein wesentlicher Faktor. Feuchte und warme Klimabedingungen begünstigen die Degradierung der DNA. Es kommt zu einer Fragmentierung des DNA-Doppelstranges, sodass nur noch kurze Bruchstücke verbleiben, die unter Umständen für den Ablauf der PCR nicht mehr ausreichend sind. Kälte und Trockenheit hingegen konservieren im Allgemeinen die DNA. Durch neue Entwicklungen in der Sequenzieretechnologie wurde jedoch die Charakterisierung, auch sehr kurzer DNA-Bruchstücke, zunehmend erleichtert. Eine weitere Schwierigkeit beim Umgang mit alter Human-DNA ist die Anfälligkeit für Kontaminationen mit „moderner“ menschlicher DNA, die vom „Handling“ der Relikte stammt und somit zu falschen Ergebnissen führen würde. Mit diesem Umstand sah sich auch Pääbo besonders in seiner Anfangszeit konfrontiert. Im Jahre 2014 veröffentlichten er und sein Forschungsteam dennoch eine Rekonstruktion des vollständigen

Neandertaler-Erbgutes und legten damit den Grundstein für einen gänzlich neuen Forschungszweig, die Paläogenetik, die sich mit dem Erforschen des Erbgutes prähistorischer Proben beschäftigt.<sup>[22]</sup> So konnte gezeigt werden, dass auch noch jahrtausendealte DNA für molekularbiologische Untersuchungen unter bestimmten Umständen durchaus geeignet ist.

In der Restaurierung eröffnen molekularbiologische Analyseverfahren weiterführende Erkenntnisgewinne bei der Untersuchung mikrobieller Besiedlungen von Kunst- und Kulturgut und den damit verbundenen Schädigungsprozessen, da auch nicht kultivierbare und tote Mikroorganismen erfasst werden können. So gelingt durch die Einbeziehung dieser Methoden ein umfassender Blick auf die Komplexität mikrobieller Befallsituationen, auch in Bezug auf potenzielle Gesundheitsgefährdungen beim Umgang mit mikrobiell kontaminierten Objekten in der Restaurierung. Für die Untersuchung organischer Materialien, wie historischer Pergamente und Bindemittel bis hin zu prähistorischen Relikten, bietet die Molekularbiologie sensitivste Analysetechniken für die Beantwortung zahlreicher Fragen, ob evolutionsbiologischer Natur oder Artidentifizierung. Molekularbiologische Methoden sind somit in den letzten Jahrzehnten zu einem nicht mehr wegzudenkenden „Tool“ zur Klärung vielfältiger Fragestellungen in den unterschiedlichsten Wissenschaftsgebieten, avanciert.

### **1.1.2 Forensische Fotografie als Untersuchungsmethode an Kunst- und Kulturgut**

#### **Ursprung der forensischen Fotografie**

Forensische Fotografie kommt aus der kriminaltechnischen Untersuchung von Tatorten und / oder Beweismitteln. Mit Hilfe besonderer Beleuchtungstechniken und spezieller Filter vor der Kamera lassen sich Phänomene darstellen, die mit bloßem Auge nicht zu erkennen sind.

#### **Bauforensik**

Prof. Dr. Andreas O. Rapp, Leiter des Instituts für Berufswissenschaften im Bauwesen von der Leibniz Universität Hannover hat die Technik im Rahmen seiner Forschung zur Bauforensik weiterentwickelt. Er hat maßgeblich durch Beratung zu Ausrüstung und durch seine Unterlagen zur Anwendung der forensischen Fotografie in der Bauforensik dazu beigetragen, dass in diesem Projektabschnitt die technische Ausrüstung und ihr theoretischer Hintergrund auf Aspekte der restauratorischen und denkmalpflegerischen Arbeit angewendet werden kann.

#### **Forensische Fotografie in Restaurierung und Denkmalpflege**

Im Projekt erfolgte die Anpassung der Methoden an die spezifischen Belange im Bereich Kulturgut und die Erstellung von Gebrauchshinweisen für Rahmenbedingungen, Aufbau und Anwendung der Technik zur Untersuchung und Dokumentation der forensischen Fotografie an historischen Oberflächen, die Untersuchung von Probekörpern bekannter Zusammensetzung und von historischen Oberflächen mit der Ausrüstung zur forensischen Fotografie, sowie die Erstellung von Fotos unter Verwendung verschiedener Kombinationen von Anregungswellenlängen und Fotofiltern. Die verwendeten Techniken der forensischen Fotografie erfordern Kenntnisse der Strahlenphysik, Optik, einiges technisches Verständnis sowie Geduld, Sorgfalt und Vorsicht beim Umgang mit empfindlicher Ausrüstung. Für einige lohnende Anwendungen gibt es hunderte Kombinationen des Umgangs mit der Ausrüstung, die nicht zum Ziel führen und nur jeweils eine Art der

erfolgreichen Anwendung. Es kommen verschiedene optische Phänomene zur Anwendung, die im täglichen Leben nur sehr selten von Bedeutung sind, wie selektive Reflektion, Absorption, Fluoreszenz, Lumineszenz, Lichtdetektion im nahen ultravioletten Licht und im nahen Infrarotlicht.

#### Die Lichtquellen - Lumatec Superlite M 05

Der Koffer (siehe Abb. 1-30 und Abb. 1-31) der Lumatec Superlite M 05 umfasst vier verschiedene Filterbrillen mit Zubehör, zwei Lichtquellen-Adapter mit fünf verschiedenen LED-Köpfen verschiedener Wellenlängen, diverse Kabel und Ladegeräte sowie eine Bedienungsanleitung. Ebenfalls befindet sich im Koffer eine bereits vorab erarbeitete Anleitung bewährter LED- und Filterkombinationen für bestimmte Anwendungsbereiche (siehe Abb. 1-32 und Abb. 1-33).

#### Einsatz der Superlite M 05 in der Kriminaltechnik

In der Bedienungsanleitung zur Lichtquelle Superlite M 05 von der Firma Lumatec findet sich auf der folgenden Tabelle zu Anwendungsgebieten von Lichtquelle und mitgelieferten farbigen Filterbrillen, mit denen man z.B. einen Tatort auf Spuren absuchen kann. Diese Tabelle ist Inspiration für die vorliegende Aufgabe, diese Technik auf ihre Anwendung an Kulturgut und in der Denkmalpflege zu prüfen. Anwendungstabelle der Lichtquelle Superlite M 05 von der Firma Lumatec GmbH, Linienstrasse 9-13, 82041 Deisenhofen Bedienungsanleitung, S. 19.



Abb. 1-30: Lumatec Superlite M 05 Kofferinhalt. 1-verschiedene Filterbrillen und Zubehör, 2-LED-Köpfe in den Wellenlängen 365nm, 405nm, 445nm, 620nm, 850nm, 3-Lichtquellen-Adapter, 4-Ladegerät mit Stromkabeln.



Abb. 1-31: Kamera mit Filtervorsatz.

Wellenlänge [nm]	Farbe	Brille	Anwendung
400 - 700	Weiss	ohne	Allgemeine Spurensuche, Schuhspuren
320 - 500	UVA - Blau	Orange	Allgemeine Spurensuche
400 - 500	Blau	Orange	Allgemeine Spurensuche, Sperma, Harnstoff, Fasern etc.
320 - 400	UVA	Transparent (UV - Schutz)	Allgemeine Spurensuche, Flecken, Fingerspuren, textile Fasern, Körperflüssigkeiten
400 - 420	Violett	ohne	Fingerspuren im Blut, Blutspuren
		Gelb / Orange	Sperma, Schmauchspuren
420 - 450	Indigo	Gelb / Orange	Sperma, Fingerspuren mit fluoreszierendem Pulver behandelt
450 - 490	Blau	Orange	Fingerspuren (Cyanoacrylat - Ardrex oder Cyanoacrylat DFO)
490 - 520	Cyan	Orange	Fingerspuren (Cyanoacrylat - Ninhydrin oder Cyanoacrylat - Rhodamin 6G)
520 - 560	Grün	Orange	Fingerspuren mit DFO behandelt, Reduktion der Untergrundfluoreszenz
560 - 590	Gelb	Rot	Fingerspuren mit Ninhydrin behandelt, Reduktion der Untergrundfluoreszenz

Alle Angaben sind als Richtwerte zu verstehen.

Abb. 1-32: Tabelle zu Anwendungsgebieten von Lichtquelle und mitgelieferten farbigen Filter-Brillen.

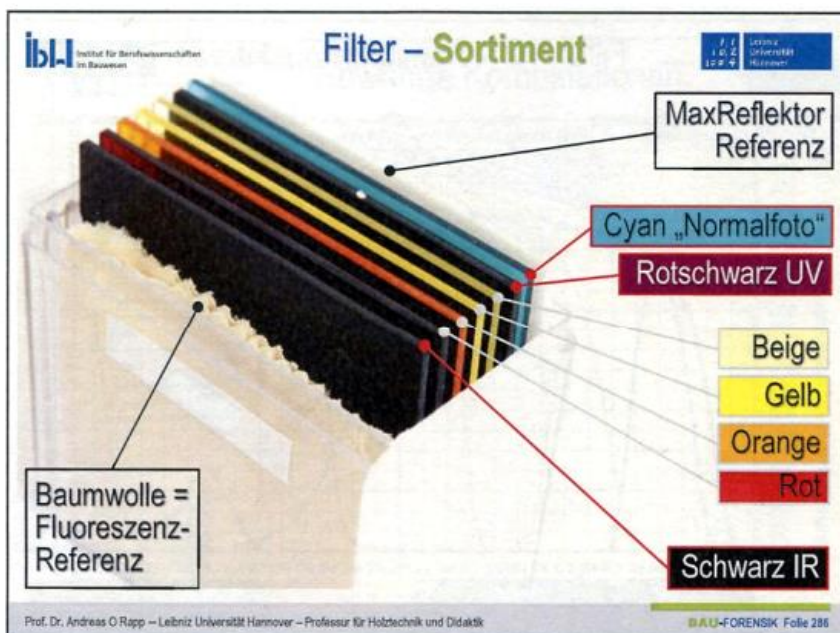


Abb. 1-33: Filter der Superlite M 05, aus: Rapp, Andreas O. Leiter des Instituts für Berufswissenschaften im Bauwesen von der Leibniz Universität Hannover, Vorab-Info zur Bauforensik Conference, 16.-18.02.2016.

Bei der Durchführung des systematischen forensischen Fotografierens der Probetafel der Wandmalerei in allen 34 in der Tabelle (Abb. 1-34) aufgeführten Filter- und Wellenlängenkombinationen ergaben sich Schwierigkeiten. Die erste Kombination ohne Filter, 365 nm Wellenlänge und einem Weißabgleich auf MaxRef führte zu einem guten Ergebnis. Aus der darauffolgenden Kombination ohne Filter, 405 nm Wellenlänge und einem Weißabgleich auf MaxRef resultierten stark lila-stichige Fotografien. Auch Einstellungsänderungen, wie beispielsweise eine verlängerte oder verkürzte Belichtungszeit, führten zu dem gleichen Ergebnis. Basierend auf den Aussagen von

Prof. Dr. Rapp und den gewonnenen Erfahrungen aus den Versuchsreihen zum Weißabgleich und dem Versuch des systematischen Fotografierens in allen Kombinationsmöglichkeiten wurde im Folgenden lediglich nur mit drei bewährten Kombinationen sowohl für die Untersuchung an Farbkarten (Kremer) als auch für die der Wandgemäldeprobetafeln unter Einbeziehung hier auch weniger gebräuchlicher Bindemittel wie Shellack aber auch von Besiedlungsanteilen wie Algen oder Cyanobakterien gearbeitet.

Vergleicht man die forensischen Fotografien der Probetafel der Wandmalerei untereinander, ist auffällig, dass die Substanzen teilweise in stark unterschiedlichen Farben erscheinen. Besonders bei der Aufnahme mit dem Beige-Filter bei 365 nm sind bläulich-weiße, grünliche und stark orangene Fluoreszenzen zu erkennen. Die für Schellack charakteristische orangene Fluoreszenz des enthaltenen Farbstoffs Lac Dye unter UV-Anregung mit Beige-Filter lässt sich ebenfalls bei den Algen erkennen, wo es sich hingegen um die Fluoreszenz des Chlorophylls handelt.

Bei den erprobten Filter- und Wellenlängenkombinationen fluoresziert Chlorophyll bei Cyan+Beige-Filter dagegen nicht orange. Interessant ist der Unterschied zwischen zwei gleichen Konzentrationen eines der international beliebtesten Kunststoffe der Restaurierung, Paraloid B72. In Feld 14, wo es im Lösungsmittel Xylol appliziert wurde, ist das Kunstharz nicht zu erkennen. In Feld 15, wo es im Lösungsmittelgemisch aus Ethanol und Aceton appliziert wurde, ist es zu erkennen. Der einzige Unterschied zwischen Feld 14 und 15 ist das Lösungsmittel, welches zum Zeitpunkt der Untersuchung komplett verdunstet war. Grund dafür ist die Eigenschaft des Xylols und ebenso des eng verwandten Toluols, den Kunststoff mit in die Tiefe des Probekörpers zu transportieren und ihn bei der Verdunstung des Lösungsmittels nicht wieder mit an die Oberfläche zu transportieren. In der Restaurierung kann man durch die Verwendung des entsprechenden Lösungsmittels die wirksame Tiefenverteilung einer Festigung durch Tränkung beeinflussen. Aceton und Ethanol führen eher zu einer Flecken- und Glanzbildung von Acrylatfestigungen an der Objektoberfläche und zu einer schlechten Tiefenfestigung. Xylol und Toluol verteilen das festigende Acrylat besser in der Tiefe und verteilen es gleichmäßiger. Dieser Effekt bildet sich bei dieser Untersuchung dadurch ab, dass die recht niedrige Konzentration von 1% Paraloid B72 sich bei Anwendung von Xylol als Lösungsmittel nicht differenzieren lässt. Bei Aceton/ Ethanol als Lösungsmittelgemisch lässt es sich differenzieren, da es sich bei der Trocknung an der Oberfläche aufkonzentriert hat.

Probetafel der Wandmalerei																		
Substanz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Beige+Cyan-Filter, 365 nm	X	X	X	X	X	X	X	X	X		X		O		X	X	X	X
Beige-Filter, 365 nm	X	X	X	X	X	X	O	X	X		X		O		X	X	X	X
Gelb-Filter, 405 nm	X	X	X	X	X	O										X	X	X
Orange-Filter, 445 nm		X	X	X	X	O	O									X	X	X

Abb. 1-34: Fluoreszenzen bei der Probetafel für Wandmalerei, Weißabgleich auf Baumwolle; X=Fluoreszenz bei Kreis und Tropfen erkennbar; O=Fluoreszenz nur bei Tropfen erkennbar.

Hierin könnte auch die Erklärung dafür liegen, dass eine in der Kalotte in Eilsun vermutete Acrylatfestigung auch in der IR Spektroskopie der Oberflächenprobe nicht erfasst werden konnte.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass diese Form der fotografischen Aufnahme durchaus die Möglichkeit bietet, zunächst nicht zuzuordnenden Phänomene zu erklären, sowie die Bereiche für im Einzelfall doch unvermeidbare Probenentnahmen einzugrenzen. Eine analytische Methode im eigentlichen Sinne stellt sie jedoch nicht dar.

Weiterführende Literatur

Rapp, Andreas O. Leiter des Instituts für Berufswissenschaften im Bauwesen von der Leibniz Universität Hannover, Vorab-Info zur Bauforensik Conference, 16.-18.02.2016

und

Rapp, Andreas O. (s.O.), Lehrmaterial zur Bauforensik 2016

Jens Klocke Diplomrestaurator (FH)

Königstraße 7, 31139 Hildesheim,

Tel.: 05121 / 134189, mobil: 0160 8432178, e-mail: jens.klocke@freenet.de

### 1.1.3 Biochemische Untersuchungsmethoden

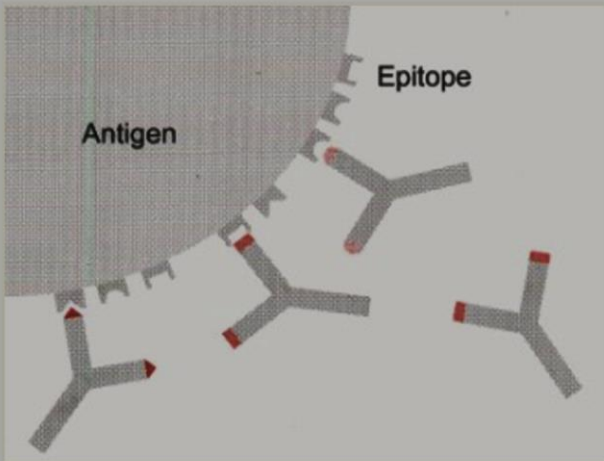
Auch zu erwähnen wären an dieser Stelle die Erarbeitung und Etablierung biochemischer Untersuchungsmethoden, insbesondere zum Nachweis proteinischer Bindemittel, wie auch zur Erfassung spezifischer Bakterien mittels Antikörper Markierung.

Das Verfahren wird im Folgenden anhand von Folien bildlich dargestellt.<sup>[23],[24]</sup>

**How do immunological methods work ?**  
→ The ability of antibodies to recognize and bind to antigens (foreign substances)

**What are antibodies ?**  
→ Antibodies are proteins that bind to characteristic three-dimensional surface features (epitopes) of an antigen

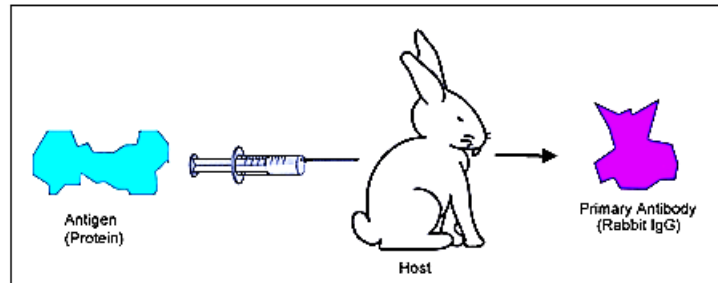
- antigens have more than one epitope
- epitopes are different from each other



Das Grundprinzip der Methode besteht darin, gegen das nachzuweisende Molekül einen Antikörper zu erzeugen und dessen Bindung an das gesuchte Zielmolekül z. B. durch eine anschließende Farbreaktion sichtbar zu machen.

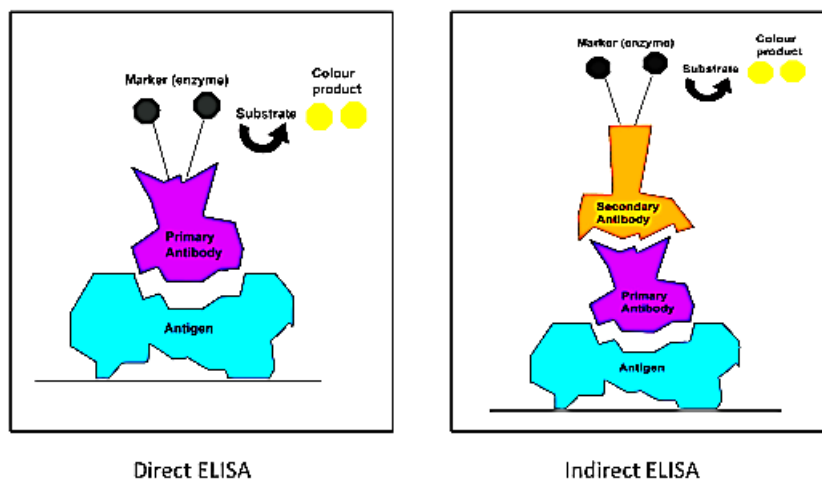
Das Zielmolekül fungiert als Antigen (Antikörper generierender Stoff), dieses wird durch Injektion in ein Säugetier (häufig Kaninchen) über dessen Immunantwort generiert. Die daraufhin gebildeten Antikörper aus Kaninchen werden aus dem Blut gewonnen.

### Antibody production



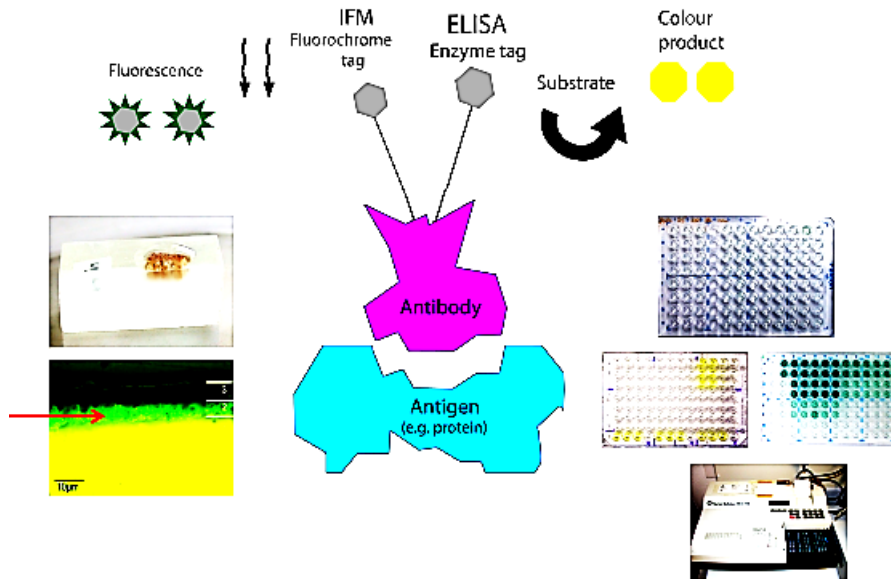
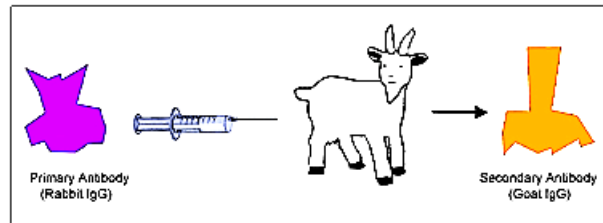
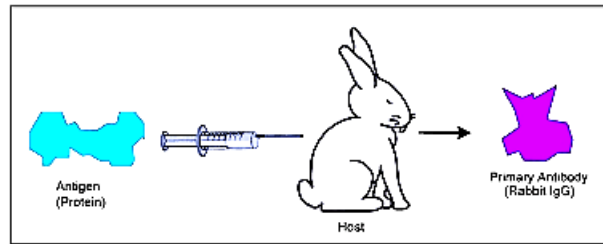
Beim Vorhandensein des gesuchten Stoffes in einer Probe bindet der Antikörper an das Zielmolekül an.

### ELISA Approaches



Im direkten Verfahren wird hier bereits ein markierter Antikörper eingesetzt, beim indirekten Verfahren wird ein zweiter gegen das erste Säugetier gerichteter Antikörper (häufig aus Ziege: Ziege gegen Kaninchen Antikörper) nach den erforderlichen Waschschrritten zugegeben, der an den Primärantikörper aus dem Kaninchen bindet und dann seinerseits für die Sichtbarmachung genutzt wird, i. R. durch einen enzymatischen Umsatz eines farblosen zu einem farbigen Substrat.

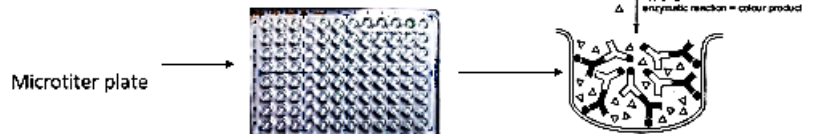
## Antibody production Part II



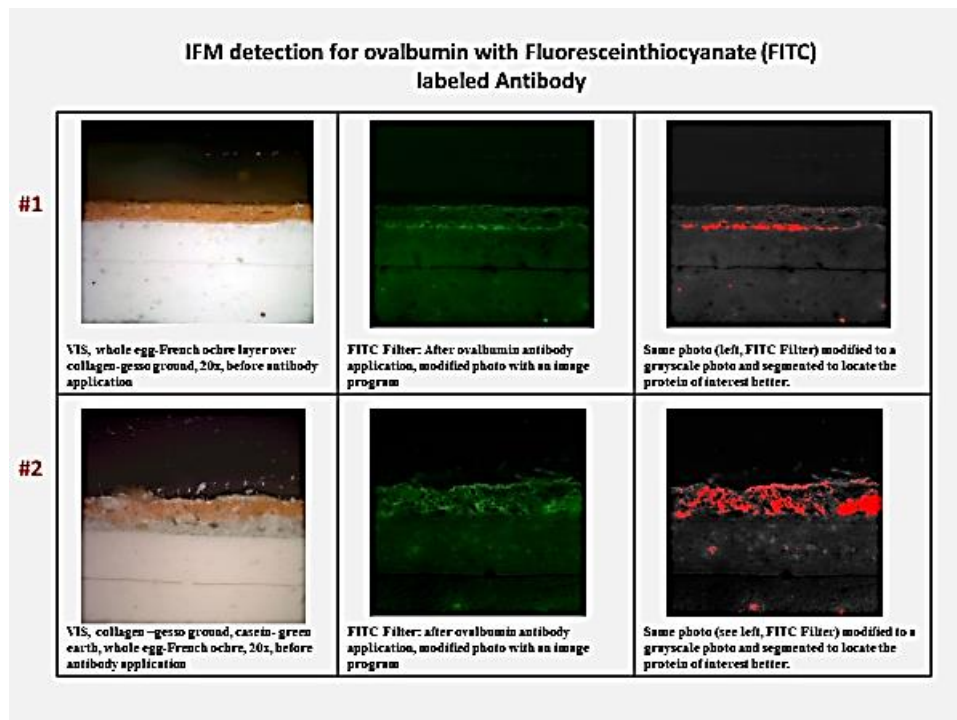
### Principle of the indirect ELISA

Every ELISA is based on three chemo-physical processes:

- Adsorption of antibodies (or antigen) with the plastic (e.g. polystyrene) of the well walls
- Specific binding of antigen and antibody
- Reporting system: Enzymatic reaction
  - - Horseradish Peroxidase (HRP)
    - Hydrogen peroxide and 2,2'-Azino-di-(3-ethylbenz-thiazoline Sulfonic Acid) (ABTS)
    - Green color
  - - Alkaline Phosphatase (AP)
    - p-Nitrophenyl phosphate (pNPP)
    - Yellow color



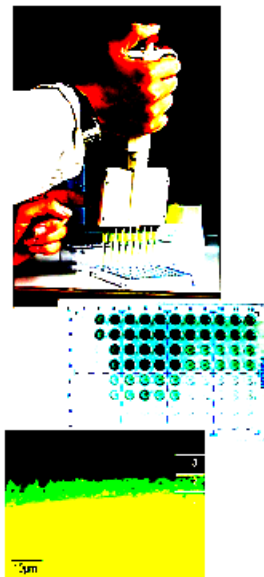




### Summary and Conclusion I

#### Benefits of ELISA and IFM

- ELISA is able to distinguish between proteins (i.e. collagen, ovalbumin, casein) and verify the presence of gums. Identification of sturgeon collagen and gum tragacanth possible.
- Reasonably straight forward, relatively inexpensive and does not require sophisticated instrumentation
- Very visual techniques and highly sensitive
- Ability to simultaneously probe for several closely related binding media from a single sample
- Ability to readily identify compounds in a mixture
- IFM offers the possibility of locating the proteins/gums of interest in a cross section



Über den Nachweis von Bindemitteln hinaus lassen sich bei Vorhandensein entsprechend spezifischer Antikörper auch einzelne Zellen markieren und so insbesondere Arten nachweisen, die gar nicht oder nur schwer kultivierbar sind.

Die Produktion der gegen Zellen gerichteten Primärantikörper erfolgt i. R. durch Injektion abgetöteter Zielzellen, um das Versuchstier nicht zu gefährden.

## 1.2 Salze

Wandmalereien bilden eine besonders sensible Objektklasse unseres Kulturguts. Einer der relevantesten Schadensfaktoren ist der durch Salzkristallisation hervorgerufene Substanzverlust. Salze können sich über diverse Quellen in den Poren des Baumaterials anreichern<sup>[25]-[28]</sup> – Beispiele für Salzeintragsquellen sind Grundwasser, welches kapillar im Material aufsteigt, oder Gischt im Falle unmittelbarer Meeresnähe. Liegt eine mit Ionen angereicherte Porenlösung im Material vor, so kommt es in Abhängigkeit der umgebenden klimatischen Bedingungen zur Kristallisation der Salze, wobei der sogenannte Kristallisationsdruck auf das Materialgefüge wirken kann, wenn das Kristallwachstum in ausreichend gefüllten Poren gegen die Porenwand erfolgt.<sup>[29]</sup> Letztlich kann die dadurch bedingte mechanische Belastung des Materials zu Schäden und Substanzverlusten führen.

Die Fertigungsart und die damit einhergehende Beschaffenheit der Wandgemälde machen sie besonders empfindlich für diesen Schädigungsprozess. So liegt beispielsweise eine sehr dünne Malerschicht vor oder zwei Putzschichten unterschiedlicher Porositäten, so dass nicht nur der fragile Putz, sondern auch die Grenzflächen zwischen verschiedenen Materialien anfällig für eine Salzschädigung sind. Liegt also eine Salzbelastung am Objekt vor, stellt die Untersuchung der vorliegenden Salze und Salzgemische und ihres Verhaltens in Abhängigkeit klimatischer Bedingungen einen wichtigen Aspekt bei der Erarbeitung konservatorischer Konzepte zum Erhalt der Maleereien dar.

Bei der Betrachtung von Bauwerken und ihrer Salzbelastung sind die vier Kationen des Natriums, Kaliums, Magnesiums und Calciums sowie die drei Anionen Chlorid, Nitrat und Sulfat die relevantesten Ionen.<sup>[26]</sup> Weitere Ionen können je nach Objekt(geschichte) ebenfalls, meist in geringeren Mengen, vorliegen, werden in erster Linie jedoch nicht berücksichtigt.

Durch den Austausch von Wasserdampf zwischen der vorliegenden Salzlösung beziehungsweise kristallinen Salzen und der Umgebung kommt es zu Kristallisations- und Auflösungsprozessen,<sup>[30]</sup> wobei die zyklische Abfolge dieser Prozesse besonders kritisch ist, da der bei der Kristallisation ausgeübte Druck das Gefüge wiederholt belasten und damit zunehmend schwächen kann. Jedem Salz kann eine temperaturabhängige spezifische relative Luftfeuchtigkeit (RH), die Deliqueszenzfeuchte, zugeordnet werden, ab dem es Wasserdampf aus der Umgebung aufnimmt und eine gesättigte Lösung gebildet wird. Unterhalb dieses Wertes liegt das kristalline Salz vor, darüber eine sich mit steigender relativer Luftfeuchtigkeit in der Umgebung zunehmend verdünnende Lösung. Folglich werden bei der Betrachtung eines einzelnen Salzes Kristallisationszyklen ausgelöst, wenn die relative Luftfeuchtigkeit in der Umgebung um den Wert der Deliqueszenzfeuchte schwankt.

Die bereits erwähnten vielfältigen Salzquellen machen das alleinige Vorliegen eines einzelnen Salzes jedoch unwahrscheinlich – meist liegen mehr oder weniger komplexe Gemische vor. Soll das Verhalten der Gemische in Abhängigkeit des Klimas bewertet werden, kann nicht mehr auf das jeweilige Verhalten der einzelnen Salze zurückgegriffen werden, da sich die Salze im Gemisch gegenseitig beeinflussen. Somit gibt es für Mischungen keinen direkt zur Deliqueszenzfeuchte analogen Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, oberhalb dessen sämtliches Salz in gelöster und unterhalb dessen alle Salze in kristalliner Form vorliegen. Die Kristallisation der Salze erfolgt hingegen

in einem Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit. Der (temperaturabhängige) Wert, ab dem die erste Phase aus dem Gemisch auskristallisiert, wird als kritische Kristallisationsfeuchte bezeichnet. Wird bei abnehmender relativer Luftfeuchtigkeit der Wert der gemeinsamen Deliqueszenzfeuchte erreicht, liegen alle Salze in kristalliner Form vor. Im Bereich zwischen diesen beiden Werten kommt es zur sukzessiven Kristallisation weiterer Salzphasen.<sup>[26],[31]</sup>

Die Information, welche Bereiche der relativen Luftfeuchtigkeit für ein vorliegendes Gemisch besonders kritisch sind, ist bei der Objektbewertung hinsichtlich eines weniger oder sehr gut geeigneten Klimas ungemein nützlich. Während die Werte der Deliqueszenzfeuchte der einzelnen Salzphasen schon zum Zeitpunkt der ersten eingehenden Untersuchungen der hier besprochenen Objekte vorlagen, war eine Modellierung der Vorgänge in Gemischen noch nicht routinemäßig möglich. Heute, rund 25 Jahre später, kann hingegen auf entsprechende Anwendungen zurückgegriffen werden, so dass sich die entsprechenden auf das Thema Salzs beziehenden Unterkapitel auch mit einer diesbezüglichen (Neu-)Auswertung von einigen der damals entnommenen und einiger weniger neuer Salzproben beschäftigen sollen.

Das zur Berechnung des Kristallisationsverhaltens von Salzmischungen verwendete Programm *ECOS-Runsalt* (*environmental control of salts*)<sup>[32],[33]</sup> soll an dieser Stelle kurz vorgestellt werden. Das Programm wurde im Rahmen eines von der EU geförderten Projekts in einer Kooperation zwischen dem University College London, der University East Anglia (Norwich) und der Universität Hamburg entwickelt.<sup>[33]</sup> Die Erweiterung *Runsalt* wurde im Rahmen der Einführung einer verbesserten Benutzeroberfläche hinzugefügt.<sup>[32]</sup> Basierend auf einem chemischen Gleichgewichtsmodell (Ionenwechselwirkungsmodell *mole fraction model*)<sup>[34]</sup> berechnet es thermodynamische Phasenumwandlungen im vorgegebenen Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit und konstanter Temperatur oder bei konstanter relativer Luftfeuchtigkeit und variierender Temperatur. So ist es möglich, die Abfolge direkt für objektrelevante Klimabedingungen zu berechnen. Eingabedaten für die sieben relevanten Ionen können Ionengehalte aus ionenanalytischen Untersuchungen von Proben des Objekts sein. Aus den Ergebnissen der Vorhersagen können die Werte der kritischen Kristallisations- und der gemeinsamen Deliqueszenzfeuchte sowie die auskristallisierenden Salzphasen erfasst werden, so dass sie im Rahmen der Diskussion einer passiven Konservierung genutzt werden können.

Die Nutzung des Programms zur Vorhersage relevanter Phasenumwandlungen für ein am Objekt vorgefundenes Ionengemisch aus Daten der Ionenanalyse muss jedoch bedacht erfolgen, erfordert einige Korrekturen und die Berücksichtigung einzelner Besonderheiten des Programms.<sup>[32],[35],[36]</sup> Bevor diese im Rahmen weiterer Unterkapitel zu den jeweiligen Objekten diskutiert werden, soll zunächst kurz auf die für die Untersuchung aktueller, im Rahmen des Projekts entnommener Proben mittels ionenanalytischer Methoden eingegangen werden.

Zunächst erfolgte die Trocknung von Putz- und Ausblühungsproben bei 60 °C, bevor sie mit Wasser (zweifach destilliert) extrahiert wurden. Das Verhältnis von Probe und Wasser wurde dabei so gewählt, dass es mindestens 1:50 entsprach. Das filtrierte (0,45 µm Porendurchmesser) Eluat wurde mittels ionenanalytischer Methoden auf die löslichen Salze untersucht. Die Kationen Natrium und Kalium wurden mittels Flammen-Atomemissionsspektrometrie quantifiziert, die des Magnesiums und Calciums mittels -Atomabsorptionsspektrometrie.

Eine ionenchromatographische Bestimmung erfolgte im Falle der Anionen (Chlorid, Nitrat und Sulfat). Die Atmomspektrometrie erfolgte am S Series AA Spektrometer (Thermo Scientific Electron Corporation, Massachusetts; zugehörige Software SOLAAR), die Ionenchromatographie am Compact IC Flex System mit Leitfähigkeitsdetektion und Unterdrückung der Eluentleitfähigkeit unter Verwendung der Software MagIC (Metrohm, Deutschland). Dabei wurden eine Anionensäule der Spezifikation Metrosep A Supp (5-150/4.0 und 5 Guard/4.0) sowie eine Eluentzusammensetzung von  $3.2 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Na}_2\text{CO}_3$  und  $1.0 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ NaHCO}_3$  verwendet.

Es sei angemerkt, dass für die Diskussion der Bearbeitung von Messdaten vor der Eingabe in das Programm *ECOS-Runsalt* die Größe der Äquivalentkonzentration der Ionen herangezogen wird. Diese ergibt sich durch die Multiplikation der Molalität (mol pro kg Lösungsmittel) mit dem Betrag der Ladungszahl  $z$  (z. B.  $|z| = 1$  für  $\text{Cl}^-$  und  $\text{Na}^+$ ,  $|z| = 2$  für  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{Ca}^{2+}$ ).

Die Eingabe der Ergebnisse dieser Untersuchungen in *ECOS-Runsalt* kann in Mol oder Gramm erfolgen. Eine direkte Eingabe der Daten ist jedoch nicht möglich, da die Ionenbilanz von Anionen und Kationen ausgeglichen sein muss. Zwar bietet das Programm eine Autokorrektur an, das Zurückgreifen auf diese ist jedoch besonders bei unerfahrenen Nutzern nicht zu empfehlen. Die Bilanz der detektierten Anionen und Kationen ist bereits durch den analytischen Fehler der Messmethoden nicht exakt ausgeglichen. Auch weitere, jedoch nicht bestimmte Ionen führen zu einer unausgeglichenen Bilanz. Kationenüberschüsse werden besonders durch Carbonat-, Hydrogencarbonat- und Hydroxid-Ionen hervorgerufen. Die Summe der Äquivalentkonzentrationen dieser drei Anionen bildet die sogenannte Alkalität.<sup>[35]</sup> Sie werden in der standardmäßig durchgeführten Ionenanalyse von Eluenten von Baustoffproben nicht berücksichtigt, kommen jedoch in Baustoffen vor, wenn alkalische Bestandteile enthalten sind. Calcit soll an dieser Stelle als Beispiel für einen solchen Bauwerksbestandteil aufgeführt werden. Trotz der geringen Löslichkeit des Calcits kann es sich während der Probenextraktion gemäß seiner Löslichkeit lösen, bei der Analyse werden jedoch nur die Calcium-, nicht aber die ebenfalls in Lösung gehenden Hydrogencarbonat-Ionen bestimmt. Die Menge des maximal löslichen Calcits steigt selbstverständlich mit der im Verhältnis zur Proben- eingesetzten Wassermenge. Ist die Salzbelastung in einer Probe ohnehin hoch, so wird der Beitrag der Calcium-Ionen aus dem im Zuge der Elution gelösten Calcit im Rahmen des analytischen Fehlers kaschiert, je geringer die Salzbelastung jedoch wird, desto mehr fällt der verursachte Kationenüberschuss ins Gewicht. Es ist an dieser Stelle hervorzuheben, dass der Calcium-Ionen-Überschuss lediglich auf die Elution der Probe zurückzuführen ist und keine Bedeutung für die Abläufe am entsprechenden Objekt hat. Am Objekt selbst liegen deutlich geringere Wassermengen vor als bei der Elution, die zur Mobilisierung des Calciums beitragen könnten; bei der Betrachtung eines Sandsteins mit 20 % Porosität ist es etwa nur 1/2000 (im Vergleich zu einem Extraktionsverhältnis von 1:50). Ein Kationenüberschuss kann jedoch nur auf das Lösen von Calcit sowie den analytischen Fehler zurückgeführt werden, wenn die ermittelte Calciummenge im Rahmen der Löslichkeit des Calcits liegt beziehungsweise ein Fehler von fünf bis zehn Prozent nicht überschritten wird. Anderenfalls ist eine Auswertung der Daten mittels *ECOS-Runsalt* nicht ohne weitere Untersuchung empfehlenswert, da weitere, nicht untersuchte Ionen vorzuliegen scheinen. Im Falle eines unter den oben erläuterten Gesichtspunkten akzeptablen Kationenüberschusses wird die Menge der Calcium-Ionen um die Differenz der Gesamtäquivalentkonzentration der Kationen und Anionen reduziert.<sup>[35],[37]</sup>

Seltener vorkommende Anionenüberschüsse können ausgeglichen werden, indem die Differenz der Gesamtäquivalentkonzentration der Kationen und Anionen anteilig mit der Äquivalentkonzentration der einzelnen Ionen verrechnet wird. Voraussetzung ist auch hier eine durch den analytischen Fehler erklärbare Größe des Anionenüberschusses.<sup>[35]</sup>

Gips ist ein häufig in Oberflächenproben nachgewiesenes Salz mit geringer Löslichkeit. Eine eventuelle Gipsproblematik an Objekten muss jedoch getrennt von der Bewertung mittels *ECOS-Runsalt* erfolgen. Bei der Entwicklung des Programms wurde auf die Berücksichtigung von Gips verzichtet, da dies zu einer geringeren Anzahl zu verwendender Parameter im thermodynamischen Modell und somit zu dessen Vereinfachung führt. Darüber hinaus ist die Vernachlässigung des Salzes damit zu rechtfertigen, dass es aufgrund der geringen Löslichkeit schnell auskristallisiert und am Ort seiner Bildung immobilisiert ist. Auch der Einfluss auf das Kristallisationsverhalten anderer Salze ist gering.<sup>[35],[37]</sup> Eine Schädigung durch Gips ist nicht mit der durch klimatische Fluktuationen zu beobachtenden Salzschädigung besser löslicher Salze gleichzusetzen, da es eine hohe Deliqueszenzfeuchte von über 99 % aufweist. Es sind eher die Gipsbildung an sich und der Eintrag von Flüssigwasser als schädigend oder schadensauslösend zu betrachten.<sup>[38]</sup> Ähnlich wie beim Calcit ist das Auflösen von Gips bei der Extaktion von Proben möglich, an Objekten ist die vorhandene Wassermenge jedoch geringer, so dass dort keinesfalls die aus der Ionenanalyse ermittelte Gipsmenge gelöst werden kann. Der Abzug von Gips aus den Daten der Ionenanalyse nach dem Ausgleich der Ionenbilanz erfolgt durch die Entfernung äquimolarer Mengen an Calcium- und Sulfat-Ionen, wobei die geringere der beiden Äquivalentkonzentrationen auf null gesetzt wird.

Auch bei der Interpretation der Ergebnisse von *ECOS-Runsalt* sind einige Aspekte zu berücksichtigen. So kommen beispielsweise einige Salze in verschiedenen Hydratstufen vor. Die Wiedergabe der Umwandlungspunkte zwischen den Phasen oder des Vorliegens bestimmter Hydratphasen ist jedoch nicht in allen Fällen richtig, so dass zwar das Vorliegen einer Hydratphase des Salzsystems korrekt ist, aber nicht unbedingt die Stufe.<sup>[32],[36]</sup>

Letztlich sei noch auf zwei weitere Aspekte hingewiesen. *ECOS-Runsalt* geht von Gleichgewichtsbedingungen und dem permanenten Kontakt von auskristallisierenden Phasen und verbleibender Lösung aus. Letzterer Aspekt erlaubt bei den Vorhersagen des Programms, dass sich eine bereits auskristallisierte Phase aus dem Gemisch zugunsten der Kristallisation einer neuen Phase (teilweise) auflösen kann. Damit wird jedoch die am Objekt mögliche Fraktionierung vernachlässigt, die dazu führt, dass Salze mit geringerer Löslichkeit, die bereits bei höheren relativen Luftfeuchtigkeiten auskristallisieren, im Falle eines kapillaren Aufstiegs von salzhaltigem Grundwasser in geringerer Höhe auskristallisieren, während besser lösliche oder bei geringeren Feuchten auskristallisierende Salze zunächst mit der Lösung weiter transportiert werden.<sup>[27]</sup> Somit schließt die Fraktionierung das Auflösen anderer Phasen in der verbleibenden Porenlösung womöglich aus. Die Annahme von Gleichgewichtsbedingungen hingegen führt dazu, dass keinerlei kinetische Prozesse (Übersättigung der Porenlösung vor der Kristallisation oder Bildung metastabiler Phasen) berücksichtigt werden, auch wenn sie am Objekt auftreten können.

Auch wenn die Auswahl der Eingabedaten und auch die Auswertung und Interpretation bei der Nutzung von *ECOS-Runsalt* eine kritische Begutachtung erfordern, bietet das Programm viele Vorteile. Da es kostenfrei zugänglich und in der Handhabung simpel ist, steht es jedem zur Nutzung zur

Verfügung. Die Ergebnisse erlauben dann eine schnelle Einschätzung bezüglich kritischer Klimabereiche für das betreffende Objekt.<sup>[39]</sup>

Die geringe Löslichkeit von Gips und die noch geringere von Calcit wurden oben bereits angesprochen. Auch Magnesiumcarbonat weist eine geringe Löslichkeit auf, so dass eine anfängliche Porenlösung mit den Ionen  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  und  $\text{CO}_3^{2-}$  im Zuge der Eindunstung zunächst Sättigung in Bezug auf die Calcium- und Magnesiumcarbonate erreicht – sie haben die geringste Löslichkeit der möglichen, aus dem Gemisch auskristallisierenden Phasen. Dem Gemisch werden so viele Calcium- und Magnesium-Ionen entzogen, wie sie zur Bildung der Carbonate durch die vorliegende Carbonat-Konzentration benötigt werden. In der danach vorliegenden Carbonat-armen Lösung wird bei weiterer Eindunstung als nächstes Sättigung in Bezug auf Gips erreicht. Hierbei ist das Verhältnis von Calcium- zu Sulfat-Ionen für den weiteren Kristallisationsverlauf beziehungsweise das Verhalten der verbleibenden Mischung entscheidend. Liegen mehr Calcium- als Sulfat-Ionen vor, sinkt der Sulfat-Gehalt mit der Kristallisation von Gips auf nahezu null. Die verbleibende Mischung wird als solche des Typs II oder als Sulfat-arme Mischung bezeichnet. Durch die überwiegend vorliegenden Chlorid- und Nitrat-Ionen liegen hygroskopischere Mischungen vor, die auskristallisierenden Phasen haben höhere Löslichkeiten und geringere Kristallisationsfeuchten als die entsprechenden Sulfate der Kationen. Anders ist es hingegen bei Mischungen des Typs I, bei denen die Sulfat-Konzentration die des Calciums übersteigt, so dass aus den nach der Gips-Kristallisation verbleibenden Mischungen auch Phasen mit geringerer Hygroskopizität und Löslichkeit und dementsprechend höheren Kristallisationsfeuchten auskristallisieren.<sup>[37]</sup> Der Vollständigkeit halber seien noch Mischungen des Typs III erwähnt, die aus Lösungen resultieren, in denen die Carbonat-Konzentration die der Calcium- und Magnesium-Ionen übersteigt.<sup>[40]</sup>

Es sei den Ergebnissen zu den Proben der hier diskutierten fünf Objekte vorweggenommen, dass sowohl Mischungen des Typs I und des Typs II vorliegen. Die Unterschiede in den Kristallisationsverläufen und kritischen relativen Luftfeuchtigkeiten werden in den entsprechenden Unterkapiteln deutlich. Bei der hier durchgeführten Untersuchung von Daten alter Probenahmen oder von im Rahmen des Projekts entnommenen Proben wurden nur Ausblühungen, Putz sowie oberflächennahe Proben (Bohrkernsegmente bis maximal 50 mm Tiefe) berücksichtigt, da diese unmittelbar durch umgebende Klimabedingungen beeinflusst werden.

## 1.3 Klima

Wandmalereischäden werden häufig durch ungünstige klimatische und bauphysikalische Bedingungen hervorgerufen sowie von dem im Baustoff vorliegenden Wassergehalt bzw. von dem vorherrschenden Raumklima gesteuert. Das Raumklima selbst kann infolge der Beheizung und eines starken Außenklimateinflusses hohe Schwankungsbreiten und extreme Maxi- und Minimalwerte aufweisen. Außerdem kann durch direkte Wasserzuführung, bedingt durch Grundwasser und Schlagregen bzw. infolge von Taupunktunterschreitung z.B. aufgrund niedriger Oberflächentemperaturen, die Wandmalerei stark belastet werden.

Da das thermisch/hygrische Verhalten einzelner Malschichten extrem variiert, führt es zu unterschiedlichen Quell- und Schwindmaßen. Im Materialverband treten dabei Scherspannungen auf, die zu Krakelee führen und Abplatzungen einzelner Malschichten verursachen können.

Um Maßnahmenvorschläge hinsichtlich der Verhinderung der Malereischäden unterbreiten zu können, ist die Ermittlung des Istzustandes mit Hilfe von Untersuchungen unerlässlich.

### 1.3.1 Schädigungspotential

Mikrobiologie und Salze führen bei ungünstigen klimatischen Verhältnissen zu den vorher beschriebenen Vorgängen und Schäden. Für die Beurteilung der Prozesse ist die Kenntnis über die Pilzarten und über die salzbildenden Ionen unerlässlich. Aus diesem Grund sollen anhand von Proben Pilzgattungs-, Pilzart- und Salzanalysen vorgenommen werden.

#### Mikrobielle Belastung

Sporen verschiedener Pilzarten sind regelmäßig in der Umgebungsluft vorzufinden.

Sind die klimatischen Verhältnisse günstig und die Wasserverfügbarkeit auf der Oberfläche ausreichend, so keimen die Sporen und entwickeln Pilzfäden (Hyphen), die zu einem Mycel zusammenwachsen. In der Folge werden weitere Mengen luftgängiger Konidien (Sporen) gebildet.

Schimmelpilze (nicht materialabbauende) entnehmen die für ihre Entwicklung notwendigen Nährstoffe und Feuchtigkeit u.a. aus dem Biofilm der Oberflächen, auf denen sie sich angesiedelt haben (z.B. Staub, Bakterien).

Die notwendige Wasserverfügbarkeit kann auf verschiedene Arten gewährleistet werden:

- hohe rel. Luftfeuchte infolge von fehlender Lüftung bzw. fehlender Luftbewegung, ungenügender Beheizung, vorliegender Feuchtequellen, zugestellten bzw. zugehängten Wandoberflächen und starkem Außenklimateinfluss
- Kondensation (Taupunktunterschreitung) auf der Oberfläche, z. B. infolge niedriger Oberflächentemperaturen, hervorgerufen u. a. durch Wärmebrücken bzw. durch hohe rel. Luftfeuchten
- kapillarer Wassertransport zur raumseitigen Wandoberfläche (Grundwasser, undichtes Mauerwerk, defekte Fugen)

Gewisse Pilzarten bzw. deren Sporen und ihre Stoffwechselprodukte stellen außerdem ein gesundheitsgefährdendes Potential dar.

## **Salze**

Häufig befinden sich im Steingefüge eines Mauerwerkes Salze. Durch Zuführung von Feuchtigkeit (aufsteigende, Kondensation, hohe Luftfeuchten) kommt es zu einer Salzwanderung und somit zu einer Anreicherung von Salzen im oberflächennahen Bereich. Sinkt die Feuchtigkeit des Baustoffes an seiner Oberfläche durch Verdunstung stark ab, führt diese zu einer Übersättigung der Salzlösung und somit zu einer Kristallisation der Salze. Abhängig von der Zusammensetzung der vorliegenden Salzgemische und dem Feuchteangebot kann es zur Kristallisation an der Oberfläche (Ausblühungen, Absandung) oder zur Kristallisation im Porenraum bzw. an Schichtgrenzen kommen. Im letzteren Fall übt die Kristallisation einen mechanischen Druck auf die Wandungen aus, der nach zahlreichen Wiederholungen zur Ermüdung und schließlich zur Zerrüttung des Gefüges führt.

Viele der in der Praxis häufigen bauschädlichen Salze sind hygroskopisch, nehmen also Feuchtigkeit aus der Luft auf. Oberhalb einer bestimmten relativen Luftfeuchte, deren Höhe von der spezifischen Zusammensetzung des Salzgemisches und u. U. von der Lufttemperatur abhängig ist, nehmen sie so viel Feuchtigkeit aus der Luft auf, dass sie in Lösung gehen. Fällt die relative Luftfeuchte unter diesen Punkt, so kristallisieren die Salze wieder aus.

Schwankende Luftfeuchten können somit zu Kristallisations- und Lösungszyklen führen und verursachen somit von einer Lockerung des Gefüges bis zum Materialverlust alle Zwischenstufen der Schädigung.

Außerdem wird der Feuchtigkeitsgehalt des Baustoffes bzw. des Mauerwerks u.a. von der Salzart und von der Salzkonzentration bestimmt.

### **1.3.2 Klimatische und bauphysikalische Einflussgrößen**

#### **Außenklima und Besucher**

Das Innenraumklima (Temperatur, Feuchte) wird vom Außenklima dadurch beeinflusst, dass über eine natürliche Be- und Entlüftung (z.B. Undichtigkeiten, Öffnen der Fenster und Türen) ein Luftaustausch stattfindet. Um den Einfluss des Außenklimas auf das Innenklima beurteilen zu können, müssen diese Größen (Lufttemperaturen, Luftfeuchten) messtechnisch ermittelt werden. Durch die Berechnung und Gegenüberstellung der absoluten Luftfeuchten (innen und außen) können der Einfluss des Außenklimas auf das Innenraumklima und die Wirkung von Be- und Entlüftungsmaßnahmen beurteilt werden.

Des Weiteren ist der Einfluss von Besuchern auf das Raumklima festzustellen. Hierzu können die Besucherzahl und der zeitbezogene Klimaverlauf gegenübergestellt werden.

#### **Raum- und Nahfeldklima**

Der Wärme- und Feuchtehaushalt der Oberflächen resultiert u.a. aus den Ausgleichsvorgängen mit den Raumklimakomponenten.

Die Baustoff- bzw. Materialfeuchte kann also durch die ständig wechselnden Luftfeuchten, z.B. Einfluss Außenklima, Heizung, Besucher, in den oberflächennahen Zonen beeinflusst werden.



Außerdem kann sie durch Oberflächenkondensation erheblich angehoben werden. Alle bauphysikalischen und biologischen Vorgänge sind u.a. von den thermisch-hygrischen Belastungen abhängig.

Aus diesem Grund sollte das Klima (Lufttemperatur und rel. Luftfeuchte) im Raum aber auch im Nahfeld geschädigter Orte kontinuierlich über einen längeren Zeitraum gemessen und protokolliert werden.

### **Oberflächentemperatur**

Niedrige Oberflächentemperaturen führen bei schwankenden Klimata häufig zu Kondensationen. Tritt Kondensat auf, so wird dieses vom Malereiträger aufgenommen (optisch nicht zu erkennen). Die damit verbundene Wasserzuführung führt zu hohen lokalen Materialfeuchten und aktiviert u.a. die vorhandene Mikrobiologie.

Aus diesem Grund sollte an verschiedenen Orten die Oberflächentemperatur gemessen werden. In Verbindung mit den Klimadaten im Nahfeld der betroffenen Oberflächen kann eine eventuelle Kondensation ermittelt werden

### **Bauwerksfeuchte und Wandaufbau**

Der Wassergehalt des Mauerwerks kann sich im überhygroskopischen (Wasserzufuhr) oder im hygroskopischen (Luftausgleichsfeuchte) Bereich befinden. Um die Ursache für den erhöhten Wassergehalt und ihre Auswirkungen beurteilen zu können, sollten Bohrkerne entnommen werden und gleichzeitig der konstruktive Wandaufbau ermittelt werden.

Mit Hilfe der Schürfgrube kann festgestellt werden, ob Maßnahmen von horizontalen und vertikalen Wassersperren getroffen worden sind bzw. ein Drainagesystem existiert.

Mit Hilfe von Kernbohrungen in Außen- und Innenwänden (keine Durchbohrung) wird der konstruktive Aufbau des Mauerwerks ermittelt. Anhand der gewonnenen Kerne wird jeweils der Wassergehalt bzw. die Verteilung des Wassers über den Wandquerschnitt und die Wandhöhe für die verschiedenen Orte im Labor gravimetrisch ermittelt.

Der ermittelte Feuchtigkeitsgehalt gibt Aufschluss über die Ursache und Intensität feuchtetechnischer Belastung des Mauerwerks und somit der Wandmalerei.

Zusätzlich soll der Wassersättigungsgrad bestimmt werden.

### **Raumluftströmung**

Um die raumklimatischen Untersuchungsergebnisse richtig bewerten und anlagenbezogene Maßnahmen erarbeiten zu können, müssen die vorliegenden Luftströmungsverhältnisse bekannt sein bzw. ermittelt werden. Mit Hilfe von Luftwechselzahlmessungen (Austausch der Raumluft mit Außenluft) und Nebelversuchen können relativ schnell Erkenntnisse über die vorliegenden Luftundichtigkeiten des Gebäudes und der Luftströmung im Raum gewonnen werden, da schlecht durchströmte Bereiche ungünstige klimatische Verhältnisse (Totzonen) hervorrufen können.

Außerdem sind diese Erkenntnis hinsichtlich der Anordnung eventueller Be- und Entlüftungsöffnungen von großer Bedeutung.

### **1.3.3 Ursachen und Auswirkungen beheben**

Das Raumklima soll sich in vorgegebenen Grenzen bewegen, die jedoch gebäudespezifisch sind, um sowohl die Bausubstanz als auch die Ausstattung zu erhalten und Schäden zu verhindern. Dies sollte mit möglichst geringem technischem Aufwand erzielt werden.

Deshalb ist eine Anpassung des vorhandenen Heizsystems an die neuen Bedingungen bzw. die Planung eines neuen in die alte Bausubstanz zu integrierendes Heizsystem (jeweils gekoppelt mit einer natürlichen bzw. erzwungenen Be- und Entlüftung) notwendig. Für den Betrieb der Anlage ist eine übergeordnete speicherprogrammierbare Steuerung vorzusehen.

Aus energetischen Gründen sollte zuerst mit Hilfe der Be- und Entlüftung versucht werden, den Feuchtehaushalt des Gebäudes zu optimieren, bevor z. B. eine Temperierung die Aufgabe übernimmt. Für Veranstaltungen muss die Anlage außerdem die Interessen der Besucher berücksichtigen.

## 2 Axien

### 2.1 Rückschau und heutiger Zustand

#### 2.1.1 Ausgangssituation 2019

Im September 2019 wurde die vereinbarte Untersuchungskampagne in der Kirche durchgeführt, Teilnehmer waren der zuständige Amtsrestaurator Herr Torsten Arnold, Dr. Helmut Berling, Dr. Herbert Juling, Herr Uwe Kalisch, Frau Anja Pohl, Dr. Frank Schlütter, Dr. Michael Steiger, Herr Sven Taubert und Frau Dr. Karin Petersen.

Die jeweiligen Vorbereitungen erfolgen für Axien durch den ehemals am BMFT-Projekt für Axien beteiligten Restaurator Sven Taubert und Herrn Uwe Kalisch vom IDK Halle (ehemals BMFT Leitstelle), der auch bereits einen relativ umfassenden Bericht zu diesem Objekt verfasst hat.

Zunächst erfolgte die Sichtung aller noch verfügbaren Berichte aus den damaligen Projekten, wobei ein weitgehend vollständiger Bestand erfasst werden konnte. Für den Zugriff auf die Daten wurde von Herrn Taubert eine Dropbox eingerichtet. Es wurde vereinbart, dass die vorhandenen Originalunterlagen nach Ende des Projekts an das zuständige Landesamt für Denkmalpflege Sachsen-Anhalt/Halle a. d. Saale übergeben werden, da an den derzeitigen Standorten bei den jeweiligen Verfassern der Erhalt nach Ende der einzelnen Beschäftigungsverhältnisse, die im Laufe der kommenden 5 Jahre erreicht werden, zwingend davon auszugehen ist, dass diese Unterlagen vernichtet werden.

Im Anschluss an das BMFT-Projekt erfolgte in Axien tatsächlich die Umsetzung einer umfangreichen Restaurierungskampagne einschließlich Nebenleistungen am Bauwerk. Besonders zu erwähnen ist hier deshalb die analog wie auch digital vorliegende Dokumentation (326 Seiten, vgl. Abb. 2-1 bis Abb. 2-6) des die Restaurierung seinerzeit ausführenden Teams, wobei darauf hinzuweisen ist, dass die originalen Fotografien eine bessere und daher zu erhaltende Qualität besitzen.

Die Kirche wird nach Angaben der vor Ort damit befassten Personen nur noch sporadisch für Gottesdienste genutzt, da die Pfarrstelle zwischen mehreren Gemeinden aufgeteilt wurde. Von Vorteil ist aber sicherlich die Nutzung der Kirche als Bücherkirche, da aus diesem Grund regelmäßig eine Betreuung die Kirche aufsucht und offensichtliche Probleme am Kirchenbau sehr schnell auffallen würden. Darüber hinaus könnte der Bestand an Büchern möglicherweise auch eine Pufferfunktion für das Klima übernehmen.

Die Dokumentation zu den im Jahr 2000 erfolgten restauratorischen Maßnahmen geht auch auf die zuvor ausgeführten Sanierungsmaßnahmen an der Kirche ein, welche sowohl eine Sanierung der Außenmauern als auch die Instandsetzung des Kirchendachs beinhalteten. Der Zustand des Dachs und auch der Regenrinnen war bei den Ortsterminen während der BMFT Projektlaufzeit als besonders kritisch bemerkt worden, da diese keinerlei Funktion mehr haben konnten, ersichtlich aus den in der Dachrinne wachsenden Pflanzen.

Ebenso wird die Klimaregulierung erwähnt. Vor Ort konnte 2019 jedoch nur in Erfahrung gebracht werden, dass eine Temperierung durch in geringem Abstand von der Wand im Fußboden

verlaufende Heizschlangen ausgeführt wurde, Angaben zur Regelung konnten jedoch nicht gemacht werden.

### **2.1.2 Wie stellt es sich heute dar, visuelle Bewertung des Objektes**

Die visuelle Wahrnehmung der Kirche ist sowohl hinsichtlich ihrer Außenfassade als auch ihres Interieurs als gut bis sehr gut zu bewerten. Positiv überrascht sind die Projektteilnehmer darüber, da seit dem Abschluß der letzten Restaurierungskampagne vor nunmehr 22 Jahren nur leichte Folgeschäden zu erkennen sind.

#### **Fassade:**

Die Fassade – ein regelmäßig aufgeführtes Backstein-Mauerwerk – verblieb seit seiner Bauzeit unverputzt und zeigt lediglich einen Kalkmörtel-Fugenverstrich. Dieser sowie die glatt geputzten Fensterfaschen mit ihren tiefen Laibungen waren Teil der jüngsten Bauwerk-Instandsetzung, bei der sowohl die Entfernung des Pflanzenbewuchses, die Reinigung der Backstein-Oberflächen, die Überarbeitung von schadhafte Fugen sowie die Versorgung des Mauerwerkes im erdberührten Sockelbereich Maßnahmegegenstand waren. Weiterhin – und das besonders wichtig im Hinblick auf die Mauerwerkschäden durch Feuchtigkeit und Salztransporte – konnte eine Drainage im Grundmauerbereich eingebaut werden. Die Dachentwässerung wurde über Abfallrohre und die Einbindung in Entwässerungsschächte zuverlässig möglich, wodurch sich in der Folge eine wesentliche Verbesserung hinsichtlich der Grundfeuchte im Mauerwerk entwickelte. Kontrollmessungen dazu sind allerdings nicht überliefert.

#### **Interieur – Wandmalerei im Chor:**

Seit der Freilegung und Restaurierung der Malereien 1914 wurden sie erst nach sechsundachtzig Jahren im Sommer 2000 konserviert. Die durchgeführten Maßnahmen dazu wurden sehr detailreich in der Restaurierungsdokumentationen von 2000 dargestellt<sup>2</sup>. Seit 2000 sind unter anderem während dieser Kampagne in der stark feuchte- und salzbelasteten Sockelzone Kompressen zur Salzminderung eingesetzt worden. Diese sowie die Maßnahmen zur nachhaltigen Trocknung des Mauerwerks haben dazu beigetragen, dass die Wandmalereien heute bis auf wenige Ausnahmen – zum Beispiel im Sockel an der Nordwand der Apsis – einen relativ stabilen Eindruck vermitteln. Naturgemäß ist die Oberfläche leicht verschmutzt. Kleinere Farbschicht-Lockerungen lassen sich bei Betrachtung im Nahbereich ausmachen. Nach 22 Jahren Standzeit ist dies wenig verwunderlich und zu erwarten. Vielmehr ist diese Feststellung als Aufforderung zu sehen, rechtzeitig, d. h. zeitnah eine Revision der Oberflächen durch Fachrestauratoren anzusetzen, die als normaler Bauunterhalt verstanden werden müssen. Nur damit kann erneuter umfänglicher und teurer Revisionsstau vermieden werden.

Vergleich damals und heute:

---

<sup>2</sup> Dokumentation der Restaurierung der romanischen Gewölbe- und Wandmalerei im Chor und in der Apsis der Dorfkirche in Axien, TEIL 1, Diplom-Restauratorin Antje Pohl, 2001



Abb. 2-1: Apsis-Kalotte 1998.



Abb. 2-2: Apsis-Kalotte 2019.



Abb. 2-3: Apsis 1998.



Abb. 2-4: Apsis 2019.



Abb. 2-5: Kirche von SO 1998.



Abb. 2-6: Kirche von SO 2019.

## Bau- und Restaurierungsmaßnahmen

Zeitlich etwas verzögert, jedoch unter Berücksichtigung der Ergebnisse des BMFT-Projektes, wurde die Dorfkirche Axien außen baulich instandgesetzt. 2001 erfolgte schließlich die umfangreiche Restaurierung der romanischen Wandmalereien.

### 2.1.3 Fazit 2022

Im Zuge der Inaugenscheinnahme der Wandmalerei-Oberflächen während der Revision sind drei wichtige Punkte auffällig geworden, die kurzfristiges Handeln erfordern, um Schadensfortschritt zu bremsen bzw. aufzuhalten.

- **Absis-Nordwand:**  
Erneute Salzkristallisation mit Schäden an Putzmatrix und Malerei-Oberfläche  
> externe Dienstleister/Restauratoren erforderlich
- **Wandoberfläche allgemein:**  
Verschmutzung durch Staub und Spinnweben (Risiko von mikrobieller Besiedlung)  
> externe Dienstleister/Restauratoren erforderlich
- **Raumklima:**  
Das Raumklima wird aktuell nicht fachkundig überwacht. Grundsätzlich erforderlich ist eine permanente Kontrolle des Raumklimas, um das Risiko von mikrobieller Besiedlung rechtzeitig erkennen und begrenzen zu können. Dazu Aufstellung von Datenloggern und regelmäßiges Auslesen/Auswertung  
> externer Dienstleister/IDK/Restauratoren erforderlich

## 2.2 Mikrobiologie

Aus den verfügbaren Unterlagen, besonders den Zusammenstellungen der Dokumentation durch das Restaurierungsteam wurde die romanische Originalmalerei als Kalkmalerei beschrieben, wobei für die Konturen auch Kalkkasein angegeben wird, für die Vergoldungen wird Ei angegeben, was auch für das Aufstehen von Schollen in diesem Bereich verantwortlich gemacht wird, als sekundäre Folge kann vermutlich auch die in den 1990ern nachgewiesene starke Untersiedlung mit Schimmelpilzen in diesen Partien erklärt werden.

Die Malerei wurde erst 1796 erstmals übertüncht und 1913/14 freigelegt und überarbeitet. Dabei wurden vermutlich Pflanzenleime (Stärke) und teils Kalkkasein genutzt, für Retuschen im Bereich der Niben wurde Ocker mit Shellack benutzt.

Der neugestaltete Sockelbereich wurde mit einer gefärbten kaseinhaltigen Schlämme teils mit öli- gen Komponenten ausgeführt.

Die 2000 ausgeführten Maßnahmen im stark feuchte- und salzgeschädigten, aber inzwischen weitgehend ausgetrockneten Sockelbereich wurden unter Einbeziehung noch erhaltener, älterer Bereiche nach Salzminderung über Kompressen mit alkalisch aufgeschlossenem Kasein ausgeführt.

Im Bereich der Malerei war insbesondere eine Reinigung der Oberflächen erforderlich, Putzhin- terspritzungen und Konsolidierungen der Malschicht sind erfolgt, für die Malschicht wurde weit- gehend mit Klucel EF gearbeitet, für die Vergoldungen wurde auch Polyvinylalkohol benutzt.

Der Zustand der Malerei wurde bei dem Ortstermin 2019 als unkritisch bewertet, eine Ausnahme stellten die Vergoldungen dar, für die erneut aufstehende Randbereiche beobachtet wurden.

Allerdings wurde nach fast 20 Jahren ohne weitere Eingriffe erneut eine starke Staubbela- stung der Maleroberflächen beobachtet, was auch mit dem Vorhandensein keimfähiger Mikroorganismen (nachgewiesen über Kontaktbeprobung) einhergeht, wobei diese aber derzeit noch nicht aktiv sind (ATP-Messung) oder gar zu einer erneuten Besiedlung geführt haben, was durch das relativ trockene Raumklima und das Unterbinden aufsteigender Feuchte erklärt werden kann.

Nach den erzielten Ergebnissen wird der Gemeinde eine erneute restauratorische Begutachtung der Malereien, gegebenenfalls auch unter Festlegung besonders kritischer und daher in Zukunft besonders zu beobachtender Bereiche, empfohlen. Wünschenswert wäre es, wenn diese Kontrolle durch die seinerzeit ausführenden Personen erfolgen könnte, da diese den Zustand zum damali- gen Zeitpunkt am besten kennen und mit der heutigen Situation vergleichen können. Ergänzend hierzu sei auf die unten angeführten neueren Fototechniken hingewiesen.

Relativ schnell sollte die erneute Staubabnahme erfolgen, beide Maßnahmen würden optimaler Weise gleichzeitig erfolgen, was eine weitere Einrüstung überflüssig machen würde.

Obwohl auch derzeit die relative Feuchte im Winterhalbjahr noch teilweise an 80 % heranreicht, ist die Gefährdung durch mikrobielle Schädigung relativiert, da diese hohen Feuchten nur bei relativ geringen Temperaturen auftreten, was die Aktivität erheblich reduziert.

An 90 % heranreichende Feuchten bei Temperaturen über 20 °C, wie sie im Sommer 2002 und noch extremer im Sommer 1999 und 2001 gemessen wurden, haben seinerzeit das Risiko einer mikrobiellen Besiedlung und damit einer Schädigung deutlich erhöht.

Schäden durch ausblühende Salze wurden nur in dem als Opferputz angelegten Bereich der Draperie sichtbar und waren seinerzeit bewusst einkalkuliert worden. Es bleibt zu hoffen, dass die angeregte restauratorische Nachkontrolle durch das ausführende Restauratorenteam in absehbarer Zeit erfolgen kann.

Ergänzend zu den Ergebnissen des Ortstermins in Axien im September 2019 liegen die durch das Institut für Diagnostik und Konservierung (IDK) Halle, Herrn Kalisch, erhobenen Werte für das Klima in der Kirche inzwischen vor (Abb. 2-8 bis Abb. 2-11). Im Vergleich zu den ebenfalls einzusehenden Messungen vergangener Jahre hat sich eine erhebliche Verbesserung des Klimas, insbesondere eine deutliche Reduzierung der relativen Feuchte, eingestellt.



Abb. 2-7: Zustand im Chor.

Comfort-Software V3		Diagramm 4	Seite 1/1	Min	Max	Mit	
D:\aktuelle Daten\Ortsverzeichnis AXIEN KIRCHE Klima Bereich				K1 [%rF] rel. F. Apsis	29.80	93.50	65.92
Axien Ldkirche, Apsis				K2 [°C] Temp. Apsis	6.90	25.70	16.31
rel. Feuchte [rot]							
Temp. [grün]							

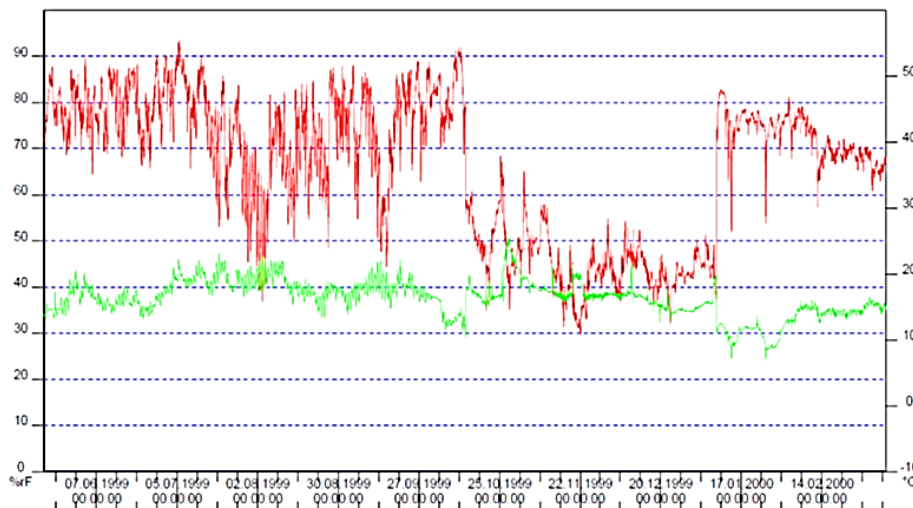


Abb. 2-8: Raumklima Axien 1999-2000 (U. Kalisch).



Comfort-Software V3	Diagramm 3	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\AXIEN\KIRCHE\Klima\Bereich			K:1 [%rF] rel. F. Apsis	36.90	93.70	68.45
Axien Dorfkirche, Apsis			K:2 [°C] Temp. Apsis	8.00	24.30	15.68
rel. Feuchte [rot]						
Temp. [grün]						



Abb. 2-9: Raumklima Axien 2000-2001 (U. Kalisch).

Comfort-Software V3	Diagramm 2	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:	
D:\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\AXIEN\KIRCHE\Klima\Bereich			K:1 [%rF] rel. F. F.2.6.1...	58.50	93.30	78.59
Axien Dorfkirche, Apsis			K:2 [°C] Temp. F.2.6.1R...	4.50	23.20	13.79
rel. Feuchte [rot]						
Temp. [grün]						

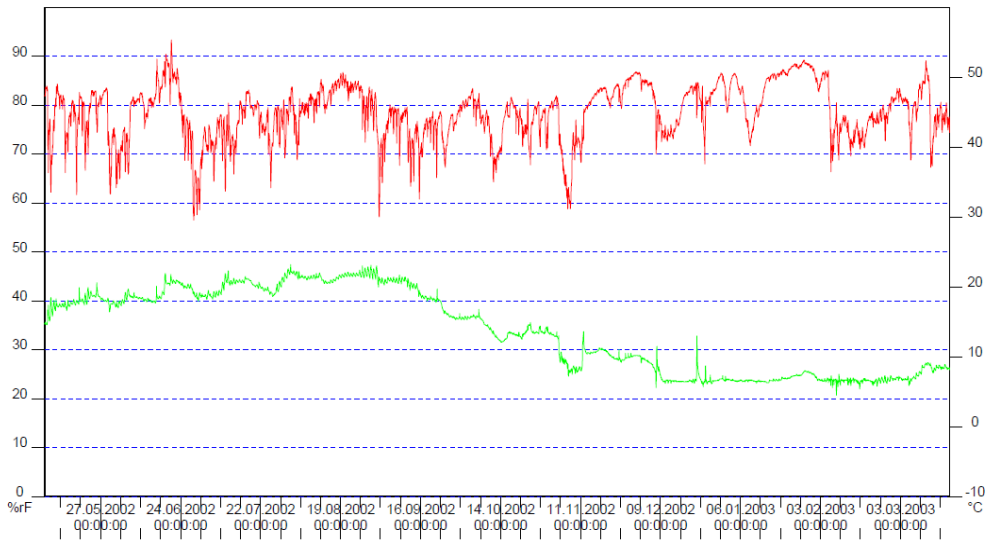


Abb. 2-10: Raumklima Axien 2002-2003 (U. Kalisch).

Comfort-Software V3	Diagramm 1	Seite 1/1	Min:	Max:	Mit:
D:\aktuelle Dateien\Ortsverzeichnis\AXIENKIRCHE\Klima\Bereich			44.30	82.30	69.27
Axien Dorfkirche, Kanzelbereich			K:1 [%rF] rel. F.		
rel. Feuchte [rot]			K:2 [°C] Temp.	7.90	25.00
Temp. [grün]					15.04

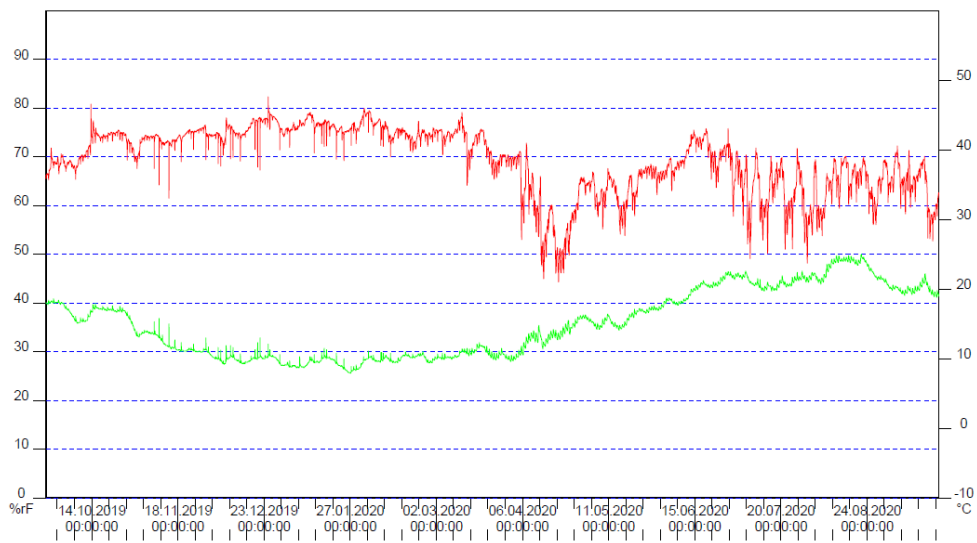


Abb. 2-11: Raumklima, Axien 2019-2020 (U. Kalisch).



Abb. 2-12: Teilnehmer beim Ortstermin Axien 2019.

Die Entnahme von Probenmaterial erfolgte 2019 nur in den Übergängen zu den bereits ausgebrochenen unteren Neuputzbereichen (P5-7 von links nach rechts), alle weiteren Proben erfolgten als zerstörungsfreie Stempelproben.



Abb. 2-13: Glanzsstelle.



Abb. 2-14: Detail Glanzstelle.

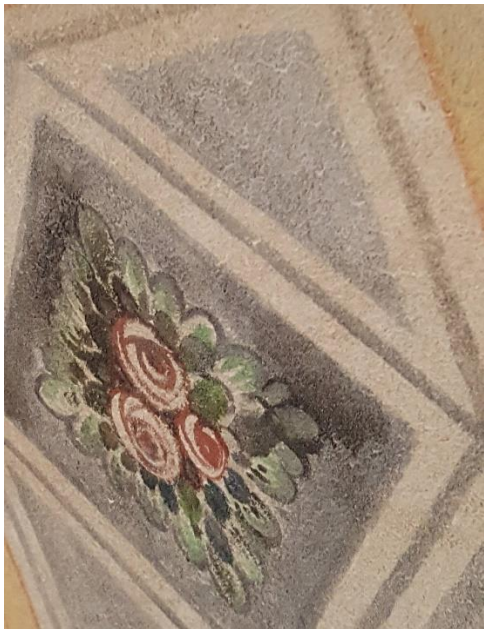


Abb. 2-15 Glanzstelle, Gurtbogen.

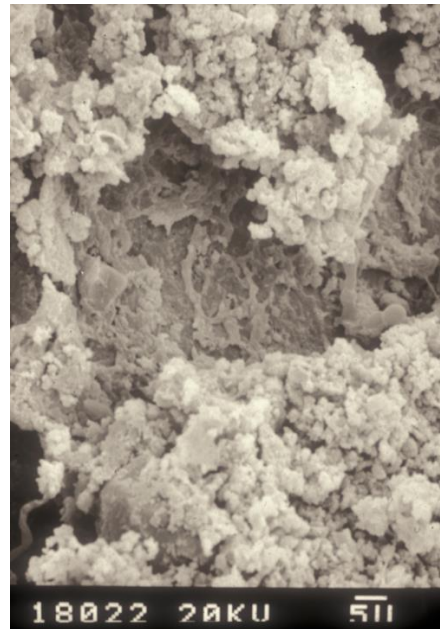


Abb. 2-16: Altzustand Vergoldung, Rückseite.

Tab. 2-1: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 1.

Medium	Beobachtung KBE/25 cm <sup>2</sup>
MEA	Keine Kolonien
DG18	Cladosporium sp. 2
	Asergillus restrictus 1 Mycelium sterile 1
CzD	Cladosporium sp. 1
	Bakterien/Hefen 2
40S	Cladosporium sp. 3
	Mycelium sterile 1
BR II	Mycelium sterile 1
	Bakterien/Hefen 3
Skim	Bakterien/Hefen 1

Tab. 2-2: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 2.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 4 Mycelium sterile 2 Bakterien/Hefen 1 Basidiomycet
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 9 Penicillium griseofulvum 1
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 2 Mycelium sterile 1
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 3
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 7 Bakterien/Hefen 1 Mycelium sterile 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 6

Tab. 2-3: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 3.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 1 Mycelium sterile 1
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 10 Penicillium griseofulvum 1 Mycelium sterile 4 Penicillium sp. 2
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 18 Aspergillus versicolor 2 Bakterien/hefen 1 Mycelium sterile 1
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 18 Aspergillus glaucus Gruppe 4 Penicillium aurantiogriseum complex 2
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 7 Bakterien/Hefen 4 Penicillium aurantiogriseum complex 1 Mycelium sterile 1 Penicillium variabile 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 7 Bakterien/Hefen 3

Tab. 2-4: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 4.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 1 Basidiomycet 1
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 1 Aspergillus versicolor 2 Penicillium brevicompactum 1
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 3 Bakterien/Hefen 1

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
	Engyodontium album 1 Mycelium sterile 1
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 4 Aspergillus versicolor 1 Mycelium sterile 3
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 2 Rhizopus stolonifer 1 Penicillium aurantiogriseum complex 1 Bakterien/Hefen 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 2 Mycelium sterile 1 Penicillium chrysogenum 1

Tab. 2-5: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 5.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 8 Bakterien/Hefen 1 Alternaria alternata 1 Mycelium sterile 1
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 9 Mycelium sterile 1 Aspergillus restictus 1
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 13 Bakterien/Hefen 3 Mycelium sterile 3
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 10 Mycelium sterile 1 Aspergillus versicolor 1 Aspergillus glaucus Gruppe 1 Bakterien/Hefen 1
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 5 Hefen/Baktrien 6 Alternaria alternata 1 Aspergillus ochraceus 1 Penicillium griseofulvum 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 1 Bakterien/Hefen 3 Penicillium aurantiogriseum complex 1 Aspergillus ochraceus 1 Aureobasision pullulans 1

Tab. 2-6: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 6a.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 3 Aspergillus ochraceus 1 Aspergillus restictus 1 Mycelium sterile 1

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 3 Mycelium sterile 2 Aspergillus restictus 3 Aspergillus versicolor 1
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 3 Aspergillus restictus 1 Mycelium sterile 1
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 4
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 4 Rhyzopus stolonifer 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 4 Bakterien/Hefen 6 Mycelium sterile 1

Tab. 2-7: Stempelproben Axien – 09/2019; Probenstelle 7a.

<b>Medium</b>	<b>Beobachtung KBE/25 cm<sup>2</sup></b>
<b>MEA</b>	Cladosporium sp. 11 Bakterien/Hefen 1 Mycelium sterile 2 Penicillium sp. 1
<b>DG18</b>	Cladosporium sp. 2 Aspergillus glaucus Gruppe 1 Penicillium sp. 2 Aspergillus restictus 1
<b>CzD</b>	Cladosporium sp. 5 Bakterien/Hefen 2 Paecilomyces sp. 1 Mycelium sterile 3
<b>40S</b>	Cladosporium sp. 16 Penicillium glabrum 1 Mycelium sterile 1
<b>BR II</b>	Cladosporium sp. 3 Bakterien Hefen 1 Engyodontium album 1 Areobasidion pullulans 1
<b>Skim</b>	Cladosporium sp. 7 Mycelium sterile 2 Überwachsen 2

Die Übertragung der Keime erfolgte auf sechs verschiedene Kulturmedien. Da sich für keine der Stellen ein Hinweis auf eine tatsächlich ausgebildete Besiedlung ergeben hatte, muss davon ausgegangen werden, dass hier ausschließlich Aeroplankton, also aus der Luft auf den Malereien abgelagerte, aber dort nicht ausgekeimte Pilzzellen (Anflugkeime) zur Anzucht gebracht wurden. Eine Gefährdung der Malerei würde durch diese Keime nur bei einer Verschlechterung des Klimas möglich werden. Zur Bewertung ist auch zu beachten, dass die häufig kultivierten Cladosporien als typische Außenluftkeime angesehen werden, die erst bei relativ hohen Feuchten in situ zur Entwicklung kommen würden. Eine Gefährdung durch Mikroorganismen ist daher derzeit nicht zu erwarten.

## 2.3 Salze

Die romanischen Wandmalereien in der Dorfkirche Axien wurden im Rahmen des BMFT-Projekts bis 1995 auch hinsichtlich der Salzbelastung untersucht. Auf die Salzkristallisation zurückzuführende Schäden an den Malereien waren Pigment- und Putzverlust, Absanden (insbesondere im Sockelbereich) sowie Rissbildung. Darüber hinaus wurden Feuchteflecken und aufsteigende Feuchte dokumentiert. Der Eintrag der Salze über verwendetes Material wurde im Rahmen der Analysen ausgeschlossen.<sup>[41]</sup>

Bohrkerne, die an der nördlichen Apsiswand von Innen bis in 800 mm Tiefe entnommen wurden, zeigten eine höhere Salzbelastung in 2.60 m Höhe als in 0.35 m Höhe. Während im Sockelbereich hohe Gehalte an Natriumcarbonat sowie Chloride und Nitrate des Natriums und Kaliums besonders in der Tiefe nachgewiesen wurden, waren jene Chloride und Nitrate in 2.60 m Höhe eher im oberflächennahen Bereich vorzufinden. In der Tiefe hingegen waren Calcium-Ionen dominierend. Die Gipsgehalte waren in beiden Höhen gering, allerdings sei hier auf die Stärke des äußeren Segments der Bohrkerne hingewiesen (1.5 bzw. 3 mm), die eine Gipsanreicherung in den ersten Millimetern kaschieren kann. Aufgrund der Salzverteilung in horizontaler und vertikaler Richtung wurde auf einen Salzeintrag von außen geschlossen, so dass in Richtung der Außenseite des Mauerwerks eine homogene Versalzung mit leichtlöslichen Salzen vorlag. Mit dem Feuchtetransport wurden sie ins Innere des Mauerwerks transportiert, wobei der effektivere Transport der leichtlöslichen Salze in steigender Höhe auf die sich im Gewölbe ansammelnde Wärme und den damit wirksameren Transport in Richtung Innenwand des Mauerwerks zurückgeführt werden könnte.<sup>[41],[42]</sup> Für diese Vermutung sprechen auch das nachgewiesene Konzentrationsgefälle von außen nach innen, wobei die Salzkonzentration an der Oberfläche der Innenmauer aufgrund der Verdunstung wieder ansteigt.

Desweiteren wurde aufsteigende Feuchte auch in der Tiefe des Mauerwerksprofils vorgefunden und auf einen Feuchteintrag über Defekte in der Fassadenfläche hingewiesen. Im Abschlussbericht des BMFT-Projekts wurden verschiedene Maßnahmen angeregt, um diesen Feuchteintrag, der den Salztransport begünstigt, zu verringern und um das stark schwankende Klima in der Apsis zu stabilisieren, damit schädigende Kristallisationsprozesse verhindert werden können.<sup>[41]</sup>

Im Bericht zu einer bis 2000 durchgeführten Restaurierungskampagne<sup>[43]</sup> wird erwähnt, dass zu dieser Zeit im Gewölbe keine weiteren Ausblühungen beobachtet werden konnten. Im Sockelbereich zeigten sich hingegen Ausblühungen, die Gips und Calciumnitrat enthielten. Eine partielle Kompressenentsalzung im nordöstlichen Gewölbezwickel und im Sockelbereich konnte die entsprechenden Ionen nachweislich entfernen.

Bezüglich der Untersuchung von Salzdaten mittels *ECOS-Runsalt* sollen nur oberflächennahe Proben berücksichtigt werden, da die Salze in diesen Proben direkt auf das umgebende Klima reagieren können und somit für potentiell schädigende Kristallisationsprozesse relevant sind. Für die Salzproben aus dem Innenbereich standen somit die Proben des jeweils ersten Segementes der beiden Bohrkerne zur Verfügung. Die Salzbelastung des in 0.35 m entnommenen Kerns war sehr gering, so dass an dieser Stelle die Kristallisationsabfolge für das Oberflächensegment des Kerns aus 2.60 m diskutiert werden soll (Bohrkern 2112,<sup>[42]</sup> Abb. 2-17). Natriumchlorid ist die bei der

kritischen Kristallisationsfeuchte (71.2 % RH bei 20 °C) zuerst auskristallisierende Phase. Es folgen geringe Mengen Sulfat-haltiger Phasen sowie Natrium- und Kaliumnitrat.

Im Rahmen des hiesigen Projekts wurden 2019 drei Proben geschädigten Putzes aus dem Sockelbereich hinter dem Altar entnommen und hinsichtlich enthaltener löslicher Salze untersucht. In einer der Proben wurde ein hoher Gips-Gehalt von 8 Gew.% nachgewiesen, während in den anderen beiden Proben keine Calcium-Ionen detektiert wurden. Auch in diesen Proben war der Salzgehalt moderat, die kritische Kristallisationsfeuchte liegt zwischen 69 und 71 % RH. Nitrat- und Chlorid-haltige Phasen überwiegen neben den ebenfalls in geringeren Mengen auskristallisierenden Sulfat-haltigen Salzen. Da die Kristallisationsverläufe für alle untersuchten Proben sehr ähnlich sind, ist in Abb. 2-17 nur einer exemplarisch gezeigt.

Trotz in Teilen abweichender Kristallisationsverläufe für die Proben aus 2.60 m und aus dem Sockelbereich (Abb. 2-17) spiegelt sich eine sehr ähnliche kritische Kristallisationsfeuchte wieder, so dass Kristallisationsprozesse im Bereich zwischen 69 und 71 % RH zu erwarten sind.

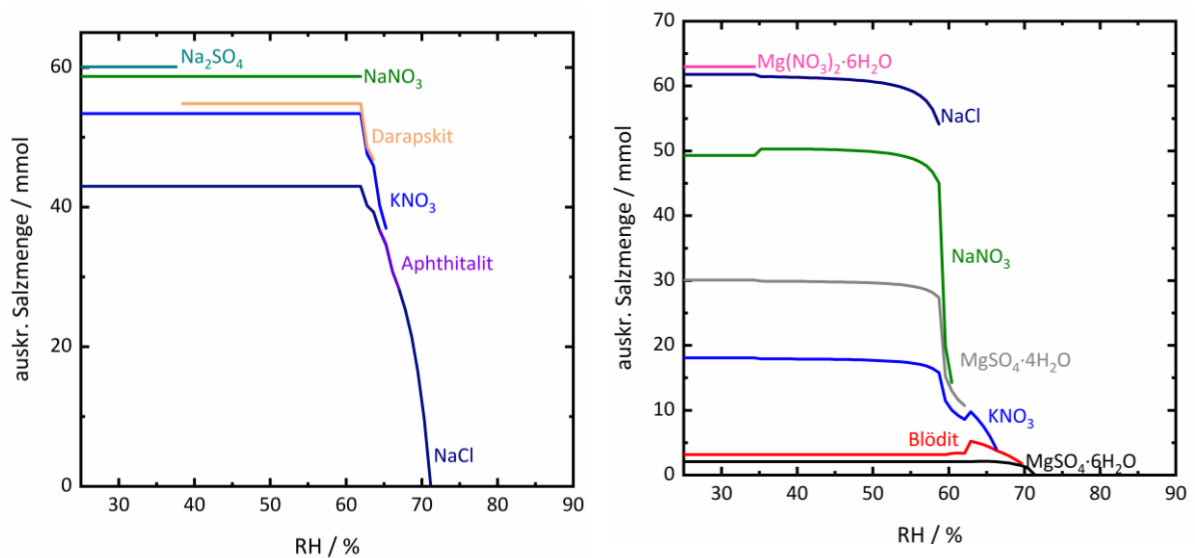


Abb. 2-17: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung (bei 20 °C) aus den Werten der Ionenanalyse des Oberflächensegments des Bohrkerns 2112 aus [42] (links) und einer Putzprobe aus dem Sockelbereich hinter dem Altar (rechts, entnommen 2019).



## **2.4 Klima**

### **2.4.1 Beurteilung und Bewertung des Istklimas im Jahre 1993 – Dorfkirche Axien**

#### **Ausgangssituation**

Die wertvolle Wandmalerei im Chorraum wies neben Putz- und Malschichtablösungen Schäden durch Salzausblühungen und Algenbildung auf.

Um einen Zusammenhang zwischen den Malereischäden und der raumklimatischen und bauphysikalischen Situation festzustellen, wurden in der Zeit von Januar 1993 bis Dezember 1994 in der Apsis und im Langschiff Nahfeldklimamessungen sowie die Ermittlung der Mauerwerksfeuchten vorgenommen.

Als Korrelationsgrößen zu den Innenklimadaten dienen die Außenklima- und Dachbodendaten.

Im Kirchenschiff und in der Apsis liegen annähernd identische klimatische Verhältnisse vor (Lufttemperatur  $-0.5\text{ °C}$  bis  $28\text{ °C}$ , absolute Luftfeuchte 4 bis  $17.5\text{ g/m}^3$  und relative Luftfeuchte 40 – 99 %).

Ebenfalls in den Sommermonaten weisen sowohl die relativen Luftfeuchten (max. 99 %) als auch die absoluten Luftfeuchten (max.  $17.5\text{ g/m}^3$ ) an den fußbodennahen Messorten die höchsten Messwerte auf (vertikaler Feuchtegradient:  $5\text{ g/m}^3$ ). In den Wintermonaten dagegen ist bei den Lufttemperaturen und auch bei den Luftfeuchten ein nahezu identischer Verlauf im gesamten Kirchenraum zu erkennen.

Die Verläufe der raumseitigen Oberflächentemperaturen zeigen tendenziell einen ähnlichen Verlauf wie die Lufttemperaturen, allerdings mit gedämpften Amplituden. Die Messwerte bewegen sich dabei zwischen  $-0.5\text{ °C}$  und  $26\text{ °C}$ .

Das Mauerwerk der Kirche weist im gesamten Wandquerschnitt nach längeren Kälteperioden negative Temperaturen auf.

Es wurde eine hohe Mauerwerksfeuchte festgestellt, deren Ursachen wahrscheinlich in aufsteigender Feuchte (Grund- u. Sickerwasser) und in einer unzureichenden Regenwasserabführung zu suchen sind.

Die Salzbelastung trägt außerdem durch Aufnahme von Wasser aus der feuchten Raumluft zur hohen Baustofffeuchte der oberflächennahen Schichten bei.

Kondenswasserbildung wurde im Frühjahr auf den inneren Wandoberflächen nach Witterungsumschwüngen festgestellt. Im Sommer kam es aufgrund der hohen absoluten Luftfeuchte in Fußbodennähe ebenfalls zur Tauwasserbildung.

#### **Sanierungsvorschlag anhand der Voruntersuchungen**

Der Verlust der Wandmalerei durch Salzkristallisation und mikrobiellen Befall kann laut den Untersuchungsergebnissen auf lange Sicht dadurch reduziert werden, dass der Wassergehalt des Mauerwerks verringert wird und ein Raumklima vorliegt, das sowohl die Mobilität der Salze als auch die Aktivitäten der Mikrobiologie unterbindet.

Die Unterbindung der Feuchtezufuhr könnte z.B. durch Abtragung des äußeren Erdreiches bis auf Fußbodenniveau sowie durch eine bessere Regenwasserabführung bzw. durch Anlegen einer Drainage (mit Kiesbett) erreicht werden.

Weiterhin sollte zur Stabilisierung des Feuchtehaushaltes eine Be- und Entlüftung des Innenraumes vorgesehen werden. In diesem Fall wird ein Austausch der Innen- mit der Außenluft vorgenommen.

## 3 Eilsum

### 3.1 Rückschau und heutiger Zustand

Im Folgenden werden die nach Beendigung des BMFT-Projekts 1996 durchgeführten Wartungen, Maßnahmen, Untersuchungen und Empfehlungen an der ev.-ref. Kirche in Eilsum in Kürze chronologisch zusammengefasst.

**08.12.1999:** Gerhard Drescher – Kontrolluntersuchung (Wartung) auf Veränderungen hinsichtlich des biologischen Befalls und Mikroorganismen

Die gesamte Malerei, besonders die ursprünglichen Bereiche, fühlen sich feucht an. Ob dies ein Grund für den neuen Algenbewuchs ist, soll über die Beprobung ermittelt werden (Kontrolluntersuchungen durchgeführt von Karin Petersen). In der Kalotte scheint der rosa Belag sich flächiger ausgedehnt zu haben.

**11.10.2002:** Kerstin Klein – Vorlage eines Anforderungsprofils für die Wartung und Pflege der ev.-ref. Kirche in Eilsum und weitere erforderliche Maßnahmen aus restauratorischer Sicht sowie Festlegung von Referenzflächen.

**13.02.2003:** FHO Emden (Prof. Dr. E. Bühler, Dipl. Ing. R. Ebel) – Messdatenerfassung Klimaregulierung

Im Labor Regelungstechnik wurde zunächst für Versuchszwecke eine Klimaregulierung entwickelt, die mehrere Sensoren und Lüfter enthält und durch ein neuartiges Steuerprogramm für günstige Luftfeuchtwerte im Chorraum sorgt (75 % RH). Das System läuft in einem Probetrieb, dessen Ergebnisse Aufschluss über das weitere Vorgehen liefern soll.

**29.06.2007:** Helmut Berling, Axel Büssing – Ermittlung des Kristallisationspunktes des Salzgemisches im oberflächennahen Wandbereich, Ev.-ref Kirche St. Petrus in Eilsum

Unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Salzgemisches im Mauerwerk der Kirche in Eilsum wäre eine Raumluftfeuchtigkeit von ca. 65 % bei möglichst geringer Schwankungsbreite wünschenswert. Unter dem Gesichtspunkt einer möglichen Schädigung der Materialien sollten insbesondere längere Unterschreitungen der genannten Feuchtigkeitsbereiche vermieden werden. Kurzfristige Spitzen oder Minima scheinen hingegen vertretbar zu sein.

**15.01.2008:** Rolf Niemeyer, Kerstin Klein, Bernhard Recker – Erfassung der Ausgangssituation vor Beginn der Temperierung des Chorraumes der Kirche in Eilsum in Form einer Wartung.

Zum Vergleich wurden an den Wandmalereien zwei Referenzflächen im Apsisrund ausgewählt. Zusätzlich wurden Tests zum mikrobiellen Befall mittels ATP-Bestimmung durchgeführt.

**18.03.2008:** Axel Büssing – Vorlage von Parametern für die Lüftungsregelung (und ggf. Erweiterung um Temperierung oder Warmluftzufuhr aus dem Predigtraum).

**9.6.2008:** Helmut Berling – Leistungsverzeichnis: Reduzierung der relativen Luftfeuchtigkeit in der Apsis der Ev.-ref. Kirche in Eilsum

Reicht die Absenkung der rel. Luftfeuchte durch die erzwungene Be- und Entlüftung nicht aus, soll vor allem während der Heizperiode in einem zweiten Schritt zusätzlich warme Luft aus dem Predigtraum abgesaugt und dem Chorraum sowie der Apsis zugeführt werden. In beiden Fällen muss die zugeführte Luft eine geringere absolute Feuchte als die zu ersetzende Luft des Chorraumes und der Apsis besitzen.

**11.07.2008:** Kerstin Klein, Bernhard Recker – Erste Zustandserfassung des Malereibestandes seit Beginn der Temperierung des Chorraumes der Kirche in Form einer Wartung (Ortstermin 8.7.2008)

Unabhängig von den Referenzflächen wurde im Januar 2008 vom Gerüst aus an der Bemalung festgestellt, dass sich im Bereich der Mandorla erhebliche Malschichtflächen ablösen. Ebenfalls heben sich die Stuckapplikationen teilweise ab. Am vorrangig zu sichernden Mandorla-Bereich wurden im Rahmen dieser Monitoring-Kampagne Konservierungsmaßnahmen mit dem Acrylat Plextol, angesetzt mit dest. Wasser im Verhältnis 1:5, ausgeführt.

**4.11.2008:** Bernhard Recker – Zweite Zustandserfassung des Malereibestandes seit Beginn der Temperierung des Chorraumes der Kirche in Form einer Wartung (Ortstermin 4.11.2008)

Die Notsicherungsmaßnahmen im Juli 2008 haben sich bewährt. Im Vergleich zum Juli 2008 wurden keine Veränderungen festgestellt.

**22.01.2009:** Helmut Berling, Axel Büssing – Kirche St. Petrus in Krummhörn Eilsum: Untersuchung der Entwicklung des Raumklimas nach Installation der rechnergesteuerten Zwangslüftung (vgl. 09.06.2008).

**29.01.2009:** Kerstin Klein, Bernhard Recker – DBU Projekt Eilsum: Zwischenbericht zum Referenzflächen Monitoring

Die im Februar 2007 festgelegten Referenzflächen wurden in mehreren Kampagnen untersucht: Bisher konnten mit dem Verfahren des Fotovergleichs, das für den Restaurator „alltagstauglich“ ist und nur einen vergleichsweise geringen Aufwand erfordert, an den ausgewählten Referenzflächen keine Veränderungen festgestellt werden.

**31.01.2009:** Rolf Niemeyer – DBU Projekt: Zwischenbericht zur Prüfung der Nachhaltigkeit der im BMBF-geförderten Forschungsprojekt „Denkmalforschungen“ in den Jahren 1987-1995 in der Ev.-ref. Kirche in Krummhörn-Eilsum, Ldkr. Aurich, durchgeführten Konservierungsmaßnahmen als Grundlage für Wartungs- und Pflegemaßnahmen.

Ermittlung des aktuellen Feuchte- und Salzgehaltes des Wandmalerei-tragenden Mauerwerks im Chor der Ev.-ref. Kirche in Eilsum. Die daraus resultierenden Messergebnisse sollen als Grundlage für die Erstellung eines Konzeptes zur Erhaltung der Wandmalerei mittels Klimatisierung dienen. Es wurden innen 2 Bohrkern genommen und neben dem Salzgehalt die Material- und Sorptionsfeuchten bestimmt.

**16.3.2009:** Rolf-Jürgen Grote – DBU Projekte Eilsum/Pilsum

Die Anfang 2008 in Eilsum installierte vollautomatische Lüftungsanlage hat dafür gesorgt, dass sich das Raumklima hinsichtlich des für die Wandmalerei-Schadensentwicklung bedeutenden

Parameters Luftfeuchtigkeit im Vergleich zu 2007 phasenweise verbessert hat. Die Beeinflussung des Raumklimas wird zurzeit nur durch einen erzwungenen Luftwechsel erreicht. Hierzu wird Dachraumluft zugeführt und nach Durchmischung mit der feuchteren Innenraumluft größtenteils gezielt nach Außen geleitet. Die Klimaverläufe zeigen, dass sich das Raumklima bislang noch häufig oberhalb des vorgesehenen Grenzwertes von 65 % RH bewegt, die Lüftungsanlage im betrachteten Zeitraum allein also nicht in der Lage ist, die Feuchte dauerhaft ausreichend stark abzusenkten. Lösungsmöglichkeit: Zusätzliche Temperierung allgemein und vor allem während des Zeitraumes, wo nicht be- und entlüftet werden kann. Es liegen keine Informationen darüber vor, was im Anschluss an diese Mitteilung erfolgt ist.

**27.10.2009:** Maria Ovelgönne – DBU-Projekt: Ein Erfahrungsbericht über das innovative Referenzflächen-Monitoring aus restauratorischer Sicht (Deutsches Bergbaumuseum)

Das innovative Referenzflächen-Monitoring ist an objekttypischen Referenzstellen eine erste kostengünstige und sichere Möglichkeit, Erstschäden und Schadensverläufe wesentlich präziser als bisher zu ermitteln. Aus restauratorischer Expertensicht ist aber darauf hinzuweisen, dass diese erste visuelle Erkenntnishilfe eine nachfolgende restauratorische und interdisziplinäre Bearbeitung erkannter Schäden und Schadensverläufe nicht ersetzen will oder möchte. Für die visuellen Objekte bezüglich der Referenzflächen in Pilsum und Eilsum war zunächst ein erheblicher apparativer Aufwand erforderlich.

**06.01.2010:** Kerstin Klein, Bernhard Recker – Dritte Zustandserfassung des Malereibestandes seit Beginn der Temperierung des Chorraumes der Kirche in Form einer Wartung (Ortstermin 16.-17.11. 2009)

Es wurde ein Defekt der Lüftungssteuerung festgestellt. Wie lange sie schon ausgefallen ist, konnte nicht ermittelt werden. Die Raumluft im Ostteil wirkte feucht und muffig. Der Ausfall der Klimasteuerung bestätigte einmal mehr, wie sinnvoll es ist, auf die Abschottung der Apsis zu verzichten. Dank der Größe des Luftraumes bis zur Trennwand zum Kirchenschiff waren Negativeinflüsse an den Maleroberflächen gegenwärtig nicht erkennbar. Zusätzlich wurden ATP-Messungen an Referenzflächen durchgeführt.

**07.01.2010:** Kerstin Klein, Bernhard Recker, Referat Fachdienste – Nachhaltige und modellhafte Pflege der national bedeutenden Wandmalereien der Kirchen in Eilsum und Pilsum durch Klimamonitoring und Entwicklung von individuellen, angepassten Lösungsstrategien

In Eilsum und Pilsum konnte einmal mehr bestätigt werden, dass mit dem Verfahren des Fotovergleichs sehr gute Ergebnisse erzielt werden können. Die gewählte Methode ist einfach zu handhaben, preiswert und äußerst alltagstauglich. Es wurde gemeinsam bei der Sitzung am 8.12.2009 bei der DBU in Osnabrück im Beisein der Herren Töpfer, Groenewold, Berling, Stadlbauer, Recker und Frau Klein beschlossen, das Monitoring in den nächsten Jahren fortzusetzen, um den Erhalt der Malereien zu gewährleisten und ggf. auftretende Veränderungen dokumentieren und Schäden rechtzeitig beheben zu können.

**29.3.2010:** Kerstin Klein, Bernhard Recker, Referat Fachdienste – DBU Förderprojekt Eilsum AZ 24270: Nachhaltige und modellhafte Pflege der national bedeutenden Wandmalereien der

Kirchen in Eilsum und Pilsum durch Klimamonitoring und Entwicklung von individuellen, angepassten Lösungsstrategien.

DBU-Abschlussbericht des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege. Beim Vergleich beider Vorgehensweisen zum Monitoring hat sich gezeigt, dass es nur unmittelbar an den Objekten durchgeführt werden kann. Das Monitoring führt zu schnellen, gut nachvollziehbaren Ergebnissen. Es ist allerdings festzustellen, dass sich eine Stabilisierung an der Wandmalerei in Eilsum durch eine Klimaregulierung erst sehr langsam einstellen wird. Wünschenswert wäre es, dass die Klimasteuerung nach den Projektvorgaben funktionieren würde. Um dies zu gewährleisten, wäre eine einmal jährliche Kontrolle durch den Bauphysiker in Zusammenarbeit mit den Restauratoren und dem Kirchenamt ratsam.

**31.3.2010:** Jürgen Heckes, Ulrike Frohne-Nölke, Heinz-Werner Voss, Birgit Borchert, Rolf-Jürgen Grote, Maria Ovelgönne – Foto Controlling von Wandmalereien 2007-2009, DBU-Projekt 24270 Deutsches Bergbaumuseum

Modellhafte Erprobung eines digitalen Controlling-Verfahrens am Beispiel der national bedeutenden Wandmalereien der Kirchen in Eilsum und Pilsum/Ostfriesland. Mit Hilfe der angewendeten wissenschaftlich-technischen Verfahren der digitalen Fotografie für den Spektralbereich des sichtbaren Lichts wurden nach wenigen Auswerteschritten Verdachtsflächen identifiziert, die auf Änderungen der Oberflächen der Referenzfelder hindeuten.

## 3.2 Mikrobiologie

Ein Vortermin in Eilsaum ohne technische Unterstützung in Form einer Gerüststellung, die aber tatsächlich erforderlich wurde, ergab ein teils kritisch zu bewertendes Bild.

Die seinerzeit empfohlene Neuverfugung des Ziegelmauerwerks erscheint zwar durchgehend erfolgt zu sein, jedoch weisen die Ziegel selbst erhebliche Schädigungen auf. Aus diesem Grund wurde während der früheren BMFT-Projekte vorgeschlagen, Schlämmen auf das Ziegelmauerwerk aufzubringen. Probeflächen wurden damals angelegt, wurden aber bereits von Beginn an als störend - weil zu auffällig rot und im Vergleich zum gewohnten Bild zu eintönig und einheitlich - empfunden.

Die Aufnahmen (2021) zeigen den Zustand der Probeflächen an der Südwand des Glockenturms (Abb. 3-1) und an der Außenwand des Chors (Abb. 3-2).

Diese Probeflächen zeigen sich auch heute noch in teilweise sehr gutem Zustand. Die möglichen Auswirkungen einer Schlämme – die sicherlich auch weniger störend ausgeführt werden könnte – auf den Feuchtegehalt des Mauerwerks wären zu diskutieren.

Nach Betreten der Kirche durch das Langhaus, wurde dort – nicht aber im vom Langhaus durch eine Glas-/Holzkonstruktion abgetrennten Chor der Kirche – ein deutlich muffiger Geruch nach Schimmel wahrgenommen. Hier wurde der Ursache nicht weiter nachgegangen, da sich das laufende Projekt mit den Malereien im Chor befasst. Es muss jedoch geklärt werden, ob hier der Teppichläufer verschimmelt ist, was in einer feuchten Kirche durchaus zu erwarten wäre. In jedem Fall sollten derartige, gut besiedelbare Materialien aus der Kirche entfernt werden.

Die Einrüstung bei dem gemeinsamen Ortstermin ermöglichte die direkte Inaugenscheinnahme der Oberflächen in der Apsis, einschließlich der die Malerei tragenden Bereiche.



Abb. 3-1: Schlämmen im unteren Turmbereich.



Abb. 3-2: Stark angegriffenes Ziegelmauerwerk mit weiteren testflächen für teils weniger auffällige Schlämmen.

Detailuntersuchungen ausgewählter Bereiche unter Gerüststellung ergaben eine insgesamt zufriedenstellende Beurteilung des Malereizustands.

Aufstehende Malschichten oder gar Farbschichtverluste konnten nicht festgestellt werden.

**Untersuchung zur Keimbelastung der Oberflächen durch heterotrophe Mikroben** Vereinbarungsgemäß erfolgten im Projektrahmen, mit Ausnahme der Proben für die IR-Spektroskopie, ausschließlich zerstörungsfreie Probenahmen auf einen möglichen mikrobiellen Befall.

### **Mikroskopische Untersuchung von Kontaktproben**

Die mikroskopische Untersuchung der Klebefilmproben ergab keinen Hinweis auf eine ausgebildete Besiedlung der Architekturoberflächen und der Malerei (Tab. 3-1).

Auch rein makroskopisch wurde kein Hinweis auf eine mikrobielle Besiedlung gesehen. Die gefundenen Keime müssen ausschließlich als Anflugkeime aus dem Aeroplankton angesehen werden, da auf keiner der Proben Hyphen nachgewiesen werden konnten.

Die vorliegenden mikrobiologischen Laboruntersuchungen als Anzuchtversuche auf verschiedenen Nährmedien belegen eine sehr starke Keimbelastung der Oberflächen durch die erwähnten Anflugkeime, die in keimfähiger Form auf den Oberflächen abgelagert sind, jedoch unter den derzeitigen Bedingungen nicht zur Entwicklung kommen können und somit derzeit keine eigentliche Besiedlung aufbauen (Abb. 3-3 und Tab. 3-2). Diese Anzuchtversuche wurden analog zu den Untersuchungen in den 1990er Jahren neben dem Gurtbogen bis zu einer Höhe von 4.50 m ausgeführt. Das heutige Ergebnis lässt auf eine starke Verschmutzung der Oberflächen schließen, dafür spricht auch der durchgehende Nachweis von Spinnfäden.

Tab. 3-1: Ergebnisse der mikroskopischen Untersuchung von 2021 in Eilsum entnommenen Proben.

<b>Probe</b>	<b>Beobachtung</b>
<b>0</b>	Kristallines Material, Fasern, Gespinstfäden Einige Cluster brauner Konidien, subglobos, glattwandig ca. 3.5 µm Durchmesser
<b>50</b>	Kristallines Material, Fasern, Gespinstfäden Einige Cluster brauner Konidien, subglobos, glattwandig ca. 3.5 µm Durchmesser Ein Cluster hyaline Konidien, leicht rauwandig, subglobos ca. 5 µm im Durchmesser
<b>100</b>	Kristallines Material, Fasern, Gespinstfäden Einige Cluster brauner Konidien, subglobos, glattwandig ca. 3.5 µm Durchmesser Einige Cluster hyaline Konidien, leicht rauwandig, subglobos ca. 5 µm im Durchmesser Ein Knäul Gespinstfäden mit Mycelrest ähnlich Cladosporium species
<b>150</b>	Kristallines Material, Fasern, Gespinstfäden Einige hyaline Konidien, leicht rauwandig, subglobos ca. 5 µm im Durchmesser
<b>200</b>	Kristallines Material, Fasern, Gespinstfäden Einige hyaline Konidien, leicht rauwandig, subglobos ca. 5 µm im Durchmesser



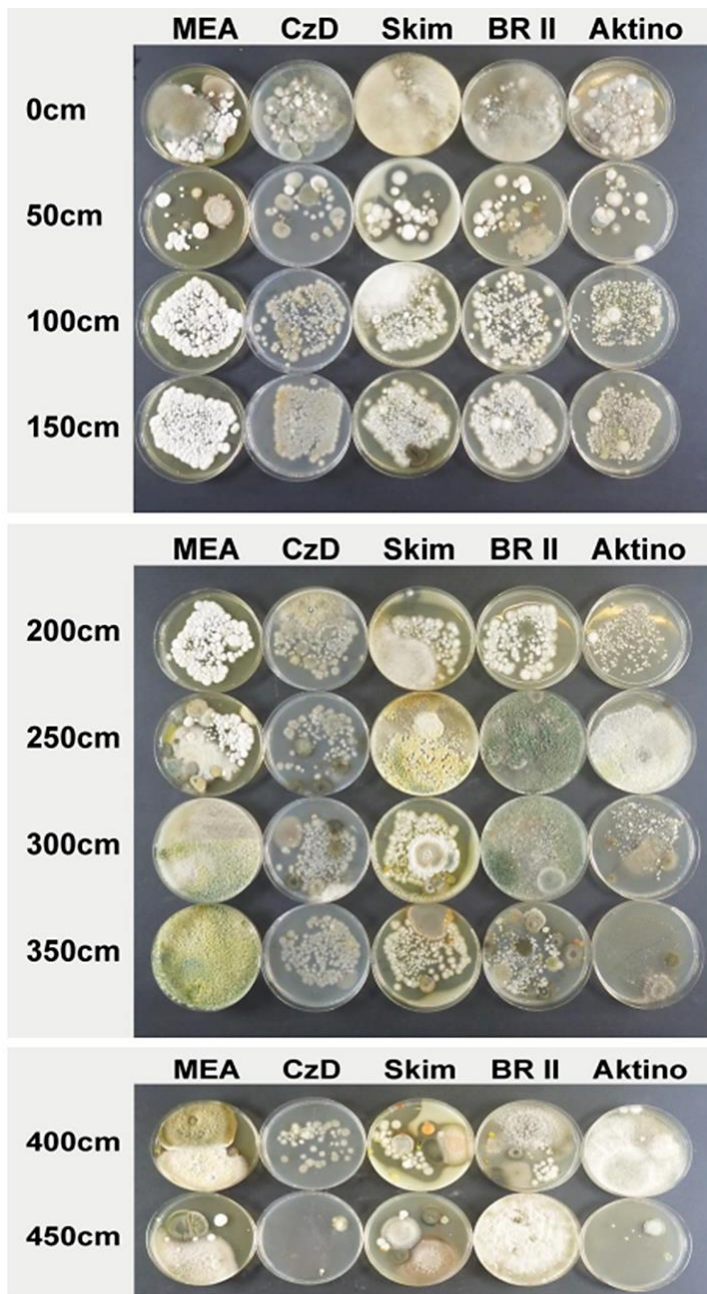


Abb. 3-3: Anzucht von Anflugkeimen auf verschiedenen Nährmedien.

Tab. 3-2: Quantitative Auswertung der Kolonie bildenden Einheiten / cm<sup>2</sup> (Anflugkeime).

Höhe ab Fußboden (cm)	Pilze (KBE/ 25 cm <sup>2</sup> )	Bakterien/Hefen ohne Aktinomyceten (KBE/ 25 cm <sup>2</sup> )	Aktinomyceten (KBE/ 25 cm <sup>2</sup> )
0	704	2	5
50	155	15	1
100	1.688	0	12
150	2.470	4	0
200	1.172	1	0
250	275	4	0
300	827	15	0
350	1.282	16	5
400	128	20	0
450	30	10	0

Eine Reinigung der Oberflächen wäre daher dringend geboten, auch um bei gegebenenfalls ungünstiger werdendem Klima die Entwicklung einer mikrobiellen Besiedlung aus den vorhandenen Anflugkeimen zu vermeiden!

Allgemein lässt u. a. die Tatsache, dass Aktinomyceten kaum auffällig wurden, auf ein deutlich verbessertes Klima mit geringerer Feuchteverfügbarkeit schließen. Die seinerzeit in großer Menge nachgewiesenen Aktinomyceten sind derzeit nicht oder nur in extrem geringer Anzahl vorhanden. Gerade diese Bakterien gelten aber als Anzeigeorganismen für erhöhte Feuchtigkeit.

Auch das Vorkommen von überwinterten Mücken auf den Architekturoberflächen (Abb. 3-4) kann längerfristig zu einem Problem werden, da anderenorts nachgewiesen werden konnte, dass abgestorbene Mückenkadaver von Schimmelpilzen als Nahrungsquelle genutzt werden und somit die Anfänge auch der Besiedlung der Oberflächen selber eingeleitet werden könnte.

Die in den durch die damaligen Kalkkaseinhinterspritzungen bedingten Besiedlungen in den so mit Nährstoffen versorgten Bereichen der Kalotte (Abb. 3-5), ließen sich nicht mehr wahrnehmen.



Abb. 3-4: Mücken auf Architekturoberfläche.

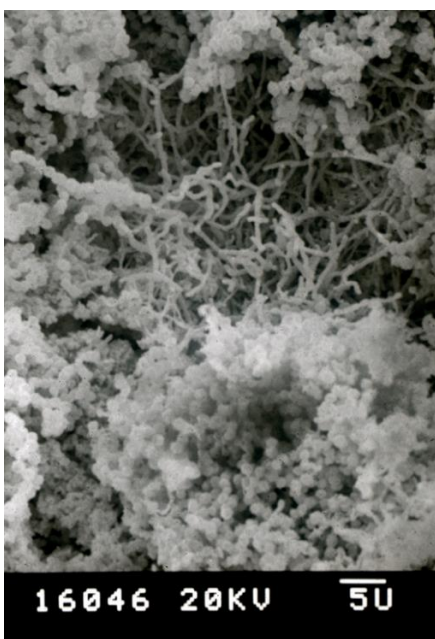


Abb. 3-5: Altzustand Putzunterseite, hinterspritzt.

## Vergrünung

In der Apsis wurden deutliche Vergrünungen im Sockelbereich sichtbar (Abb. 3-6), die auf nach wie vor aufsteigende Feuchte hinweisen, was jedoch hier im unteren Neuputzbereich nicht als kritisch angesehen wird.

Die ehemals deutlich vergrüneten Läufer, besonders ausgeprägt im Apostelband, – resultierend aus den veränderten Feuchteverfügbarkeiten auf den aus den Injektionslöchern herausgelaufenen Kalkkaseinhinterspritzungen – sind nicht wieder aufgetreten, nachdem im Zuge der Restaurierungsmaßnahmen Mitte der 1990er Jahre diese Kaseinläufer abgenommen worden waren (Abb. 3-7 und Abb. 3-8).

Hier muss betont werden, dass das Algenwachstum seinerzeit nicht durch die Nährstoffe in den Läufern ausgelöst wurde, sondern auf die Quellfähigkeit des Kaseinfilms zurückzuführen ist, was den Algen exakt auf den Bereich begrenzt die zum Wachstum erforderliche Feuchte garantierte. Die seinerzeit ausgebildeten Algen wurden als *Chlorella minor* angesprochen.



Abb. 3-6: Vergrünung im Sockelbereich.



Abb. 3-7: Apostelband, Altzustand (Foto: T. Trapp).



Abb. 3-8: derzeitiger Zustand.

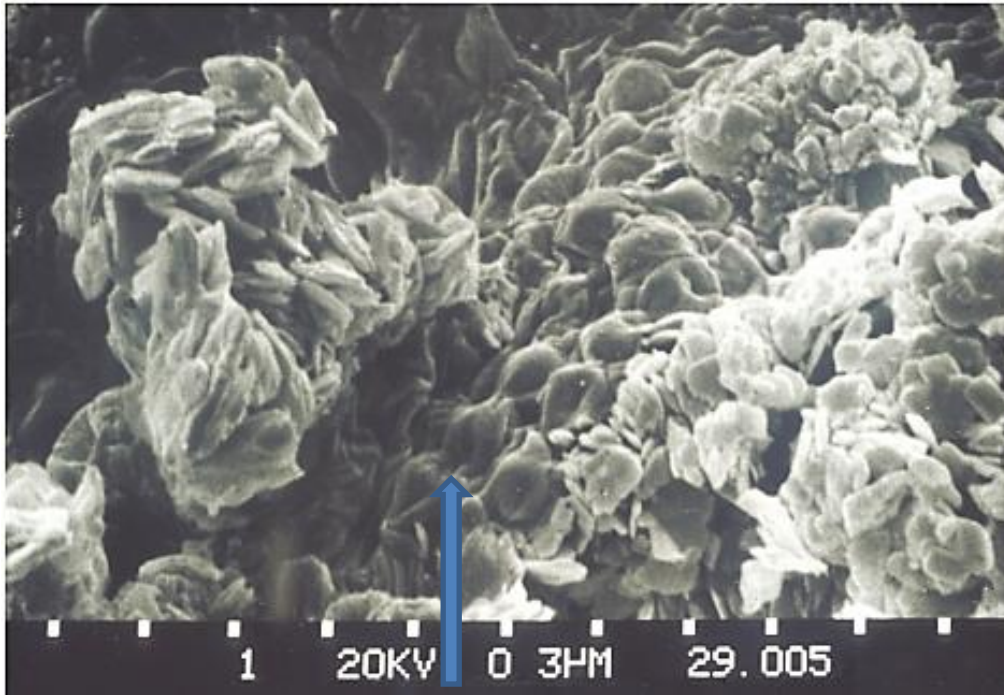


Abb. 3-9: Algenzellen auf Kaseinläufer im Rasterelektronenmikroskop.

Derzeit wurden im an den Fußboden angrenzenden Wandbereich Algen derselben Gattung, jedoch einer anderen Art – eher *Chlorella vulgaris* zuzuordnen – festgestellt.

Erheblich störender als im Sockelbereich fielen jedoch extreme Vergrünungen bis in den Bereich der Mandorla hinein ins Auge, die sich im gesamten oberen Chorbereich zeigen (Abb. 3-10 bis Abb. 3-13).



Abb. 3-10: Vergrünung in der Kuppel.



Abb. 3-11: Die Malerei nachzeichnende Vergrünung

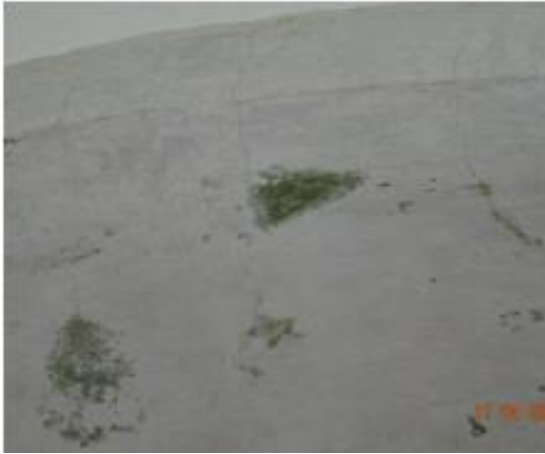


Abb. 3-12: Vergrünung am Gurtbogen.



Abb. 3-13: vermutlich nicht Biozid behandelter Bereich im Detail.

Ebenfalls auf punktuell Feuchtigkeit weisen die im gesamten Bereich der Kalotte auftretenden Algenbeläge hin.

Insbesondere wegen der teils die Malerei nachbildenden Vergrünungen (Abb. 3-11) wurde vermutet, dass in den betroffenen Bereichen gegebenenfalls Reste der seinerzeit nachgewiesenen Oberflächenfixierungen – vermutet wurde hier ein Acrylat – erhalten sind, die Feuchte speichern und diese den Mikroorganismen zur Verfügung stellen können, wie seinerzeit für die bereits angesprochenen Kaseinläufer gefunden.

Der Frage wurde einerseits durch einen ersten Probedurchlauf durch den Einsatz einer mit verschiedenen LEDs und Filtersystemen ausgestatteten Kamera nachgegangen (s. Kapitel 1.1 zu forensischer Fotografie). Für die Ausarbeitung der analytischen Möglichkeiten mittels dieser Technik wurde eine Vielzahl von erforderlichen Probekörpern unterschiedlichsten Aufbaus hergestellt, deren Untersuchung inzwischen abgeschlossen ist, ein entsprechender Bericht<sup>[13]</sup> liegt bei.

Als störend wird derzeit noch die Ausbreitung des Lichtkegels empfunden, ebenso müsste zumindest ein weiteres Objektiv umgerüstet werden, um größere Flexibilität bei den zur Beurteilung/Aufnahme möglichen Entfernungen zu gewinnen.



Abb. 3-14: Übersichtsaufnahme Rissbereich.



Abb. 3-15: Rissbereich unter LED-Beleuchtung, li. ohne, re. mit Besiedlung



Abb. 3-16: Bereich links vom Riss ohne Vergrünung unter Tageslicht.



Abb. 3-17: Bereich aus Abb. 3-16 mit LED-Anregung.



Abb. 3-18: Besiedelter Bereich rechts vom Riss unter LED-Anregung (Lichtkegel stört).

Ebenso erfolgte eine Analyse der einzigen entnommenen Proben auf deren mögliche Oberflächenbehandlung/Fixierungsauftrag mittels IR-Spektroskopie.

Auch hier ist der Bericht angeführt. Zum jetzigen Zeitpunkt lassen die Ergebnisse jedoch keinen Rückschluss auf die Ursachen der punktuellen Algenbesiedlung in diesen Bereichen zu.

Das Gewölbe war während des Ortstermins von oben zugänglich, die dort entnommenen „Staub-/Bodenproben“ wiesen jedoch keine erhöhte Materialfeuchte auf. Vor Schließung der Schallöffnungen konnten auf dem Gewölbe seinerzeit bereits makroskopisch feuchte Auflagerungen beobachtet werden, insbesondere nach Starkregenereignissen, denen im Laufe weniger Tage auch die punktuelle Ausbildung von Algenbesiedlungen folgte.

Insgesamt erscheint es, als sei die Feuchtigkeit nur in einigen sich derzeit durch die auffällige Algenausbildung markierenden Bereichen in einem Maße erhöht, dass eben nur dort eine Algenentwicklung möglich ist. Dies war auch seinerzeit in den Kaseinläufern verantwortlich dafür, dass nur dort eine auf diese Läufer scharf begrenzte Besiedlung durch Algen erfolgen konnte. Auch dieser Frage sollte in einem weiteren Ortstermin nachgegangen werden. Eventuelle Unregelmäßigkeiten sollten durch den Einsatz einer Thermokamera überprüft werden, was erst bei entsprechenden Temperaturdifferenzen innen/außen möglich ist. In diesen Zusammenhang gilt auch zu klären, ob das seinerzeit in die Hochschule Emden verlagerte Klimamonitoring (ein Messfühler hängt im Scheitelbereich des Gurtbogens, Abb. 3-19) auf temporär verstärkten Feuchteintrag zumindest hinweist, oder aber ob der Fühler nicht mehr in Funktion oder Wartung ist. Entsprechende Informationen konnten bisher nicht gewonnen werden, gelten jedoch als unwahrscheinlich.

Die aktuell inzwischen durchgeführten Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung, ebenso wie die in Greene (s. v.) erfolgreichen Versuche mit Einsatz einer Thermokamera kältere und damit möglicherweise durch höhere Feuchtigkeit gefährdete Bereiche zu erfassen, geben keinerlei Hinweis auf eine akute Gefährdung der Malereien durch Mikroorganismen.

Eine Einschränkung muss hier jedoch für die Algenbesiedlung gemacht werden, der Zustand der darunter befindlichen Oberflächen wäre durch vorsichtige Reinigungsproben (Abnahme der Beläge) zu bewerten.



Abb. 3-19 Klimafühler im Gurtbogen.

### 3.3 Salze

In verschiedenen Berichten aus der Zeit zwischen 1995 und 2009 wird die Salzverteilung und -belastung wie folgte beschrieben:<sup>[44]-[46]</sup> Die aufgehenden Apsiswände sind mit teilweise über 100 µm starken Gipsschichten bedeckt, die Gipsbelastung nimmt aber mit zunehmender Höhe ab. In höher gelegenen Bereichen nimmt hingegen der Anteil an Chloriden und Nitraten zu. Die Belastung mit hygroskopischeren Salzen wurde mit der Aufschüttung der Kalotte begründet, wodurch Unrat (offene Schallluken bis 1990) und mit Chlorid angereichertes Regenwasser eingebracht werden konnten. Das Abtragen der Aufschüttung wurde bereits in einem 1995 verfassten Bericht<sup>[46]</sup> empfohlen, so dass ein weiterer Nachschub der Ionen in die Kalotte unterbunden werden sollte. Als nachgewiesene Ausblühsalze wurden Gips, Natriumsulfat, Natriumchlorid und in deutlich geringeren Mengen -nitrat, -carbonat und Kaliumcalciumsulfat-Dihydrat (Syngenit) genannt. Im September 2021 wurden neun Proben (Putz und Ausblühungen) im Chorraum sowie im Bereich hinter der Orgel im Haupthaus entnommen. Zunächst soll auf die Proben aus dem Bereich des die Wandmalerei beherbergenden Chorraumes eingegangen werden.

Drei Proben wurden aus dem unteren Bereich der Apsis (maximal 300 mm Höhe) entnommen, jeweils eine an dem nach Norden (Putz und Salz), Nordosten (Salzausblühung) und Osten (Putz) ausgerichteten Wandbereich. Alle drei Proben wiesen hohe Gipsgehalte auf, jene aus dem nordöstlichen Bereich zudem hohe Gehalte an Natriumsulfat. In allen drei Proben war der Sulfat-Gehalt höher als der des Calciums, so dass es sich um Mischungen des Typs I handelt. Abb. 3-20 zeigt das Ergebnis der *ECOS*-Berechnung (durchgeführt für eine Temperatur von 20 °C) für die aus dem nach Norden ausgerichteten Wandbereich entnommene Probe. Es sind die Kristallisation weiterer Sulfat-haltiger Phasen sowie eine kritische Kristallisationsfeuchte von 77 % und eine gemeinsame Deliqueszenzfeuchte von 61 % erkennbar. Neben dem prognostizierten

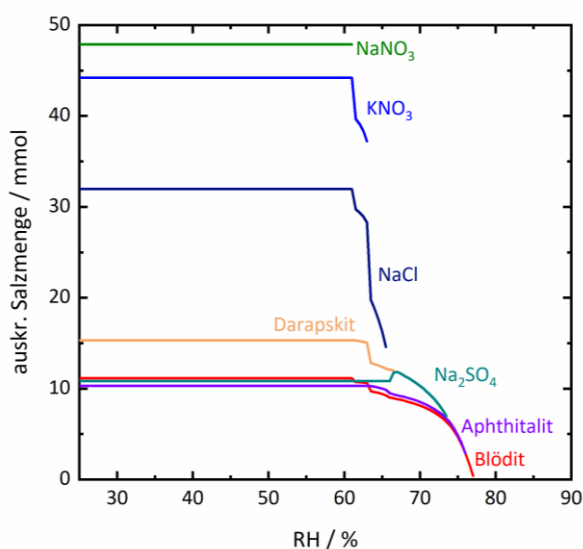


Abb. 3-20: Ergebnis der Berechnungen mit *ECOS-Runsalt* (bei 20 °C, links) zu einer Probe aus dem nach Norden ausgerichteten Bereich der Apsis (150 mm Höhe, Foto der Entnahmestelle rechts).



Kristallisationsverlauf ist in Abb. 3-20 auch ein Foto der Entnahmestelle der entsprechenden Probe gezeigt, in der Ausblühungen und durch Salzaktivität geschwächter und geschädigter Putz neben lokalem Algenbewuchs erkennbar sind.

Zwei weitere Putzproben wurden aus dem Bereich der Malerei entnommen. Der in Abb. 3-21 gezeigte Ausschnitt der Malerei zeigt deutlich das abgesetzte, grünlich verfärbte Ornament. Sowohl in Bezug auf Mikrobiologie als auch auf Salze sollte eine Probe des grünen Bereichs mit einer aus einem nicht verfärbten Bereich verglichen werden. Die Untersuchung der Proben hat jedoch auch einen anderen Zweck – es können die zuvor besprochenen Proben aus dem Bereich unter der Wandmalerei kurz oberhalb des Bodens und die aus dem Bereich der Malerei mit den Beschreibungen aus früheren Berichten verglichen werden.

In Abb. 3-22 ist links das Ergebnis der *ECOS*-Berechnung für die Probe mit und rechts für jene ohne Algenbewuchs dargestellt. Die Gipsgehalte waren gering, ferner lagen Mischungen des Typs II vor, mit einem höheren Gehalt an Calcium- als an Sulfat-Ionen. Die Ergebnisse zeigen in beiden Fällen eine kritische Kristallisationsfeuchte von 67 % (gemeinsame Deliqueszenzfeuchte: 28 %). Im Kristallisationsverlauf zeigen sich die gleichen auskristallisierenden Salzphasen, jedoch teilweise bei unterschiedlichen Kristallisationsfeuchten. Der Salzgehalt in der Probe aus dem Bereich mit grünem Bewuchs weist zudem einen höheren Salzgehalt mit verhältnismäßig mehr Kalium- und Calcium-Ionen auf, das Verhältnis zwischen Nitrat- und Chlorid-Ionen ist in beiden Fällen gleich.

Werden die Ergebnisse der im Rahmen des Projekts neu untersuchten Proben aus dem Bereich um die Wandmalerei mit den Beobachtungen aus den Berichten ab 1995 verglichen, so zeigen sich weiterhin eine Gipsbelastung im unteren Bereich der Apsis und hygroskopischere Salzmischungen im Bereich der Malerei, wo nur noch geringe Gipsbelastungen nachweisbar sind. Neu sind die Einblicke, die durch die *ECOS*-Berechnungen zugänglich sind. Sie zeigen, dass für untere Bereiche eine Unterschreitung von 77 % RH bereits zu Kristallisationsprozessen führen kann, weiter oben sollte eine Unterschreitung von 67 % vermieden werden.

Um einen weiteren Blick auf die Versalzungssituation im Bereich des Haupthauses der Kirche zu werfen, wurde auch der Bereich hinter der Orgel auf einer Empore betrachtet (Westwand der Kirche). Abb. 3-23 zeigt den Bereich, in dem eine Probe abblätternden Putzes und Salzausblühungen entnommen wurde sowie das Ergebnis der *ECOS*-Berechnung mit den Werten der Ionenanalyse dieser Proben. Calcium- und Sulfat-Ionen machten bereits 5.3 Gew.% der Probe aus. Wird Gips aus dem Gemisch herausgerechnet, verbleibt eine Mischung des Typs I, die kritische Kristallisationsfeuchte liegt bei 74 % RH.

Zudem wurden zwei Proben (Salzausblühungen) aus dem Bereich der Gurtrippe (Nordwest, Abb. 3-24) entnommen, wobei eine der Proben einen Kationenüberschuss von 94 % bei gleichzeitig hohen Natriumgehalten aufwies, was auf das überweiegende Vorliegen von Natriumcarbonat schließen lässt. Für die andere Probe ergab sich ebenfalls ein Gemisch des Typs I mit einer kritischen Kristallisationsfeuchte von 88 % RH.

Es lassen sich somit deutliche Unterschiede für die Versalzung und das Kristallisationsverhalten der Mischungen im oberen Bereich des Chorraumes und im Haupthaus (zumindest im beprobten Bereich hinter der Orgel) feststellen. Auch diese Beobachtung bekräftigt die Annahme, dass der Eintrag hygroskopischer Salze über die Aufschüttung der Kalotte über Jahrhunderte hinweg die Quelle für das im Bereich der Wandmalerei vorgefundene Salzgemisch ist.



Abb. 3-21: Foto der Probenahmestelle im Bereich der Malerei (Apsis Putz mit und ohne Algenbewuchs).

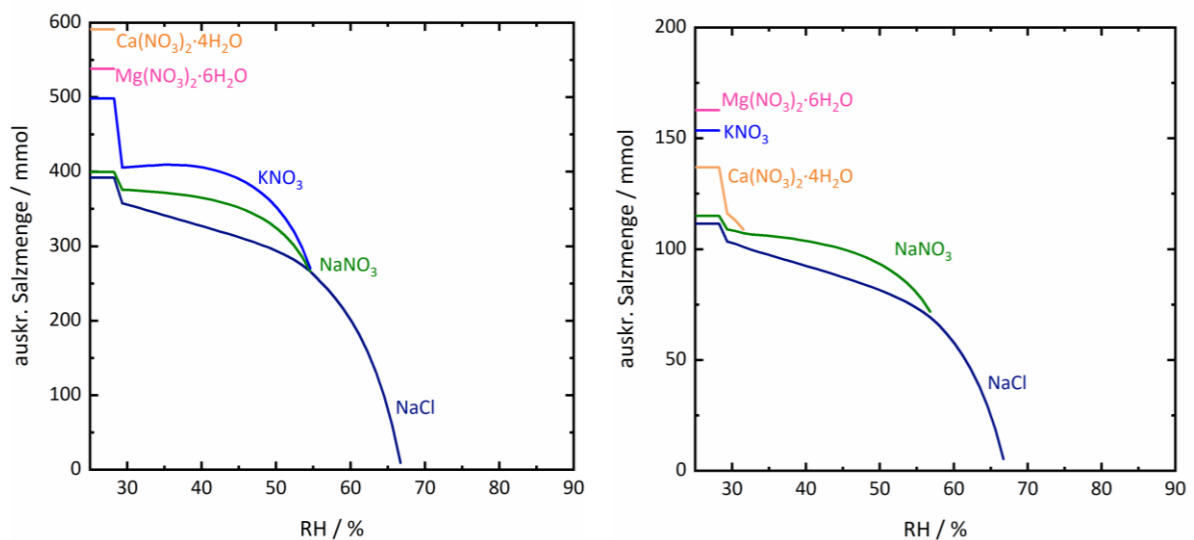


Abb. 3-22: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung (20 °C) aus den Werten der Ionenanalyse von Proben aus dem in Abb. 3-21 gezeigten Bereich (links für die Probe mit, rechts für die Probe ohne Algenbewuchs)

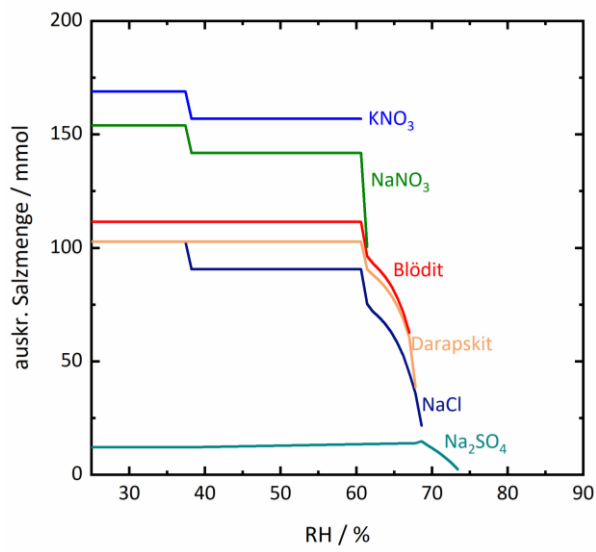


Abb. 3-23: Ergebnis der *ECOS-Runsalt* Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C, links) zur Probe aus dem Bereich hinter der Orgel (Foto der Entnahmestelle rechts).

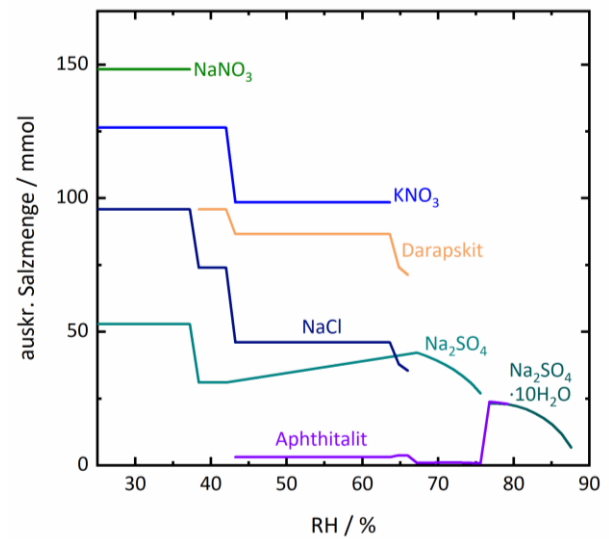


Abb. 3-24: Foto der Gurtrippe (links) und Ergebnis der *ECOS-Runsalt* Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C, rechts) einer Salzprobe aus dem links gezeigten Bereich.

## **3.4 Klima**

### **3.4.1 Reduzierung des Feuchtehaushaltes in der ev.-ref. Kirche in Eilsum/Krumhörn**

#### **Ausgangssituation**

Die Wandmalerei in der Apsis zeigte erhebliche Schäden wie z. B. schollenartige, dachförmige Abhebungen der Malerei, Farbumbwandlungen und abpudernde Malerei.

Um einen Zusammenhang zwischen den Malereischäden und der raumklimatischen und bauphysikalischen Situation festzustellen, wurden in der Zeit von Juli 1993 bis März 1995 messtechnische Untersuchungen vorgenommen.

Es wurde ein stark schwankendes Innenklima (Temperatur -2 °C bis 18 °C und relative Luftfeuchten von 35 % bis 90 %) ermittelt.

Das Mauerwerk war stark feuchtebelastet und der Durchfeuchtungsgrad zeigte Werte zwischen 13.6 und 24.6 %. Darüber hinaus belastete ein Salzgemisch aus Natriumchlorid NaCl und Natriumnitrat NaNO<sub>3</sub> die raumseitigen Mauerwerksoberflächen.

Die Apsis und der Chorraum wiesen zu diesem Zeitpunkt keinerlei technische Einrichtungen hinsichtlich der Klimabeeinflussung und -regulierung auf.

#### **Sanierungsvorschlag anhand der Voruntersuchungen**

Der Verlust der Wandmalerei durch Salzkristallisation und mikrobiellen Befall kann laut der Untersuchungsergebnisse auf lange Sicht dadurch reduziert werden, dass der Wassergehalt des Mauerwerks verringert wird und ein Raumklima vorliegt, das sowohl die Mobilität der Salze als auch die Aktivitäten der Mikrobiologie unterbindet.

Außerdem tragen hohe relative Luftfeuchten infolge des hygroskopischen Verhaltens des Salzgemisches zu einem feuchten Mauerwerk bei.

#### **Ausgeführte Maßnahmen**

Durch Überarbeitung des Außenmauerwerks (Schlämmen, Verfugung, Austausch Ziegel) wurde die Wasserzufuhr reduziert.

Zur Stabilisierung des Raumklimas im Chorbereich der St.-Petrus-Kirche in Krumhörn-Eilsum wurde zu Beginn des Jahres 2008 eine Lüftungsanlage installiert. Die Steuerung wird von einer automatischen Regelung übernommen, die das Raumklima zum Schutz der Wandmalereien in der Chorapsis in Abhängigkeit von der relativen Raumluftfeuchte beeinflussen soll.

Dies wird durch einen erzwungenen Luftwechsel erreicht. Hierzu wird – beim Vorliegen geeigneter klimatischer Verhältnisse – gefilterte Dachraumluft zugeführt. Nach Durchmischung mit der feuchteren Innenraumluft wird diese zwangsgeführt durch einen bereits vorhandenen Wand-schacht nach außen geleitet. Durch diese Luftführung wird die Durchströmung des gesamten Raumes gewährleistet.

## **Situation heute und künftige Maßnahmen**

Die Untersuchung des Raumklimas nach der Installation belegt eine Verbesserung gegenüber dem Zustand vor dem Anlageneinbau. Feuchtespitzen sind deutlich reduziert und das Feuchteniveau ist insgesamt abgesenkt (Werte < 70 %). Trotzdem wird der von der interdisziplinären Arbeitsgruppe angestrebte Wert von maximal 65 % relativer Feuchte weiterhin oft überschritten.

Die Gründe hierfür liegen einerseits im nicht ständig vorhandenen Angebot absolut trockenerer Luft im Dachraum und andererseits in der Deaktivierung der Lüftung bei Dachraumtemperaturen unterhalb von 5 °C, um ein zu starkes Auskühlen der Kirche zu vermeiden.

Aus diesem Grund sollte in Erwägung gezogen werden, den Feuchtehaushalt zusätzlich durch eine Temperierung gezielt zu beeinflussen. Eine Erhöhung der Lufttemperatur bewirkt ein Absinken der relativen Luftfeuchtigkeit. Die vorhandene Steuerungsanlage ist bereits darauf eingerichtet, zusätzlich zu der Be- und Entlüftung eine Temperiereinrichtung zu integrieren.

## 4 Heiligen-Geist-Hospital Lübeck



Abb. 4-1: Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck.

### 4.1 Rückschau und heutiger Zustand

Die im Zeitraum 1990 bis 1994 durchgeführten Untersuchungen im Rahmen des BMFT-Forschungsprogramms „Wandmalereischäden“ erfolgten unter der Leitung des Restaurators Jochen Seebach (Emkendorf). Die Untersuchungen starteten im September 1990 mit dem Wandbildfeld „Salomonischer Thron“ im westlichen Blendbogenfeld der Nordwand der Westhalle des Heiligen-Geist-Hospitals. Der Gesamtbericht<sup>[47]</sup> und damit auch die Untersuchungsergebnisse zu dem zweiten östlichen Blendbogenfeld mit dem monumentalen Wandbild „Majestas Domini“ war im März 1995 abgeschlossen und übergeben worden.

Die Untersuchungen zu diesen beiden Inkunabeln Norddeutscher Wandmalerei des 13. Jahrhunderts waren im Rahmen des Projektes breit aufgestellt. Themen hierbei waren die Objektidentifikation und -Beschreibung, Einordnung der Umweltsituation (Wettermerkmale, Baugrund/Grundwasser, Schall und Erschütterungen, Luftverunreinigungen), bau- und kunsthistorische Erörterungen und Darstellung des Forschungsstandes, Erhebung der restauratorischen Vorgeschichte, allgemeine restauratorische-konservatorische Objektdokumentation, Beurteilung des Schadenszustandes und Vorschläge zu therapeutischen Maßnahmen.

Die Objektdokumentation umfasste dabei mehrere Untersuchungsschwerpunkte, die im Folgenden genannt werden:

### **Fotografie als Groß-Dia, S/W, KB-Dia) und Kartierung**

1. der hist. Putzergänzungen
2. der Konturen
3. der Konturenverluste
4. der Putz-Hohlräume
5. der Malschichtverluste und Absandungen
6. biologische Kontamination im Feld 1156
7. der Probeentnahmen (z. B. Salze, Farbsplitter)
8. der Oberflächenleitfähigkeit
9. der Injektionslöcher früherer Restaurierungen
10. der Gipsausblühungen
11. der Gerüstellöcher
12. der Meßsonden

### **Allgemeine Beurteilung des Zustandes**

1. vorgefundener Zustand der Wandmalerei
2. Aufbau der Wandmalerei
3. Schäden, Ursachen und Schadensverlauf

### **Weiterführende Untersuchungen**

1. Untersuchungen zur Oberflächenleitfähigkeit
2. Klimamessungen
3. Mikrobiologie
4. Salzuntersuchungen
5. Bindemitteluntersuchungen
6. Sonnenschein-Monitoring
7. Dokumentation

### **Konzept und Therapievorschläge**

1. Entwicklung und Abstimmung mit Eigentümern, Fachleuten, Denkmalbehörde
2. Ausblick auf Maßnahmen/ Sofortmaßnahmen zur Sicherung des Bestandes
3. Beseitigung der Schadensursache
4. langfristig wirkende Maßnahmen



Abstand Gitterkreuze: 50cm

Abb. 4-2: Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck, Wandbild „Salomonischer Thron“ (Nordwand, NW-Seite), 01/2023.





Abb. 4-3: Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck, Wandbild „Majestas Domini“ (Nordwand, NO-Seite), 01/2023.

**4.1.1 Empfehlungen aus dem Forschungsprojekt**

Im Ergebnis des Forschungsprojektes wurde vom Projektleiter Jochen Seebach eine Reihe erforderlicher Maßnahmen vorgeschlagen, die der eigentlichen Konservierung und Restaurierung an den Wandmalerei-Oberflächen und dem Mauerwerksträger dringend vorangestellt werden sollten:

**Außenbereich/ Fassade:**

1. Außenfassade (Westwand, Straßenseite Koberg) – vordringlich ist, dass das Funknetz sorgfältig mit einem dafür geeigneten Mörtel repariert wird. Dazu gehört auch - falls erforderlich – ein Austausch stark geschädigter (gegebenenfalls salzbelasteter) Mauerziegel.
2. Kontrolle der Siele vor der Fassade; gegebenenfalls Reparatur, damit Regenwasser ablaufen kann und nicht übermäßig lange auf dem Gehsteig stehen bleibt und damit Feuchtigkeit in die Sockel des Fassadenmauerwerks einträgt.

## Innenbereich:

1. Austausch stark veralteter Ziegelsteine unterhalb der Wandmalerei gegen unbelastetes Material (im Bereich unter den Wandmalerei-Feldern ist eine sehr starke Salzbelastung vorhanden; hier liegen auch jüngere Putzreparaturen vor);
2. partielle Freilegung (Nachreinigung) der noch mit Ölfarbe überarbeiteten Teilbereiche innerhalb der Wandmalereifelder;
3. Ergänzung abgeplatzter Konturen mit dem gleichen Material wie in den intakten Bereichen, um die Dampfdiffusion zu egalisieren;
4. Schließen der abgeschabten Bildhintergründe, um zu verhindern, daß durch die stark schwankende Luftfeuchtigkeit die im Mörtel und Mauerwerk befindlichen hygroskopischen Salze aktiviert werden;
5. Niederlegung der abstehenden Putz- und Farbschollen als Sofortmaßnahme zur Sicherung des Bestandes;
6. Entfernung der schadhafte, stark mit Salzen belasteten Einputzungen im unteren westlichen Bereich der Wandmalerei und an dem durchgehenden Riss;
7. Festigung der losen Putzbereiche und Konsolidierung der großen Hohlstellen durch Hinterspritzung mit Kalk-Kasein und einem Fungizid.

### 4.1.2 Umsetzung Konservierung und Restaurierung

Die **erste Kampagne** zur Umsetzung der im Ergebnis des BMFT-Forschungsprojektes empfohlenen Maßnahmen konnte am Wandbild „**Salomonischer Thron**“ im Zeitraum vom **August 1997 bis Mai 1998** realisiert werden. Die Finanzierung sicherte maßgeblich der „Deutsche Verband Frau und Kultur e.V.“, Gruppe Lübeck unter der damaligen Vorsitzenden Frau Hannelore Rohde.

Nahtlos und ohne Verzögerung erfolgte dann die Umsetzung des Gerüsts auf die Ostseite der Nordwand an das Wandbild „**Majestas Domini**“. Die Arbeiten hier begannen im September 1998 und fanden im Mai 1999 mit der Abnahme und Übergabe des Arbeitsberichtes ihren Abschluss.

#### Mauerwerk/ Rissversorgung

- Rissversorgung mit teilweiser Außenmauerung, vor allem am Wandbild „Salomonischer Thron“;
- Entfernung jüngerer Überputzungen (teilweise zementhaltig);
- Stabilisierung von Mauerwerksrisse (Rißfüllung an Ziegelsteinen)

#### Konservierung/ Restaurierung Putz + Malerei

- Festigung von korrodierten Putzoberflächen
- Oberflächenreinigung Wandmalerei

- Abnahme von jüngeren Übermalungen/besonders Entfernung von Ölfarbe-Resten (1930er Jahre)
- Oberflächen-Kittung der abgeplatzten Konturen
- Farbretuschen (reversibles Aquarell-System, Tratteggio-Manier)

Dokumentation/ Kartierung/Abschlussbericht

Nicht nur das Forschungsprojekt selbst, sondern auch die umgesetzten Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen sind durch den leitenden Restaurator Jochen Seebach und sein Team vorbildlich dokumentiert worden. Neben der Beschreibung der Maßnahmen wurden zahlreiche Detail-Fotos erstellt (teilweise in Farbdia-Qualität, tlw. Schwarz-Weiß-Aufnahmen). Weiterhin erstellte man detailreiche zeichnerische Kartierungen zu unterschiedlichen Themen des Zustandes und der Bearbeitung. Diese Kartierungen könnten heute mit digitalen Medien (digitale Kartierung auf Messbild-Basis) wiederholt werden. Damit ergäbe sich eine gute Möglichkeit der Vergleichbarkeit der Zustände zu unterschiedlichen Zeitpunkten.

#### **4.1.3 Visuelle Wahrnehmung 2022**

Während der aktuellen Kampagne zur Nachuntersuchung der beiden Wandbilder im Januar 2022 wurde ein Fassadengerüst vor beide Wandflächen gestellt. Damit war die Zugänglichkeit gewährt, die eine bessere Untersuchung und Beurteilung der Wandbildoberflächen möglich machte. Folgende Phänomene waren hier bei feststellbar:

##### 1. Verschmutzung

- starke Verschmutzung beider Wandbildoberflächen durch aufliegenden Staub, teilweise flusenartig zusammenhängend
- Spinnweben in 10 bis 20 cm langen zusammenhängenden Gewebestreifen

##### 2. Salze

- 1-3 mm im Durchmesser messende, punktuelle Malschichtausbrüche durch Salzwachstum einzelner in die Putzmatrix eingelagerter Mineralkörner führen zu Malschichtverlusten. Sie zeigen sich als weiße Ausbrüche und beeinträchtigen somit auch die

##### 3. Malschicht

- Malschichtschäden durch aktive Salzkristallisation (v. a. punktuell – siehe „Salze“) Malschichtlockerungen – hier Gefährdung v.a. der originalen Malschichten (Malschichtpakete) an den Aus- bzw. Abbruchkanten; sehr wahrscheinlich sind auch hier „drückende“ Salze zwischen Putz und Malschicht ursächlich;

#### **4.1.4 Bewertung**

Bei diesem Objekt stellte sich heraus, dass erheblicher Handlungsbedarf besteht. Die für dieses Objekt zuständige Stiftung Deutscher Verband Frau und Kultur e.V. – Gruppe Lübeck wurde unterrichtet und hat zugesagt, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen und zu finanzieren.

Die beiden Wandmalereien in der Westhalle des Heiligen-Geist-Hospitals sind bis Ende der 1990er Jahre abschließend und umfänglich restauriert/konserviert worden. Zwischenzeitlich gab

es nur eine einzige Maßnahme am Wandbild „Salomonischer Thron“ 2015, weil es hier zu einem massiven Wasserschaden gekommen war. Seitdem erfuhren die beiden Gemälde keinerlei fachliche Revision oder Kontrolle. Auch das Raumklima, welches regelmäßig aus Expertensicht als essenzieller Faktor der präventiven Konservierung gesehen wird, ist nur zeitweise – keinesfalls durchgehend regelmäßig – gemessen und fachlich beurteilt worden. Die an den Wandflächen feststellbaren Schmutzauflagerungen sind über einen zu langen Zeitraum entstanden und sind ein nicht zu unterschätzender Schadfaktor. Schmutzdepositionen stellen eine wichtige Nahrungsgrundlage für Mikroorganismen dar, die bei für sie günstigen Rahmenbedingungen – z. B. erhöhtem Feuchteangebot im Grenzflächenbereich Luft-Wand – aufwachsen und schädliche Stoffwechselprozesse in Gang setzen können

#### 4.1.5 Visuelle Untersuchung und fotografische Detailaufnahmen

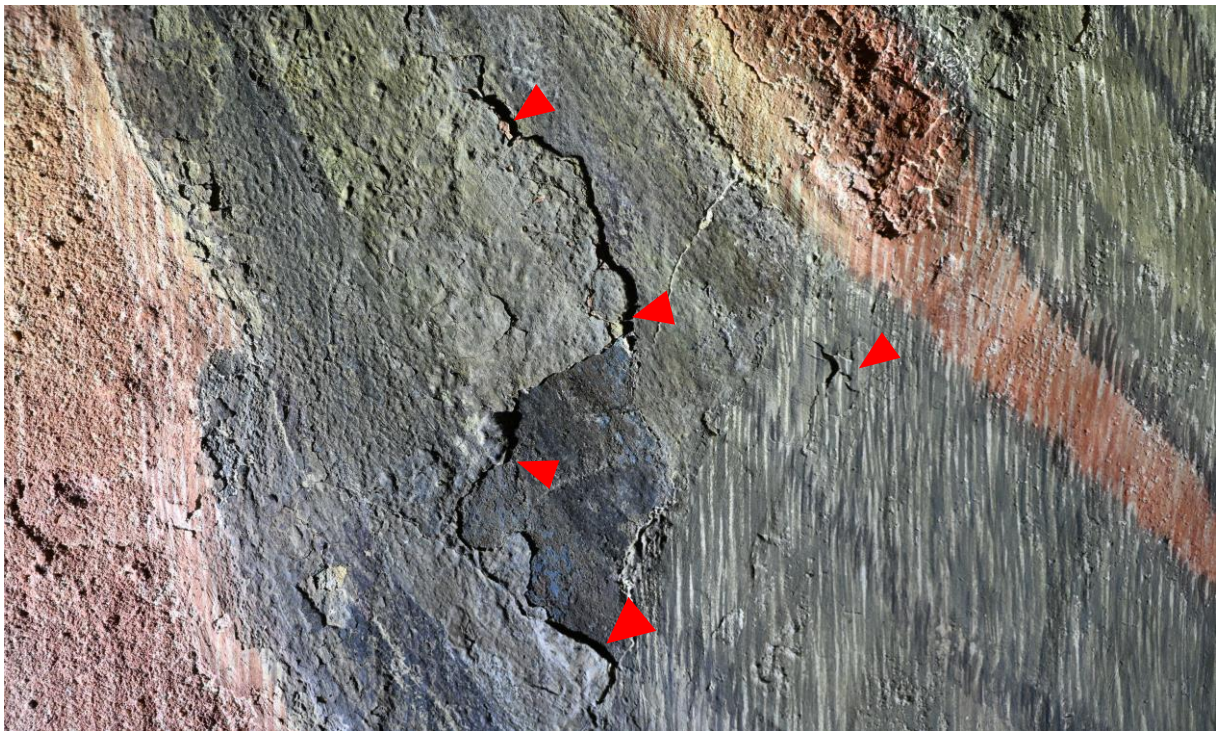


Abb. 4-4: zum Teil dramatische Malschicht-Abhebungen / -lockerungen.

Zur visuellen Begutachtung gehört auch die fotografische Aufnahme auffälliger Phänomene und Beobachtungen. An den beiden Wandmalereifeldern lassen sich zahlreiche Abhebungen an den Kanten originaler Malschichten und beginnende Lockerungen feststellen – der richtige Zeitpunkt zu intervenieren, ohne dass der Umfang zu groß wird.



Abb. 4-5: IR-Aufnahme NO-Ecke mit starkem OF-Temperaturabfall zur Gebäudeecke (NO, rechts) hin.

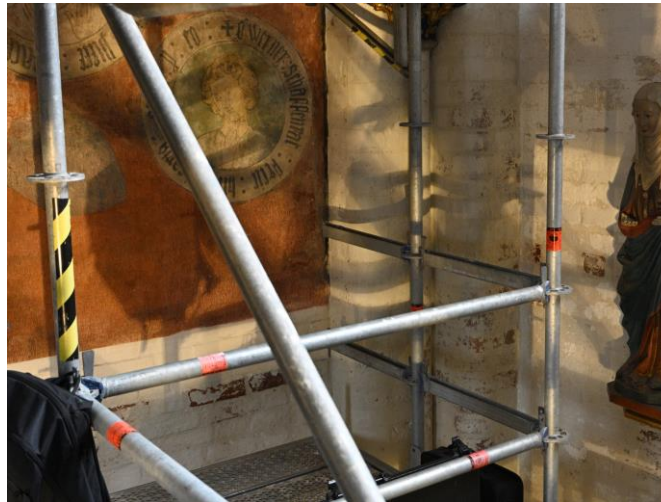


Abb. 4-6: Kunstlicht-Aufnahme NO-Gebäudeecke.

#### 4.1.6 Sofortmaßnahmen Januar 2022

Im Rahmen des Projekttermins vor Ort im HGH konnte die Brisanz der starken Oberflächenverschmutzung an beiden Wandbildern der Eigentümerin vermittelt werden. Es gelang, die dringend erforderliche Reinigungskampagne von der Eigentümerin beauftragen und durch eine Fachfirma kurzfristig umsetzen zu lassen. Weiterhin wurden vorhandene Klimamesswerte eines Datenloggers (westliche Bildkante „Salomonischer Thron“) ausgelesen. Wenngleich auch lückenhaft (11/2018 bis 12/2022), so geben diese immerhin einen auszugsweisen Eindruck von der raumklimatischen Situation. Werte von minimal 40 % maximal 85 % relativer Luftfeuchte – innerhalb weniger Tage wechselnd – sind ein hoher Stressfaktor für die salzbelasteten Malschichten der beiden Wandbilder.

Die im Ausgang des Forschungsprojektes empfohlenen baulichen Veränderungen zur Minimierung des Luftwechsels bei stetiger Öffnung und Schließung der beiden Zugangstüren wurden nicht umgesetzt.

#### 4.1.7 Empfehlungen

Im Ergebnis der im Rahmen des aktuellen DBU Projektes 2022 durchgeführten Revision an den beiden Wandbildern sind folgende Punkte kurz- bzw. mittelfristig dringend zur Umsetzung empfohlen:

- Feinreinigung der Wandmalerei-Oberfläche;
- Erstellung eines hochauflösten Messbildes zur Darstellung des aktuellen Schadensstandes und zum direkten Vergleich mit den historischen Zustandsbildern (1999);
- Festigung/ Stabilisierung loser Malschichtflächen (vor allem der originalen Farbschicht-Pakete);
- Putz-Festigung, vor allen in alten Rissbereichen (Rissflanken-Stabilisierung);

- partielle Salzreduzierung;
- Klima-Monitoring (Installation von zwei Datenloggern und regelmäßiges Auslesen der Klimawerte);
- jährliche Revisionen durch einen/-e Fachrestaurator/-in (Inaugenscheinnahme mit kurzer Zustandsbeschreibung und ggf. Handlungsempfehlung); dadurch wenig Reparaturstau und kurze Wartungsintervalle mit niedrigeren Kosten.

Hinweis:

Es wird empfohlen den/die Restaurator:in/Restaurator:innen federführend einzubinden, die seinerzeit an der Restaurierung/ Konservierung beteiligt waren.

## 4.2 Mikrobiologie

### 4.2.1 Durchgeführte Untersuchungen

Die Einrüstung zum Ortstermin 2022 eröffnete die Möglichkeit beide Bildfelder intensiv auch mit unterschiedlichen Beleuchtungstechniken und unter Einsatz einer Thermokamera zu inspizieren. Zerstörungsfrei erfolgten Untersuchungen zur Keimbelastung auf den Gemäldeoberflächen mittels mikroskopischer Untersuchung von Klebefilmproben sowie auf keimfähiges Material mittels Anzucht von Oberflächenkeimen.

#### **Im mikroskopischen Bild ergab sich Folgendes aus den Klebefilmproben:**

1. An diesem Klebefilm sehr viel kristallines Material. Sonst ist diese Probe unauffällig
2. An dieser Probe kristallines Material, kurze Faserfragmente und extrem selten vereinzelte Konidien vom Cladosporium-Typ. Ansonsten keine Schimmelpilzstrukturen auffällig.
3. Staubpartikel und Fasern, sehr vereinzelt Aeroplankton (Cladosporium-Typ). Darüber hinaus keine Schimmelpilzstrukturen zu beobachten.
4. Staubpartikel, Fasern, Haare, vereinzelt Aeroplankton. Probe sonst unauffällig.
5. Kristalline Partikel, Fasern, Staub, etwas Aeroplankton. Schimmelpilzstrukturen nicht auffällig.
6. Sehr wenige Partikel an dieser Probe. Einige Fasern und kristallines Material, vereinzelte Konidien vom Cladosporium-Typ. Keine Hinweise auf einen Schimmelpilzbefall erkennbar.

Generell wurde hierbei festgestellt, dass die Malereien deutliche Schmutzablagerungen aufweisen und eine Reinigung zwingend anzuraten war, eine Keimbelastung konnte jedoch ausschließlich durch Anflugkeime – sogenanntes Aeroplankton – nachgewiesen werden.

Darüber hinaus erwies es sich als auffällig, dass die seinerzeit restaurierten Bereiche sich in einem guten Zustand zeigten, während problematische Bereiche z. B. mit aufstehenden Rändern der Malerei in den originalen Bereichen zu beobachten waren, woraufhin angeraten wurde, diese zu überarbeiten, zumal die seinerzeit vorhandene Gerüststellung hier zu einer deutlichen Reduzierung der Kosten für einen solchen Eingriff führen würde.

Keimfähige Zellen des Aeroplanktons konnten mittels Abstempelns auf geeignete Nährmedien auch angezogen werden, eine Besiedlung ließ sich für die beprobten Oberflächen zum Zeitpunkt der Probennahme allerdings ausschließen. Jedoch wurde dringend angeraten die auffälligen Verschmutzungen soweit möglich in naher Zukunft zu reduzieren, um bei entsprechenden Umfeldbedingungen einen Besiedlungsaufbau zu vermeiden. In wenigen Bereichen mit Salzausblühungen wurde hier Material der Ausblühungen für die Analyse entnommen.

Ebenso wurde darauf hingewiesen, dass die Malereien offensichtlich stark dem Außenklima ausgesetzt sind. Obwohl die Aufsichtsperson für das Objekt an einem Platz direkt neben der Eingangstür saß, zeigte sich, dass diese Tür nicht schließt, sondern einen deutlichen Spalt aufwies (Abb. 4-8).



Abb. 4-7: Heiligen-Geist-Hospital Lübeck, Einrüstung 2022.



Abb. 4 8: Heiligen-Geist-Hospital Lübeck, Abgleich der Situation an originalen und überarbeiteten Bereichen.





Abb. 4-8: Heiligen-Geist-Hospital Lübeck, Arbeitsplatz der Aufsichtsperson bei „geschlossener“ Eingangstür.

Klimadaten 16.10.2015 – 07.01.2022 (Original im Anhang): Hier werden keinesfalls zuträgliche Temperaturunterschiede zwischen 2.6 und 28.5 °C und Unterschiede in der relativen Feuchte zwischen 31.6 und 92.6 % dokumentiert. Es erfolgten erste Diskussionen zu Möglichkeiten, hier wie auch an den beiden anderen nicht geöffneten Eingangstüren eine Art Schleusensystem zu installieren, um hier den Einfluss des Außenklimas zu minimieren.

#### 4.2.2 Ergebnisse der mikrobiologischen Untersuchungen

Die Untersuchung erfolgte zerstörungsfrei durch Stempelproben an verschiedenen Bereichen der Malerei auf 4 Medien. Die Ergebnisse sind in Tab. 4-1 zusammengefasst.

Tab. 4-1: Anzucht mittels Stempelproben auf verschiedenen Nährmedien KBE/Boden.

1.)	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
	Trichoderma sp. (überwachsen)	Penicillium griseofulvum 44 Cladosporium cladosporioides 1
	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Steriles Mycel 3 Penicillium griseofulvum 2 Cladosporium cladosporioides 1	Steriles Mycel 1 (-) Cladosporium herbarum 2 (+)
2.)	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
	Hefe/Bakterien 8 Basiomycet 1 Steriles Mycel 1	Penicillium griseofulvum 29
	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Keine Kolonien	Aspergillus fumigatus 1 (-) Penicillium sp. cf. expansum 3 (+)
3.)	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
	Botrytis cinera (überwachsen)	Penicillium griseofulvum 5

	Penicillium aurantiogriseum comp. 1 Penicillium sp. 3 Penicillium sp. cf. expansum 1 Cladosporium cladosporioides 1 Nigrospora sphaerica 1	Cladosporium herbarum 2
	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Cladosporium herbarum 1 Penicillium griseofulvum 5	Steriles Mycel 2 (-) Steriles Mycel 1 (+) Penicillium griseofulvum 2 (+) Engyodontium album 1 (+)
4.)	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
	Steriles Mycel 4 Penicillium griseofulvum 1 Alternaria sp. 1 Penicillium sp. 1	Keine Kolonien
	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Cladosporium cladosporioides 4 Hefe/Bakterien 2 Penicillium sp. 1	Hefe/Bakterien 3 (+) Hefe/Bakterien 2 (1) Cladosporium sp. 3 (+) Aspergillus versicolor (-) Steriles Mycel (-)
5.)	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
	Hefe/Bakterien 2 Cladosporium species 7 Steriles Mycel 1	Penicillium griseofulvum 2 Cladosporium cladosporioides 3
	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Penicillium brevicompactum 1 Penicillium griseofulvum 1 Steriles Mycel 1 Cladosporium cladosporioides 3	Hefe/Bakterien 8 (-) Hefe/Bakterien 5 (+) Cladosporium sp. 7 (+) Penicillium sp. 2 (+) Penicillium aurantiogriseum comp. 1 (+)
	<b>Malzextrakt-Agar</b>	<b>Dichloran-Glycerin-Agar</b>
Steriles Mycel 3 Cladosporium herbarum 2 Cladosporium cladosporioides 3	Cladosporium cladosporioides 1	
6.)	<b>Malz-40% Saccharose</b>	<b>Skim-Milk-Agar</b>
	Botrytis cinera 1 Steriles Mycel 3 Cladosporium sp. 2	Steriles Mycel 1 (-) Steriles Mycel 2 (+) Hefe/Bakterien 3 (+) Cladosporium sp. 2 (+)

Die Ergebnisse belegen eine deutliche Staubbelastung der Malereioberflächen, ein Wachstum der nachgewiesenen keimfähigen Sporen aus dem Aeroplankton in situ hat bisher nicht stattgefunden, würde aber bei weiterer Verschlechterung des Klimas sofort möglich sein. Eine vorsichtige Abreinigung wurde daher bereits vor Ort empfohlen, da auch die massive Entwicklung von Spinnwebfäden, die sich mit der geringsten Luftbewegung ebenfalls bewegten und teilweise hinter leicht aufstehenden Malereirändern verhakten, als gefährdend eingeschätzt werden mussten.

### 4.3 Salze

Die Wandmalereien Salomonischer Thron und Majestas Domini wurden im Zuge mehrerer Kampagnen wiederholt auch in Bezug auf ihre Salzbelastung untersucht. Bereits 1982 und 1983 wurden für das im linken Teil der Nordwand befindliche Gemälde Salomonischer Thron hohe Chlorid- und mittlere Nitrat-Gehalte sowie ungleichmäßig verteilte Sulfat-Gehalte ermittelt, die 1988 in Form ähnlicher Ergebnisse reproduziert werden konnten.<sup>[45]</sup> Oberflächenleitfähigkeitsmessungen zeigten, dass der linke und mittlere Bereich der Malerei die höchste Salzbelastung aufwies. Hohe Gipsgehalte (bis zu 15 Gew.%) und eine ebenfalls hohe Belastung mit hygroskopischen Salzen wurden im Rahmen des vom BMBF geförderten Projekts (zwischen 1990 und 1995) wiederholt festgestellt.<sup>[47]</sup> In einer erneuten Untersuchung von Bohrkernen 1996 wurde in den Proben zudem ein einheitliches Verhältnis von Nitrat und Chlorid festgestellt, so dass ein Salzeintrag über Regenwasser, ermöglicht durch ein temporär defektes Dach, vorgeschlagen wurde. Die teils hohe, jedoch ungleichmäßige Verteilung von Gips wurde mit einem in Teilen verwendeten Putzmörtel mit Gipszuschlägen in Verbindung gebracht.<sup>[48]</sup>

Die Malerei wies zur Zeit des BMBF-Projekts verschiedene durch Salzkristallisation hervorgerufene Schädigungen auf, so dass Absanden und Ablättern der Putzschicht zu Malereiverlusten führten. Ein hohes Gefährdungspotenzial für die Malerei wurde derzeit auf die Ausführungstechnik der Malerei mit unterschiedlichen Bindemitteln sowie auf Reste einer Ölübermalung zurückgeführt – beides bedingt durch Unterschiede im Diffusionsverhalten eine Anfälligkeit für Substanzverluste, insbesondere an den Übergängen unterschiedlich beschaffener Bereiche.<sup>[47],[49]</sup>

Auch das auf der rechten Wandseite befindliche Wandgemälde Majestas Domini war in gleicher Weise geschädigt, die Versalzung erwies sich als nahezu identisch zu der im Gemälde Salomonischer Thron.<sup>[50]</sup> Bei der Konservierung der Wandgemälde mit verschiedenen Maßnahmen wurde bewusst auf Salzreduzierungsmaßnahmen verzichtet, da Folgeschäden für die Malerei resultieren könnten. Vielmehr wurde auf ein geeignetes Klimakonzept hingewiesen, das eine Begünstigung schädigender Kristallisationszyklen unterbindet.<sup>[47]</sup>

Bevor auf eine genauere Betrachtung der in den neunziger Jahren erfasste Versalzung und mittels *ECOS-Runsalt* berechnete Kristallisationsverläufe und kritische relative Luftfeuchtigkeiten eingegangen werden soll, sei noch auf die 2014 erneut festgestellte Schädigung der Malereien hingewiesen. Auslöser war ein im Zuge von Verpressarbeiten am Mauerwerk ausgelöster Wassereintritt. Auch darauffolgende Untersuchungen zeigten Gips, Chloride und Nitrate. Zudem wurden Kaliumsulfat sowie die Bildung von Kondenswasser auf der Wandvorderseite beobachtet.<sup>[51]</sup> Letzteres wurde durch das Vorliegen hygroskopischer Salze begründet, was sich durch die untenstehende Betrachtung bestätigen lässt.

Auch wenn während der Untersuchungen in den neunziger Jahren die Problematik vorliegender hygroskopischer Salzmischungen bereits erfasst wurde, war eine Ermittlung der kritischen relativen Luftfeuchtigkeiten, bei denen Kristallisationsprozesse ausgelöst werden, nicht ohne Weiteres möglich. Zu diesem Zweck erfolgte im Rahmen des hiesigen Projekts eine erneute Betrachtung von Oberflächenproben mittels *ECOS-Runsalt*. Dabei wurden nur Oberflächen- sowie

oberflächennahe Proben berücksichtigt. Aufgrund einer relativ geringen Durchschnittstemperatur<sup>[47]</sup> erfolgte die Berechnung der Kristallisationsverläufe bei 15 °C.

Zunächst soll auf die Oberflächenproben aus dem linken Drittel der Malerei Salomonischer Thron eingegangen werden.<sup>[47]</sup> Es wurden jeweils zwei Proben aus dem unteren, mittleren und oberen Drittel untersucht. Bezüglich der Gipsbelastung wurden bereits oben die teilweise hohen und stark schwankenden Gehalte (bis zu 15 Gew.%) angesprochen. Aus der Untersuchung der Proben mittels *ECOS-Runsalt* ergibt sich, dass die kritische Kristallisationsfeuchte in allen Fällen zwischen 56 und 62 % RH liegt. Aufgrund der Ähnlichkeit einiger Proben werden in Abb. 4-9 nur einige exemplarisch gezeigt. In den meisten Fällen ist Natriumnitrat die zuerst bei dieser Luftfeuchtigkeit auskristallisierende Phase und im unteren Bereich der Luftfeuchtigkeit wird ein teilweises Auflösen der Phase zugunsten der Bildung von Natriumchlorid und eines anderen Nitrats berechnet (Abb. 4-9 oben links und rechts). Lediglich bei einer Probe aus dem unteren linken Drittel wird keine Natriumnitrat-Kristallisation vorhergesagt, der Überschuss an Nitrat-Ionen im Vergleich zu Chlorid ist in dieser Probe weniger stark ausgeprägt (1.6 mal soviel Nitrat wie Chlorid, in den anderen Proben 2.0 bis 3.3 mal soviel; Abb. 4-9 unten links). Nur eine der sechs Proben resultiert nach Abzug von Gips in einer Mischung des Typs I, so dass ebenfalls Magnesiumsulfat gebildet werden sollte (Abb. 4-9 unten rechts).

Von den 1995 entnommenen Bohrkernen<sup>[48]</sup> wurden die damals erfassten Ionengehalte der Putzoberfläche und des ersten darauffolgenden Fragments untersucht. Da die Kristallisationsabfolgen für die jeweils in den gleichen Feldern entnommenen Proben sehr ähnlich waren und die kritische Kristallisationsfeuchte auch bei diesen Proben bei etwa 58 % RH liegt, sollen an dieser Stelle keine Abbildungen der Ergebnisse von *ECOS-Runsalt* gezeigt werden.

Bei der Besichtigung der Wandmalereien im Januar 2022 wurden zudem drei Proben von Salzausblühungen aus dem unteren linken Drittel der Malerei Salomonischer Thron entnommen (eine Probe aus einem Bereich in der Malerei, zwei aus dem Wandbereich darunter). Eine der Ausblühungen war farblos, zwei wiesen vermutlich durch enthaltene Pigmentpartikel eine rötliche Verfärbung auf. Für die Proben wurden Kristallisationsabfolgen wie für Oberflächenproben aus demselben Feld berechnet (vgl. Abb. 4-9 oben und unten links). Die Gipsgehalte lagen zwischen 2 und 4 Gew.%.

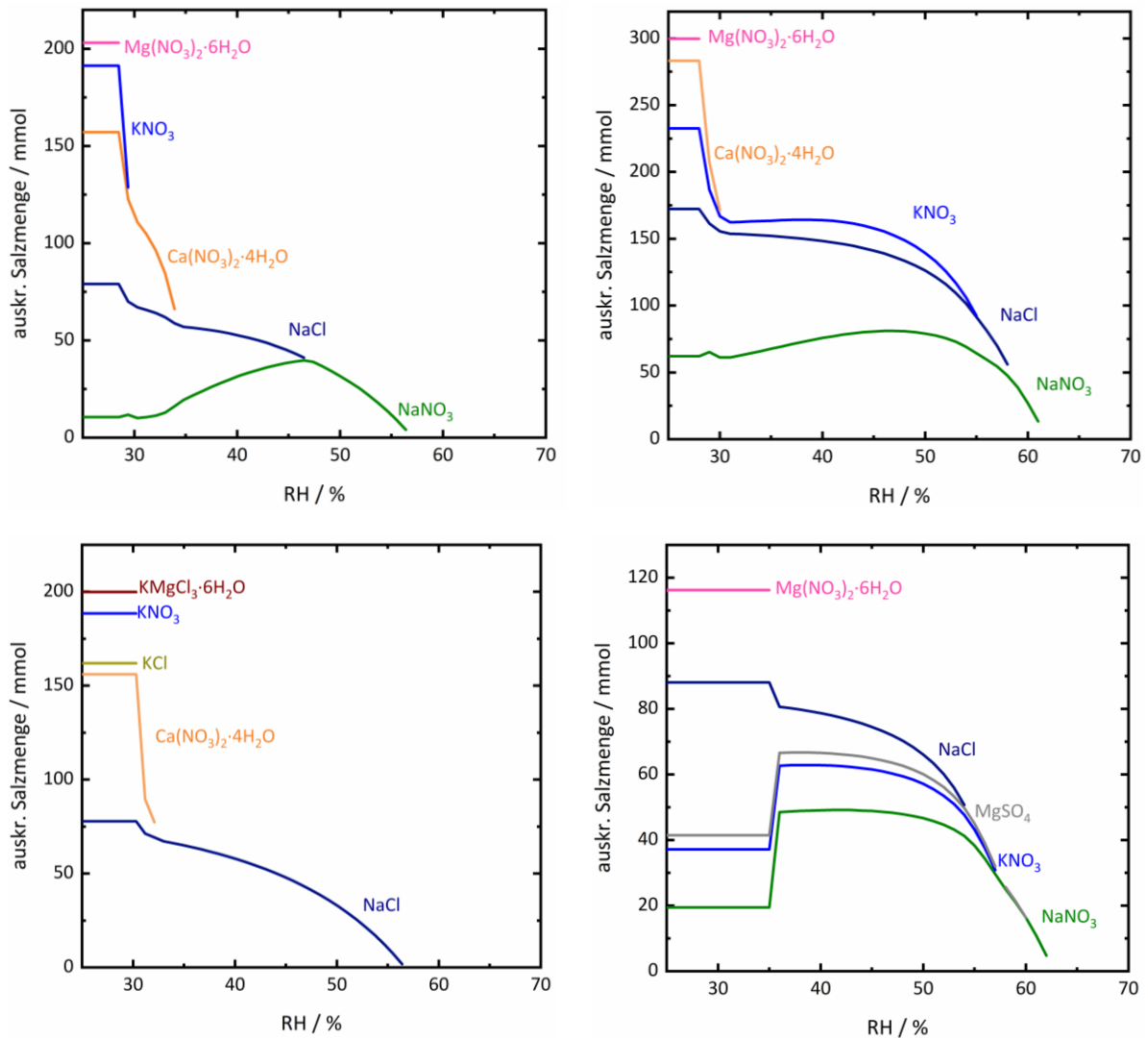


Abb. 4-9: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse für die Proben 2-1159 (oben links), 55-1153 (oben rechts), 24-1159 (unten links) und 154-1156 (unten rechts) bei 15 °C.<sup>[47]</sup>

Aus den Ergebnissen geht hervor, dass sich die Versalzungssituation in den vergangenen 25 Jahren nicht merklich verändert hat. Trotz lokaler Unterschiede in der Ionenzusammensetzung der Proben liegen die kritischen Kristallisationsfeuchten in einem sehr engen Bereich, so dass zwischen 54 und 62 % RH Kristallisationsprozesse eintreten können und Schwankungen um diesen Bereich der Luftfeuchtigkeit vermieden werden sollten. Anzumerken ist auch, dass oberhalb dieser kritischen Kristallisationsfeuchten die Salze in gelöster Form vorliegen und die Salzlösungen mit steigender Luftfeuchtigkeit und zunehmender Verdünnung der Lösung zur Durchfeuchtung des Mauerwerks beitragen können.

Diesbezüglich wurde die hygroskopische Feuchteaufnahme zweier Proben mithilfe eines Modells zur Berechnung thermodynamischer Eigenschaften von Elektrolytlösungen berechnet (Steiger unveröffentlicht). Teil der Auswertung waren die Proben, deren ECOS-Ergebnisse in Abb. 4-8 oben und unten links gezeigt sind (2-1159 und 24-1159 aus <sup>[47]</sup>).

Das Ergebnis ist in Form der Auftragung des Wassergehalts in Gewichtsprozent gegen die relative Luftfeuchtigkeit in Abb. 4-10 (links) dargestellt. Es zeigt sich, dass die aufgenommene Wassermenge mit ansteigender relativer Luftfeuchtigkeit schnell ansteigt, so dass bereits um 80 % RH eine Sättigung des Porenraumes mit Salzlösung möglich ist. Der Vergleich der Wasseraufnahme beider Proben weist nur geringe Unterschiede auf. Der höhere Wassergehalt bei der Probe 24-1159 lässt sich auf den höheren Anteil an Chlorid- im Vergleich zu Nitrat-Ionen bei nahezu identischer Kationenzusammensetzung erklären. Somit ist die Löslichkeit im Vergleich zur Probe 2-1159 geringer und eine größere Wassermenge wird nach Überschreitung der kritischen Kristallisationsfeuchte zum Auflösen der Salze benötigt, so dass ein höherer prozentualer Wasseranteil resultiert.

Ebenfalls die Proben HGH 1/1, 2/1 und 3/1 der Bohrkern-Entnahme 1995<sup>[48]</sup> wurden hinsichtlich der hygroskopischen Wasseraufnahme untersucht (Abb. 4-10 rechts, Ionengehalte in Tab. 4-2). Die gestrichelte Linie in Abb. 4-10 markiert die hygroskopische Wasseraufnahme bei 80 % RH. Die hygroskopische Wasseraufnahme der Probe HGH 1/1 ist geringer als die der beiden anderen Proben, welche sich wiederum aufgrund einer ähnlichen Ionenzusammensetzung kaum voneinander unterscheidet. Zurückzuführen ist dies auf eine etwas höhere kritische Kristallisationsfeuchte der Probe HGH 1/1. Diese Proben wurden 1995 auch gravimetrisch bezüglich der Sorptionsfeuchte untersucht. Dabei erfolgte eine Lagerung bei 40 und 80 % RH und die Ermittlung der über die Gasphase aufgenommenen Wassermenge in Gewichtsprozent der Probenmasse. Im Falle der damals durchgeführten Untersuchung entspricht die Probenmasse der Summe der Masse des Baumaterials (im Falle der drei besprochenen Proben Putz) und der des enthaltenen Salzes. Bei 80 % RH wurden für die sorbierte Wassermenge Werte von 4.26, 14.7 und 10.6 Gew.% in der Reihenfolge HGH 1/1, 2/1 und 3/1 erhalten. Verglichen mit der berechneten hygroskopischen Wasseraufnahme ergibt sich auf den ersten Blick die Diskrepanz, dass die Wasseraufnahme der Probe HGH 3/1 nahezu identisch zu der der Probe 2/1 ist, die gravimetrische Untersuchung aber eine um 4 % geringere Wasseraufnahme als für die Probe 2/1 ergab. Zu begründen ist dies jedoch mit der unterschiedlichen Salzbelastung der Proben, so dass trotz ähnlicher Salzzusammensetzungen abweichende Wasseraufnahmen erfasst wurden.

Zusätzlich zu dem ermittelten Bereich der kritischen Kristallisationsfeuchte für die in den Wandgemälden vorgefundenen Salzzusammensetzung zwischen 54 und 62 % RH kann anhand der hygroskopischen Feuchteaufnahme verdeutlicht werden, dass erhöhte Werte der relativen Luftfeuchtigkeit zu einer Durchfeuchtung des Mauerwerks beitragen können. Auch eine starke Mauerwerksdurchfeuchtung kann Schadensprozesse begünstigen, beispielsweise einen mikrobiologischen Befall.

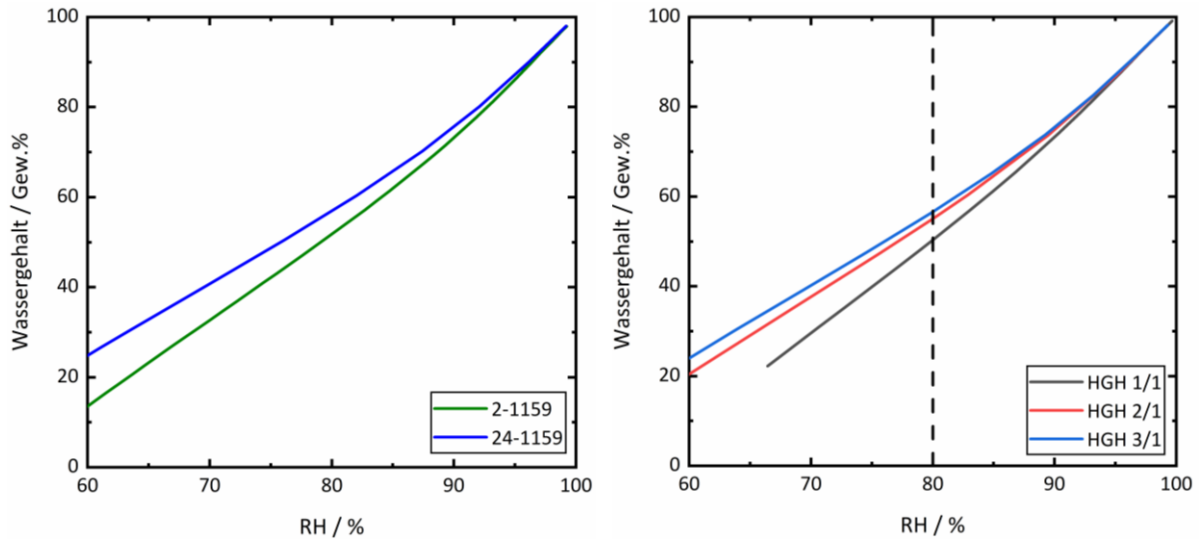


Abb. 4-10: Berechnete hygroskopische Feuchteaufnahme, dargestellt als Wasseraufnahme in Gewichtsprozent in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchtigkeit. Links für Proben aus dem Bericht <sup>[47]</sup>, rechts für Proben aus <sup>[48]</sup>.

Tab. 4-2: Ionengehalte der Proben HGH 1/1, 2/1 und 3/1 in mg/kg aus.<sup>[48]</sup>

Probe	Ionengehalte in mg/kg						
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>
HGH 1/1	4000	5020	1360	1140	930	160	3410
HGH 2/1	140300	16900	4140	2520	1770	560	70430
HGH 3/1	6920	10500	3300	1480	1390	330	37270

## 4.4 Klima

### 4.4.1 Klimatologische und bauphysikalische Untersuchungen hinsichtlich der thermisch/hygrischen Belastung der Wandmalerei – Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck

#### Ausgangssituation

Die dreischiffige Hallenkirche weist auf der Nordwand eine Wandmalerei auf, die den Kirchenraum von den Seniorenwohnungen trennt. Diese beginnt in einer Höhe von ca. 2.80 m über Oberkante Fußboden und weist die Ausmaße von 6.60 m Breite und 5.85 m Höhe auf. Bei der Ausmalung dieses Schildbogenfeldes handelt es sich um eine Temperamalerei. Die Schäden zeigen sich durch Konturenverlust, abblätternde Malschicht sowie absandende Mal- und Putzschichten.

Um beurteilen zu können, ob und in welchem Umfang klimatologische und feuchtetechnische Parameter für den beobachteten Schädigungsvorgang Bedeutung haben, sind während des Zeitraumes von Januar 1993 bis Dezember 1994 klimatologische und bauphysikalische Untersuchungen vorgenommen worden.

Die messtechnischen Untersuchungen in der Kirchenhalle des Heiligen-Geist-Hospitals haben gezeigt, dass das Raumklima starken Schwankungen unterworfen ist. Es treten Lufttemperaturen zwischen 27 und -3 °C sowie relative Luftfeuchten zwischen 40 und 80 % auf.

Die Oberflächentemperaturen der westseitigen Nordwand (Salomonischer Thron) weisen vor allem im Winter infolge des angrenzenden Altenwohnheims immer höhere Werte auf als die Lufttemperaturen (keine Tauwassergefahr).

Dagegen weist die Ostseite (Majestas Domini) der Nordwand – die im untersuchten Bereich eine Außenwand darstellt – Oberflächentemperaturen zwischen 24 und -3 °C auf. Somit dürften in diesem Bereich Gefrier- und Auftauprozesse stattfinden. Die niedrigen Oberflächentemperaturen (negative Temperaturen) verursachen außerdem wahrscheinlich eine Kapillarkondensation im Ziegel.

Da die Wandmalerei bzw. deren Träger große Mengen hygroskopischer Salze aufweist (Salzgemisch Natriumchlorid NaCl und Calciumnitrat  $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ ), tragen die Klimaschwankungen zur Schädigung der Wandmalerei bei. Salzkristallisation sowie Quell- und Schwindprozesse führen vor allem in geschädigten bzw. offenen Oberflächenbereichen zu Malereiverlust durch Absandung.

Der Wasserdampf diffundiert in der Nordwand überwiegend in Richtung Kirchenhalle. Die teilweise mit Ölfarbe überarbeitete Wandmalerei stellt einen erhöhten Dampfdiffusionswiderstand (Austrittswiderstand) dar, wodurch erhöhte und somit wechselnde Baustofffeuchten (Salzkristallisation) in diesem Bereich vorliegen. Die Schäden zeigen sich in Form von Craquelées, deren Ränder sich vom Träger lösen und sich infolge der Trocknung hochwölben.

Die Untersuchungen hinsichtlich der Mauerwerksfeuchte ergaben, dass sich alle Mauerwerksfeuchten im hygroskopischen Bereich befinden. Dabei weisen die Ziegel unterschiedliche Feuchtigkeitsgrade auf. Im unteren Bereich liegen Wassergehalte – infolge der hohen Salzbelastung –



von 8 bis 10 Masseprozent (Sättigungsgrad 51 – 63 %) vor. Im Bereich der Wandmalerei betragen allerdings die Feuchtigkeitsgehalte nur 1 Masseprozent.

Der jährliche Weihnachtsmarkt übt klimamäßig keine außergewöhnliche Belastung auf die Wandmalerei aus, da infolge der Klimatisierung Parameter vorliegen, die auch im Jahresgang auftreten. Allerdings sollte zu Beginn und am Schluss der Veranstaltung die Klimaveränderung bzw. -anpassung langsamer erfolgen. Festzuhalten bleibt, dass während des Weihnachtsmarktes der Wasserdampfdiffusionsstrom seine Richtung wechselt (d.h. von der Kirchenhalle in Richtung Seniorenheim).

### **Sanierungsvorschlag anhand der Voruntersuchungen**

Der Verlust der Wandmalerei kann laut der Untersuchungsergebnisse wesentlich reduziert werden, wenn das in der Kirchenhalle vorliegende Klima die Salze nicht mehr mobilisiert und der Dampfdiffusionsstrom zum Seniorenheim hin gerichtet ist.

Um die Salzkristallisationen zu verhindern, sollte die rel. Luftfeuchte konstant unter Berücksichtigung der Mikrobiologie unterhalb (z.B. 60 %) der Mobilitätsgrenze der Salze liegen.

Eine feuchtetechnische Aufbereitung der Luft auf z.B. konstant 60 % ist jedoch möglich, kann sich aber nicht auf das gesamte Luftvolumen der Kirchenhalle beziehen, da dieses Volumen zu groß ist und somit zu große Kosten verursacht.

Aus diesem Grund sollte ein konstantes Klima nur im Nahfeld der Wandmalerei gefahren werden, das eine Dampfdiffusion in Richtung Seniorenheim bewirkt und Kristallisationserscheinungen unterbindet.

Mittels Nebelversuchen konnte beobachtet werden, dass die Klimaparameter in der Kirchenhalle durch Undichtigkeiten und beim Öffnen der Eingangstüren stark vom Außenklima beeinflusst werden. Hier könnte Abhilfe durch eine Anordnung von Windfängen im Bereich der Türen geschaffen werden. Die Windfänge sollten aber so konzipiert werden, dass eine natürliche Be- und Entlüftung (kontrollier- und steuerbar) gewährleistet ist.

### **Situation heute**

Bei der Ortsbesichtigung am 10. Januar 2022 konnte keine Realisierung der genannten bzw. vorgeschlagenen Maßnahmen festgestellt werden. Die Raumklimaparameter (6 °C Lufttemperatur und 77.2 % relative Feuchte) ordneten sich auch an diesem Tag in die vorliegenden älteren Verläufe ein.

## 5 Idensen

### 5.1 Rückschau und heutiger Zustand

Im Folgenden werden die nach 1996 durchgeführten Wartungen, Maßnahmen, Untersuchungen und Empfehlungen an der Sigwardskirche in Idensen in Kürze chronologisch zusammengefasst.

**1995 – 1998:** Sicherungsarbeiten in drei Bauabschnitten:

1. Bauabschnitt 1995: Sanierung Süd- und Ostwand des Turmes, Sockelmauerwerk und Drainage Instand gesetzt. Regenabflussleitung: Die Betonrohre waren teilweise defekt und außerdem von Baumwurzeln zugewachsen. Der Sickerschacht für das Regenwasser war unbrauchbar geworden, so dass die Ableitung für das Regenwasser völlig erneuert werden musste.
2. Bauabschnitt 1996: Sanierung Turm Westwand, Sicherungsrestaurierung an den Wand- und Gewölbemalereien.
3. Bauabschnitt 1998: Sicherung der Dachkonstruktion und des Gewölbes.

**1995/1996:** Schmalstieg – Natursteinarbeiten Westseite, Turm Ostseite, Turm Westseite, Südseite etc.

**1996:** M. Lausmann – Alte Kirche in Idensen: Konservierungs- und Kartierungsarbeiten an den romanischen Wandmalereien. Arbeiten vom 5.8 – 2-10.1996.

**21.3.1997:** Helmut Berling – Messtechnische Untersuchungen zur Erarbeitung bauphysikalisch-klimatologischer Erhaltungsgrundlagen.

**30.06.1998:** Niedersächsisches Landesamt für Bodenforschung (NLfB) – Durchführung von Sondierbohrungen und Bodenuntersuchungen.

Die Sulfatgehalte in den Proben waren deutlich höher als bei den Untersuchungen von 1990. Das Grundwasser steht in den Bohrlöchern bei 1.34 bzw. 1.28 m unter dem Bohransatzpunkten.

**1998:** Helmut Berling – Raumklimatische und feuchtetechnische Untersuchungen mit Gutachten (26.2.1998). Diese Untersuchungen dienten als Basis für die spätere Raumklimatisierung und die Dämmmaßnahmen im Gewölbe.

Es treten Lufttemperaturen zwischen 23 und  $-6$  °C und rel. Luftfeuchten zwischen 45 und 93 % auf. Somit werden die Deliqueszenzfeuchten der Salze häufig unter- und überschritten, die bei Kristallisation zur Schädigung der Wandmalereien führen. Die hohen Luftfeuchten begünstigen auch die Aktivitäten der Mikroorganismen. Eine Feuchtezufuhr aus dem Fußboden erfolgt vor allem während der Sommermonate. Es wird empfohlen, dies durch eine Unterbrechung des kapillaren Wassertransports zu minimieren. Taupunktunterschreitungen erfolgen nicht auf den raumseitigen Oberflächen, jedoch kurzzeitig und wenig auf den dachbodenseitigen Gewölbeoberflächen. Die Deckengewölbe können als trocken bezeichnet werden.

**2002:** Naturstein Krause – Erd- und Sockelarbeiten.

**2002:** Elektro-Seegers – Einbau einer rechnergestützten Temperierungs- und Be- und Entlüftungsanlage zur Stabilisierung der relativen Luftfeuchte. Begleitet wurden die Elektroarbeiten von Helmut Berling.

**14.11.2003:** Helmut Berling – Das Raumklima nach Inbetriebnahme der Temperier- und Be- und Entlüftungsanlage. Die Aufzeichnung der Messdaten erfolgt seit dem 08.04.2003.

Vorwiegend wird die relative Luftfeuchte mittels der automatischen Be- und Entlüftung auf 70 % RH nahezu konstant gehalten, sofern die dazu notwendigen Bedingungen vorliegen. Sind diese Bedingungen zum vorrangigen Betrieb der Lüftungsanlage nicht gegeben, liegt die Lufttemperatur gleichzeitig unter 20 °C und steigt dann die relative Luftfeuchte über 73 % RH, so erfolgt die Senkung der Feuchtwerte mittels Temperierung des Kirchenraums bis maximal 20 °C.

**2003:** Holzbau Märtens – Wärmedämmung im Dachraum und Verfügen des Außenmauerwerks. Dach im Dach als Schaffung einer Zwischenkonstruktion. Wärmedämmung über dem Gewölbe als Faserdämmstoff.

**2004:** J.M. Granek, C. Leupold – Monitoring der romanischen Wandmalerei nach Einbau einer Anlage zur Regulierung des Innenklimas, Facharbeit zum Diplom, HAWK Hildesheim, Fachbereich Konservierung und Restaurierung, mit dem Fazit: „Die Ergebnisse des Monitorings zeigen deutlich, dass die Klimatisierung zwar zu einer Verbesserung der Gesamtsituation in Idensen geführt hat, diese jedoch nicht als ausreichend bezeichnet werden kann.“ Dies gilt insbesondere für die Sockelbereiche.

**2005:** Rolf Niemeyer – Salzflaum-Probe vom 24.1.2005 aus dem Bereich „Christus in der Mandorla“. Sie besteht aus  $\text{KNO}_3$ .

**2005:** Rolf Niemeyer – Analyse von Kompressen zur Messung der Salzbelastung (12.06.2005).

**2005 – 2011:** Monitoring-Kampagnen des Niedersächsischen Landesamt für Denkmalpflege (NLD) – insgesamt 12, Fortsetzung ab 2015 geplant. Ziel ist u.a. auch die Begutachtung des derzeitigen Zustandes anhand exemplarisch ausgewählter Musterflächen.

Einbau einer kapillar brechenden Schicht unter dem Sandsteinfußboden (2006/2007): Auskoffnung des Erdreichs bis ca. 40 cm Tiefe, Einbau einer kapillar brechenden Kiesschicht, Wiederverlegung der Sandsteinplatten im Sandbett entsprechend Bestand.

**26.10.2009:** Klaus Harenberg – baubegleitende Dokumentation.

Im Rahmen der Einbringung einer kapillar brechenden Schicht unterhalb des Fußbodens wurde der Fußboden in mehreren Abschnitten auf 40 cm Tiefe angehoben. Diese Arbeiten wurden im Juli 2006 im Querhaus begonnen.

**16.06.2009:** Helmut Berling – Jede zweite Heizbank wurde vom Netz genommen, um die Heizleistung zu reduzieren, was auch die Heizkosten verringert.

**2009:** Helmut Berling – Vergleich des Raumklimas an drei verschiedenen Orten in der Kirche.

Die Raumlufttemperaturen und Luftfeuchten sind auch im Chor ohne Temperierung vergleichbar. Es sollen jedoch Messungen der Oberflächentemperaturen erfolgen, da Feuchteschäden dort zu

beobachten sind (20.04.2009). Ob die Messung von Oberflächentemperaturen erfolgt ist, geht aus den Akten nicht hervor.

**5.8.2010:** Christiane Maier – Konservierung der Friesflächen.

**2015:** Jürgen Pursche – Archivrecherche und restauratorische Vergleichsuntersuchungen mit Sichtung und Bewertung von NLD Archivalien, Zustandserfassung von Referenzflächen an den Wandmalereien, Dokumentation der Untersuchungen und Ergebnisbericht. Vorschläge zur Verbesserung des Monitorings, u.a. auch eine Hinterfragung der derzeit praktizierten Klimakontrolle und ggf. Möglichkeiten der Nachjustierung.

**2015:** Erwin Stadlbauer – Das NLD überlässt der Kirchengemeinde Idensen ein Rollgerüst. Diese verpflichtet sich zum Aufbau dessen für ein regelmäßige Monitoring in Idensen, in der Regel im 3. Quartal des Jahres.

**2016:** Rolf Niemeyer – Salz- und Putzanalysen, Laborbericht 20151103 (11.3.2016). Es wurden drei Putzproben, drei Salzausblühungen und 32 Bohrmehlproben aus 12 Bohrungen untersucht.

**2016:** Christiane Maier – Anlegen von Reinigungsproben sowie Vorlage eines Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes.

**2016:** Tobias Trapp – Fotodokumentation von Referenzflächen.

**2017/2018:** Tobias Trapp – Fotodokumentation der Alten Kirche in Idensen.

**16.08.2017:** Rolf Niemeyer – Vorlage einer Putzempfehlung für den Kirchenraum.

**2017:** Rolf Niemeyer – Putzanalysen, Laborbericht 20160901 (23.5.2017). Es wurden vier Putzproben auf Putzzusammensetzung, Kornverteilung, Feuchte- und Salzgehalt untersucht.

**2018:** Elodie Rossel – Kartierung und Konservierung der Wand- und Gewölbmalereien mit Bericht vom 16.07.2018.

Basierend auf einem Bericht von C. Maier wurden die Konservierungsmaßnahmen und Kartierungen der Wandmalereien ausgeführt. Die Hauptaufgabe des Auftrages bestand jedoch darin, die Grundlage für ein langfristiges Monitoring der Malereien zu schaffen, um eine mögliche Schadensdynamik beobachten und die Schwachstellen erkennen zu können.

**04.04.2018: Materialuntersuchungen im Bestand und Zentrum für Materialkunde von Kulturgut (MIK & ZMK)** – Setzen eines Rissmonitors am 22.03.2018 an der Ostwand der Bischofskapelle gesetzt.

**7.8.2018: MIB & ZMK** –Sanierung des Innenputzes in der Sockelzone des Kirchenschiffs sowie Sanierung des Innenputzes in der Turmhalle und in der Bischofskapelle: Material- und Schadensuntersuchungen, Empfehlungen zur Instandsetzung.

**Ende 2018:** Innen wurde eine Glastür mit einem Lüftungsschlitz anstelle der alten Gitterholztür eingebaut.

## 5.2 Mikrobiologie

Anlässlich des am 8.5.2019 erfolgten ersten Ortstermins mit Gerüststellung in Idensen konnten folgende Feststellungen getroffen werden, die im Zusammenhang mit den seinerzeit durch Herrn Dr. Berling geplanten Maßnahmen zur Stabilisierung des Klimas sowie weiteren Maßnahmen zur Trockenlegung im Fundamentbereich und zur Dämmung des Kirchengewölbes vom Dach her zu sehen sind:

- der seinerzeit erhebliche Algenbewuchs im Sockelbereich ist nicht mehr festzustellen;
- der seinerzeit in einigen Bereichen deutliche Befall durch rot pigmentierte alkaliphile Bakterien ist nicht mehr sichtbar;

(Analysen der in diesen Bereichen auskristallisierenden Salze sind nicht erfolgt, da keine Kristallisation zu sehen war.)

- der frühere modrige Geruch in der Kirche ist nicht mehr wahrzunehmen;
- die seinerzeit auch makroskopisch sichtbaren Schäden an der Oberflächenfixierung (Abb. 5-1), die auf Untersiedlung durch Mikroorganismen zurückgeführt werden konnten, lassen sich nach den erfolgten Konsolidierungsmaßnahmen nicht mehr wahrnehmen.

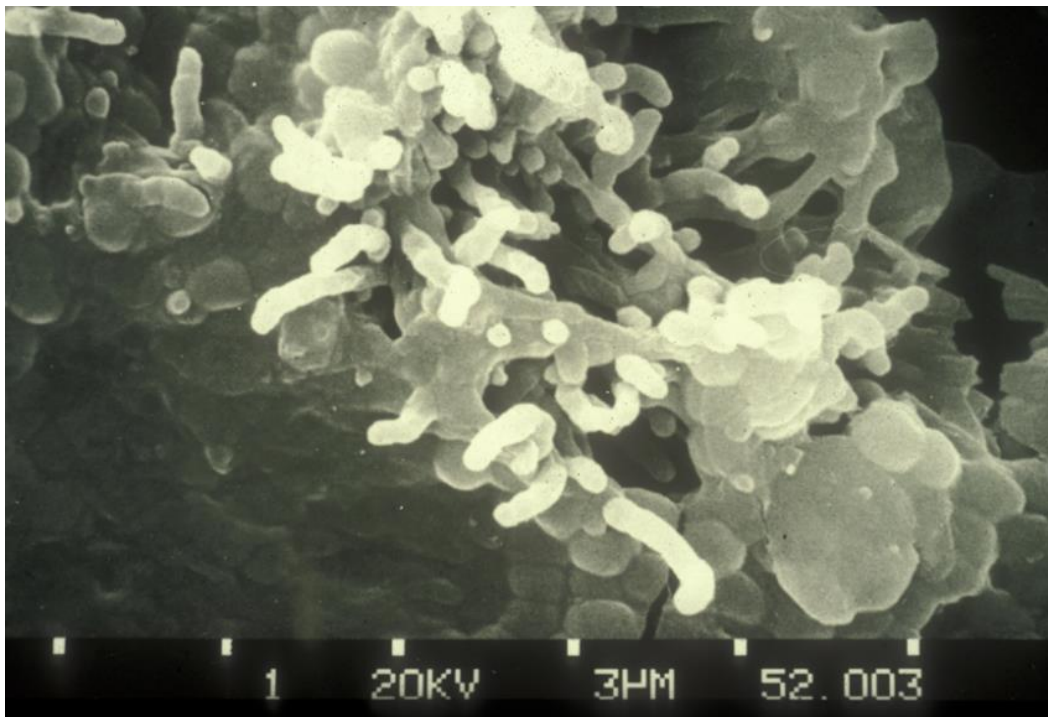


Abb. 5-1: Altzustand, durchbrochene, untersiedelte Oberflächenfixierung im Rasterelektronenmikroskop.

- Hinweise auf Kristallisations- und Lösungsprozesse von Salzen (s. v.) wurden nicht mehr festgestellt (dies entspricht auch langfristigen Beobachtungen durch Dr. Klein, NLfD);
- geringfügige Reaktionen von Salzen nur im Bereich der Apsiskalotte, da diese aus technischen Gründen nicht gedämmt werden konnte;
- Dämmung des Dachbodens so ausgeführt, dass Zustandskontrollen jederzeit ohne größeren Aufwand erfolgen können, da die Dämmung dem Gewölbe nicht direkt aufliegt!
- Letzte Maßnahme: Nachrüsten der erneuerten Eingangstür mit automatischem Schließmechanismus und durch eine neue Glastür ergänzt (erforderlich, da Objekt als „offene Kirche“ gelistet ist).

Der Kirchengemeinde wurde auch eine Unterstützung für die geplante Ergänzung unterer, salzbelasteter, nicht originaler Putzbereiche, der Lichtinstallation (Kontakt zu einem entsprechenden im Bereich Denkmalpflege tätigen Planer wurde vermittelt) sowie bei Anpassungen des derzeit nicht zuverlässig laufenden Klimamonitorings zugesagt.

- Sollten sich im Zusammenhang mit den Putzerneuerungen Phasen mit erhöhter Feuchtigkeit einstellen, wird eine UV-C Desinfektion zur Vermeidung der Schimmelbildung angeregt.

Der Zustand der Malereien konnte durch Gerüststellung in der Vierung makroskopisch unter Einbeziehung verschiedener Beleuchtungssysteme erfolgen und wurde als stabil und ohne Befund festgehalten.

Auf eine Beprobung wurde daher im Einverständnis mit allen Beteiligten verzichtet.

Ergänzend kann festgestellt werden, dass als eine weitere Grundlage für die Bewertung der Ausgangssituation in Idensen inzwischen mehrere Aktenordner der durch das Restauratorenteam (Drescher, Emmenegger, Fünders, Möller, Pursche) erstellten Dokumentation aufgefunden werden konnten. Auch diese Informationen stehen für die Aufarbeitung durch Herrn Dr. Schwarz jetzt zur Verfügung.

## **Ergebnisprotokoll zum Treffen in der Sigwardskirche, Idensen, am 08.05.2019**

*Teilnehmende:*

*Herr Herrmann, Freundeskreis Sigwardskirche e.V. Idensen (<https://sigwardskirche.de/>) auch in Vertretung für Herrn Mecke vom Kirchenvorstand*

*Herr Krause, Amt für Bau- und Kunstpflege der Ev.-luth. Landeskirche Hannovers*

*Dr. Herbert Berling, Bauphysik, Braunschweig*

*Dr. Herbert Juling, Bremen auch in Vertretung für Dr. Frank Schlütter, MPA, Bremen*

*Dr. Kerstin Klein, NLD, Hannover*

*Dr. Hans-Jürgen Schwarz, Ri-Con, Hannover*

*Hon.-Prof. Dr. Erwin Stadlbauer, NLD, Hannover*

*Prof. Dr. Michael Steiger, Institut für anorganische Chemie, Universität Hamburg*

*Protokoll: Karin Petersen, HAWK, Hildesheim*

*Der Ortstermin wurde bereits im November 2018 angedacht und erneut im Februar 2019 festgelegt (siehe entsprechende Protokolle Bremen/Hamburg), vorbehaltlich der Möglichkeiten vor Ort.*

*Für den Ortstermin zum Monitoring des derzeitigen Zustands der Wand- und Deckengemälde stand ein Rollgerüst in der Vierung zur Verfügung. Dank an Herrn Herrmann und drei Helfer aus Freundeskreis und Kirchenvorstand!*

*Die Anwesenden konnten sich zunächst einen Überblick über die Situation vom Boden aus machen. Es wurde eine deutliche Verbesserung gegenüber dem Zustand während der Phase der BMFT-Projekte festgestellt:*

*Eingangstür durch (vor Kurzem) automatischen Schließmechanismus aufgerüstet / neue Glastür zum Kirchenraum ergänzt (offene Kirche zwischen 10:00 und 18:00 Uhr täglich) / modriger Geruch nicht mehr wahrnehmbar /*

*ehemaliger Algenbewuchs in unteren Bereichen nicht mehr nachweisbar /*

*ehemaliger Bewuchs durch rot pigmentierte Bakterien in keinem Bereich mehr nachweisbar /*

*indem Zusammenhang konnte nicht endgültig geklärt werden, ob eine Belastung mit alkalischen Salzen seinerzeit untersucht wurde (i. R. bisher Zusammenhang zu den alkaliphilen Bakterien gegeben) /*

*kein offensichtlicher Hinweis auf Kristallisations- und Lösungsprozesse von Salzen /*

*Hinweis von Dr. Klein auf geringfügige Reaktionen von Salzen im Bereich der aus technischen Gründen nicht gedämmten Apsiskalotte /*

*Beobachtungen zur Deckenmalerei in der Vierung (vom Gerüst aus) ergeben keinerlei Hinweis auf aktuelle Schadensprozesse /*

*Dr. Klein erläutert das über mehrere Jahre hinweg dauernde Monitoring auch in Korrelation zu den Klimamessungen und der damit vorgenommenen Änderungen der Temperierung. Darüber hinaus erläutert Sie die letzte große Maßnahme zur Schaffung der Ausgangssituation für das auch weiterhin durchzuführende Monitoring und die konservierenden Eingriffe.*

*Wegen des sehr guten Zustands der Malereien wurde auf eine Probennahme für vertiefende Untersuchungen einvernehmlich verzichtet.*

*Im Zuge der seitens des Ev.-Luth. Landeskirchenamts und der Verantwortlichen vor Ort geplanten Erneuerung der mit Schadsalzen belasteten teils stark abgängigen unteren nicht historischen Putzbereiche sollten die Maßnahmen allerdings insbesondere wegen des hohen Feuchteintrags streng kontrolliert werden. Bei erneut einsetzendem Bewuchs könnte hier während der Abbinde- und Austrocknungsphase gezielt mit UV-C ein Befall weitgehend verhindert werden.*

*Frau Petersen bittet diesbezüglich um frühzeitige Einbindung und entsprechende Information.*

*Weiterhin wurden vereinbart:*

*Zusammenstellung der erfolgten Maßnahmen auf Basis der Empfehlungen zur Regulierung der Bauwerksfeuchte durch Herrn Dr. Berling /*

*Beratung der Verantwortlichen vor Ort zur Aufrüstung der Messtechnik für die Überwachung und Regulierung des Klimas (derzeitige Anlage wurde vor ca.18 Jahren installiert) /*

*Nicht nur auf Wunsch der Landeskirche soll eine Zusammenstellung der nach Abschluss des BMFT Projektes erfolgten Baumaßnahmen und möglicher anderer Eingriffe als Basis für alle zu späteren Zeitpunkten möglicherweise erforderlichen Maßnahmen/Eingriffe erfolgen.*

*Angebot hierzu wird durch Herrn Dr. Schwarz erstellt, da er auch zu einem früheren Zeitpunkt im Auftrag des NLD bereits die im Rahmen der Projekte zusammengetragenen Ergebnisse aufbereitet hat.*

*Frau Petersen versucht, an der HAWK den Verbleib der Kartierungsunterlagen der Restauratoren aus der BMFT/BMBF-Projektphase (vermutlich an Frau Prof. Dr. Riedel übergeben) zu klären.*

*Die Publikation der wichtigsten Ergebnisse aller Untersuchungen und Maßnahmen, die in den letzten 30 Jahren durchgeführt wurden, wird einvernehmlich als sinnvoll erachtet. Die Projektgruppe befürwortet den Vorschlag von Frau Dr. Klein und Herrn Dr. Stadlbauer, in der Reihe der Arbeitshefte zur Denkmalpflege in Niedersachsen zu veröffentlichen. Herr Stadlbauer und Frau Klein werden dies im NLD abstimmen und einen Gliederungsvorschlag erstellen.*

***Zusammenfassend wurde eine extreme Verbesserung der Situation festgestellt, die getroffenen Maßnahmen können als Beispiel für eine sehr erfolgreiche Vorgehensweise angesehen werden. Besonders hervorzuheben ist hierbei auch das schrittweise Umsetzen der Maßnahmen unter Beobachtung der in situ daraus resultierenden Veränderungen.***



### 5.3 Salze

Die 1889 teilweise und in den 1930er Jahren vollständig freigelegten romanischen Wandmalereien in der Alten Kirche in Idensen wurden im Rahmen zweier BMFT-Projekte zwischen 1987 und 1996 hinsichtlich der vorliegenden Schadenssituation untersucht. Ausblühungen und durch Salze verursachte Schädigungen wurden sowohl an der Fassade als auch im Innenraum der Kirche festgestellt.<sup>[52],[53]</sup>

Bevor auf die vorliegenden Salze und deren Verteilung sowie Gehalt eingegangen wird, sollen die damaligen Erkenntnisse hinsichtlich der Salzeintragsquellen kurz zusammengefasst werden. Diesbezüglich stellte aufsteigende Feuchte eine Problematik am Objekt dar, zudem müssen aber auch das nicht ausreichende Abführen von Regenwasser bis in die 90er Jahre sowie ein Wassereintrag über ein zeitweise undichtes Dach als Eintragsquellen berücksichtigt werden. Im Rahmen der Untersuchungen bis 1996 wurde mittels vielfältiger Analysen (Bodenproben, Regenwasser, Isotopenanalyse des Schwefels) versucht, den Ursprung der Salze, insbesondere des Gipses, nachzuvollziehen. Eine eindeutige Klärung der Haupteintragsquelle war jedoch nicht möglich, so dass sowohl ein Gipsintrag aus der Atmosphäre als auch über verwendetes Baumaterial möglich sind.<sup>[52],[53]</sup>

In Oberflächenproben des Außenmauerwerks wurde die 1990 ermittelte Salzbelastung als vergleichsweise gering beschrieben, wobei die nach Norden ausgerichteten Flächen eine höhere Belastung aufwiesen als die nach Süden ausgerichteten, und höhere Salzgehalte in den feuchten Sockelbereichen erfasst wurden. Gips stellte den Hauptbestandteil der an der Oberfläche vorliegenden Salze dar. Die Gipsbildung auf dem carbonatfreien Steinmaterial der Kirche führt zunächst nicht zur Schädigung des Materials, jedoch birgt das wiederholte Auflösen und Auskristallisieren geringer Mengen des schlechtlöslichen Salzes in vollen Poren des Materials ein Schadenspotenzial. In Tiefenprofilen zeigte sich eine hohe Salzbelastung, teilweise mit Maxima in 10 bis 30 mm Tiefe. Jene Maxima waren meist dort vorzufinden, wo parallel zur Oberfläche verlaufende Risse vorlagen, die lokale Anreicherungszone für die Salzkristallisation bilden. Das Fugennetzwerk, vorliegende Risse sowie ein kapillarer Feuchtetransport ermöglichten den Salztransport ins Mauerwerk.<sup>[52],[53]</sup>

Im Innenraum der Kirche wurden ebenfalls Salzausblühungen beobachtet, sowohl in den Sockelbereichen und im aufgehenden Mauerwerk als auch im Bereich der Wandmalereien. Die 1990 und 1991 primär vorgefundenen kristallinen Salze waren Gips, der in Form von Pusteln auch im Bereich der Malerei beobachtet wurde, Natriumsulfat und weniger Kaliumnitrat. Die durch Salzkristallisation bedingten Schädigungen zeigten sich beispielsweise durch Schollenbildung oder Absanden und führten teilweise zu Malschichtverlusten.<sup>[52],[53]</sup>

Hinsichtlich der Salzverteilung wurden vorwiegend Proben des aufgehenden Mauerwerks aus der Umgebung der Wandmalereien untersucht. Ein Vertikalprofil von Neuputzproben in der Südkapelle zeigte dabei die Abnahme von Sulfat von unten nach oben (Maximalbelastung von etwa 1.8 Gew. %). Chloride und Nitrate stiegen mit der Höhe zunächst an und erreichten bei 0.8 beziehungsweise 1.5 m ein Maximum, nahmen dann bis zur untersuchten Höhe von etwa 2.30 m wieder ab (Maximalgehalte von etwa 0.6 und 1 Gew. %).<sup>[52],[53]</sup>

Ebenfalls an der Nordwand wurde ein Vertikalprofil von Wandputzen im Bereich der Eingangstür erstellt. Dieser Bereich des Innenraumes wies die höchste Salzbelastung mit leichtlöslichen Salzen auf, so dass Nitrat-Gehalte bis zu 2.9 Gew.% ermittelt wurden, die Chlorid-Gehalte waren jedoch mit ebenfalls maximal 0.6 Gew.% mit den für die Südkapelle ermittelten Werten vergleichbar. Die Abnahme der Sulfat-Gehalte mit der Höhe sowie die Zunahme der Nitrat- und Chlorid-Gehalte bis in eine gewisse Höhe und eine erneute Abnahme konnten auch für diesen Bereich des Innenraums detektiert werden.<sup>[52],[53]</sup>

Für einige der Proben aus diesem Vertikalprofil wurden Berechnungen mittels *ECOS-Runsalt* durchgeführt (Abb. 5-2). Es zeigt sich, dass einige Proben des Profils nach Abzug von Gips aus dem Gemisch Mischungen des Typs II ergeben, andere wiederum des Typs I. Folglich ergeben sich auch hinsichtlich der Hygroskopizität der Mischungen größere Variationen, so dass die kritischen Kristallisationsfeuchten zwischen 50 und 75 % RH variieren. In den Vorhersagen tritt für keine der Proben aus dem Profil die Kristallisation von Natriumsulfat auf, obwohl es bei der Salzkartierung bis 1991 durchaus als zweithäufigstes Ausblühsalz erfasst wurde. Die vorwiegend auskristallisierenden Salze sind laut der Berechnungen Kalium- und Natriumnitrat sowie Natriumchlorid. Proben aus höheren Bereichen des Mauerwerks weisen aber auch größere Mengen Calciumnitrat auf, die Kristallisation des Salzes wird in den Berechnungen jedoch erst unterhalb von 35 % RH prognostiziert.

Für die wertvollen Wandmalereien wurde die Gefährdung durch die leichtlöslichen Salze 1997 als gering eingestuft, da diese Salze vorwiegend in geringeren Höhen nachgewiesen und ein Effekt aufsteigender Feuchte nur bis zu einer Höhe von 2 m verzeichnet wurde. Wichtigster Schadensfaktor für die Wandmalereien sei die Gipsbelastung, die durch einen zwar langsamen, aber stetigen Schadensverlauf zu Verlusten der Malschicht führen könne, aufgrund der Beschaffenheit der Malereien jedoch nicht durch klassische Umwandlungsmaßnahmen entfernt werden konnte.<sup>[52]</sup>

Nach Ende der BMFT-Projekte wurde auf Basis der Erkenntnisse eine Entsalzung im Gewölbe sowie eine Erneuerung des stark salzbelasteten Putzes auf dem aufgehenden Mauerwerk empfohlen. Diese Maßnahmen sollten, im Zusammenspiel mit einem geeigneten Klimaprofil, die vorangehende Schädigung durch Salzkristallisation eingrenzen.<sup>[52]</sup>

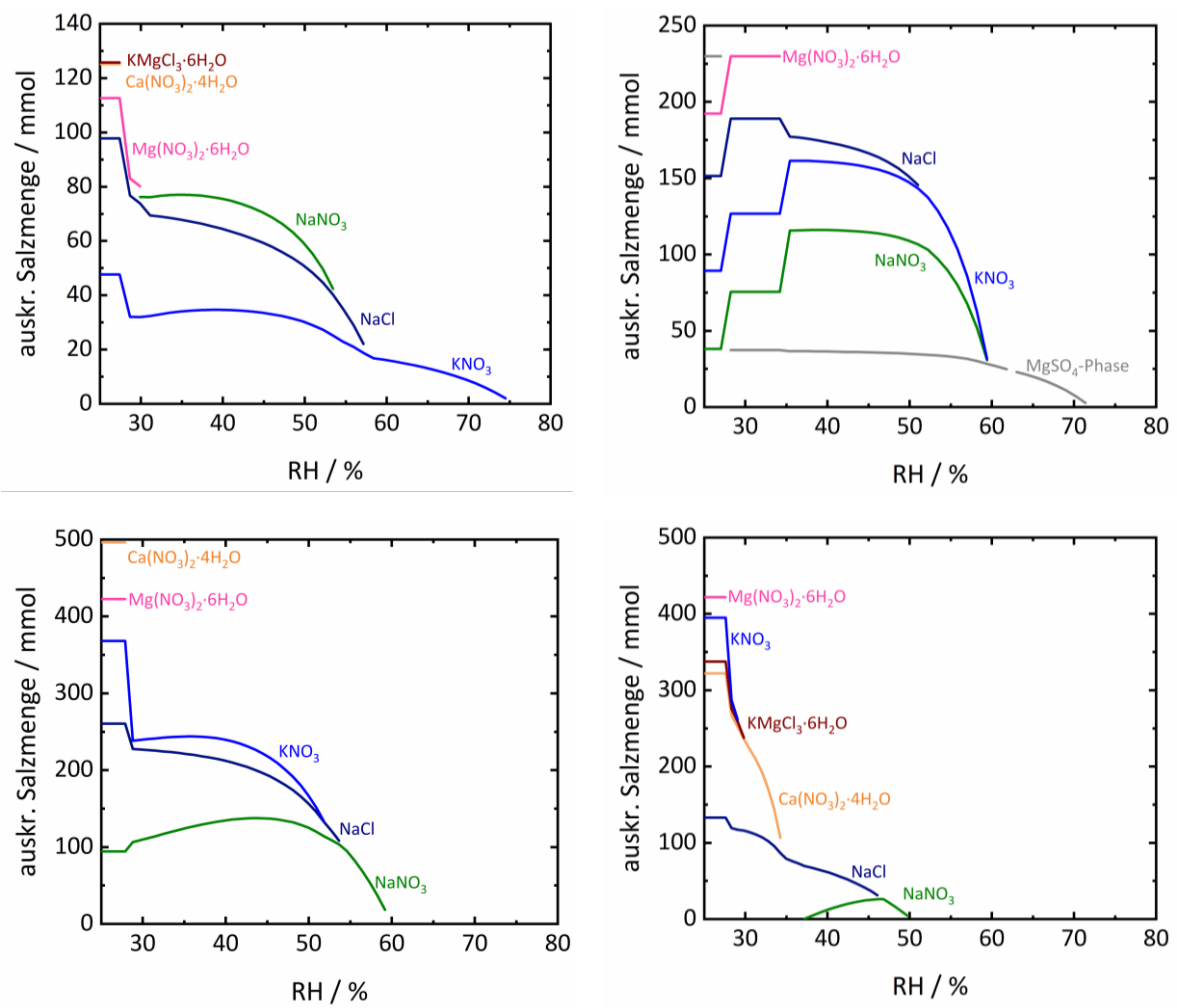


Abb. 5-2: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse für die Proben Id137 (oben links, 0.43 m Höhe), Id7 (oben rechts, 0.73 m Höhe), Id38 (unten links, 0.73 m Höhe) und Id139 (unten rechts, 1.4 m Höhe) bei 20 °C. Daten aus [53].

## **5.4 Klima**

### **5.4.1 Optimierung des Raumklimas in der Sigwardskirche Idensen**

#### **Ausgangssituation**

Ende der 1990er-Jahre fanden in der Sigwardskirche umfangreiche Voruntersuchungen statt. Technische Einrichtungen zur Beeinflussung des Raumklimas existierten zu dieser Zeit nicht.

Die Lufttemperatur bewegte sich im untersuchten Zeitraum zwischen  $-5$  und  $+24$  °C. Die insgesamt sehr hohe relative Luftfeuchte wies starke Schwankungen auf und zeigte mehrfach Spitzenwerte von bis zu 90 % relativer Feuchte, langfristig lag sie über 75 %.

Infolge dieser besonderen bauphysikalischen Situation waren an den raumseitigen Wand- und Gewölbeoberflächen vielfältige Schadensbilder wie z. B. Salzkristallisationen, Mal- und Putzschichtverluste oder mikrobieller Befall festzustellen.

#### **Maßnahmenvorschlag anhand von Voruntersuchungen**

Vorrangig zum Schutz der kulturhistorisch bedeutsamen Wandmalereien sollten Maßnahmen ergriffen werden, die eine Frostgefährdung ausschließen und das Raumklima in der Weise verändern, dass die wirksamen Schadensmechanismen möglichst unterbunden, oder zumindest gehemmt werden.

Alle Maßnahmen sollten nur minimale Eingriffe in die historische Gebäudesubstanz zur Folge haben. Eine Beeinträchtigung des optischen Eindrucks des Kircheninnenraums durch die bewusst gering zu haltenden technischen Einrichtungen war zu verhindern. Außerdem sollten alle Systemkomponenten für eine fallweise Nutzung des Kirchenraumes ohne Möblierung oder für Bau- und Erhaltungsmaßnahmen möglichst einfach zeitweise zu entfernen sein.

Zum Schutz vor Fehlbedienungen sollte das gesamte System automatisch geregelt werden, dabei war aber unter dem Gesichtspunkt der Kosteneinsparung für die Kirchengemeinde als Betreiberin der Anlage die Minimierung der Betriebskosten besonders zu berücksichtigen.

#### **Realisierte Maßnahmen**

Die Verstetigung des Raumklimas wurde ab dem Jahr 2002 mit drei grundlegenden Maßnahmen erreicht:

- Verminderung der Wärmeverluste durch die Gewölbedecken mittels einer Dämmung,
- gesteuerte Be- und Entlüftung des Innenraums und
- Installation eines Temperiersystems.

Zur Anhebung der Oberflächentemperaturen der Gewölbeunterseiten einerseits und zur Verringerung des Temperaturgefälles innerhalb der Kalktuff-Gewölbedecke andererseits erfolgte im Dachraum der Kirche der Einbau einer Dämmschicht.

Um das Gewölbe weiterhin von oben auf mechanische Schäden untersuchen zu können, ist die Dämmung über dem Hauptschiff nicht direkt auf das Gewölbe aufgelegt, sondern in einer eigenen Ebene installiert.

Die Absenkung der hohen relativen Luftfeuchte sowie die Minderung ihrer Schwankungsbreite erfolgt durch eine Kombination aus rechnergesteuerter Temperierung und Zwangslüftung. Die Heizelemente sind als Bankheizung ausgeführt, die über Bodensteckdosen angeschlossen sind. Dies ermöglicht den unproblematischen Ausbau einzelner oder sämtlicher Kirchenbänke.

Der erzwungene Luftaustausch erfolgt mit Hilfe eines Ventilators in einem Turmfenster.

Es wird vorrangig – aus energetischen Gründen – immer zuerst versucht, mit Hilfe der Lüftungsanlage eine Senkung der Luftfeuchtigkeit zu erreichen. Der Luftaustausch von Innen- durch Außenluft wird immer dann erzwungen, wenn die relative Luftfeuchtigkeit innen über 70 % liegt, die Außenluft eine geringere absolute Feuchte aufweist als die Innenluft und die Belüftung nicht zu einer Abkühlung des Innenraums führt.

Nur wenn die genannten Voraussetzungen für den Lüftungsbetrieb nicht vorliegen, erfolgt die Absenkung der relativen Feuchte mit Hilfe der Temperierelemente ab einer Innenraumfeuchte von 73 % zunächst im Teillastbetrieb mit halber Leistung, bei einem Anstieg über 75 % schließlich im Volllastbetrieb. Die Anhebung der Lufttemperatur bewirkt eine Absenkung der relativen Luftfeuchte.

Schwankungen der Raumlufttemperatur werden weiterhin hingenommen, da ihr Einfluss auf die beobachteten Schadensbilder gering ist. Lediglich zur Einhaltung der Frostfreiheit wird unterhalb von 3 °C durch Beheizung gezielt auf die Temperatur eingewirkt.

### **Situation heute**

Schon kurz nach dem Beginn der Luftfeuchteabsenkung zeigten sich als augenfälligste Ergebnisse das Ausbleiben der Oberflächenkondensation an den Außenwänden, die verringerte Aktivität der Mikrobiologie und weniger Salzkristallisationen.

Abgesehen von Zeiträumen, in denen wegen Bautätigkeit ein unkontrollierter Zutritt von Außenluft stattfand, schwankt die relative Feuchte im Nahfeld der Wandmalerei im Gewölbe seit dem Sommer 2004 nur noch zwischen 67 und 77 %, während der meistens Zeit des Jahres wird dieser enge Spielraum weiter auf 69 bis 75 % eingegrenzt.

Die feuchteabhängige automatische Belüftung läuft derzeit vorrangig im Zeitraum von April bis Oktober und reduziert den notwendigen Temperierbetrieb zur Absenkung der relativen Feuchte.

Der Einbau einer kapillarbrechenden Schicht unter dem Fußboden unter tätiger Mithilfe der Gemeinde und des Freundeskreises im Jahr 2006 verringert zusätzlich den Feuchteeintrag in das Gebäude von unten, was zu geringeren Betriebszeiten gerade der Heizelemente und damit niedrigeren Kosten führt.

Die aktuellen Klimawerte wurden primär gewählt, um den Bestand der Wandmalereien zu sichern. Die Untersuchungen des Landesamts für Denkmalpflege im Rahmen des Bauwerksmonitorings bestätigen die Wirksamkeit der getroffenen Maßnahmen.

Mit einer voranschreitenden Trocknung des Mauerwerks kann künftig an eine behutsame Absenkung der Innenfeuchte gedacht werden. Die Salzkristallisation an den Wandoberflächen ist dabei jedoch weiter zu beobachten.

Die zentrale Regeleinheit wurde 2021 unter Beibehaltung der Regelprinzipien erneuert. Die Anlagenzustände und Klimaparameter können seitdem per Fernüberwachung kontrolliert werden.

## 6 Süderende

### 6.1 Rückschau und heutiger Zustand

Aus der Zeit des BMBF-Projektes liegt ein umfassender Abschlussbericht vor, aus dem für die Rückschau wichtige Informationen hervorgehen. Ziel war damals wie heute, die barocken Gewölbemalereien der St. Laurentii Kirche auf der Nordseeinsel Föhr zu erhalten. Es wurde damals eine Anamnese zum Kirchenbau und dessen vielfältigen Renovierungen in den letzten Jahrhunderten erstellt. Aus heutiger Sicht besonders interessant war der Einbau der Warmluftheizung in den 80er Jahren, die mittlerweile erneuert und mit einer Klimaregelung ausgestattet ist, die aber weiterhin nur mangelhaft funktioniert. Weiter zurückliegende Umbau- und Ausbesserungsarbeiten am Mauerwerk, Gewölbe, Dach etc. wurden mittels einer Bauaufnahme lokalisiert und datiert.

Damals wie heute ist die Kenntnis der klimatischen Gegebenheiten im Kirchen- und Dachraum sowie an der Maleroberfläche, insbesondere unter dem Einfluß einer periodischen Beheizung, für die Interpretation aller anderen Beobachtungen und Ergebnisse von entscheidender Bedeutung. Es wurden damals an ausgewählten Bereichen Nahfeldklimasonden direkt vor den Wandoberflächen montiert, um die klimatischen Parameter in einem Jahresgang zu erfassen und somit u.a. auch die Auswirkungen der Heizung zu ermitteln.

Der damalige Zustand der Gewölbemalereien wurde in einer Schadens- und Bestandskartierung durch den Restaurator festgehalten. Den Schwerpunkt der weitergehenden Untersuchungen bildete das makroskopisch deutlich sichtbare Abplatzen von zum Teil Malerei tragenden Putzschollen im Gewölbe in Verbindung mit dem Einsatz der Heizung. Es zeigte sich zusätzlich, dass nicht nur die Heizung, sondern auch die sommerliche Erwärmung infolge der Sonneneinstrahlung zu den beobachteten Schäden führt. Bei unserem heutigen Besuch der Kirche hatten wir nicht den Eindruck, dass seit der letzten Untersuchung in den 90er Jahren die Schäden wesentlich zugenommen haben. Offenbar ist der Schadensprozess zum Stillstand gekommen, wenngleich immer noch Salzausblühungen im Sockelbereich auffallen.

Die damaligen Untersuchungen mündeten in konkrete Therapievorschlüge. Maßnahmen, die sich schadensmindernd auf den Erhalt der Gewölbemalereien auswirken, wurden in erster Linie in einer Dämmung der Dachhaut gesehen. Man erhoffte sich, dass hierdurch die benötigte Heizleistung gesenkt und die Einflüsse des Außenklimas auf das Gewölbe vermindert werden. Ein Einbeziehen des Dachbodens in das Raumklima des Kirchenschiffes sollte gleiche thermisch-hygri-sche Verhältnisse beiderseits der dünnen Gewölbeschale schaffen und somit die Materialspannungen reduzieren. Die Schwankungen der relativen Luftfeuchte sollten durch eine permanente Trocknung der Luft abgemildert werden, wobei eine konstante Luftfeuchte angestrebt, aber möglichst unterhalb der Gleichgewichtsfeuchte der im Gewölbe vorliegenden Salz-mischung eingestellt werden sollte. Im Rahmen dieses Projektes wurden mit Kenntnis der damals ermittelten Salze und Salzgemische Nachberechnungen mit besseren Methoden durchgeführt, die die damaligen Ergebnisse bestätigten.

Eine großflächige Restaurierung der Malereien sollte erst nach diesen baulichen Maßnahmen stattfinden. Die (relativ dünne) Dämmung der Gewölbeschale würde ausgeführt und hat

offensichtlich ihren Zweck erfüllt. Inwieweit die weiteren Maßnahmen umgesetzt wurden, entzieht sich auch heute unserer Kenntnis.

Im Gegensatz zu anderen, innerhalb des Forschungsprogramms bearbeiteten wandmalereitragenden Objekten (Eilsum, Axien), wird und wurde die St. Laurentii Kirche beheizt. Hier konnten demzufolge der Einfluß der Beheizung auf die Schäden untersucht und die Ergebnisse stellvertretend für eine zunehmende Vielzahl von beheizten Baudenkmalern ausgewertet werden. Laut Abschlussbericht wurde ein umfassendes Untersuchungskonzept erarbeitet und umgesetzt.

In den Jahren 1992 bis 1995 erfolgten, in Absprache mit den zuständigen Denkmalbehörden und unter Aufsicht eines Restaurators, während insgesamt 10 zumeist einwöchiger Kampagnen vor Ort, die Untersuchungen und erste Konsolidierungsversuche der Wandmalerei an ausgewählten Testflächen. Welche sich daraus ergebenen konkreten Maßnahmen umgesetzt wurden, ist nicht ganz klar.



## 6.2 Mikrobiologie

Unmittelbar vor dem durch die Corona-Pandemie bedingten Lockdown konnte die gemeinsame Kampagne in Süderende auf Föhr im März 2020 noch durchgeführt werden.

Im Gegensatz zu den drei bisher untersuchten Kirchen, zeigte sich dort keinerlei eindeutige Verbesserung der Situation. Besonders auffällig waren nach wie vor Putzausbrüche in allen Bereichen der Kirche, wie auch Ausbrüche der Ziegeloberflächen (z. B. am Altar; Abb. 6-1 bis Abb. 6-5). Wobei sich allerdings auch keine negative Veränderung beobachten ließ.



Abb. 6-1: abgeplatzter Putz in vielen Bereichen.



Abb. 6-2: Flächige Putzabplatzungen.



Abb. 6-3: Flächige Putzabplatzungen, Detail.



Abb. 6-4: Ausbrüche an Ziegeln.



Abb. 6-5: Ausbrüche an Ziegeln, Detail.

Zur Beurteilung möglicher Konsolidierungsmaßnahmen wurden die 1994 als Monitoringflächen angelegten Bereiche im zweiten Joch, Südkappe, erneut beprobt. Nur dieser Bereich war während der Kampagne zugänglich.

Folgende Überlegungen im Abschlussbericht der MPA Bremen erfolgten seinerzeit zur Auswahl geeigneter Materialien:

Auszug aus dem Bericht:

*Die Festigungen wurden im November 1994 durchgeführt.*

*Die Auswahl der Festigungsmittel erfolgte in Zusammenarbeit mit den am Projekt beteiligten Restauratoren und dem Landesamt für Denkmalpflege, Kiel. Die organischen Bindemittel Klucel (Hydroxypropylcellulose) und Tylose (Methylcellulose) genügten den geforderten Eigenschaften nach Reversibilität, Atmungsaktivität und Verträglichkeit mit den bereits vorliegenden Bindemitteln. Die als Nachteil zu sehenden biologischen Abbaubarkeit sollte mit dem Einsatz von Bioziden entgegengewirkt werden. Als Biozide kamen aufgrund des steten Abputterns der Malereien von den Gewölben im Hinblick auf die intensive Kirchennutzung nur gering toxische Mittel in Frage. Bei dem eingesetzten Disin handelt es sich um ein Desinfektionsmittel ohne Giftklasseneinstufung. Preventol ist ebenfalls ein Desinfektionsmittel mit antimikrobieller Wirkung.*

**Behandlung der Testflächen:**

- Fixative: die Fixative wurden mit dem Pinsel aufgetragen
- Tylose 2%ig in Wasser, Flächen wurden mit 95%ig vergälltem Ethanol vorgeätzt
- Klucel E 5%ig in Ethanol
- Biozide: die Biozide wurden nach der Fixierung mit dem Pinsel rein aufgetragen
- Disin 2%ig
- Preventol R50 1%ig

*Die Testflächen (s. starke Umrandung in Abb. 6-6) wurde in den jeweiligen Quadranten A-D einheitlich für alle Joche nach dem aufgeführten Schema behandelt.*

*Um die Wirkung der Biozide ohne Fixative zu ermitteln wurden nur im 4. Joch zusätzliche, „fixativfreie“ Flächen mit Bioziden behandelt (E und F in Abb. 6-6).*

	A Tylose mit Preventol R 50	B Tylose mit Disin	
E Preventol R 50 (im 4. Joch)	C Klucel E mit Preventol R 50	D Klucel E mit Disin	F Disin (im 4. Joch)

Abb. 6-6: Behandlung der Testflächen 1994.

*Die Fixative wurden ähnlich dem Löschblatteffekt in die pudrige Malschicht eingezogen. Tylose zeigt ein etwas besseres Eindringverhalten als Klucel, hat aber den Nachteil, dass es in Wasser vorgequollen wird und somit Feuchtigkeit in die Malerei trägt, welche wiederum das Wachstum der Mikroorganismen stimuliert.*

### **10.3 Nachkontrolle der Festigungen**

*Im Juni 1995 wurden die behandelten Testflächen erneut untersucht. Insbesondere die Testflächen in den Jochen 3 und 2 unterschieden sich bereits rein optisch von den umgebenden Wandpartien. Deutlich heben sich die dunkleren Rechtecke vor dem hellen Malgrund ab. Bei der Beprobung mit einem Skalpell entsteht der Eindruck, dass die Fixierung lediglich eine Glättung der Malschicht bewirkt hat, jedoch keine Anhaftung an den Putzuntergrund erfolgt ist. Die benachbarten Malschichten stehen in kleinen Schollen auf und sind stark gefährdet, herunterzufallen.*

*Rasterlektronenmikroskopische Untersuchungen der gefestigten Malschichten zeigen, dass Klucel vollständig in die Malschicht eingedrungen ist, wohingegen Tylose einen dünnen Oberflächenbelag hinterlässt.*

#### **Mikrobiologie**

*Von den gefestigten und mit Hemmstoffen versehenen Testflächen ließen sich lebensfähige Stadien von Mikroorganismen nur noch in extrem geringem Umfang nachweisen. Hieraus kann geschlossen werden, dass die Maßnahmen 1. Vortränken mit Alkohol, 2. Festigung mit einem nicht filmbildenden Festigungsmittel und 3. Einsatz der beiden Hemmstoffe an diesem Objekt zu einer Verringerung der mikrobiellen Belastung und damit auch Schädigung führen. Es muss betont werden, dass die hier anwendbaren Biozide keine langfristige Hemmung bewirken. Es wird ein Zeitraum bis zu vier Jahren angenommen. Länger wirksame, daher aber auch hochtoxische Hemmstoffe können nicht zum Einsatz kommen, da der Substanzverlust der Malschicht auch in Zukunft höchstens verlangsamt aber nicht gestoppt werden wird und damit ein Kontakt der abgänigen Materialien mit den Kirchenbesuchern nicht auf Dauer vermieden werden kann. Aus mikrobiologischer Sicht sind beide angewandten Festigungsmittel und Biozide für eine weitere Festigung einsetzbar. (Zitat Bericht)*

### **6.2.1 Ergebnisse der mikrobiologischen Nachkontrolle im März 2020**

Die Oberflächenbesiedlung wurde durch zerstörungsfrei durchgeführte Stempelproben auf fünf verschiedenen Festmedien ausgeführt (Tab. 6-1).

Auf Grund dieser Ergebnisse konnte zum Zeitpunkt der Nachkontrolle nicht von einer Gefährdung des Bestands durch Mikroorganismen ausgegangen werden.

Diese Ergebnisse lassen sich auch auf Proben am Altar und an der Kanzel übertragen. In der Orgel jedoch ist Befall durch Schimmelpilze ausgebildet, dem im Projektzusammenhang nicht nachgegangen werden konnte.

Wegen der starken Salzbelastung sollte hier jedoch, falls über Eingriffsmöglichkeiten an der Orgel nachgedacht wird, auf lokale, auf die Orgel begrenzte Methoden zurückgegriffen werden.

In sehr begrenztem Umfang wurden im Bereich des Emporenaufgangs rote Verfärbungen gesehen, die sich mit hoher Wahrscheinlichkeit auf das Vorhandensein rot pigmentierter Archäebakterien zurückführen lassen. Diese wurden bisher stets im Zusammenhang mit alkalischen Salzbelastungen nachgewiesen.

Tab. 6-1: Stempelproben KBE/Nährböden, Föhr 03/2020.

Probe	MEA	DG18	40S	Nutrient	Skim
<b>2.1 Fläche A</b>	1 Cladosporium sphaerospermum	2 Wallemia sebi	1 Cladosporium sphaerospermum 1 Mycelium ste- rile	0	1 gelb, Kokken, Gram+ Hof- 3 blassgelb, Kok- ken, Gram+, Hof+ 1 beige Kokken Gram+ Hof+
<b>2.2 Fläche C</b>	1 Cladosporium sphaerospermum	0	0	1 blassgelb, Di- plokoken, Gram+ 1 gelb Diplokok- ken, Gram+, 1 beige, Kokken, Gram +	3 gelb, Kokken, Gram+ Hof+
<b>2.3 Fläche B</b>	0	0	1 Mycelium ste- rile	Milbenspuren Beige, Kokken, Gram +	3 gelb Kokken, Gram+ Hof+
<b>2.4 Fläche D</b>	0	0	0	0	Milbenspuren Beige, Kokken, Gram + Hof-

### 6.3 Salze

Die Wandmalereien und das Ziegelwerk in Süderende weisen massive Salzsäden auf. Treiber der zunehmenden Schädigung war auch die Installation einer Heizung in den achtziger Jahren, aber auch ein Einfluss der Aufheizung des Gewölbes in warmen Sommermonaten konnte im Rahmen des BMFT-Projektes erfasst werden.<sup>[54]</sup> Natriumchlorid wurde als Hauptschadensauslöser detektiert, dessen Eintrag durch die Nähe zum Meer bedingt ist. Als Hauptquellen des Salzeintrags wurden Schlagregen und eine trockene Deposition benannt, aufsteigende Feuchte sowie ein anhaltender Salztransport über im Bauwerk vorliegende Salzlösungen konnten im Rahmen der Untersuchungen ausgeschlossen werden.<sup>[54],[55]</sup>

Mittels Bohrkernen konnte an Ziegeloberflächen in den Gewölbezwickeln eine Belastung mit Natriumchlorid und Gips von bis zu 5 Gew.% ausgemacht werden, ebenfalls Natrium-, Calcium- und Nitrationen konnten mit einem Anteil von bis zu 2 Gew.% nachgewiesen werden. Im Inneren des Ziegelwerks wurden große Unterschiede hinsichtlich der Salzkonzentration und -verteilung festgestellt. Auch der Putz der Wandmalereien wies eine geringere Salzbelastung als die nicht von Putz bedeckten Ziegeloberflächen auf. Natriumchlorid und geringere Mengen Gips wurden identifiziert. Letztlich konnten auch im aufgehenden Mauerwerk, innen wie außen, die gleichen Salze gefunden werden. Die Belastung im Inneren der Kirche war dabei höher als außen, ebenso war die Belastung an der Nordseite höher als an der Südseite. Bedingt durch die dem Wind und Schlagregen exponierte Südost-Fläche erfolgt dort eine schnellere Trocknung und auch ein Auswaschen der Wandbereiche an der Südseite im Vergleich zur Nordseite. Kapillarer Transport in horizontaler Richtung führt zu einer erhöhten Salzbelastung im Inneren. Insgesamt ist die Salzbelastung am Objekt jedoch in Anbetracht seiner Lokation gering.<sup>[54]</sup>

Zu Zeiten des BMFT-Projekts wurden äußerst vielseitige und detaillierte Untersuchungen zu Salzbelastung und -quellen durchgeführt. Allerdings war zu der Zeit noch keine Modellierung der Kristallisationsfeuchten der Gemische möglich, so dass lediglich ein Abschätzen dieser erfolgen konnte. Somit sollen einige der damals entnommenen Proben an dieser Stelle hinsichtlich der kritischen Feuchten und Kristallisationsverläufe betrachtet werden.

In diese Betrachtung mittels *ECOS-Runsalt* fließen lediglich oberflächennahe Proben aus dem Innenraum der Kirche ein (im Falle von Bohrkernen nur deren äußerste Schicht). Entsprechende Proben wurden zwischen 1993 und 1994 in den Jochen 2, 3 und 4 entnommen. In Joch 2 wurden Bohrkern, die an der Südwand von innen nach außen gebohrt wurden, berücksichtigt; in den Jochen 3 und 4 jene Bohrkern, die im Gewölbezwickel von der Wandmalereiseite in Richtung Dachraum gebohrt wurden. Zudem wurden Rieselpollen im Bereich des Kanzeldaches gesammelt und analysiert.

Bei der Auswertung der *ECOS*-Ergebnisse fiel auf, dass es keine Systematik der Salzbelastung in den verschiedenen Jochen oder Höhen gibt, wie es auch schon in den entsprechenden Originalberichten und im Abschlussbericht des BMFT-Projektes erläutert wurde.<sup>[54],[56]–[58]</sup>

Zunächst soll auf die Proben des aufgehenden Mauerwerks an der Südwand eingegangen werden.<sup>[57]</sup> Deutlich ist ein relativ geringer Salzgehalt in den Proben mit Natriumchlorid als Hauptbestandteil sowie eine hinsichtlich des Kristallisationsverlaufs große Ähnlichkeit der beiden Proben

aus 2.0 und 2.7 m Höhe, so dass lediglich das Ergebnis für die aus geringerer Höhe in Abb. 6-7 gezeigt ist. Nach Abzug von Gips ergab sich in beiden Fällen eine Mischung des Typs I, die kritische Kristallisationsfeuchte wird vom Programm mit 70 % vorhergesagt.

Bei Oberflächenproben aus den Gewölben der Joche 3 und 4<sup>[56]</sup> lagen jeweils Mischungen des Typs II und des Typs I vor, allerdings waren die Sulfat-Gehalte in den Proben mit einer Typ I-Zusammensetzung sehr gering. Die Kristallisationsfeuchte des Natriumchlorids wurde in allen Proben im Bereich zwischen 67 und 71 % RH vorhergesagt. Abb. 6-8 zeigt jeweils ein Beispiel für eine Probe aus Joch 4 und Joch 3, davon ist erstere dem Typ I, die letztere dem Typ II zuzuordnen. In einigen der betrachteten Proben aus Joch 4 waren die Salzgehalte deutlich geringer als in Proben aus Joch 3.

Die Salzbelastung war in den beiden Rieselpfen erwartungsgemäß deutlich höher, da es sich dabei um herabfallende Ausblühungen mit Materialfragmenten handelt. Eine der Proben wies einen höheren Gips- sowie etwas höhere Nitratgehalte auf. Der nach Abzug von Gips berechnete Kristallisationsverlauf und die auskristallisierenden Phasen sind jedoch in beiden Proben ähnlich, so dass in Abb. 6-9 nur der Verlauf für eine der Proben (K8\_6586) gezeigt ist. Hauptbestandteil ist auch hier Natriumchlorid, welches bei der kritischen Kristallisationsfeuchte von 72 % RH (bzw. 74 %, Probe 6021 aus <sup>[58]</sup>, entommen 1995) beginnt, auszukristallisieren.

Wie bereits erwähnt, ergibt sich keine Systematik einer zunehmenden Salzbelastung in Abhängigkeit der Höhe oder einer örtlichen Salzzusammensetzung (vgl. <sup>[54],[56]-[58]</sup>). Insgesamt kann aus den Ergebnissen jedoch abgeleitet werden, dass kritische Kristallisationsprozesse im Bereich zwischen 67 und 78 % RH einsetzen.

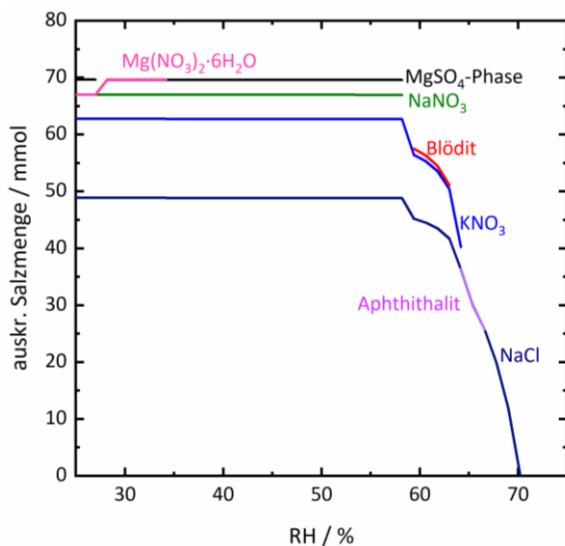


Abb. 6-7: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C) für eine an der Südwand entnommene Probe (Joch 2, 2 m Höhe, entommen 1994, Probe 2221.1 aus <sup>[57]</sup>)

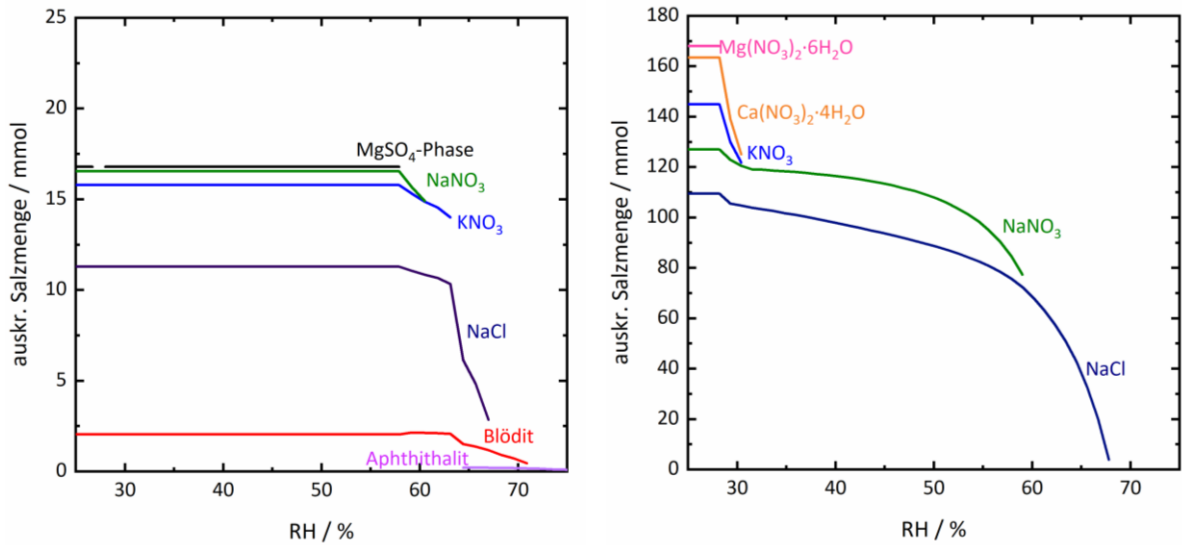


Abb. 6-8: Ergebnis der *ECOS-Runsalt* Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C) für eine im Gewölbe von Joch 4 (Ostkappe, 6 m Höhe, entnommen 1993, Probe 2059 aus [56]; rechts) und eine in Joch 3 (Westkappe, 6 m Höhe, entnommen 1993, Probe 2061 aus [56] links) entnommene Probe.

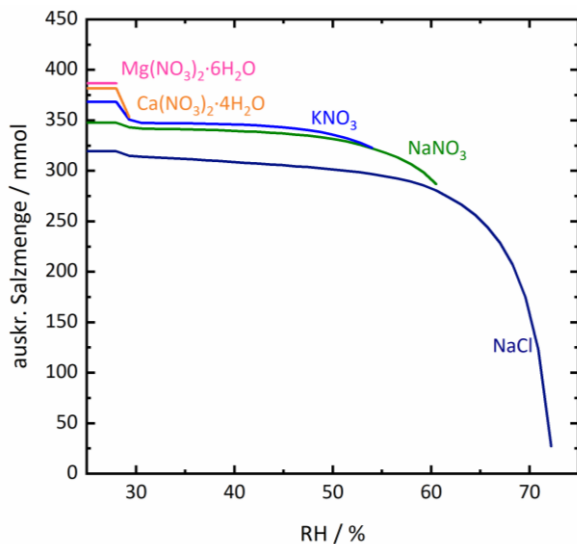


Abb. 6-9: Ergebnis der *ECOS-Runsalt* Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C) für eine der 1995 entnommenen Rieselproben (Probe K8\_6586 aus [58]).

Über die Auswertung früher entnommener Proben mittels *ECOS-Runsalt* hinaus wurden zwei weitere oberflächliche Proben von freiliegenden Ziegeln 2020 entnommen und auf die vorliegenden Salze untersucht. Eine Entnahme im Bereich des Gewölbes war aus technischen Gründen nicht möglich, so dass leider kein direkter Vergleich der in den neuziger Jahren festgestellten Versalzung zur heutigen Situation möglich ist. Die Proben stammen vom Altar und vom aufgehenden Mauerwerk beim Aufgang zur Empore an der Nordwand. Neben wenig Gips im Falle der Probe vom Altar und etwa 1 Gew.% im Falle der an der Nordwand entnommenen Probe, stellte auch hier Natriumchlorid den Hauptbestandteil der Proben dar; in der Probe aus dem aufgehenden Mauerwerk waren nur sehr geringe Mengen anderer auskristallisierender Salze vertreten. Die Probe vom Altar wies zudem erhöhte Nitrat-Gehalte auf. Die berechneten Kristallisationsverläufe sind in Abb. 6-10 dargestellt. Es sei auch auf die große Ähnlichkeit der Kristallisationsverläufe zu

denen der Rieselproben (Abb. 6-9) und der Proben aus dem Gewölbe (Abb. 6-8) hingewiesen. Abgesehen von den in einigen der in diesem Unterkapiteln diskutierten Proben geringen Mengen auskristallisierender Sulfat-haltiger Phasen ergibt sich somit eine weitestgehend gleichmäßige Salzverteilung in Süderende, wobei die Salzbelastung uneinheitlich ist.

Schadensrelevante Prozesse werden durch Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit um 70 % möglich (Spannbreite der kritischen Kristallisationsfeuchte bei 20 °C: 67 – 78 % RH).

Der Vollständigkeit halber soll auch noch kurz auf die weitere Untersuchungsmethode der Raman-Mikroskopie eingegangen werden, die für die Analyse von Salzausblühungen eingesetzt wurde. Für eine massive Ausblühung vom Mauerwerk hinter der Orgel und vom Altar ergaben sich keine Raman-Verschiebungen, was auf das erwartete Vorliegen von Natriumchlorid schließen lässt, bei dem es sich um eine Raman-inaktive Substanz handelt. In einer Ausblühung von einer verputzten Wand aus dem Querschiff (nördlicher Teil der Kirche, nach Nordwesten ausgerichtete Wand) konnte hingegen Natriumsulfat identifiziert werden, welches im Zusammenhang mit dem Objekt noch keine bedeutenswerte Erwähnung gefunden hat. Es ist davon auszugehen, dass das verwendete Baumaterial in diesem Bereich für die Natriumsulfat-Ausblühungen verantwortlich ist und es nicht als allgemeines, auch die Wandmalereien betreffendes Schadsalz anzusehen ist.

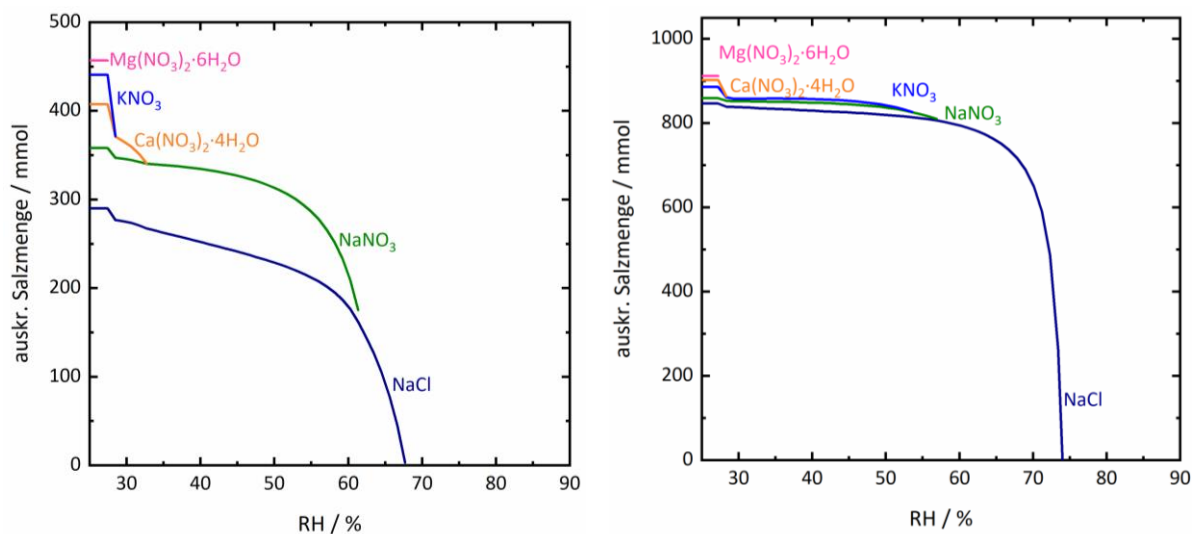


Abb. 6-10: Ergebnis der ECOS-Runsalt Berechnung aus den Werten der Ionenanalyse (20 °C) für die Probe vom Altar (links) und von der Nordwand (rechts), entnommen 2020.



## **6.4 Klima**

### **6.4.1 Optimierung des Raumklimas infolge starker Salzbelastung der Raumumschließungsfläche – Kirche St. Laurentii in Süderende/Föhr**

#### **Ausgangssituation**

Die Kirche wurde bereits seit 1895 in gewissen Bereichen beheizt, wobei die Beheizung zuerst durch Öfen vorgenommen und diese 1933 durch eine Zentralheizung (Luftheizung) ersetzt wurde. Nach verschiedenen zwischenzeitlichen Ergänzungen und Umstellungen der Heizungsanlage auf Zwangsumlüftung (1961) wurde um 1980 das Warmluftheizsystem infolge schlechter Temperaturverhältnisse in der Kirche grundlegend verändert. Das neue Heizsystem, das heute noch genutzt wird, stellt eine Kombination von Warmluft- und Fußbodenheizung dar. Die zentral erwärmte Luft wird mit Hilfe eines Zuluftkanals, der längs in der Mitte des Langschiffs verläuft, der Kirche zugeführt (zurzeit Umluftbetrieb). Vom Zuluftkanal wird zuerst die Luft flächendeckend durch den Fußboden geführt und tritt an den Außenwänden nach oben gerichtet aus. Die Abluft wird im 5. Joch entnommen und zu der Zentrale zurückgeführt.

Es zeigten sich bislang Schäden an der Wandmalerei durch abblätternde und absandende Mal- bzw. Putzschichten sowie Putzabstoßungen infolge ungünstiger Klimaverhältnisse.

Parallel wurden Salzanalysen durchgeführt. Diese ergaben eine starke Belastung der Raumumschließungsflächen mit Natriumchlorid (Mobilitätspunkt ca. 60 % RH).

Um einen Zusammenhang zwischen den Wandmalereischäden und der raumklimatischen und bauphysikalischen Situation festzustellen, wurden Nahfeldklimamessungen sowie feuchtetechnische Messungen in der Gewölbekappe (Dezember 93 bis Dezember 94) vorgenommen. Dabei zeigte sich ein Feuchtehaushalt mit relativen Luftfeuchten bis zu 80 %.

#### **Sanierungsvorschlag anhand der Voruntersuchungen**

Um auf Dauer Schäden an der Malerei und deren Träger zu verhindern bzw. zu reduzieren, muss ein Klima vorliegen, das die Salze nicht mehr so stark mobilisiert und die Mikrobiologie nicht aktiviert. Zu diesem Zweck müssen Extremwerte des relativen Luftfeuchteverlaufs unterbunden werden, so dass ein konstanter und stetiger Verlauf vorliegt (ca. 60 % RH).

Die Luftfeuchte während der Wintermonate (November bis Mai) kann durch eine Temperierung (Lufttemperatur zwischen 8 und 18 °C) reduziert werden. Dabei sollte die Heizungsanlage vorrangig in Abhängigkeit von der Raumluftfeuchte und der zeitabhängigen Gebäudenutzung geregelt werden.

Eine Mindestlufttemperatur von 5 °C (Frostsicherheit) und eine maximale Lufttemperatur von 18 °C sollten eingehalten werden.

Veranstaltungen müssen separat betrachtet werden. Damit die Behaglichkeit für Besucher während dieser Zeit gewährleistet ist, sollte infolge der dafür benötigten höheren Lufttemperatur eine kurzzeitige Absenkung der relativen Luftfeuchte auf z. B. 40 % zugelassen werden.

Im Sommer kann eine Reduzierung der Luftfeuchte auf 60 % RH durch Beimischung von Außenluft (Austausch feuchter Raumluft durch trockenere Außenluft) erreicht werden. Die Trocknung sollte allerdings in Abhängigkeit von den Innen- und Außenklimadaten vollautomatisch erfolgen.

### **Ausgeführte Maßnahmen**

Aus energetischen und klimatischen Gründen erfolgte im Jahre 1997 die erste Modernisierung der Heizungsanlage. Seitdem erfolgt der Heizbetrieb mikroprozessorgesteuert. Darüber hinaus erfolgte die Aufbringung einer Dämmung (Dicke ca. 7 cm) auf die Gewölbekappen und in die Decke des Querhauses. Dabei handelt es sich um eine Schlackenwolle mit hydraulischen Bindemitteln.

Mit Hilfe der Dämmung wurde die raumseitige Oberflächentemperatur der Gewölbekappen angehoben und somit die Tauwassergefahr reduziert. Außerdem erfährt die gesamte Gewölbekonstruktion durch die Dämmmaßnahme eine wesentlich geringere thermische Belastung.

Trotz dieser Maßnahmen (Dämmung, Regelung der relativen Luftfeuchte in Abhängigkeit von der Lufttemperatur) ergaben Untersuchungen während des Zeitraumes Dezember 98 bis Dezember 99, dass die relativen Luftfeuchten im Kirchenraum von 60 % häufig über- und unterschritten wurden.

Im Jahr 2017 erfolgte laut Auskunft der Fa. Mahr eine Umstellung der Wärmeerzeugung. Die Kirche wurde an ein Fernwärmenetz angeschlossen, wobei die gesamte Wärmezentrale erneuert wurde (System Warmwasser/Luft), jedoch die Luftheizung in der Kirche bestehen blieb. Lufttechnisch erlaubt die Anlage sogar eine Beimischung von Außenluft. Die ebenfalls neu installierte Regelungseinheit sieht eine Beimischung nicht vor.

Der Sollwert der relativen Luftfeuchte soll sich zwischen 40 und 70 % bewegen. Die Einhaltung dieses Wertebereichs wird in Abhängigkeit von der Lufttemperatur, d.h. mittels Wärmezufuhr geregelt (Lufttemperatur maximal 18.5 °C).

Ob diese Sollwerte zurzeit noch Gültigkeit haben bzw. welche Sollwerte vorliegen, konnte nicht in Erfahrung gebracht werden.

### **Situation heute und künftige Maßnahmen**

Beim Ortstermin lagen jedoch Klimawerte vor, die dem Gebäude und der Wandmalerei nicht zugekommen und Schadensprozesse verursachen werden.

Außerdem sollten die Sollwerte dringend, wie empfohlen, angepasst werden. Dabei sollte sich die relative Raumluftfeuchte um 60 % bewegen, um Schadensprozesse zu unterbinden.

Um auch während der Sommerphase Einfluss auf den Feuchtehaushalt nehmen zu können, sollte regelungstechnisch die Beimischung von Außenluft (anlagentechnisch bereits vorgesehen) in Abhängigkeit vom Innen- und Außenklima in Kraft gesetzt werden.

## 7 Abschließende Bewertung und Empfehlungen

Die Idee zu diesem Projekt entstand aus der Erkenntnis heraus, dass wir Projektbeteiligten uns auf das Ende unserer beruflichen Tätigkeit hinbewegen und wir nicht immer wissen, ob unsere langjährige Arbeit auf dem Gebiet der Konservierungsforschung insbesondere von Wandmalereien zum Erfolg geführt und unsere Arbeit zu einer besseren Pflege unserer Kulturgüter beigetragen hat.

Vor mehr als 30 Jahren haben wir uns in dem damaligen BMBF-Projekt zusammengefunden, um die neue Disziplin der Konservierungsforschung auf den Weg zu bringen. Wir waren alle junge Wissenschaftler, die bislang noch keine Erfahrung mit Denkmalpflege oder Konservierung hatten. Wir vertraten alle unsere eigenen Disziplinen mit den anfänglichen Problemen, eine eigene, wissenschaftliche Sprache zu sprechen. Diese Form von interdisziplinärer Zusammenarbeit musste erst wachsen und hat zum Teil auch viel Kraft gekostet.

Wir hatten im aktuellen DBU-Projekt die einmalige Gelegenheit, mit den Kolleginnen und Kollegen noch einmal Objekte zu besuchen, die wir damals im ersten Wandmalerei-Projekt untersucht hatten. Wir haben damals nach unseren Ergebnissen Empfehlungen abgeleitet, wie mit den Objekten verfahren werden soll, um weitere Schäden zu vermeiden. Nach Abschluss der Untersuchungen haben wir häufig keine weiteren Informationen bekommen, insbesondere war bis zu diesem Projekt nicht immer klar, welche von unseren Empfehlungen umgesetzt worden sind und welche zum Erfolg geführt haben. Nun wollten wir wissen, ob unsere damaligen Vorstellungen von Konservierung auch tatsächlich richtig waren und zu einem guten Ergebnis mit nachhaltigem Erfolg geführt haben.

Die Konservierungswissenschaften verfügen heute über weitergehende Untersuchungsmethoden, die uns damals noch nicht zur Verfügung standen und z. T. von uns selbst aus den Erfahrungen der letzten 30 Jahre entwickelt worden sind. Zu nennen sind hier die Möglichkeiten der Berechnung der thermodynamischen Eigenschaftentendenzen von Salzen und Salzgemischen (*ECOS-Runsalt*), die uns in die Lage versetzen, das Hydratations- bzw. Kristallisationsverhalten im Material vorherzusagen. Mit Kenntnis der vorhandenen Salze können Vorgaben zur Klimatisierung errechnet werden, die dann mit neuen Regelungstechniken umgesetzt werden können. Auf dem Gebiet der Mikrobiologie haben sich molekularbiologische und forensische Methoden etabliert, die eine verfeinerte Analyse der mikrobiologischen Belastung ermöglichen. Über allem steht die Erkenntnis, dass den klimatischen Bedingungen eine wesentliche Betrachtung zukommen muss.

Wir haben fünf Objekte ausgesucht, von denen wir wussten, dass die damaligen wissenschaftlichen und auch die restauratorischen Kollegen noch verfügbar waren, um nun nach 30 Jahren noch einmal die damaligen Arbeiten Revue passieren zu lassen und zu bewerten. Leider stellte sich noch im Laufe des Projektes heraus, dass einige Objekte nicht mehr die Voraussetzungen erfüllten, weil ehemalige Restauratorenkollegen mittlerweile verstorben sind.

Letztendlich haben wir uns für die Kirchen in Axien, Eilsum, Idensen, Süderende und das Heiligen-Geist-Hospital Lübeck entschieden. Das ursprünglich angedachte Objekt „Römische Bäder“ in Potsdam musste allerdings aus dem Projekt gestrichen werden, weil aus Sicherheitsgründen das Betreten mittlerweile nicht mehr erlaubt ist.

Wir haben alle Objekte besucht, die heutigen Eindrücke auf uns wirken lassen und mit den Erinnerungen und Berichten von damals verglichen und konnten zum Teil überraschend gute Ergebnisse vorfinden, aber auch Handlungsbedarf definieren, der heute weiterhin besteht.

Bei der kleinen **Dorfkirche in Axien**, der Nähe von Torgau, ist uns von damals in Erinnerung geblieben, dass sie in einem desolaten Zustand war. Die Kirche war gelegentlich von Hochwasser betroffen und in der Folge hat eine sehr starke Durchnässung der Innen- und Außenmauern stattgefunden. Bis in ca. anderthalb Meter Höhe lag an der Innenwand ein starker grüner Algenbewuchs vor. Wir haben damals vorgeschlagen, die Kirche an den Außenmauern mit einer wirksamen Dränage zu versehen, die Backstein-Fassade und die Dachentwässerung instandzusetzen, die Restaurierung der Wandmalereien aus dem frühen 13. Jahrhundert vorzunehmen und eine anschließende Klimatisierung zu installieren.

Nach 30 Jahren fanden wir die kleine Dorfkirche in erstaunlich gutem Zustand vor. Lediglich im Sockelbereich hinter dem Altar konnten noch Ausblühungen von Salzen und Abplatzungen des Innenputzes erkannt werden, was aber angesichts des Zustandes und der Vorgeschichte nicht verwunderlich war. Hier ist auch heute noch eine regelmäßige Kontrolle und Konsolidierung der geschädigten Bereiche anzuraten, was aber, gemessen an dem Aufwand einer Totalsanierung (wie sie damals vorgenommen werden musste), wesentlich wirtschaftlicher ist. Bei dem Ortstermin konnten wir auch die zuletzt tätigen Restauratoren einbinden, die ebenfalls seit mehr als 20 Jahren nicht mehr vor Ort gewesen sind. Auch sie waren überrascht über den guten Zustand, sodass wir nach dem ersten Eindruck die seinerzeit vorgenommenen Maßnahmen in Axien als sehr erfolgreich bewerten konnten.

Die **Sigwards-Kirche in Idensen** war ein bedeutendes Projekt in der Anfangsphase der Wandmalerei-Forschung. Dort wurden große Anstrengungen und auch finanzieller Einsatz aufgewendet, um die dortigen Malereien aus dem 12. Jahrhundert zu erhalten und zu konservieren. Es ist uns in Erinnerung geblieben, dass der Schlüsseffekt zur Erhaltung der Malerei eine ausgefeilte Klimatisierung ist. Diese wurde damals von der Kirchengemeinde beauftragt, von der Denkmalpflege unterstützt und von der Firma Berling (Braunschweig) umgesetzt. Wir konnten uns vor Ort davon überzeugen, dass diese Maßnahmen außerordentlich erfolgreich waren, so dass die Verwitterung und Schädigung der Malereien dadurch fast vollständig gestoppt werden konnten. Leider mussten wir aber auch erfahren, dass die automatische Klimatisierung offenbar aus Kostengründen nicht mehr weiter beauftragt wurde und in Eigenregie erfolgen sollte (was, wie in den meisten vergleichbaren Fällen, nicht funktioniert hat). Unser Besuch und das Rekapitulieren der Restaurierungs- und Untersuchungsmaßnahmen in Idensen haben immerhin dazu geführt, dass die Gemeinde sich überzeugen ließ, auch weiterhin kontrollierte Klimamessungen zu beauftragen. Auch Idensen ist als Erfolg anzusehen, wir alle waren erfreut über den Zustand der Malerei.

Die **evangelisch-reformierte Kirche in Eilsaum** war ebenfalls ein Schlüsselobjekt in der damaligen Forschung. Sie war in dramatisch schlechtem Zustand, ebenfalls von Feuchtigkeit betroffen. Wir können uns noch daran erinnern, dass als erste Notmaßnahme die Reparatur der Dachrinnen erfolgen musste und die Schalllücken im Turm, über die sehr viel Regenwasser eingetragen

wurde, verschlossen werden sollten. Das ist dann auch relativ schnell geschehen. Auch in Eilsum kam der Klimatisierung eine Schlüsselrolle zu und wir waren gespannt, wie sich diese Maßnahmen auf den Zustand der Apsis-Malerei ausgewirkt haben. Auch hier waren wir überrascht, welches gute Klima in der Apsis herrscht. Nach dem Aufstieg in den Turm konnten wir beobachten, dass das Mauerwerk mittlerweile in einem sehr trockenen Zustand vorliegt und auch keine Modergerüche (wie sie damals sofort auffielen) mehr auftraten. Die Zwickel im Apsisgewölbe waren damals mit Schutt gefüllt und mit Regenwasser durchnässt. Heute gibt es keine Feuchtester mehr und auch die einfache Klimatisierung funktioniert weiterhin. Wie erfolgreich diese Maßnahme war, konnte man daran erkennen, dass im Kirchenschiff ein deutlicher Modergeruch zu bemerken war. Aber die Apsis ist von dieser Belastung befreit. Wir hatten dieses positive Ergebnis so nicht erwartet und waren auch hier positiv überrascht. An einer Stelle der Malerei fiel aber ein starker Algenbewuchs auf, dessen Ursache nicht abschließend ermittelt werden konnte. Sehr wahrscheinlich handelt es sich um überschüssige Konservierungsmittel, die den Algen als Feuchtereservoir dienen.

In **Süderende in der Sankt Laurentius Kirche** waren die Wandmalereien damals sehr stark geschädigt, nicht nur durch klimatisch schlechte Bedingungen, sondern auch durch fehlgeschlagene Restaurierungsmaßnahmen. Wir haben damals empfohlen, eine thermische Entkopplung des Dachbodens von den Gewölben vorzunehmen. Es wurde Isoliermaterial auf das Gewölbe gelegt, dessen Materialstärke uns aus heutiger Sicht sehr gering vorkam, aber dennoch offenbar ihren Zweck erfüllt. In der Rückschau zu dem damaligen Zustand können wir heute nach dem ersten Eindruck keinen fortgeschrittenen Schaden entdecken. Die Klimatisierung, die damals vorgeschlagen wurde, ist allerdings heute nicht mehr im ausreichenden Zustand aktiv. Offenbar ist ein System installiert worden, was aber heute nicht mehr arbeitet und vermutlich sind auch falsche Regelungsparameter eingestellt. Hier ist die deutliche Empfehlung, dieses System wieder in den funktionierenden Zustand zu versetzen. Damit kann der gute Eindruck auch in Zukunft erhalten bleiben. Süderende zeichnete sich damals und auch heute noch als problematisch aus, wenn die Situation der Salze betrachtet wird. Nachberechnungen zeigten, dass die damals vorgeschlagenen Klimatisierungsparameter auch heute noch sinnvoll sind und angewendet werden können.

Das Objekt **Heiligen-Geist-Hospital in Lübeck** wurde als Ersatz für die römischen Bäder mit in das Projekt aufgenommen. Der Vorteil war, dass zwar nicht mehr der seinerzeit leitende Restaurator Jochen Seebach zur Verfügung stand, nun aber mit der Firma Taubert (Dresden), vertreten durch Dipl.-Restaurator Sven Taubert, die nötige Erfahrung aus den damaligen Restaurierarbeiten aktiviert werden konnte. Bei diesem Objekt stellte sich allerdings heraus, dass erheblicher Handlungsbedarf besteht. Bei näherem Hinsehen auf dem eigens für die Inaugenscheinnahme aufgestellten Gerüst sind deutlich Korrosionserscheinungen durch abstehende Schollen, oberflächennahe Salzausbildungen und bei leichtem Luftzug sich bewegende, biogene Auflagerungen (Spinnwebfäden) erkennbar. Die Stiftung „Frau und Kultur e. V. – Gruppe Lübeck“, die für dieses Objekt zuständig ist, wurde unterrichtet und hat zugesagt, entsprechende Maßnahmen zu ergreifen und zu finanzieren.

Alles in allem muss festgehalten werden, dass wir mit dem Allgemeinzustand der untersuchten Objekte sehr zufrieden waren und dass offenbar die Maßnahmen, die von uns jungen

Wissenschaftlern damals vorgeschlagen wurden, größtenteils umgesetzt wurden und auch zum Erfolg geführt haben. Dennoch müssen wir immer wieder anmahnen, dass regelmäßige Kontrollen durch erfahrene Restauratoren erfolgen sollten und insbesondere auf die Funktionalität und die richtige Ausführung von Klimatisierungsmaßnahmen ein Augenmerk gelegt werden muß. Vom Klima hängen nahezu alle Faktoren ab, die die Korrosion von Wandmalerei-Oberflächen begünstigen oder verhindern können. Dazu gehören im Mauerwerk befindliche Salze und auf der Oberfläche wachsende Organismen, die ebenfalls ein hohes Schadenspotenzial verkörpern. Hinsichtlich der Salze sollte eine größtmögliche klimatische Konstanz vorliegen – abhängig von der Art und der Zusammensetzung der Salze. Temperatur und Luftfeuchtigkeit dürfen zu keiner Wechselbelastung zwischen Auskristallisation und Lösung der Salze führen. Dabei spielt die Höhe der Feuchtigkeit keine entscheidende Rolle, vielmehr muß Wechselfeuchte vermieden werden. Bezüglich der Mikrobiologie allerdings sollte eine gewisse Grundfeuchtigkeit im Innenraum nicht überschritten werden, um damit die Lebensgrundlage von Mikroorganismen zu verschlechtern. Allgemein hat sich bestätigt, dass die Kombination von wissenschaftlichen Untersuchungen zur Bestimmung von Salzen und Mikroorganismen und deren Schadenspotentialen und die daraus resultierende klimatische Beurteilung der Raumluft mit anschließender professioneller Durchführung von Restaurierungsmaßnahmen damals wie heute zum Erfolg führen.

### **Monitoring- und Evaluierungsverfahren**

Die Befahrung der exemplarisch ausgewählten Objekte, die im Rahmen des BMFT-Projektes bearbeitet worden sind, erwies sich als sehr aufschlussreich – besonders auch, weil ehemals an den einzelnen Projekten Beteiligte noch subjektive Erfahrungen und Erinnerungen in die aktuell abgeschlossene Visitation nach etwa 25 Jahren einbringen konnten. Das wird nicht immer so sein und bleiben können. Gerade deswegen ist es wichtig darüber nachzudenken, welche Methoden des Monitorings gefunden werden können, um die wertvollen und dabei so empfindlichen Wandbilder in ihren jeweiligen Bausituationen bei der Alterung zu begleiten und rechtzeitig Schadensfortschritte zu erkennen, die Ursachen schnell festzustellen und kurzfristig zu handeln.

#### **Monitoring:**

Es besteht in der Fachwelt allgemeiner Konsens, dass die regelmäßige Objektbeobachtung – das Monitoring – ein sinnvolles Instrument ist, um verschiedene Objektzustände zu unterschiedlichen Zeitpunkten zu vergleichen und dabei Schadensfortschritte zu dokumentieren.

Um die Dokumentation von Schadensfortschritten und Veränderungen ging es auch im hier beschriebenen Projekt. Dabei wurden die Bereiche und Teilflächen an den einzelnen Objekten vergleichend herangezogen, die ehemals besonders stark geschädigt waren und erst nach dem BMFT-Forschungsprojekt bearbeitet worden sind.

#### **Regelmäßige Visitationen:**

Die Beobachtungen an den befahrenen Objekten zeigen, dass der jeweils festgestellte Zustand sehr unterschiedlich ausfällt. Dabei kommen Schadensbilder zum Tragen, die ganz offensichtlich über längere Zeiträume entstanden sind (z. B. Heiligen-Geist-Hospital Lübeck).

zeigt, dass die vor über 20 Jahren zuletzt konservierten Wandmalereien viel zu lange nicht mehr betrachtet oder untersucht, manchmal nicht einmal sauber gehalten (Spinnweben!) worden sind. Dies und das Erfassen von beginnenden oder sich gerade im Prozeß befindlichen Schadensvorgängen ist Gegenstand dringend erforderlicher – vor allem regelmäßiger – „Durchsichten“.

Zustandsvergleiche:

Der direkte, breit angelegte Vergleich von Zuständen ist am Objekt ohne größeren Aufwand, wie z. B. Gerüststellung oder Einsatz von Hubsteigern nicht möglich. Hohlräumdetektion oder Probenahmen sind ebenso mit Zugangstechnik verbunden, wie Makrofotografie oder gar Mikroskopie an der Oberfläche. Aber auch Festigkeitsprüfungen an Putzmörteln oder an Farboberflächen erfordern die haptische Beurteilung des Untersuchenden.

Gleichwohl können einige der Schadenskriterien durch **optische Vergleiche** beurteilt werden. Verschiedene Schadensarten – hier seien beispielsweise Salzeffloreszenzen an der Malerei-Oberfläche genannt – lassen sich gut durch optische Oberflächenveränderungen erkennen. Verstärken sich Salzausblühungen, verstärkt sich auch der markante weiße Kristallisationsbelag.

Feuchte Flächen – auch hygroskopische Feuchte – markieren sich dunkel. Rissbildungen sind optisch auch gut zu erkennen und zu messen.

Mapping – Fotografie – Kartierung:

Die oben genannten und weitere optische Veränderungen lassen sich durch fotografische Mittel gut dokumentieren. Werden nun Fotoaufnahmen aus unterschiedlichen Aufnahmezeitpunkten maßstäblich entzerrt und übereinander- oder nebeneinandergelegt (mapping), so sind optische Veränderungen sehr gut erkennbar. Durch das Auflegen von Kartierungsebenen (digital layers) können die Schadensbilder und -verläufe visualisiert und auch mengenmäßig gemessen werden. Eine präzise Eingrenzung von Schäden und Maßnahmen wird damit möglich, erspart Zeit, Kosten und ist zudem genauer als alle Empirie und verbale Beschreibung.



Abb. 7-1 (links): Ausgangsbild mit Schäden 1991.

Abb. 7-2 (rechts): Kartierung von 1991 mit Permanent-Schreiber auf Transparentfolie.





Abb. 7-3: 2023 > Die Kartierung von 1991 wurde digitalisiert, entzerrt und damit maßstäblich referenziert sowie digital nachkartiert (farbige Schadensklassen).

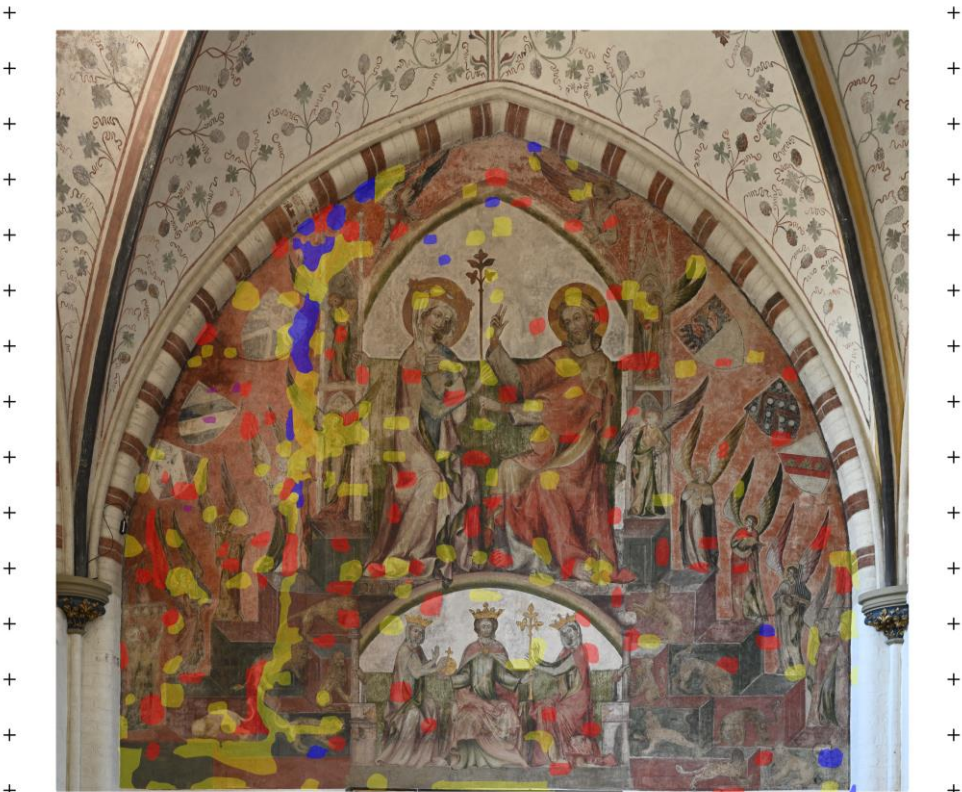


Abb. 7-4: 2023 > aktuelle Bildaufnahme (hochauflöstes Foto) wurde entzerrt und maßstäblich referenziert; Die digital nachkartierten Schadensklassen von 1991 wurden auf das neue Bild gemappt und ermöglichen so den direkten Vergleich zwischen den 1991 kartierten Schäden und deren Entwicklung/ Zustand bis 2023.

Klima-Datenerfassung:

Die Erfassung von Raumklimadaten und/ oder Klimamessungen an ausgewählten Punkten an den Wandmalereien und im Umfeld der Wandmalereien sind wichtig für die konservatorische Schadensprävention.

Oft werden nach Abschluß von konservatorischen Interventionen objektspezifische Klimabedingungen - sog. „Klimakorridore“ – vorgegeben, die konsequenterweise auch überwacht werden müssen. So war es auch nachzulesen in den meisten der Abschlußberichte am Ende der vom BMFT geförderten Forschung bzw. der sich daran anschließenden Restaurierungskampagnen.

Nur dadurch können unvorhersehbare klimatische Änderungen erfasst und kritisch bewertet werden.

### **Schlußbemerkung**

Regelmäßige Untersuchungen:

Für alle aktuell befahrenen Objekte wird gleichermaßen die Empfehlung ausgesprochen, regelmäßige Durchsichten von qualifizierten Restauratoren durchführen zu lassen. Diese vergleichsweisen kleinen Kampagnen von 1 bis 2 Tagen Dauer analysieren den jeweils aktuellen Objektzustand, ermöglichen kleinumfängliche Sofortmaßnahmen und zeigen kurz- und mittelfristigen konservatorischen Handlungsbedarf auf. Dadurch können größere Interventionen besser und vor allem frühzeitig vorbereitet und finanziell abgesichert werden.

Klimakontrolle:

Raumklimakontrolle ist wichtig, wie das aktuelle Projekt wiederholt gezeigt hat. Sie kann unmittelbar zum Erhalt und zu Kostenersparnis beitragen.

Das regelmäßige Erfassen und Kontrollieren der Raumklimadaten ist deshalb in allen Fällen einzuführen bzw. fortzusetzen – im Interesse des Wandmalereierhalts und der Kostenersparnis für die verantwortlichen Eigentümer und Nutzer.

Kosten:

Der Kostenrahmen zur Konservierung/ Restaurierung eines der beiden Wandbilder im Heiligen-Geist-Hospital lag seinerzeit bei **ca. 170 TDM**. Solch große Maßnahmen sind nur selten zu stemmen – und auch dann ist der Restaurierungstau meist sehr groß – ebenso wie die Verluste an originaler Substanz.

Kleine, regelmäßige Inaugenscheinnahmen und Monitoring mit geringem Kostenrahmen verhindern große kostenintensive Interventionen bzw. helfen dabei, solche zeitlich weit hinauszuschieben.

## 8 Literatur

- [1] M. Scheer, *Masterarbeit*, HAWK Hildesheim, Hildesheim, **2007**.
- [2] W.E. Krumbein, S.E. Diakumaku, K. Petersen, T. Warscheid, C. Urzi in *Conservation of Stone and Other Materials* (Eds.: M.J. Thiel, E. & F.N. Spon), Chapman and Hall, London, **1993**.
- [3] R.J. Koestler, E.D. Santoro, *Assessment of the Susceptibility to Biodegradation of Selected Polymers and Resins. Final Report.*, Getty Conservation Institute, Los Angeles, **1988**.
- [4] C. Heyn, K. Petersen, W.E. Krumbein, *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* **1996**, *10*, 87–105.
- [5] M. Berner, K. Petersen, *Restauro* **1992**, *3*, 164–167.
- [6] I. Töpfer, *Diplomarbeit*, Universität Oldenburg, Oldenburg, **1998**.
- [7] K. Petersen in *VDR Schriftenreihe 1* (Eds.: A. Rauch, S. Miklin-Kniefacz, A. Harmssen), VDR, Bonn, **2004**.
- [8] C. Meier, *Diplomarbeit*, FH Hildesheim, Hildesheim, **2004**.
- [9] I. Lojek, *Masterarbeit*, HAWK Hildesheim, Hildesheim, **2017**.
- [10] C. Gramann, *Diplomarbeit*, FH Hildesheim, Hildesheim, **1998**.
- [11] A.A. Gorbushina, K. Petersen, *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2000**, *46*, 277–284.
- [12] E. Burghard, *Bachelorarbeit*, HAWK Hildesheim, Hildesheim, **2009**.
- [13] J. Klocke, *Abschlussbericht zum AGIP-Projekt 2001.418 „Methodenentwicklung zur praxisorientierten Erfassung von Mikroben an Kunstobjekten*, **2004**.
- [14] „Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen (Schimmelpilz-Leitfaden)“, can be found under [https://www.igutec.de/download/leitfaden\\_schimmelpilzsanierung.pdf](https://www.igutec.de/download/leitfaden_schimmelpilzsanierung.pdf).
- [15] K. Petersen, U.-M. Fritz, G. Krüger in *Klimaethisches Architekturkonzept zur nachhaltigen Fortentwicklung historischer Kirchenbauwerke* (Eds.: H. Garrecht, S. Reeb, D. Ullmann), Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, **2017**.
- [16] P. Möhlenhoff, L. Müller, A.A. Gorbushina, K. Petersen, *FEMS Microbiol. Lett.* **2001**, *195*, 169–173.
- [17] O. Ableitner, *Einführung in die Molekularbiologie: Basiswissen für das Arbeiten mit DNA und RNA im Labor*, Springer Verlag, Wiesbaden, **2018**.
- [18] G. Pinar, C. Gurtner, W. Lubitz, S. Rölleke, *Meth. Enzymol.* **356-366**, 336.
- [19] P. Möhlenhoff, A.A. Gorbushina, P. Koerting, W.E. Krumbein, K. Petersen in *Of Microbes and Art. The Role of Microbial Communities in the Degradation and Protection of Cultural Heritage. International conference on microbiology and conservation (ICMC)* (Eds.: O. Ciferri, P. Tiano, G. Mastromei), Kluwer Academic/Plenum Publishers, New York, **1999**.
- [20] H.-J. Müller, D.R. Prange, *PCR-Polymerase-Kettenreaktion*, Springer Verlag, Wiesbaden, **2016**.
- [21] E. Willerslev, A. Cooper, *Proc. R. Soc. B* **2005**, *272*, 3–16.
- [22] K. Prüfer, F. Racimo, N. Patterson, F. Jay, S. Sankararaman, S. Sawyer, A. Heinze, G. Renaud, P.H. Sudmant, C. de Filippo et al., *Nature* **2014**, *505*, 43–49.
- [23] J. Schultz, J. Arslanoglu, C. Tavzes, K. Petersen, *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* **2009**, *1*, 129–139.
- [24] J. Arslanoglu, J. Schultz, J. Loike, K. Petersen, *J. Biosci.* **2010**, *35*, 3–10.

- [25] C. Bläuer, B. Rousset in *Proceedings of SWBSS 2014* (Ed.: H. de Clercq), Peeters Printers, Herent, Belgium, **2014**.
- [26] M. Steiger, A. E. Charola, K. Streflinger in *Stone in Architecture* (Eds.: S. Siegesmund, R. Snethlage), Springer, Berlin, Heidelberg, **2014**.
- [27] A. Arnold, K. Zehnder in *The Conservation of Wall Paintings. Proceedings of a Symposium Organized by the Courtauld Institute of Art and the Getty Conservation Institute, London, July 13-16, 1987* (Ed.: S. Cather), Getty Conservation Institute, Los Angeles, **1996**.
- [28] P. Mora, L. Mora, P. Philippot (Eds.) *Butterworths series in conservation and museology*, Butterworths, London, **1984**.
- [29] M. Steiger, *J. Cryst. Growth* **2005**, 282, 455–469.
- [30] M. Steiger, *Resto. Build. Monum.* **2005**, 11, 419–432.
- [31] C. A. Price, P. Brimblecombe in *Preventive Conservation: Practice, Theory and Research* (Ed.: International Institute for Conservation), London, **1994**.
- [32] D. Bionda, *Dissertation*, ETH Zürich, Zürich, **2006**.
- [33] C. A. Price (Ed.) *Studies / European Commission / Community Research, Vol. 11*, Archetype, London, **2000**.
- [34] K. S. Pitzer (Ed.) *Activity Coefficients in Electrolyte Solutions*, CRC Press, Boca Raton, **1991**.
- [35] M. Steiger, A. Heritage in *12<sup>th</sup> International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone*, Columbia University, New York, **2012**.
- [36] S. Godts, M. Steiger, S.A. Orr, A. Stahlbuhk, J. Desarnaud, H. de Clercq, V. Cnudde, T. de Kock, *Heritage*, **2022**, 5, 3648–3663.
- [37] S. Godts, M. Steiger, S.A. Orr, T. de Kock, J. Desarnaud, H. de Clercq, V. Cnudde, *Sci. Data*, **2021**, 9, 324.
- [38] A. E. Charola, J. Pühringer, M. Steiger, *Environ. Geol.* **2007**, 52, 339–352.
- [39] B. Menéndez, *J. Cult. Herit.* **2017**, 24, 22–30.
- [40] M. Steiger in *The Effects of Air Pollution on the Built Environment* (Ed.: P. Brimblecombe), Imperial College Press, London, **2003**.
- [41] U. Kalisch, *Ergebnisse der BMFT-Forschung an der Dorfkirche Axien*, Halle/Saale, **1995**.
- [42] U. Richter, *Untersuchungsbericht Dorfkirche Axien*, Hamburg, **1993**.
- [43] A. Pohl, *Dokumentation der Restaurierung der romanischen Gewölbe- und Wandmalerei im Chor und in der Apsis der Dorfkirche in Axien*, Sülzhayn, **2001**.
- [44] R. Niemeyer, *Projektzwischenbericht 20090131 – Prüfung der Nachhaltigkeit der im BMBF-geförderten Forschungsprojekt „Denkmalforschungen“ in den Jahren 1987 – 1995 in der ref. Kirche Krummhörn-Eilsum, Ldkr. Aurich, durchgeführten Konservierungsmaßnahmen als Grundlage für Wartungs- und Pflegemaßnahmen*, Hannover, **2009**.
- [45] H.-J. Schwarz, *Bericht zu den Untersuchungen im Rahmen der BMBF Forschungsprojekte in den Jahren 1987 – 1995, Untersuchungsergebnisse – Erhaltungskonzepte*, Hannover, **1997**.
- [46] V. Schostak, M. Tennikat, H. Juling, *Entwicklung und Durchführung eines Untersuchungskonzeptes zum langfristigen Erhalt einer Wandmalerei*, Bremen, **1995**.
- [47] J. Seebach, *Die Wandmalerei des Heiligen-Geist-Hospital zu Lübeck, Forschungsprojekt des BMBF*, Emekendorf, **1995**.
- [48] C. Wittenburg, *Grafiken zum Untersuchungsbericht Heiligen-Geist-Hospital, Lübeck*, Hamburg, **1996**.

- [49] J. Seebach, *Bericht über die Restaurierung der Wandmalerei „Salomonischer Thron“ in der Kirche des Heiligen-Geist-Hospital zu Lübeck*, Emekendorf, **1998**.
- [50] J. Seebach, *Bericht über die Restaurierung der Wandmalerei „Majestas Domini“ in der Kirche des Heiligen-Geist-Hospital zu Lübeck*, Emekendorf, **1999**.
- [51] Butt Restaurierungen, *Heiligen-Geist-Hospital zu Lübeck, Konservierung und Restaurierung schadhafter Bereiche der Wand- und Gewölbmalereien*, Lübeck, **2015**.
- [52] H.-J. Schwarz, *Die Alte Kirche in Wunstorff/Idensen – Bericht zu den Untersuchungen im Rahmen der BMBF Forschungsprojekte in den Jahren 1987 – 1996, Untersuchungsergebnisse – Erhaltungskonzept*, Hannover, **1997**.
- [53] H.-J. Schwarz, *Die Alte Kirche Idensen – Bild der Kirche; Abschlussbericht zum Verbundprojekt „Wandmalereischäden“ im Rahmen der BMFT Denkmalpflegeforschung*, Hannover, **1996**.
- [54] M. Tennikat, V. Schostak, H. Juling, *Kirche St. Laurentii in Süderende auf Föhr – Untersuchungen und Therapieempfehlungen zu klimatisch induzierten Schäden an den malereitragenden Gewölben des Langhauses*, Bremen, **1996**.
- [55] M. Steiger in *Proceedings of the 4<sup>th</sup> International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean, Rhodes 6 – 11 May 1997* (Eds.: A. Moropoulou, F. Zezza, E. Kollias, I. Papachristodoulou), Athens, **1997**.
- [56] U. Richter, *Untersuchungsbericht Kirche St. Laurentii Süderende*, Hamburg, **1993**.
- [57] U. Richter, *Untersuchungsbericht Untersuchungskampagnen vom 7.-11.2.1994 und vom 11.-15.4.1994*, Hamburg, **1995**.
- [58] U. Richter, *Ergebnisse der Rieselproben vom Kanzeldach*, Hamburg, **1995**.