

Untersuchungen zu Umwandlung, Mobilisierung und Rekrystallisation von Gips auf stark salzbelastetem Untergrund von national bedeutenden Wandmalereien am Beispiel des Schwahls des Doms St. Petri zu Schleswig

A. Stahlbuk,¹ J. Heller,³ B. Löffler-Dreyer,⁴ A. Dahm,²
D. Jonkanski,⁴ C. Leonhardt,³ M. Steiger¹

und Beiträgen von:

C. Lasch Pittkowski, T. Meier, E. Erkul, T. Steinkraus, Y. Esel, S. Hintz, D. Schulte-Kortnack, M. Tesch, H. Drengemann

Abschlussbericht zum DBU-geförderten Vorhaben
Aktenzeichen: 32169
(Förderzeitraum: 08/2015–09/2018)



Projektpartner:

- ¹ Universität Hamburg
Fachbereich Chemie
- ² Landeskirchenamt Kiel,
Dezernat Bauwesen
- ³ Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege Kiel
- ⁴ Landesamt für Denkmalpflege
Schleswig-Holstein

Herausgeber

Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein
Sartori & Berger-Speicher
Wall 47/51
24103 Kiel
Tel.: 0431 69677-60
Fax: 0431 69677-61
E-Mail: denkmalamt@ld.landsh.de

www.denkmal.schleswig-holstein.de

Redaktion

Diana Härtrich

Gestaltung

Andrea Kelb

Titelbild

Dom St. Petri zu Schleswig, Ostflügel des Schwahls, Aufn. 2018. Foto: Alexander Voss.

Auflage

500 Exemplare

Herstellung

Carius-Druck Kiel

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Jede Verwertung ist ohne Zustimmung des Landesamtes für Denkmalpflege Schleswig-Holstein unzulässig. Dies gilt insbesondere für Vervielfältigungen, Übersetzungen, Mikroverfilmungen und die Einspeicherung und Verarbeitung in elektronischen Systemen.

© 2019 Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein

ISBN 978-3-9820646-0-4

Dem Gilb auf der Spur: Zu Gips, Salz und Überzügen an den historischen Malereien im Schwahl des Schleswiger Doms

Publikation zum DBU-Projekt „Untersuchungen zu Umwandlung,
Mobilisierung und Rekristallisation von Gips auf stark salzbelastetem
Untergrund von national bedeutenden Wandmalereien am Beispiel
des Schwahls des Doms St. Petri zu Schleswig“

August 2015 bis Oktober 2018
Projekt Az. 32169/01

Inhaltsverzeichnis

- 3 Vorwort
- 4 Zur heutigen Nutzung des Schwahls aus Sicht der Kirchengemeinde
Christiana Lasch-Pittkowski
- 5 Ziel des Forschungsprojektes
Michael Steiger

Der Schwahl – Überblick zur Bau-, Kunst- und Restaurierungsgeschichte

- 9 Abriss zur Bau- und Kunstgeschichte
Dirk Jonkanski
- 15 Bauliche Situation
Arnulf Dahm
- 21 Restaurierungsgeschichte der Wand- und Gewölbemalereien
Birgid Löffler-Dreyer
- 28 Rückblick auf die konservatorischen Maßnahmen bis 2015
Julika Heller/Christian Leonhardt

Untersuchungen zur Schadenssituation, Methoden und Konzepte

- 35 Erfassung der Bestandsmaterialien – Schadensphänomene und Schadensmechanismen
Julika Heller
- 41 Evaluation baulicher Veränderungen und konservatorischer Maßnahmen bis 2015
Julika Heller
- 47 Klimatische Einflüsse
Christian Leonhardt
- 53 Salz und Klima
Amelie Stahlbuhk/Michael Steiger
- 62 Die Verwendung der Kammermethode zur Untersuchung des Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhaltens poröser Materialien
Amelie Stahlbuhk et al.
- 71 Identifizierung und Bewertung der Schädigungswirkung der gelben Oberflächenverfärbung
Amelie Stahlbuhk/Julika Heller
- 78 Erarbeitung eines Konzeptes zur Reduzierung gealterter Fixiermittel auf Putz- und Maleroberflächen
Julika Heller/Amelie Stahlbuhk
- 85 Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5
Thomas Meier et al.

Zusammenfassung und Ausblick

- 96 Zusammenfassung der Ergebnisse
Michael Steiger
- 99 Ausblick
Christian Leonhardt
- 100 Abbildungsnachweis
- 101 Danksagung

Vorwort

1824/25 war der „Schwahl“ genannte, um 1310/20 errichtete Kreuzgang am Schleswiger Dom nur knapp dem Abriss entgangen. Als man ihn nach seiner Rettung neu weihte, wurden durch den feuchten Kalk zunächst die roten Umrisslinien eines christologischen Wandmalereizyklus auf den Bogenfeldern erkennbar. Diese Malereien zählen heute zusammen mit den polychromen Bemalungen der hofseitigen Wände und der Gewölbe sowie der Ausmalung des hohen Chors aus der Zeit um 1330 zu den frühesten und bedeutendsten gotischen Wandmalereien in Schleswig-Holstein. Diesen Schatz zu erhalten und zu pflegen ist eine Herausforderung, der sich Eigentümer, Denkmalpfleger, Restauratoren und Naturwissenschaftler kontinuierlich und mit großem Engagement stellen, denn Salzanreicherungen und Verwitterungsprozesse gefährden dieses wertvolle Kulturerbe.

Seit der Wiederentdeckung der Schwahlmalereien zeugen vier umfangreiche Restaurierungen von den Bemühungen um ihren Erhalt, wobei sich die Abstände zwischen den einzelnen Maßnahmen zunehmend verringert haben. Stand zunächst noch die Wiederherstellung des Schauwerts im Fokus einer Restaurierung, so stellten die jüngeren Maßnahmen seit den 1960er Jahren die dauerhafte Konservierung der Malereien und ihres Putzuntergrundes in den Vordergrund. Daraus ergaben sich restauratorische und naturwissenschaftliche Fragestellungen, die sich mit dem Beginn der jüngsten Maßnahme ab 2006 vor allem mit dem Raumklima, der Belastung durch bauschädliche Salze, der Umwandlung und Rekristallisation von substanzschädigenden Gipskrusten und zuletzt mit einer unerklärlich rasch wiederaufgetretenen Gelbfärbung einzelner Wandmalereibereiche beschäftigten.

Dank der Unterstützung und Förderung der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) gelang es, im Rahmen eines interdisziplinär angelegten Forschungsprojektes diesen Phänomenen auf den Grund zu gehen und einen gemeinsamen Lösungsansatz zu entwickeln. In der vorliegenden Publikation kommen die Projektpartner – das sind die Universität Hamburg (Fachbereich Chemie), die Werkstatt für Kunst- und Denkmalpflege des Restaurierungszentrums Kiel, das Baudezernat des Landeskirchenamtes Kiel und das Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein – mit



ihren jeweiligen Fachbeiträgen zu Wort. Schwerpunkt der Forschungsarbeiten waren speziell auf die vorliegende Problematik angewandte und auch neu entwickelte Untersuchungsmethoden der Universität Hamburg – auch in Kooperation mit der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Institut für Geophysik) und im Zusammenwirken mit den Fachrestauratoren des Restaurierungszentrums Kiel.

Blick auf die winterliche Domliegenschaft in Schleswig, im Vordergrund der Schwahl, Aufn. 2009.

Das gemeinsam mit der Schleswiger Domgemeinde erarbeitete Konzept für den restauratorischen Umgang mit den historischen Schwahlmalereien und ihre zukünftige Pflege und Wartung resultiert aus den neu gewonnenen Erkenntnissen. Die Handlungsanweisungen können darüber hinaus auch für den Umgang mit anderen historischen Wandmalereiobjekten mit ähnlichen Schadensbildern und Problemstellungen von Nutzen sein.

Dr. Michael Paarmann
Landeskonservator,
Landesamt für Denkmalpflege
Schleswig-Holstein

Jan Simonsen
Oberkirchenrat,
Baudezernat des
Landeskirchenamtes Kiel

Christiana Lasch-Pittkowski

Zur heutigen Nutzung des Schwahls aus Sicht der Kirchengemeinde

Der Dom ist die weit in die Region ausstrahlende Stadtkirche für Schleswig und zugleich die Bischofskirche für den Sprengel Schleswig und Holstein der Nordkirche. Dadurch ergibt sich eine vielfältige Nutzung für den Schwahl:

PROZESSIONSGANG

Vor großen, festlichen Gottesdiensten ziehen die Geistlichen und alle Beteiligten durch den Schwahl in den Dom: bei Konfirmationen und Konfirmationsjubiläen, Ordinationen, Einführungen und Verabschiedungen von Bischöfen und Pastoren, bei Kirchenjubiläen (500 Jahre Reformation!). Der Gang durch den Schwahl hat dabei eine wichtige Funktion: Er ist wie ein Auftakt, er hilft, sich zu sammeln und ruhig zu werden.

GOTTESDIENSTLICHER RAUM

Gottesdienste mit mehreren Stationen, zum Teil unter Einbeziehung der Wandmalereien, werden ebenso im Schwahl gefeiert. Auch gelegentlich ein Abendsegen zum Abschluss eines ereignisreichen Tages. Die Raum- und Klangerfahrungen beeindruckend. Da man an Himmelfahrt ins Freie gehen muss, feiern wir den Himmelfahrtsgottesdienst traditionell im Innenhof des Schwahls, mit Posaunenchor und E-Piano, mal im herrlichen Sonnenschein, häufiger bei heftigem Wind.

SEHENSWÜRDIGKEIT

Der Schwahl steht Besuchern offen und wird auch bei Domführungen regelmäßig gezeigt. Der Trutzhahnstreit findet dabei immer Erwähnung. Flyer und eine Infotafel am Eingang zum Schwahl erzählen die Geschichte des Bauwerks und erläutern seine historische Bedeutung.

Führung durch den Schwahl, Aufn. 2013.

„RAUM DER STILLE“

Wer auch in der Hochsaison einen ruhigen Ort im Dom sucht, findet ihn im Innenhof des Schwahls.

Geschützt von den Mauern des Kreuzgangs in der Sonne oder unter dem Ginkgo zu sitzen und auf den Dom zu schauen, kann zu einer großen inneren Ruhe führen.

RAUM DER BEGEGNUNG

Regelmäßig lädt die Nordkirche zum Sommerempfang in den Schleswiger Dom ein – nach Gottesdienst und Grußworten bietet der Innenhof des Schwahls einen würdigen Rahmen für entspannte Gespräche zwischen Vertretern der Öffentlichkeit aus Stadt und Land und der Landeskirche. In der ersten Woche der Sommerferien laden die Jugendlichen der Kirchengemeinde zum Erdbeercafé in den Schwahl-Innenhof ein. Es hat sich zu einer Attraktion für Dombesucher, die Gemeinde und Menschen, die in der Nähe wohnen und arbeiten, entwickelt. Bei Konzerten des Schleswig-Holstein-Musikfestivals können Besucher in der Pause in den Schwahl und den Innenhof gehen, dort ein Glas Wein trinken und mit anderen Besuchern ins Gespräch kommen.

SCHWAHLMARKT

In der Tradition der mittelalterlichen Dommärkte findet seit 37 Jahren vom zweiten bis zum dritten Adventswochenende der weit über Schlesiens Grenzen hinaus bekannte Schwahlmarkt statt. Ein Kunsthandwerkermarkt, der sich für viele durch das besondere Ambiente im historischen Kreuzgang auszeichnet. Hier wird hochwertiges Kunsthandwerk verkauft, der Erlös ist für die Erhaltung der Kunstschätze im Dom bestimmt. Den Markt begleitet ein reichhaltiges Kulturprogramm im Dom: Konzerte, Lesungen, adventliches Singen, Vorträge und Führungen zu domspezifischen Themen. Durch Cafeteria, Punsch- und Wurststände ist der Schwahlmarkt auch ein beliebter Treffpunkt für die Gemeinde und viele Menschen aus der Umgebung.

DOMERWEITERUNG BEI GROSSVERANSTALTUNGEN

Bei Großveranstaltungen nutzen wir den Schwahl und den Innenhof für Arbeitsgruppen oder thematische Stationen: beim Treffen aller Pastorinnen und Pastoren des Sprengels genauso wie 2017 bei zwei Luthertagen mit jeweils fast 500 Schülerinnen und Schülern, an denen an 15 Stationen in und um den Dom und in der Stadt das Leben Martin Luthers präsentiert wurde.



Michael Steiger

Ziele des Forschungsprojektes

Wandmalereien gehören zu den wertvollsten, aber auch zu den empfindlichsten Kulturgütern. Durch die in Baustoffen wirksamen Schadensprozesse sind Malereischichten in besonderer Weise gefährdet, so dass ihre Konservierung hohe Ansprüche stellt. Einer der wichtigsten Vorgänge, die zur Schädigung historischer Baustoffe führen, beginnt mit der Anreicherung von Salzen im Mauerwerk.^{1,2} Auslösendes Moment für den Schadensprozess ist dabei das Kristallwachstum im Porenraum, das im Wesentlichen durch die komplexe Wechselwirkung der Salze mit dem Umgebungsklima bestimmt ist und zur mechanischen Schädigung durch Kristallisationsdruck führt. Erfolgt das Kristallwachstum im Bereich der Malereischicht, ist eine schwerwiegende Schädigung beinahe unausweichlich. Geeignete Konzepte für die Konservierung von Wandmalereien auf salzbelastetem Untergrund sind deshalb außerordentlich wichtig.

Für die Dynamik des Schadensprozesses ist der Austausch von Feuchtigkeit mit der Umgebung von entscheidender Bedeutung. Der Feuchtehaushalt eines Mauerwerks ist bestimmt durch den Eintrag von Schlagregen (Außenseite), den kapillaren Transport im Mauerwerk, die hygroskopischen Eigenschaften des im Mauerwerk vorhandenen Salzgemisches sowie durch das Innenraumklima (relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur). Unter ungünstigen, das heißt stark schwankenden

klimatischen Bedingungen kommt es zyklisch zur Salzkristallisation und deshalb zur schnellen Schädigung eines Mauerwerks beziehungsweise einer Maleroberfläche. Umgekehrt können bei günstigen klimatischen Bedingungen auch hohe Salzkonzentrationen in einem Mauerwerk in einem stabilen Zustand gehalten werden. Hier hängen die Möglichkeiten der passiven Konservierung eng mit den klimatischen Randbedingungen, den Erfordernissen einer bestimmten Nutzung eines Objektes und der Art des vorhandenen Salzgemisches zusammen.

Der Schwahl (Abb. 1) stellt ein typisches Beispiel eines Objektes mit wertvoller Wandmalerei auf stark versalztem Ziegeluntergrund dar. Das Mauerwerk weist einen sehr hohen Gehalt an Nitraten und Chloriden auf, die sich aufgrund recht günstiger klimatischer Verhältnisse derzeit in einem relativ stabilen Zustand befinden. Auf den Maleroberflächen findet sich zudem eine starke Vergipsung, die vielfach als gelbliche Kruste wahrgenommen wird und das ästhetische Empfinden beeinträchtigt. Die bisherigen konservatorisch-restauratorischen Schritte betrafen vor allem die Gipsumwandlung und die Salzreduktion im Mauerwerk. Direkt im Anschluss an diese Maßnahmen wurden zufriedenstellende Ergebnisse erzielt. Bei der langfristigen Beobachtung traten die Schadensphänomene allerdings erneut auf. In Bereichen mit besonders starker Verkrustung bildeten sich trotz sichtbarer

1 Innenhof des Schwahls mit Blick auf den Westflügel, Aufn. 2015.





2 Messungen zum Trocknungsverhalten des Mauerwerks mit Hilfe der Kammermethode, Aufn. 2018.

Gipsumwandlung nach wenigen Monaten neue gelblich verfärbte Krusten.

Aufgrund dieser Erfahrungen bestand Bedarf nach weiteren Untersuchungen, um die Ursachen der schnellen Neuverkrustung aufzuklären. Von einer kleinen Arbeitsgruppe wurde eine Forschungsskizze entwickelt und die Universität Hamburg (Fachbereich Chemie) und das Landeskirchenamt Kiel (Dezernat Bauwesen) haben bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) entsprechende Fördermittel erfolgreich beantragt. Als weitere Projektpartner waren die Werkstatt für Kunst und

Denkmalpflege (im Restaurierungszentrum Kiel) sowie das Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein in die Antragstellung eingebunden.

Als Arbeitshypothese wurde bei der Beantragung des Vorhabens zunächst eine andauernde Infiltration des Außenmauerwerks in Verbindung mit einer erhöhten Mobilisierung von Gips infolge der hohen Gehalte an hygroskopischen Salzen im Mauerwerk als Hauptursache der schnellen Neuverkrustung angesehen. Als erstes Teilziel des Vorhabens sollte deshalb systematisch untersucht werden, ob die beobachtete beschleunigte Bildung oberflächlicher Gipsanreicherungen ursächlich mit der erhöhten Belastung des Mauerwerks mit leicht löslichen Chloriden und Nitraten im Zusammenhang steht. Aufgrund der im Verlauf des Vorhabens gewonnenen neuen Erkenntnisse über die Ursache der gelblichen Verfärbungen wurde dieses Teilziel später modifiziert und auf die Entwicklung eines geeigneten restauratorischen Konzeptes für ihre Reduktion erweitert.

Neben der rein ästhetischen Wirkung der oberflächlichen Krusten war auch von großem Interesse, wie sich das vorhandene Salzsystem – bestehend aus gleichmäßig über das Mauerwerk verteilten hygroskopischen Nitraten und Chloriden sowie dem unmittelbar an der Oberfläche angereicherten Gips – bei Veränderungen der klimatischen Bedingungen verhält. Hier war insbesondere auch eine Untersuchung des Einflusses der Gipschichten auf die Dynamik des Wasserhaushaltes von besonderem Belang. Ein wesentliches Teilziel des Vorhabens bestand also in der Beantwortung der Frage, ob sich die beobachteten Krusten und die damit einhergehenden oberflächlichen Verdichtungen negativ auf den Feuchtehaushalt, also das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten des Mauerwerks, auswirken. Im Rahmen des Vorhabens sollten deshalb zerstörungsfreie Messungen des Trocknungsverhaltens des Mauerwerks durchgeführt werden. Zu diesem Zweck konnte eine Messkammer eingesetzt werden, die erst kürzlich im Rahmen eines anderen von der DBU geförderten Projektes entwickelt wurde.^{3,4} Es handelt sich um eine auf die Wandoberfläche aufgesetzte Messkammer, die mit Luft definiert eingestellter Feuchtigkeit durchströmt wird. Durch Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit am Ein- und Ausgang der Kammer ist es möglich, den Wasserdampfstrom entweder aus der Wand (Zunahme der Feuchtigkeit bei der Durchströmung) oder in die Wand (Abnahme der Feuchtigkeit) quantitativ zu bestimmen (Abb. 2).

Da zu erwarten stand, dass sich Wandbereiche mit unterschiedlicher Krustenbelegung in ihrem Trocknungsverhalten deutlich voneinander unterscheiden, war davon auszugehen, dass mit solchen Messungen auch indirekt der Erfolg einer restauratorischen Maßnahme zur Gipsreduktion zu erkennen sein würde. Entsprechende Messungen sollten deshalb auf verschiedenen Musterflächen jeweils vor und nach einer Maßnahme durchgeführt werden. Liegt tatsächlich eine deutliche Veränderung des Verhaltens nach erfolgter Gipsumwandlung vor, so bietet sich die Möglichkeit, durch regelmäßige Messungen nach Abschluss der Maßnahme das Verhalten der Oberfläche zu überwachen und einen Beitrag zur Nachkontrolle von Musterflächen zu leisten.

Bezüglich der hygroscopischen Salze im Mauerwerk (Nitrate, Chloride) hatten bereits frühere Untersuchungen gezeigt, dass sie recht gleichmäßig im Mauerwerk verteilt sind. Dies hat zur Folge, dass bei Salzreduktionsversuchen bisher lediglich die Reduktion des Salzgehaltes an der Oberfläche erreicht wurde. Aufgrund von Salztransport im Mauerwerk stellte sich nach einigen Monaten wieder die anfängliche gleichmäßige Salzverteilung ein. Eine nahezu vollständige Entsalzung scheint aus diesem Grund unmöglich und es müssen andere Wege gefunden werden, um eine Schädigung der Malereien durch diese Salze zuverlässig auszuschließen. Dies bedeutet, dass durch eine strenge Einhaltung verträglicher raumklimatischer Verhältnisse die Salzkristallisation unterbunden werden muss.

Aufgrund der derzeit günstigen raumklimatischen Verhältnisse – die Fenster des unbeheizten Schwahls sind nicht vollständig geschlossen und erlauben einen ständigen Austausch mit der Außenluft – sind die Salze in der Regel hohen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt. Unter solchen

Bedingungen kommt es nicht zur Salzkristallisation und somit auch nicht zur Salzschädigung. Unklar ist aufgrund der bisherigen Untersuchungen allerdings, wie empfindlich das Salzsystem auf Veränderungen der klimatischen Bedingungen, sei es nach einer Nutzungsänderung, nach einer baulichen Veränderung oder aber auch aufgrund eines veränderten Außenklimas, beispielsweise durch den prognostizierten Klimawandel, reagiert.

Im Rahmen des Vorhabens sollten zunächst die bereits vorliegenden Klimadaten für den Schwahl systematisch ausgewertet werden. Auf dieser Grundlage sollte dann ein Konzept für ein Klimamonitoring ausgearbeitet werden, das sicherstellt, dass kritische klimatische Verhältnisse zuverlässig detektiert werden. Kritische raumklimatische Situationen können einerseits durch zu niedrige Luftfeuchtigkeiten verursacht sein, weil dadurch Salzkristallisation ausgelöst wird. Andererseits können aber auch hohe Luftfeuchtigkeiten kritisch sein, da sie mikrobiologisches Wachstum begünstigen und in Verbindung mit kühlen Wandoberflächen zu einem kritischen Feuchteeintrag durch Kondensation führen können.

Die Klimamessungen sollten weiterhin durch entsprechende Laboruntersuchungen sowie durch eine rechnerische Simulation des Kristallisationsverhaltens der im Mauerwerk vorhandenen Salzgemische ergänzt werden. Dabei wird ermittelt, bei welchen klimatischen Bedingungen es zu Kristallisationsprozessen kommt, die zur Schädigung des Mauerwerks führen. Zusammen mit den klimatischen Untersuchungen am Objekt ist es anschließend möglich, Vorhersagen zu treffen, wie empfindlich das Objekt auf mögliche klimatische Veränderungen reagieren wird, die durch bauliche Veränderungen, ein verändertes Nutzungskonzept oder eine andere Veränderung des Umgebungsklimas hervorgerufen werden können.

¹ Andreas Arnold und Konrad 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.: Sharon Cather), Los Angeles 1991, S. 103–135.

² Michael Steiger, Elena Charola und Katja Sterflinger in: *Stone in Architecture* (Eds.: Siegfried Siegesmund and Rolf Snethlage), Berlin/Heidelberg 2014, S. 225–315.

³ Hans-Hermann Neumann, Michael Niermann und Michael Steiger: *Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung des Wassertransportes für die Planung und zum Bautenschutz in historischem Ziegelmauerwerk bei dem Einsatz von Innenraumdämmung. Abschlussbericht zu dem DBU-geförderten Vorhaben DBU28751-45, 2014.*

⁴ Amelie Stahlbuhk, Michael Niermann und Michael Steiger in: *Proceedings of SWBSS 2017. Fourth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures, University of Applied Sciences Potsdam, Germany, 20-22 September 2017* (Ed.: S. Laue), Potsdam 2017, S. 57–64.



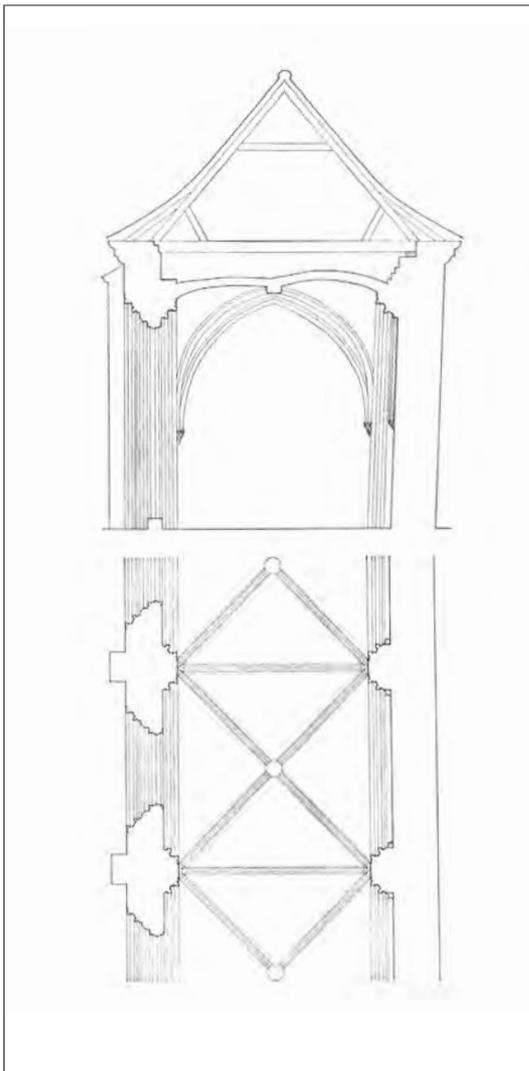
Der Schwahl – Überblick zur Bau-,
Kunst- und Restaurierungsgeschichte

Abriss zur Bau- und Kunstgeschichte

DER SCHWAHL

Dem romanischen Dom der Bischofs- und Residenzstadt Schleswig wurde um 1310/20 der backsteinerne, „Schwahl“ genannte Kreuzgang auf der Nordseite des Langhauses angefügt. „Svâl“ bedeutet im niederdeutsch-dänischen Sprachgebrauch kühler, überdachter Gang. Er diente den bis zu 24 Domherren des Domkapitels als Prozessionsgang und als Raum für geistliche Veranstaltungen um einen für Begräbnisse genutzten Hof. Aber auch bürgerliche Rechtsgeschäfte werden hier getätigt worden sein. Mit seiner offenen Seite schließt der Schwahl an das nördliche Langhausschiff des 1134 erstmals erwähnten und wiederholt erweiterten Domes an, im Norden und Westen steht er frei, an der Ostseite war er ehemals mit einem Verlängerungsbau des Kapitelhauses verbunden (heute ein Anbau von 1936, Abb. 1). Ein in der zweiten Hälfte des 15. Jahrhunderts mit dem nördlichen Hallenschiff erbautes Obergeschoss des Ostflügels beherbergte die Zellen des „clerus minor“, nach 1567 die der Vikare des „Paedagogiums“, das aus der 1307 erstmalig erwähnten Domschule hervorging, und wurde nach einem Brand 1743 abgebrochen. Am Dom weisen Bauspuren auf die einstige Zweigeschossigkeit hin. Zwei reich profilierte, kämpferlose Portale führen in den Nord- und den Ostflügel. Die Malereien, die bald nach Vollendung des Kreuzgangs im ersten Drittel des 14. Jahrhunderts entstanden sind, umfassten sämtliche Wand- und Gewölbe- flächen sowie die Architekturglieder, Konsolen und Schlusssteine.

Das gewölbte Kreuzganginnere wird in Breite und Höhe der 22 (von ursprünglich 24) annähernd quadratischen Joche durch spitzbogige Blendarkaden an den Außenwänden und entsprechend große Spitzbogenfenster zum Hof gegliedert (Abb. 2 und 3). Neben Birn- und Rundstäben sowie Gewölbeschlusssteinen zählen trichterförmige Ton- und Stuckkonsolen zum Bauschmuck, geziert mit Maßwerk und Blattdekor, im Ostflügel auch mit Figuren und Menschenköpfen. Auf das ausführliche Großinventar, das Dietrich Ellger in der Reihe „Die Kunstdenkmäler des Landes Schleswig-Holstein“ zum Dom verfasste, sei hier ausdrücklich verwiesen, denn im vorliegenden Beitrag kann nur ein kurzer Überblick zur Bau- und Kunstgeschichte geliefert werden.¹



1 Sogenannter Pfadfinder-Anbau, errichtet 1936, Aufn. 2018.

2 Teilgrundriss und Schnitt durch den westlichen Flügel des Kreuzgangs mit Blick nach Süden.

AUSMALUNG

Die 14 erhaltenen, großfigurigen Wandbilder in den tiefen Schildbögen auf den verputzten Innenseiten der fensterlosen Außenwände sind seitlich von breiten Weinblattornamenten, zum Sockelbereich hin durch einen Fries von Rundmedaillons mit paarig gegenübergestellten Tierdarstellungen gerahmt. Ist das Weinblattmotiv durch die Worte Christi „Ich bin der Weinstock ...“ zu deuten (Johannes 15, 5), so ist die Bedeutung der auf den Innenflächen dargestellten figürlichen Szenen durch Tiere nicht immer erschließbar.²

Die Wandbilder beschreiben das Leben Jesu in einer Folge einfarbiger Rotlinienzeichnungen auf weißem Putzgrund, im Westflügel beginnend mit dem Ritt der Heiligen Drei Könige, der Anbetung der Könige, der Darstellung Jesu im Tempel, dem Kindermord in Bethlehem, der Flucht nach Ägypten und der Taufe Jesu. Im Nordflügel der Passionszyklus mit Gefangennahme Jesu, Geißelung, Kreuztragung, Kreuzigung, Kreuzabnahme,

Grablegung, Auferstehung und den drei Frauen am Grabe. Im Ostflügel ist nur noch der Tod der Maria erhalten, hier ohne Tierfries unter der Bildszene, geschützt durch seine Lage als Anbau an die spätromanische Kanonikersakristei zwischen Kreuzgang und nördlichem Querschiff. Auf den weiteren Wandflächen und in den beiden südlichen Jochen des Kreuzgangs, also den beiden ersten Jochen des Ost- und Westflügels, die gegen Ende des 14. Jahrhunderts der Vergrößerung des Domnordschiffs zum Opfer fielen, sind ergänzende Szenen aus der Kreuzigung und Passion Christi zu vermuten, so die Verkündigung und die Geburt Christi, der Einzug in Jerusalem, Höllenfahrt und Verklärung Christi und das Pfingstwunder, vielleicht auch weitere Szenen aus der Passion, den Wundertaten oder Gleichnissen (Erweckung des Lazarus, ungläubiger Thomas u.a.), denkbar auch eine Majestas Domini oder eine Verbindung zwischen den Zyklen des Marienlebens und der Vita Christi mit einer Krönung der Maria.³ Mehrere Möglichkeiten der Vervollständigung sind plausibel, so auch die nicht

3 Grundriss des Schwahls mit Angabe der Jochzählung und der christologischen Darstellungen in Rotlinienmalerei auf den äußeren Wandflächen. Wiedergegeben ist der Bestand um 1890, die von Olbers neu oder nach alten Spuren geschaffenen Darstellungen sind heute ganz verschwunden.

Westflügel

- 1 Geburt Christi (Olbers)
- 2 Ritt der Hl. Drei Könige
- 3 Anbetung der Hl. Drei Könige
- 4 Darbringung im Tempel
- 5 Kindermord (Truthahnfries: Olbers 1890, Fey 1930)
- 6 Flucht nach Ägypten
- 7 Taufe

Nordflügel

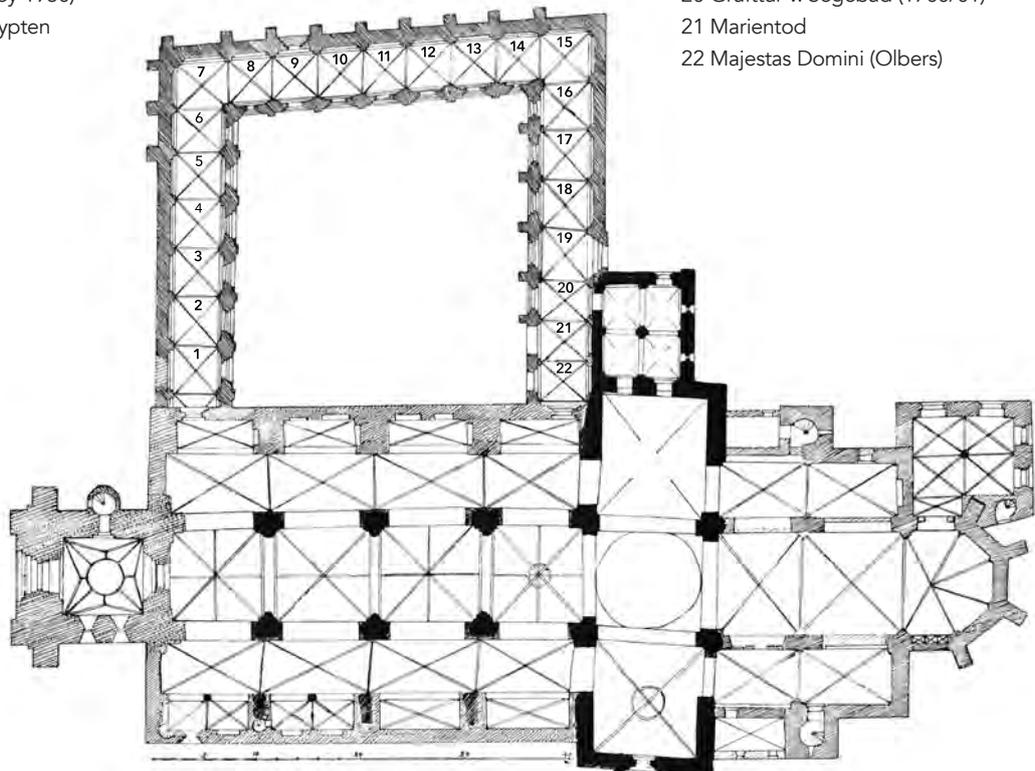
- 7 Gefangennahme
- 8 Geißelung
- 9 Nordportal (1892/94)
- 10 Kreuztragung

11 Kreuzigung

- 12 Kreuzabnahme
- 13 Grablegung
- 14 Auferstehung
- 15 Die Frauen am Grab

Ostflügel

- 15 Christus in Emmaus (Olbers)
- 16 Ungläubiger Thomas (Olbers)
- 17 Himmelfahrt (Olbers)
- 18 Pfingsten (Olbers)
- 19 Ostportal (1890/94)
- 20 Grufttür v. Segebad (1700/01)
- 21 Marientod
- 22 Majestas Domini (Olbers)



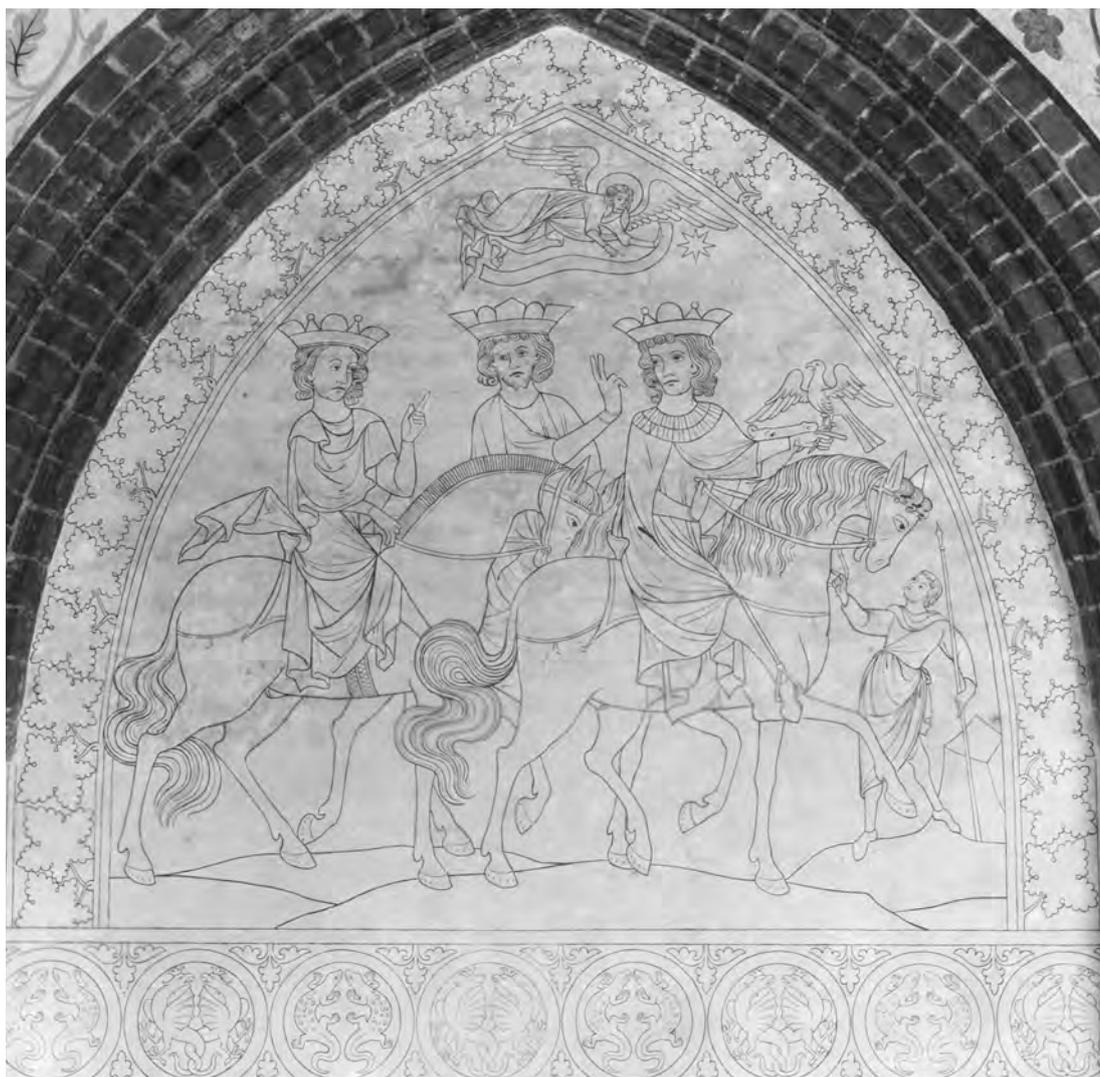
mehr erhaltene Ergänzung durch den Restaurator August Olbers von 1891.⁴ Da die Bildfolge mit der Geburt Christi startet oder wohl ursprünglich mit der Verkündigung im verlorenen Joch des Westflügels begann (erhalten ist nur ein schmales Segment des abgeschnittenen Jochs), ist der angenommene Prozessionsweg der Kanoniker wie ein Kreuzweg eindeutig ausgerichtet. Er führte im Westen aus der Kirche heraus, durch den Kreuzgang und wieder in die Kirche hinein.

In ihrer Linienzeichnung wirken die Darstellungen graphisch, auf das Wesentliche reduziert und nicht naturalistisch, nach Teuchert „... eine Technik, die besonders geeignet war, das idealisierte Menschenbild jener Zeit in seiner Unkörperlichkeit, den schwingenden Bewegungen und der beredten Gestik auszudrücken.“⁵ In Stil und Malduktus erinnere sie ihn an eine Gravur.⁶

Auffallend ähnlich, doch maßstäblich kleiner als die Rotlinienmalereien sind vergleichbare Szenen



4 Darstellung der Falkenjagd aus der Manessischen Liederhandschrift.



5 Westflügel, Joch 2, Der Ritt der Heiligen drei Könige, Aufn. um 1890.



6 Schleswiger Domchor, Blick nach Osten, Ausmalung, Aufn. 2014.

in der zeitgleichen Buchmalerei (Abb. 4 und 5). Die Konturen der Figuren sind auch hier streng betont, so die Falkenjagd aus der Manessischen Liederhandschrift vom Anfang des 14. Jahrhunderts in Gegenüberstellung mit dem Ritt der Heiligen Drei Könige.⁷

In ihrer Erscheinungsform verwandt ist auch die hochgotische Ausmalung des Schleswiger Domchors um 1330 (Abb. 6), die unter der Regierung des Bischofs Johannes II. von Bokholt angelegt wurde, im Westjoch Mariä Verkündigung und Krönung, Philippus und Katharina zeigend, im Ostjoch die Deesis mit Weihrauchgefäße schwingenden Engeln neben dem Patron des Domes Petrus. Weil Heinrich Bokholt, der Bruder von Johannes II., damals den Bischofsstuhl im nahen Kunstzentrum Lübeck innehatte und die Schleswiger Malereien auch Parallelen zu den Wandmalereien der Jakobikirche (Pfeiler), des Heiliggeistspitals (nördliches Seitenschiff), von

Dom (Grufte Bischof Bokholts) und Marienkirche (Langhaus) zeigen, malte wohl dieselbe lübische Werkstatt den Schleswiger Domchor und den Schwahl aus. Die im gotischen Saal des Schleswiger Grauklosters, dem heutigen Rathaus, aufgedeckte Kreuzigungsszene zeigt ein weiteres Werk dieser Malschule in unmittelbarer Nähe des Schwahls. Außerhalb der beiden mittelalterlichen Stadtmetropolen sind weitere monumentale Wandmalereien dieser Schule und Zeit aus dem Hinterland Lübecks überliefert. Hier ist die ausgemalte Dorfkirche von Büchen ein weiteres Beispiel für „Rötelkonturzeichnungen lebensgroßer Gewandfiguren“.⁸

Auf den schmalen Wandabschnitten auf der Hofseite des Schwahls sind Standfiguren dargestellt: Könige des Alten (Nordflügel) und Apostel (Ostflügel) des Neuen Testaments in typologischer Zuordnung zu den Propheten des Alten Testaments (Westflügel), etwa lebensgroß unter



Baldachinen gemalt. Die polychromen Figuren sind fragmentarisch erhalten. Die Absetzung der Architekturglieder in rot und grün ist nur noch in Spuren nachweisbar. Im Kontrast zu den graphisch wirkenden Kontur-Zeichnungen der Innenwände sind die Gewölbekappen des Schwahls vollflächig mit leuchtend-farbigen Drolierien geschmückt, das weltliche „Treiben“ mit Musikanten und Jagdgesellschaften schildernd (Abb. 7). Daneben eine phantastische Welt aus wuchernden Blatt- und Blumenranken, in denen Vogel- und Fischmensen, Fabeltiere und Drachmensen ihr Unwesen treiben. Die Malereien sind so angelegt, dass die Darstellungen auf den vier Kappen jedes Joches sich spiegelbildlich wiederholen, das heißt jedes Motiv findet sich in paarweiser Gegenüberstellung achtmal auf jedem Gewölbe. Verloren sind die Gewölbemalereien im nordwestlichen Eckgewölbe und in den letzten vier Gewölben des Ostflügels zum Dom. Nach Teuchert ist „trotz der Unterschied-

lichkeit der Malereien [...] ein Sinnzusammenhang zwischen ihnen auszumachen“ und er sieht die Welt „menschlicher Unzulänglichkeiten“ der „Erlösung des Menschen durch das Opfer Christi“ gegenübergestellt, mit den Heiligengestalten auf der Hofseite als „Deuter und Zeugen“.⁹

Zur Maltechnik und zum Erhaltungszustand der Malereien äußern sich die Autoren der Folgebeiträge. Es bleibt anzumerken, dass es keine Anhaltspunkte dafür gibt, dass die Rotlinienmalereien des Schwahls nur Vorzeichnungen seien, dass sie das Ergebnis einer verfälschenden Restaurierung sind oder dass eine farbige Ausmalung bis auf die Linien verblasst wäre.¹⁰ Zu beantworten bleibt aber die Frage, was nach den wiederholten Restaurierungen der Malereien als authentisches Zeugnis gelten kann.¹¹ Von 1888 bis 1894 wurde die übertünchte dekorative und figürliche Erstaussmalung des Schwahls von August Olbers freigelegt und unter anderem

7 Ostflügel,
Joch 18,
Gewölbekappe,
Aufn. 2007.

durch die bekannten Truthähne im Tierfries der Kindermordszene vervollständigt. Die 1933 bis 1940 unter Ernst Fey durchgeführte Restaurierung wurde mit Hinweis auf die aus der Lübecker Marienkirche bekannten Ergänzungen und Fälschungen als fragwürdig erachtet, ihr Ergebnis 1972 bis 1981 und dann erneut ab 2006 korrigiert.

BEDEUTUNG

Um 1200 beherbergte die aus sieben Kirchspielen zusammengesetzte Stadt Schleswig an die fünf bis neun Pfarrkirchen, mehrere Klosteranlagen (das Johanniskloster, das Franziskanerkloster St. Paulus, heute Rathaus, und das Dominikanerkloster) und den Petrus geweihten Dom als Hauptkirche des Bistums Schleswig.¹²

Mit seiner hochgotischen Backsteinarchitektur in Erstaumalung zählt der Schwahl zu den bedeutendsten Kreuzgängen seiner Art im Ostseeraum. Er

wurde im BKM-Programm des Bundes als national wertvoll gefördert und im Dehio-Handbuch 2009 von Johannes Habich als „eines der edlen Beispiele gotischer Architektur im Lande“ gewürdigt.¹³ Der Schwahl zeugt vom Reichtum und der Bedeutung des Bischofssitzes und der Handelsstadt Schleswig in der Nachfolge der Handelsmetropole Haintau und war Schauplatz spektakulärer Ereignisse. Von hier nahm die Reformation in Schleswig ihren Ausgang.¹⁴ Mit dem Ende der Gelehrtenschule 1583 wurde im Schwahl bis zum Jahre 1887 der Dommarkt abgehalten. Der weihnachtliche Kunsthandwerkermarkt, dessen Erlös für die Restaurierung der Kunstaussstattung im Dom eingesetzt wird, führt diese jahrhundertalte Markttradition fort. Über lange Zeit war der Schwahl verschlossen und vergessen, denn zum Schutz der Malereien vor Verschmutzung und Kondenswasser konnten die Malereien nur bei Führungen besichtigt werden. Unter nun anderen Voraussetzungen soll sich das in absehbarer Zeit ändern.

¹ Hartwig Beseler (Hrsg.): Die Kunstdenkmäler des Landes Schleswig-Holstein, Stadt Schleswig, 2. Bd.: Der Dom und der ehemalige Dombezirk, bearbeitet von Dietrich Ellger, München/Berlin 1966. Johanna Kolbe hat hier die Malereien in Dom und Schwahl behandelt (S. 210-277).

² Victor Curt Habicht: Die Wandmalereien im Schwahl des Domes zu Schleswig, in: Marburger Jahrbuch für Kunstwissenschaft 10, 1937, Sonderdruck Marburg 1939, S. 2-9, „Zur Ikonographie“.

³ „Christusbild“ in: Ernst Badstübner, Helga Neumann und Hannelore Sachs: Christliche Ikonographie in Stichworten, Leipzig 1973, S. 79f.

⁴ Zu ergänzen sind die Malereien in zwei Jochen des Westflügels und in sieben Jochen des Ostflügels. Da zwei Joche mit der Verbreiterung des nördlichen Seitenschiffs entfielen, konnte Olbers nur die Geburt Jesu im Westflügel voranstellen. Im Ostflügel erlaubte er sich folgende Szenen zu ergänzen: Emmaus, der ungläubige Thomas, Himmelfahrt und Pfingsten, dann an den Tod der Maria anschließend die Majestas Domini. Die von Olbers signierten Ergänzungen sind abgewittert und nicht mehr erhalten. Vgl. dazu den Beitrag zur „Restaurierungsgeschichte der Wand- und Gewölbmalereien“ im vorliegenden Band.

⁵ Wolfgang Teuchert: Die Restaurierungen der Wandmalereien im Schwahl des Schleswiger Domes zwischen 1883 und 1981. In: Christian Radtke und Walter Körber (Hrsg.): 850 Jahre St.-Petri-Dom zu Schleswig, 1134–1984, Schleswig 1984, S. 79-95, hier S. 84.

⁶ Wolfgang Teuchert: Restaurierung der Schwahlmalereien im Schleswiger Dom. In: Tagung der Dombaumeister, Münsterbaumeister, Hüttenbaumeister vom 19. bis 22. September 1989 in Schleswig, masch. Dokumentation 1990, S. 56-67, hier S. 57: „Sowohl stilistisch wie im Malduktus aus bedeutungsvoll an- und abschwellenden Linien unterscheidet sich diese Malerei in nichts als nur in Größe und Material von einer nur wenige Zentimeter großen Gravur auf einer vergoldeten Messingscheibe von einem Buchbeutel aus dem Kloster Preetz bei Kiel.“

⁷ Codex Manesse, UB Heidelberg, Cod. Pal. germ. bzw. cpg 848. Zur Rezeption der ritterlich-höfischen Malerei der manessischen Handschrift und zum Ideologischen in der Deutung der Malereien vgl. Teuchert 1990 (wie Anm. 6), S. 62. Das Bildthema der ritterlichen Falkenjagd war weit verbreitet und u.a. Gegenstand einer Kalkmalerei in der Kirche zu Skibby auf Nordseealand. Siehe dazu Niels M. Saxtorph: Danmarks Kalkmalierier, Aarhus 1986, S. 80-82. Weitere Vergleiche zur Buchmalerei zieht Habicht 1939 (wie Anm. 2), S. 9-27 im Kapitel „Zeitliche Ansetzung“.

⁸ Georg Dehio: Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler. Hamburg, Schleswig-Holstein, bearbeitet von Johannes Habich u.a., München/Berlin 2009, S. 214. Zur Verbreitung der Malereien siehe Dietrich Ellger und Johanna Kolbe: St. Marien zu Lübeck und seine Wandmalereien (Arbeiten des kunsthistorischen Instituts der Universität Kiel, Bd. 2), Neumünster 1951, S. 138f.

⁹ Teuchert 1984 (wie Anm. 5), S. 86.

¹⁰ Dazu Alfred Stange: Der Schleswiger Dom und seine Wandmalereien, Berlin 1940, S. 60f.: „Nirgends findet sich eine Spur von Farbe oder auch nur ein Hinweis, daß sie noch ausgemalt werden sollten, daß also die Rötzelzeichnung nur als Vorzeichnung hinzunehmen wäre“. Vgl. dazu auch die verfeinerte Malerei im Obergaden des Langhauses von St. Marien in Lübeck, die Max Hasse (Die Marienkirche zu Lübeck, Berlin 1983, S. 48) folgendermaßen charakterisierte: „Man beschränkte sich darauf, die schwarzen Linien, die die Figuren umrissen und gliederten, mit Rot und Grün und einigen Mischfarben wie den rötlichen Ton des Fleisches auszufüllen.“

¹¹ So die mahnden Worte von Kurt Wehlte in: Bericht über Untersuchungen an den Wandmalereien im Schwahl des Schleswiger Domes im November 1949, maschinengeschriebenes Manuskript im Aktenarchiv des LDSH, S. 6.

¹² Christian Radtke: Grundzüge der kirchlichen Entwicklung Schleswigs im frühen und hohen Mittelalter. In: Tagung der Dombaumeister (wie Anm. 6), S. 10-18, hier S. 15f.

¹³ Dehio 2009 (wie Anm. 8), S. 837f.

¹⁴ Gegen den Widerstand von Bischof und Domkapitel soll ein ehemaliger Mönch, genannt der „tolle Friedrich“ erstmals im Sinne der Reformation gepredigt haben, die Marquard Schuldorp 1526 am Dom einführte. Die Kanoniker behaupteten sich noch bis 1542 im Hohen Chor.

Arnulf Dahm

Bauliche Situation

Der Schwahl wird vielfach auch als Kreuzgang titulierte, ist jedoch nicht als vier- sondern als dreiseitiger halboffener Umgang an die Nordseite des Doms angebaut und datiert an den Beginn des

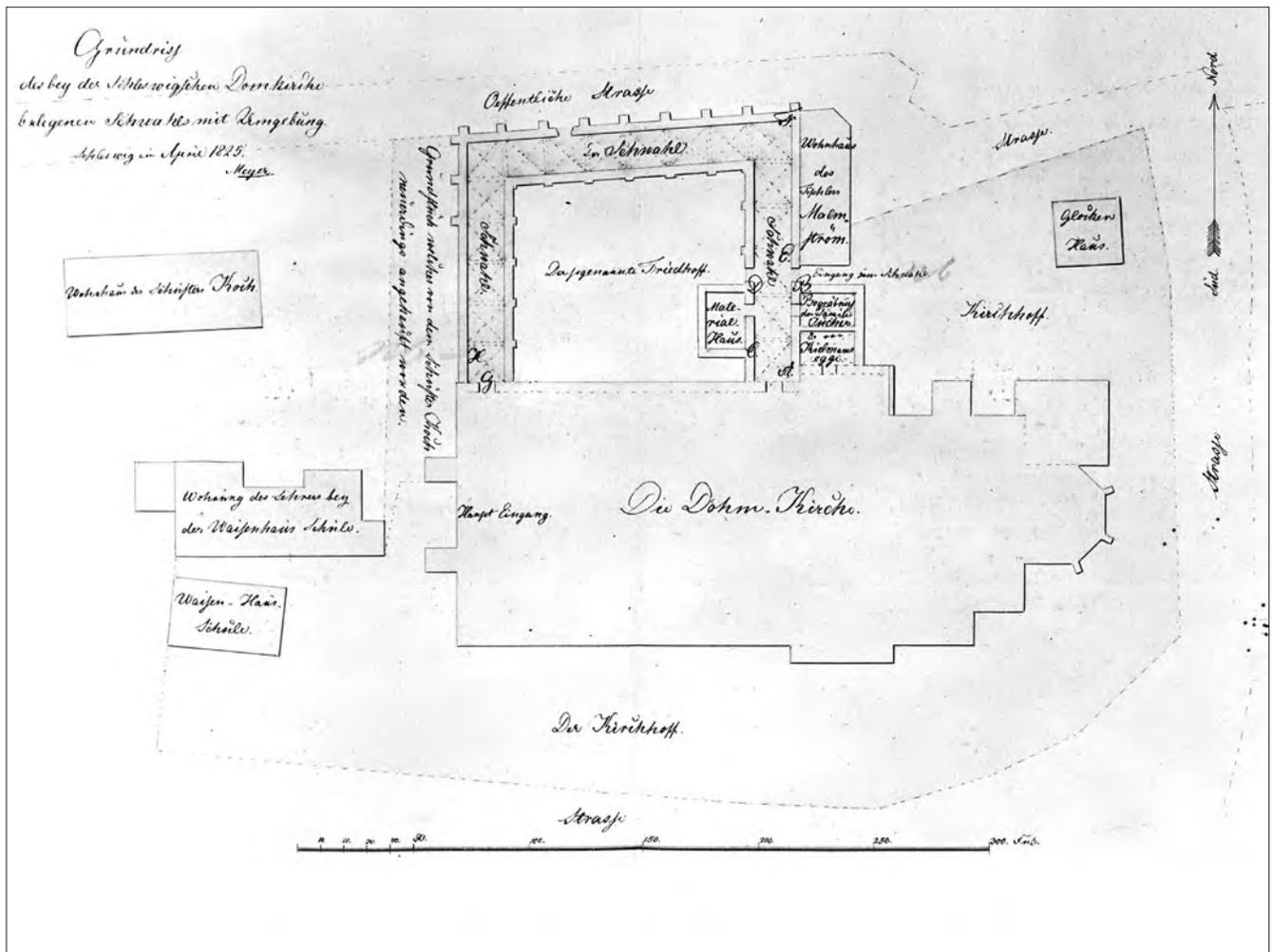


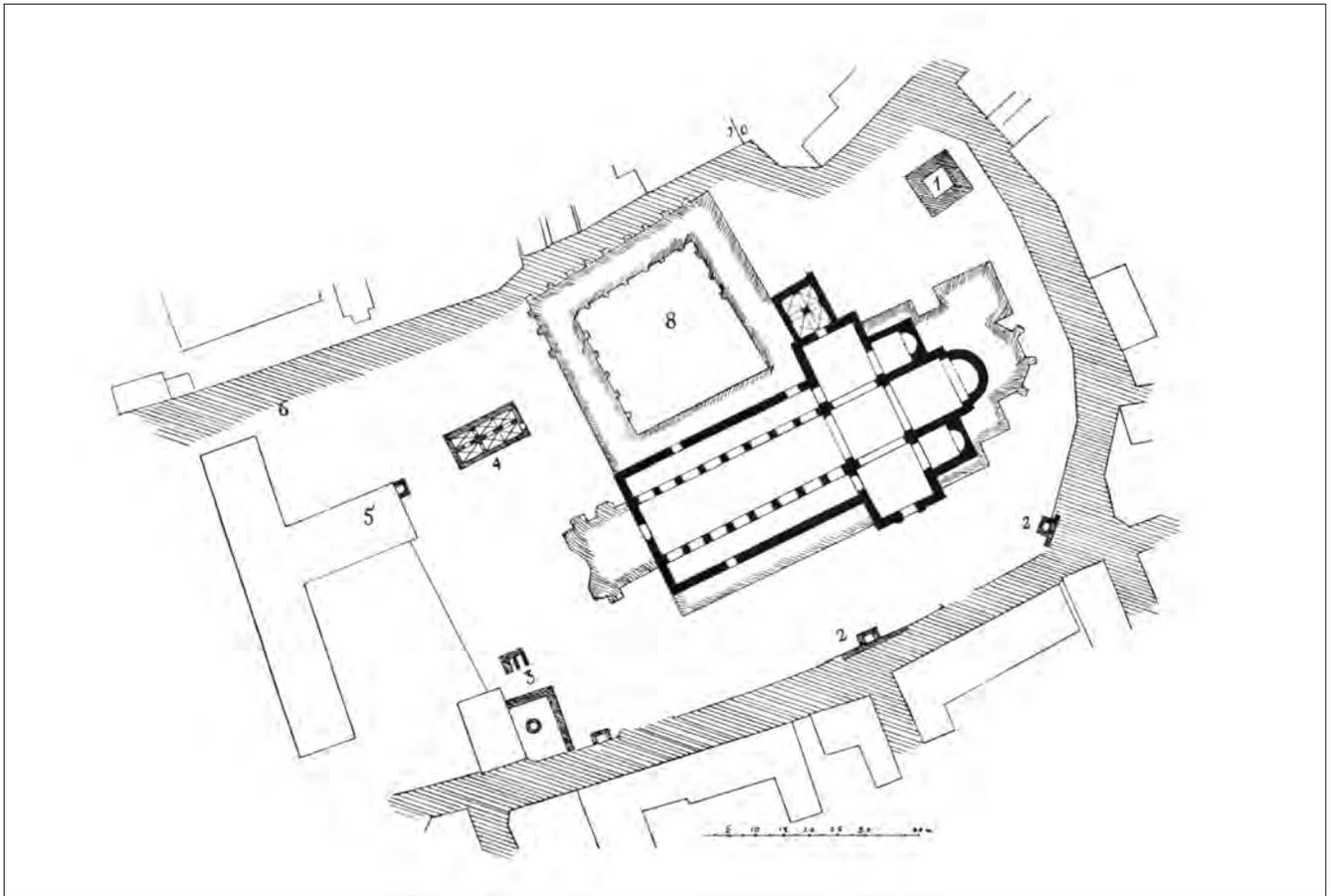
14. Jahrhunderts. Es handelt sich um einen Backsteinbau auf Feldsteinfundamenten (Abb. 1 und 2). Seine Außenseiten sind geschlossen, zum Innenhof hin ist er mit Spitzbogenfenstern versehen. Der gesamte Schwahl wurde im Inneren eingewölbt (insgesamt 22 Gewölbe) und verputzt. Es darf vermutet werden, dass es eine erste vierseitige Version zu Zeiten der Basilika gegeben hat (Abb. 3); der südliche Flügel des Kreuzganges wäre dann der Erweiterung des Doms um 1500 gewichen.

Heute stellt sich der Schwahl wie folgt dar: Er ist zur Hofseite verglast, wobei die Scheiben mit einer zum Gewände hin ca. 2 cm offenen Fuge versehen sind. Unbeheizt wird er für die verschiedensten kirchlichen Veranstaltungen genutzt, in der Vorweihnachtszeit findet hier seit vielen Jahren der Schwahlmarkt mit hauptsächlich kunstgewerblicher Ausrichtung statt (Abb. 4).

1 Archäologische Ausgrabung im Innenhof des Schwahls: freigelegtes Feldsteinfundament und ursprüngliches Bodenniveau, Aufn. 2011.

2 Grundriss des Dombezirks im Jahr 1825, Innenhof des Schwahls als der "Der sogenannte Friedhoff" bezeichnet.





3 Rekonstruktion eines vierseitigen Schwahls von Richard Haupt, um 1900.

4 Kunstgewerbe-stände auf dem Schwahlmarkt, Aufn. 2018.



Über viele restauratorische Maßnahmen hinaus erfolgten in der Vergangenheit, das heißt bereits vor Beginn des DBU-Projektes, auch bauliche Er-tüchtigungen – ist es doch neben der klimatischen Einflussnahme auch der Zustand einer schlechten Bausubstanz, der zu Schäden führen kann. Es er-scheint wichtig, die Gründe für die Schädigung der Wandmalereien zu kennen. Die Faktoren Klima, Nutzung und bauliche Umstände sind dabei die wesentlichsten. Der Eintrag von organischen Bestandteilen und schädigenden Salzen in das Mauerwerk und damit den Putz und die Malereien kann über mangelnden Bauunterhalt, Bauschäden, klimatische Einflussgrößen und über ein schädi-gendes Nutzerverhalten passieren. Diese Einfluss-größen werden im Folgenden genauer beschrieben.

FAKTOR NUTZUNGSVERHALTEN

Im Laufe seiner gut siebenhundertjährigen Geschichte ist der Schwahl (umgangssprachlich für kühler, bedeckter Gang) auf vielfältige Weise genutzt worden. Er diente unter anderem als Pro-zessionsgang, Raum für geistliche Veranstaltungen, der Unterbringung von Vikaren, als Begräbnisstätte und Marktplatz. Ein Anbau an den Ostflügel zum Innenhof ist abgebrochen. Ein weiterer Anbau an der Außenseite des Ostflügels, der in den 1930er

Jahren errichtet wurde, besteht weiterhin. Aufgrund der wiederholten kostenintensiven Reparaturen und Instandsetzungen wurde bereits im 18. und 19. Jahrhundert mehrfach über einen Abbruch des Schwahls nachgedacht. Welche Einträge von schädigenden Stoffen (menschliche und tierische Hinterlassenschaften) zum Beispiel über die Nutzung durch Marktbulden und den Schwahlmarkt bis zu dessen Schließung 1887 sowohl im Inneren, als auch an den Außenmauern über die sieben Jahrhunderte des Bestehens eingebracht worden sind, kann vermutet, aber nicht belegt werden.

FAKTOR WASSER UND FEUCHTIGKEIT

Einer der wesentlichen Gründe zur Schädigung scheint die zum Innenhof hin temporär offene Bauweise zu sein – ab ca. 1890 bis in die 1970er Jahre waren die Arkadenöffnungen nicht geschlossen (Abb. 5). Dadurch konnte Regen unter Windeinfluss in den Umgang gelangen und den Boden sowie die Wände durchfeuchten. Einen anderen erheblichen Anteil an der Versalzung der Wände hat die aufsteigende Feuchte, obwohl die Außenwände auf Granitfelsen gegründet sind. Vermutlich um 1890 wurde in ca. 0,60 m Höhe über Fußbodenniveau eine Horizontalsperre eingebaut (Abb. 6).

Immer wieder hat der Schwahl große Dachreparaturen benötigt. Es wird davon berichtet, dass das geschädigte Dach mehrfach über einen längeren Zeitraum offen lag. Über diese Undichtigkeiten der Bauhülle gelangten größere Wassermassen in die Wände und angrenzende Bauteile. Der nicht überdeckte Innenhof, über einen langen Zeitraum als Begräbnisstätte genutzt, speicherte die Feuchtigkeit wie in einem Becken. Eine Entwässerung oder Drainage gab es bis in die 1950er Jahre nicht (Abb. 7).

Des Weiteren wurde ab der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts bis heute die unmittelbar an die Nordwand angrenzende Norderstraße im Winter teils intensiv mit Salz abgestreut und die Schneemassen an die Schwahlwand geschoben.

FAKTOR BAUSCHÄDEN

Im Jahre 1743 wurde das gesamte Kranzgesims erneuert und man errichtete Stützpfiler aus Altmaterial am nördlichen Flügel und am Nordteil des Westflügels (Abb. 8). Hintergrund war eine starke Schiefstellung der Außenwände, bedingt durch eine in diesem Bereich vorhandene Torflinse im Untergrund. 1805 wurden weitere Stützpfiler gesetzt.

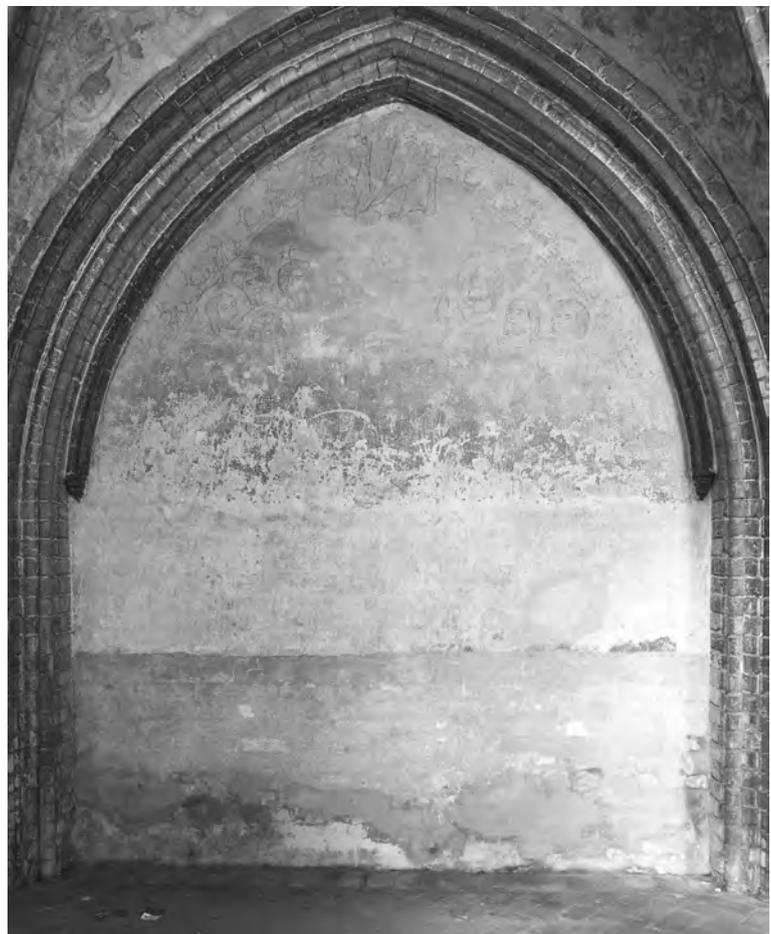
1826 entfernte man die Begräbnisse unter dem Fußboden des Schwahls und verfüllte die entstandenen

Hohlräume. Für den neuen Fußbodenbelag verwendete man die Steine der abgebrochenen Kirchhofsmauer. Um 1890 erfolgte die Öffnung der bis dahin geschlossenen Arkadenfenster.

In den 1970er Jahren entschloss man sich zur statischen Ertüchtigung zum Einbau eines Stahlbeton-Ringbalkens und Zugankern im Obergeschoss (Abb. 9). Zusätzlich wurde unter der Nordwestecke des Schwahls zur Stabilisierung des Bauuntergrunds

5 Unverglaste Arkaden, historische Aufnahme um 1930.

6 Joch 17, Christi Himmelfahrt (von Olbers), Horizontalsperre im unteren Bildfeld, Aufn. 1969.



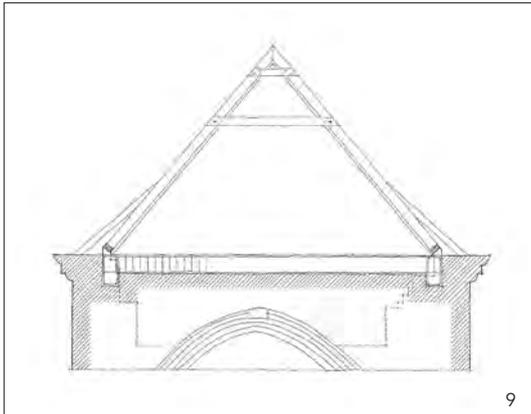


bis zu einer Tiefe von 1 m Zement eingebracht; insgesamt ca. 73 Tonnen. 1971/1978 wurden die Arkadenöffnungen wieder verschlossen. Nach einer ersten geschlossenen Version und den dadurch entstandenen Schäden an den Malereien (massive Schimmelbildung) entschied man sich dann, eine Teilbelüftung (umlaufende Lüftungsfuge) vorzunehmen (Abb. 10).

Eine intensive, interdisziplinäre Befassung mit den baulichen Gegebenheiten während der letzten zehn

Jahre führte zu der Auffassung, dass eine sehr behutsame und fachlich durch das Landeskirchenamt, das Landesamt für Denkmalpflege und ein Restauratoren-Team zu begleitende Maßnahme zur Verbesserung des Raumklimas im Schwahl vorgenommen werden sollte. Eine Klimatisierung wurde aufgrund der dafür notwendigen technischen Einbauten nicht weiter verfolgt. Um eine verbesserte Nachhaltigkeit der restauratorischen Maßnahmen an den Malereien zu erzielen, wurden bislang folgende bauliche Maßnahmen ergriffen:

1.) Von großer Bedeutung war der Austausch des feuchtebelasteten Bodens im Innenhof. Er bestand aus einer die vorhandene Feuchtigkeit stark bindenden Moosfläche, die durch eine niederschlagsdurchlässige Schicht ersetzt wurde. Die Entwässerung des Norddachs des Langhauses über den Schwahl-Innenhof wurde verbessert, die kurzzeitig erhöhten Mengen an Oberflächenwasser werden jetzt über ein gemauertes Traufrinnenpflaster am Rand des Hofes schnell abgeführt (Abb. 11).



7 Innenhof des Schwahls während der archäologischen Untersuchungen, Aufn. 2010.

8 Stützpfeiler an der Außenseite des Schwahls, Zustand vor dem Abbruch des südlichsten Pfeilers am Westflügel, Aufn. 2011.

9 Schnitt durch den Schwahl mit eingezeichnetem Stahlbeton-Ringbalken, Zeichnung aus dem Jahr 1970.

10 Blick in den Innenhof des Schwahls vor der Sanierung, Fenster bereits mit Randlüftung, Aufn. 2010.

2.) Die geschädigten Fundamente der innenseitigen Außenmauern wurden saniert (Steine und Fugen) und mit einem Lehm-Grand-Gemisch gegen drückendes Wasser geschützt.

3.) Die Fällung einer großen Buche Anfang 2011 im Innenhof war notwendig, um zukünftig eine Befeuchtung des Fußbodens durch Kondensat-Ausfall im Schattenwurf des Baumes zu vermeiden (Abb. 12).

4.) Bei Feuchtemessungen an der westlichen Außenwand zeigten die analysierten Proben eine starke Feuchtebelastung eines der drei Stützpfeiler. Aufgrund dieser Tatsache und der in den 1970er Jahren durchgeführten statischen Ertüchtigung im Obergeschoss konnte ein Abbruch dieses Pfeilers begründet und durchgeführt werden.

5.) Eine Leckage direkt am Übergang vom Ortgang des westlichen Schwahlflügels zum aufgehenden Mauerwerk der Nordwestecke des Langhauses hatte bereits Schäden verursacht; sie wurde umgehend beseitigt.

Zukünftig werden weitere Maßnahmen zur Verbesserung der klimatischen Verhältnisse notwendig sein. Bei der zurzeit stattfindenden Sanierung des Turms wird ein Windfang am Westzugang zum Schwahl eingebaut, der auf der Ostseite bereits bestehende

wird ertüchtigt. Aufgrund von Klimamessungen wurde erkannt, dass die westliche Zugangstür zum Schwahl zu häufig offensteht und damit einen starken Durchzug erzeugt. Dieser Durchzug führt zu einer erheblichen Belastung der historischen Malereien durch Verschmutzungen und zum anderen zu starken Klimaschwankungen im Bereich von Temperatur und relativer Feuchtigkeit.

11 Nordwestecke des Schwahlhofs nach der Sanierung, Aufn. 2015.



12 Der Schwahlhof vor der Fällung der großen Buche, vom Dachreiter aus gesehen, Aufn. 1996.



Hartwig Beseler (Hrsg.): Die Kunstdenkmäler des Landes Schleswig-Holstein, Stadt Schleswig, 2. Bd.: Der Dom und der ehemalige Dombezirk. Bearbeitet von Dietrich Ellger, München/Berlin 1966.

Karlheinz Schlüter: Aus der jüngeren Baugeschichte des Schleswiger Domes. Dokumentation im Archiv des Landeskirchenamtes Kiel.



Birgid Löffler-Dreyer
 Restaurierungsgeschichte
 der Wand- und Gewölbemalereien

1 Blick in den Nordflügel des Schwahls mit seinen aus dem Lot gewichenen Wänden, Aufn. 2015.

Der Schwahl wurde um 1310/20 als dreiflügeliger Gang im Anschluss an die Nordseite des Langhauses errichtet (Abb. 1). Der West- und der Nordflügel standen immer frei, der Ostflügel wurde überbaut. Von seiner Funktion her ist der Schwahl nicht als Kreuzgang eines Domklosters zu verstehen, sondern als Prozessionsgang für das Domkapitel. Darauf deutet auch das Thema der Wandmalereien, die Christusgeschichte, hin.

Die Malereien entstanden bald nach Vollendung des Kreuzgangs im ersten Drittel des 14. Jahrhunderts. Sie sind ursprünglich als sogenannte Kalkmalereien oder Kasein-Kalkmalereien ausgeführt worden: Über den bereits getrockneten oder baufeuchten Kalkputz wird eine Kalktünche als Grundierung gelegt. Die Farbpigmente werden in einer „Milch“ aus gelöschtem Kalk angesetzt, dem auch Kasein als zusätzliches Bindemittel zugegeben sein kann. Im Idealfall werden sie „Nass in Nass“ aufgetragen. Nur dann ist der Abbindeprozess der Materialien mit dem der Freskomalerei vergleichbar. Im Schwahl haben wir ein Nebeneinander von gut gebundenen und damit bis heute erhaltenen Farbaufträgen, aber auch große Verluste. Durch Abplatzen der Malschicht gefährdete Bereiche sind teilweise auch auf eine

Überbindung durch Festigungsmittel vergangener Restaurierungen zurückzuführen.

Nach Gehalt und Rang sind die großfigurigen Darstellungen der Lebensgeschichte Christi auf den äußeren Bogenfeldern in der Abfolge von West nach Ost die bedeutenderen Malereien. Noch vierzehn Szenen sind hiervon erhalten. Zwei Szenen fielen bereits mittelalterlichen Umbaumaßnahmen zum Opfer: vermutlich die Verkündigung und die Geburt Christi. Im Ostflügel fehlen weitere Darstellungen unbekanntem Inhalts bis auf den Marientod. Sechs Szenen waren durch August Olbers 1887 neu komponiert beziehungsweise geschaffen worden und sind heute größtenteils wieder verloren. Die gesamte Bildfolge ist auf hellem Putz in roter Linienzeichnung in der Art übergroßer Grafiken ausgeführt.

Auf den hofseitigen Wandfeldern befinden sich hingegen polychrom gemalte Einzelfiguren, Propheten, Könige und Apostel unter gemalten Baldachinen. Auch die Gewölbe sind flächfüllend und leuchtend farbig gestaltet. Ihre Ausmalung erfolgte – farblich und ikonografisch – in bewusstem Kontrast zu den monochrom bemalten Wandflächen (vgl. Abb. 10).

2 Joch 6,
Flucht nach
Ägypten, Zeich-
nung von Olbers,
angefertigt
um 1887.



3 Joch 6,
Flucht nach
Ägypten, Zustand
nach der Restaura-
tion durch Olbers
um 1890.



4 Joch 22,
vermutlich frei
ergänzte Gewölbe-
malerei von Olbers,
um 1890
(heute verloren).



DIE RESTAURIERUNG DURCH AUGUST OLBERS AB 1887

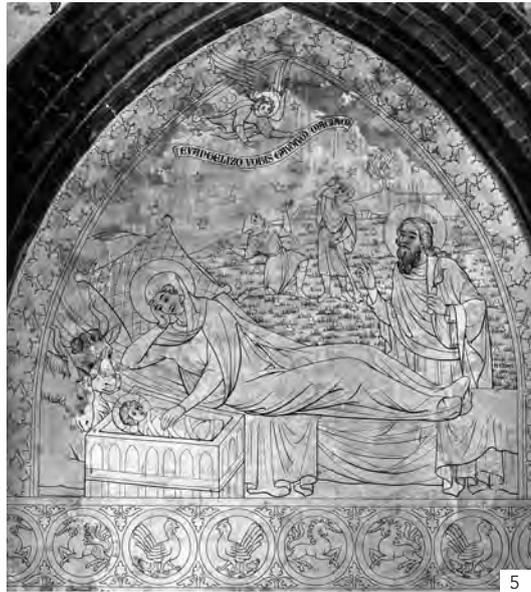
Die Restaurierungsgeschichte der Schwahlmalereien beginnt streng genommen bereits im Mittelalter, denn die Malereien sind seit ihrer Entstehung mehrfach im Laufe der Jahrhunderte ausgebessert, überarbeitet oder auch überkalkt worden. Wir beginnen jedoch mit den ersten erhaltenen schriftlichen Aufzeichnungen zur jüngeren Restaurierungsgeschichte: 1826 entdeckte man, während man den Schwahl neu „weißte“, die rote Kontur der Gemälde, „die nicht ohne Wert zu sein schienen, aber von niemandem beachtet worden sind.“ (Ellger 1966, S. 212). Im Oktober 1883 erscheinen erste Nachrichten von der Wiederentdeckung der Wandmalereien durch den Kreisbaudirektor Adalbert Hotzen. Um die Restaurierung zu beschleunigen, beginnt er – zunächst im Nordflügel – unerlaubt und eigenhändig mit der Freilegung der Malereien. Im tiefen Winter 1886 besichtigt Hotzen mit Baudirektor Ernst Erhardt, der künftig die Bauleitung übernehmen wird, den Schwahl. Fünf Jahrzehnte später schildert Erhardt seine damaligen Eindrücke in einem Brief an den schleswig-holsteinischen Provinzialkonservator Ernst Saueremann: „[...] wir traten ein und befanden uns in einem enggedrängten Jahrmarktreiben. Auf Tischen lagen Waren ausgebreitet, brannten Kerzen. Im Schwahl eine erstickende schwühle Luft. Da bemerkte ich, dass an der Westwand große Bilder aus der Heilsgeschichte durch eine helle Tünche schimmerten. Ich konnte auch erkennen, was sie darstellten. Damals war der Schwahl noch verglast. In ihm hatten die Husaren exerziert. An den Wänden waren Grabsteine aufgerichtet. Durch ein Fenster sah man den tiefverschneiten Kreuzganghof und auf die Mauer des Domes [...].“

1887 gelingt es Hotzen den bekannten Historienmaler Hermann Schaper von der Technischen Hochschule Hannover für eine Besichtigung der Wandmalereien zu gewinnen. Schaper empfiehlt, die vorhandene Zeichnung durch Nachziehen zu erneuern. Die Ausführung übernimmt August Olbers, ein Schüler und Gehilfe Schapers. Ein Kostenvoranschlag für „Stilgerechte Wiederherstellung“ der Schwahlmalereien (einschließlich Gewölbe) wird genehmigt. Die Vorgabe lautet „nur eine Wiederherstellung und Ergänzung der Konturen unter Erhaltung des Vorhandenen“ vorzunehmen. 1889 beginnt die „Restaurierung“ (Abb. 2 und 3). Im Westflügel wird bis auf die erste Szene, die Geburt Christi – sie stellt eine Neuschöpfung Olbers dar – so verfahren, ebenso im Nordflügel. Dort wo die Linien sehr schwach und schwer zu erkennen waren, wurden sie durch Anfeuchten deutlicher gemacht und dann

nachgemalt. Im Ostflügel scheint nur der Marientod noch ursprüngliche Linien zu zeigen. Alle weiteren Felder sind stilgerechte Neuschöpfungen Olbers, die er durch seine Signatur als eigene Komposition kennzeichnete (Abb. 5 und 6). Auch sämtliche Tierfriese und große Teile der Umrahmungen werden ihm zugeschrieben.

Fünfzig Jahre später wird August Olbers seine Arbeitsweise noch einmal erläutern, nachdem er Angriffen ausgesetzt ist, er habe die Malereien auf neuem Untergrund neu gemalt. Er schreibt an den Provinzialkonservator Saueremann: „Zunächst habe ich die Malereien vom Staube befreit, mit Wasser, dem ein wenig vom besten Kasein zugesetzt war, übergangen um die Farben besser haftend zu machen. Dann bin ich gewissermaßen allen alten Spuren mit großer Mühe nachgegangen, wobei ich mich vor kühnen Ergänzungen gehütet habe, wenn es mir auch von manchen Seiten verübelt wurde. Einzelne kleine Partien mussten namentlich am unteren Teil der Bilder im Ton der Wände überpinselt und dann die durchscheinenden Linien einmal erneuert werden. Das war aber nur an wenigen Stellen, wo der Grund ganz unansehnlich geworden war, der Fall. Das durch Pausen Übertragen kam nur bei Tierfiguren in Frage, das Durchpausen der alten Linien und Punkte wäre auch gar nicht möglich gewesen, besonders bei den Bildern der Westwand nicht. Um nicht mit deckenden Farben malen zu

müssen, habe ich von der schwarz-braunen und hart gewordenen Mennige Teile abgekratzt um densel-



5 Joch 1, Geburt Christi. Eigenkompositorische, stilgerechte Neuschöpfungen kennzeichnete Olbers durch seine Signatur (rechts außen neben dem Hirten), Aufn. nach 1891.



6 Detail aus Abb. 5, Signatur von Olbers.

7 Kolorierte Zeichnung hofseitiger Wandfelder von Olbers, um 1887.

8 und 9 Kolorierte Zeichnungen der Gewölbmalereien von Olbers, um 1887.

10 Joch 17, hofseitiges Wandfeld mit polychromer Malerei, Aufn. 2007.

ben Malgrund wiederzubekommen.“ Im Vorwege erstellte Olbers gewissenhafte Zeichnungen des Vorgefundenen auf Papier, die er anschließend mit Wasserfarben kolorierte (Abb. 7 bis 9).

Hotzen trifft – gegen die Bedenken seines Bauleiters Erhardt – eine folgenschwere Entscheidung, indem er die vorhandene Verglasung, die die Malereien bisher vor Witterungseinflüssen schützte, aus ästhetischen Gründen entfernen lässt. Profilsteine der Fenstergewände belegen indessen, dass ein Verschluss der Fensteröffnungen wohl von Anfang an vorgesehen und wahrscheinlich auch ausgeführt war. Nicht lange haben die Wandmalereien im ungeschützten Schwahl den Witterungseinflüssen standgehalten. Erneuter Verfall und Verschmutzung setzten ein. Die Rotlinienmalerei platzte zunehmend ab. Seit 1914 stellte man wieder Überlegungen zur Rettung der Schwahlmalereien an. Am radikalsten war Olbers' Vorschlag, die Malereien auf Pausen zu übertragen, den Wandputz mit der alten Malerei abzuschlagen und die Pausen auf die neu verputzten Wände zu übertragen oder alternativ Kopien auf Leinwand anzufertigen und diese auf Holzrahmen vor die Originale zu bringen.

DIE RESTAURIERUNG DURCH ERNST UND DIETRICH FEY AB 1933

Mehrfach wurde die Wiederverglasung des Schwahls, später vor allem auch von den Professoren Max Dörner aus München und Friedrich Wilhelm Rathgen aus Berlin gefordert. Bereits 1922 hatte man Glas angeschafft, doch die Maßnahme unterblieb. Dörner riet zu einer Festigung der Malereien mit Kalkkasein, Rathgen mit organischen Kieselsäureverbindungen. Der preussische Konservator Robert Hiecke entschied, die Festigung mit Kalkkasein durchzuführen, da sie der alten Technik unmittelbar entspricht und zu den Werkstoffen des vorhandenen Bestandes in einer natürlichen Verwandtschaft steht.

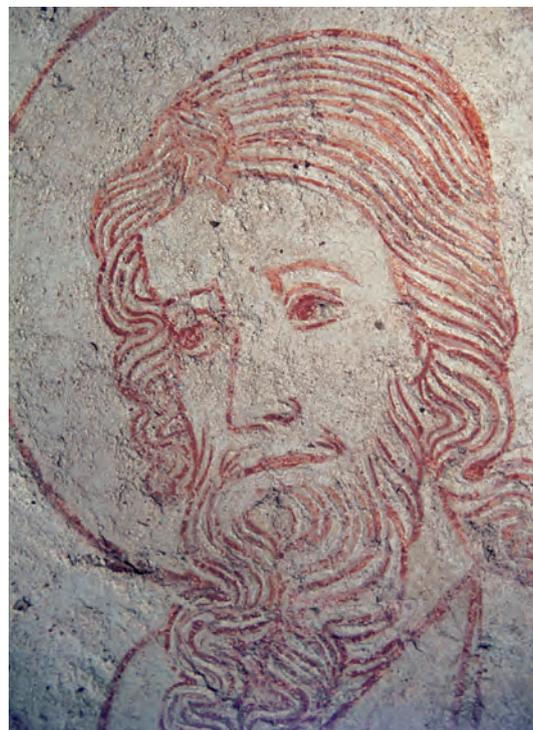
1933 erhielt der Kunstmaler Prof. Ernst Fey aus Berlin den Auftrag zur Restaurierung der Schwahlmalereien. Bald übernahm sein Sohn Dietrich zunächst mit einem Gehilfen namens Keitz, später zusammen mit Lothar Malskat die Ausführungen in eigener Verantwortung. Dietrich Fey und sein Gehilfe stellten angeblich fest, dass die Malereien unter einer von Olbers bemalten Kreideschicht noch gut erhalten waren. Prof. Rathgen bestätigte dies 1933. Olbers widerspricht ganz energisch und es gibt viele Anhaltspunkte, die für Olbers' Version sprechen oder zumindest dafür, dass Olbers nur

Teile mit Kreidegrund überfasste und darauf neu malte, besonders auf den Gewölben, dort wo Risse die Ergänzungen erschwerten.

Der nach der Restaurierung durch Fey zu Tage getretene vermeintlich unverfälschte Zustand wurde hoch gelobt. Es gibt jedoch keinen Beweis für die angebliche Freilegung Feys. Hingegen stellte man 1970 fest, dass bei der Restaurierung durch Fey die vorgefundene Malerei teilweise überkalkt und neu nachgezogen wurde. Einzelne Partien, wo Olbers keine Rekonstruktion gewagt hatte, waren jetzt ergänzt. Besonders umfangreich waren auch die Ergänzungen in den Tierfriesen.

Der Unterschied zwischen der Feyschen und der Olbers'schen Restaurierung bestand im Wesentlichen darin, dass Olbers bei seinen Ergänzungen einen handwerklich perfekten Zustand hinterließ, während Fey seine Ergänzungen und Übermalungen „auf Alt“ trimmte und den Figuren einen herben Gesichtsausdruck verlieh, der dem neuen Zeitgeschmack entsprach (Abb. 11).

Auch im Chor und im Schiff des Doms wird heute deutlich, dass Fey vieles, was er angeblich freilegte, in Wirklichkeit neu malte und künstlich alterte, indem er durch Bearbeiten (z.B. Bürsten) der Oberfläche einen Alterszustand vortäuschte.



11 Joch 4, Darbringung im Tempel, Kopf des Priesters mit typischen Spuren der künstlichen Alterung (Ritzungen im Haar, abgeriebene Oberfläche) durch Fey.

DER „TRUTHAHNSTREIT“

Fehlstellen in den stark zerstörten Tiermedaillonfriesen ergänzte Olbers frei nach eigenen Vorlagen ohne fälschende Absicht und machte die während seiner Arbeit hinzugekommenen vier Truthähne unter der Szene "Kindermord" auf seinen zur Dokumentation angefertigten Zeichnungen als eigene Zutat kenntlich. Provinzialkonservator Prof. Richard Haupt wies Olbers auf einen Anachronismus hin, denn schließlich kam der Truthahn erst Anfang des 16. Jahrhunderts von Amerika nach Europa. Vierzig Jahre später, nach der Restaurierung durch Fey, waren aus vier, im Wechsel zu den Truthähnen gemalten Füchsen, ebenfalls Truthähne geworden (Abb.12 und 13). Den Beteuerungen des inzwischen betagten Malers Olbers, ihm sei bei seiner Restaurierung damals ein Fehler unterlaufen und er der eigentliche Schöpfer der Truthähne, wurde kein Glauben geschenkt. Für den Kulturforscher Freerk-Haye Schirmann-Hamkens aus Schleswig schien nun endlich der Beweis für die Entdeckung Amerikas durch die Wikinger erbracht. Mit Schlagzeilen wie "Truthahn entthront Columbus" nahm die Neuentdeckung einen geradezu sensationellen Verlauf, bis 1947 ein vom Hochbauamt Schleswig angefordertes Gutachten von Prof. Wehlte (damals Berlin) Aufklärung brachte. Die vorkolumbischen Wikingerfahrten hatten nur zu gut in die germanisierende Weltanschauung des Nationalsozialismus gepasst!

Zitat aus dem Gutachten Wehlte von 1948:
„Musste den Kunsthistorikern schon die Einmaligkeit des Auftauchens eines so sensationellen Motivs zu denken geben, so musste weiterhin auffallen, dass stilistisch eine unverkennbare Diskrepanz zwischen den auf Originalmotive zurückgehenden Tierfiguren und den Truthähnen besteht.[...] Ob die aufgefundenen Spuren von Originalresten zu Pfauen gehören könnten, die von Olbers missverstanden waren, ist nicht mehr feststellbar.[...] Sollte der letzte Restaurator beidene können, das Olberssche Fuchsmotiv abwaschen und darunter Truthähne wieder aufgedeckt zu haben, so hätte also Olbers zunächst den gesamten Tierfries [...] mit Truthähnen gestaltet, dann aber als er gemerkt hat, dass er damit vom paarweisen Motivwechsel abgewichen war, jedes zweite Medaillonpaar überstrichen und durch Fuchsmotive ersetzt. Damit war es nahe liegend, dass der zuletzt tätige Restaurator beim Weglösen der Fuchsmotive dem Irrtum verfiel, die darunter befindlichen Truthähne seien Originale. In Wirklichkeit haben sich alle diese Vorgänge [...] auf der Olbersschen Kalktünche abgespielt. [...] Tröstlich

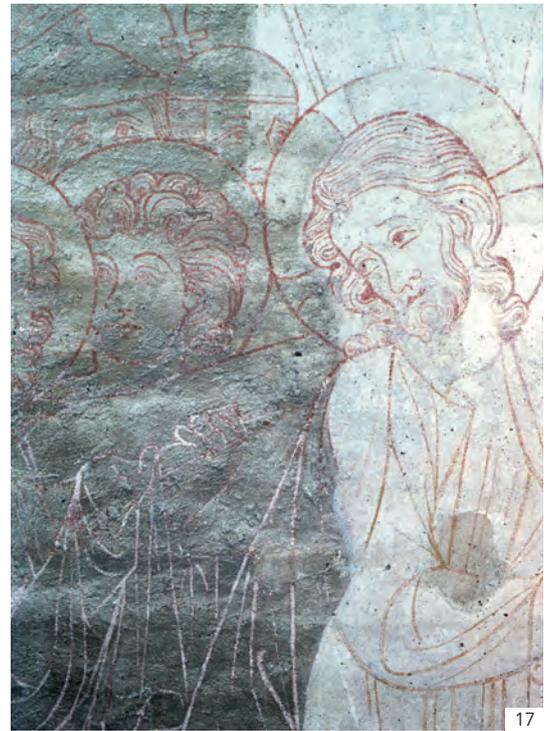


12 Joch 5, Kindermord, Zustand vor der Restaurierung durch Fey: Tierfries mit Füchsen und Truthähnen im Wechsel aus der Zeit Olbers, Aufn. um 1930.

13 Joch 5, Kindermord, Ausschnitt des Tierfrieses mit einem Truthahnpaar. Zustand nach der Restaurierung durch Olbers, Aufn. 1891.

14 Joch 5, Kindermord, Truthahn nach der Restaurierung 1976/77, Aufn. 1988.

ist, dass ein noch rechtzeitiges Einsetzen modernster Hilfsmittel zu objektiver Aufklärung zu führen vermag und dass die heutigen Grundsätze einer fortschrittlichen Denkmalpflege für die Zukunft derartige Streitfälle so gut wie ausschließen.“



15 Joch 6, Flucht nach Ägypten, Zustand nach 1950.

16 Joch 4, Gewölbemalerei während der Reinigung 1978.

17 Joch 10, Restaurierung ab 1970: Zustand während der Reinigung. Dort wo der Anteil an originaler Malerei besonders groß war, war die Konturenmalerei durch Überbindung mit Kaseinleim abgeplatzt. Die Malereien waren dort im Negativ zu sehen (Hintergründe schwarz, Linien weiß).

DIE RESTAURIERUNGEN AB 1970 DURCH BARBARA RENDTORFF UND 1978 BIS 1983 DURCH HARTMUT SCHOLZ

Ende der 1950er Jahre waren die Malereien derart geschwärzt beziehungsweise verschmutzt, dass sie kaum noch zu erkennen waren (Abb. 15). Dort wo der Anteil an originaler Malerei besonders groß war, war die Konturenmalerei durch Überbindung mit Kaseinleim abgeplatzt. Die Malereien glichen jetzt einem Negativ: die Hintergründe waren schwarz, die Linien hingegen durch den freigelegten Putzgrund hell.

Gutachten wurden eingeholt, unter anderem 1964 von Restaurator Wolfhard Glaise aus dem Rheinischen Amt für Denkmalpflege. Ab 1969 fanden Beratungen statt durch Restaurator Kurt Schmidt-Thomsen vom Westfälischen Amt für Denkmalpflege sowie durch Johannes Taubert, dem Leiter der Restaurierungswerkstätten des

Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege. Da bei einer intensiven Reinigung der Gemälde, lediglich originale Linien in geringem Ausmaß erhalten geblieben und damit Bildinhalte verloren gegangen wären, einigte man sich, die Zutaten der Olbers'schen und Fey'schen Restaurierung, dort, wo sie der ursprünglichen Linienführung entsprachen, zu belassen. Neben einer Sicherung des Malgrundes und dem Aufbrechen der alten Kaseinfixierungskrusten richteten sich die Bemühungen in erster Linie auf eine konservierende Behandlung der Malereien und nachrangig auf die Wiederherstellung des Schauwerts. Die Hintergrundflächen wurden mit einer alkalischen Paste gereinigt und anschließend mit einem Neutralisierungsmittel behandelt, die Konturenmalerei im Nachgang nur vorsichtig vom Schmutz befreit. Stellenweise wurden auch originale Konturen freigelegt und fixiert (Abb. 16).

Anders stellten sich die Probleme in denjenigen Feldern des Nordflügels dar, wo in erheblichem Maße Farbverluste eingetreten waren. Eine Reinigung hätte hier einen hellen Putzgrund ohne Liniemalerei zur Folge gehabt (Abb. 17). Nach vielerlei Versuchen wurde ein Verfahren gewählt, mit dem die weißen Linien vor der Reinigung beidseitig und sorgfältig mit reinigungsfester, jedoch nicht lichtbeständiger Farbe punktchenweise konturiert wurden. Man verwendete dafür spezielle nicht lichtbeständige Filzschreiber. Nach der Reinigung wurden die Konturen mit einer Farbe, die erkennbar vom Original abweicht, nachgezogen.

Abgesehen vom Eintönen frischer und älterer Putzausbesserungen sind nur bei den Konturen farbliche Ergänzungen vorgenommen worden. Als Schlussbehandlung der Wandflächen wurde nach unbefriedigenden Versuchen mit verschiedenen Fixativen, darunter auch hydrophobierende silikonhaltige Steinhärtungsmittel, ein nicht hydrophobierender Sandsteinfestiger gewählt. Ausgenommen sind zwei mit einem Fixativ auf Wasserglasbasis behandelte Felder, die für die Nachwelt dokumentiert sind. Die vornehmlich in den Farben rot und grün gehaltene Fassung der Architekturglieder wurde nicht wieder hergestellt.

Während der Arbeiten sind die Fenster mit drahtverstärkten Folien geschlossen worden, bis es 1978 zu einer endgültigen Verglasung kam. Ein ständiger Luftaustausch ist gegeben, da die Fensterrahmen nicht dicht am Anschlag sitzen. Außerdem besitzt jedes Fenster einen Öffnungsflügel.

Die im Winter 1976/77 unter einem Winterbauzelt durchgeführten baulichen Sanierungsmaßnahmen zur Sicherung der Nordwand brachten ein besonders feuchtes Raumklima mit sich. Es begünstigte die Entwicklung von schwarzen Pilzkulturen auf den noch ungefestigten Putzgründen, die wie schwärzliche Teppiche die Wandfelder überzogen. Untersuchungen des Instituts für allgemeine Mikrobiologie der Universität Kiel ergaben, dass die schwarzen Pilze bis zu mehreren Millimetern tief im Putz nachzuweisen waren. Das saure Milieu und die Mürbheit der alten Putzgründe seien wahrscheinlich diesen Pilzen zuzuschreiben, da sie organische, kalklösende Säuren ausscheiden. Es folgte eine Behandlung mit einem Fungizid, das üppig auf alle Felder ausgedehnt wurde und bis heute nachwirkt.

Die Restaurierung wurde unter der Leitung der Restauratorin des Landesamtes für Denkmalpflege Schleswig-Holstein, Barbara Rendtorff, den freien Mitarbeitern Peter Gloy, Harald Eckert und Hans Fernkorn mit Sohn ausgeführt. Ab 1978 erfolgte die abschließende Restaurierung vor allem der Gewölbe und der Hofseiten unter der Leitung des Amtsrestaurators Hartmut Scholz mit den Restauratoren Wolfgang Baude, Michael Oeß, Henning Mathiessen, Harald Eckert, sowie Frau Laros und ab 1980 mit Michael Doose.

Die Restaurierungsgeschichte der Schwahlmalereien spiegelt die vorherrschende Restaurierungsauffassung der jeweiligen Zeit wieder. Die eher undurchsichtige und kaum dokumentierte Phase unter Fey und Malskat, die zuletzt im Skandal um die gefälschten Chormalereien in der Lübecker Marienkirche ihr unrühmliches Ende fand, leitete die Wende ein. Die Wiederherstellung des Schauwerts der Malereien stand bei der letzten Restaurierung unter der Leitung von Frau Rendtorff und anschließend durch Herrn Scholz bereits nicht mehr so sehr im Fokus, sondern die Konservierung und die schwierige Suche nach den „richtigen“ Methoden, etwa der Reinigung und der Festigung. Aus den Restaurierungsakten im Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein in Kiel ist ersichtlich, wie intensiv man sich mit den einzelnen Maßnahmen und Methoden auseinandergesetzt hat. Es wurde zunehmend unerlässlich, Naturwissenschaftler mit in die Restaurierungsmaßnahmen einzubinden. Zudem entwickelte sich bereits die Ausbildung von wissenschaftlich geschulten Restauratoren an Hoch- und Fachhochschulen. Heute ist die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Restauratoren, Naturwissenschaftlern, Architekten, Klimaingenieuren und Kunsthistorikern sowie die gewissenhafte Dokumentation aller getroffenen Maßnahmen selbstverständlich.

Hartwig Beseler (Hrsg.): Die Kunstdenkmäler des Landes Schleswig-Holstein, Stadt Schleswig, 2. Bd.: Der Dom und der ehemalige Dombezirk. Bearbeitet von Dietrich Ellger, München/Berlin 1966.

Restaurierungsakten im Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein in Kiel, hierin enthalten die Zusammenfassung von Dr. Wolfgang Teuchert: Bericht zur Restaurierung der Wand- und Gewölbemalereien im Schwahl des Schleswiger Domes 1972–1981 in zeitlicher und sachlicher Ordnung.

Wolfgang Teuchert: Die drei Restaurierungen der Wandmalereien im Kreuzgang des Schleswiger Domes zwischen 1883 und 1981, in: Deutsche Kunst und Denkmalpflege 41, 1983, Heft 2, 1983, S. 88-108.

Wolfgang Teuchert: Die Restaurierungen der Wandmalereien im Schwahl des Schleswiger Domes zwischen 1883 und 1981. In: Christian Radtke und Walter Körber (Hrsg.): 850 Jahre St.-Petri-Dom zu Schleswig, 1134–1984, Schleswig 1984, S. 79-95.

Julika Heller und Christian Leonhardt
Rückblick auf die konservatorischen
Maßnahmen bis 2015

VORAUSSETZUNGEN UND MECHANISMEN ZUR KONSERVIE- RUNG PORÖSER, SALZBELASTETER, GEFASSTER PUTZE

Der Umgang mit historischen Bauwerken mit einer hohen Kontamination von leicht löslichen Salzen bedarf individueller Lösungsansätze im Kontext der objektspezifischen Anforderungen. Die Komplexität der Schadensmechanismen und ihre Schadenspotentiale sowie -ursachen können ausgehend von einer fundierten Bestandsanalyse erfasst und mit Hilfe naturwissenschaftlicher Untersuchungen der Objektsituation erschlossen werden.

Die salzinduzierte Belastung von Bauwerken, im speziellen die Anreicherung von Salzgemischen in Mauerwerk, Putz und Malereigefüge, zählt in der Baudenkmalpflege zu den anspruchsvollsten Konservierungsproblematiken. Die mit dem Bauwerk verbundenen Malereien befinden sich im direkten Einfluss des Malschichtuntergrundes, dessen Schadeinflüsse unmittelbar mit der Malerei im Austausch stehen. Dementsprechend befinden sich auch salzinduzierte Störungen im Mauerwerk in einer Wechselwirkung mit der Architekturoberfläche.

Entstehung und Ursache der Salzanreicherungen und Erkenntnisse über die Transportsysteme können somit nur im dreidimensionalen Zusammenhang des Gebäudes erschlossen werden. Darüber hinaus sind die komplexen Wirkungsmechanismen von Salzgemischen je nach Art ihrer Zusammensetzung, der Baufeuchte und des thermohygrischen Umgebungsklimas ausschlaggebend für den Schadenstyp. Der konservatorische Umgang mit Schadsalzen muss also ausgehend von der Objektsituation verschiedene Ansätze verfolgen: So können zum Beispiel Ursachen wie ein Feuchteintrag beseitigt oder klimatische Bedingungen beeinflusst werden.

Außerdem gibt es verschiedene Möglichkeiten, die Salze selbst zu reduzieren: Neben der rein mechanischen oberflächlichen Abreinigung von auskristallisierten Salzen können chemische Umwandlungen, elektrochemische und physikalische Methoden oder die Anwendung von Entsalzungskompressen, häufig aber auch ein Mischsystem, zur Salzreduktion eingesetzt werden.

Der Schwahl ist seit 2006 Gegenstand fortführender Untersuchungen, Analysen und verschiedenster Maßnahmen. Aufbauend auf der Bestands- und Zustandsaufnahme wurde von 2008 bis 2010 eine restauratorische Voruntersuchung zu den Möglichkeiten einer Konservierung der Wand- und Gewölbemalereien erarbeitet. Das Konservierungskonzept wurde anhand von naturwissenschaftlichen Untersuchungen überprüft und für die weitere Anwendung optimiert.

DIE ENTWICKLUNG EINES KONSERVIERUNGSKONZEPTES

Die hohe Anreicherung von hygroskopischen Salzen, Nitraten und die gipsangereicherte, verdichtete Oberfläche an den Außenwänden des Schwahls, auf einem mittel bis überwiegend stark entfestigten und durchfeuchteten Putzgefüge, bildete 2008 bis 2010 die große Herausforderung bei der Erarbeitung eines Konzeptes zum konservatorischen Vorgehen. Darüber hinaus musste der klimatische Einfluss auf die Schadensmechanismen bewertet werden. Die ersten Klimamessungen wurden 2007 begonnen, 2009 erweitert und 2015 mit einem eigens entwickelten netzwerkbasierten Klimamonitoring optimiert.¹

1 Konservatorische
Maßnahmen im
Nordflügel
des Schwahls,
Aufn. 2013.



Im Folgenden werden die konservatorischen Maßnahmen beschrieben, die direkt an den Außenwänden selbst zur Anwendung kamen (Abb. 1). Entwickelt wurde eine konservatorische Methode, die eine kombinierte Anwendung einer Reinigungs- und Salzverminderungs- sowie einer Gipsumwandlungskompressen umfasst. Da eine Salzreduzierung des gesamten Mauerwerks kaum zu realisieren war und einen massiven Eingriff in die historische Substanz bedeutet hätte, war es konzeptionell vorgesehen, nur die oberflächennahen Salz- und Gipsanreicherungen zu reduzieren, um auf diese Weise die verdichtete Oberfläche und das entfestigte Putzgefüge für die darauf folgende Putzfestigung zugänglich zu machen. Zur Maßnahmenüberprüfung wurde zunächst die Dicke des Mauerwerks mit 80 cm gemessen und jeweils vor und nach der Kompressenanwendung der Erfolg der Salzreduzierung mittels Bohrmehlentnahmen in ausgewählten Testbereichen überprüft.

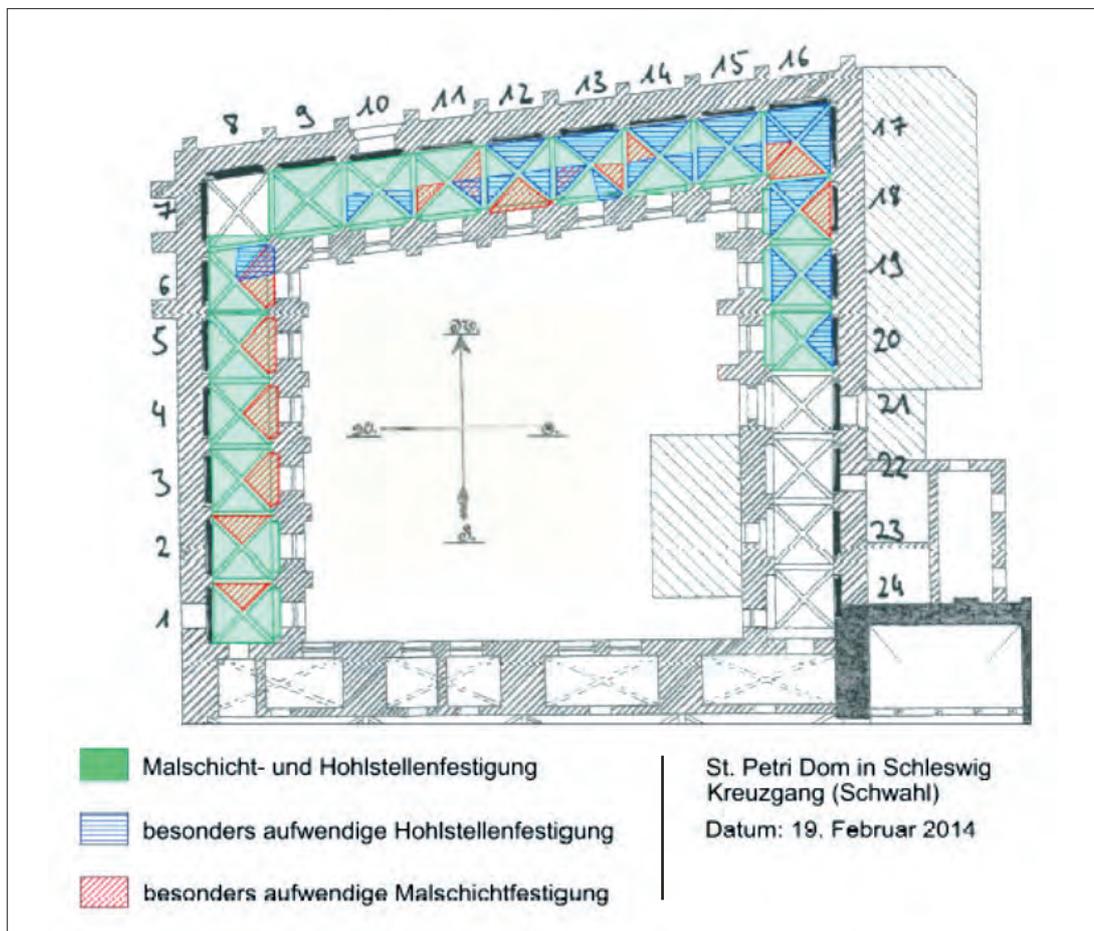
- Die Konservierungsmaßnahmen umfassten im Einzelnen folgende Anwendungsschritte:
- Vorreinigung und Vorfestigung
 - Salzverminderung
 - Gipsumwandlung
 - Strukturfestigung des Putzes der Außenwände

VORREINIGUNG UND VORFESTIGUNG

Vor den Kompressenanwendungen wurden substanzsichernde Maßnahmen durchgeführt (Abb. 2). Diese umfassten die mechanische Vorreinigung von losen Schmutzaufträgen und die Festigung gelöster Malschichtschollen mit Methylhydroxyethylcellulose und Kiesel (Tylose MH 300 1,5 % gelöst in demineralisiertem Wasser/Ludox PX 30 im Verhältnis von 3:1). Instabile Putzhohlstellen wurden mit dispergiertem Weißkalkhydrat (CalXnova, Vornässen mit demineralisiertem Wasser und Ethanol im Verhältnis von 1:1) stabilisiert. Aufgrund wasserlöslicher Retuschen im originalen Malereibestand musste die Malschicht zum präventiven Schutz mit einem flüchtigen Bindemittel temporär fixiert werden. Hierfür wurde das Wachs Cyclododecan verdünnt mit Siedegrenzbenzin mit dem Pinsel auf die gesamte rote Linienführung aufgetragen (Abb. 3). Des Weiteren mussten gefährdete Putzränder angeböschet beziehungsweise mit Kalksandmörtel (1:3) gekittet werden.

REINIGUNG UND SALZVERMINDERUNG

Als „Reinigungs-/Salzverminderungskompressen“ wurden Cellulosekompressen zum Entfernen von Verschmutzungen und zur Minderung oberflächennaher hygroskopischer Salze angewendet. Die



2 Grundriss mit Nummerierung der äußeren Wandfelder, Übersicht der durchgeführten Maßnahmen bis 2014.

3 Auftrag von Cyclododecan in Joch 11, Aufn. 2013.



4 Auftrag der Salzreduzierungskompressen in Joch 10, Aufn. 2013.



5 Messung der elektrischen Kapazität von Feuchte und Salzen: Die Ergebnisse der elektrischen Leitfähigkeitsmessungen geben Aufschluss über die Verteilung von Feuchte und Salzen in der Wand und werden in die Kartierung eingetragen, Außenwand Joch 2.



Kompresse bestand aus Buchenzellulosefasern Arbocel BC 200 und 1000 (1:1) und demineralisiertem Wasser. Sie wurde auf die gesamte Fläche der Außenwände aufgetragen. Durch Folienauflagen wurde die Wasserspeicherung optimiert (Abb. 4). Durchschnittlich verblieben die Kompressen je Zyklus ca. 1-2 Stunden auf der Wand und wurden stetig mit demineralisiertem Wasser nachgefeuchtet. Allgemein gilt für dauernasse Kompressen ein häufiger Kompressenwechsel und eine kurze Einwirkdauer.² Die genauen Zeitabstände wurden durch stetiges Überprüfen ausgewählter Testfelder mittels Leitfähigkeitsmessung ermittelt. Die Überprüfung der Kompressenauszüge (Extrakt aus definierten Testfeldern) fand vor Ort statt, so dass Auftragsdauer und Anzahl je nach Ergebnis angepasst werden konnten (Abb. 5). Abhängig von der vorliegenden Salzbelastung kam eine unterschiedliche Anzahl an Kompressenzyklen zur Anwendung. Bei einer hohen Belastung mit Salzen sollten diese zunächst weiter extrahiert werden.

GIPSUMWANDLUNG

Die Umwandlung von Gips ist durch Anwendung von Ammoniumcarbonat oder Ionenaustauscharzen möglich. Für die Maßnahmen im Schwahl war die Anwendung von Ammoniumcarbonat besser geeignet, da der ursprüngliche Materialbestand den ersten Analyseergebnissen zufolge stabil sein sollte und der Putz der Außenwände zu sehr entfestigt schien.³

Der Einsatz von Ammoniumcarbonat führt zur Umwandlung von Gips in das leicht lösliche Salz Ammoniumsulfat und Kalziumcarbonat.⁴ Überschüssiges Ammoniumcarbonat zersetzt sich zu Ammoniak, Kohlendioxid und Wasser. Eine Trocknung der Kompresse darf nicht stattfinden, da sich sonst die Reaktionsprodukte als Schleier an der Oberfläche anreichern. Die anschließende Entfernung des Ammoniumsulfats durch eine Neutralkompresse muss auf der noch feuchten Putzoberfläche erfolgen. Meist findet sich sogar deutlich mehr Sulfat in der Neutralkompresse als in der eigentlichen Umwandlungskompresse.⁵ Die Neutralkompresse wurde wie die Entsalzungskompresse mittels Leitfähigkeit kontrolliert und die Dauer des Auftrags bestimmt.

Die Gipsumwandlung findet vorwiegend an der Putzoberfläche statt. Tiefliegende Gipsbestandteile werden bei der Reaktion nicht umgewandelt und verbleiben meist „untätig“ im Gefüge.⁶ Im Rahmen von Wartungsmaßnahmen ist es daher notwendig zu überprüfen, ob sich Gipsbestandteile an der

Oberfläche angelagert haben beziehungsweise ob neue Gipsanreicherungen entstanden sind. Allgemein ist bei Anwendung dieser Methode darauf zu achten, dass die Putzstrukturen geschwächt werden können und eine nachfolgende Festigung notwendig machen.

Wie bereits bei der „Reinigungs- und Entsalzungskompressen“ wurde zur Gipsumwandlung Kompressenmaterial aus Buchenzellulosefasern (Arbocel BC 200 und 1000, 1:1) verwendet und eine gesättigte Ammoniumcarbonatlösung in demineralisiertem Wasser angesetzt. Die Auftragsdauer betrug ca. 1-1½ Stunden. Die Wirksamkeit der Kompressen wurde zunächst während des Auftrags optisch durch die verbleibende Intensität der Vergilbung bewertet. Abschließend wurde erneut eine Kompressen zur „Neutralisierung“ (Sulfatverminderung) bestehend aus Buchenzellulosefasern (Arbocel BC 200 und 1000, 1:1) und demineralisiertem Wasser, Auftragsdauer max. 1 Stunde aufgetragen. Eine Überprüfung des Ergebnisses für die Salzverminderung und Gipsumwandlung fand durch die Entnahme von Bohrmehlproben statt, unmittelbar nach Ausführung der Kompressen und nach Abtrocknung der Wandoberflächen.⁷

STRUKTURFESTIGUNG DES PUTZES

Zur Strukturfestigung des Putzes wurden drei Materialien erprobt und ihre Poren- und Kristallstruktur im Rasterelektronenmikroskop untersucht: Kalkwasser + CO₂-Gas, Calosil (Kalziumhydroxid-Sol in Ethanol) und Bariumhydroxid. Es zeigte sich, dass die Materialien unterschiedliche festigende Wirkung erzielten. Aufgrund der gleichmäßigen Festigungswirkung des Bariumhydroxids und der optischen Ergebnisse am Objekt wurde die Bariumhydroxidkompressen zur großflächigen Anwendung ausgewählt. Die Anwendung von Bariumhydroxid zur Festigung von Malerei- und Putzoberflächen wird in Italien seit den 1960er Jahren angewendet. Die langjährige Beobachtung der behandelten Bereiche zeigt einen dauerhaften Erfolg der Maßnahme.⁸

Durch den Eintrag von Bariumhydroxid mittels Kompressen wird Bariumkarbonat gebildet. Das Bariumkarbonat ist kompatibel mit Kalziumkarbonat und weist ähnliche Kristallstrukturen auf. Die Reaktion findet schnell statt. In Untersuchungen konnte eine hohe festigende Wirkung trotz geringerer Anzahl nachgewiesener Kristallstrukturen bestätigt werden. Das Bariumkarbonat selbst ist transparent und unlöslich. Eine Wiederholbarkeit der Anwendung bleibt gegeben,

so dass spätere Festigungen mit Bariumhydroxid oder anderen mineralischen Festigungsmitteln möglich sind.

Eine objektbedingte Einschränkung für die Anwendung ist ein erhöhter Nitratanteil von ca. 10 %, da hier das Risiko besteht, dass es bei der Strukturfestigung des Putzes zu einer ungewünschten Nebenreaktion durch irreversible Schleierbildung kommt.⁹ Im Fall der Wandmalereien des Schwahls wurden Nitrate bereits bestätigt. Da sie leicht löslich sind, konnte durch die zuvor durchgeführten Salzreduzierungskompressen jedoch eine ausreichende Verminderung der Nitratkonzentration erreicht werden.

Ein deutlicher Hinweis gilt der Beachtung der Toxizität des Materials. Im Vergleich zu den Methoden, die Matteini¹⁰ beschreibt, wurde im Schwahl eine veränderte Kombination der Bariumhydroxid-Festigung angewandt, die u.a. Paschinger¹¹ vorschlägt: Zunächst fand nach der Salzverminderungskompressen die Gipsumwandlung mit Ammoniumcarbonat statt. Anschließend wurden die Putzoberflächen mit Bariumhydroxid gefestigt. Die Putzfestigung mit Bariumhydroxid sollte ca. 3 Wochen nach der Gipsumwandlung mit Ammoniumcarbonat erfolgen, damit eventuell noch vorhandene Reste von Ammoniumsulfat verfliegen können.

Das Bariumhydroxid wurde in demineralisiertem Wasser als gesättigte Lösung (ca. 5-6 g/100 cm³)¹² mittels Kompressenmaterial aufgetragen. Um das Verdunsten der Lösung zu vermindern, wurde die Kompressen gut genässt und mit Folie abgedeckt. Der in der Literatur als schnell beschriebene Reaktionsverlauf konnte während der Maßnahme bestätigt werden.¹³ Da nur wenige Kristallstrukturen zur Gefügefestigung notwendig sind, konnte davon ausgegangen werden, dass der CO₂-Eintrag aus der Luft für die Reaktion ausreichend ist. Die Maßnahme wurde mittels Putzanalyse im Rasterelektronenmikroskop überprüft. Die Putzstrukturen waren gleichmäßig gefestigt und das Sanden der Putzoberfläche deutlich reduziert (vgl. S. 45, Abb. 7). Eine Auftragsdauer von 1 Stunde erbrachte eine homogene Festigung der Putzstrukturen.

MASSNAHMEN 2010 BIS 2015

Die erste Umsetzung des Konservierungskonzeptes begann 2011 im Westflügel des Schwahls. Die Arbeitsschritte zur Konservierung der Außenwände und des Gewölbes wurden von Joch 2 bis 6 ausgeführt. 2012 folgten die weiteren Konservie-

rungsarbeiten in den nachfolgenden drei Jochen 7 bis 9 im Eckbereich des West- und Nordflügels. Die Kompressenanwendungen wurden in allen Jochen mit Malereibestand bis 2012 durchgeführt. Darüber hinaus wurden salzangereicherte Putze im Sockelbereich unterhalb der Horizontalsperre mit Opferputzen ausgetauscht, gleiches galt für schadhafte Kittungen. Die Reinigungs- und Festigungsarbeiten im Gewölbe und an den Hofwänden fanden parallel zu den Maßnahmen an den Außenwänden statt. Einen nachhaltigen Konservierungserfolg bestätigte die Maßnahmenüberprüfung 2015.

MIKROBIOLOGISCHE BESIEDLUNG

Im Schwahl konnte bereits 1977 eine großflächig aufliegende schwarze Schimmelbildung beobachtet werden, welche auf die Einhausung in ein Winterzelt und die damit einhergehende Wasserbildung an den Wandmalereien zurückzuführen waren. Der Befall wurde damals mit Preventol (Biozid) beseitigt.

2010 wurde ein weiterer Bewuchs mit rosafarbenen Bakterien und *Cladosporium Sp.* festgestellt.¹⁴ Dieser konnte durch Anwendung der Ammoniumcarbonatkompressen bei der Maßnahme reduziert werden. Noch im gleichen Jahr musste jedoch ein erneuter Befall im Zuge einer weiteren Kompressenanwendung entfernt werden. Nicht auszuschließen war, dass durch den massiven Feuchtigkeitseintrag der Kompressen Sporen aktiviert wurden, die eine Ausbreitung des Befalls begünstigten.¹⁵

RESULTATE UND ZUSAMMENFASSUNG

Das in den Jahren 2008 bis 2010 erarbeitete Konservierungskonzept war die Grundlage der von 2011 bis 2015 verwirklichten Konservierungsmaßnahmen. Die restauratorischen Untersuchungen vor Ort während dieser Maßnahmen und die interdisziplinäre Zusam-

6 und 7 Oben vor und unten nach den Salz- und Gypsumwandlungskompressen, Joch 2, Aufn. 2012.



menarbeit ermöglichten präzise Aussagen über die Wirksamkeit der durchgeführten Arbeitsschritte.

Die Analyse der Bohrmehlentnahmen 2012 vor und nach der Maßnahme ergaben, dass sich die leichtlöslichen Salze (Chloride und Nitrate) durch die gesamte Mauerstärke hindurch gleichmäßig angereichert hatten. Nach mehreren Monaten und Abtrocknung der Wand reicherten sich diese Salze, trotz der Salzverminderungskompressen, erneut an der Oberfläche an. Die temporäre Reduktion der leichtlöslichen Salze minderte jedoch das Risiko für die unerwünschte Nebenreaktion einer irreversiblen Schleierbildung bei der Strukturfestigung des Putzes. Die Reduzierung der Salzkristalle in den Porenstrukturen des Putzes ermöglichte darüber hinaus die Verfestigung eben dieser Poren mit den Kristallen des Festigungsmittels.

Die schwerlöslichen Sulfate (Gipskrusten) konnten durch Ammoniumcarbonatkompressen optisch sichtbar und analytisch nachweisbar in Kalk umgewandelt werden. Teilweise mussten 2013 im Westflügel Arbeiten aus den Vorjahren 2011/12 wiederholt werden, da erneut Gipsanreicherungen in Kombination mit gelblichen Oberflächenverfärbungen festgestellt wurden, wenn auch in geringerem Ausmaß und Intensität. Diese gelben Verfärbungen bildeten sich in den Wandbereichen, in denen sehr stark gefärbte Bereiche vor Anwendung der Ammo-

niumpcarbonatkompressen vorhanden waren. In den Jochen 2, 3 und 6 sind die Farbveränderungen in einem geringeren Umfang wieder aufgetreten und heller als zuvor. In Joch 5 war die gelbe Verfärbung ähnlich groß und dunkel wie im Vorzustand 2011. Auch in Wandbereichen ohne Gelbfärbung wurde eine Anreicherung mit Kalziumsulfat festgestellt. In den Bereichen, in denen 2011 Konservierungsmaßnahmen durchgeführt wurden, konnte eine Kalziumsulfatreduzierung an der gesamten Wandfläche nachgewiesen werden. Nach dem Abtrocknen der Wandoberfläche (ca. 5 Wochen) wurde in den Analyseergebnissen erneut ein geringer Anstieg von Kalziumsulfat nachgewiesen.¹⁶

Der Großteil der gelblichen Verfärbungen konnte flächig und farblich reduziert werden (Abb. 6 und 7), die erneut entstandenen Verfärbungen waren meist geringer. Abweichend hierzu zeigte sich Joch 5, dessen gelbliche Verfärbung 2012 vollständig verschwunden war, sich aber bereits 2013 wieder im gleichen Umfang neu gebildet hatte. Das erneute Auftreten der gelben Verfärbungen führte zur Hinterfragung der Schadensursachen. Bisher war angenommen worden, dass es sich dabei um historische Schadsalzeinträge handelt. Nun wurden bauliche Gegebenheiten neu diskutiert und eine beschleunigte Gipsmobilisierung durch hygroskopische Salze als Möglichkeit in Betracht gezogen.

¹ Zu den bauphysikalischen und klimatischen Bedingungen vgl. den Beitrag „Klimatische Einflüsse“ im vorliegenden Band.

² WTA-Merkblatt 3-13-01/D nach Grassegger-Schön, 2003, S. 155.

³ Historische Maltechnik: Kalkmalereien mit Eisenpigmenten auf Kalkputz; Übermalungen und Ergänzungen: Kalkbindemittel (eventuell mit Kaseinanteil) und eisenhaltige Pigmente. Siehe Henrik Schulz: Bindemittel- und Pigmentanalysen, Bericht 260110, Archäometriellabor 2010.

⁴ $\text{CaSO}_4 + (\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$
Vgl. Mauro Matteini und Maria Rosa Nepoti: Analytische Kontrollen der Methoden zur Beseitigung von Gips in der Wandmalerei und bei Kunstobjekten aus Stein. In: Konservierung von Wandmalerei, Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 104, München 2001, S. 67-74.

⁵ Ute Steinhäusser und Eberhard Wendler: Untersuchungen zur Mobilisierung von Gips. In: Matthias Staschull und Bernhard Rösch (Hrsg.): Die Restaurierung eines Meisterwerks. Das Tiepolo-Fresko im Treppenhaus der Würzburger Residenz, München 2009, S. 123.

⁶ Matteini/Nepoti 2001 (wie Anm. 4).

⁷ Michael Steiger: Analysen der Bohrmehlentnahmen, Universität Hamburg, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Hamburg 2011.

⁸ Mauro Matteini: Mineralische Festigungsmittel zur Konservierung von Objekten aus porösem Material aus dem Bereich der Kunst und Archäologie. In: Mauersalze und Architekturoberflächen, Tagungsbeiträge Hochschule für Bildende Künste Dresden, Dresden 2003, S. 179.

⁹ Ekkehard Fritz: Reinigungs- und Rekonversionsverfahren an Wandmalereien. In: Konservierung von Wandmalerei, Arbeitshefte des bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 104, München 2001, S. 86.

¹⁰ Gipsumwandlung mittels Ammoniumcarbonat und Bariumhydroxid als Nachfestigung:
1. Reaktion: $\text{CaSO}_4 + (\text{NH}_4)_2 \text{CO}_3 \rightarrow (\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{CaCO}_3$ / 2. Reaktion: $(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4 + \text{Ba}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{BaSO}_4 + 2\text{NH}_3 + 2\text{H}_2\text{O}$
Bariumhydroxid zur Festigung von Kalkmörtel: $\text{Ba}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{BaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
„Passivierung“ von Gips: 1. Reaktion: $\text{CaSO}_4 + \text{Ba}(\text{OH})_2 \rightarrow \text{BaSO}_4 + \text{Ca}(\text{OH})_2$ / 2. Reaktion: $\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
Vgl. Matteini 2003 (wie Anm. 8), S. 180.

¹¹ Vgl. Hubert Paschinger: Bemerkungen zur Ammoniumcarbonat-Methode an Beispielen in Österreich. In: Konservierung von Wandmalerei, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 104, München 2001, S. 102.

¹² Matteini 2003 (wie Anm. 8), S. 179.

¹³ Matteini/Nepoti 2001 (wie Anm. 4).

¹⁴ Karin Petersen: Analysebericht Mikrobiologielabor, Hochschule für angewandte Wissenschaften (HAWK), Hildesheim 2016.

¹⁵ Cornelia Gehrman-Janßen, Petra Möhlenhoff und Karin Petersen: Die Gefährdung von Wandmalereien durch mikrobiellen Befall. Möglichkeiten der Prävention und der Abtötung von Schimmel. In: UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau, Tagungsband, hrsg. v. Dörthe Jakobs und Harald Garrecht, Ostfildern 2017, S. 125-142, hier 132.

¹⁶ Michael Steiger: Analysebericht Juni 2010, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg, Hamburg 2010.



Untersuchungen zur Schadenssituation,
Methoden und Konzepte



1 Übersicht
Innenhof nach
Nordwest,
Aufn. 2016.

Julika Heller

Erfassung der Bestandsmaterialien – Schadensphänomene und Schadensmechanismen

Die Erhaltung von Wandmalereien und Architekturoberflächen basiert auf der restauratorischen Erfassung der Bestandsmaterialien. Sie bezieht sich auf die materiellen Eigenschaften, den Erhaltungszustand und die individuellen Schadensursachen im Kontext eines dreidimensionalen Bauwerks. Darüber hinaus bilden aber auch naturwissenschaftliche Materialanalysen und die spätere Konzipierung wichtige Grundlagen. Die Verknüpfung und Interpretation der Ergebnisse durch den leitenden Restaurator führt zu einer Bewertung der Schadensfaktoren im Objekt und im Umfeld, ermöglicht eine Beurteilung der bisherigen Maßnahmen und liefert die Grundlage für die Wahl der Methoden der Konservierung.

Die Wandmalereien des Schwahls waren in der Vergangenheit wiederholt Gegenstand historischer Eingriffe und Restaurierungen. 16 Szenen des Wandmalerei-Zyklus und ca. 80 % der Malereien im Gewölbe sind in einem gut lesbaren Zustand erhalten.

Der Ostflügel erfuhr die umfänglichsten baulichen Veränderungen. Nach 1540 wurde er um ein Stockwerk erhöht und seine Räume als Vikars-Zellen genutzt. 1743 erfolgte der Abbruch des oberen Stockwerks. Dies führte vermutlich unter anderem dazu, dass an den aufgehenden Außenwänden des Ostflügels der Malereizyklus weitestgehend zerstört

und nur noch in Fragmenten überliefert ist. Die am besten erhaltene Darstellung im Schwahl „Mariä Tod“ befindet sich jedoch hier in Joch 21. Als Anbau an die östliche Außenwand bestand bis 1905 ein zweigeschossiges Wohnhaus und noch heute befinden sich unter einem gemeinsamen Dach mit dem Schwahl an dessen Außenwand der eingeschossige sogenannte Pfadfinder-Anbau und die Kanoniker-Sakristei.

2006 wurde anhand ausgewählter Joche eine restauratorische Befundsicherung der Deckenmalereien sowie der Malereien der Hof- und Außenwände durchgeführt. Seitdem werden Erkenntnisse über die historische Substanz, ihre Zusammensetzung und die Schädigungsmechanismen des Schwahls und seiner Malereien gesammelt, zusammengefasst und bewertet. Sie bilden eine zusammenhängende, langjährige Arbeitsgrundlage zur Erforschung der individuellen Schadensprozesse des Objektes. Das Ziel ist, mit einem umfassenden Gesamtkonzept die Grundlage für eine nachhaltige Konservierung, Restaurierung und ein Monitoring zu erarbeiten, um die Wand- und Deckenmalereien im Schwahl erhalten zu können. Auf Grundlage der Kenntnisse zur konservatorischen Problematik der Malereien wurde 2008 bis 2010 ein Konzept erstellt, das in der Folge bis 2015 umgesetzt und ständig optimiert wurde.¹

2 Übersicht der Außenwände im Westflügel, Aufn. 2016.



3 Kopf des Jesus aus der Darstellung der Majestas Domini in Joch 22, Aufn. 2013.

2015 standen im Rahmen des hier beschriebenen Forschungsprojektes der DBU die Außenwände im Fokus der weiteren Untersuchung. Die Konzipierung des Projektes basierte auf den 2006 erfassten phänomenologischen Untersuchungen des Bestandes und des Zustandes. Sie wurden im Projekt ergänzt und weitergeführt.

PHÄNOMENOLOGISCHE UNTERSUCHUNGEN

Die praktische Durchführung phänomenologischer Untersuchungen stützt sich primär auf die visuell-empirische Erfassung. Die Art der Untersuchungen wird dabei rein optisch (makroskopisch) beziehungsweise durch Zuhilfenahme einer Binokularlupe durchgeführt. Dies ermöglicht die Ablesbarkeit aller materiellen und technischen Sachverhalte, ohne einen mechanischen Eingriff in die Substanz tätigen zu müssen. Auf Grundlage dieser Methodik wurden seit 2006 fortlaufend der Bestand und die jeweiligen Schadensphänomene untersucht und fotografisch wie auch schriftlich dokumentiert. Anhand von bestehenden Kartierungen und Übersichtsplänen wurde eine eingemessene fotografische Monitoringgrundlage zur kontinuierlichen Bewertung des Erhaltungszustandes angelegt.

BESTANDSMATERIALIEN UND ZUSTANDSERFASSUNG

Das Mauerwerk des Schwahls besteht aus gelben bis vereinzelt rötlichen Tonziegeln (ca. 80 cm stark). Das Dach ist mit roten Tonziegeln gedeckt,



mit verstrichenen Fugen. Auf der Mauerkrone befindet sich seit 1979 ein umlaufender Ringanker aus armiertem Beton. Der Innenhof besteht aus einer Rasenfläche mit einem großen Ginkgo-Baum in der Nordost-Ecke (Abb. 1).

Im West- und Nordflügel ist der am großflächigsten erhaltene Bestand an Malerei vorzufinden (Abb. 2). Der Ostflügel zeigt, mit der Ausnahme von einem Joch, überwiegend fragmentarische Darstellungen. Die Malerei aus eisenoxidroten Linien ist in ihrer Gestaltungsabsicht gut nachvollziehbar, der Fondton der Kalkschlämme fehlt jedoch überwiegend. Historische Ergänzungen wurden im Fondton mit

BESTAND	MATERIAL	ABMESSUNG
MAUERWERK	Ziegelmauerwerk	Klosterformat
PUTZ	Kalkputz	5 - 15 mm
ZUSCHLAG PUTZ	Braun-schwarze Sandkörnung, Kalkgallen, Muschelschalen, Ziegelsplitt	< 5 mm
SCHLÄMME	Kalk	< 1 mm
MALSCHICHT	Kalkgebunden, Eisenoxid	< 1 mm
ÜBERMALUNGEN	Kalkgebunden, Eisenpigmente, Kaseinanteil	< 1 mm

4 Übersicht der Bestandsmaterialien der Außenwände nach Henrik Schulz.²

einer leichten Ockerfärbung und Punktierung in der Fläche oder bei den roten Linien in helleren Rottönen ausgeführt (Abb. 3). Der Putz ist dünn, wodurch das Fugenbild deutlich ablesbar ist. Die Putzeinschlüsse sind überwiegend feinkörnig, mit größeren Bestandteilen wie schwarzem Sandkornzuschlag, Kalkgallen, Muschelschalen und Ziegelsplitt (Abb. 4).

Die verschiedenen Schadensphänomene an den Außenwänden wurden zusammen mit dem Bestand 2007 erfasst.³ Die Malereien der Außenwände erscheinen in der Distanz in einem guten Zustand. Bei näherer Betrachtung werden jedoch viele akut gefährdete Bereiche deutlich. Der seit 2007 kontinuierlich dokumentierte Zustand wurde im Rahmen des Forschungsprojektes 2015 erneut bewertet. Im Folgenden werden die aktuell beobachteten Phänomene und Schäden nach den drei Schwerpunkten Mauerwerk, Putz und Malschicht beschrieben:

STATISCHE DEFORMIERUNGEN

Einer der gravierendsten Schäden hätte schon im 18. Jahrhundert fast zum Abbruch des gesamten Bauwerks geführt: Die nordwestliche Ecke und die gesamte nördliche Wand neigten sich, nach langsamem Einsacken der unter dem Gebäude liegenden Torflinse, zur Straße hin.⁴ 1743 wurden dort Stützpfiler aufgemauert, außerdem zwei an der Ecke des Westflügels. 1805 folgte schließlich der Aufbau eines dritten Stützpfilers.⁵ 1978 wurden dann umfangreiche statische Sicherungsmaßnahmen notwendig. Die gesamte Mauerkrone des Schwahls bekam dabei einen Betonring und die unter der nordwestlichen Ecke im Erdreich liegende schrumpfende Torflinse wurde komplett mit Beton verpresst. Um Erschütterungen zu verhindern, wurde die Straße für den LKW-Verkehr gesperrt und für den PKW-Verkehr zur Spielstraße, das heißt es muss im Schritttempo gefahren werden.⁶

HORIZONTALSPERRE

Als Horizontalsperre wurde bei baulichen Maßnahmen im 19. Jahrhundert eine Teerschicht eingebracht.⁷ Der damalige Schadenshorizont lag höher als heute, im Tierfries unterhalb der Darstellungen. Zu beobachten sind Schäden und Salzausblühungen an der Schlämmschicht unterhalb der Teerabsperzung generell auf der Nord- und der Westwand, hier liegt die Teerschicht tiefer. Sie ist auch auf der Außenseite der Mauer zu sehen. Das heißt aber nicht, dass sie durchgehend ist. Unterhalb der Horizontalsperre sind bis heute verstärkt Salzausblühungen und Schäden zu beobachten.

FEHLSTELLEN BIS AUF DEN ZIEGEL

Größere Fehlstellen des Putzes liegen überwiegend im Sockelbereich an den Neuverputzungen vor. Im historischen Putz sind größtenteils kleinere Fehlstellen vorhanden.

HOHLSTELLEN

In wenigen Bereichen befinden sich Hohlstellen im Putz, überwiegend an den Übergängen zu Putzergänzungen. Joch 2 weist die höchste Dichte an Hohlstellen auf, darunter auch instabile Hohlstellen, welche ausschließlich in Verbindung mit Putzbeulenbildung auftreten.

PUTZBEULENBILDUNGEN

Bezeichnet lokal begrenzte, konvex gewölbte Deformationen des Putzes, welche durch Salzkristallisationsdruck unter der Putzoberfläche hervorgerufen werden. Die Außenwand von Joch 2 weist ein besonders hohes Vorkommen auf. Die Lage gegenüber der Hoftür begünstigt hier einen erhöhten Luftaustausch und infolge dessen einen beschleunigten Klimawechsel sowie eine erhöhte mechanische Belastung durch Luftbewegungen an der Oberfläche. Das Auftreten von Putzbeulen ist vereinzelt auch in den anderen Jochen vorzufinden.

STRUKTURENTFESTIGTER, VERWITTERTER PUTZ

Salzauskristallisationen sind an allen Außenwänden des Kreuzganges festzustellen. Sie entfestigen das Putzgefüge und vergrößern die Poren. Das Phänomen ist auch auf der Putzoberfläche zu beobachten. Einzelne Putzbestandteile sanden ab, teilweise lokal begrenzt um den Zuschlag im Putz herum. Aus der geglätteten Kalkoberfläche des Putzes lösen sich die Sandkörnchen des Zuschlags (1 – 5 mm groß) heraus und hinterlassen entsprechende Krater im Putzgefüge. Unter dem Mikroskop wird der Schadensvorgang noch ersichtlicher; der Vorgang ist akut, da immer neue weiße Ausbruchstellen entstehen. Auf den porösen Oberflächen haftet Staub und führt zur Vergrauung oder zur Bildung von Mikroorganismen. Die Putzstruktur ist so weit reduziert, dass im Fondton in vielen Bereichen der Malereien kaum noch Malschicht aufliegt und die Putzoberfläche stark entfestigt ist (Abb. 5).

5 Detail
Putzfestigung und
Malschichtbeschaf-
fenheit, Joch 11,
Aufn. 2013.

6 Detail
Salzausblühung,
Joch 5,
Aufn. 2012.

FEHLSTELLEN IM PUTZ

Der Putz ist mitsamt der Malschicht „mürbe“ und langfristig durch weiteren Verfall gefähr-



det. Durch die fortschreitende Entfestigung der Putzstrukturen resultieren Fehlstellen im Putz. Zu differenzieren sind mechanisch bedingte Fehlstellen (z.B. Einritzungen). Besonders im Bereich der Horizontalsperren bis hin zum Bodenniveau sind an allen Außenwänden großflächige Putzfehlstellen vorzufinden, welche auf salzinduzierte Schädigungsmechanismen zurückzuführen sind.

MALSCHICHTFEHLSTELLEN BIS AUF FONDTON/PUTZ

Es sind Verluste der pastosen originalen Malschicht, des Fondtons und der Retuschen/Ergänzungen bis auf den Putz vorhanden. In den Linien der Malerei ist die Malschicht in der Mitte der Linie häufig verloren und nur in den Randzonen erhalten. Der Malschichtverlust ist besonders hoch in den Fugenverläufen des Ziegelmauerwerks. Die starke Reduzierung des Fondtons ist eine Folge der Restaurierung von 1979, als bei der Freilegung nur die originale rote Linierung stehen gelassen wurde. Zwischen dem weißen Original und der darüber liegenden Tünche ist nur schwer zu differenzieren. Freilegungsspuren wie beispielsweise Kratzspuren sind nicht festzustellen, doch ist anzunehmen, dass der weiße Fondton sehr stark gereinigt und damit auch die Malschicht reduziert wurde. In Joch 3 finden sich Überlagerungsspuren einer Tünche mit originaler roter Linierung im Tiermedaillonfries, die diese These stützen.

SALZE

Auf den historischen Oberflächen der Außenwände sind nur in den warmen, trockenen Sommermonaten auskristallisierte Salze sichtbar (Abb. 6). Im Sockelbereich unterhalb der Horizontalsperre im Neuputz sind hingegen ganzjährig starke Ausblühungen mit Verlust des Ergänzungsputzes festzustellen. Die Salzanalysen ergaben hauptsächlich hygroskopische Salze sowie Nitrate und oberflächliche Gipsanreicherungen.⁸

DURCHFUCHTUNG

Die Außenwände zeigen unterhalb der 1975 eingebrachten Horizontalsperre Feuchteflecken im Putz. Die Sperre scheint überwiegend funktions-tüchtig, da oberhalb der Teerschicht die Feuchte und Schäden abnehmen.⁹

VERSCHMUTZUNG

Insgesamt befinden sich auf allen Oberflächen unterschiedlich starke Verschmutzungen durch Staubablagerungen, Spinnweben, Fledermaus- und teilweise Vogelkot. Durch die Schiefelage der Außenwände, hauptsächlich im Nordflügel, lagern sich

Verschmutzungen erheblich stärker ab als auf den übrigen Wandflächen. Insbesondere in den Bereichen mit hervorstehenden Fugen und Kittungen ist eine besonders hohe Staubablagerung festzustellen.

MIKROORGANISMEN

Es konnten zwei Arten von Mikroorganismen differenziert werden: Optisch besonders auffällig ist der braune bis schwarze Befall der Gattung *Cladosporium Sp.* Der Schimmelpilz sitzt fest in der Putzstruktur der Oberfläche, verursacht jedoch keine makroskopisch sichtbaren strukturellen Beschädigungen. Im Zusammenhang mit den verstärkten Staubablagerungen und der immer wieder über 90 % steigenden relativen Luftfeuchtigkeit liegen im Schwahl günstige Wachstumsbedingungen für mikrobielle Besiedelungen von *Cladosporium Sp.* vor.¹⁰ Rosafarbener Befall (*Halalkaliphile Archae*) findet sich flächig und massiv ausgeprägt im Sockelbereich des Nordflügels. Die Bakterien besitzen aufgrund ihres hohen Gehalts an Karotinoiden ein rötliches Erscheinungsbild und stehen oft im Zusammenhang mit extrem hohen salzanreicherten Regionen, Feuchtigkeit, Neuputz (z.B. Zementputz) und Schlämmen (Kalk).¹¹

GELBE VERFÄRBUNGEN UND VERGIPSUNGEN

Im Westflügel liegen lokal begrenzte gelb gefärbte Bereiche der Wandoberfläche vor (Abb. 7). Die Dimensionen sind unterschiedlich groß ausgeprägt. Es handelt sich um eine dichte krustenartige Schicht, Linierungen und Putzzuschläge sind dennoch sichtbar. Die verfärbten Bereiche bewirken eine intensivere Kontrastierung der Malerei.

Häufig geht die Gelbfärbung mit einer beulenartigen Abwitterung einher, zurückzuführen auf die verdichtete und somit diffusionseingeschränkte Oberfläche. Putzanalysen wiesen zusätzlich eine starke Gipsanreicherung in diesen Bereichen nach, allerdings auch in Bereichen ohne Verfärbungen.¹² Eine genauere Differenzierung zwischen Vergipsung und gelb verfärbten Oberflächen ist dem Beitrag „Identifizierung der gelblichen Verfärbungen“ im vorliegenden Band zu entnehmen.

OBERFLÄCHENGLANZ

Als Überzüge vorangegangener Restaurierungen konnten Polyvinylalkohol und Polyvinylacetat nachgewiesen werden.¹³ Diese kommen großflächig in den Gewölben, an den Hofwänden und reduziert an den Außenwänden vor. Der Überzug ist durchsichtig und im Streiflicht durch Oberflächenglanz zu lokalisieren.

7 Vergilbung und Verkrustung der Oberfläche, Joch 2, Aufn. 2011.

8 Übersicht der Schadensphänomene an den Außenwänden.¹⁴



MATERIAL	PHÄNOMEN	LOKALISIERUNG	URSACHE
BAUGRUND	Statische Deformierungen, Schräglage der Außenwand	Nordflügel	Ehem. Obergeschoss, Bodenbeschaffenheit
PUTZ	Durchfeuchtung	West- und Nordflügel	Hygroskopische Salze, Luftfeuchtigkeit
	Strukturentfestigung	West- und Nordflügel	Salzauskristallisation, durchfeuchteter Putz
	Beulenbildung	West- und Nordflügel	Salzauskristallisation, durchfeuchteter Putz
	Fehlstellen	Gesamter Kreuzgang	Salzauskristallisation
MALSCHICHT	Fehlstellen bis Fondton	Gesamter Kreuzgang	Freilegungen, Salzauskristallisation
	Fehlstellen bis Putz	Gesamter Kreuzgang	Salzauskristallisation
	Gelbliche Verfärbungen	West- und Nordflügel	Gips/Überzugsmittel
OBERFLÄCHEN-AUFLAGEN	Salzausblühungen	West- und Nordflügel	Salze, Feuchtigkeit
	Mikrobieller Befall mit <i>Cladosporium sp.</i>	West- und Nordflügel, Joch 2-9	Staub, Feuchtigkeit, ggf. zusätzliche organische Nahrungsquelle
	Mikrobieller Befall mit rosafarbene Bakterien	Nordflügel, Sockel und Neuputz	Vermutlich alte Zementkittungen
	Biogene Auflagen	Gesamter Kreuzgang	Vogel- und Fledermauskot

ZUR SCHADENSPROBLEMATIK – INTERPRETATION UND SCHLUSSFOLGERUNG

Zu bewerten waren insbesondere die Zusammenhänge zwischen einer beschleunigten Neubildung von Gipsanreicherungen an der Oberfläche und den hygrischen Salzen der Außenwände des Schwahls. Hygrische Salze stellen insbesondere in Bezug auf die sich an der Oberfläche anreichernden Nitrate eine wesentliche Schadensursache dar. Die Nitrate verbleiben unter den Gipskrusten und entfestigen durch Kristallisationsdruck das Putzgefüge. Der unter der oberflächlichen Verdichtung liegende Putz kann nicht gefestigt werden. Die Oberfläche wird durch den Kristallisationsdruck lokal gewölbt. Auf diese Weise entstehen äußerlich sichtbare Putzwölbungen mit darunter liegenden entfestigten Putzstrukturen.

Die Gipsbelastung liegt nicht nur im feuchteren Sockelbereich in Form von Krusten vor, sondern auch in höher gelegenen Wandbereichen als dünnere Gipschicht. Dieses Schadensbild an den Außenwänden des Schwahls ist durch eine gleichzeitige Anreicherung von hygroskopischen Salzen wie Nitraten und Chloriden bedingt.¹⁵ So wird Gips zu

einem Schadensfaktor bei kontinuierlichem Feuchteintrag und Klimaschwankungen. Durch den – zwar langsamen, aber sich wiederholenden – Löse- und Kristallisationsprozess des Gipses bilden sich dichte, spannungsreiche Gipsschichten.¹⁶ Diese Krusten behindern durch ihre absperrende Wirkung den Transport von Feuchtigkeit und Salzen. Die Folgen davon sind Absprengungen der Oberfläche, bis hin zu ganzen Schollen,¹⁷ sowie Malschichtverluste und eine geschädigte, zermürbte Putzoberfläche.¹⁸ Die Auflösung der Gipskrusten ist demzufolge für die kapillare Öffnung der Putzoberfläche unerlässlich. Nach Abnahme der Kruste ist eine Festigung der Putzoberfläche notwendig und durchführbar.

Die Gipskrustenbildung wird in der Literatur als sehr langsamer Prozess beschrieben, der über Jahrzehnte entsteht. In diesem Fall, also an den Außenwänden des Schwahls, mussten wir jedoch trotz vollständiger Umwandlung des Gipses bis in die Mauerwerkstiefe innerhalb weniger Monate eine erneute Gipsanreicherung an der Malschichtoberfläche feststellen. Daher war anzunehmen, dass hohe Salzkonzentrationen im Mauerwerk eine erhöhte Löslichkeit der Sulfatkristalle bewirken.¹⁹ Diese Fragestellung sollte im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes geklärt werden.

¹ Vgl. den vorangegangenen Beitrag „Rückblick auf die konservatorischen Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.

² Henrik Schulz: Analysebericht 26.10.2007, Archäometriellabor, Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Hildesheim 2007.

³ Christian Leonhardt: Bestandsaufnahme Mai 2007 – November 2008, Werkstatt für Kunst- und Denkmalpflege GbR, Mönkeberg 2008, S. 5.

⁴ Karlheinz Schlüter: Aus der jüngeren Baugeschichte des Domes. In: Christian Radtke und Walter Körber (Hrsg.): 850 Jahre St.-Petri-Dom zu Schleswig, 1134–1984, Schleswig 1984, S. 59–78, hier S. 69.

⁵ Hartwig Beseler (Hrsg.): Die Kunstdenkmäler des Landes Schleswig-Holstein, Stadt Schleswig, 2. Bd.: Der Dom und der ehemalige Dombezirk, bearbeitet von Dietrich Ellger, München/Berlin, 1966, S. 163, 166.

⁶ Bauliche Sicherungsmaßnahmen 1975: Bodenverfestigungen, Fundamentausbesserungen, Betonschüttung in die Mauerkrone, Ringanker auf die Mauerkrone gelegt, Horizontalsperre eingezogen und neue Fensterleibungen aufgemauert. Von restauratorischer Seite wurden im Mauerwerk des Kreuzgangs Fugen ausgebessert, Steine ausgetauscht, Steine mit Mörtel nachgeformt und Nirokeile im Gewölbe eingesetzt.

⁷ Die Horizontalsperre wurde nach Ellger zusammen mit einer neuen Ziegellage Maschinenziegel an der Westwand eingezogen. Der Einbau muss im 19. Jahrhundert stattgefunden haben. 1889/90 wird auf eine Neuvermauerungen im Sockel in der Nordwestecke und am Südende der Außenwand hingewiesen, vermutlich fand der Einbau der Horizontalsperre in diesem Zusammenhang statt. Siehe Ellger 1966 (wie Anm. 5), S. 163–164.

⁸ Vgl. den Beitrag „Salz und Klima“ im vorliegenden Band.

⁹ Zur Funktionsfähigkeit der Horizontalsperre vgl. den Beitrag „Evaluation baulicher Veränderungen und bisheriger konservatorischer Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.

¹⁰ Karin Petersen und Carla Leupold: Analysebericht, Mikrobiologielabor Lehrstuhl für Mikrobiologie, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Hildesheim 2010.

¹¹ Karin Petersen: Analysebericht, Mikrobiologielabor Lehrstuhl für Mikrobiologie, Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Hildesheim 2016.

¹² Henrik Schulz: Analysebericht 26.01.2010, Archäometriellabor, Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Hildesheim 2010.

¹³ Schulz 2010 (wie Anm. 12).

¹⁴ Ein detaillierter Bestands- und Schadenskatalog wurde 2006 bis 2008 angefertigt und ist als Dokumentation im Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein in Kiel archiviert.

¹⁵ Ein dünner Gipsschleier weist einen Salzgehalt von 1–3 g/m² auf, ein stärkerer Schleier 5 g/m². Dickere Gipskrusten von 1 mm besitzen einen Salzgehalt von 2000 g/m². Konrad Zehnder: New aspects of decay caused by crystallization of gypsum. In: Salzsäuren an Wandmalereien, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 78, München 1996, Anhang S. 205ff, hier S. 206.

¹⁶ Elisabeth Jägers: Aktuelle Methoden für die Konservierung von Wandmalereien. In: Konservierung von Wandmalerei, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Band 104, München 2001, S. 30.

¹⁷ Jörg Riedel: Zur Konservierung gipsbelasteter Außenwandmalerei. In: Mauersalze und Architekturoberflächen, Tagungsbeiträge der Hochschule für Bildende Künste Dresden, Dresden 2003, S. 185.

¹⁸ Jägers 2001 (wie Anm. 16).

¹⁹ Vgl. den Beitrag „Evaluation baulicher Veränderungen und konservatorischer Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.

Evaluation baulicher Veränderungen und konservatorischer Maßnahmen bis 2015

Historische Quellen zu erfassen und dokumentierte Daten und Ergebnisse der letzten Jahre zu inventarisieren und auszuwerten, erwies sich als ein wichtiger Aspekt im Rahmen der Arbeiten im DBU-Projekt. Die Bestands- und Zustandserfassung 2007, die darauffolgenden Untersuchungen und Maßnahmen bis 2015, dazu die im Rahmen des DBU-Projektes durchgeführten Maßnahmen bis 2018 ergaben eine Vielzahl an Informationen. Neben der Erfassung einzelner Berichte galt es, alle Untersuchungsergebnisse mit ihren individuellen Schwerpunkten auszuwerten und mit der Objektsituation in Korrelation zu setzen. Die Auswertung erfolgte mit folgenden Schwerpunkten:

- Bewertung baulicher Maßnahmen hinsichtlich der Feuchteinwirkung
- Auswertung erhobener Analysedaten zu Salzen (qualitativ und quantitativ)
- Auswertung der Maßnahmen gegen die gelben Verfärbungen
- Auswertung der Untersuchungen mikrobieller Ansiedelungen

BEWERTUNG BAULICHER EINGRIFFE ZUR FEUCHTIG- KEITSMINDERUNG

Neben den restauratorischen Eingriffen an den Wandmalereien selbst erfolgten bis 2015 auch an der Bausubstanz Veränderungen und Optimierungsversuche, die unter anderem die Reduzierung der Feuchtigkeit zum Ziel hatten.

HORIZONTALSPERRE

Ende des 19. Jahrhunderts wurde in die Außenwände des Schwahls eine waagrecht im Mauerwerk verlaufende Isolierschicht (Pech/Teer) eingebracht.¹ Die Maschinenziegel unterhalb der Horizontalsperre sprechen für ein Mauer-Austauschverfahren. Vermutlich gab es damals schon erhebliche Schäden durch aufsteigende Feuchte und die dadurch transportierten Schadsalze. Die Zone unterhalb der Isolierschicht zeigt heute noch großflächige massive Putzschädigungen. Schäden dieses Ausmaßes sind oberhalb der Isolierschicht nicht zu beobachten. Dies spricht zunächst dafür, dass die Funktionsfähigkeit der Sperre noch gegeben ist.



1 Übersicht
Horizontalsperre,
Joch 5, Aufn. 2016.



2 Horizontalsperre
Detailaufnahme,
Teertropfenbildung,
Joch 5, Aufn. 2016.

Die wiederholte Neubildung von Teerläufern an den Innenwänden, teilweise innerhalb weniger Monate, stellte jedoch die homogene Verteilung der Isolierschicht sowie die Funktionsfähigkeit der Horizontalsperre infrage (Abb. 1 und 2).

Das verwendete Material für die Horizontalsperre ist eine schwarze Substanz, bei der es sich vermutlich um ein Teergemisch handelt. In regelmäßigen Abständen treten aus dieser Isolierschicht tropfenförmige Blasen hervor. Die erste Annahme war, etwas würde die Isolationsschicht verflüssigen und die Tropfenbildung verursachen. Dies ist jedoch unter Berücksichtigung der überraschend hohen Viskosität von Pech, die sich ähnlich wie bei Teer verhält, nicht zwingend notwendig. Wie seit 90 Jahren anschaulich in der Queensland Universität

bei dem *pitch drop experiment* bewiesen wird, härten diese Stoffe nie vollkommen aus, sondern bleiben stets viskos.² Addiert man dazu den Druck des Mauerwerks, der auf der Isolierschicht lastet, sind solche stetigen Tropfenbildungen gut zu erklären. Zu vermuten ist, dass die Sperre aufgrund des Austretens des Teeres mittlerweile stellenweise unwirksam ist. Wichtig für die Frage der Integrität der Sperre ist auch die Tiefe, mit der sie in das Mauerwerk reicht.

Um zu klären, ob die Isolierung vollständig durch die gesamte Mauerstärke verläuft, wurde 2017 von außen und von innen in die Fuge der Horizontalsperre gebohrt. Zusätzlich wurden zur Prüfung der Funktion

der Trennschicht unterhalb (in 0,34 m Höhe ab Oberkante Fußboden = OKF) und oberhalb (0,40 m OKF) der Sperre Bohrmehlproben entnommen. Durch die Bohrungen war festzustellen, dass die Horizontalsperre von innen nach außen bis zu 37 cm tief und von außen nach innen 37 cm tief in die Wand hinein verläuft. Die Mauerdicke beträgt insgesamt 80 cm. Somit lässt sich eine Lücke der Horizontalsperre von ca. 6 cm ermitteln.

Die Ergebnisse der Feuchtigkeitsbestimmung und die Ionenanalyse der Bohrmehlproben³ bestärkten die Beobachtungen während der Probeentnahme. Die Feuchtigkeitsbestimmung ergab, dass unterhalb der Horizontalsperre die Feuchtigkeit bis hin zu einer Tiefe von 15 cm zunächst ansteigt und darauf folgend bis zu einer Tiefe von 25 cm leicht absinkt (etwa 2 %). Ab 25 cm ist wiederum ein deutlicher Feuchtigkeitsanstieg zu beobachten. Parallel hierzu ist oberhalb der Horizontalsperre von 15 bis 25 cm die Feuchtigkeit am höchsten. Neben der bereits beobachteten Teertropfenbildung kann dies ein weiterer Hinweis auf eine stellenweise inhomogene Verteilung oder eine Störung der Horizontalsperre sein. Der sonst anhaltend hohe Feuchtigkeitsverlauf unterhalb der Sperre bis in einer Mauerwerkstiefe von 35 cm lässt jedoch auf eine überwiegend durchgängige Sperrfunktion schließen.

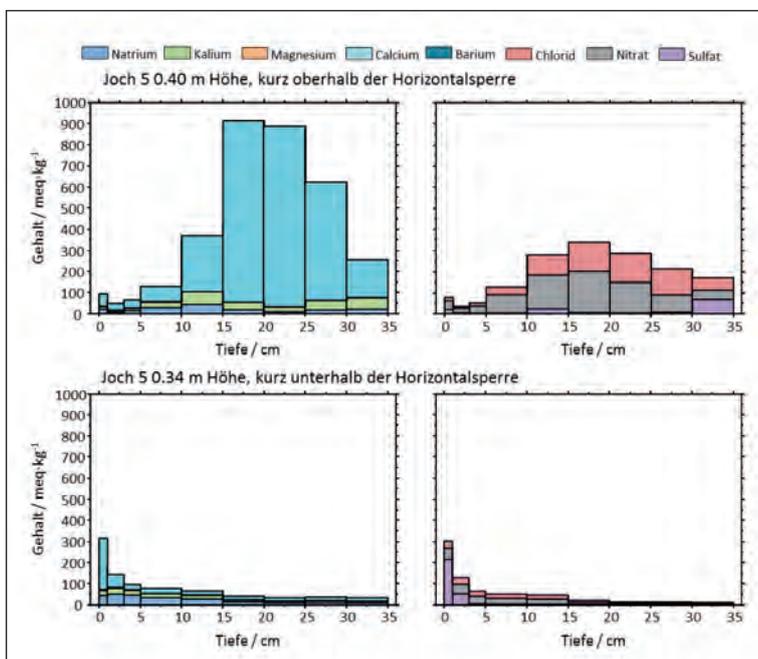
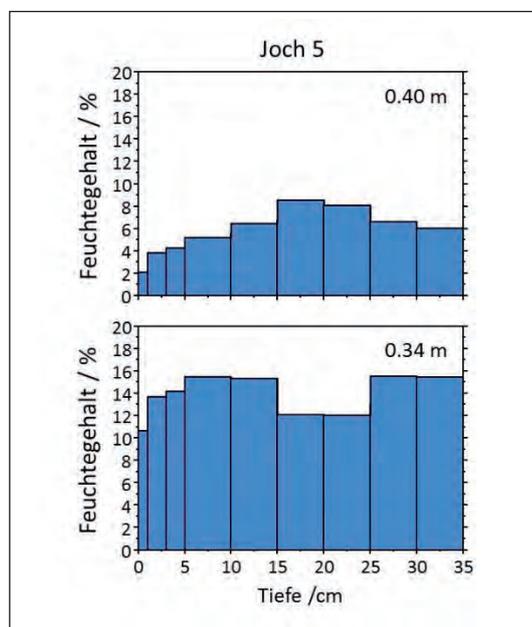
Die Analyse der Ionen ergab oberhalb der Horizontalsperre eine geringere oberflächennahe Salzbelastung, welche in einer Tiefe von 5 bis 15 cm leicht ansteigt. In den Ionengehalten dominieren Kalziumionen, des Weiteren liegen Nitrat- und Chloridionen vor.⁴ Ab einer Tiefe von 15 bis 25 cm ist ein Anstieg des Ionengehaltes zu beobachten; die Werte korrelieren mit den hier ebenfalls festgestellten höchsten Feuchtigkeitswerten. Unterhalb der Sperre sind vergleichsweise geringere hygroskopische Salzgehalte bei vergleichsweise hoher Feuchtigkeit festzustellen. Im oberflächennahen Bereich befinden sich hauptsächlich Nitrat- und Chloridionen, welche nach innen hin deutlich abnehmen. Oberflächennah sind auch Sulfatanreicherungen festzustellen.

Aufgrund der Ionenverteilung der einzelnen Tiefenabschnitte kann keine eindeutige Störung der Horizontalsperre festgestellt werden. Die Korrelation der hohen Feuchtigkeitswerte mit dem erhöhten Salzgehalt in einer Tiefe von 15 bis 25 cm und die Beobachtungen während der Probeentnahmen deuten jedoch auf Störungen in der Sperre hin (Abb. 3 und 4).

Einen weiteren Hinweis bot auch die Auswertung der thermografischen Aufnahmen auf Höhe der

3 Untersuchung der Durchgängigkeit der Horizontalsperre in Joch 5, 2016. Feuchtegehalte in Prozent, Bohrmehlproben in 0,40 m und 0,34 m Höhe.

4 Untersuchung der Durchgängigkeit der Horizontalsperre in Joch 5, 2016, rechts Kationen- und links Anionenverteilungen, Ionenprofile der Bohrungen in 0,40 m und 0,34 m Höhe.



Horizontalsperre. Die Aufnahmen zeigten eine Unregelmäßigkeit der Horizontalsperre im rechten Bereich von Joch 5.⁵

BAULICHE MASSNAHMEN IM BEREICH DES INNENHOFS

Zusammen mit dem Landeskirchenamt Kiel, dem Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein, dem Architekten Edgar Schwinghammer und dem Landschaftsplaner Holger Muhs wurden verschiedene bauliche Maßnahmen geplant und ausgeführt, die zu einer Verbesserung des langfristigen und nachhaltigen Schutzes der Malereien beitragen werden. Die Sanierung des Innenhofs begann mit dem Fällen der großen Rotbuche, die den nordöstlichen Teil des Schwahls weit überragte und beschattete. Auch der an den Hofwänden hoch wuchernde Efeu wurde entfernt. Die erhöhten relativen Luftfeuchten in Herbst und Winter gerade in dieser Ecke des Schwahls konnten damit positiv beeinflusst werden. Die zunehmenden Schlagregenmengen sollten möglichst wartungsarm abgeleitet werden. Dafür wurde das Entwässerungssystem des Innenhofs neu angelegt. Die an Humus reiche und damit die Feuchte stark bindende Erde des Innenhofs konnte ausgetauscht und durch einen wasserabweisenderen Untergrund mit Rasenbelag ausgetauscht werden.

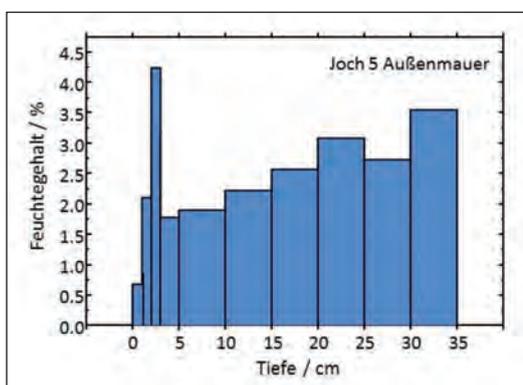
Im Außenmauerwerk und an den Wänden zum Hof wurden die Fugen ausgebessert. Das Fundament wurde zum Hof hin aufgedigert und mit Ton gegen die mit Nitraten angereicherte feuchte Erde abgesperrt. Auch die im Hof liegenden oder an den aufgehenden Wänden befestigten zahlreichen Grabplatten wurden im Bestand aufgenommen und nicht mehr an den Wänden des Schwahls platziert. Im Zusammenhang mit den Maßnahmen konnte der östliche hölzerne Pfadfinder-Anbau am Schwahl saniert und die Zuwegung von Osten her zum Schwahl neu angelegt werden.

BAULICHE MASSNAHMEN AN DEN AUSSENSEITEN DES SCHWAHLS

Die gesamte Westwand zeigte bereits in den vergangenen Jahren eine erhöhte Feuchtigkeitsentwicklung im Mauerwerk und Vergipsungen der Wandflächen. Auf Höhe von Joch 5, gegenüber der am stärksten ausgebildeten gelblichen Verfärbung, stand außen bis 2015 ein stark durchfeuchteter Stütz Pfeiler. Der Pfeiler selbst wies keinen Originalbestand auf. Infolge der Ergebnisse der Bohrmehlanalysen und der Bestandserfassung wurde 2015 der Abriss des Pfeilers beschlossen. Während der Abbrucharbeiten wurden die Ziegelsteine und weitere für die Aufmauerung verwendete Materialien aufgenommen und die

dortige Situation vermessen. An den Flächen ohne Verzahnung war der Raum zwischen Pfeiler und Wand mit Mörtel ausgefüllt. Die Humusbildung auf diesem Mörtel weist darauf hin, dass die Wandfläche vor dem Anbau des Pfeilers frei bewittert war. Die Wandrückseite des Stütz Pfeilers zwischen Joch 5 und 6 ist schräg aufgemauert. Durch diese zu schräge Aufmauerung wurde Regenwasser über die Fugen in den Stütz Pfeiler und damit in das Mauerwerk geleitet.

Vor dem Abriss waren zunächst in verschiedenen Höhen Bohrmehlproben entnommen und eine hohe Salzkonzentration im Pfeiler festgestellt worden.⁶ Zur Evaluierung der Maßnahme wurden diese Ergebnisse 2017 mit einer erneuten Probeentnahme nach dem Abriss verglichen. Im Bereich rechts neben dem Pfeiler, dort wo die Feuchtigkeit damals augenscheinlich am deutlichsten abzulesen war, gaben die Bohrmehlanalysen weiteren Aufschluss über die Schadsituation. Der Salzgehalt zeigte im Vergleich zu den Untersuchungen im Oktober 2015, ebenfalls rechts neben dem Pfeiler, dass die Salzgehalte etwas höher waren. Trotzdem lagen sie auch im Abschnitt mit dem höchsten Salzgehalt unterhalb von insgesamt 3 Masseprozent. Anzunehmen ist, dass die Wandfläche neben dem Pfeiler seit 2015 abtrocknen konnte, darauf weist auch der rein optische Vergleich der Wandfläche zwischen 2015 und 2017 hin. Der erhöhte Salzgehalt kann mit der Abtrocknung der Wandfläche zu erklären sein, durch welche die Salze aus der Wand verstärkt an die Oberfläche transportiert wurden. Die Probe von 2017 wurde mit den Feuchtegehalten aus dem Bereich der Wandmalereien und denen hinter dem Pfeiler verglichen. Diese lagen 2015 kaum unterhalb von 3 %. Die Probe von 2017 zeigt mit einem Feuchtegehalt von unter 3 % eine geringere Feuchte (Abb. 5). Mit zunehmender Tiefe steigt die Feuchtigkeit jedoch an. Die Feuchtegehalte deuten somit ebenfalls auf eine Abtrocknung dieses Bereiches hin.



5 Feuchtegehalt der Bohrmehlproben im Außenmauerwerk (rechts neben dem Stütz Pfeiler), 2017.

Der Pfeiler begünstigte somit eine Feuchteanreicherung im Mauerwerk und eine geringe Abtrocknungsmöglichkeit aufgrund der Ecksituation der Wandflächen zum Stützpfiler. Seit Entfernung des Pfeilers kann dieser Bereich nun abtrocknen.

Das Problem von Streusalz und Spritzwasser der direkt an die nördliche Außenwand des Schwahls angrenzenden Kopfsteinpflaster-Straße konnte durch Einschränkungen des Verkehrs und geänderter Streusalzvorgaben behoben werden.

SALZREDUZIERUNG MITTELS KOMPRESSENAUFTRAG UND WEITERE MASSNAHMEN

Zur besseren Quantifizierbarkeit der einzelnen Analyseergebnisse (Bohrmehlproben) der Kompressenanwendungen wurden alle erhobenen Daten der letzten Jahre (2011–2016) miteinander verglichen. Exemplarisch für die Evaluierung der Salzreduzierungskompressen werden im Folgenden die Ergebnisse von Joch 5 vorgestellt, hier werden die Salzreduzierungserfolge besonders deutlich. Wie in der Diagrammdarstellung (Abb. 6) zu sehen ist, haben sich die Ionengehalte ca. um ein 6-faches reduziert.⁷ Dies betrifft auch die hohen Konzentrationen der oberflächlichen Gipsanreicherungen in Bereichen mit und ohne aufliegende gelbliche Verfärbungen. In Konsequenz der geringeren Salzgehalte wurde 2015 angenommen, dass weitere Salzreduzierungskompressen eine geringere Salzreduktion als in den

Vorjahren bewirken würden. Zu überdenken war, ob noch weitere Kompressenanwendungen durchgeführt werden sollten.

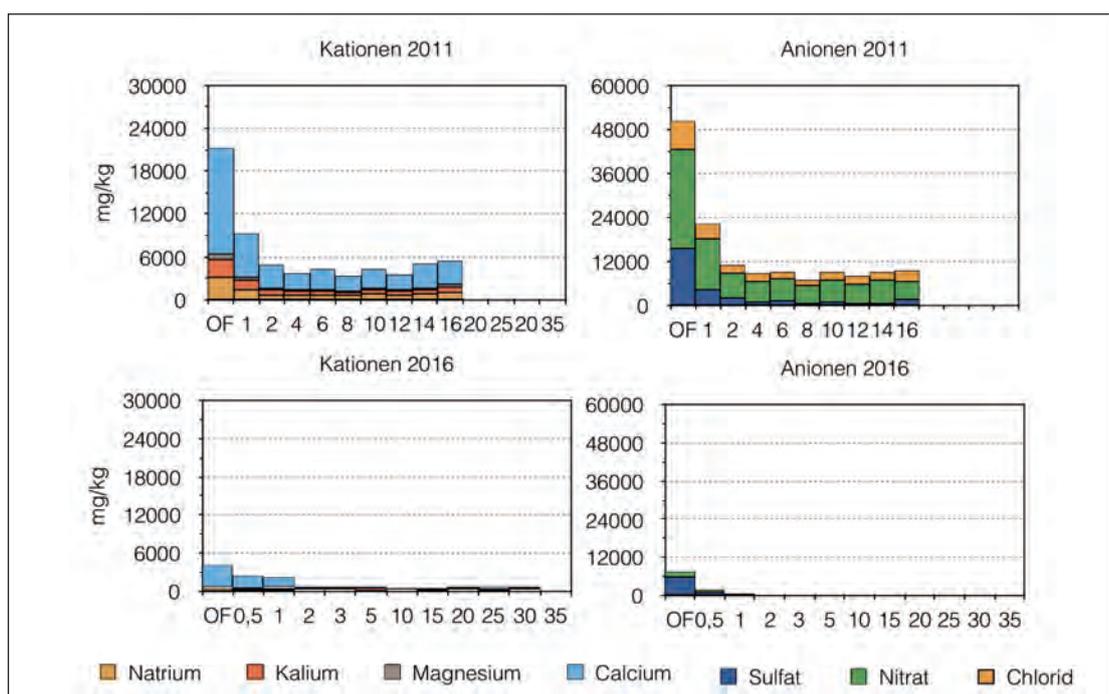
Seit 2011 angebrachte Putze und Schlemmen in Funktion von Opferputzen hatten sich bis 2015 stark mit Salzen angereichert und mussten erneuert werden. Dieser Putz mit hoher Porosität beziehungsweise erhöhtem Porenanteil dient zur Aufnahme von löslichen Salzen. Die Opferputzanwendung hat sich bewährt und wurde 2016 erneut durchgeführt.

Malschichtablösungen aufgrund von Salzauskristallisationen konnten speziell an den Außenwänden der Joche 5 bis 12 festgestellt werden. Im Rahmen des DBU-Projektes (2015–2018) waren bis zu drei Wiederholungen von Maßnahmen zur Malschichtfestigung notwendig. Hingegen wies die Maßnahmenkontrolle bei den Gewölbemalereien einen ausgesprochen guten Erhaltungszustand auf. Nur in wenigen Bereichen musste die Malschicht erneut fixiert und nur eine Hohlstelle hinterfüllt werden.

GIPSPROBLEMATIK - AUSSENWÄNDE

Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen zeigten neben den hohen Salzgehalten der Außenwände auch Gipsanreicherungen auf den Oberflächen. Aufgrund dieser Anreicherungen wurden gelbe, krustenähnliche Verfärbungen in diesen Bereichen als Gipskrusten interpretiert.

6 Gegenüberstellung der Ionengehalte 2011 vor und 2016 nach Kompressen, Joch 5, 2,70 m Höhe.



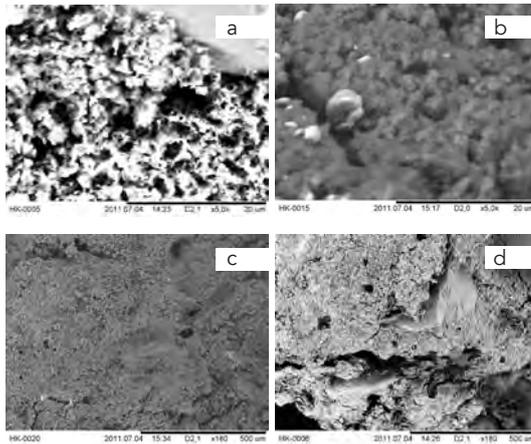
Bevor weitere Maßnahmen im Rahmen des DBU-Projektes betreffend der „Gipsproblematik“, ergriffen werden sollten, wurde zu Beginn der 2016 geplanten Maßnahme zunächst der Zustand der Außenwände des Schwahls erneut kartiert und fotografisch dokumentiert. Hierbei wurden unter anderem die Ausmaße der gelblichen Verfärbungen und Salzauflagen erfasst. Darüber hinaus wurde ein Fotovergleich der Zustände von 2007, 2011 und 2016 durchgeführt und dabei Veränderungen der Form und der Intensität der gelblichen Verfärbungen bewertet.

Der Vergleich von Kartierungen und Fotomaterial der vergangenen Jahre mit dem heutigen Bestand zeigte deutlich, dass zwar eine Reduzierung der gelben Verfärbung erzielt werden konnte, es aber in kurzer Zeit (mehrere Monate, teilweise auch Wochen) wieder zu erneuten Verfärbungen gekommen war (Abb. 8 bis 10).

Diese wiesen jedoch meistens ein geringeres Ausmaß und eine schwächere farbliche Intensität auf. Im Rahmen des DBU-Projektes wurde der Frage nach den Ursachen und Hintergründen der gelben Verfärbungen intensiv nachgegangen. In dem Beitrag „Identifizierung und Bewertung der Schädigungswirkung der gelben Oberflächenverfärbung“ im vorliegenden Band wird auf diese Problematik speziell eingegangen.

PUTZFESTIGUNGSMASSNAHMEN

Das wesentliche Ziel der Salzminderung und des Entferns der verdichtenden Vergipsungen war die Putzfestigung mittels Bariumhydroxids. Untersuchungen im Rasterelektronenmikroskop (REM) konnten eine homogene, gefestigte Putzstruktur bestätigen (Abb. 7).



7 REM-Aufnahmen vor und nach der Putzfestigung, Joch 5, 2011.

a und b: Unbehandelte Oberflächen: sehr offene Porenstruktur, lose nebeneinander liegende Kristalle und große Hohlräume.

c und d: Nach der Festigung mit Bariumhydroxid: homogene, geglättete Oberfläche, alle Poren mit sehr kleinen Kristallen verdichtet.

MIKROBIELLER BEFALL-WECHSELWIRKUNG MIT STAUB-ABLAGERUNGEN UND SALZEN

Schadstoffeinträge und Schädigungspotenziale durch mikrobiologischen Befall wurden bisher noch nicht umfassend evaluiert. Beobachtungen zeigen jedoch eine verstärkte Staubablagerung auf den Wandmalereien der Außen- und Hofwände. 2015 und 2016 musste erneut eine *Cladosporium Sp.* Besiedelung festgestellt werden. Der Befall wurde mit Wattetupfer und 80%igem Isopropylalkohol behandelt. Es wurden zwei Anwendungszyklen im Abstand von zwei Wochen ausgeführt, um einen Wiederbefall von auf der Oberfläche verbleibende Sporen vorzubeugen. Die Entstehung mikrobieller Besiedelung

8 Joch 5 vor der Kompressenanwendung, Aufn. 2016.

9 Joch 5 direkt nach Kompressenabnahme, Aufn. 2016.

10 Joch 5, 14 Tage nach der Kompressenanwendung, Aufn. 2016.



sollte im Schwahl weiterhin dringend beobachtet werden. Mögliche Einflüsse von Staubablagerungen, Feuchtigkeit und Klima auf das Wachstumsverhalten müssen weiter abgeklärt werden.

Die lokal ausgeprägten Staubpartikelanreicherungen begünstigen nicht nur die Entstehung von Mikroorganismen, sondern verschmutzen auch die Oberfläche. Die Partikel setzen sich in den unebenen, tieferen Bereichen der Putz- und Maleroberfläche ab. Auch mechanische Abriebmechanismen können hierdurch vorangetrieben werden, daraus können unter anderem auch Pigmentverluste entstehen. Einen weiteren nicht zu unterschätzenden Schadensfaktor stellen die verstärkt zu beobachtenden Salzanreicherungen in Bereichen mit Staubablagerungen dar. Bei der existenten, hohen Luftfeuchtigkeit gehen die Salzgemische in Lösung und dringen samt der Staubpartikel wieder in tiefere Putzstrukturen ein. Dies wiederum kann einen Nährboden für mikrobielle Besiedelungen in tieferliegenden Putzstrukturen bedeuten. Das Phänomen lässt sich bereits vor Ort mit dem Digitalmikroskop nachvollziehen. Interessant wäre hier, mögliche Wechselwirkungen zwischen Staubablagerungen, der mikrobiellen Besiedelung und den vorhandenen Salzanreicherungen in Abhängigkeit des Klimas zu erfassen. Eine Staub- und Feinstaubmessung oder weitere Analysen konnte im Rahmen des aktuellen DBU-Projektes nicht realisiert werden.

ERGEBNISSE UND ERARBEITETE FRAGESTELLUNGEN IM RAHMEN DES DBU-PROJEKTES

Mit der Evaluierung der bereits erhobenen Untersuchungsergebnisse, der abgeschlossenen Konservierungsmaßnahmen sowie der aktuellen Gesamtsituation des Schwahls wurde deutlich, dass wichtige Grundlagen für das Verständnis der Schadensmechanismen am Bauwerk bereits vorliegen. Für den weiteren Umgang mit der Schadenssituation kommt insbesondere der umfassenden Datenarchi-

vierung der jüngeren Maßnahmen eine elementare Bedeutung zu. Die systematische Auswertung und Gegenüberstellung einer Vielzahl von Einzelergebnissen erbrachte dafür eine wertvolle interdisziplinär gelagerte Interpretationsgrundlage. Historische Quellen, langfristig aufgezeichnete restauratorische Beobachtungen vor Ort (Berichte, Dokumentationen, Klimaaufzeichnungen), naturwissenschaftliche Analyseberichte und archivierte konservatorische Fragestellungen bildeten die Basis der Auswertung. Mit der Neubewertung der Horizontalsperre als mögliche Schadensquelle sowie der erfolgreichen Pfeilerentfernung zur Feuchtigkeitsreduzierung konnte die Bauwerkssituation weiter erschlossen und verbessert werden.

Die beschleunigte starke Staubablagerung auf den Oberflächen der Außenwände, insbesondere auf Kittungen und den schrägen Wandflächen im Nord- und teilweise im Westflügel, führen nicht nur zu einer die Malereien optisch beeinträchtigenden oberflächlichen Verschmutzung. Die Staubauflagen bilden offensichtlich auch einen optimalen Nährboden für die sich wiederholende Neubildung von mikrobiellem Wachstum. Die Evaluation vergangener Konservierungsmaßnahmen und historischer Eingriffe in den Bestand begründet in diesem Zusammenhang die Notwendigkeit einer kontinuierlichen Wartung der Malereien.

Die Auswertung der Maßnahmen zur Salzreduzierung zeigt, dass der Salzgehalt um ein 6-faches gegenüber 2011 reduziert werden konnte. Die in der Vergangenheit durchgeführten Untersuchungen wiesen neben hohen Salzgehalten in den Außenwänden auch Gipsanreicherungen an den Oberflächen nach. Die Auswertungen der Ionenprofile zeigen auch hier eine deutliche Reduktion von Kalziumsulfat. Erneut stellte sich die Frage nach dem Ursprung der gelblichen Oberflächenverfärbungen und ob diese allein auf Gipsanreicherungen zurückzuführen sind. Die Wirksamkeit der Putzfestigungsmaßnahme durch Bariumhydroxidkompressen konnte im Rasterelektronenmikroskop bestätigt werden.

¹ Vgl. den Beitrag „Erfassung der Bestandsmaterialien“ im vorliegenden Band.

² R. Edgeworth, B. J. Dalton und T. Parnell: "The pitch drop experiment", Eur. J. Phys. (1984), S. 198-200.

³ Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger: Analysebericht 08.09.2016, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg, 2016.

⁴ Der Kationenüberschuss ist vermutlich auf Teermaterial und/oder Ziegelmaterial in der Probe zurückzuführen sowie auf den hohen Kalziumgehalt und den alkalischen Charakter der Eluate. Stahlbuhk/Steiger 2016 (wie Anm. 3).

⁵ Vgl. den Beitrag „Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5“ im vorliegenden Band.

⁶ Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger: Analysebericht Oktober 2015, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg, Hamburg 2015.

⁷ Die Ergebnisse der einzelnen Ionenverteilungen sind folgenden Untersuchungsberichten entnommen: Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg: Juni und Oktober 2010, Mai und Juni 2011, August und Oktober 2012, Juni, April, September und Oktober 2016 sowie Februar 2017.

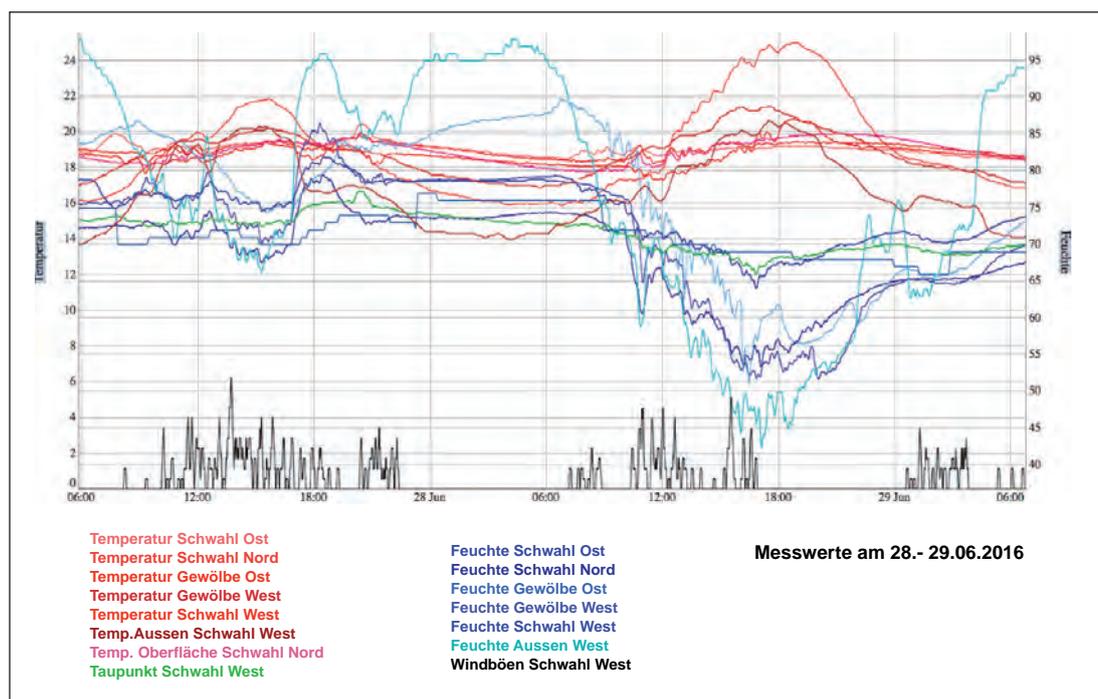
BAULICHE GEGEBENHEITEN

Der im ersten Viertel des 14. Jahrhunderts errichtete Schwahl schließt im Norden an das Kirchenschiff des Doms an. Das eingeschossige dreiflügelige Bauwerk zeigt außen ein unverputztes Ziegelmauerwerk. Das Steildach ist mit roten Tonpfannen gedeckt. Die Außenmauern sind fensterlos und die schräge Nordwand entlang der Domstraße wird komplett von gemauerten Pfeilern gestützt. Die nördliche Ecke der Westwand wurde ehemals durch drei Stützpfiler abgefangen, seit dem Abbruch des südlichsten im Jahr 2015 sind es nur noch zwei. Von außen von der Domstraße aus hat der Besucher Zutritt über das Portal des Nordflügels. In der Mitte des Westflügels betritt man den Schwahl durch den hölzernen sogenannten Pfadfinder-Anbau. Der Zugang zum Kirchenschiff ist durch je ein Portal mit zweiflügeligen Türen an den Stirnseiten des westlichen und des östlichen Kreuzgangflügels gegeben. Der Schwahl umschließt einen Innenhof, angelegt als Rasenfläche mit nur einem hoch aufschießenden Ginkgo-Baum. Das flache Gebäude und der Innenhof werden durch das Schiff des Doms und den alles überragenden Turm beschattet. Der Turm und das Kirchenschiff sind auch Ursache für die starken Verwirbelungen der Hauptwindrichtungen im Innenhof.¹

ERSTE BEOBACHTUNGEN ZU DEN KLIMATISCHEN BEDINGUNGEN ENDE 2006

Die umlaufenden Spitzbögen zum Innenhof des Kreuzgangs haben feuerverzinkte Vierkant-Stahlprofilrahmen mit einer Einfach-Verglasung als Fenster. Die Fensterrahmen schließen nicht an das Mauerwerk an, es bleibt ein 1-3 cm breiter Spalt. Schon bei leichten Winden wird mit dem umlaufenden Schlitz eine permanente Zwangsbelüftung des Schwahls erreicht. In jedem Fenster sitzt zudem zwischen den beiden Mittelstreben des Rahmens eine verglaste Klappe. Die Klappen lassen sich mit der Öffnung nach oben kippen. Der Kippmechanismus ist nur umständlich mechanisch zu bedienen, so dass die Fenster über längere Zeiträume entweder geöffnet oder geschlossen sind, ungeachtet von Feuchte- und Temperaturwerten. Die beiden Türen zum Innenhof stehen im Sommer für die Besucher immer offen. Die permanente Lüftung führt zu einer hohen relativen Luftfeuchte im Schwahl (Abb. 1). Deutlich sichtbar wird dies an dem Kondenswasser, das sich auf den im Fußboden eingelassenen steinernen Grabplatten niederschlägt, bis hin zu kleinen Pfützen.

Grüner Bewuchs zeigt sich auf dem mit Ziegeln ausgelegten Fußboden vor den Fenstern zum Innenhof.



1 Einfluss des Windes auf die relative Feuchte im Schwahl.

ERSTE DATENLOGGER ZUR AUFZEICHNUNG DES KLIMAS 2007 BIS 2009

Die ersten Datenlogger wurden vom Kirchenbauamt der Nordkirche aufgehängt und ausgelesen. Zuerst zeichnete je ein Datenlogger die Raumtemperatur und die relative Luftfeuchte im West- und im Ostflügel des Schwahls auf. Die Logger speicherten im Abstand von einer Stunde und waren platziert in Joch 3 und Joch 22.²

Wir haben im Rahmen der Bestandsaufnahme diese beiden Datenlogger ausgelesen und so Aufzeichnungen über zwei halbe Winter und eine gesamte Sommerperiode (07.11.2007 – 03.02.2009) erhalten. Diese Datensätze gaben einen ersten Eindruck auf die klimatischen Verhältnisse im Schwahl über einen zusammenhängenden Jahresverlauf.

ERWEITERTES KONZEPT DER MESSUNGEN FÜR DEN ZEITRAUM AB ANFANG 2009 BIS 2015

Zusätzliche Datenlogger wurden angebracht. Die zwei bereits vorhandenen Logger wurden kurzzeitig abgenommen und zur Kalibrierung eingeschickt, um sie auf die neuen Datenlogger abzustimmen. Die relative Luftfeuchte und die Temperatur konnten jetzt im Ost-, im West- und im Nordflügel sowie auf den Gewölben im Dachraum gemessen und aufgezeichnet werden. So waren alle Teile des Schwahls abgedeckt. Die neuen Logger verfügen über zwei zusätzliche Kanäle, mit denen die Taupunkttemperatur und der Luftdruck angezeigt werden, so dass eine einfache Taupunkt-ermittlung möglich ist. Außerdem wurden drei Logger mit Sensoren für Oberflächentemperaturen installiert. Damit ist es möglich, die Auswirkungen von Feuchte und Temperatur auf die Oberflächen von Innenwand, Gewölbe und Außenwand miteinander zu vergleichen und zu bewerten.

2015 wurde im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes das bestehende Messsystem mit vorhandenen Sensoren in das Funknetz eines netzwerk-basierten Klimamonitoring-Systems eingebunden.

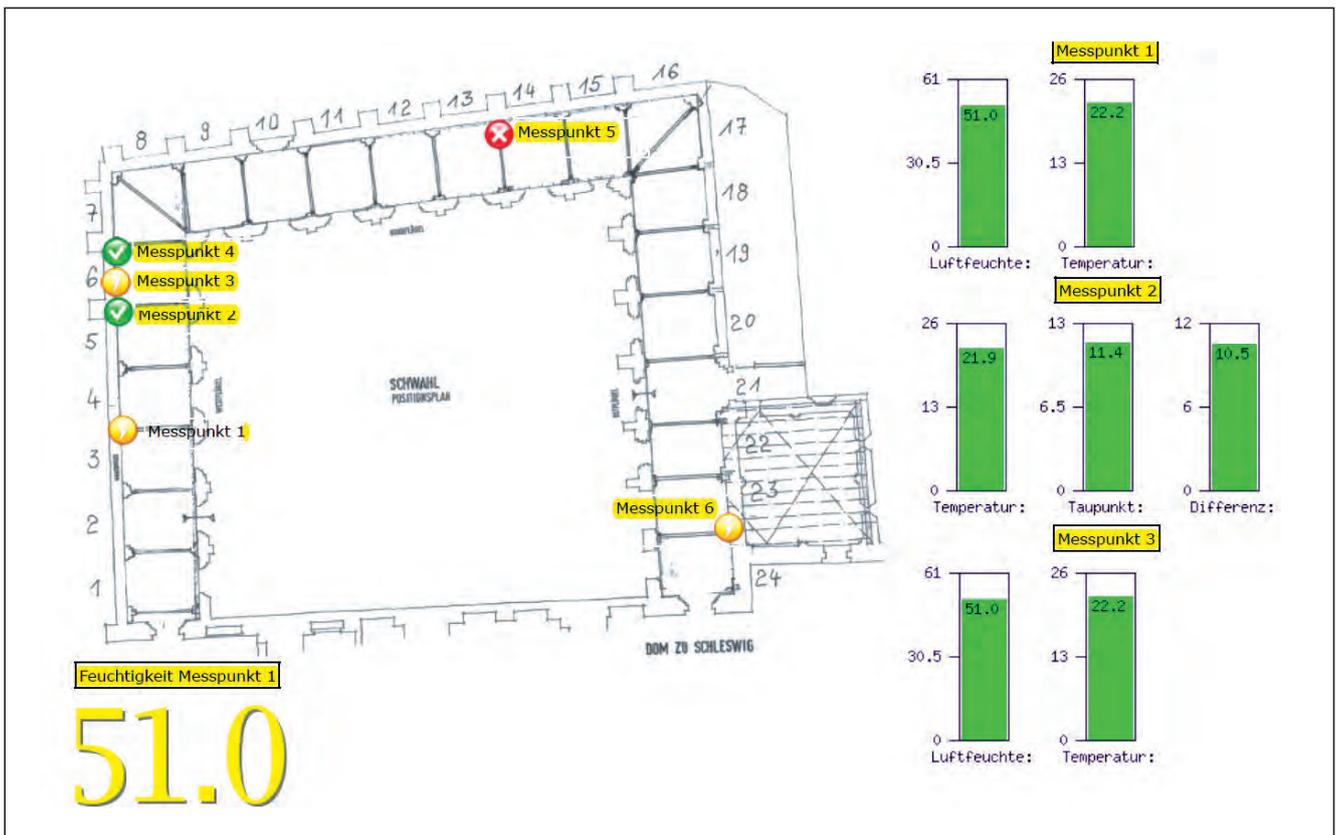
Das Projekt ermöglichte es uns, die bereits erhobenen Messdaten in einer Datenbank zusammenzufassen und auszuwerten. Das vorhandene Messsystem mit elektrischen Datenloggern wurde erweitert und an ein Bussytem angeschlossen. Die Übertra-

gung der Daten geschieht per Anbindung an das Internet durch ein UMTS-Modem. Sie werden dort auf einem Server gespeichert. Die minütlich gewonnenen Daten können so allen Projektbeteiligten in Echtzeit zur Verfügung gestellt werden.

Außerdem wurde ein Alarmsystem mit E-Mail Benachrichtigung installiert. Das ist möglich durch die Einrichtung von Datensammlern, sogenannten „Smartmote-Knoten“, die über eine Antenne die Messdaten über das Internet an vorhandene Empfangsgeräte sowie stationäre Computer, Laptops oder Smartphones senden. Auf diesen Geräten lassen sich für zugangsberechtigte Personen die Daten mittels einer Software oder App visualisieren. Die Informationen lassen sich für einen gemessenen Parameter in einem bestimmten Zeitraum darstellen, es können aber auch Grenzwerte für eine Alarmgebung eingestellt oder automatisierte Aktionen der Haustechnik, wie kontrollierte Belüftung, Öffnen und Schließen von Fensterklappen ausgelöst werden. Bei deutlichen Grenzwertüberschreitungen können Restaurator, Küster sowie Haustechniker über das Smartphone alarmiert beziehungsweise benachrichtigt werden. Die Priorität der Alarmierung kann je nach Sensibilität des Objektes nach vorgegebenen Parametern eingestellt werden.

Des Weiteren ist eine Auswertung der raumklimatischen Situation mit der Software zur Archivierung, Analyse und Datenmodellierung gegeben. Ein Klima-Protokoll über einen begrenzten Zeitraum zu einem einzelnen Ereignis wird auf Anforderung erstellt. Eine Erweiterung des bestehenden Sensornetzes ist jederzeit mit auch drahtlosen Miniatursensoren, Wetterstation und weiteren „Smartmote-Knoten“ ohne großen Aufwand möglich. Es können Miniatursensoren zur Messung von Einflussparametern wie Temperatur, Feuchtigkeit, UV-Strahlung, Licht, CO₂, Ozon, Schadstoffanreicherung, Staubablagerung, Luftzug, Dehnung, Bewegung, Akustik, Vibration usw. installiert werden.

Die inzwischen sichere Funknetz-Datenübertragung und die geprüfte und vielfach eingesetzte Smartmote-Technologie bietet mit ihren Funktionen eine wertvolle Unterstützung im Umgang mit großen Mengen an Messdaten, dennoch bleibt sie ein Expertentool, die spezifisches Wissen zur Interpretation der Daten voraussetzt. „Fortlaufende instrumentale Messungen werden niemals Expertenwissen, wie das von Restauratoren, ersetzen“, so ein Fazit aus den Guidelines, des durch die EU geförderten Forschungsvorhabens „Smart Monito-



ring of Historic Structures“ kurz SMOOTHS. Das im Schwahl verwendete System basiert sowohl auf dem technischen Monitoring des Servers als auch auf der Betreuung durch den verantwortlichen Restaurator, der die Parameter für Alarme und Aktivitäten bestimmt und immer den Blick auf das zu pflegende Kulturgut hat (Abb. 2).

Für die Ermittlung der oben genannten zu definierenden Parameter sind klimatische Messungen unverzichtbar. Aus den Werten zum Raumklima und den Nahfeld-Klimamessungen im Bezug zu Türen und Fenstern im Umfeld der Malereien wurde mit Hilfe der im Raum platzierten neuen Mess-Sensoren das Klima im Schwahl über zwei ganze Jahreszyklen erfasst. Die zuvor lediglich gespeicherten Messdaten der Jahreszyklen von 2011 bis 2016 wurden in den Server eingepflegt und ausgewertet. Aus den ermittelten bauphysikalischen Eckdaten und den gemessenen, ausgewerteten Daten wurden die klimatischen Grenzwerte für das Benachrichtigungssystem festgelegt. Das Benachrichtigungssystem wurde über den ganzen Projektzeitraum auf seine Alltagstauglichkeit getestet. Die Grenzwerte wurden am Ende des Projektes den neuesten Analyseergebnissen angepasst.

Die hier beschriebene Messtechnik gibt eine Hilfestellung, die Ziele des DBU-Forschungspro-

jektes zu erreichen: Offene Fragen zu klären, Maßnahmen zu entwickeln sowie Parameter und Methoden für ein langfristiges Monitoring zu erarbeiten, mit denen zuverlässig und nachhaltig der weiteren Schädigung des Wandmalereizyklus zu begegnen ist.

ZUSAMMENFASSUNG ZUR SITUATION DER WANDMALEREIEN IM SCHWAHL

Die Wandmalereien im Schwahl sind durch Salzanreicherung und Verwitterung gefährdet. In den Poren der Malschicht, den Poren des die Malerei tragenden Putzes und den Poren der Ziegel und des Mörtels des Mauerwerks haben sich durch aufsteigende Feuchte oder anthropogen verursachte Umwelteinflüsse Salze angereichert. Durch Wechselwirkungen der Salze mit dem Umgebungsklima kann es unter bestimmten Bedingungen zur Kristallisation und somit zur Schädigung der Malereien kommen.

Im Schwahl wurden hohe Versalzungen mit Nitraten und Chloriden in Malerei und Mauerwerk gemessen, welche sich gegenwärtig durch überwiegend feuchte, günstige klimatische Bedingungen in einem stabilen, sprich gelösten, Zustand befinden.

2 Klima im Schwahl auf dem Monitor.

Zudem liegen gelbliche Gipsanreicherungen als Krusten auf den Malereien vor. Diese Schalenbildung führte bereits zu Verlusten in der Malschicht. Die bis 2013 erfolgreich durchgeführten Salzreduzierungen und Gipsumwandlungen konnten bei der Reduzierung der gelblichen Verfärbungen jedoch nur kurzzeitige Erfolge erzielen, bevor diese nach einigen Tagen oder Wochen sich erneut transparent gelblich abzeichneten.

Die Eigenschaften von Gips in Kombination mit leichtlöslichen Salzen, der Einfluss des Klimas im Schwahl und der Feuchtehaushalt des Mauerwerks, des Putzes und der Malschicht bilden den Fokus der Untersuchungen am Objekt und im Labor. Aus den Ergebnissen sollen Handlungsanweisungen für das Monitoring und den Umgang mit den salzbelasteten Wandmalereien im Schwahl formuliert werden.

Die festgestellten klimatisch bedingten Schadensphänomene sind:

- Tauwasser auf den Oberflächen der Schwahlwände bzw. der Malereien
- Malschichtablösungen
- Fehlstellen in der Malschicht, an denen sich Kornzuschläge aus dem Putz lösen
- Riss- und Hohlstellenbildung durch Kristallisationsdruck
- Aufliegende Salzkristallbildungen
- Beförderung mikrobiellen Befalls durch Feuchtigkeit
- Verschmutzungen der Oberflächen: Staubauflagen werden durchfeuchtet und dringen in die Putzstrukturen ein, partielle Verunreinigung und dadurch Verdunklung

AUSWERTUNG DER KLIMAMESSUNGEN

Auswirkung des Klimas auf den Erhalt der Wandmalereien in dem ungeheizten und permanent belüfteten dreiflügeligen Gebäude sollten hinterfragt werden. Die Klimadaten von relativer Feuchte, Raumtemperatur und Taupunkttemperatur wurden in jedem Flügel erfasst. Oberflächentemperaturen wurden an ausgewählten Flächen der Außenwand, Hofwand, auf und unter dem Gewölbe gemessen. Bei

der Auswertung der Daten galt es die makroskopisch ermittelten Schadensphänomene und die durch die Materialanalysen diagnostizierten Schadensmechanismen mit den klimatischen Verhältnissen der drei unterschiedlichen Baukörper sowie deren zu differenzierenden Oberflächen – der Außenwand, der Innenwand zum Hof und der Gewölbe – in einen Kontext zu setzen. Durch den Fachbereich Chemie der Universität Hamburg wurden ergänzend zu den gemessenen Klimadaten rechnerische Simulationen zum Kristallisationsverhalten der Salze im Mauerwerk durchgeführt.

ERGEBNISSE

Anhand der Messdaten konnte festgestellt werden, dass es häufige und starke Schwankungen von Lufttemperatur und relativer Feuchte gibt. In Korrelation hierzu konnten auch Schwankungen der Oberflächentemperaturen und somit auch häufige Taupunktunterschreitungen gemessen werden. Die Zwangsbelüftung bewirkt, dass das Klima des Schwahls dem Außenklima nur bedingt folgt, es wird vielmehr gedämpft, verzögert oder gar verstärkt. Das Dach beschattet den Schwahl, dies führt im Frühjahr zu erheblich niedrigeren Temperaturen im Schwahl als draußen. Der Baukörper erwärmt sich sehr langsam und speichert lange die Kälte. Der Luftraum im Dach über den Gewölben funktioniert als Puffer gegenüber den Außentemperaturen. Im Sommer heizt sich der Dachraum tagsüber durch die Sonneneinstrahlung auf und hält den Schwahl nach Sonnenuntergang länger warm. Die relative Luftfeuchte im Schwahl und im Nahfeld der Malerei ist stark an die Außenluftfeuchte und die Temperatur gekoppelt.

RELATIVE FEUCHTE

Es wurden durchgängig hohe relative Luftfeuchten von uns gemessen: Im Winter und auch in den Übergangszeiten häufig über 90 % relative Luftfeuchte. Im Sommer schwankt die relative Feuchte zwischen 60-80 %. In diesem Zeitraum waren hohe Tag-Nacht-Schwankungen zu verzeichnen. Nachts war ein Anstieg der relativen Feuchte zu verzeichnen. Der Wind kann durch die Schlitze der Zwangsbelüftung in den Fenstern die relative Feuchte im Schwahl reduzieren.

TEMPERATUR

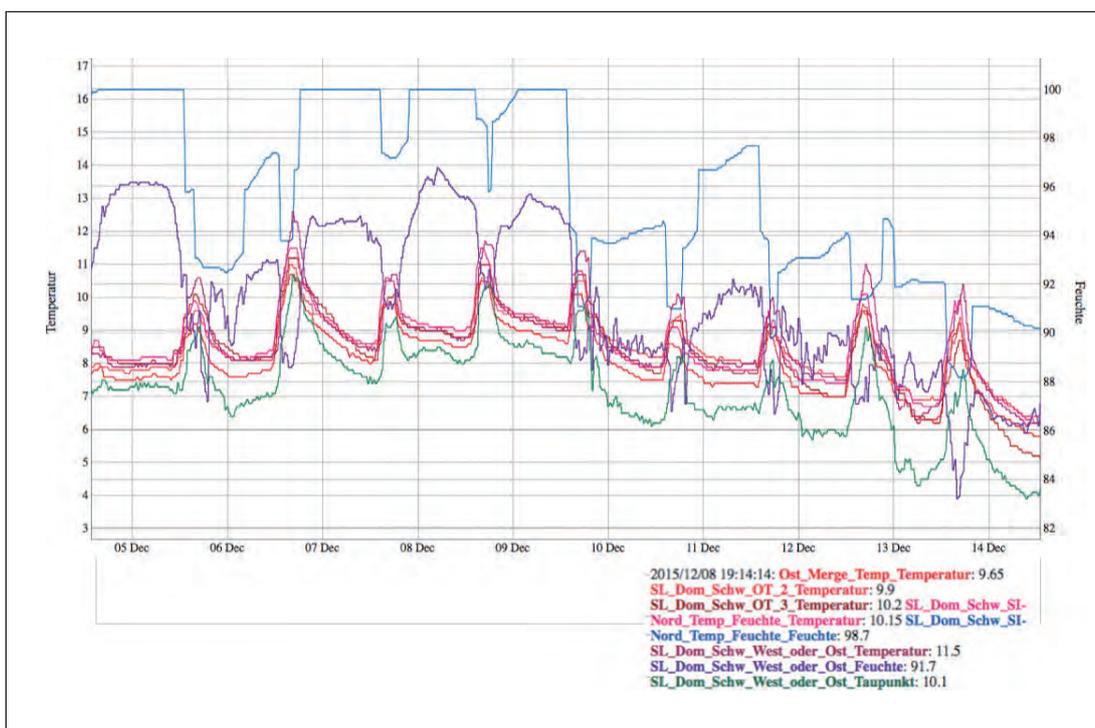
Die sommerliche Temperatur im Gewölbe steigt im Tagesverlauf parallel zur Außentemperatur an, liegt jedoch 2-3 °C darüber. Der Dachraum puffert das Außenklima zur Gewölbeschale hin ab und damit

auch zu den Oberflächentemperaturen im Gewölbe. Die Oberflächentemperaturen bewegen sich im Tagesverlauf zwischen 18 und 20 °C. Deutlichere Schwankungen ergeben sich bei den Temperaturen der Luft, die zwischen 16 und 19,5 °C liegen.

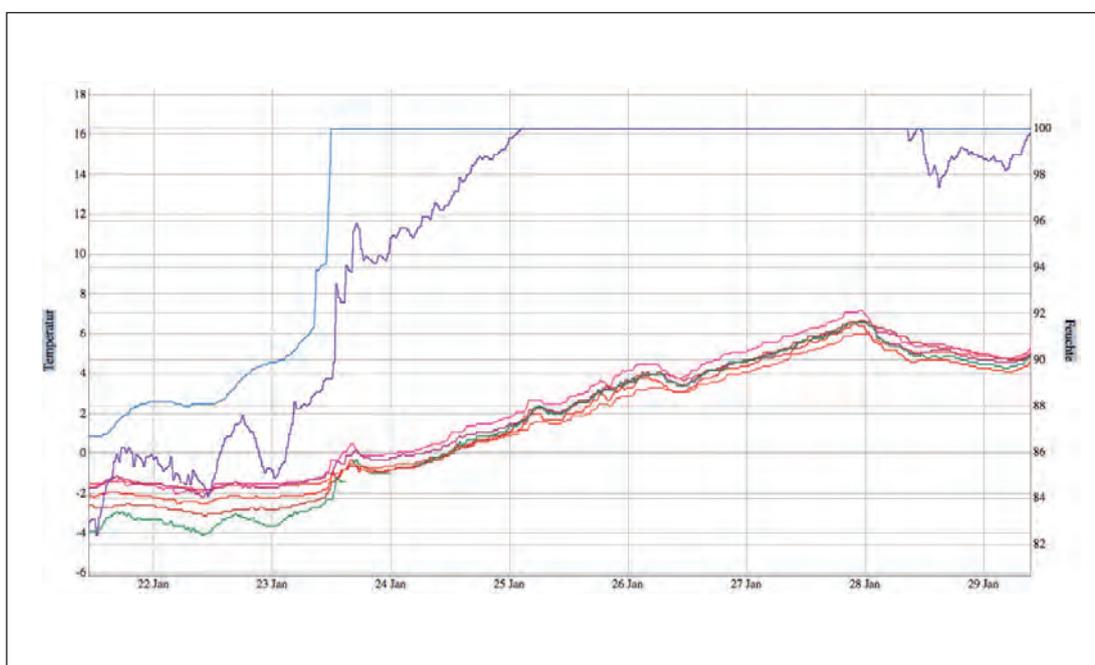
Tauwasserausfälle wurden an den Wänden und im Gewölbe während folgender Zeiträume ermittelt: Zum einen in der Woche im Dezember während des Schwahlmarktes (Abb. 3). Zum anderen tritt eine hohe Luftfeuchtigkeit im Schwahl vor allem anlässlich der Weihnachtsgottesdienste auf, bei denen es

sich eingebürgert hat, dass nach dem ersten Gottesdienst die etwa 1 000 Besucher den Dom durch den Schwahl und das Nordportal verlassen, während die Besucher des sich anschließenden zweiten Gottesdienstes durch den Westeingang in den Dom strömen. Sämtliche Portale sind dann weit geöffnet, so dass feuchtwarme Luft aus dem Kirchenschiff in den winterkalten Schwahl hineinströmt.

Außerdem wurde beim Durchzug einer Warmfront im Frühjahr nach einer längeren Frost- oder Kälteperiode ein starker Tauwasserausfall an den



3 Tauwasserausfall während des Schwahlmarktes.



4 Durchzug einer Warmfront nach einer Frostperiode.

ausgekühlten Oberflächen des Schwahls gemessen (Abb. 4). Im Ostflügel wurden insgesamt größere klimatische Schwankungen festgestellt. Die östliche Schwahlmauer weist auch den größten Verlust in den Malereien auf. In Gänze erhalten ist hier nur noch in Joch 21 die Darstellung „Tod der Maria“. Alle anderen Joche zeigen nur noch Fragmente der Malereien am oberen Rand der Wandfläche. Der östliche Flügel hat, bedingt durch den angrenzenden beheizbaren sogenannten Pfadfinder-Anbau und die Kanonikersakristei, ein um etwa 2 °C wärmeres und trockeneres Raumklima.

Im Westflügel kommt es im Sommer durch die permanent offen stehende Tür zum Innenhof und das stetige Öffnen der Zugangstür vom Kirchenschiff zum Schwahl durch Besucher zu einem stetigen Luftaustausch. Der andauernde Luftzug führt zu Kristallisationsdruck durch Abtrocknung der Wandflächen in Joch 2. Hier mussten wiederholt Hohlstellen hinterfüllt und lose Malschichten gesichert werden.

Die hohe Nitrat-Anreicherung und die hohe Luftfeuchte führen zu einer ständigen hohen Materialfeuchte im *Intonaco*. Die Situation wird durch die offenstehenden Klappen der Mittelfenster verstärkt, denn den gesamten Sommer über wird auf diese Weise – unabhängig von Feuchte- und Temperaturwerten – zusätzlich zur permanenten Lüftung durch die Fensterschlitze gelüftet und weitere Feuchtigkeit eingebracht.

BIOGENER BEFALL

Die permanente Belüftung sorgt für ausreichend Luftzirkulation, so dass nur in den beiden Jochen in der Ecksituation der Gebäudeflügel, an denen keine Fensteröffnungen liegen, vermehrt Mikroorganismen auftreten. Der biogene Befall wird auf Staubablagerungen auf den schräg stehenden Wänden der Nordwand und auf Unebenheiten wie Fugen und Vorsprüngen durch eine hohe Luftfeuchte begünstigt.

ZUSAMMENFASSUNG UND BEWERTUNG

WINTER UND ÜBERGANGSZEITEN

Eine relative Luftfeuchte über 80 % führt zu ständig hoher Materialfeuchte und zum Quellen im *Intonaco*. Das im Jahresverlauf überwiegend vorherrschende Klima im Schwahl mit langanhaltenden hohen Luftfeuchten und kühlen Temperaturen ist eine günstige Situation für den Erhalt der Wandmalereien.

SOMMER

Eine relative Luftfeuchte unter 42 % bedingt Salzkristallisationsdruck. Dadurch sind kurzzeitige kritische Situationen möglich. Zyklische Wechsel unter- und oberhalb der kritischen Kristallisationsfeuchte können zu thermischen und/oder hygrischen Formänderungen und Wechselwirkungen mit bauschädlichen Salzen im Material des Schwahls und damit zu Schäden führen.

¹ Es wurde eine Wetterstation an drei unterschiedlichen Orten im Innenhof installiert ohne eindeutige Messergebnisse erzielen zu können. Inzwischen werden Wetterdaten einer externen Station von uns mit einbezogen.

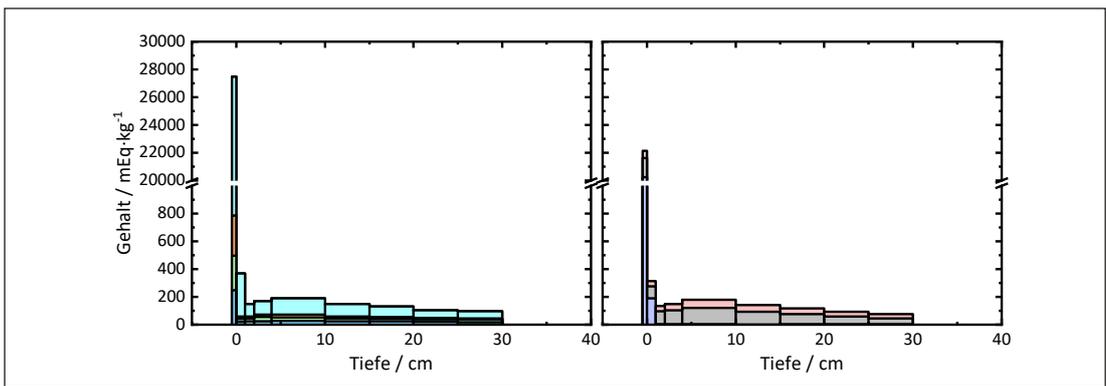
² Die Datenlogger liefen, aber die Datensätze waren bisher nicht ausgelesen worden.

Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger

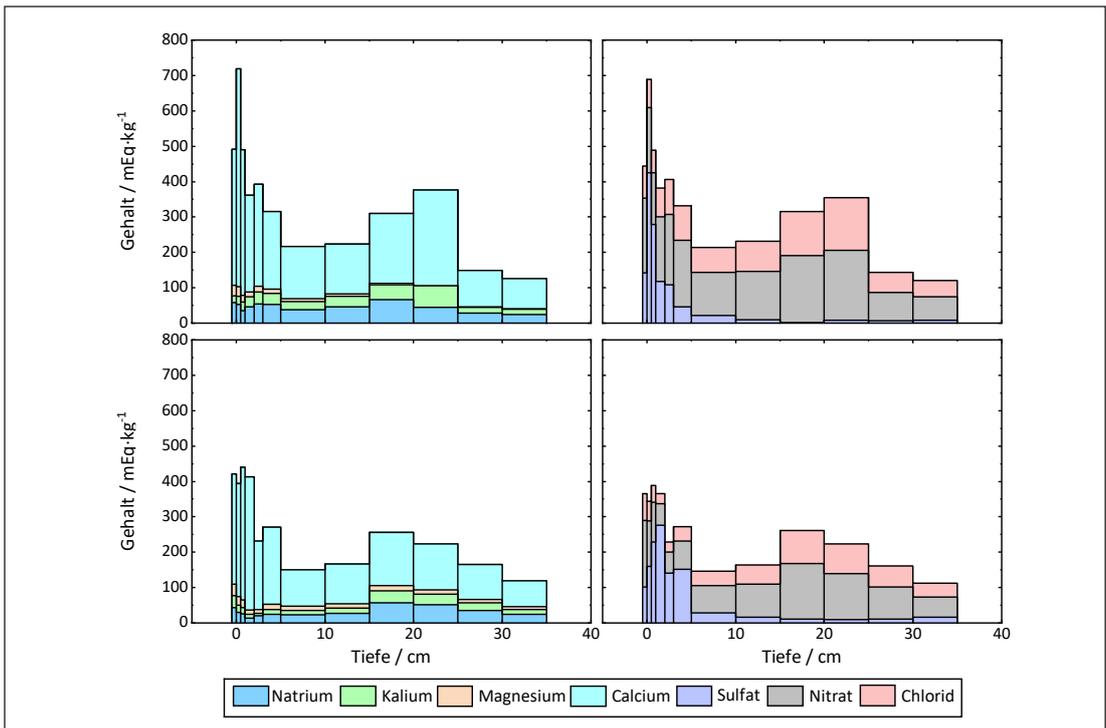
Salz und Klima

Mit dem Ziel, die Salzbelastung im Schwahl zu untersuchen und aufzuklären sowie restauratorische Maßnahmen der Salzreduzierung und Gipsumwandlung zu verfolgen, wurden seit Beginn des Projekts vermehrt Bohrmehlprouben mit Tiefenprofilen in verschiedenen Bereichen entnommen und anschließend analysiert. Zur Beschreibung der Ausgangssituation der Salzbelastung konnte auf Untersuchungen zurückgegriffen werden, die in den Jahren zwischen 2010 und 2013 durchgeführt worden waren. Eine gleichmäßige Verteilung hygroskopischer Chloride und Nitrate im gesamten Mauerwerk des Schwahls und Gipsanreicherungen, die sich durch restauratorische Maßnahmen reduzieren ließen, wurden in diesem Zuge ermittelt.

Abb. 1 zeigt beispielhaft die Ionengehalte aus dem Jahr 2011 im Joch 12, die die Ausgangssituation vor den restauratorischen Eingriffen mit erhöhten Gipsgehalten an der Oberfläche und nahezu gleichmäßigen Verteilungen hygroskopischer Salze im Inneren des Mauerwerks verdeutlichen.¹ Weitere Joche, beispielsweise die Joche 2 und 3, sind ebenfalls in der Zeit vor dem Projekt untersucht worden, wobei sehr ähnliche Salzverteilungen beobachtet werden konnten. Auch die im Rahmen des Projekts wiederholt untersuchten Joche wiesen im Vergleich zu den Vorjahren kaum Veränderungen auf, wenn auch die Gipsgehalte nahe der Oberfläche erneut deutlich verringert werden konnten. Unter anderem wurden in Joch 2 im Rahmen des Projekts nochmals Ent-



1 Joch 12, 2011, Ionenprofil: Gezeigt sind die Ionengehalte in $\text{meq}\cdot\text{kg}^{-1}$ vor einer Salzreduzierung, links sind die enthaltenen Kationen dargestellt, rechts die Anionen.



2 Joch 2, 2016, Ionenprofile in 2 m Höhe, die vor (oben) und nach (unten) einer Kompressenbehandlung untersucht wurden: Die Salz- und Gipsgehalte in oberflächennahen Bereichen wurden reduziert, die Verteilung hygroskopischer Salze im Mauerwerksinneren ist im Vergleich zur Situation in den Vorjahren weitestgehend unverändert.

salzungsmaßnahmen durchgeführt, die eine Reduzierung von Gips im Vergleich zur Ausgangssituation bewirkten (Abb. 2). Die Darstellung zeigt weiterhin, dass auch nach der Kompressenbehandlung noch hygroskopische Salze im Mauerwerksinneren verblieben sind, während die Gehalte von Gips und den hygroskopischen Salzen an der Oberfläche erneut erfolgreich reduziert werden konnten. Auch die erstmals im Rahmen des Projekts untersuchten Joche 17 und 22 im Ostflügel des Kreuzgangs zeigen das gleiche Versalzungsmuster mit Gipsanreicherungen an der Oberfläche und erhöhten Gehalten hygroskopischer Salze in der Tiefe. Folglich kann die Versalzungssituation im Schwahl als weitestgehend homogen beurteilt werden. Für einen Großteil der entnommenen Tiefenprofile wurde auch der Feuchtegehalt in den Bohrmehlproben bestimmt. Für die mit hygroskopischen Salzen belasteten Mauern korrelieren die Feuchtegehalte mit der Verteilung dieser Salze in der Tiefe.

Ein wichtiges Kriterium bei der Untersuchung der Situation im Schwahl war neben der getrennten Betrachtung der Versalzungssituation und der raumklimatischen Verhältnisse besonders auch der Einfluss des Klimas auf die vorliegenden Salze. Auf Grundlage der zahlreichen Salzanalysen in Bohrmehlproben sollte die Kristallisationsabfolge in Abhängigkeit des Klimas untersucht werden. Salze im porösen Material stehen immer im Austausch mit dem Umgebungsklima, also der vorliegenden Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit, so dass sie stets auf deren Änderungen reagieren. Jedes Salz hat einen spezifischen und temperaturabhängigen Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, ab welchem es Wasserdampf aus der Umgebung aufnimmt, um zunächst eine gesättigte Lösung zu bilden. Diese wird als Deliqueszenzfeuchte (DRH) bezeichnet. Bei weiter ansteigender Luftfeuchtigkeit verdünnt sich die Lösung fortwährend. Ausgehend von hohen relativen Luftfeuchtigkeiten, gibt die Salzlösung bei Erreichen der DRH wieder Wasserdampf an die Umgebung ab, um erneut eine gesättigte Lösung zu bilden. Unterhalb der DRH liegt es vollständig kristallin vor. Kommt es zu zyklischen Wechseln zwischen Deliqueszenz und Kristallisation, können daraus kritische Situationen für betroffene Objekte resultieren, da es wiederholt zu dem möglicherweise bei der Kristallisation der Salze wirksamen Kristallisationsdruck kommen kann. Bei der Betrachtung von Objekten des kulturellen Erbes, die teilweise seit vielen Jahrhunderten mehr oder weniger ungeschützt ihrer Umgebung ausgesetzt sind, liegt meist eine komplexe Mischung verschiedener Ionen vor. In diesem Fall gibt es keinen konkreten Wert der

relativen Luftfeuchtigkeit, bei dem es zur Kristallisation aus der Lösung kommt, sondern Kristallisation und Auflösung erfolgen über einen Bereich der relativen Luftfeuchtigkeit. Dabei beschreibt die kritische Kristallisationsfeuchte den Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, bei deren Unterschreitung die Kristallisation kristalliner Phasen beginnt, die gemeinsame Deliqueszenzfeuchte beschreibt den endgültigen Trocknungspunkt der Lösung. Unterhalb der Deliqueszenzfeuchte liegen also alle Salze kristallin vor.

In Bezug auf die Situation von Bauwerken können neben einer zyklischen Kristallisation und Auflösung unter anderem auch das Vorliegen stark hygroskopischer Mischungen und Taupunktunterschreitungen kritisch sein. Stark hygroskopische Mischungen können schon bei verhältnismäßig niedrigen relativen Luftfeuchtigkeiten Lösungen bilden und so zu durchfeuchteten Mauerwerken führen, während eine Unterschreitung des Taupunkts und somit die Kondensation von Wasserdampf in den Poren ebenfalls zur Auflösung der Salze beitragen kann. Im konkreten Fall des Schwahls ist ein hoher Feuchtegehalt in den Mauern somit weitgehend durch die hygroskopischen Salze in Verbindung mit hohen relativen Luftfeuchtigkeiten bedingt.

Wird ein spezifisches Objekt betrachtet, ist es aus konservatorischer Sicht wichtig zu ermitteln, unter welchen klimatischen Bedingungen mit einer Phasenumwandlung zu rechnen ist. Sind die Auswirkungen des Umgebungsklimas auf die in den Poren vorliegenden Salze bekannt, ist es möglich, mehr oder weniger geeignete klimatische Situationen für das Objekt abzuleiten. Die relative Luftfeuchtigkeit (RH) sollte für das Objekt günstige Bedingungen bieten und darf deshalb nicht zyklisch um den Wert der kritischen Kristallisationsfeuchte schwanken. So können potentiell schädigende, zyklische Wechsel zwischen Kristallisation und Deliqueszenz vermieden werden.

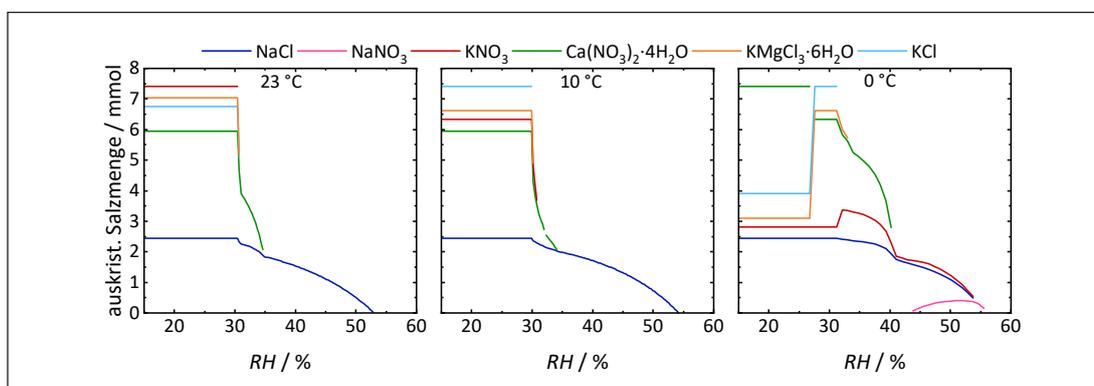
Eine Möglichkeit das Kristallisationsverhalten von Salzmischungen zu untersuchen, bietet das freizugängliche Programm *ECOS-Runsalt*. Es ermöglicht die Berechnung der Kristallisationsabfolge eines Salzgemischs, so dass unter anderem die Werte der kritischen Kristallisationsfeuchte und der gemeinsamen Deliqueszenzfeuchte zugänglich werden. Durch einen angemessenen Einsatz der Methode können für das Objekt spezifische Vorhersagen bezüglich der zu erwartenden Kristallisationsabfolge gemacht werden. Das zugrunde liegende chemische Gleichgewichtsmodell ermöglicht die Bestimmung

der Kristallisationsabfolge in Abhängigkeit variierender Temperatur und fester relativer Feuchte oder variierender Feuchte und fester Temperatur. Das Programm *ECOS (Environmental Control of Salts)* wurde im Rahmen eines von der Europäischen Union geförderten Projekts als Kollaboration zwischen dem University College London, der University of East Anglia (Norwich) und der Universität Hamburg erstellt.² Durch Einführung einer verbesserten Benutzeroberfläche wurde es 2006 zu *ECOS-Runsalt* erweitert.³

Die erforderlichen Eingabedaten für derlei Berechnungen sind die Gehalte der Ionen (Na^+ , K^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} und NO_3^-) sowie der zu untersuchende Bereich der raumklimatischen Bedingungen. Die Konzentrationen der Ionen können dabei, wie im Fall des Schwahls, aus ionenanalytischen Daten von Bohrmehlproben stammen. Vor der Dateneingabe und Berechnung müssen zunächst einige Faktoren berücksichtigt werden. So müssen die Eingabedaten von Anionen- und Kationengehalten eine ausgeglichene Ladungsbilanz aufweisen. Dies ist allerdings nach einer Analyse meist bereits durch den Fehler der verwendeten analytischen Methode unwahrscheinlich, so dass kleine Korrekturen erforderlich sind. Eine weitere Korrektur der Ionendaten wird notwendig, um die Handhabbarkeit des Systems zu verbessern. Um das Modell um einige Parameter zu erleichtern, die mit jedem hinzukommenden Ion mehr werden, sollte das zu berücksichtigende System gemischter Ionen verkleinert werden. Gips ist zwar ein an Bauwerken sehr häufig vorkommendes und nicht zu vernachlässigendes Salz, trotzdem hat er eine so geringe Löslichkeit, dass er in Baustoffen kristallin und weitgehend immobilisiert vorliegt. Der Einfluss von Gips auf das Kristallisationsverhalten anderer Salze ist deshalb vernachlässigbar.⁴

Für die bereits seit 2010 vermehrt entnommenen Bohrmehlproben aus dem Schwahl⁵ wurden mittels *ECOS-Runsalt* die Kristallisationsabfolgen berechnet, die im Folgenden zusammenfassend dargestellt werden. Dabei fanden nur oberflächennahe Proben Berücksichtigung, die unmittelbar durch das Raumklima beeinflusst werden (Putzoberflächen und Proben aus maximal 20 mm Tiefe). Um neben dem Kristallisationsverhalten bei Raumtemperatur auch den Einfluss von Temperaturunterschieden zu untersuchen, wurden die Berechnungen auch bei niedrigeren Temperaturen durchgeführt (bei 10 °C und 0 °C). Wird die klimatische Situation im Schwahl betrachtet, so ist die Berücksichtigung niedriger Umgebungstemperaturen durchaus notwendig, um die Situation in den kühlen Wintermonaten korrekt zu untersuchen.

Wie die Abb. 3 zeigt, beginnt in der Probe aus Joch 2 (Putzoberfläche aus 1 m Höhe, entnommen 2010) bei Raumtemperatur bei 52 % RH die Kristallisation von Natriumchlorid (NaCl), bei 35 % setzt auch die Kristallisation von Calciumnitrat-Tetrahydrat ($\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$) ein. Weitere Phasen (Kaliumchlorid, KCl , Kaliumnitrat, KNO_3 und Carnallit, $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) bilden sich erst bei Unterschreitung der Deliqueszenzfeuchte. Bei 10 °C verschieben sich die Kristallisationsfeuchten lediglich zu leicht höheren Werten, so dass keine größeren Veränderungen beobachtet werden können. Bei einer Umgebungstemperatur von 0 °C ergeben sich hingegen einige Unterschiede. Die Kristallisation von Kaliumnitrat setzt schon bei deutlich höheren relativen Luftfeuchtigkeiten ein als bei höheren Umgebungstemperaturen und es bildet sich temporär Natriumnitrat (NaNO_3). Trotz dieser Unterschiede, die die Temperaturabhängigkeit einiger Phasen unterstreicht, verschiebt sich auch hier die kritische Kristallisationsfeuchte der Mischung nur leicht zu höheren Werten, so dass bei dieser Probe



3 Mittels *ECOS-Runsalt* vorhergesagte Kristallisationsabfolge für eine Probe aus Joch 2 (Putzoberfläche aus 1 m Höhe, entnommen 2010) für 23 °C, 10 °C und 0 °C. Dargestellt ist die auskristallisierte Salzmenge in mmol in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchtigkeit in %.

im untersuchten Temperaturbereich erst unterhalb von etwa 58 % RH mit Kristallisationsprozessen zu rechnen ist.

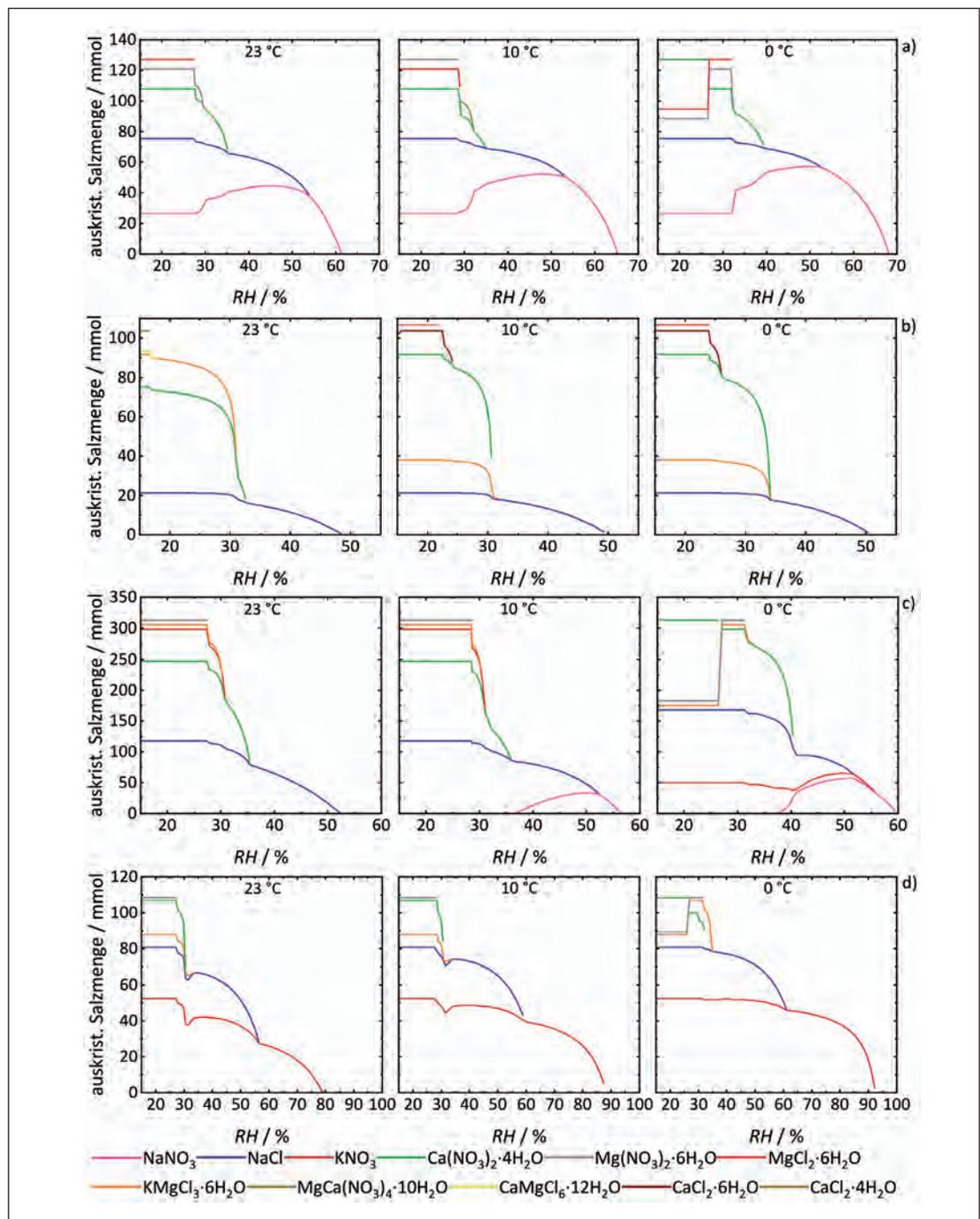
Bei Änderungen der Salzzusammensetzung verändert sich folglich auch die Kristallisationsabfolge, was exemplarisch anhand einer weiteren Probe aus demselben Joch (Putzoberfläche aus 1 m Höhe, entnommen 2016, Abb. 4a) dargestellt werden soll. Verhältnismäßig sind hier die Gehalte an Natrium, Magnesium und Nitrat erhöht, so dass größere Mengen Natriumnitrat auskristallisieren und Magnesiumnitrat-Hexahydrat ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) als weitere

Phase ab etwa 31 % RH vorhergesagt wird. Auch bei dieser Probe verschieben sich die Kristallisationsfeuchten bei abnehmender Umgebungstemperatur zu höheren Werten, jedoch wird eine Kristallisation auch bei dieser Probe bei 0 °C erst unterhalb von 68 % RH vorhergesagt.

Wird eine Probe betrachtet, in welcher etwa gleich große Gehalte an Nitrat und Chlorid, jedoch größere Mengen an Calcium und Magnesium vorliegen, so macht sich der hygroskopischere Charakter der Mischung in den Kristallisationsfeuchten bemerkbar (beispielsweise in Joch 3, Putzoberfläche aus 3,25 m

4 Mittels ECOS-Runsalt berechnete Kristallisationsabfolgen für 23 °C, 10 °C und 0 °C. Dargestellt ist die auskristallisierte Salzmenge in mmol in Abhängigkeit zur relativen Luftfeuchtigkeit in %:

- a) Probe aus Joch 2 (Putzoberfläche aus 1 m Höhe, entnommen 2016);
- b) Probe aus Joch 3 (Putzoberfläche aus 3,25 m Höhe, entnommen 2012);
- c) Probe aus Joch 12 (5 mm Tiefe aus 1 m Höhe, entnommen 2016);
- d) Probe aus Joch 12 (10 mm Tiefe aus 2 m Höhe, entnommen 2016).



Höhe, entnommen 2012, Abb. 4b). Diese sind insgesamt niedriger, die kritische Kristallisationsfeuchte beträgt auch bei sehr niedrigen Temperaturen nur etwa 50 % RH.

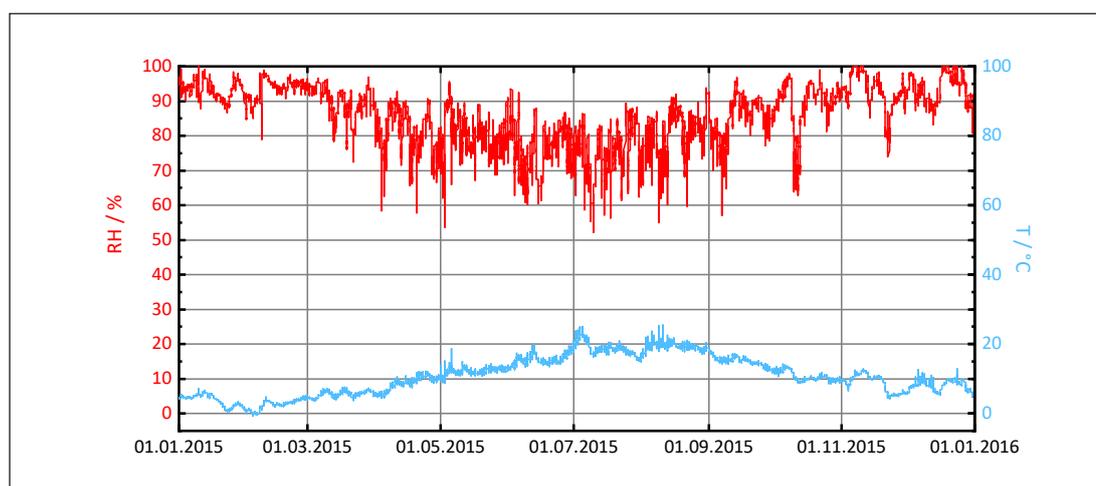
Enthält eine Probe (beispielsweise aus Joch 12, Fragment aus 5 mm Tiefe, aus 1 m Höhe, entnommen 2016, Abb. 4c) hingegen mehr Nitrat als Chlorid sowie mehr Natrium und Kalium, resultiert daraus ein geringerer hygroskopischer Charakter. Trotzdem liegt die kritische Kristallisationsfeuchte zwischen 23 °C und 0 °C im Bereich von 50 bis 60 % RH. Sinkt aber zusätzlich auch der Calciumgehalt im Gemisch stark ab, so wirkt sich dies schnell auf die Kristallisationsfeuchten aus. Zu beobachten war dies in einer weiteren Probe aus Joch 12 (10 mm Tiefe aus 2 m Höhe, entnommen 2016, Abb. 4d), bei welcher bereits ab 78 % RH bei Raumtemperatur mit einer Kristallisation zu rechnen ist, bei niedrigen Temperaturen bereits ab 92 % RH. Hervorgerufen wird dies durch den Einfluss des weniger hygroskopischen Kaliumnitrats, welches in größeren Mengen ohne gleichzeitig vorhandene größere Mengen hygroskopischer Salze vorliegt.

Insgesamt waren die Abweichungen der weiteren Proben zu den hier aufgeführten recht gering, so dass an dieser Stelle keine weiteren Ergebnisdigramme dargestellt, sondern einige für die verschiedenen untersuchten Proben festgestellte Muster erläutert werden sollen. Dabei spielen Sulfate keine Rolle, da in allen Proben mehr Calcium als Sulfat gefunden wurde, so dass davon auszugehen ist, dass Sulfat ausschließlich in Form von Gips vorliegt. Aus Untersuchungen von Salzmischungen und Einzelsalzen ist bekannt, dass höhere Gehalte an Magnesium- und Calciumionen im Vergleich zu denen von Natrium und Kalium zu niedrige-

ren kritischen Kristallisationsfeuchten führen, da vermehrt die hygroskopischen Chloride und Nitrate der Erdalkalimetalle gebildet werden. Andererseits führen höhere Natrium- und Kaliumgehalte zu steigenden kritischen Kristallisationsfeuchten. Die Salzverteilung in den Jochen, aus denen die untersuchten Proben entnommen wurden, zeigte sich als weitestgehend homogen. Auch wenn es einige Ausnahmen gibt, wurden überwiegend Mischungen nachgewiesen, die zur Bildung hygroskopischer Salze neigen. Somit ist für einen Großteil der oberflächennahen Bereiche im Schwahl erst unterhalb von 60 % RH mit Kristallisationsprozessen zu rechnen.

Bei den Untersuchungen mittels *ECOS-Runsalt* war auffällig, dass die Kristallisation von Calciumnitrat im Großteil der Proben die gleiche Kristallisationsfeuchte aufwies, unabhängig von der Konzentration des Salzes im Gemisch. Somit wurde bei Raumtemperatur eine Kristallisationsfeuchte zwischen 30 und 35 % RH, für niedrige Umgebungstemperaturen von maximal 40 % RH vorhergesagt. Auch bei den Phasen, die unterhalb von 30 % RH auskristallisieren, ist die Kristallisationsfeuchte für jeweils die gleichen Phasen stets ähnlich. Insgesamt kommt es oberhalb von 40 % RH lediglich zur Kristallisation von Natriumchlorid, Natriumnitrat und Kaliumnitrat. Während die Kristallisationsfeuchte von Calciumnitrat und auch die gemeinsame Deliqueszenzfeuchte bei allen Proben sehr ähnlich waren, konnten für die Phasen, die in geringeren Mengen gebildet werden, mehr Variationen festgestellt werden.

Nach der Betrachtung des Einflusses des Klimas auf die Salze in den Mauern des Schwahls bleibt noch die Frage, ob die klimatische Situation im Schwahl mit diesen Erkenntnissen vereinbar ist. Wird das Klima eines Jahresverlaufs im Schwahl betrachtet, so zeigen sich große Unterschiede zwischen Sommer



5 Jahresverlauf des Klimas im Schwahl (2015), gemessen an der Außenwand im Ostflügel des Kreuzgangs, mit der relativen Luftfeuchtigkeit in rot und der Temperatur in blau.⁶

und Winter (Abb. 5). Im Winter ist das Klima weitestgehend kühl und sehr feucht. Eine Unterschreitung der jeweiligen kritischen Kristallisationsfeuchte ist somit nur sehr selten zu erwarten, so dass das Klima hinsichtlich der Versalzungssituation günstig ist, da die Salze stets in gelöster Form vorliegen. In den Sommermonaten hingegen kommt es häufiger zu Schwankungen um den Wert der kritischen Kristallisationsfeuchte, so dass sich kritische Situationen für viele oberflächennahe Bereiche im Schwahl ergeben können. Die Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen Tag und Nacht oder auch zwischen wenigen Stunden sind teilweise groß (20 % RH oder größer), verglichen mit denen in den Wintermonaten. Da sie außerdem teilweise sehr kurzzeitig auftreten, sollte die Frage berücksichtigt werden, wie schnell die Salzmischungen besonders im Inneren des Mauerwerks auf diese Änderungen reagieren.

Neben der Betrachtung des theoretischen Verhaltens der Salzmischungen bei variierenden Klimasituationen wurden auch Laborversuche durchgeführt, die das tatsächliche Verhalten der Mischungen untersuchen sollten. Das Kristallisationsverhalten von Salzlösungen ist eine wichtige Grundlage für das Verständnis des Verhaltens der Lösungen im porösen Baumaterial, auch wenn es sich dort aufgrund der vorliegenden Kristallisationskeime und Oberflächeneinflüsse von der Kristallisation der „freien“ Lösung unterscheiden kann. Die in einem Großteil des Schwahls vorgefundene Versalzung mit überwiegend hygroskopischen Nitraten und Chloriden warf unter anderem die Frage auf, ob es trotz des wasserziehenden und zur Übersättigung neigenden Charakters zur vollständigen Kristallisation der Salze kommt. In diesem Sinne wurde eine Lösung angesetzt, die in ihrer Zusammensetzung der einer 2010 entnommenen Putzoberfläche aus Joch 2 entsprach. Da sich die Salzverteilung im Schwahl

Salz	Molalität / mol·kg ⁻¹	Relative Zusammensetzung
MgCl ₂ ·6H ₂ O	0.288	1
CaCl ₂ ·2H ₂ O	0.543	1.9
KNO ₃	1.47	5.1
NaCl	2.44	8.5
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	2.97	10.3

6 Molalitäten und relative Zusammensetzung der Salze, die zur Herstellung einer hygroskopischen Salzlösung verwendet wurde und in ihrer Zusammensetzung einer 2010 entnommenen Putzoberfläche aus Joch 2 entspricht.

zunächst als weitestgehend homogen zeigte, soll diese Mischung als repräsentative „Schwahl-Lösung“ betrachtet werden. Wie auch bei den Berechnungen mittels *ECOS-Runsalt* wurde Gips zunächst aus dem Gemisch herausgerechnet, so dass sich die in Abb. 6 angegebene Zusammensetzung ergab.

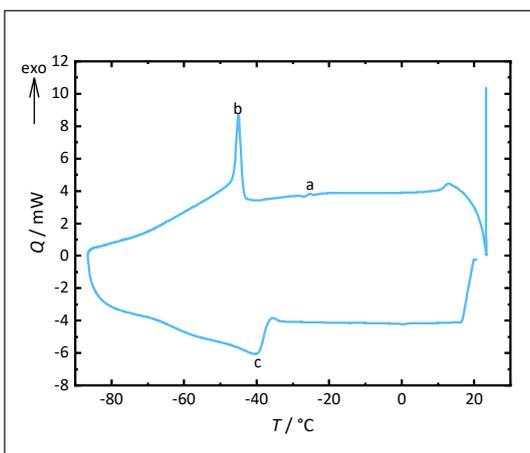
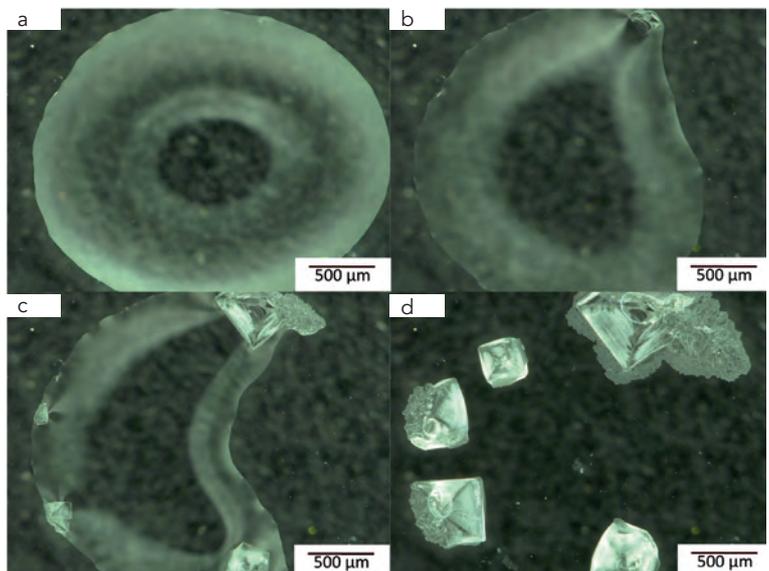
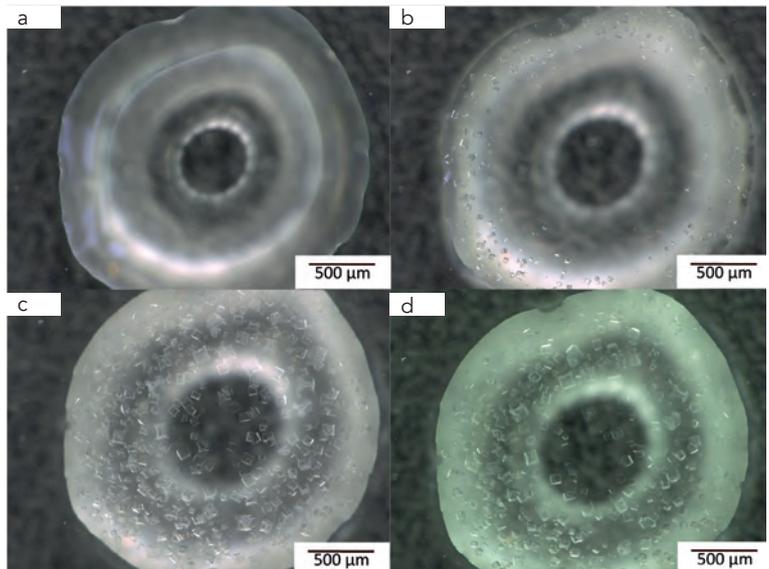
Zunächst sollte untersucht werden, wie sich die Lösung im Zuge einer Eindunstung verhält, und das Ergebnis mit den theoretischen Berechnungen mit *ECOS-Runsalt* verglichen werden. Für die Untersuchung des tatsächlichen Kristallisationsverhaltens wurde die Kristallisation bei der Verdunstung von Lösungstropfen mittels optischer Mikroskopie verfolgt (optisches Mikroskop Keyence VHX-600 mit einer *profile measurement unit* VHX-S15 und einem Objektiv mit einer 20- bis 200-fachen Vergrößerung, Keyence, Japan). Vergleichend wurde auch die Kristallisation einer reinen Natriumchlorid-Lösung (Molalität 2,44 mol·kg⁻¹) beobachtet, deren Konzentration dem Natriumchlorid-Gehalt in der Schwahl-Lösung entsprach.

Die Tropfenkristallisation der hygroskopischen Salzlösung (Abb. 7) ergab, dass selbst nach einer 72-stündigen Lagerung im trockenen Luftstrom (<5 % RH) keine vollständige Kristallisation der Lösung erfolgte. Zu Beginn des Experiments bildeten sich nach einigen Minuten kubische Kristalle, bei denen es sich aufgrund ihres Habitus und der Lösungszusammensetzung sowie der Berechnung mittels *ECOS-Runsalt* um Natriumchlorid handelt. Neben einer steigenden Anzahl an Kristallen konnte auch ihr Wachstum beobachtet werden und damit einhergehend eine Veränderung der Kristallformen hin zu weniger scharfkantigen Seiten. Diese Abweichung des Habitus ist vermutlich auf die chemische Umgebung der Kristalle in der hygroskopischen Lösung zurückzuführen. Auch nach der Lagerung unter trockenen Bedingungen konnten keine weiteren Kristalle mit anderem Habitus beobachtet werden. Vergleichend dazu konnten bei der Tropfenkristallisation der reinen Natriumchlorid-Lösung (Abb. 8) lediglich vier bis fünf Kristalle beobachtet werden, die bis zur vollständigen Eindunstung weiter wuchsen und, verglichen mit den Natriumchlorid-Kristallen in der hygroskopischen Lösung, deutlich größer waren.

Für die Situation im Schwahl und das dort herrschende Klima bedeutet dies, dass auch bei sehr geringen relativen Luftfeuchtigkeiten, die im Schwahl ohnehin nur sehr selten zu erwarten sind, keine vollständige Kristallisation der Salzmischungen aufzutreten scheint. Es sollte

berücksichtigt werden, dass das Kristallisationsverhalten im Putz oder in den Ziegeln von dem aus einer reinen Lösung abweichen kann, da Kristallisationskeime vorliegen. Der Verbleib eines Restes Lösung auch bei tiefen relativen Luftfeuchtigkeiten und somit eine Abweichung von dem mittels *ECOS-Runsalt* vorhergesagten Kristallisationsverhalten ist auf eine Übersättigung der Lösung zurückzuführen. Bedingt wird diese höchstwahrscheinlich durch den erhöhten Gehalt an hygroskopischem Calciumnitrat und auch Calciumchlorid. Die Ergebnisse von *ECOS-Runsalt* zeigten sich somit im Rahmen des Projekts als sehr wichtiges Werkzeug, da kritische Situationen für das Objekt zunächst abgeschätzt werden können. Anzumerken ist jedoch, dass das Programm keine Abweichungen vom thermodynamischen Gleichgewicht berücksichtigen kann, wie es aber bei der Schwahl-Lösung in Form einer Übersättigung und somit dem Verbleib einer hochviskosen Lösung auch bei relativen Luftfeuchtigkeiten unterhalb der gemeinsamen Deliqueszenzfeuchte beobachtet wurde.

Um zusätzlich auch das Verhalten der Lösung bei niedrigen Temperaturen zu bestimmen, wurde sie mittels Kühlkalorimetrie (Setaram BT.215, Setaram Instrumentation, Frankreich) untersucht. Dabei wurde die Lösung zunächst auf -90 °C gekühlt und anschließend erneut auf Raumtemperatur erwärmt, wobei die Kühl- beziehungsweise Heizrate jeweils $0,1\text{ K}\cdot\text{min}^{-1}$ betrug. Bezüglich der hier durchgeführten Untersuchung einer Salzlösung ermöglicht es die Methode, Wärmemengen,



9 Ergebnis der kalorimetrischen Messung der Schwahl-Lösung. Dargestellt ist die Wärmemenge Q in mW in Abhängigkeit der Temperatur. Erkennbar sind zwei exotherme Signale während des Abkühlprozesses und ein breites endothermes Signal beim erneuten Aufheizen der Lösung.

7 Tropfenkristallisation einer Lösung der Zusammensetzung einer Probe aus Joch 2:

- a) Start der Tropfenkristallisation, $t=0$;
- b) Bildung vereinzelter kleiner kubischer Kristalle, $t=7\text{ min }38\text{ sec}$;
- c) voranschreitende Kristallisation, $t=62\text{ min }26\text{ sec}$;
- d) Anzahl der Kristalle steigt nicht mehr an, Lösung dunstet nicht vollständig ein, Kristallkanten teilweise abgerundet, $t=72\text{ h}$.

8 Tropfenkristallisation einer Natriumchlorid-Lösung:

- a) Start der Tropfenkristallisation, $t=0$;
- b) Verkleinerung des Tropfens im Zuge der Kristallisation und Wachstum des ersten Kristalls, $t=9\text{ min }16\text{ sec}$;
- c) Wachstum weitere vereinzelter Kristalle, $t=12\text{ min }36\text{ sec}$;
- d) vollständige Eindunstung des Tropfens mit wenigen Kristallen, $t=15\text{ min }54\text{ sec}$.

die im Zuge einer Phasenumwandlung vom System aufgenommen oder abgegeben werden, zu messen. In diesem Falle wären zu berücksichtigende Phasenumwandlungen beispielsweise Kristallisation und Auflösung beziehungsweise Gefrieren und Auftauen. Im Rahmen der Messungen (Abb. 9) zeigten sich zwei Signale im Zuge der Abkühlung und eines beim erneuten Aufwärmen. Das erste bei der Kühlung zu beobachtende Signal bei etwa $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist sehr klein und kann womöglich der Kristallisation von Natriumchlorid zugeordnet werden. Das zweite Signal bei Temperaturen unterhalb von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ist größer, so dass es entweder der Kristallisation einer weiteren Phase oder dem Gefrieren des gesamten Gemisches zugeordnet werden kann. Das breite Signal, welches während des erneuten Erwärmens zu beobachten ist, ist dementsprechend dem Auftauen der Lösung oder dem Auflösen einer Salzphase zuzuordnen. Insgesamt lässt dieses Experiment die Aussage zu, dass im Schwahl keine Gefrier- und Auftauprozesse der Salzmischungen zu berücksichtigen sind. Auch wenn die Temperaturen im Winter stark abfallen, sinken sie nicht auf derart tiefe Werte, wie sie in den kalorimetrischen Messungen detektiert wurden.

Da zusammenfassend nun überwiegend hygroskopische Mischungen mit hohen Anteilen an Calciumnitrat in den Mauern des Schwahls vorliegen und gleichzeitig besonders im Winter hohe relative Luftfeuchtigkeiten erreicht und über längere Zeiträume gehalten werden, sollte ein weiterer Aspekt berücksichtigt werden. Die Salze können bei entsprechendem Klima größere Wassermengen aufnehmen und somit auch stark verdünnte Lösungen bilden. Somit stellt sich die Frage, wie sich ändernde Volumina von verdünnten und konzentrierteren Lösungen oder kristalliner Salze und vor allem auch die Salzlösungen selbst auf die Putzfestigkeit auswirken. Putzbeulen und erhöhte Feuchtegehalte in den Mauern wurden im Schwahl bereits beobachtet. Um diesen Aspekt zu untersuchen, wurden Kalkprüfkörper (etwa $40 \times 40 \times 10\text{ mm}^3$) aus einem Gemisch aus gelöschtem Kalk und feinem Sand (Korngröße $0,04\text{--}0,15\text{ mm}$) hergestellt, die an die feinere Putzschicht eines Wandgemäldes angelehnt waren. Jeweils drei der Prüfkörper wurden mit Calciumnitrat-Lösungen ($1,93$, $1,29$ und $0,966\text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) imprägniert, während drei unbehandelt blieben. Nach Aufbringung einer Flankenversiegelung an den vier langen Seitenflächen wurden die Kalkprüfkörper zyklisch jeweils 14 Tage hohen ($>85\text{ \% RH}$) und sieben Tage geringen ($<10\text{ \% RH}$) relativen Luftfeuchtigkeiten ausgesetzt und die Gewichtsveränderungen

gravimetrisch sowie die optischen Veränderungen visuell verfolgt. Die aufgenommene Salzmenge in Gewichtsprozent sowie die Mittelwerte der in den Zyklen aufgenommenen Wassermenge in Prozent des Eigengewichts der Kalkprüfkörper sind in Abb. 10 zusammengefasst.

Tränkungslösung / $\text{mol}\cdot\text{kg}^{-1}$	$m_{\text{Salz}} / \%$	$m_w / \%$
0.00	0.00	3.8 ± 0.1
0.966	8.9 ± 0.02	22.3 ± 6
1.29	10.2 ± 0.2	25.5 ± 1
1.93	10.6 ± 1	29.1 ± 2

10 Konzentrationen der Tränkungslösungen, dabei aufgenommen Salzmenge (als Salzgehalt m_{Salz} in Gewichtsprozent) und die während der Befeuchtung durchschnittliche prozentuale Wasseraufnahme m_w der Kalkprüfkörper.

Es wird schnell deutlich, dass die aufgenommene Wassermenge der leeren Prüfkörper weit unterhalb derjenigen der imprägnierten Prüfkörper liegt. Mehr Informationen als die gravimetrische Untersuchung lieferte jedoch die optische Betrachtung (Abb. 11). Salzhaltige Prüfkörper zeigten nach der Befeuchtung eine dunkle Verfärbung (beige/gelblich, Abb. 11a und 11b), bedingt durch den erhöhten Feuchtegehalt. Zudem, und das hat in Bezug auf das Schädigungspotential solcher zyklischen Wechsel eine weitaus höhere Bedeutung, waren die beladenen Kalkprüfkörper nach der Befeuchtung aufgeweicht (Abb. 11c). Dieser Effekt wurde mit zunehmendem Salzgehalt größer, reduzierte sich aber mit der anschließenden Trocknung wieder (Abb. 11d). Zum Vergleich wurde ein leerer Kalkprüfkörper für 24 Stunden unter Wasser gelagert. Neben einer leichten gräulichen Verfärbung zeigte sich keine Abnahme der Festigkeit (Abb. 11e). Somit steht die Salzlösung im Prüfkörper im direkten Zusammenhang mit der Aufweichung im Zuge der Befeuchtung. Es ist an dieser Stelle zwar nicht zu vernachlässigen, dass die Salzgehalte in den Prüfkörpern jene in realen Objekten überschreiten, trotzdem zeigt sich, dass sich ein erhöhter Feuchtegehalt in der Putzschicht, der lediglich durch die hygroskopische Wasseraufnahme der vorliegenden Salze hervorgerufen wurde, in einer Veränderung der Materialeigenschaften widerspiegeln kann. Ein Verlust der Festigkeit stellt in jedem Fall eine kritische Situation für die Beständigkeit fragiler Wandgemälde dar.

Die Berechnungen mittels *ECOS-Runsalt* in Kombination mit den Laborexperimenten konnten verdeutlichen, dass das Klima im Winter durch die hohen relativen Luftfeuchtigkeiten für die Versalzungssituation zunächst günstig ist, da die hygroskopischen Salzmischungen dann weitestgehend in gelöster Form vorliegen und keine zyklischen Wechsel zwischen Kristallisation und Deliqueszenz zu erwarten sind. Im Sommer wird die kritische Kristallisationsfeuchte zwar häufiger unterschritten, so dass daraus kritische Situationen für die Wandgemälde resultieren könnten, allerdings zeigten Tropfenkristallisationen, dass auch bei geringen relativen Luftfeuchtigkeiten mit keiner vollständigen Kristallisation zu

rechnen ist. Zu berücksichtigen ist an dieser Stelle noch ein möglicherweise abweichendes Kristallisationsverhalten der Salze im porösen Material. Zudem könnten im Winter die hohe Feuchtigkeit und dadurch gebildete verdünnte Salzlösungen kritische Situationen für den Putz ergeben, da eine Aufweichung von Kalkprüfkörpern mit Calciumnitrat bei hohen relativen Luftfeuchtigkeiten beobachtet werden konnte. Hervorgehoben werden sollte jedoch, dass eine Bewertung des Klimas als günstig oder kritisch in diesem Kontext nur in Bezug auf die Versalzungssituation gilt. Andere Schadensphänomene wie beispielsweise mikrobiologische Prozesse müssen separat betrachtet werden.



11 Untersuchung von Kalkprüfkörpern in Zyklen mit hoher und niedriger relativer Luftfeuchtigkeit: a) oben ein leerer und unten ein mit einer $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung ($0,966 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) imprägnierter Kalkprüfkörper (Vorderseite) nach der Befeuchtung, letzterer mit dunkler Verfärbung; b) oben ein mit einer $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung ($1,93 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) imprägnierter und unten ein leerer Kalkprüfkörper (Rückseite) nach der Befeuchtung, wobei der obere eine deutliche Verfärbung zeigt; c) ein mit einer $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung ($0,966 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) imprägnierter Kalkprüfkörper (Rückseite) nach der Befeuchtung mit einem Riss bedingt durch das Aufweichen des Materials; d) oben zwei ein mit einer $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ -Lösung ($1,29 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) imprägnierte und unten ein leerer Kalkprüfkörper (Vorderseite) nach der Trocknung. Die gelbliche Verfärbung wurde nach der Trocknung wieder reduziert; e) links ein leerer sowie trockener und rechts ein leerer aber 24 h unter Wasser gelagerter Kalkprüfkörper. Letzterer zeigt nach der Befeuchtung zwar eine gräuliche Verfärbung, die Festigkeit wurde aber nicht beeinflusst.

¹ Daten und Messpositionen aus: Christian Leonhardt: Probenentnahme zur Salzanalyse Joch 2 und Joch 12, III bis V, Werkstatt für Kunst & Denkmalpflege GbR, interner Bericht, Kiel 2011.

² Clifford Price (Ed.): An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials. Studies / European Commission / Community Research, Vol. 11, London 2000.

³ Davide Bionda: Modelling indoor climate and salt behaviour in historical buildings. Dissertation ETH Zürich, Zürich 2006.

⁴ Michael Steiger und Alison Heritage: Modelling the crystallization behavior of mixed salt systems: input data requirements. In: 12th International Congress on Deterioration and Conservation of Stone, Columbia University, New York 2012.

⁵ Christian Leonhardt: Erweiterte Probenentnahme zur Salzanalyse Joch 2, Werkstatt für Kunst & Denkmalpflege GbR, interner Bericht, Kiel 2010.

⁶ Daten aus: Christian Leonhardt und Julika Heller: Klimaaufzeichnungen Schwahl 2014–2016, EASYLog 80, Werkstatt für Kunst & Denkmalpflege GbR, interner Bericht, Kiel 2016.

Amelie Stahlbuhk, Michael Niermann, Hannah Grotian, Michael Steiger

Die Verwendung der Kammermethode zur Untersuchung des Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhaltens poröser Materialien

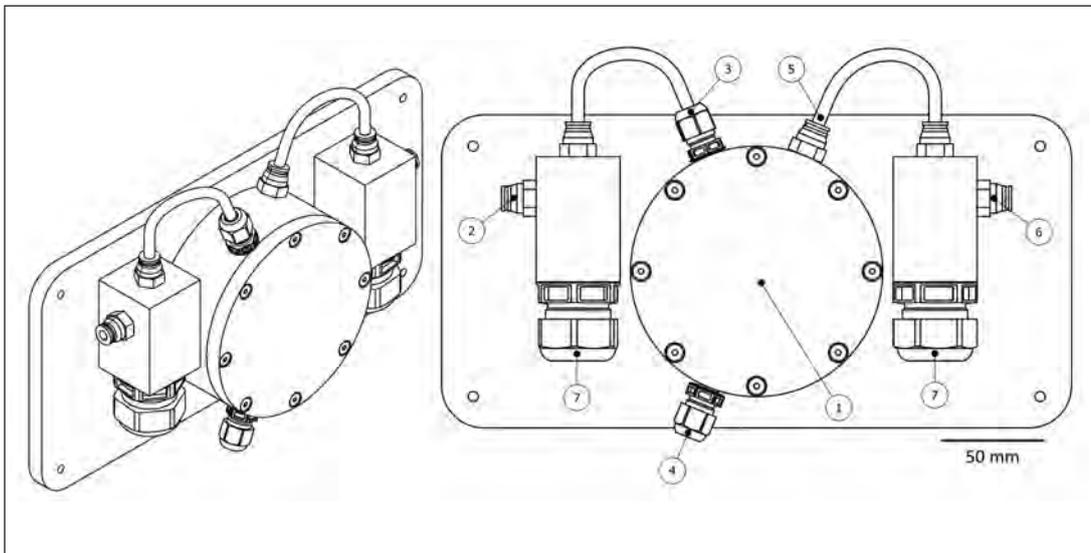
Poröse Baumaterialien, die bei der Errichtung historischer Bauwerke Verwendung finden, weisen häufig Anreicherungen verschiedener Art auf. Nicht nur Salze – eingebracht durch sowohl anthropogene als auch natürliche, umweltbedingte Prozesse^{1,2} – sondern auch Luftschadstoffe und weiteres Fremdmaterial können in diesem Zusammenhang identifiziert werden. Fremdmaterial stammt häufig aus restauratorischen Eingriffen,^{3,4} aber auch Ruß oder Wachs, die durch die Nutzung der Räumlichkeiten eingebracht werden, sind Beispiele für solche Substanzen. Ein mögliches Schädigungspotential und ästhetische Beeinträchtigungen können Auswirkungen dieser Anreicherungen sein. Zusätzlich ist aber auch eine Beeinflussung des Wassersorptionsverhaltens der porösen Materialien eine potentielle Konsequenz.

Das Sorptionsverhalten poröser Materialien beschreibt das Gleichgewicht von Wasseraufnahme und -abgabe zwischen porösen Materialien und ihrer Umgebung. Wird zunächst ein Objekt ohne jegliche Anreicherungen betrachtet, so wird Wasserdampf in Abhängigkeit von der Porengrößenverteilung des Materials, seinem Wassergehalt und den Umgebungsbedingungen, also von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (RH), aus der Umgebung vom Material aufgenommen oder an diese abgegeben. Liegen hingegen Anreicherungen vor, kann es beispielsweise zu einer erhöhten Wasseraufnahme oder einer reduzierten Wasserabgabe kommen.

Salze müssen hinsichtlich der Schädigung von Bauwerken bereits wegen des bei ihrer Kristallisation möglichen Kristallisationsdrucks⁵ berücksichtigt werden. Zusätzlich hat jedes Salz einen temperaturabhängigen, spezifischen Wert der relativen Luftfeuchtigkeit, die Deliqueszenzfeuchte, ab welchem es Wasserdampf aus der Umgebung aufnimmt, um eine gesättigte Lösung zu bilden. Bei steigender Feuchte verdünnt sich die Lösung, da weiterhin Wasserdampf aufgenommen wird, fällt die Feuchte hingegen unterhalb des Wertes der Deliqueszenzfeuchte ab, liegt das Salz kristallin vor. Folglich können Salze zu einer erhöhten Wasseraufnahme auch schon bei verhältnismäßig geringen relativen

Luftfeuchtigkeiten führen. Da Hygroskopizität und Löslichkeit von Salzen stark variieren, ist auch die bei gleichem Klima aufgenommene Wassermenge teilweise sehr unterschiedlich. Im Falle von Salzanreicherungen im porösen Baumaterial beeinflussen folglich sowohl die Sorptionseigenschaften des Materials als auch die des Salzes beziehungsweise der Salzmischung das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten. Krusten (Fremdmaterial oder schwer lösliche Salze) oder auch Hydrophobierungen verringern hingegen die Wasserabgabe bei Trocknung des Materials, da sie oberflächliche Poren verstopfen und die Trocknungsgeschwindigkeit herabgesetzt wird. Auch die Kristallisation von Salzen in oberflächlichen Poren, das sogenannte *pore clogging*, kann zu einer verringerten Wasserabgabe führen, da der Kapillartransport gehindert wird. In all diesen Fällen kommt es zu einer Abweichung vom intrinsischen Sorptionsverhalten des reinen Materials ohne Salze oder Fremdmaterial.

Auch auf den Wandmalereien im Schwahl konnten Anreicherungen und Krustenbildungen beobachtet werden, besonders stark ausgeprägt in Joch 5. Da neben der deutlichen Beeinträchtigung des ästhetischen Erscheinungsbildes auch eine Auswirkung der Anreicherungen auf das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten erwartet wurde, stellte die Untersuchung dieser Auswirkungen mithilfe einer zerstörungsfreien Kammermethode⁶ einen wesentlichen Punkt in dem vorgestellten Projekt dar. Die für diesen Zweck verwendete Methode wurde in einem früheren DBU-Projekt⁷ entwickelt und nun für die zu untersuchende Fragestellung weiter modifiziert. Eine derartige Kammermethode wurde bereits für die Untersuchung der Deposition von Schwefeldioxid aus der Luftverschmutzung auf Materialoberflächen verwendet.^{8,9} Anders als bei der Untersuchung der Deposition von Schadgasen ist die Aufnahme von Wasserdampf ein reversibler Prozess, der mithilfe der Kammermethode in beide Richtungen untersucht werden kann. Die Untersuchung basiert auf der Massenbilanz, so dass durch die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit am Ein- und Ausgang der Kammer der Wasserdampfstrom im Zuge einer hygroskopischen Wasseraufnahme oder Verdunstung ermittelt werden kann.¹⁰



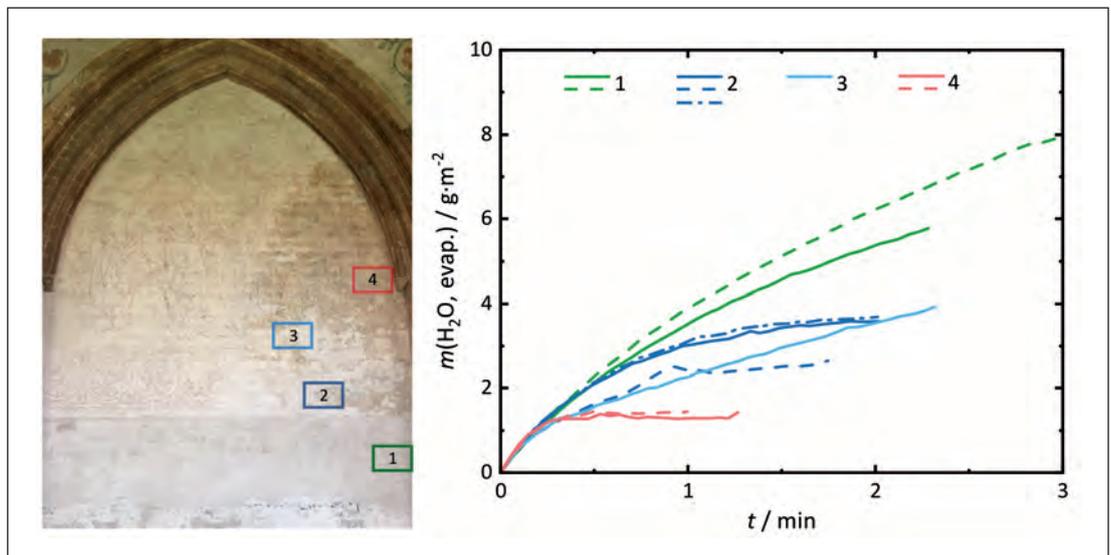
1 Schematische Darstellung der verwendeten Kammer: links: 3D-Darstellung, rechts: Frontalansicht.
 1 - zylindrische Kammer, 2 und 3 - Kammereingang, 4 - Zugang für die Stromversorgung des Ventilators,
 5 und 6 - Kammerausgang, 7 - Positionen für die T/RH-Sensoren.

Der Aufbau der verwendeten Kammer ist in Abb. 1 dargestellt. Es handelt sich um eine zylindrische Kammer (1, Durchmesser 100 mm) aus Polyoxymethylen (POM) und Polymethylmethacrylat (PMMA), die im Inneren ventiliert wird (Stromversorgung über 4). Dies ermöglicht eine ideale Durchmischung in der Kammer, so dass die Luftfeuchtigkeit, die am Kammerausgang gemessen wird, jener innerhalb der Kammer entspricht und der Transport von Wasserdampf von der Oberfläche an die Umgebung oder andersherum geschwindigkeitsbestimmend ist. Montiert ist die Kammer auf einer Platte (ebenfalls PMMA, 300 x 150 mm²), auf die zwei Temperatur- und Feuchtesensoren (7, Hygroclip, Rotronic Messgeräte GmbH, $\pm 0,8$ % RH und $\pm 0,2$ K) aufgebracht und mit einer Hygrolab C1 Station (Rotronic Messgeräte GmbH) verbunden sind, so dass relative Feuchte und Temperatur vor Kammereintritt und nach -austritt kontinuierlich gemessen werden. Ein durch eine Membranpumpe generierter und regulierbarer Luftstrom (in den durchgeführten Experimenten durchschnittlich $3,9 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$) wird über den Kammereingang und -ausgang (2,3 und 5,6) durch die Kammer geleitet, wobei ebenfalls der Feuchtegehalt des Luftstroms eingestellt werden kann. Ein sehr wichtiger Aspekt für die Verwendung der Kammer an Objekten des kulturellen Erbes ist ein zerstörungsfreier Charakter. Auf der Rückseite der Kammer ist ein weiches und nicht adhäsives Dichtungsband befestigt (Tesamoll, P-Profil), welches sich rückstandslos von Oberflächen entfernen lässt.¹¹ Bei den Messungen im Schwahl wurde aufgrund des teilweise sehr unebenen Mauerwerks zusätzlich eine Matte Armaflex verwendet. Auch dieses Dichtungsmaterial ist weich, nicht

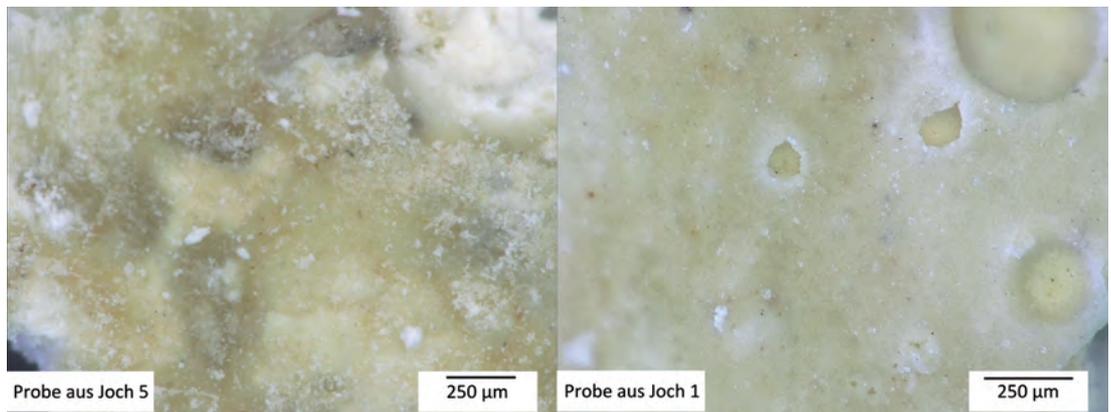
adhäsiv und rückstandslos entfernbar, jedoch ist es dicker und ermöglicht so den Ausgleich von größeren Differenzen der Oberfläche. Aus der Beschreibung des Aufbaus geht bereits hervor, dass lediglich die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur am Kammereingang und -ausgang gemessen werden. Weitere Größen, die für die Auswertung bekannt sein müssen, sind der Gasfluss Q (in $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$), welcher zudem mit einer Gasuhr gemessen werden kann, und die ebenfalls konstante, in der zylindrischen Kammer exponierte Fläche A (in m^2) der Wand. In den im Folgenden abgebildeten Diagrammen wird die Masse der transportierten Wassermenge (in $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$) in Abhängigkeit der Zeit t dargestellt, so dass diese Wassermenge zu jedem Zeitpunkt der Messung abgelesen werden kann.

Die im Projekt durchgeführten Messungen am Objekt sollten die Auswirkungen der beobachteten gelblichen Verkrustungen auf das Trocknungsverhalten untersuchen. Dafür wurde der Luftstrom vor Kammereintritt durch ein mit Silicagel gefülltes Trockenrohr geleitet, um eine relative Luftfeuchtigkeit von nur wenigen Prozent zu erhalten. Da von einer Verdichtung der Oberfläche durch Krustenbildung ausgegangen wurde, war mit einer gehinderten Wasserabgabe bei der Trocknung der Wandmaleereien und des dahinterliegenden Mauerwerks zu rechnen. Folglich wurden am Objekt – vorrangig in dem am stärksten von den Vergilbungen betroffenen Joch 5 – systematische Untersuchungen mit der Kammermethode durchgeführt.

Bei den ersten Untersuchungen wurden verschiedenen stark betroffenen Bereiche in Joch 5 hinsicht-



2 Links: Messpositionen der Kammermessungen in Joch 5. Rechts: die zugehörigen bei der Trocknung abgegebenen Wassermengen in einem neuverputzten Bereich ohne Vergilbungen (1, grün), in Bereichen mit unregelmäßiger Vergilbung (2, dunkelblau und 3, hellblau) sowie in einem Bereich mit flächendeckender Vergilbung (4, rot).

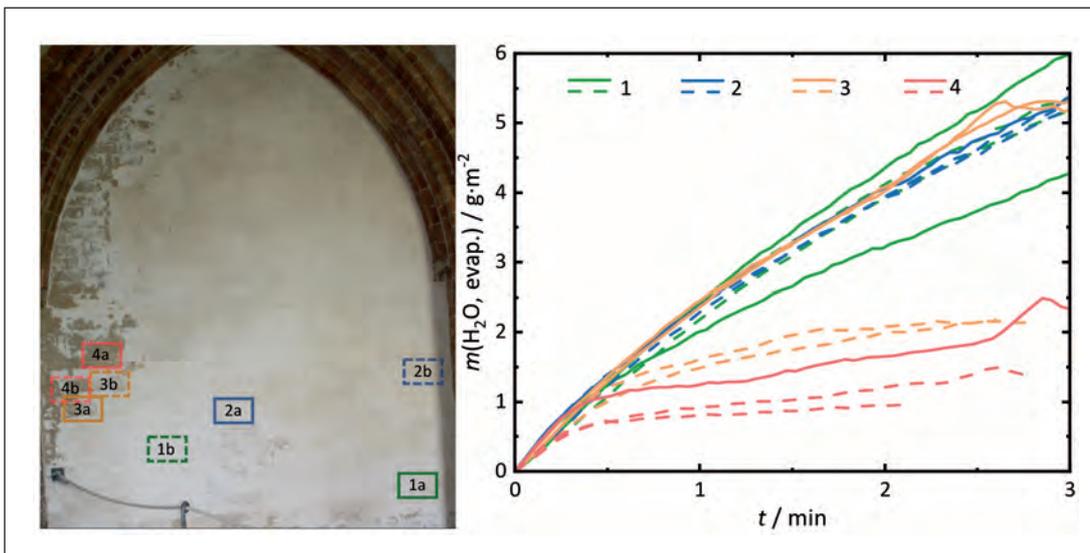


3 Mikroskopische Aufnahmen der Überzüge aus Joch 5 (links) und 1 (rechts).

lich ihres Trocknungsverhaltens untersucht. Unterschieden wurden ein neuer Kalkputz unterhalb der Malerei ohne erkennbare Verkrustungen (0,70 m, Bereich 1), Bereiche mit unregelmäßig verteilten Verkrustungen im Bereich der Malerei (1,40 m und 1,75 m, Bereiche 2 und 3) sowie ein vollständig von Verkrustungen bedecktes Areal im rechten oberen Teil des Jochs (2,30 m, Bereich 4). In den meisten Fällen wurden Mehrfachmessungen durchgeführt.¹²

Bei Betrachtung der Ergebnisse (Abb. 2) ist deutlich erkennbar, dass im Falle eines unverkrusteten Bereichs (Bereich 1) mehr Wasserdampf an die Umgebung abgegeben werden kann als von teilweise oder gar vollständig bedeckten Bereichen. Auffällig ist ferner, dass die zu einer Messposition gehörenden Messkurven unterscheidbare Gruppen bilden und dass die Messkurven der beiden teilweise verkrusteten Messpositionen ebenfalls eine Gruppe stellen.

Eine vollständig exakte Reproduzierbarkeit im Falle von Mehrfachbestimmungen ist zwar nicht gegeben, dies ist aber womöglich auf eine nicht vollständige, erneute Gleichgewichtseinstellung zwischen den Wandbereichen und der Umgebung im Zeitraum zwischen den Mehrfachmessungen zurückzuführen. Wird die vollständig von der Vergilbung bedeckte Fläche in 2,30 m Höhe betrachtet, zeigt sich, dass die abgegebene Wassermenge schon nach kurzer Zeit nicht mehr ansteigt. Es ist denkbar, dass lediglich die an der Oberfläche kondensierte Feuchtigkeit abtransportiert wurde. Wie eingangs erläutert, können auch auskristallisierte Salze in oberflächlichen Poren zu einer gehinderten Trocknung führen. Im Falle der Verkrustung in Joch 5 konnte dies jedoch anhand der mikroskopischen Betrachtung von Proben der Putzoberfläche (Abb. 3) ausgeschlossen werden. Der Verschluss der Oberfläche durch eine kontinuierliche gelbliche Schicht war dort deutlich erkennbar. Somit



4 Links: Messpositionen der Kammermessungen in Joch 1. Rechts: die zugehörigen bei der Trocknung abgegebenen Wassermengen in Bereichen mit weißem, unverändertem Putz (1a und 1b, grün), mit leichten beigefarbenen Verfärbungen (2a und 2b, blau), mit unregelmäßig verteilten, leichten Verfärbungen beziehungsweise unregelmäßig verteilten, stärkeren Verfärbungen (3a und 3b, orange) und mit flächendeckenden Verfärbungen (4a und 4b, rot). Durchgezogene Kurven (Mehrfachbestimmungen) gehören zu der jeweiligen Position „a“, gestrichelte Kurven zu Positionen „b“.

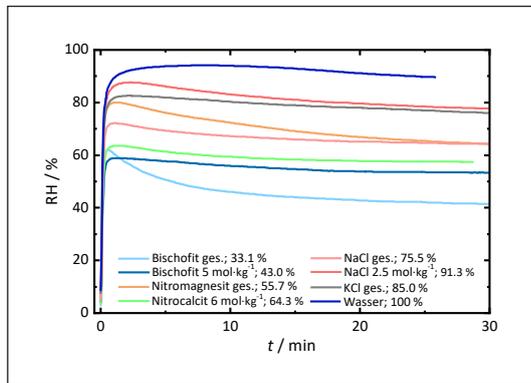
konnte bereits mit der ersten Messkampagne eine massive Auswirkung der Verkrustung auf das Trocknungsverhalten des Putzes und des darunterliegenden Mauerwerks bestätigt werden. Die Verkrustungen führen zu einer Verdichtung der oberflächlichen Porenstruktur und reduzieren die Wasserabgabe. Vergleichend zu Joch 5 wurden weitere Messungen in Joch 1 durchgeführt (Abb. 4), welches ebenfalls durch Verfärbungen auf der Maleroberfläche auffiel. Unterschieden wurden erneut unterschiedlich stark betroffene Bereiche ohne Verfärbungen (1a und 1b), mit leichten, beigefarbenen Verfärbungen (2a und 2b), mit ungleichmäßigen Verkrustungen mit leichter (3a) und stärkerer Verfärbung (3b) und mit vollständig bedeckenden Verkrustungen (4a und 4b). Bei den Ergebnissen konnten ähnliche Beobachtungen gemacht werden wie bei den Messungen in Joch 5. In den Bereichen ohne oder mit nur leichten Verfärbungen (1a und 1b, 2a und 2b sowie 3a) wurden sehr ähnliche Mengen Wasserdampf im Zuge der Trocknung abtransportiert. Diese liegen alle über den Mengen, die von den stärker verkrusteten Bereichen abgegeben wurden. Dies deutet auf eine Einschränkung des Trocknungsverhaltens des Putzes und des darunterliegenden Mauerwerks durch die vorliegenden Verkrustungen hin, wie es auch in Joch 5 beobachtet wurde. Bezüglich der Verkrustungen in Joch 5 und Joch 1 ist jedoch unklar, ob sie gleicher Herkunft und Zusammensetzung sind, da sie sich bereits in mikroskopischen Aufnahmen deutlich voneinander unterscheiden (vgl. Abb. 3).

Weitere Kammermessungen am Objekt wurden begleitend zur Reinigung von Testflächen durchgeführt. Diese werden im Beitrag „Erarbeitung eines Konzeptes zur Reduzierung gealterter Fixiermittel auf Putz- und Maleroberflächen“ im vorliegenden Band vorgestellt. Sie zeigen, dass die Methode auch zur Überprüfung und Verfolgung von Maßnahmen zur Reduktion der Überzüge erfolgreich eingesetzt werden kann.

Durch die Anwendung der Kammermethode in verschiedenen Bereichen der Wandmalereien im Kreuzgang des Schleswiger Doms konnte eine Veränderung des intrinsischen Wassersorptionsverhaltens des Materials durch die Verkrustungen eindeutig bestätigt werden. Die Messergebnisse sind zuverlässig und reproduzierbar, so dass über die Ermittlung von Abweichungen vom intrinsischen Sorptionsverhalten auch kritische Situationen für die Objekte erkannt werden können. Im Falle der Krustenbildungen im Schwahl beispielsweise ergibt sich eine kritische Situation durch den Verschluss oberflächlicher Poren. Dahinter, im Mauerwerk und im Putz, vorliegende Salze können sich anreichern und, bedingt durch den Verschluss, in freie Bereiche neben der Verkrustung ausweichen. Substanzverluste können die Folge sein, besonders wenn Risse oder kleine freie Bereiche im Überzug vorliegen. Zudem war es mit der Kammermethode auch möglich, die schrittweise Zunahme des Effekts der Verringerung der Wasserabgabe mit zunehmend ausgeprägter Verkrustung zu veran-

schaulichen, in dem unterschiedlich stark belastete Bereiche berücksichtigt wurden. Mit ihrem zerstörungsfreien Charakter ist der Einsatz der Kammer auch auf Objekten des kulturellen Erbes möglich, wobei selbstverständlich die Festigkeit des Materials zuvor gesichert werden muss und beispielsweise – wie im Falle der Wandmalereien – nur unpigmentierte Bereiche den Kammermessungen ausgesetzt werden sollten.

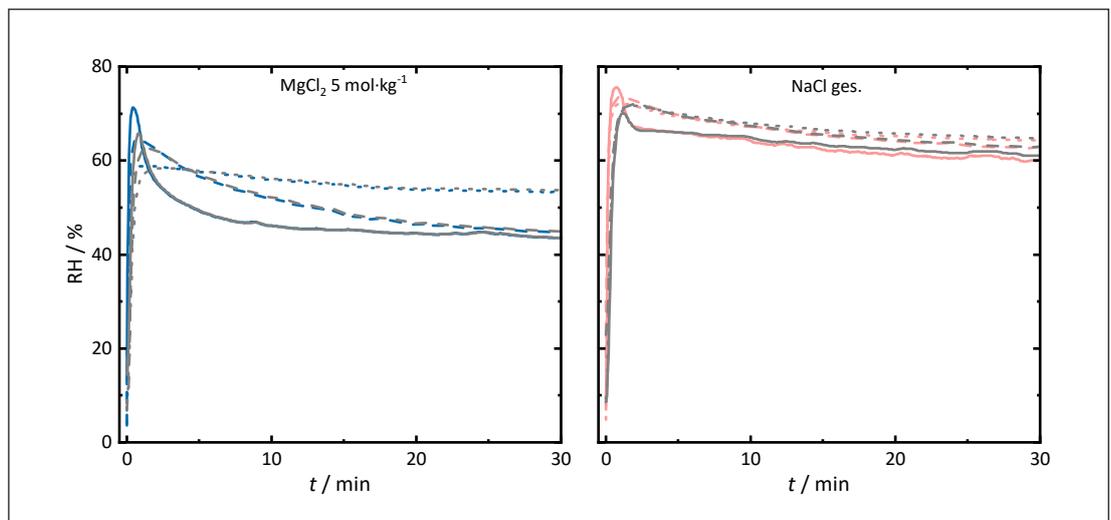
Mit dem weiteren Ziel, die Kammermethode hinsichtlich der Untersuchung der hygroskopischen Wasseraufnahme weiterzuentwickeln, wurden im Rahmen des DBU-Projektes auch Laborexperimente durchgeführt.¹³ Dabei galt es nicht nur Verkrustungen, wie sie am Objekt vorgefunden wurden, zu untersuchen, sondern auch den Einfluss verschiedener Salze zu simulieren. Anders als



5 Am Kammereingang erreichte relative Luftfeuchtigkeiten bei der Verwendung verschiedener (gesättigter) Salzlösungen, über die der Luftstrom vor Kammereintritt geleitet wurde.

bei den Untersuchungen am Objekt wird hierbei ein Luftstrom mit geregelter relativer Feuchte in die Kammer geleitet und die von den mit Salz imprägnierten Prüfkörpern aufgenommene Wassermenge durch Differenzbildung der am Ein- und Ausgang gemessenen Feuchte ermittelt. Durch die Verwendung verschiedener relativer Luftfeuchtigkeiten für die Befeuchtung kann untersucht werden, ab welchen Umgebungsfeuchten es zu einer hygroskopischen Wasseraufnahme und, bei anschließender Trocknung, Wasserabgabe kommt, so dass die Werte der Deliqueszenzfeuchte und der kritischen Kristallisationsfeuchte abgeschätzt werden können.¹⁴

Die Einstellung stabiler Eingangsfeuchten stellt somit den ersten Schritt in den Laborexperimenten dar. Da der Aufbau für Versuche am Objekt geeignet sein sollte, standen unter anderem eine gute Handhabbarkeit sowie ein kostengünstiger Aufbau im Fokus, um das Verfahren einem breiteren potentiellen Anwenderkreis zugänglich zu machen. Der einfachste Weg relative Luftfeuchtigkeiten einzustellen und gleichzeitig auf einen sperrigen und teuren Feuchtegenerator zu verzichten, ist die Verwendung von Salzlösungen. Wird ein Luftstrom durch bzw. über eine Salzlösung geleitet, so wird die Luftfeuchtigkeit durch die Gleichgewichts- bzw. die Sättigungfeuchte der entsprechenden Lösung bestimmt. Dafür wurde die Öffnung der Kammer zur Vermeidung von Sorptionsprozessen mit einer Metallplatte verschlossen. Mithilfe einer Pumpe wurde der Luftstrom vor Kammereintritt über die entsprechenden Lösungen¹⁵ geleitet und die erreichte Luftfeuchtigkeit am Kammereingang auf-



6 Dreifachbestimmung der Einstellung feuchter Luft mit einer MgCl_2 -($5 \text{ mol}\cdot\text{kg}^{-1}$) und einer NaCl -Lösung (ges.). Gezeigt sind die Eingangsfeuchten (blau und rot) sowie die Ausgangsfeuchten (jeweils in grau). Die einzelnen Messungen der Dreifachbestimmungen werden durch durchgezogene, gestrichelte und gepunktete Kurven unterschieden.

gezeichnet. In Abb. 5 sind die erhaltenen Feuchten zusammen mit der Lösungskonzentration und den theoretisch bei 20 °C erreichbaren Sättigungs- bzw. Gleichgewichtsfeuchten dargestellt. Nach einer Einschwingphase konnten konstante Werte der relativen Luftfeuchtigkeit erhalten werden. Zwar wurden die theoretischen Werte der Sättigungs- oder Gleichgewichtsfeuchten nicht erreicht, was aber auf die Verdunstungskälte und damit abnehmende erreichbare Feuchten zurückgeführt werden kann.

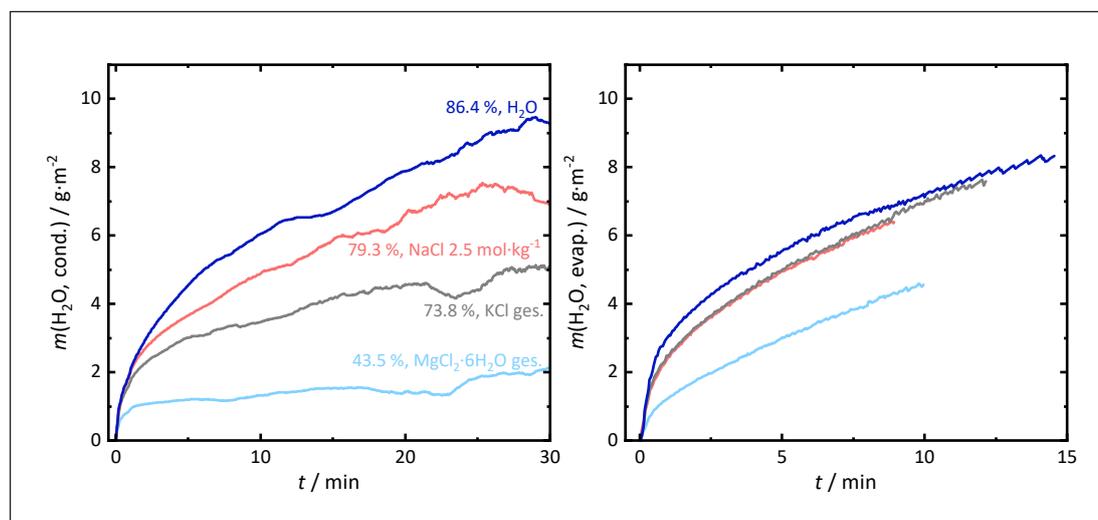
In Dreifachbestimmungen der so erreichten relativen Luftfeuchtigkeit konnten teilweise leichte Abweichungen ermittelt werden, die auf Temperaturunterschiede während der verschiedenen Messungen zurückzuführen sind. Die Temperaturabhängigkeit der Sättigungs- bzw. Gleichgewichtsfeuchten ist bei den verschiedenen Salzen unterschiedlich stark ausgeprägt, was in diesem Zusammenhang zu größeren oder kleineren Abweichungen führen kann (Abb. 6). Im Folgenden wurden ausgewaschene Platten des Sander Sandsteins (etwa 100 x 100 x 100 mm³)

mit Salzlösungen imprägniert. Verwendet wurden NaCl-, NaNO₃-, MgCl₂-, Mg(NO₃)₂-Lösungen und eine sogenannte Schwahl-Lösung. Letztere wies eine typische Salzzusammensetzung auf, wie sie in Bohrmehlproben aus dem Schwahl identifiziert wurde. Die Konzentrationen der Salze in den Lösungen und die nach der Trocknung bestimmte, aufgenommene Salzmenge in den Proben können Abb. 7 entnommen werden. Anschließend wurden die Platten flankenversiegelt und mit Dichtungsmasse unter der Kammeröffnung platziert. Befeuchtung und anschließende Trocknung, für die der Luftstrom wieder durch ein mit Silicagel gefülltes Trockenrohr geleitet wurde, wurden beginnend mit der niedrigsten Eingangsfeuchte meist in einer Dreifachbestimmung abwechselnd durchgeführt.

An dieser Stelle soll darauf hingewiesen werden, dass es sich bei den im Folgenden dargestellten Kurven um geglättete Daten handelt. Aufgrund leichter Schwankungen der Eingangsfeuchte und der Temperatur enthielten die Wasseraufnahmekurven Schwankungen, die durch Bildung des

Salzlösung	Konzentration / mol·kg ⁻¹	Salzgehalt nach Tränkung / g·kg ⁻¹ _{Stein}
0.00	0.00	3.8±0.1
0.966	8.9±0.02	22.3±6
1.29	10.2±0.2	25.5±1
1.93	10.6±1	29.1±2

7 Konzentrationen der Salze in den verwendeten Tränklösungen in mol·kg⁻¹ und Salzgehalte der getränkten Steinen.



8 Darstellung der aufgenommenen Wassermenge bei ausgewählten Befeuchtungsexperimenten bei den angegebenen relativen Luftfeuchtigkeiten (links) und die abgegebene Wassermenge bei der im Anschluss durchgeführten Trocknung eines salzfreien Steins (rechts).

gleitenden Mittelwerts reduziert wurden. Der gleitende Mittelwert wurde jeweils über 9 bis 25 Werte gebildet.

Als Referenz wurde ein Stein verwendet, der nicht mit einer Salzlösung imprägniert wurde. Exemplarisch sind einige Ergebnisse der Befeuchtungs- und Trocknungsexperimente dieser Referenz in Abb. 8 dargestellt. Hierbei sind die Mengen kondensierten oder verdunsteten Wasserdampfs in $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ gegen die Zeit aufgetragen. Die Abbildung enthält zudem die Information über erreichte relative Luftfeuchtigkeiten am Kammereingang. Für die Referenzprobe sind die aufgenommenen und somit auch die anschließend abgegebenen Wassermengen gering. Lediglich das Sorptionsverhalten des leeren Sandsteins trägt zur Wasseraufnahme bei. Die aufgenommene beziehungsweise abgegebene Wassermenge steigt dabei mit der relativen Feuchte der Befeuchtung an. Geringere Werte bei der Wasserabgabe als bei der entsprechenden Aufnahme sind durch eine noch unvollständige Trocknung des Materials zu erklären.

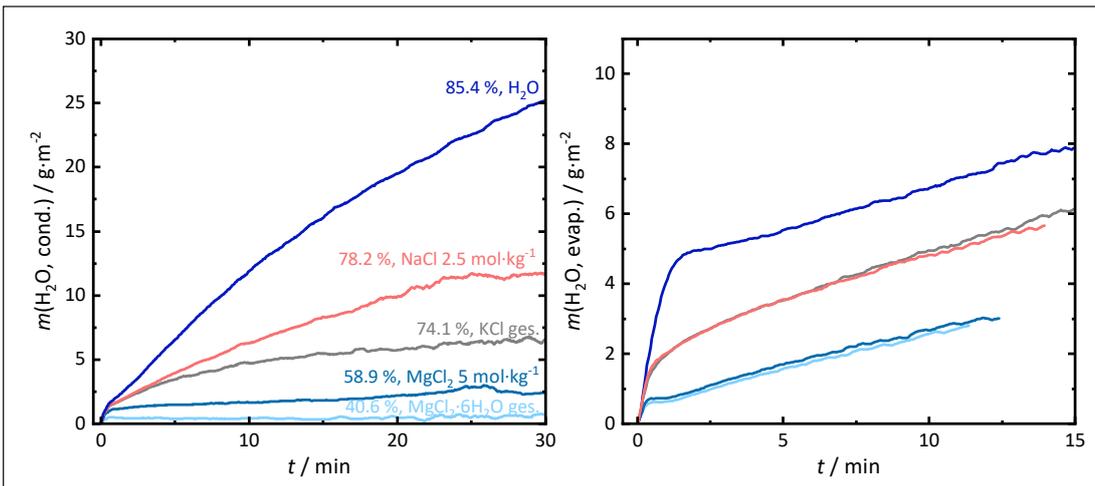
Auch im Falle des mit Natriumchlorid imprägnierten Sandsteins (Abb. 9) steigt die aufgenommene Wassermenge mit der relativen Feuchte bei der Befeuchtung an. Deutlich erkennbar ist, dass ein größerer Anstieg erst nahe und vor allem nach Überschreitung der Deliqueszenzfeuchte des Natriumchlorids (75,5 % bei 20 °C) erfolgte, was den Beitrag der hygroskopischen Wasseraufnahme durch das im Stein vorliegende Salz verdeutlicht. Es konnten einige Abweichungen bei den durchgeführten Mehrfachbestimmungen beobachtet werden, welche jedoch auf die Mobilität des Salzes zurückzuführen sind. Jedes Mal wenn der Wert der Deliqueszenzfeuchte überschritten wird, liegt eine Salzlösung vor, die mobil ist und bis zur erneuten Kristallisation durch Kapillarkräfte in Richtung Gesteinsoberfläche transportiert werden kann.

Ein weiteres bei der Kristallisation von Salzen aus ihren Lösungen auftretendes Phänomen konnte im Falle des mit Bischofit ($\text{MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) imprägnierten Sandsteins beobachtet werden (Abb. 10). Nachdem auch hier die aufgenommene Wassermenge oberhalb der Deliqueszenzfeuchte des Salzes mit zunehmender Feuchte stetig zunahm, stieg auch die abgegebene Wassermenge bei der jeweils anschließenden Trocknung an, flachte dann jedoch ab. Alle Kurven zeigen einen Wendepunkt, ab welchem die Wassermenge im Stein abnimmt und die Trocknungsgeschwindigkeit sinkt. Interessanterweise lag der Wendepunkt bei allen un-

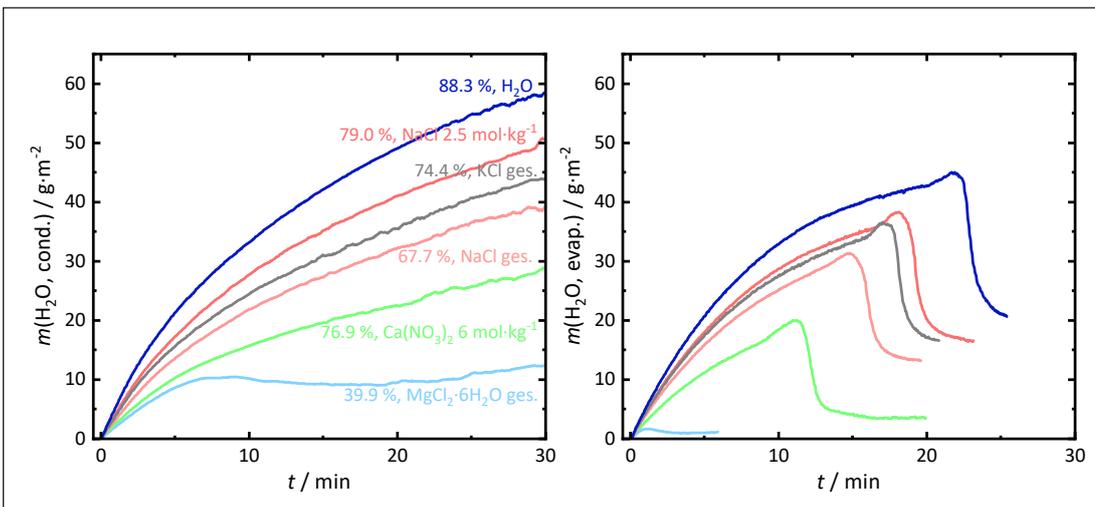
tersuchten Lösungen und Dreifachbestimmungen bei $21,4 \pm 2$ % RH. Dieses Verhalten ist womöglich durch eine zunächst aufgebaute Übersättigung der Salzlösung im Stein zu erklären. Die Kristallisation des Bischofits sollte laut thermodynamischen Daten bei 20 °C bei der Deliqueszenzfeuchte von 33,1 % RH erfolgen, sie wurde in diesen Experimenten jedoch reproduzierbar bei 21,4 % RH beobachtet. Der starke Abfall des Feuchtegehalts im Stein kann ferner auf einen bei der Kristallisation des Hexahydrats abrupt sinkenden Wassergehalt zurückgeführt werden. Eine abnehmende Trocknungsgeschwindigkeit kann zudem durch ein Verstopfen der oberflächlichen Poren im Zuge der Salzkristallisation (*pore clogging*) hervorgerufen werden. Mit diesen Untersuchungen und dem beobachteten Phänomen konnte erneut die Reproduzierbarkeit der Messmethode verdeutlicht werden.

Hinsichtlich der Übersättigung konnten ähnliche Ergebnisse und Kurvenverläufe bei der Trocknung auch für die mit Nitronatrit (NaNO_2) und mit Nitromagnesit ($\text{Mg}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) imprägnierten Steine erzielt werden, sofern die relative Luftfeuchtigkeit bei der vorherigen Befeuchtung oberhalb der Deliqueszenzfeuchte des jeweiligen Salzes lag. Folglich nur dann, wenn das Salz vollständig gelöst wurde und es bei anschließender Trocknung aus einer Lösung auskristallisierte. Die jeweilige relative Luftfeuchtigkeit am Wendepunkt lag auch hier bei Mehrfachbestimmungen in einem engen gemeinsamen Bereich. Insgesamt zeigt sich, dass die Messmethode in der Lage ist, Übersättigungen von Salzlösungen im Stein zu ermitteln. Auch damit können interessante Aussagen über das Verhalten des jeweiligen Salzes im porösen Material getroffen werden. Darüber hinaus ist es möglich festzustellen, ob die Deliqueszenzfeuchte bei einer gegebenen Luftfeuchtigkeit bereits überschritten wurde oder nicht. Es ist vorstellbar, dass bei Messungen an realen Objekten so bereits vor destruktiven Salzanalysen Aussagen darüber möglich sein können, ob stark hygroskopische Mischungen am Objekt vorliegen. Auch geeignete klimatische Bedingungen könnten so im Vorwege abgeschätzt werden.

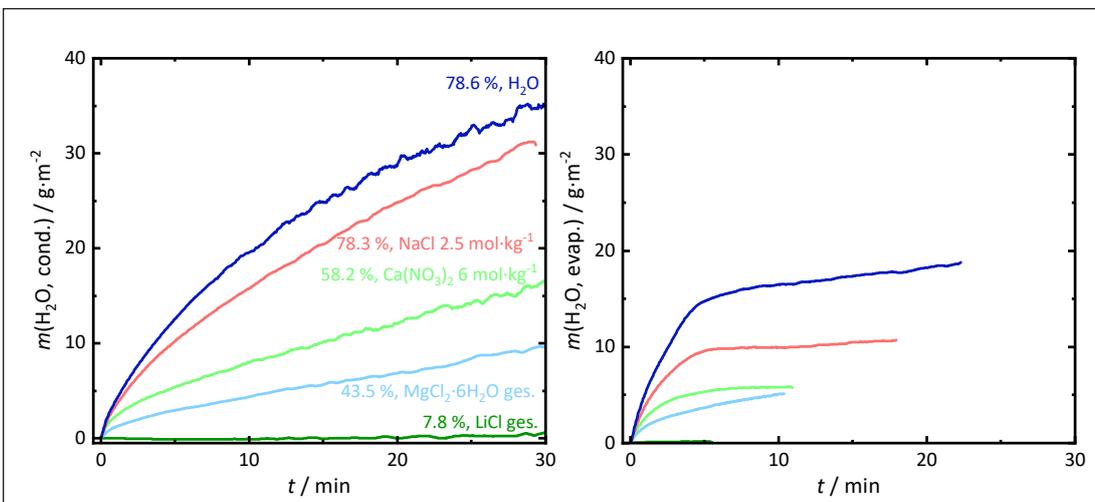
Hinsichtlich der Salzmischungen soll an dieser Stelle noch der mit einer „Schwabl-Lösung“ imprägnierte Sandstein betrachtet werden (Abb. 11). Da bei den ursprünglich für die Befeuchtung verwendeten Lösungen in allen Fällen eine hygroskopische Wasseraufnahme beobachtet werden konnte, wurde zusätzlich eine gesättigte Lithiumchlorid-Lösung (Sättigungsfeuchte: 11,3 %



9 Darstellung der aufgenommenen Wassermenge eines bei den angegebenen relativen Luftfeuchtigkeiten befeuchteten und mit Natriumchlorid imprägnierten Steins (links). Rechts die bei der jeweils anschließenden Trocknung abgegebene Wassermenge.



10 Darstellung der aufgenommenen Wassermenge eines bei den angegebenen relativen Luftfeuchtigkeiten befeuchteten und mit Bischofite imprägnierten Steins (links). Rechts die bei der jeweils anschließenden Trocknung abgegebene Wassermenge.



11 Darstellung der aufgenommenen Wassermenge eines bei den angegebenen relativen Luftfeuchtigkeiten befeuchteten Steins, der mit einer für den Schwahl typischen Salzzusammensetzung imprägniert wurde (links). Rechts die bei der jeweils anschließenden Trocknung abgegebene Wassermenge.

RH bei 20 °C) verwendet, mit der am Kammereingang eine Feuchte von 7,6 % RH erreicht wurde. Eine hygroskopische Feuchtaufnahme wurde hier nicht beobachtet. Laut der Ergebnisse kommt es im Falle einer typischen Salzzusammensetzung aus dem Schwahl erst unterhalb von etwa 43,5 % RH zu Kristallisationsprozessen. Berechnungen mittels *ECOS-Runsalt* ergeben für die verwendete Mischung bei 20 °C eine gemeinsame Deliqueszenzfeuchte von 27 % RH und eine kritische Kristallisationsfeuchte von 48 % RH.

Auch im Rahmen der Laboruntersuchungen konnten mithilfe der Kammermethode zuverlässige und gut reproduzierbare Ergebnisse erhalten werden, so dass die Anwendung der Methode hinsichtlich der Untersuchung der hygroskopischen Wasseraufnahme erfolgreich erweitert werden konnte. Dadurch sind interessante Informationen über vorliegende Salze oder Salzmischungen in einer Probe beziehungsweise in einem Objekt zugänglich, die es ermöglichen können, erste Aussagen über geeignete klimatische Bedingungen zu treffen.

¹ Andreas Arnold und Konrad 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.: Sharon Cather), Los Angeles, 1996.

² Michael Steiger, Elena Charola, Katja Streflinger in: *Stone in Architecture* (Eds.: Siegfried Siegesmund and Rolf Sneath), Berlin/Heidelberg 2014.

³ Paolo Mora, Laura Mora and Paul Philippot (Eds.): *Butterworths series in conservation and museology*, Butterworths/London 1984.

⁴ Leonardo Borgioli und Paolo Cremonesi: *Le resine sintetiche usate nel trattamento di opere policrome*, Il prato, Saonara (Padova), Saonara (Padova) 2005.

⁵ Michael Steiger in: *Journal of Crystal Growth* 2005, 282, S. 455–469.

⁶ Clyde Hill in: *Journal of the Air Pollution Control Association* 1967, 17, S. 743–748.

⁷ Hans-Hermann Neumann, Michael Niermann und Michael Steiger: *Methodenentwicklung zur zerstörungsfreien Prüfung des Wassertransportes für die Planung und zum Bautenschutz in historischem Ziegelmauerwerk bei dem Einsatz von Innenraumdämmung. Abschlussbericht*, Deutsche Bundesstiftung Umwelt. DBU28751-45, Hamburg 2014.

⁸ Utz Wiese, Andreas Behlen und Michael Steiger in: *Environmental Earth Sciences*, 2013, 69, S. 1125–1134.

⁹ Andreas Behlen, Christian Wittenburg, Michael Steiger und Walter Dannecker in: *International Congress on Deterioration and Conservation of Stone - Proceedings* (Ed.: Josef Riederer), Berlin 1996.

¹⁰ Wiese/Behlen/Steiger 2013 (wie Anm. 8).

¹¹ Amelie Stahlbuhk, Michael Niermann und Michael Steiger in: *Proceedings of SWBSS 2017. Fourth International Conference on Salt Weathering of Buildings and Stone Sculptures*, University of Applied Sciences Potsdam, Germany, 20-22 September 2017 (Ed.: Steffen Laue), Potsdam 2017.

¹² Stahlbuhk/Niermann/Steiger 2017 (wie Anm. 11).

¹³ Hannah Grotian gen. Klages: *Untersuchung der Wasseraufnahme und Wasserabgabe von Mauerwerken am Beispiel des Schwahls im Schleswiger Dom*. Unveröffentlichte Bachelorarbeit, Universität Hamburg, Fachbereich Chemie, Hamburg 2017.

¹⁴ Vgl. den Beitrag „Salz und Klima“ im vorliegenden Band.

¹⁵ Andreas Behlen: *Reaktive Stickstoffverbindungen in der Atmosphäre – Konzentrationsbestimmung und trockene Deposition auf Natursteinen*. Dissertation, Universität Hamburg, Hamburg 1996.

Amelie Stahlbuhk und Julika Heller

Identifizierung und Bewertung der Schädigungswirkung der gelben Oberflächenverfärbung

Bereits die von 2006 bis 2015 vor Beginn des DBU-Projektes durchgeführten Untersuchungen zeigten neben den hohen Salzgehalten der Außenwände eine hohe Gipsanreicherung an Putz- und Wandmaleroberflächen. Aufgrund dieser Anreicherungen und der optischen Merkmale wurden die gelblichen Verfärbungen zunächst als Gipskrusten interpretiert. Probenentnahmen aus den gelblichen Verfärbungen verschiedener Joche bestätigten wiederholt eine erhöhte Gipskonzentration an der Putzoberfläche. Die Ergebnisse bestärkten stets die Annahme, es handle sich um eine Gipskrustenbildung, zumal in zusätzlichen mikrochemischen Analysen der vergilbten Oberfläche keine weiteren Fremdstoffe festgestellt werden konnten. Die Problematik war jedoch, dass sich die Verfärbungen bereits nach wenigen Tagen, spätestens aber nach mehreren Monaten nach Anwendung der Gipsumwandlungskompressen erneut bildeten. Im Rahmen des DBU-Projektes wurde eine beschleunigte Gipsanreicherung durch eine hohe Konzentration vorliegender hygroskopischer Salze in Betracht gezogen. Die Auswertung der Ionenprofile nach dem letzten Kompressenzyklus 2016 ergab einen hohen Erfolg bei der Salzreduzierung und nur noch geringe Salzkonzentrationen in den Außenwänden. Dies warf erneut die Frage auf, warum eine temporäre, vollständige Reduzierung der gelblichen Verfärbungen mit der Kompressenanwendung nach der *Florentiner Methode* erbracht werden konnte, jedoch nach wenigen Tagen bis Wochen eine Rückfärbung stattfand.

MAKROSKOPISCHE MERKMALE

Das Phänomen der gelblichen Verfärbung ist makroskopisch betrachtet durch seine verkrustet wirkende Oberfläche charakterisiert und befindet sich lokal begrenzt auf den oberen Putzschichten und auf der Malschichtoberfläche. Teilweise sind die verfärbten Bereiche nur in den vertikalen und horizontalen Fugenlinien festzustellen. Großflächige homogen verteilte Oberflächenverfärbungen liegen in Joch 5 und 6 vor. Die Oberfläche ist hier deutlich gelblich verfärbt, ohne jedoch die Lesbarkeit der roten Linien der Darstellungen zu beeinträchtigen (Abb. 1).

BEWERTUNG DER SCHÄDIGUNGSWIRKUNG VON GIPSANREICHERUNGEN UND ÜBERZUG

Gipskrusten sind den salzinduzierten Schäden zuzusprechen, konzentriert auf Baustoffoberflächen können sich diese durch eine Farbintensivierung des Untergrundes charakterisieren und beispielsweise aufgrund einer Anreicherung von Immissionspartikeln verfärben.² Neben der optischen Beeinträchtigung verursacht die Diffusionseinschränkende Verdichtung der Oberfläche auch konservatorische Probleme. Der verringerte Feuchteausgleich sowie der Kristallisationsdruck unter den verdichteten Oberflächen entfestigt das Putzgefüge und lässt im weiteren Schadensverlauf Putzbeulen entstehen. Die Oberfläche ist darüber hinaus weniger durchlässig für die Kompressenanwendung zur Salzreduzierung und Putzfestigung.

Ähnliche Oberflächenverdichtungen und somit Auswirkungen auf die Diffusionseigenschaften können Überzüge auf Putzoberflächen aufweisen. Ein hoher Anteil des Gipsgehaltes an den Putzoberflächen der Außenwände im Schwahl konnte bereits in den Maßnahmen von 2011 bis 2015 entfernt werden, die gelblichen Verfärbungen des Überzuges konnten hingegen nur leicht reduziert werden. In welchem Umfang und in welcher Intensität sich die Gipsanreicherungen und/oder der Überzug negativ auf den Bestand auswirken, steht in Wechselwirkung mit individuellen Schadenssituationen. Bereits makroskopisch betrachtet wirken die Wand-

1 Joch 5, Detail der gelblichen Verfärbung, Aufn. 2008.



oberflächen der Außenwände verdichtet und die Porenräume mit den krustenartigen Gelbfärbungen verschlossen. Ein verringerter Feuchteausaustausch ist wahrscheinlich. Hierfür spricht auch das entfestigte Putzgefüge, welches durch Kristallisationsdruck unter den verdichteten Oberflächen weiter zermürt und in seinem weiteren Schadensverlauf Putzbeulen verursacht. Für die Entsalzungs- und Putzfestigungsmaßnahmen bedeutet dies unter anderem, dass das Putzgefüge weniger durchlässig und die Anwendung der *Florentiner Methode* in ihrer Wirksamkeit eingeschränkt ist.

Für die Einschätzung des Schadenpotenzials durch Gipsanreicherung und Überzüge ist die fachgerechte Schadensdiagnostik grundlegend. Für eine weiterführende, möglichst minimalinvasive Bewertung des Schadenpotenzials wurde im Rahmen des DBU-Projektes das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten mit der Kammermethode untersucht. Mit dieser Methode konnte belegt werden, dass das intrinsische Wassersorptionsverhalten des Putzes und des dahinterliegenden Mauerwerks durch den Überzug verändert wird. Neben der Beeinträchtigung des ästhetischen Erscheinungsbildes der Wandgemälde durch die gelbliche Verfärbung, stellt der ermittelte Verschluss oberflächlicher Poren, bedingt durch Gipskrustenbildung oder durch Überzüge anderer Art, eine kritische Situation für die Wandgemälde dar, die Substanzverluste zur Folge haben kann.³

2 bis 4 Vergleich der Verfärbungen 1933 bis 2015 in Joch 5 (v.l.n.r.): 1933 leichte Verfärbung im Blattfries, 2008 deutliche Vergrößerung der Verfärbung, 2015 ähnliches Ausmaß wie 2008 und deutliche Verdichtung des Phänomens.

VERSUCH ZUR DATIERUNG DER GELBLICHEN VERFÄRBUNG

Infolge der Annahme, dass es sich um Substanzen einer Altrestaurierung handeln könne, wurden historische Fotoaufnahmen des Schwahls auf das Phänomen der Verfärbungen hin untersucht und miteinander verglichen. Das Auftreten des Phänomens konnte auf diese Weise zeitlich eingegrenzt und die in dieser Zeit verwendeten gängigen Festigungsmittel damaliger Restaurierungen konnten benannt werden.

Um die Entstehung des Phänomens der gelblichen Verfärbung genauer zu datieren, wurde eine Gegenüberstellung von Bildmaterial aus verschiedenen Jahren angefertigt. Auf Abbildungen von Joch 5 kann bereits 1933 eine deutliche Verfärbung festgestellt werden. Die betroffenen Bereiche wurden bis 2016 farbintensiver und verdreifachten sich etwa in ihren Ausmaßen (Abb. 2 bis 4). Auch Joch 2 zeigt auf einer Aufnahme von 1973 einen verfärbten Bereich in ca. 1-2 m Höhe. Dieser stimmt mit den heutigen Ausmaßen überein, die Verfärbung wurde bis 2016 nur geringfügig farbintensiver (Abb. 5 und 6).

Das Phänomen der oberflächlichen Gelbfärbungen lässt sich somit vor 1933 datieren. In Bezug auf mögliche Restaurierungsmittel der damaligen Zeit lassen sich Überzugmittel auf Polymerbasis eher ausschließen, diese fanden etwa ab den 1960er Jahren Anwendung.



NATURWISSENSCHAFTLICHE UNTERSUCHUNGEN ZUR IDENTIFIZIERUNG DER GELBLICHEN VERFÄRBUNG

Um die Zusammenhänge und die Ursachen für die Rückverfärbung nach Anwendung der Gipsumwandlungskompressen noch weiter zu ergründen, wurden erneut Proben in Joch 2 und Joch 5 aus einer vergilbten Oberfläche entnommen. Mittels der Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie (FTIR) konnte eine geringe Gipsanreicherung an der Probenoberfläche im Bereich der Kalkfarbe bestätigt werden. Auch konnte mikrochemisch Fe^{3+} (Eisenoxidhydrat) nachgewiesen werden.⁴ Zurückzuführen ist dies auf die Rotpigmente der Malerei oder auch auf Ziegelpartikel, welche an die Wandmaleroberfläche transportiert worden sind. Eine Beteiligung der sehr geringen Eisenhydratkonzentration an der intensiven Gelbfärbung der Putzoberfläche ist unwahrscheinlich. Denkbar wäre jedoch, dass ein in geringer Konzentration vorliegendes Festigungsmittel oder ein Überzug in Kombination mit der ober-

flächlichen Vergipsung zu der charakteristischen Gelbfärbung führt.

Mithilfe der am Objekt eingesetzten Kammermethode konnte bereits gezeigt werden, dass der Überzug zum Verschluss oberflächlicher Poren und somit zu einer Veränderung des intrinsischen Wassersorptionsverhaltens und einem damit einhergehenden Schadenspotential führt.

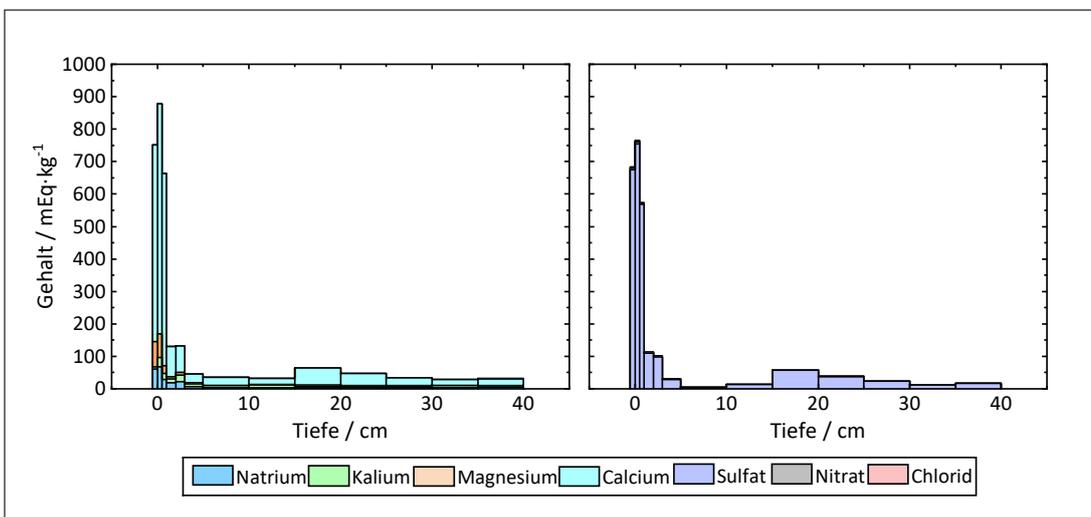
In Joch 5 wurden zu verschiedenen Zeitpunkten vor und während des Projekts Salzanalysen durchgeführt.⁵ Anders als in den übrigen Jochen, in denen die Salzverteilung mit erhöhten Anteilen hygroskopischer Chloride und Nitraten auch im Inneren des Mauerwerks als weitestgehend homogen angesehen werden kann, weichen die Salzgehalte in Joch 5 ab. Wie Abb. 7 entnommen werden kann, sind die Gesamtsalzgehalte, besonders aber die Gehalte an Chloriden und Nitraten, hier geringer, gleichzeitig ist die Gipsanreicherung im oberflächennahen Bereich



5 bis 6 Vergleich der Verfärbungen 1973 bis 2015 in Joch 2:

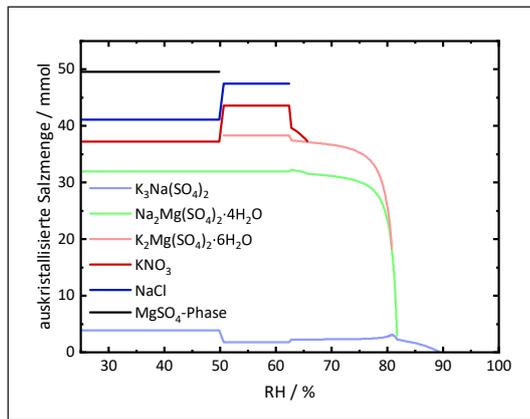
links Zustand 1973 (Restaurierung und Dokumentation durch B. Rendtorff),

rechts Zustand 2012 (vor der zweiten Kompressenanwendung).



7 Beispiel für ein Ionenprofil aus Joch 5, entnommen wurden die Bohrmehlproben im Juni 2016:

Anstelle der üblichen erhöhten Gehalte hygroskopischer Salze in den anderen Jochen sind die Gesamtsalzgehalte stark reduziert, Gipsanreicherungen liegen im oberflächennahen Bereich vor.



8 Kristallisationsabfolge, die für eine Probe aus Joch 5 (in 2,77 m Höhe, 5 mm Tiefe) mittels *ECOS-Runsalt* berechnet wurde. Dominiert werden die Gemische von weitaus weniger hygroskopischen Sulfat-Salzen, so dass erhöhte kritische Kristallisationsfeuchten resultieren.

teilweise stärker ausgeprägt als in anderen Jochen. Somit nimmt das Joch 5 eine gewisse Sonderrolle im Kreuzgang ein. Ferner wurde nur in diesem Joch anstelle von Bohrmehl von Ziegeln oder Mörtel ein weißes Hinterfüllmaterial geborgen. Aufgrund der abweichenden Salzzusammensetzung liegt in diesem Joch auch ein anderes Kristallisationsverhalten vor, welches mit dem Programm *ECOS-Runsalt* ermittelt wurde.⁶ Durch den erhöhten Sulfatgehalt in mehreren Proben aus Joch 5 verbleibt auch unter Berücksichtigung der Gipsbildung in den Gemischen noch ein Überschuss an Sulfat, so dass weitere Sulfat-Salze auskristallisieren können (Abb. 8). Da die meisten Sulfate weniger hygroskopisch sind als die entsprechenden Chloride und Nitrate, sind die kritischen Kristallisationsfeuchten einiger Proben in Joch 5 deutlich

höher als in den meisten Proben aus anderen Jochen. Zu den möglichen Phasen gehören beispielsweise $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ (Blödit), $\text{K}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ (Pikromerit) oder $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$ (Aphthitalit). Auch wenn bei einigen Proben aus Joch 5 hinsichtlich der gebildeten kristallinen Phasen mehr Ähnlichkeiten zu Proben aus anderen Jochen vorliegen, ist dennoch der Gehalt hygroskopischer Salze in Joch 5 deutlich geringer, so dass auch in diesen Fällen höhere kritische Kristallisationsfeuchten resultieren.

Der zu Beginn des Projekts in Erwägung gezogene Einfluss hoher Gehalte hygroskopischer Salze im Inneren des Mauerwerks auf eine erhöhte Gipsmobilisierung und schnelle Neubildung der Vergilbung konnte somit bereits durch Betrachtung dieser Ergebnisse ausgeschlossen werden. Wichtige Impulse für die weitere Untersuchung der Frage nach dem Ursprung des Überzugs erbrachte ein Aufenthalt am *Opificio delle Pietre Dure* im Rahmen des ARCHLAB Programms (*IPERION CH*) in Florenz.⁷

Putzproben aus dem Schwahl wurden mittels stratigraphischer Analysen mit optischer Mikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie mit energiedispersiver Röntgenspektroskopie (REM-EDX) untersucht. Die vorherige Probenahme erfolgte in Bereichen ohne Pigmentierung. Untersucht wurden drei Proben, eine ohne gelbliche Verkrustungen aus Joch 2 und zwei aus Bereichen mit sichtbarer Vergilbung aus Joch 5 (Abb. 9). Bei den beiden untersuchten Fragmenten aus Joch 2 zeigte sich in den mikroskopischen Aufnahmen und in den Untersuchungen mittels REM-EDX zunächst

9 Positionen der Entnahme von Proben, die mittels optischer Mikroskopie und REM-EDX am *Opificio delle Pietre Dure* untersucht wurden: links aus Joch 2 ohne gelbliche Verkrustungen und rechts aus Joch 5 mit deutlich erkennbaren gelblichen Verkrustungen.

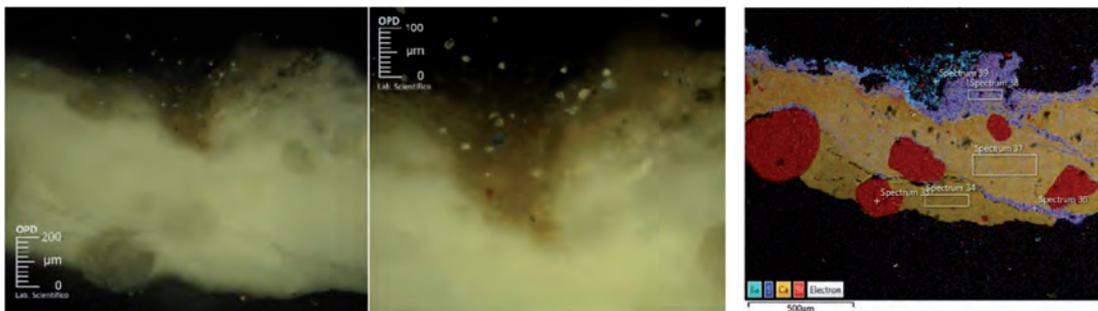


das Vorliegen des *Intonaco* auf Basis von ursprünglich Calciumhydroxid (heute in Calciumcarbonat umgewandelt) und Quarz. Während das erste Fragment im oberflächennahen Bereich eine leichte Gipsanreicherung sowie eine dünne Schicht Bariumsulfat als Folge der Maßnahmen der Gipsumwandlung aufwies,⁸ zeigte das zweite Fragment zwei Putzschichten, die durch eine leicht pigmentierte Schicht mit rötlichen und schwarzen Pigmenten getrennt wurden. Interessanterweise wies die untere dieser Schichten eine Gipsan-

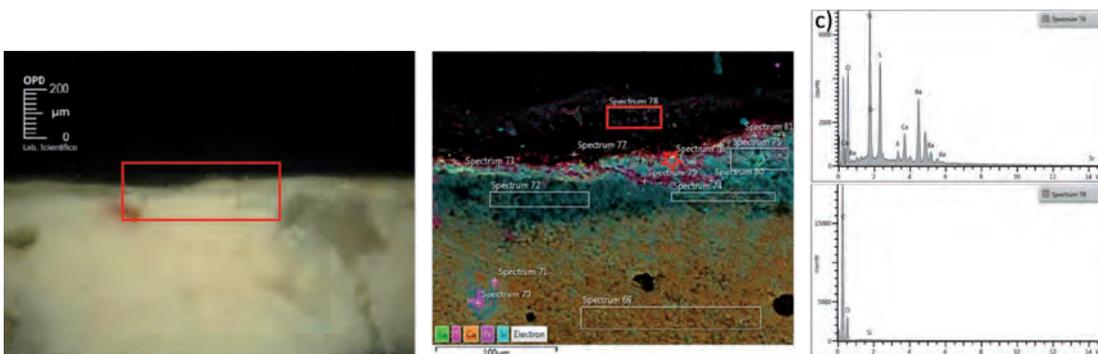
reicherung in ihrem oberflächennahen Bereich auf, nicht aber die obere (Abb. 10). Dort konnte ebenfalls Bariumsulfat aus den restauratorischen Maßnahmen nachgewiesen werden. Somit lag in diesem Bereich eine Übertünchung auf einem bereits vergipsten Bereich vor. Folglich konnten auch in diesen Proben ohne gelbliche Verfärbungen Gipsanreicherungen beobachtet werden. Die erste Probe aus Joch 5 (Abb. 11) wies im Bereich einer Kerbe an der Oberfläche eindeutige gelbliche Verfärbungen auf, wie es die mikroskopischen



10 a) Mikroskopische Aufnahme eines Fragments aus Joch 2 (links: 10-fache und rechts: 20-fache Vergrößerung des im linken Bild rot umrandeten Bereichs); b) Elementmapping aus REM-EDX-Untersuchungen mit Gipsanreicherungen (rot eingefärbt) zwischen zwei Putzschichten.⁹



11 a) Mikroskopische Aufnahmen eines Fragments aus Joch 5 (10- und 20-fache Vergrößerung), mit deutlich erkennbarer gelblicher Verkrustung an der Oberfläche; b) Elementmapping aus REM-EDX-Untersuchungen des Fragments, Gipsanreicherungen (violett eingefärbt) nahe der Oberfläche und in Rissen des Fragments, eine bariumhaltige Verbindung (u.a. Bariumsulfat) im Bereich der Vergilbung und eine Lücke in der Elementverteilung im oberen rechten Bildbereich.¹⁰



12 a) Mikroskopische Aufnahme eines Fragments aus Joch 5 (10-fache Vergrößerung); b) Elementmapping aus REM-EDX-Untersuchungen in dem in a) rot umrandeten Bereich, Gipsanreicherungen (violett eingefärbt) und bariumhaltige Verbindungen (u.a. Bariumsulfat) sind im zunächst als Oberfläche erscheinenden Bereich erkennbar; c) Oben: Röntgenspektrum der in b) mit dem Stern markierten Position, in der Gips und eine bariumhaltige Verbindung vorliegen; unten: Röntgenspektrum des in b) rot umrandeten Bereichs, welches die Existenz einer organischen Verbindung auf der Oberfläche belegt.¹¹

Aufnahmen zeigen. Außerdem konnten im *Intonaco* sowohl unter dem Mikroskop als auch in den REM-Aufnahmen Risse beobachtet werden. Bei Betrachtung der Elementverteilung zeigte sich zudem das Vorliegen von Gips (violett eingefärbt) nahe der Oberfläche aber auch in den Rissen, so dass es sich bereits in eine gewisse Tiefe ausgebreitet hatte. In der Kerbe hingegen lag eindeutig kein Gips vor. Nachweisbar waren in diesem Bereich jedoch bariumhaltige Verbindungen und Partikel aus der Atmosphäre. Es konnte anhand dieser Probe eindeutig ausgeschlossen werden, dass Gips an den beobachteten Vergilbungen beteiligt ist. In einigen oberflächennahen Bereichen des Fragments zeigte sich unter dem optischen Mikroskop eindeutig Probensubstanz (rechter Teil der Oberfläche in Abb. 11), nicht aber in den zugehörigen REM-Aufnahmen. Auch bei der zweiten Probe aus Joch 5 (Abb. 12), in der Gips und Bariumsulfat auf den ersten Blick unmittelbar an der Oberfläche gemeinsam vorliegen, konnte bei genauerer Betrachtung eine weitere nur schemenhaft erkennbare oberflächliche Schicht ermittelt werden. Bei dieser Probe war es ferner möglich, ein Spektrum in diesem Bereich aufzunehmen, wobei ein organisches Material nachgewiesen wurde. Eine schwächere Erkennbarkeit in REM-EDX-Untersuchungen ist damit ebenfalls konform, da die im organischen Material vorwiegend auftretenden Elemente Wasserstoff, Sauerstoff und Kohlenstoff durch ihr geringes Atomgewicht zu einer schwächeren Rückstreuung von Elektronen und somit zu dunkleren Bereichen in REM-Aufnahmen führen.

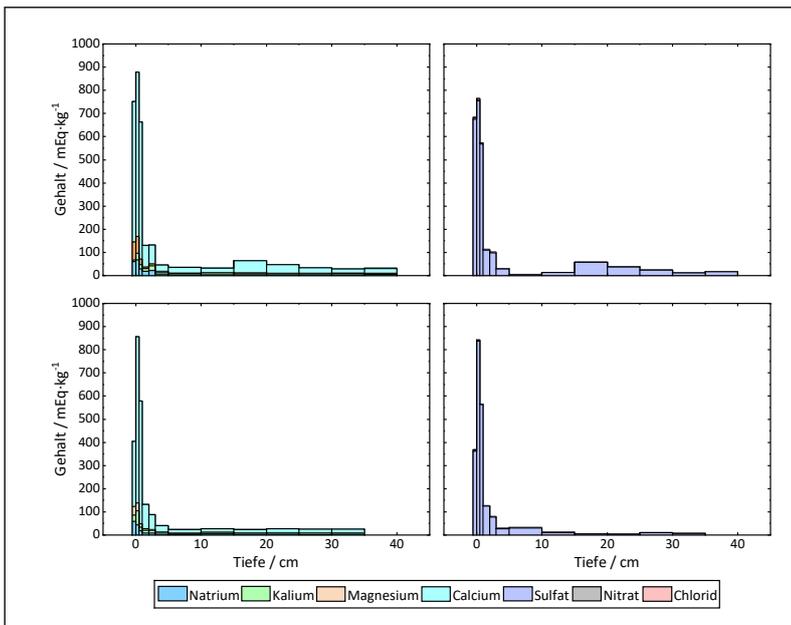
Somit belegen die Ergebnisse, die am *Opificio delle Pietre Dure* erarbeitet wurden, dass Gipsanreicherungen nicht die Ursache der Vergilbungen sind.¹² Vielmehr konnte bestätigt werden, dass organische Materialien oder deren Alterungsprodukte zu den unregelmäßig verteilten Vergilbungen auf den Oberflächen der Wandmalereien führen.

Das Vorliegen der Gipsschicht unterhalb einer Schicht organischen Materials sowie einer bariumhaltigen Verbindung oberhalb der Vergipsungen sind Anzeichen dafür, dass die durchgeführten restauratorischen Maßnahmen zur Gipsreduzierung nicht den gewünschten Erfolg brachten. Es ist möglich, dass die mit Kompressen aufgetragenen Ammoniumcarbonat- und Bariumhydroxid-Lösungen die im Laufe der Zeit gealterten und verkrusteten Schichten des organischen Materials nicht durchdringen konnten. Der Auftrag von Ammoniumcarbonat-Kompressen könnte zwar zu einer temporären Aufweichung des organischen Materials und damit zur ebenfalls temporären Verringerung der Vergilbung geführt haben.

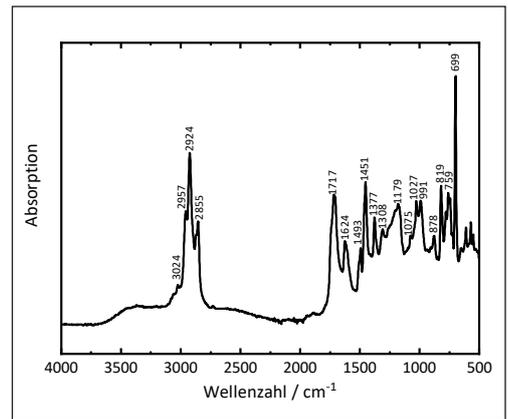
Eine Abtragung des Materials erfolgte im Zuge der Eingriffe jedoch nicht, so dass es nach der Trocknung erneut verhärtet und vergilbt. Dafür sprechen wohl auch die Ergebnisse der Bohrmehluntersuchungen, die vor und nach der Anwendung der Ammoniumcarbonat-Kompressen zusammen mit den Restauratoren entnommen wurden (Abb. 13). Auch nach der Kompressenbehandlung haben sich die Salzgehalte in der Tiefe zwischen 0 und 15 cm nicht verändert, während der Gipsgehalt direkt an der Oberfläche reduziert werden konnte.

Auch das Ergebnis einer Literaturrecherche mit Fokus auf Wandgemälde, die gelbliche Verkrustungen oder Gipsanreicherungen aufweisen, legt die Vermutung nahe, dass es sich bei den gelblichen Krusten auf den Wandgemälden im Schwahl nicht um Gipsanreicherungen handelt. Eine gelbliche Patina, teilweise mit unregelmäßiger Verteilung, wurde in mehreren Artikeln beschrieben und ihr Ursprung auf organische Materialien und deren Alterungsprodukte zurückgeführt. Als Quellen der organischen Materialien werden Luftverschmutzung, Verunreinigungen im verwendeten Putz und restauratorische Eingriffe mit Harzen und anderen Fixativen genannt.¹³

Mit der Information, dass ein organisches Material und nicht Gips die Ursache für die Vergilbungen ist, konnten im Anschluss weitere Untersuchungen eingeleitet werden, um dieses Material genauer zu bestimmen. Seine Identifikation ist aus konservatorischer Sicht für eine erfolgreiche Entfernung des Überzugs durch restauratorische Maßnahmen zielführend. Zu diesem Zweck wurde eine weitere Putzprobe aus einem Bereich mit sichtbaren Vergilbungen aus Joch 5 bei Raumtemperatur mit Xylol extrahiert. Das Lösungsmittel wurde ausgewählt, da sich darin viele unpolare Substanzen lösen. Nach Entfernung des Lösungsmittels wurde die verbleibende gelbliche, ölige Substanz mittels Infrarot-Spektroskopie (IR) untersucht, das zugehörige Spektrum ist in Abb. 14 dargestellt. Durch einen Vergleich mit Spektren von gängigen Festigungs- und Überzugsmitteln für Wandgemälde konnten in weiten Bereichen der Wellenzahlen Übereinstimmungen mit Spektren¹⁴ von Harzen, besonders aber mit dem von Schellack beobachtet werden.¹⁵ Dabei sollte beachtet werden, dass noch weitere Bestandteile in der Probe vorgelegen und so zu den Signalen im IR-Spektrum beigetragen haben könnten, jedoch nicht weiter identifiziert wurden. Außerdem können sich Spektren von Schellack unterscheiden, da das Harz aus einer Kombination verschiedener Polymere besteht. Während leichte



13 Ionenprofile aus Joch 5, die vor (oben) und nach (unten) einer Kompressenbehandlung mit Ammoniumcarbonat-Lösung entnommen wurden. Links: Kationen, rechts: Anionen. Die Salzgehalte zwischen 0 und 15 cm haben sich trotz der Kompressenbehandlungen nicht verändert, Gipsgehalte auf der Oberfläche wurden hingegen reduziert.



14 IR-Spektrum des Extrakts aus einem Fragment mit gelblicher Verkrustung aus Joch 5. Einige Banden sind mit ihrer Wellenzahl angegeben.

Abweichungen in den Intensitäten beim Vergleich verschiedener Lacke beobachtet werden können, kann auch die Alterung des Schellacks zu Veränderungen im Spektrum führen.¹⁶ In Bezug auf Schellack ist sowohl bekannt, dass es vermehrt auf Wandgemälden eingesetzt wurde als auch, dass es sich mit seiner Alterung gelblich bis bräunlich

verfärbt. Nach einer massiven Alterung des Harzes wird seine Entfernung immer schwieriger.¹⁷

Schlussendlich konnte das Material des gelblichen Überzugs erfolgreich identifiziert werden, so dass eine neue Grundlage für die Erstellung eines individuellen Reinigungskonzeptes vorgelegt werden konnte.

¹ Kombinierte Anwendung von Ammoniumcarbonat zur Gipsumwandlung und Bariumhydroxid zur Putzfestigung. Vgl. den Beitrag „Evaluation baulicher und Veränderungen und konservatorischer Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.
² Hans-Jürgen Schwarz und Michael Steiger: Salzsäuren an Kulturgütern, Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Hannover 2008, S. 14.
³ Vgl. den Beitrag „Verwendung der Kammermethode zur Untersuchung des Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhaltens poröser Materialien“ im vorliegenden Band.
⁴ Jürgen Osswald: Analysebericht vom 29.05.2016, Labor für Bauschadensdiagnostik und Sachverständigenbüro, Kaufbeuren 2016.
⁵ Vgl. den Beitrag „Salz und Klima“ im vorliegenden Band.
⁶ Wie Anm. 5.
⁷ Forschungsaufenthalt von Amelie Stahlbuhk im Oktober 2016. Die finanzielle Unterstützung durch *Transnational Access to Research Infrastructures Activity im Horizon 2020 Programm* der EU (IPERI-ON CH Grant Agreement n. 654028) wird dankbar anerkannt. Weiterhin bedankt sich die Autorin herzlich für die Betreuung und die fachliche Unterstützung während ihres Aufenthalts am *Opificio delle Pietre Dure*.
⁸ Vgl. den Beitrag „Rückblick auf die konservatorischen Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.
⁹ Carlo Lalli und Federica Innocenti: Unpublished Report, Opificio delle Pietre Dure, Firenze 2016.
¹⁰ Wie Anm. 9.
¹¹ Wie Anm. 9.
¹² Wie Anm. 9.
¹³ F. Bandini, C. Danti, M. R. Lanfranchi, M. Matteini, M. Rizzi, P. Ruschi und U. Senerini, OPD Restauro 2001, S. 60–89; Rodorigo Giorgi, Luigi Dei, Piero Baglioni, Studies in Conservation 2000, 154–161; Fabrizio Bandini, Cristina Danti, Paola Ilaria Mariotti, OPD Restauro 2005, 139–151; Giulia Bucci, Carlo Lalli, Mariarosa Lanfranchi, OPD Restauro 2006, 201–210; Mariarosa Lanfranchi, Alberto Felici, OPD Restauro 2005, 179–190; F. Bandini, Paola Ilaria Mariotti, OPD Restauro 2004, 178–188; Mariarosa Lanfranchi, Enrica Neri Lusanna, OPD Restauro 2002, 99–107; Cecilia Forsinini, Mariarosa Lanfranchi, Annamaria Bernacchioni, OPD Restauro 2004, 31–51; Mariarosa Lanfranchi, Giancarlo Lanterna, Anna Medori, OPD Restauro 2013, 167–188; Fabrizio Bandini, Giancarlo Lanterna, Anna Mazzinghi, Chiara Ruberto, Caroline Czelusniak, Lara Palla, Roberto Olmi, Cristiano Riminesi, OPD Restauro 2014, 15–34; Alfredo Aldrovandi, Fabrizio Bandini, Diego Cauzzi, Paola Ilaria Mariotti, Alessandro Migliori, OPD Restauro 2007, 107–126.
¹⁴ Beth A. Price, Boris Pretzel (Eds.) Infrared and Raman Users Group Spectral Database 2007 ed. (www.irug.org), IRUG, Philadelphia, 2007.
¹⁵ Céline Daher, Céline Paris, Anne-Solenn Le Hô, Ludovic Bellot-Gurlet, Jean-Philippe Échard, Journal of Raman Spectroscopy 2010, 41, 1494–1499; Michele Derrick, Journal of the American Institute for Conservation, 1989, 28, 43; Michele Derrick, Dusan Stulik, James M. Landry, Infrared spectroscopy in conservation science, Getty Conservation Institute, Los Angeles, 1999.
¹⁶ Daher et al. 2010 (wie Anm. 15).
¹⁷ Mauro Matteini, Arcangelo Moles, La chimica nel restauro. I materiali nell'arte pittorica, Nardini, Firenze, 2010.

Julika Heller und Amelie Stahlbuhk
Erarbeitung eines Konzeptes
zur Reduzierung gealterter Fixiermittel
auf Putz- und Maleroberflächen

Die Entfernung gealterter Überzüge, welche sich ungünstig auf den Putz- und Malereibestand auswirken, stellt in der Denkmalpflege ein altbekanntes Thema dar. Zahlreiche Schäden an Kunst- und Kulturgütern gehen auf die Verwendung ungeeigneter Festigungsmittel, insbesondere in Form von Überzügen, zurück. Oberflächlich angewandt können sie aufgrund von Alterungserscheinungen (chemisch, physikalisch) farbliche Veränderungen aufweisen, durch eine veränderte Oberflächenspannung Schäden am Objekt verursachen oder sich anderweitig nachteilig auf das Objekt auswirken, beispielweise durch die Beeinträchtigung der Diffusionseigenschaften.

Erst mit einer eindeutigen Identifizierung des verwendeten Festigungsmittels kann eine konkrete Konzeption für dessen Abnahme ausgearbeitet werden. Die makroskopische Betrachtung des Bestandes und die genaue Erfassung der vorherrschenden Schadensmechanismen bilden die Basis des weiteren Vorgehens.

Die Ausdünnung des aufliegenden Materials kann auf verschiedene Weise erfolgen, etwa durch die chemische Spaltung organischer Verbindungen. Es kann – in Abhängigkeit einer explizit auf die Situation angepassten Auftragsdauer – abgenommen oder reduziert werden. Die Eignung des im Labor erprobten oder in der Theorie ausgearbeiteten Konzepts wird zunächst an Testflächen unter Laborbedingungen durchgeführt und muss am Objekt gegebenenfalls optimiert werden.

Grundlegend für die Ermittlung der Wirksamkeit einer Überzugsentfernung ist die Auswahl geeigneter Testflächen. Diese sollen einen möglichst minimalinvasiven Eingriff in den Bestand darstellen, dennoch maximal wirksam sein und reproduzierbare Ergebnisse liefern. Die Reduzierung eines Festigungsmittels wird häufig durch eine Kombination mechanischer und chemischer Vorgehensweisen erreicht.

ERARBEITUNG EINES VERFAHRENS ZUR ÜBERZUGSREDUZIERUNG

Bis 2017 wurde das Phänomen der oberflächlichen Gelbfärbung auf eine Farbvertiefung mit der nachgewiesenen Gipsanreicherung an der Putzoberfläche in Verbindung gebracht. Die Untersuchung einer Probe aus einer gelblichen Verfärbung in Joch 5 im Rasterelektronenmikroskop (REM) zeigte jedoch das Vorhandensein einer organischen Substanz auf. Die Erstellung eines Extrakts der Probe mittels Toulol ergab durch die Analyse mittels FTIR-Spektroskopie, dass es sich bei dem organischen Material um Schellack handelt. Darüber hinaus konnte die hierdurch eingeschränkte Diffusionseigenschaft des Putzes festgestellt werden, welche die Wirksamkeit sowohl der Salzreduzierungsmaßnahmen als auch der Gypsumwandlung einschränkt.¹

Die Löslichkeit von Schellack ist grundsätzlich durch Aceton² gegeben, erste Löslichkeitsversuche mittels Wattestäbchen zeigten jedoch keine Reinigungserfolge am Objekt. Auch weitere Lösemittelanwendungen mit Wattestäbchen gaben keinen Hinweis auf mögliche Löslichkeitsparameter. Zurückzuführen war dies wohl auf die veränderten Eigenschaften des Schellacks durch die Materialalterung. Das spröde und starre Material konnte durch das Aceton nicht angelöst werden. Auch das Vorhandensein weiterer Festigungsmittel konnte nicht ausgeschlossen werden. Zusätzliche Lösemittelversuche mit einer längeren Auftragsdauer und Lösemittelvariationen wurden angedacht. Neben Lösemitteln mit Schellack lösenden Eigenschaften wurden weitere Lösemittel ausgewählt, welche ein möglichst breites Spektrum an gängigen Festigungsmitteln (Polymerverbindungen, Fette, Öle und proteinhaltigen Verbindungen) lösen.

Ein wichtiger Hinweis aus den vergangenen Maßnahmen war, dass das bei der Gypsumwandlung eingesetzte Ammoniumcarbonat eine temporäre Reduzierung des Überzugs bewirkte. Aufgrund dieser Beobachtungen wurden Testfelder mit Ammoniumcarbonatkompressen unterschiedlicher Einwirkzeit und in Kombination mit anderen

Lösemitteln angelegt. Die Überlegung war, dass das Ammoniumcarbonat den Überzug damals zwar anquellen ließ, dieser jedoch auf der Oberfläche verblieb, sich erneut verfestigt und vergilbte. Das Aufbrechen der chemischen Verbindungen des Überzuges und das anschließende mechanische Abreinigen (Abtransport des gelösten Materials) der Putzoberfläche mit einem geeigneten Lösemittel und Wattestäbchen sollte demnach den Überzug von der Wandoberfläche lösen und entfernen. Darüber hinaus waren auch Lösemittelkompressen ohne Verwendung von Ammoniumcarbonat zur Aufbringung vorgesehen (Abb. 1).

Zu Beginn der praktischen Anwendung wurden die Anforderungen an eine geeignete Testfläche wie folgt definiert:

- homogene Intensität der Verfärbung
- zusammenhängende, ausreichend große Fläche
- möglichst ebene Putzoberfläche
- möglichst geringer bis kein Malschichtbestand
- Möglichkeit des direkten Vergleichs zu einer unbehandelten Fläche in unmittelbarer Umgebung
- Salzverteilung (Bohrmehlentnahme Tiefenprofil) und Schädigungsmechanismen im Joch müssen bekannt sein
- historische Aufnahmen des vergilbten Bereiches sollten vorliegen.

TESTFELD (AUFTRAGSDAUER)	LÖSEMITTEL	ANWENDUNG	STOFF- KLASSE	FORMEL	LÖSEVERMÖGEN
1 (2 Std.) 2 (4 Std.)	Ammoniumcarbonat (AC)	N Komresse + AC Komresse + N Komresse + Nachreinigung	Lauge	NH_4OH	protein-, öhlhaltige Substanzen, alte Harzfirnisse (z. B. Schellack)
3 (2 Std.) 4 (4 Std.)	Ethylacetat (EA)	N Komresse + EA Komresse + N Komresse + Nachreinigung	Ester	$\text{CH}_3\text{-COOC}_2\text{H}_5$	Natur und Kunstharze: Mastix, Sandarak, PVAC, Cellulosenitrat, Cellulose- acetat, Ethylcellulose, Styrol/Butadiencopolymer, Polymetaacrylat (z. B. Schellack), Öle, Fette und Weichmacher, PVC
5a (2 Std.)	Ammoniumcarbonat (AC) + Aceton (ACT)	N Komresse + AC Komresse + ACT Komresse + ACT Nachreinigung	Lauge/Keton	siehe AC, ACT	siehe AC, ACT
5b (2 Std.)	Ammoniumcarbonat (AC) + Ethylacetat (EA)	N Komresse + AC Komresse + EA Komresse + EA Nachreinigung	Lauge/Ester	siehe AC, EA	siehe AC, EA
6 (4 Std.)	Isopropanol (80 %ig) (IP)	N Komresse + IP Komresse + N Komresse + Nachreinigung	Alkohol	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{CH}_2\text{OH}$	Fette und Öle, polare Harze
7 (2 Std.) 8 (4 Std.)	Aceton (ACT)	N Komresse + ACT Komresse + N Komresse + Nachreinigung	Keton	CH_3COCH_3	sehr gut Öle, Fette, wenige Harze und Kunststoffe (z. B. Leinöl, Cellulosenitrat, Ethylcellulose, PVAC)

1 Übersicht der für die Testflächen ausgewählten Lösemittel und Lösemittelkombinationen mit Beschreibung der Anwendung und Auftragsdauer. N=Neutralisationskomresse, Nachreinigung bezeichnet das Nachreinigen mit dem jeweiligen Lösemittel und Wattestäbchen.

Testflächen müssen repräsentativ und die Anwendung für die spätere Konzeptumsetzung wiederholbar sein. Die großflächige Verfärbung in Joch 5 erfüllte die erforderlichen Parameter, außerdem wurde hier der Schellacküberzug nachgewiesen.

Am rechten Rand von Joch 5 wurde die Testfläche in insgesamt 9 Testfelder unterteilt (Abb. 2). Bei der Art der Kompressen wurde auf die bereits bewährten Zellstoffkompressen der Salzreduzierungsmaßnahmen zurückgegriffen.³ Die Testfelder bemessen sich im Einzelnen auf 15 x 20 cm. Durch die teilweise inhomogene Verteilung der Verfärbung und die benötigten Mindestgrößen zum optimalen Halt der Kompressen auf der Putzoberfläche war eine gewisse Größe der Kompressen notwendig, unter anderem um die erforderliche Sensorik der Messinstrumente der Kammermethode und der Ultraschall-Oberflächenmessung zur Maßnahmenkontrolle an den Testfeldern aufzulegen.

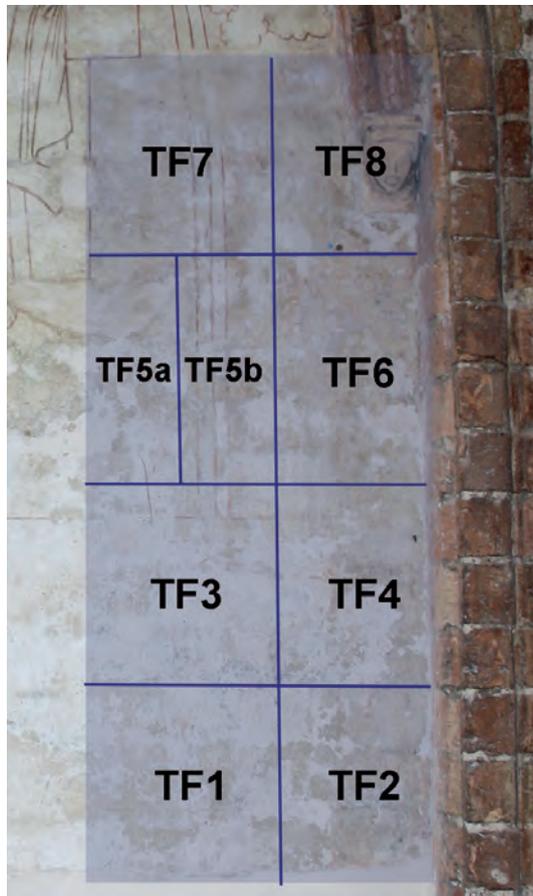
Insgesamt wurden vier verschiedene Lösemittel (Ammoniumcarbonat, Ethylacetat, Isopropanol, Aceton) mit einer jeweils zwei- und vierstündigen Auftragsdauer angewendet (TF 1-4, 6-8). Anschlie-

ßend wurde das Testfeld mit dem jeweiligen Lösemittel und Wattestäbchen abgereinigt. TF 5 wurde zusätzlich in zwei Testfelder TF 5a und TF 5b unterteilt und mit einer Lösemittelkombination (Ammoniumcarbonat + Ethylacetat und Ammoniumcarbonat + Aceton) und einer Auftragsdauer von jeweils zwei Stunden behandelt. Alle Testfelder wurden vor der Lösemittelanwendung mit einer Reinigungskompressen behandelt, um Verschmutzungen und oberflächliche Salzanreicherungen zu reduzieren. Nach der Lösemittelanwendung wurde eine Neutralisationskompressen angebracht, um gegebenenfalls verbleibende Reaktionsprodukte zu reduzieren.

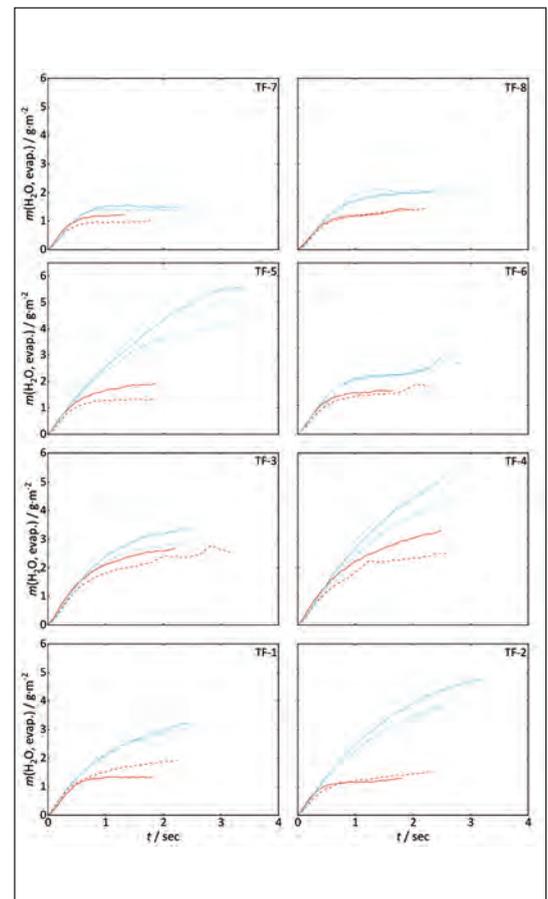
EVALUIERUNG DER TESTFELDER - METHODIK UND ERGEBNISSE

Die Auswertung der einzelnen Lösemittelanwendungen erfolgte durch makroskopische Betrachtung, die Anwendung der Kammermethode, der Ultraschall-Oberflächenmessungen und der Thermografiemessungen. Die Testfelder wurden jeweils vor und nach der Anwendung mit allen vier Evaluationsverfahren bewertet. Neben der Auswertung der Testfelder sollte auch die Anwendbarkeit der verschiedenen Evaluationsmethoden ausgewertet werden.⁴

2 Einteilung der Testfelder in Joch 5, 2017.



3 Vergleich des Wasserabgabeverhaltens der auf unterschiedliche Weisen gereinigten Testflächen. Rote Kurven zeigen den Zustand vor der Reinigung, blaue jenen danach. Gezeigt sind jeweils Doppelbestimmungen, gekennzeichnet durch durchgezogene bzw. gestrichelte Kurven der gleichen Farbe.



Die makroskopische Betrachtung ergab, dass zunächst eine deutliche Aufhellung der Flächen mittels Ammoniumcarbonat stattfand. Die Flächen verfärbten sich jedoch wie gewohnt nach mehreren Wochen zurück. Auch die Anwendung der Kompressen mit einer deutlich höheren Einwirkzeit von 6 Stunden (TF 2) zeigte das gleiche Ergebnis. Dies erhärtete die These, dass Ammoniumcarbonat den Überzug lediglich anquellen lässt, er jedoch auf der Wand verbleibt. Langfristig zeigte die Anwendung in TF 5b – eine Kombination von Ammoniumcarbonat, Ethylacetat und Wattestäbchenreinigung – die besten Ergebnisse. Bis auf leichte, helle Verfärbungen in den Fugen war makroskopisch kein vergilbter Überzug mehr zu erkennen. Eine Rückverfärbung über mehrere Monate konnte ebensowenig festgestellt werden. Die Anwendung der Kammermethode, die Ultraschall-Oberflächenuntersuchung und die Thermografie bestätigten die visuellen Beobachtungen.

AUSWERTUNG DER TESTFELDER MIT DER KAMMERMETHODE

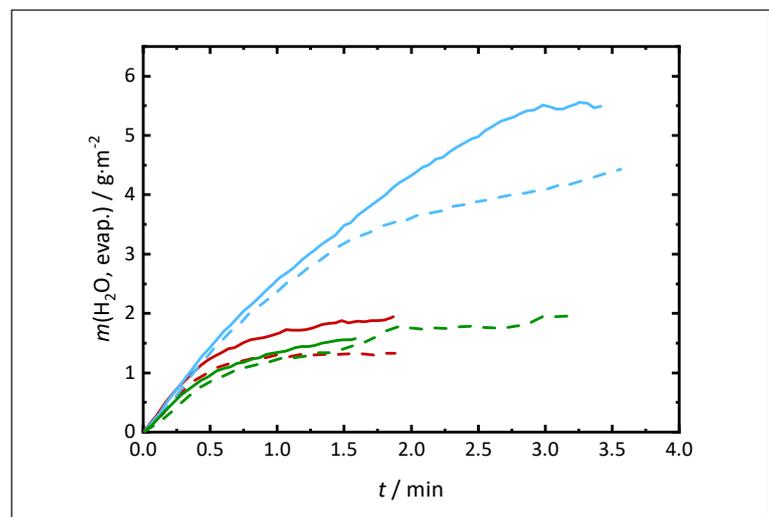
Begleitend zu den Reinigungsversuchen in den Testfeldern in Joch 5 wurde die Wasserabgabe mithilfe der Kammermethode untersucht, um neben einer rein visuellen Bewertung den Fortschritt der Maßnahme auch messtechnisch zu evaluieren und zu verfolgen. In den im rechten Bereich des Jochs angelegten Testfeldern wurden Doppelbestimmungen mit der Kammermethode vor und nach Kompressenreinigungen mit verschiedenen Lösemitteln und Auftragungsdauern durchgeführt. Der Vergleich des mit der Kammermethode gemessenen zeitlichen Verlaufs der Wasserabgabe während der Trocknung ist in Abb. 3 zusammengefasst. Rot sind die Kurven vor der Behandlung, blau jene danach. Vor der Restaurierungskampagne waren die abgegebenen Wassermengen in allen Testfeldern ähnlich, auch wenn in Bereichen mit geringerer Ausprägung der Verkrustungen (wie TF 3) leicht erhöhte Wasserabgaben beobachtet werden konnten. Alle nach der Reinigung aufgenommenen Messkurven liegen oberhalb der Kurven, die den Zustand vor der Reinigung zeigen, wenn auch teilweise nur geringfügig (wie TF 7).

Eindeutig erkennbar sind jedoch die im Vergleich zu den anderen Testfeldern deutlich erhöhten Wasserabgaben nach der Behandlung im Falle von TF 2 und TF 5. Das beste Ergebnis zeigte sich für TF 5, welches mit Ammoniumcarbonat-Kompressen und anschließender Nachreinigung mit Aceton beziehungsweise Ethylacetat behandelt wurde. Aufgrund der Abmessungen der Testfelder

und der Kammer war es nicht möglich die beiden Hälften, von denen eine mit Aceton und die andere mit Ethylacetat nachbehandelt wurde, zu unterscheiden. Es kann davon ausgegangen werden, dass hier eine effektivere Reinigung zum Anstieg der Wasserabgabe geführt hat. Die Behandlungen mit Aceton und Isopropanol in den Flächen TF 6 bis TF 8 führten zu der geringsten Verbesserung, so dass die Wirksamkeit dieser Lösemittel unter den gewählten Bedingungen für die Entfernung der Vergilbungen als sehr gering bewertet werden kann. Werden die vor der Reinigung weniger betroffenen Flächen TF 3 und TF 4 betrachtet, ist der Reinigungserfolg gemessen am Anstieg der Wasserabgabe nach der Reinigung verhältnismäßig gering.

Nach der vollständigen Reinigung des Jochs 5 mit der ausgewählten Reinigungsmethode (TF 5, Ammoniumcarbonat-Kompressen und anschließende Nachreinigung mit Aceton beziehungsweise Ethylacetat) wurden erneut Kammermessungen im Testfeld 5 durchgeführt, bei dem der Reinigungserfolg zuvor als am größten ermittelt wurde. Das in Abb. 4 gezeigte Ergebnis deutet auf eine erneut reduzierte Wasserabgabe nach der Reinigung des gesamten Jochs hin, so dass die abgegebene Wassermenge im Bereich jener vor der ersten Reinigung in den Testfeldern lag. Auch wenn dies zunächst verwunderlich erscheint, gibt es mehrere mögliche Ursachen für diese Beobachtung. Eine große Rolle spielt wahrscheinlich die Tatsache, dass der Zeitraum zwischen Kompressenauftragung und Kammermessung unterschiedlich lang war. Nach der Reinigung der Testfelder verging nur eine Woche, nach der Reinigung der gesamten Fläche im Joch 5 verstrichen hingegen zweieinhalb Wochen, so dass der Feuchtegehalt

4 Ergebnisse der Kammermessungen in TF 5. Verglichen werden die Messungen vor und nach der Testflächenreinigung (rot und blau) sowie nach der vollständigen Reinigung von Joch 5 (grün).



dementsprechend geringer war und weniger Wasser im Zuge der Trocknung abgegeben werden konnte. Auch ein verändertes Klima mit einer längeren Trockenperiode könnte zu einer reduzierten Wasserabgabe geführt haben. Zudem ist auch in Betracht zu ziehen, dass durch die Reinigung nur ein Teil des Überzugs entfernt werden konnte, dieser also noch immer in einer dünnen Schicht vorliegt und einige Poren weiterhin verschlossen sind. Ebenso muss mit einer Überlagerung der verschiedenen beschriebenen Effekte gerechnet werden. Die Diskussion verdeutlicht, dass die Ergebnisse der Kammermethode sehr hilfreich sind, der Einsatz der Methode zur Verfolgung eines Reinigungserfolgs jedoch eine genaue Abstimmung von Maßnahmen, Reinigung und begleitenden Messungen erfordert. Der zuvor diskutierte Reinigungserfolg auf den unterschiedlichen Testfeldern ist durch diese Überlegungen jedoch nicht beeinträchtigt, weil hier der direkte Vergleich der acht Flächen untereinander im Fokus stand. Da alle Testfelder unter den gleichen Bedingungen und zum gleichen Zeitpunkt untersucht wurden, sind die oben genannten Abweichungen bei Messungen, die zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wurden, in diesem Fall nicht relevant.

AUSWERTUNG DER TESTFELDER MIT OBERFLÄCHEN-ULTRASCHALL UND THERMOGRAFIE

Die Auswertung der Testfelder durch die Anwendung von Oberflächen-Ultraschall und Thermografie-Messung zeigte Änderungen an der Oberfläche von TF 5, insbesondere TF 5b, durch ein komplexes Wellenbild, was für eine aufgelockerte

Oberfläche und somit für die Reduzierung des Überzuges spricht.⁵ Beide Messverfahren ergaben ergänzend zu den makroskopischen Beobachtungen und der Kammermethode identische Ergebnisse über die Wirksamkeit der Lösemittelanwendungen in TF 5b.

KONZEPTENTWICKLUNG AUF GRUNDLAGE DER TESTFLÄCHENERGEBNISSE

Die Erweiterung um das Wissen eines Schellacküberzuges auf den Außenwänden ermöglichte eine explizite Konzeption zur chemischen und mechanischen Reduktion des Überzuges. Durch die zwischen 2006 bis 2018 durchgeführten, umfangreichen naturwissenschaftlichen Untersuchungen der Salzgehalte, der Putzfestigung und der Überzugsentfernung konnte die Wirksamkeit der einzelnen Arbeitsschritte bestätigt werden. Das 2018 im Rahmen des DBU-Projektes erarbeitete Konzept stützt sich nach wie vor primär auf die Umsetzung der Bariumhydroxidmethode. Sie wurde jedoch aufgrund objektspezifischer Merkmale angepasst und beispielsweise auf die notwendige Überzugsentfernung erweitert (Abb. 5).

Den ersten Arbeitsschritt stellt die Entfernung von losen Schmutzaufgaben dar, welche mechanisch mit einem Ziegenhaarpinsel abgenommen werden. Zur Festigung gelöster Malschichtschollen wird weiterhin Methylhydroxyethylcellulose und Kieselöl (Tylose MH 300 1,5 % gelöst in demineralisiertem Wasser/Ludox PX 30, 3:1) und für die Hinterfüllung der Putzhohlstellen dispergiertes Weißkalkhydrat (CalXnova, Vornässen mit demineralisiertem Wasser und Ethanol, 1:1) ver-

⁵ Übersicht der Anwendungsschritte, Konzepterarbeitung 2018.

KONZEPTINHALT	EINWIRKZEITRAUM	AUFTRAGSZEIT
Oberflächenreinigung mechanisch	Ziegenhaarpinsel	
Vorfestigung von Malschichtschollen Vorfestigung von Putzhohlstellen	Methylhydroxyethylcellulose und Kieselöl dispergiertes Weißkalkhydrat	
Temporäre Malschichtfixierung	Cyclododecan in Siedegrenzbenzin 65-80°	
Salzreduzierung	Neutralisationskompresse – ggf. Wiederholung	nach LF
Anquellen Schellacküberzug	Ammoniumcarbonatkompresse	2h
Anlösen Schellacküberzug	Ethylacetatkompresse	2h
Reinigungskompresse	Neutralisationskompresse	nach LF
Abtragen Schellacküberzug	Wattestäbchen Nachreinigung Ethylacetat	2h
Putzfestigung	Bariumhydroxidkompresse	1h

wendet. Anschließend wird Cyclododecan (leicht flüchtiges Wachs, in Siedegrenzbenzin) zum Schutz auf die roten Linierungen aufgetragen. Aufgrund möglicher Wechselwirkungen von Salzanreicherungen und bestimmten Lösemitteln⁶ wird zunächst eine Salzreduzierung mittels Cellulosekompreße durchgeführt. Die darauffolgende Ammoniumcarbonatkompreße (gesättigte Lösung) soll zum einen Gipsanreicherungen an der Oberfläche chemisch umwandeln und zum anderen den gealterten Schellacküberzug anquellen. Das Anquellen des Überzuges ist elementar für den darauffolgenden Auftrag einer Ethylacetatkompreße. Das Ethylacetat löst die chemischen Verbindungen des Schellacküberzuges auf, welcher anschließend mechanisch durch Abrieb mit einem in Ethylacetat getränkten Wattestäbchen von der Wandoberfläche abgenommen werden kann. Mögliche verbleibende Reaktionsprodukte werden anschließend durch eine Neutralisations-

kompreße aufgenommen, die Häufigkeit dieser Kompreße richtet sich nach dem Vergleichswert der Leitfähigkeit.

Abschließend wird die Bariumhydroxidkompreße (gesättigte Lösung) zur Strukturfestigung des Putzes aufgetragen. Der Auftrag der Ammoniumcarbonat- und Bariumhydroxidkompreßen wurde identisch zu den bis 2015 Anwendungen ausgeführt.⁷

Das anhand des Testfelds 5b ausgewählte Konzept wurde schließlich auf der gesamten Wandfläche in Joch 5 angewendet. Die praktische Durchführung stellte sich auch großflächig als realisierbar dar. Unmittelbar nach der Maßnahme konnte optisch eine vollständige Entfernung festgestellt werden (Abb. 6 bis 8). Nach mehreren Monaten war nur in Bereichen der Fugen und der vorher sehr dichten, dunklen Verfärbung eine leichte Rückverfärbung erkennbar (Abb. 9).

6 Joch 5, Zustand 2013.

7 Joch 5, Zustand vor Anwendung des Konzepts aus Testfeld 5b, Aufn. 2017.

8 Joch 5, Zustand nach der Anwendung des Konzepts aus Testfeld 5b, Aufn. 2018.



9 Dunkel verfärbte Fugen und lokal begrenzte Verfärbungen in Joch 5 nach der Kompreßenanwendung, Aufn. 2018.

Zurückzuführen ist dies auf die höhere Eindringtiefe des Schellacks in Fugenbereichen und der Variabilität der Auftragsdicke. Die Wiederholung der Anwendung in entsprechenden Bereichen wird eine weitere Reduzierung erbringen. Die Effektivität und Durchführbarkeit der Maßnahme konnte auch durch die Kammermethode und die Ultraschall-Oberflächenmessung nachgewiesen werden. Die Putzoberfläche zeigte eine erhöhte Diffusionsoffenheit sowie eine Auflockerung der Oberfläche.⁸

ZUSAMMENFASSUNG

Resümierend lässt sich sagen, dass ein langjähriger aber bemerkenswerter Weg zur Erhaltung der Wandmalereien der Außenwände im Schwahl beschritten wurde. Die interdisziplinäre Zusammenarbeit aller Projektbeteiligten ermöglichte die Bearbeitung wichtiger Problemstellungen insbesondere zur Ermittlung der Schadenssituation und zur Überzugsentfernung und trug so zu einem wesentlichen Teil zur restauratorischen Konzepterarbeitung bei. Darüber hinaus wurden innovative Evaluationsmethoden ergriffen und weiterentwickelt.

¹ Vgl. den Beitrag „Identifizierung und Bewertung der Schädigungswirkung der gelben Oberflächenverfärbungen“ im vorliegenden Band.

² Annik Pietsch: Lösemittel, ein Leitfadens für die restauratorische Praxis, Bd. 7, VDR Schriftenreihe, hrsg. vom Verband der Restauratoren, Stuttgart 2005, S. 37-99.

³ Vgl. den Beitrag „Rückblick auf die konservatorischen Maßnahmen bis 2015“ im vorliegenden Band.

⁴ Vgl. den Beitrag „Die Verwendung der Kammermethode zur Untersuchung des Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhaltens poröser Materialien“ und „Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5“ im vorliegenden Band.

⁵ Details der Messungen sind dem Beitrag „Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5“ im vorliegenden Band zu entnehmen.

⁶ Wie Anm. 3.

⁷ Wie Anm. 3.

⁸ Vgl. den Beitrag „Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5“ im vorliegenden Band.

Thomas Meier, Ercan Erkul, Tim Steinkraus, Yunus Esel, Sandra Hintz, Detlef Schulte-Kortnack, Marcel Tesch, Henrieke Drengemann, Christian Leonhardt, Julika Heller

Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen im Joch 5

Im Rahmen des DBU-Projekts wurden vom 4. bis 5. September, vom 4. bis 6. Oktober 2017 sowie am 31. Mai 2018 ergänzend zu den bisher im vorliegenden Band beschriebenen Untersuchungen Ultraschall-Oberflächen-Messungen und thermografische Messungen durchgeführt. Das Hauptaugenmerk lag dabei auf minimalinvasiven physikalischen Untersuchungsmethoden, mit denen zerstörungsfrei die Objekteigenschaften im Joch 5 des Schwahls näher beschrieben werden können.

Es wurde exemplarisch getestet, ob Ultraschall-Oberflächen-Messungen für die quantitative Untersuchung des Bestandes mittelalterlicher Wandmalereien und zur Kontrolle von Konservierungsmaßnahmen geeignet sind. Das Verfahren hatte sich bereits im Rahmen vorangegangener Messkampagnen als geeignet erwiesen, um die Verwitterung von Naturstein und Beton zu untersuchen (vgl. u.a. Meier et al. 2015, 2016 und 2017). Im Rahmen dieses Projekts wurden nun erste Messungen an optisch unveränderten sowie an vergilbten Bereichen der mittelalterlichen Putzoberfläche von Joch 5 durchgeführt. Da der auf der Putzoberfläche befindliche vergilbte Überzug (Schellack) die Dampfdiffusion des vorliegenden Materials nachweislich negativ beeinträchtigt, wurden Testflächen zu seiner Reduzierung angelegt. Es wurden Wiederholungsmessungen vorgenommen, um Veränderungen des Materials durch die unterschiedlichen Behandlungsmethoden des Überzuges sowie natürliche zeitliche Veränderungen zu detektieren.

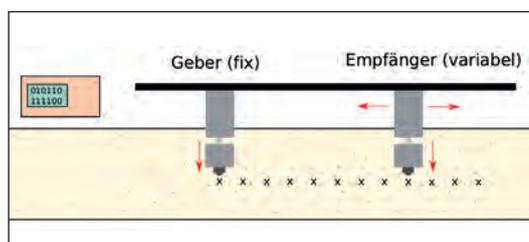
Weiterhin wurden aktive und passive thermografische Messungen durchgeführt. Ziel der passiven thermografischen Untersuchungen war es, die Wirksamkeit der Horizontalsperren im Schwahl zu überprüfen. Mit der aktiven Thermografie wurden die Testflächen im Joch 5 vor und nach den Versuchen zur Überzugsreduzierung untersucht. Hierbei stellte sich die Frage, ob Veränderungen der Putzoberfläche durch die Anwendung der Lösemittel thermografisch nachweisbar sind.

ULTRASCHALL

METHODE

Mit Ultraschall kann der Zustand von Objekten mittels elastischer Wellen quantifiziert werden. Die am häufigsten genutzte Methode ist die Durchschallung mit P-Wellen. Hierfür muss das Untersuchungsobjekt allerdings von zwei Seiten zugänglich sein und oberflächennahe Strukturen können nur schwer untersucht werden. Sollen – wie im Fall der Messungen am Dom St. Petri zu Schleswig – der Putz und somit die oberflächennahen Eigenschaften untersucht werden, bieten sich dagegen Oberflächen-Messungen entlang von Profilen auf der Oberfläche an. Ein großer Vorteil besteht in der Auswertung der gesamten Wellenform, nicht ausschließlich des Ersteinsatzes. Dadurch kann die Ausbreitung sowohl der P- als auch der Rayleigh-Welle entlang der Oberfläche analysiert werden, um die Eigenschaften des Mediums in den oberen ca. 2 cm zu untersuchen. Ein weiterer Vorteil der Untersuchung mittels Oberflächenwellen ist, dass deren frequenzabhängige Geschwindigkeiten genutzt werden können, um Änderungen des Untersuchungsobjekts mit der Tiefe zu detektieren.

Es wurden Geräte der Firma Geotron (www.geotron.de) verwendet. Mit einer speziellen manuellen Ankopplvorrichtung werden breitbandige, wiederverwendbare Ultraschallprüfköpfe UPG-D (Geber, fix) und UPE-D (Empfänger, variabel) leicht auf die Oberfläche aufgesetzt (Abb. 1), ohne dass es dabei zu Beschädigungen kommt. Die Prüfköpfe besitzen eine Tastschneide von ca. 1 mm Durchmesser und ermöglichen dadurch punktgenaue, reproduzierbare Messungen. Die Messungen wurden im Frequenzbereich zwischen ca. 10 kHz und 300 kHz durchge-



1 Skizze des Ultraschallaufbaus mit einem fixen Geber und einem variablen Empfänger.

führt. Die Abtastfrequenz der Ultraschallwellenformen betrug 5 MHz. Bei der Messung eines Profils wurde der Abstand zwischen Geber und Empfänger systematisch mit einer Schrittweite von 1 cm von 5 cm auf max. 20 cm vergrößert, so dass pro Profil bis zu 16 Messungen vorgenommen wurden.

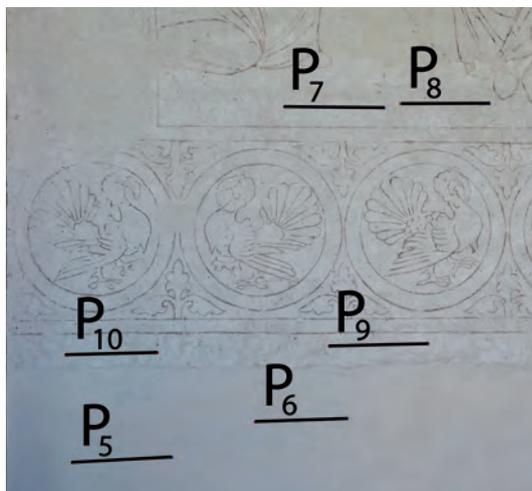
Das optische Erscheinungsbild der Kalkmalerei „Kindermord“ auf der Westwand des Jochs 5 im Schwahl wird durch die partiell sehr starken Vergilbungen eines auf der Oberfläche befindlichen organischen Überzugmaterials auf der rechten Bildhälfte beeinträchtigt. Da dieser Überzug eine Absperrung der Putzoberfläche darstellt und somit negativen Einfluss auf die Wasserdampfdiffusion besitzt, wurden verschiedene Kompressenanwendungen mit organischen und anorganischen Lösemitteln in neun Testflächen entwickelt. Diese hatten das Ziel, eine Reduzierung des Überzuges zu bewirken. Die Effektivität des jeweiligen Lösemittels und damit das Anlösen des Überzuges galt es dabei durch Ultraschall-Oberflächen-Messungen innerhalb der einzelnen Testflächen zu untersuchen. Zum Vergleich wurden Messungen in unbehandelten Bereichen der mittelalterlichen Putzoberfläche auf der

linken Bildhälfte durchgeführt. Weitere Messungen konnten im unteren Bereich der Wandmalerei mit der Darstellung der Truthähne, auf einer modernen Putzergänzung im Sockelbereich sowie exemplarisch auf dem historischen Ziegelmauerwerk umgesetzt werden. Im September 2017 wurden vor den Lösemittelanwendungen in den beschriebenen Bereichen insgesamt 28 Ultraschall-Oberflächen-Messungen durchgeführt. Sie wurden nach den Maßnahmen im Oktober wiederholt, um die Reproduzierbarkeit der Messungen und Veränderungen feststellen zu können. Im Mai 2018 wurden erneut exemplarisch Wiederholungsmessungen durchgeführt, um die Wiederholbarkeit der Messungen ein zweites Mal zu prüfen und um langfristige Veränderungen erkennen zu können.

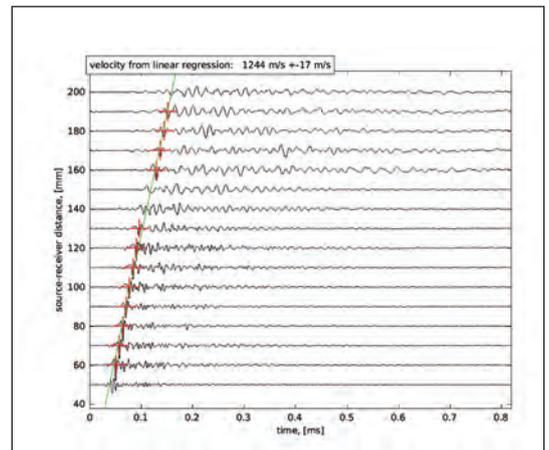
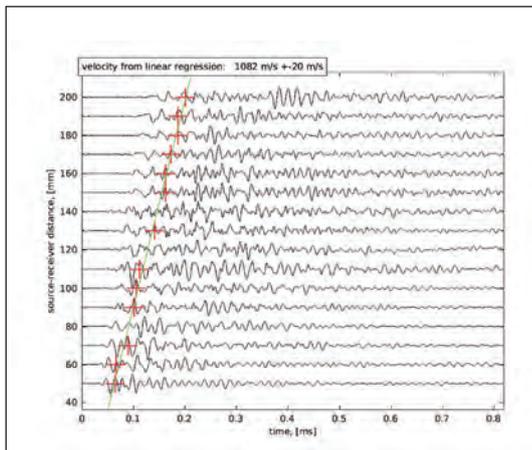
MITTELALTERLICHER PUTZ UND ERGÄNZTER PUTZ (TRUTHAHNFRIES) AUF DER LINKEN SEITE

Zunächst werden beispielhaft Messungen an intaktem mittelalterlichem Putz und an ergänztem Putz (Abb. 2) verglichen. Es fallen sofort die sehr komplizierten Wellenformen am mittelalterlichen Putz auf (Abb. 3, links). Sie weisen auf stark poröses Material

2 Fotos der Messlokation (links) sowie des Putzes im Bereich des intakten mittelalterlichen Putzes (Profil 7) und des ergänzten Putzes (Profil 9).



3 Vergleich der Ultraschall-Oberflächen-Messungen an intaktem mittelalterlichem Putz (links) und an ergänztem Putz (rechts).



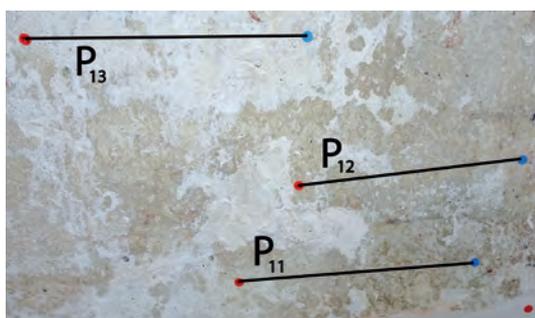
mit Heterogenität durch Einlagerungen wie Kornzuschläge in der Putzmatrix hin. Die Rayleigh-Grundmode ist aufgrund der internen Heterogenität des Putzes nur schwer erkennbar (rote Kreuze in Abb. 3, links). Es konnten trotzdem mittlere Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten von 1082 m/s gemessen werden. Da die Komplexität der Wellenformen ein wichtiger Hinweis auf die Eigenschaften des Materials, hier vor allem des Putzes, ist, wurde als Maß für das Auftreten gestreuter Wellen die Kurtosis der Wellenformen eingeführt. Die Kurtosis ist ein statistisches Maß für die Wölbung einer Wahrscheinlichkeitsdichte-Verteilung. Hier zeigt eine geringe Kurtosis das Auftreten einer komplizierten Wellenform mit vielen gestreuten Wellen an, die durch interne Heterogenität des Materials erzeugt werden. Eine große Kurtosis deutet auf eine einfache, impulsartige Wellenform und damit auf homogenes Material hin. Die Kurtosis beträgt für die in Abb. 3 links gezeigten Wellenformen im Mittel 5 und ist damit sehr gering, was auf die komplizierten Wellenformen mit einer Vielzahl an gestreuten Wellen zurückzuführen ist.

Die Messungen auf dem erneuerten Putz auf der linken Seite im Bereich der Truthahndarstellungen werden in Abb. 3 rechts vorgestellt. Offensichtlich weist der ergänzte Putz etwas andere elastische Eigenschaften als der original mittelalterliche Putz auf: Die mittleren Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten sind höher (1244 m/s) und die Wellenformen sind wesentlich einfacher. Das weist auf eine insge-

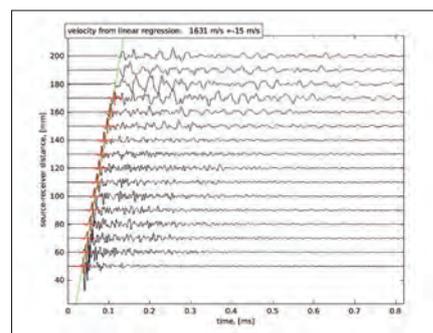
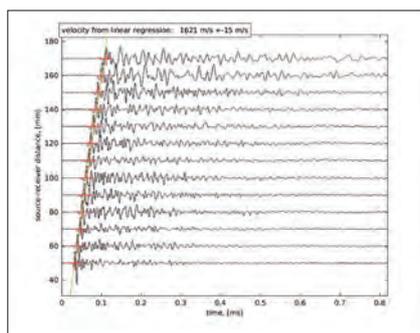
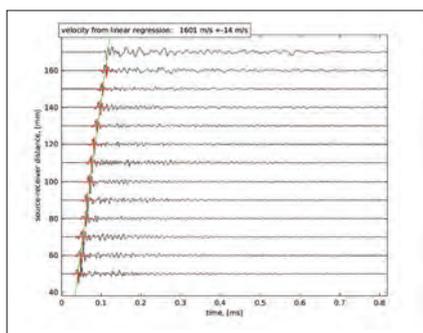
samt höhere Festigkeit und geringere Heterogenität beziehungsweise Porosität hin. Diese Unterschiede sind visuell kaum zu erkennen (vgl. Abb. 2), aber mit Hilfe von Messungen nachweisbar. Die Komplexität der Wellenformen ist auf dem jüngeren Putz geringer: Die Kurtosis der Wellenformen beträgt 30 und ist damit wesentlich höher als für den intakten Putz (dort 5).

VERGILBTE PUTZOBERFLÄCHE AUF DER RECHTEN SEITE, TESTFLÄCHE TF 1

Weiter soll ein Beispiel für Wiederholungsmessungen auf einer Testfläche vor der Maßnahme sowie kurz beziehungsweise 8 Monate danach gezeigt werden (Abb. 4). Vor der Maßnahme weist die Ultraschallwellenform in diesem Bereich auf verdichteten Putz hin: Die mittlere Rayleigh-Wellengeschwindigkeit beträgt 1601 m/s, die Wellenform ist einfach (Abb. 5, links), deshalb ist die Kurtosis hoch (35), das heißt der Putz ist homogen verdichtet. Nach Durchführung der Maßnahme wird die Wellenform komplexer (Abb. 5, Mitte), die Kurtosis sinkt auf 15. Dadurch und anhand der Frequenzabhängigkeit der Ausbreitungsgeschwindigkeit der Rayleigh-Grundmode wird erkennbar, dass durch den Reduzierungsversuch des Überzugs mit Ammoniumcarbonat (Einwirkzeit 6 Stunden) der Putz bis in mehrere Millimeter Tiefe aufgelockert wurde. Durch Auswertung der Eigenschaften der gemessenen Wellenformen kann also die Wirksamkeit der Überzugsentfernung quantifiziert werden, obwohl sich die mittlere Rayleigh-Wellengeschwindigkeit nicht signifikant ändert. Bemerkenswert ist insbesondere, dass 8 Monate nach der Maßnahme der Einfluss der Überzugsreduzierung noch erkennbar ist, sich aber verringert hat: das



4 Fotos der Messlokation (links) sowie des Putzes im Bereich der Testfläche TF 1 (Profil 13, rechts).



5 Ultraschall-Oberflächen-Messung September 2017 vor der Restaurierung (links, Profil 13), Oktober 2017 nach der Restaurierung (Mitte, Profil 42) und Mai 2018 (rechts, Profil 80).

Wellenfeld ist wieder etwas einfacher geworden (Abb. 5, rechts), die Kurtosis ist wieder auf 31 gestiegen.

ÜBERBLICK ÜBER DIE MESSUNGEN

Die Variabilität der gemessenen Geschwindigkeiten ist beträchtlich. Intakter mittelalterlicher Putz zeichnet sich durch geringe Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten um ca. 1000 m/s aus. Der jüngere Putz weist leicht erhöhte Geschwindigkeiten auf. Der vergilbte, verdichtete Putz kann Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten bis ca. 2000 m/s erreichen. Allerdings gibt es auf der rechten Seite ebenfalls gering verdichtete Bereiche, in denen die Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten niedrig sind.

Neben der mittleren Rayleigh-Wellengeschwindigkeit ist die Komplexität der Wellenformen ein wesentliches Kriterium für die Bewertung der Messungen. Es wurde deshalb ein Kriterium κ definiert, das neben der Rayleigh-Wellengeschwindigkeit auch die P-Wellengeschwindigkeit und die Kurtosis als Maß für die Komplexität der Wellenform berücksichtigt:

$$\kappa = \left(\frac{v_R}{v_{Rmax}} + \frac{v_P}{v_{Pmax}} + \frac{Kurtosis}{Kurtosis_{max}} \right) / 3,$$

dabei wurden für die Normierung

$$v_{Rmax} = 2000 \frac{m}{s}, v_{Pmax} = 4000 \frac{m}{s} \text{ und } Kurtosis_{max} = 25$$

angesetzt. Im Fall von intaktem mittelalterlichen Putz würden geringe Geschwindigkeiten und eine geringe Kurtosis als Ausdruck für gestreute Wellen erwartet. Verdichteter, geschädigter Putz würde dagegen hohe κ -Werte aufweisen. In Abb. 6 sind die Ergebnisse für Joch 5 dargestellt. Der mittelalterliche Putz links sowie einzelne aufgelockerte Bereiche rechts weisen geringe κ -Werte auf. Die höchsten κ -Werte treten in stark gestörten, vergilbten und verdichteten Bereichen auf. Jüngerer Putz sowie die mittelalterlichen Ziegel zeigen mittlere κ -Werte. Damit konnte nachge-

wiesen werden, dass Ultraschall-Oberflächen-Messungen auch zur Untersuchung mittelalterlicher Wandmalereien auf Putz geeignet sind.

WIEDERHOLUNGSMESSUNGEN INNERHALB DER TESTFLÄCHEN

In Abb. 7 werden die κ -Werte auf den Testflächen vor der Anwendung der Lösemittelkompressen (links) und die Änderungen durch die Maßnahme (rechts) gezeigt. Die Eigenschaften des Putzes auf den Testflächen sind vor der Restaurierung variabel, wobei sich eine Tendenz zu erhöhten Festigkeiten und geringer Porosität und damit erhöhten κ -Werten zeigt. Es gibt aber auch aufgelockerte, stark gestörte Bereiche in denen niedrige elastische Kenngrößen gemessen werden.

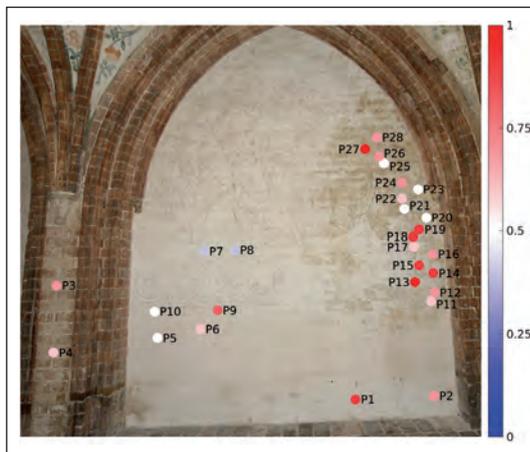
Insbesondere auf den Testflächen TF 5b und TF 6 verringern sich durch die Maßnahme die κ -Werte, was dafür spricht, dass durch die testweise Reduzierung des Überzuges durch die Auflage von Ammoniumcarbonat- bzw. Isopropanolkompressen die gewünschte Erhöhung der Porosität erreicht wurde. Nicht ganz so eindeutig können positive Effekte auch auf den Testflächen TF 7, TF 1 und stellenweise auf TF 2 beobachtet werden.

Es zeigt sich somit, dass auch die Wirksamkeit einer restauratorischen Maßnahme mittels Ultraschall-Oberflächen-Messungen kontrolliert werden kann. Allerdings muss dabei berücksichtigt werden, dass die Messwerte mittlere Werte für das jeweilige Profil darstellen und dass die Wirksamkeit der Reinigung aufgrund der starken Variabilität der vorgefundenen Schädigung auch innerhalb der Testflächen variieren kann.

WELLENFORMINVERSIONEN

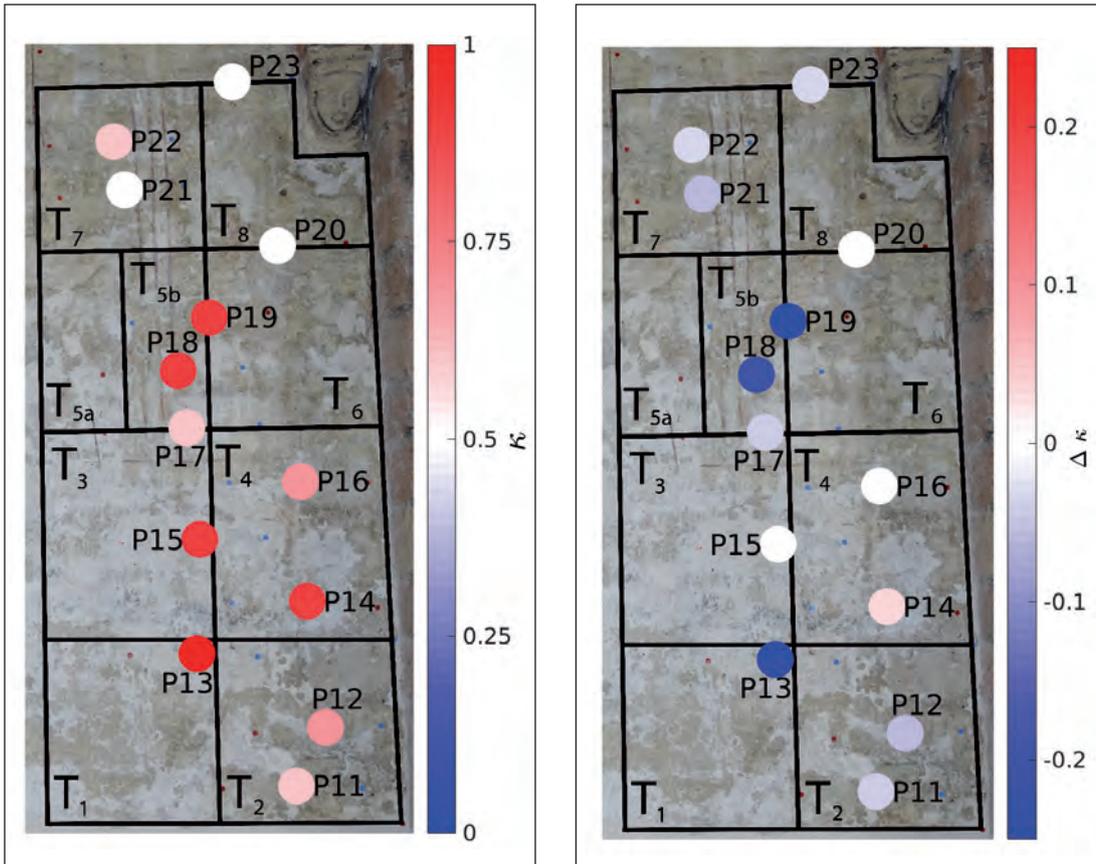
Zur weiterführenden Auswertung der Wellenformen kann eine Wellenforminversion nach der Scherwellengeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Tiefe durchgeführt werden. Dabei wird die Frequenzabhängigkeit der Empfindlichkeit der Rayleigh-Welle für den Untergrund genutzt. Hohe Frequenzen dringen nur wenige Millimeter ein, geringe Frequenzen unter ca. 50 kHz dagegen bis zu zwei Zentimeter. Es können somit zerstörungsfrei Tiefenprofile elastischer Parameter – hier der Scherwellengeschwindigkeit – aus den Ultraschall-Oberflächen-Messungen berechnet werden. Zusätzlich muss die Dämpfung seismischer Wellen bei der Modellierung der Wellenformen berücksichtigt werden. Es wurden tiefenunabhängige Q-Werte bestimmt. Mittels Partikelschwarmoptimierung wird eine große Anzahl an Untergrund-

6 Überblick über die am Joch 5 gemessenen κ -Werte. Hohe Werte weisen auf verdichteten Putz, niedrige Werte auf porösen Putz hin.

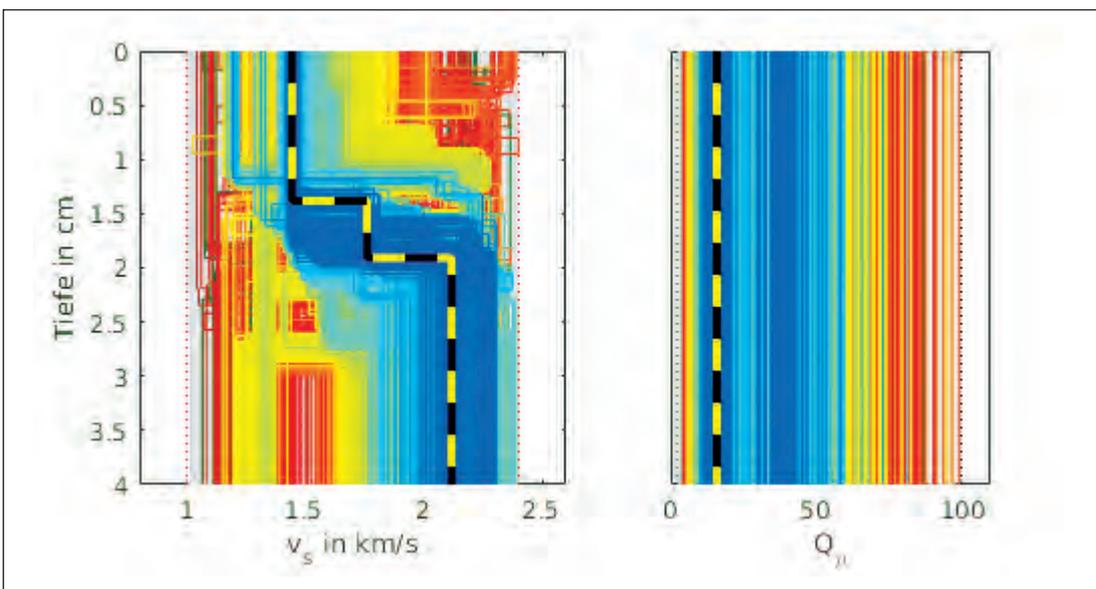


modellen getestet und auf ihre Übereinstimmung mit den Messungen geprüft. Die Anpassung der berechneten synthetischen Wellenformen an die gemessenen Wellenformen wird farblich dargestellt (Abb. 8). Blau bedeutet eine gute Anpassung, grün, rot und grau eine zunehmend schlechtere Anpassung. Mit dieser Form der Inversion können auch Unsicherheiten in den bestimmten Parametern erkannt werden, da alle blauen Modelle eine ähnlich gute Anpassung zeigen.

In Abb. 8 werden Ergebnisse der Wellenforminversion für die Messung an intaktem mittelalterlichen Putz im September 2017 gezeigt. Der Putz erscheint innerhalb des ersten Zentimeters homogen und weist eine nahezu konstante Geschwindigkeit von ca. 1500 m/s auf. Gestreute Wellen wurden dabei nicht modelliert, da Streuung durch laterale Heterogenität und Porosität hervorgerufen wird, die nicht durch ein eindimensionales Tiefenprofil beschrieben werden kann. Unter dem



7 Überblick über die auf den Testflächen gemessenen κ -Werte vor der Restaurierung (links) und die Veränderung nach der Restaurierung (rechts).



8 Tiefenprofil der Scherwellengeschwindigkeit für Profil 7 an intaktem mittelalterlichen Putz (links). Rechts ist das berechnete tiefenunabhängige Dämpfungsmodell zu sehen. Akzeptable Modelle werden blau, das optimale Ergebnis wird durch eine gelb-schwarze Linie dargestellt.

Putz ist der Übergang vom Ziegel mit höherer Geschwindigkeit (ca. 2000 m/s) in ca. 1,5 cm bis 2 cm Tiefe zu erkennen.

ZUSAMMENFASSUNG

Im September und Oktober 2017, sowie im Mai 2018 wurden im Dom St. Petri zu Schleswig insgesamt 83 Profile mit Ultraschallmessungen untersucht. Zum ersten Mal wurden dabei Ultraschall-Oberflächen-Messungen an mittelalterlichen Wandmalereien auf Putz durchgeführt. Die Ergebnisse für das Joch 5 des Schwahls bestätigen die Anwendbarkeit der Methode zur Quantifizierung des Zustandes des Putzes. Die Wellenformen sind aufgrund der Streuung an Heterogenität im intakten Putz sehr kompliziert. Dieses Merkmal kann neben der Geschwindigkeit elastischer Wellen zur Unterscheidung gegenüber geschädigtem, verdichtetem Putz herangezogen werden. Es wird die Kurtosis als quantitatives Maß für die Komplexität der Wellenform vorgeschlagen. Intakter Putz weist geringe mittlere Rayleigh-Wellengeschwindigkeiten um ca. 1000 m/s und geringe Kurtosis-Werte unter 10 auf.

An geschädigtem, verdichteten Putz betragen die Geschwindigkeiten bis 2000 m/s und die Kurtosis steigt auf über 20. Interessant ist, das sich jüngerer Putz von mittelalterlichem Putz durch leicht erhöhte Geschwindigkeiten um 1200 m/s und geringere Kurtosis unterscheidet. Die elastischen Eigenschaften können mittels eines dimensionslosen κ -Wertes, der zwischen 0 und 1 schwankt, zusammengefasst werden. Die Messungen zeigen, dass der Zustand des Putzes im Joch 5 sehr variabel ist (vgl. Abb. 6 und 7).

Mit Wiederholungsmessungen können zeitliche Änderungen der elastischen Eigenschaften des Putzes erkannt werden. Im Bereich der Testflächen sind Auflockerungen der Putzoberfläche durch die exemplarische Überzugsreduktion mit unterschiedlichen Lösemitteln erkennbar. Teilweise sinkt

die mittlere Rayleigh-Wellengeschwindigkeit und die Wellenformen werden deutlich komplizierter, was zu einer Verringerung der Kurtosis und des κ -Wertes führt. Allerdings ist der Zustand des Putzes im Bereich der Testflächen keineswegs einheitlich, was sich in der Variabilität der gemessenen Kennwerte widerspiegelt. Besonders eindeutig sind gewünschte Änderungen im Bereich der Testflächen TF 5B und TF 6, mit Abstrichen auch auf den Testflächen TF 1, TF 2, TF 7 und TF 8 erkennbar. Die Wiederholungsmessungen im Mai 2018 ergaben, dass die Wirkung der restauratorischen Eingriffe zwar optisch noch erkennbar, tatsächlich aber bereits teilweise wieder abgeklungen war. Interessant ist weiterhin, dass auch auf Profilen außerhalb der Testflächen zeitliche Änderungen der elastischen Parameter insbesondere am Übergang zwischen Putz und Ziegel festgestellt wurden. Die zeitliche Variabilität der Eigenschaften des Putzes sollte weiter beobachtet werden.

THERMOGRAFIE

METHODE

Die Datenerfassung an den Messpunkten erfolgte mithilfe einer Infrarot-Wärmebildkamera. Genutzt wurde das Kamera Modell VarioCam® hd head der Firma InfraTec GmbH aus Dresden. Die Wellenlängen des verwendeten Spektralbereiches liegen zwischen 7,5 - 14 μm . Die detektierte IR-Strahlung wird über einen flächenhaften Pixelsensor, der diese in einer zweidimensionalen Matrix aufzeichnet, aufgenommen. Dieser Sensor wird Focal Plane Array (FPA) genannt und besitzt in der verwendeten Kamera eine Pixelgröße von 640 x 480 px. Durch die zusätzliche Anwendung der Resolution Enhancement Technology (RET) entsteht ein Thermogramm mit doppelter Auflösung (1280 x 960 px). Durch Verschiebung des Sensors um eine halbe Pixelbreite pro Scan wird jeder Pixel mehrfach gescannt und die Auflösung verbessert. Der mögliche

9 Schematischer Messaufbau Thermografie nach Jepsen 2013: Links die passive Messung mit Kamera und Referenzblock, rechts die aktive Messung mit Kamera, Referenzblock, Wärmestrahler und Diffusorschirm.



Messbereich von $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ bis $2000\text{ }^{\circ}\text{C}$ wird mit einer absoluten Messgenauigkeit von $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ aufgenommen und mit einer Pixel zu Pixel Relativauflösung von ca. $0,03\text{ K}$ aufgelöst (InfraTec-GmbH, 2015).

Die passive Thermografie (Abb. 9, links) beruht auf der Analyse von natürlich vorkommenden, oberflächennahen zeitlich-räumlichen Temperaturänderungen. Im Gegensatz zur aktiven Messung (Abb. 9, rechts) wird das Messobjekt während der Datenerfassung nicht künstlich mittels IR-Strahler erwärmt. Der Verzicht auf die Strahler gestattet eine frei wählbare Größe des zu messenden Bildausschnittes. Dies ermöglicht beispielsweise die Aufnahme kompletter Außenfassaden von Gebäuden, bei denen eine homogene Ausleuchtung nicht gewährleistet werden kann. Ein wichtiger Aspekt bei dieser Methode ist, dass äußere Umwelteinflüsse wie zum Beispiel Regen oder eine sich durch den Aufnahmebereich bewegende Person minimal gehalten beziehungsweise vermieden werden müssen. Um eine bessere Vergleichbarkeit passiver Messungen zu erhalten, erfolgt die Aufnahme jeder Messung über eine fixe Aufnahmezeit und Bildrate. Hier wurde ein Aufnahmezeitraum von zehn Minuten gewählt. Die Bildrate beträgt sechs Bilder pro Minute. Wichtig ist die Aufnahmezeit nicht zu kurz zu wählen, um signifikante Temperaturänderungen erfassen zu können. So kann sich eine Messung auch über mehrere Stunden oder Tage erstrecken, wenn langperiodische Temperaturänderungen erfasst werden sollen.

Aktive Thermografie ermöglicht die Analyse von zeitlich-räumlichen Temperaturänderungen, die durch künstliche Erwärmung und anschließende Abkühlung hervorgerufen werden. Die Messung wird in einen dreiphasigen Zyklus unterteilt. Die erste Phase des Zyklus wird als „Passiv-Phase“ bezeichnet und misst den ausgewählten Bildbereich für zunächst fünf Minuten (30 Bilder) mit möglichst minimalen äußeren Einflüssen. Im Anschluss wird durch das Einschalten der zwei Infrarotstrahler das zu untersuchende Objekt möglichst homogen um wenige Grad erwärmt. Dieser zweite Vorgang wird als „Heiz-Phase“ bezeichnet. Ist die maximale Erwärmung durch die Strahler erreicht, so werden diese ausgeschaltet und von der Messfläche abgewandt. Während der dritten und längsten Phase, der „Abkühl-Phase“, werden die Temperaturen während des Abkühlungsprozesses bis zum Erreichen der Ausgangstemperatur erfasst. Der Vorteil aktiver Messungen ist die weitgehende Unabhängigkeit von äußeren Einflüssen sowie die Möglichkeit, eine direkte Materialantwort

auf die induzierte Wärmestrahlung untersuchen zu können. So lassen sich beispielsweise lokale Eigenschaften wie die Feuchtigkeit im Gemäuer, die Oberflächenbeschaffenheit oder auch verdeckte Strukturen wie etwa Hohlräume oder Bauwerkstrukturen unter Putz analysieren.

ERGEBNISSE DER PASSIVEN THERMOGRAFIE

Abb. 10 zeigt den Mittelwert von 2000 passiven Einzelmessungen im Joch 5. Klar zeichnet sich der Bereich unterhalb der Horizontalsperre durch geringe Temperaturen ab. Auffällig ist, dass die Horizontalsperre gerade in dem Bereich der stärksten Oberflächenverfärbung rechts nicht voll wirksam ist. Es wird empfohlen, die Funktionsfähigkeit der Isolierung zu überprüfen, um gegebenenfalls einen weiteren Feuchtigkeitseintrag zu verhindern. Sehr bemerkenswert ist weiterhin, dass der im 19. Jahrhundert ergänzte beziehungsweise erneuerte Bereich einschließlich der Truthahndarstellungen geringere Temperaturen aufweist als der originale mittelalterliche Putz.

Die Passivmessung im Joch 5 wurde im Oktober 2017, das heißt nach der Durchführung der restauratorischen Maßnahmen, wiederholt. Die im September beobachtete Dreiteilung der Fläche trat im Mittelwert der neuen Messung nicht auf. Das bedeutet, dass die feuchten Bereiche unterhalb der Horizontalsperre ähnliche Temperaturen wie die Flächen oberhalb aufweisen. In der Standardabweichung der Einzelmessungen zeichnen sich die feuchteren Bereiche allerdings durch geringe Werte ab. Aufgrund der erhöhten Wassersättigung unterhalb der Horizontalsperre sind die Temperaturschwankungen geringer. Es empfiehlt sich daher, bei fehlenden Temperaturkontrasten neben dem Mittelwert auch die Standardabweichung der passiven Einzelmessungen zu betrachten, um zu erkennen, wie das Objekt auf Temperaturänderungen reagiert.

Die Horizontalsperre ist in der thermografischen Aufnahme der Außenseite der Westwand von Joch 5 ebenfalls sehr gut sichtbar (Abb. 11). Wenn auch etwas undeutlich, so lässt sich in dieser Aufnahme eine bogenförmige Struktur im geschädigten Bereich der Mauer erkennen.

Auch in den Jochen 2, 12 und 21 zeigt die passive Thermografie ähnliche Ergebnisse wie für Joch 5: Die Horizontalsperre ist thermisch erkennbar und der im 19. Jahrhundert erneuerte Putz zeigt andere thermische Eigenschaften als der original mittelalterliche, stärker poröse Putz.

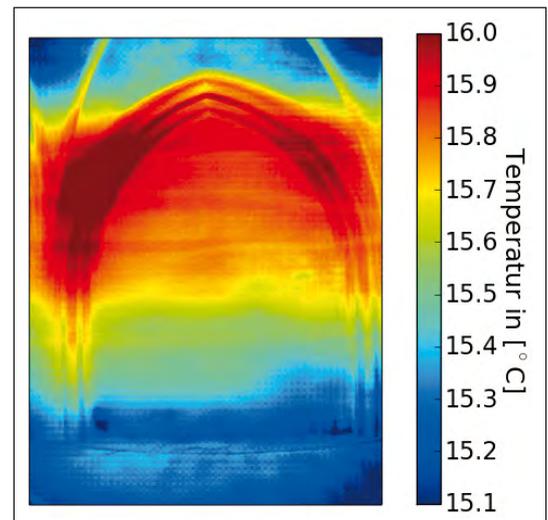
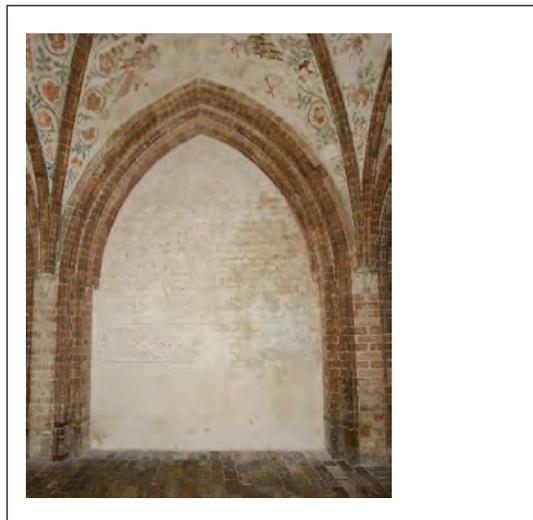
ERGEBNISSE DER AKTIVEN THERMOGRAFIE

Im Joch 5 wurden vier aktive thermografische Messungen durchgeführt: Im September und Oktober jeweils eine Messung im linken Teil der Wand in einem Bereich mit weitgehend unbeschädigten Wandmalereien sowie Messungen im rechten Teil der Wand im Bereich der Testflächen. Nach der Messung im September wurden auf der Testfläche probeweise Lösemittelkompressen zur Reduzierung des Überzuges durchgeführt, so dass im Oktober überprüft werden konnte, welche Auswirkung die Maßnahmen auf die thermischen Eigenschaften des Putzes hatten. In Abb. 12 werden als Beispiel die für die linke Seite der Wand im September aufgenommenen Temperaturkurven gezeigt. Nach der Passiv-Phase steigt die Temperatur durch das Aufheizen um ca. 2 K. Die Temperaturerhöhung ist nach 45 min weitgehend abgeklungen.

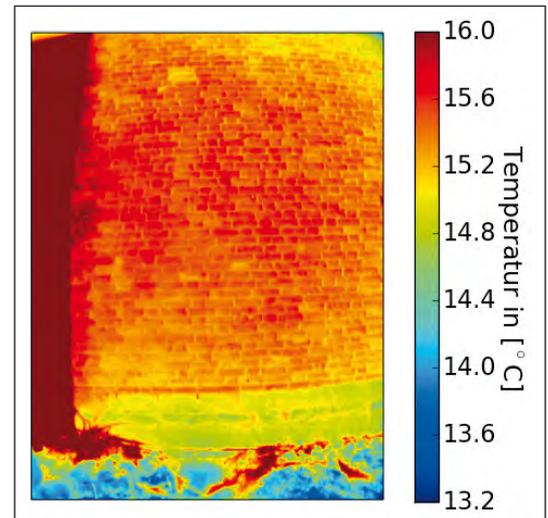
Aufschlussreich ist der Vergleich der Temperaturen in den zwei betrachteten Zeitabschnitten der

Abkühl-Phase (Abb. 13 und 14). Beide Zeitabschnitte sind in der Darstellung des Temperaturverlaufs (Abb. 12, rechts) grau eingezeichnet und befinden sich einmal sofort nach Abschalten der Heizung am Beginn der Abkühlphase und zum anderen 8 Minuten nach Ende der Heiz-Phase. Aus Abb. 13 und 14, in denen die Temperaturdifferenzen zum Referenzblock dargestellt sind, wird deutlich, dass der beschädigte Putz im Bereich der Testfläche im September vor den Restaurierungsmaßnahmen deutlich schneller abkühlte (jeweils Mitte rechts) als die Vergleichsfläche auf der linken Seite der Wand (jeweils links). Das heißt die thermische Diffusivität ist im Bereich der Schäden erhöht und die Wärme wird schneller abgeleitet als in dem stärker porösen, intakten mittelalterlichen Putz (links). Die Wiederholungsmessung im Oktober zeigt im Bereich der linken Wandseite keine merkliche Veränderung der thermischen Eigenschaften (Abb. 13, 14, jeweils Mitte links) gegenüber der Messung im September (Abb. 13, 14, jeweils links). Dagegen ändern sich durch die Lösemittelbehandlungen innerhalb der

10 Joch 5, September 2017, IR-Aufnahme der Innenseite der Westwand mit dem Realbild (links) und dem Mittelwert (rechts).



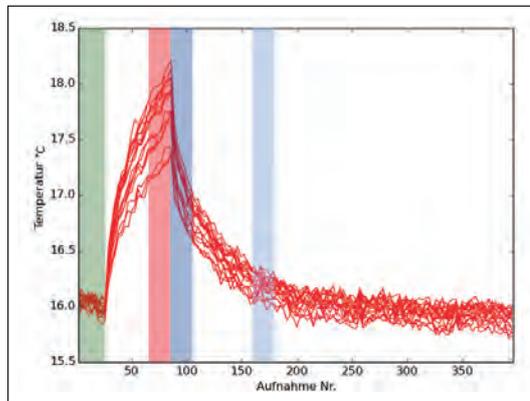
11 Joch 5, September 2017, IR-Aufnahme der Außenseite der Westwand mit dem Realbild (links) und dem Mittelwert (rechts).



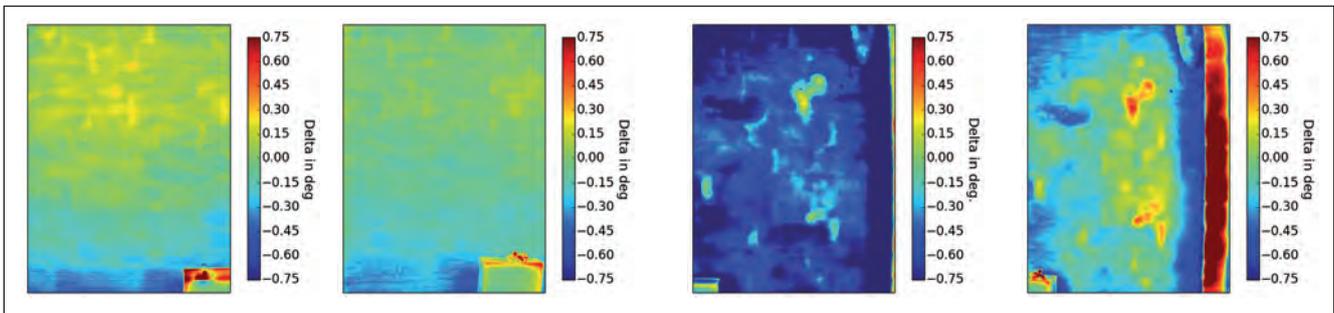
Testflächen offensichtlich die thermischen Eigenschaften des Putzes merklich (Abb. 13, 14, jeweils ganz rechts). Aufgrund erhöhter Porosität wird die Wärme im Bereich der behandelten Testfläche deutlich schlechter abgeleitet und kühlt wesentlich langsamer aus. Durch die aktive Thermografie kann also die Wirksamkeit der restauratorischen Maßnahmen in Bezug auf die oberflächennahe Erhöhung der Porosität erkannt werden.

In Abb. 15 ist die Temperaturdifferenz zum Referenzblock im Bereich der Testflächen im Oktober nach der Überzugsreduzierung für Zeitabschnitt 1 (links) und Zeitabschnitt 2 (rechts) detaillierter dargestellt. Im Zeitabschnitt 1 dominieren oberflächliche Strukturen, im Zeitabschnitt 2 mittlere Eigenschaften des Putzes. Erhöhte Temperaturen

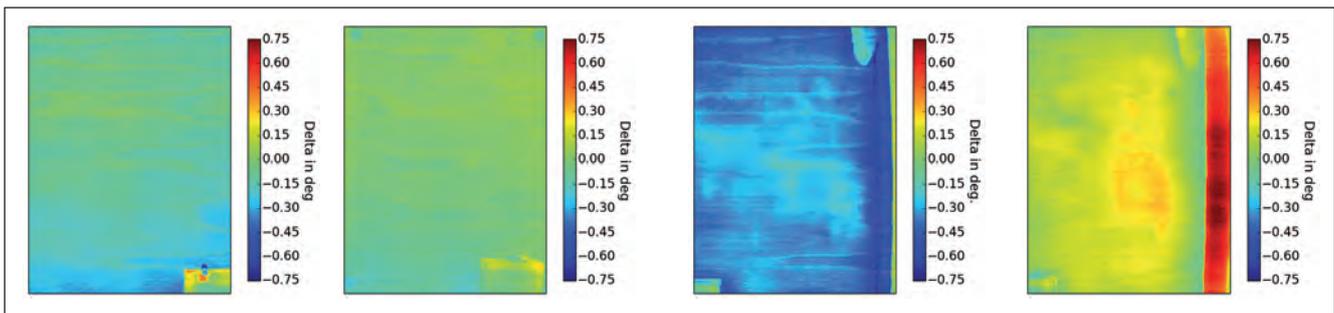
deuten auf poröse Bereiche hin. Die Porosität wurde durch die Behandlung oberflächlich insbesondere in aufgelockerten Bereichen erhöht (Abb. 15, links). Dort scheint die Behandlung besonders wirksam gewesen zu sein. Zu späteren Zeiten nach dem Ende des Aufheizens (Abb. 15, rechts) werden etwas tieferliegende Bereiche des Putzes analysiert. Auf den Flächen TF 5b und TF 6 war die Behandlung besonders wirksam. Das zeigt sich an den erhöhten Temperaturen, die auf eine erhöhte Porosität hinweisen. Im äußersten rechten Bereich der Testfläche sind die Temperaturen eher gering, die Messungen sind hier aufgrund des angrenzenden Pfeilers nicht aussagekräftig. Die Behandlung im Bereich von TF 5a war deutlich weniger wirksam. Scheinbar sind die auf TF 5b und TF 6 verwendeten Substanzen etwas in den oberen Bereich von TF 3 und TF 4



12 Joch 5, September 2017, aktive Thermografie: auf der linken Seite der Wand mit Realbild (links) und den Temperaturkurven (rechts).



13 Aktive Thermografie (Zeitabschnitt 1, direkt nach der Heizphase) – Temperaturdifferenz zum Referenzblock. Linker Wandbereich: September (links) und Oktober (Mitte links), rechter Wandbereich: September (Mitte rechts) und Oktober (rechts).



14 Aktive Thermografie (Zeitabschnitt 2, 8 Minuten nach der Heizphase) – Temperaturdifferenz zum Referenzblock. Linker Wandbereich: September (links) und Oktober (Mitte links), rechter Wandbereich: September (Mitte rechts) und Oktober (rechts).

diffundiert und haben dort die Porosität ebenfalls signifikant erhöht.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die aktive Thermografie unerwartet gut geeignet ist, geschädigte Bereiche zu detektieren und die Wirksamkeit der Kompressenanwendung der Putzoberfläche zu untersuchen. Bereiche mit vergilbten Oberflächen kühlen schneller ab als intakter mittelalterlicher Putz. Die durch die Behandlung erhöhte Porosität ist offenbar durch langsames Abkühlen erkennbar.

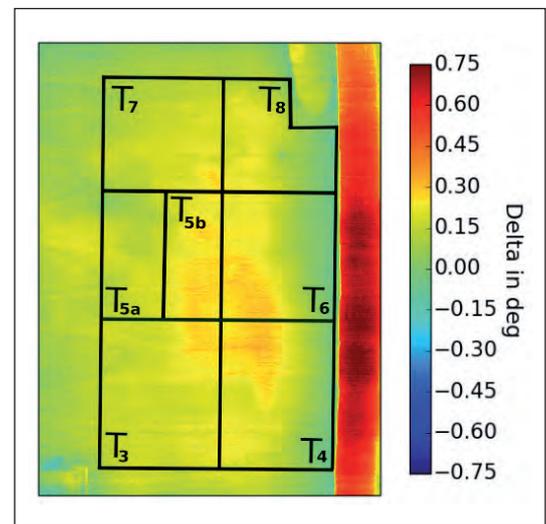
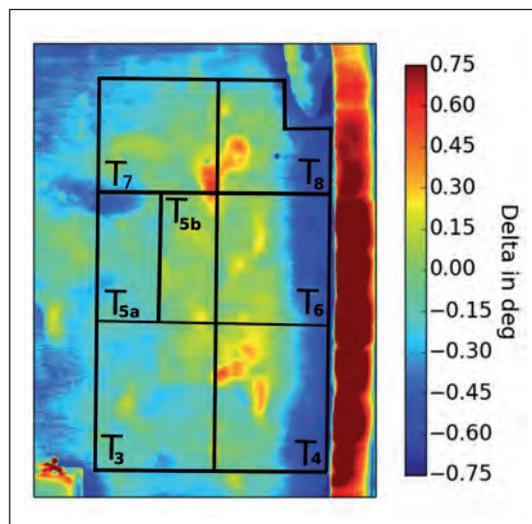
Abschließend soll bemerkt werden, dass die Interpretation der Ultraschall- sowie der thermografischen Messungen eine interdisziplinäre Zusam-

menarbeit zwischen betreuendem Restaurator und Geophysiker verlangt. Sowohl Ultraschall-Oberflächen-Messungen als auch thermografische Untersuchungen werden als eine ergänzende, hilfreiche Analysemethode angesehen, die zerstörungsfrei zur Registrierung oberflächennaher Materialeigenschaften von Putzen eingesetzt werden kann.

DANK

Wir danken den Studierenden der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Nils Dörr, Madeline Evers, Helen Heinisch, Jan Ridderbusch und Eva Wortmeyer für die Unterstützung bei der Durchführung und Auswertung der Messungen.

15 Aktive Thermografie – Temperaturdifferenz zum Referenzblock im Bereich der Testflächen: Zeitabschnitt 1 (links), Zeitabschnitt 2 (rechts).



InfraTec-GmbH: User manual variocam hr head, 2015 (<http://www.infratec.de/fileadmin/media/IRMT/Handbuecher/InfraTec-Manual-VarioCAM-hr-head.pdf>). Abgerufen: 2017-08-22).

Kalle Jepsen: Quantitative Analyse aktiver Thermographie: Schmutzkrusten an der Porta Nigra. Masterarbeit, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel 2013.

Thomas Meier, Michael Auras, Ercan Erkul, Daniel Köhn, Dirk Niehoff und Filiz Bilgili: Zerstörungsfreie Untersuchung von Beton mittels Ultraschall bzw. GPR (ground penetrating radar) – eine Laborstudie und Anwendungsbeispiele. In: Michael Raupach (Hrsg.): 4. Kolloquium „Erhaltung von Bauwerken“, Tagungshandbuch 2015, Technische Akademie Esslingen, Esslingen 2015, S. 345-353.

Thomas Meier, Michael Auras, Moritz Fehr, Daniel Köhn, Tim Steinkraus, Felix Eckel, Robert Sobott, Siegfried Siegesmund, Detlef Schulte-Kortnack und Ercan Erkul: Untersuchung der Verwitterung von Naturstein mit Ultraschall-Oberflächen-Messungen. In: Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger und Otto Wölbert (Hrsg.): Natursteinsanierung, Stuttgart 2016, S. 57-72.

Thomas Meier, Michael Auras, Moritz Fehr, Daniel Köhn, Luigia Cristiano, Robert Sobott, Ilaria Mosca, Hans Ettl, Felix Eckel, Tim Steinkraus, Ercan Erkul, Detlef Schulte-Kortnack, Karin Sigloch, Filiz Bilgili, Elena Di Gioia und Claudio Parisi Presicce: Investigating surficial alterations of natural stone by ultrasonic surface measurements. In: Nicola Masini und Francesco Soldovieri (Hrsg.): Sensing the Past, Geotechnologies and the Environment, Vol. 16, 2017, S. 257-288.



Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Bei der Konservierung von Kulturgut setzt sich immer mehr die Erkenntnis durch, dass eine so komplexe Aufgabe in hohem Maße interdisziplinäre Kooperation erfordert. Dies trifft auf Wandmalereien in ganz besonderer Weise zu. Sie stellen ein Verbundsystem aus Mauerwerk, Putz und Malschicht dar und sind sowohl technisch als auch ästhetisch in eine architektonische Umgebung eingebunden. Als äußerst dünne und empfindliche Schicht bilden Wandmalereien eine Grenzfläche zwischen der architektonischen Umgebung und der Umwelt. Sie sind deshalb in besonderer Weise einer Vielzahl unterschiedlicher Schadensfaktoren ausgesetzt und ihre Zerfallerscheinungen müssen in diesem Kontext diskutiert werden. Bei der Bewertung von Schadenszuständen müssen zunächst immer die Kunst- und Baugeschichte, die Restaurierungsgeschichte und die Nutzungsgeschichte betrachtet werden. Daneben ist die aktuelle Schadensdynamik unter Berücksichtigung der verschiedenen Schadensfaktoren zu betrachten, wobei vor allem materialwissenschaftliche Aspekte und die Wechselwirkung mit dem Umgebungsklima eine zentrale Rolle spielen. Dies zu leisten erfordert interdisziplinäre Kooperation, das hat auch das hier vorgestellte Forschungsprojekt bestätigt.

Bereits Planung und Beantragung des Vorhabens erfolgten durch eine Arbeitsgruppe der späteren Projektpartner aus dem Fachbereich Chemie der Universität Hamburg, dem Landeskirchenamt Kiel (Dezernat Bauwesen), der Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege (im Restaurierungszentrum Kiel) und dem Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein. Ausgehend von einer sorgfältigen Analyse des kunst- und baugeschichtlichen Hintergrundes, der aktuellen baulichen Situation und Nutzung, der langen Restaurierungsgeschichte und der Untersuchungen am Objekt in den vergangenen Jahren wurden für das gemeinsame Vorhaben drei Ziele als vordringlich erachtet.

Im Fokus stand zunächst die auf den Maleroberflächen häufig anzutreffende starke Vergipsung, die vielfach als gelbliche Kruste wahrgenommen wird und das ästhetische Empfinden beeinträchtigt. Nach früheren Maßnahmen zur Entfernung der Vergipsungen wurden vielfach schnelle Neuverkrustungen sowie die damit einhergehenden

gelblichen Verfärbungen der Maleroberflächen beobachtet. Als Arbeitshypothese für die schnelle Neuverkrustung wurde bei der Beantragung des Vorhabens zunächst von einer andauernden Infiltration des Außenmauerwerks in Verbindung mit einer erhöhten Mobilisierung von Gips als Folge der hohen Gehalte an hygroscopischen Salzen im Mauerwerk ausgegangen. Im Verlauf der Untersuchungen sowohl am Objekt als auch in begleitenden Laborexperimenten stellte sich allerdings heraus, dass oberflächliche Gipsanreicherungen als Ursache der gelblichen Verkrustungen nicht in Betracht kommen. Die Zielsetzung musste deshalb neu definiert werden und galt fortan der analytischen Charakterisierung der gelblichen Beläge und der Entwicklung eines Verfahrens zu ihrer Entfernung. Beide Ziele konnten in enger Kooperation der Projektpartner erreicht werden. In akribischer Detektivarbeit ist es gelungen, unter Verwendung historischer Aufnahmen den Zeitraum für das erstmalige Auftreten der Vergilbungen auf vor 1933 zu datieren und schließlich durch den kombinierten Einsatz verschiedener analytischer Methoden Schellack als Hauptverursacher zu identifizieren.

Nach Alterung verfärbt sich dieses Harz typischerweise gelblich bis braun. Somit galt es, ein Verfahren zur Entfernung des Schellacküberzuges zu entwickeln. Auch dieses Teilziel konnte erfolgreich bearbeitet werden. Dazu wurde eine Vielzahl unterschiedlicher Lösungsmittel beziehungsweise Lösungsmittelkombinationen in Musterflächen erprobt. Der Durchbruch gelang schließlich auf Grundlage der Erkenntnis, dass durch das bei der Gipsumwandlung eingesetzte Ammoniumcarbonat zumindest eine temporäre Reduzierung des gelblichen Überzuges erzielt wurde. In der Folge wurden Testfelder mit Ammoniumcarbonatkompressen unterschiedlicher Einwirkzeit und in Kombination mit weiteren Lösungsmitteln angelegt. Die Kombination von Ammoniumcarbonat und Ethylacetat führte schließlich zum Erfolg. Das restauratorische Konzept zur Entfernung von Vergipsungen und Vergilbungen stützt sich deshalb auf die Bariumhydroxidmethode, die um das beschriebene Verfahren zur Entfernung der Schellacküberzüge ergänzt wird. Auch Entwicklung und Überprüfung des restauratorischen Konzeptes erfolgten in enger Kooperation der Projektpartner mit

umfangreichen Testflächen und begleitenden analytischen Untersuchungen sowie zerstörungsfreien Messungen. Hier wurden neben Messungen zum hygri-schen Verhalten der Malereiflächen mit der Kammermethode auch Ultraschallmessungen und die Thermografie erfolgreich eingesetzt. Die beiden zuletzt genannten Methoden wurden vom Institut für Geowissenschaften der Christian-Albrechts-Universität Kiel beigesteuert.

Neben der rein ästhetischen Wirkung der oberflächlichen Krusten galt ein besonderes Augenmerk der Wechselwirkung der Malereiflächen und der in hohen Konzentrationen im Mauerwerk vorhandenen Salze mit dem Umgebungsklima. Ein weiteres Teilziel bestand in der Beantwortung der Frage, ob sich die beobachteten Krusten und die damit einhergehenden oberflächlichen Verdichtungen negativ auf den Feuchtegehalt, also das Wasseraufnahme- und Wasserabgabeverhalten des Mauerwerks auswirken. Zu diesem Zweck wurden zerstörungsfreie Messungen des Trocknungsverhaltens des Mauerwerks mit der sogenannten Kammermethode durchgeführt. Eine auf die Wandoberfläche aufgesetzte Messkammer wurde mit trockener Luft durchströmt. Durch Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit am Ein- und Ausgang der Kammer war es möglich, den Wasserdampfstrom aus der Wand (Zunahme der Feuchtigkeit bei der Durchströmung) quantitativ zu bestimmen. Entsprechende Messungen wurden in verschiedenen Positionen durchgeführt und es bestätigte sich, dass mit zunehmender Verkrustung der Oberflächen der Trocknungsvorgang immer langsamer verläuft. In stark verkrusteten Bereichen wurde auf Grund der Oberflächenverdichtung eine nahezu vollständige Trocknungsblockade beobachtet.

Messungen mit der Kammermethode konnten deshalb auch gewinnbringend genutzt werden, um den Erfolg von Gipsumwandlung und Entfernung der Schellacküberzüge in den Testflächen durch Messungen vor und zu verschiedenen Zeitpunkten nach dem Anlegen der Testfelder zu überprüfen. Das große Potential dieser Untersuchungsmethode konnte schließlich auch in ergänzenden Labormessungen demonstriert werden. Hierbei wurde die Methode zur Bestimmung

der erhöhten hygroskopischen Wasseraufnahme durch salzkontaminierte Materialien eingesetzt. Solche zerstörungsfreien Messungen liefern wichtige Informationen über die im Mauerwerk vorhandenen Salze oder Salzgemische und ihr Verhalten bei bestimmten raumklimatischen Verhältnissen. Die Wechselwirkung von Salzen mit dem Raumklima ist für die Dynamik des Schadensprozesses von entscheidender Bedeutung. Bei stark schwankenden klimatischen Bedingungen kommt es zyklisch zur Kristallisation (bei niedriger Luftfeuchtigkeit) und erneuter Auflösung (bei hoher Luftfeuchtigkeit) und damit unweigerlich zur schnellen Schädigung eines Mauerwerks beziehungsweise einer Maleroberfläche. Umgekehrt können bei günstigen klimatischen Bedingungen auch hohe Salzkonzentrationen in einem Mauerwerk toleriert werden. Der Schwahl weist eine hohe Belastung mit hygroskopischen Nitraten und Chloriden auf, die wegen ihrer gleichmäßigen Verteilung im Mauerwerk durch übliche Salz-minderungsmaßnahmen nicht entfernt werden konnten. Das bedeutet, dass nur durch strenge Einhaltung verträglicher raumklimatischer Verhältnisse die Salzschi-den sicher unterbunden werden können. Als weiteres Teilziel des Vorhabens sollte deshalb ein Konzept für ein Klimamonitoring erarbeitet werden, das zukünftig durch kontinuierliche Überwachung die Einhaltung kritischer raumklimatischer Parameter ermöglicht.

Die Auswertung der bereits seit einigen Jahren laufenden Klimamessungen hat bestätigt, dass im Schwahl durchgängig hohe relative Luftfeuchtigkeiten vorliegen. Dies ist Folge der Zwangsbelüftung der Fenster und der daraus resultierenden Ankopplung des Raumklimas an das Außenklima. Unter diesen Bedingungen kommt es nicht zur Salzkristallisation, es ist allerdings mit einer erhöhten hygroskopischen Durchfeuchtung der Malschichten in Bereichen mit hoher Salzbelastung zu rechnen. Als negative Folge der Anbindung an das Außenklima treten weiterhin im Frühjahr Taupunktunterschreitungen auf, da sich der im Winter ausgekühlte Baukörper langsamer erwärmt als die Außenluft. Auch mikrobiologische Aktivität kann durch zu hohe Raumluftfeuchtigkeiten gefördert werden. Es ist deshalb geboten, auch zukünftig die Male-

reien regelmäßig zu beobachten, insbesondere zu Zeiten kritischer raumklimatischer Bedingungen. Die Voraussetzungen hierfür wurden im Rahmen des Vorhabens durch Einbindung des bestehenden Klimamesssystems in ein netzwerkbasierendes Klimamonitoring-System geschaffen, das den Objektverantwortlichen Zugriff in Echtzeit gewährleistet und sie bei Auftreten kritischer Messwerte automatisch benachrichtigt.

Um kritische raumklimatische Bedingungen besser einzugrenzen, unter denen Salzkristallisationsprozesse auftreten können, wurden rechnerische Simulationen und ergänzende Labormessungen durchgeführt. Dabei wurde ausgehend von den im Schwahl vorliegenden Salzgehalten und Mischungszusammensetzungen das Kristallisati-

Blick in den Nordflügel des Schwahls, Aufn. 2015.



onsverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und Luftfeuchtigkeiten betrachtet. Es zeigte sich, dass in den meisten Bereichen des Schwahls Salzkristallisationen erst unterhalb von ca. 50–60 % relativer Luftfeuchtigkeit zu erwarten sind, so dass die gegenwärtigen klimatischen Verhältnisse in dieser Hinsicht unkritisch sind. Lediglich in einigen Bereichen ist mit Kristallisation auch schon bei höheren Luftfeuchtigkeiten zu rechnen, so dass dort zukünftig regelmäßige Kontrollen wichtig sind. Mit den am Schwahl typischerweise anzutreffenden Salzmischungen wurden weiterhin Laboruntersuchungen durchgeführt. Die Ergebnisse der Simulationsrechnungen wurden dabei im Wesentlichen bestätigt. Schäden durch Salzkristallisation sind erst bei sehr niedrigen Luftfeuchtigkeiten zu erwarten, die derzeit nicht oder allenfalls kurzzeitig erreicht werden. Allerdings wurde beobachtet, dass sich die Kombination von hoher Salzbelastung mit hoher Luftfeuchtigkeit, die vor allem im Winter vorliegt, nachteilig auf die Putzfestigkeiten auswirkt. Gleichzeitig besteht bei hohen Feuchtigkeiten das Risiko von biologischer Aktivität. Auch hier ist zukünftig eine regelmäßige Kontrolle anzuraten.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Rahmen des Vorhabens erfolgreich ein restauratorisches Konzept für die Malereiflächen entwickelt und überprüft wurde. Weiterhin wurden verschiedene zerstörungsfreie Messverfahren etabliert, die bei zukünftigen Untersuchungen am Schwahl und auch an anderen Objekten sinnvoll integriert werden können. Schließlich wurde ein Konzept für ein langfristiges Klimamonitoring erarbeitet und es wurden einige kritische Randbedingungen für die raumklimatischen Parameter im Schwahl definiert, auf deren Einhaltung zukünftig geachtet werden sollte. Die Ergebnisse sind das Resultat einer engen interdisziplinären Kooperation aller Beteiligten. Leider gibt es derzeit nur wenige Institutionen, die solche Projekte finanziell unterstützen. Der besondere Dank der Projektpartner gilt deshalb der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Förderung dieses Vorhabens.

Christian Leonhardt Ausblick

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt wurden Maßnahmen und Methoden zur Konservierung getestet. Es wurden Flächen kartiert und dokumentiert, an denen mikrobielles Wachstum aufgetreten war. Die Mikrobiologie wurde bestimmt und Methoden zu deren Minimierung erprobt. Die begleitenden umfangreichen Untersuchungen zu den Salzanreicherungen im Material der Mauern und der Malereien des Schwahls haben entscheidende Erkenntnisse über das Potenzial der Gefährdung zukünftiger Klimaveränderungen aufgezeigt. Wenn sich die Niederschläge und die relativen Luftfeuchten – wie im Sommer 2018 geschehen – im Jahresdurchschnitt halbieren, ist mit längeren Zeiten, in denen Grenzwerte unter 40 % relativer Luftfeuchte erreicht werden, zu rechnen.

Das DBU-Projekt hat die messtechnische Ausstattung für die laufenden und zukünftigen Klimamessungen erheblich verbessert. Die rechnerischen Simulationen und Laborversuche zum Kristallisationsverhalten der Salze im Mauerwerk liefern jetzt noch die Grenzwerte für die Alarmierung der Restauratoren. In Zukunft können die Grenzwerte der Regelentscheidung für das Öffnen und Schließen der Fenster und Türen zugrunde gelegt werden.

Eine Verminderung der raumklimatischen Schwankungen kann jedoch kaum erreicht werden, wenn gleichzeitig die Nutzung des Schwahls und des Innenhofes durch Veranstaltungen ausgeweitet wird. Bauliche Maßnahmen wie Zugangsrampen und Windfänge zum Kirchenschiff tragen den steigenden Besucherzahlen Rechnung und werden im Zuge der Domsanierung umgesetzt. Um klimatische Einflüsse durch Witterschwankungen auf das sich dem Außenklima nur verzögernd anpassende, meist kühlere Klima des Schwahls – des „kühlen Gangs“ – abzumildern, müssen weitere bauliche Maßnahmen an den Außentüren und den Fenstern diskutiert werden.

Für eine mögliche Installation von Ventilatoren oder ähnlichen Einrichtungen wurden bereits elektrische Zuleitungen außen im Traufgraben bis jeweils in die Fensterleibungen verlegt. Elektrisch angetriebene und gesteuerte Kippfenster sowie sich nach vorgegebenen Parametern schließende

Türen sind denkbar, so zum Beispiel das automatische Schließen der Fenster und Türen vor dem Durchzug einer Warmfront im Frühjahr. Ein Abdichten der Schlitze zwischen Fensterrahmen und -leibung wäre im Zusammenhang mit dem Einbau von elektrischen Lüftern zu prüfen.

All diese technischen Maßnahmen können die Fortführung der Wartung, das Klimamonitoring und die Fortschreibung der Dokumentation nicht ersetzen, sondern nur ergänzen. In den Jahren nach dem DBU-Projekt sind fortlaufende Nachsorgeuntersuchungen und Maßnahmen unerlässlich. An den Wand- und Gewölbemalereien waren in den letzten Jahren kontinuierlich Malschichtfestigungen erforderlich und wurden ausgeführt. Auch in den folgenden Jahren wird dies notwendig sein. Das Entfernen der Staubablagerungen gerade auf der schrägen Nordwand und den Unregelmäßigkeiten der Aufmauerungen müssen zur Vorbeugung eines erneuten mikrobiellen Bewuchses fortgesetzt werden. Die Flächen mit Mikroorganismen müssen weiterhin in Beobachtung bleiben und falls erforderlich behandelt werden.

Im Rahmen des Projektes konnte Schellack als Überzug in Joch 5 identifiziert und lokalisiert werden. Es konnte eine Methode zur Reduzierung des Überzuges erprobt und deren Erfolg durch ein neu entwickeltes Ultraschall-Oberflächenmessverfahren und die Anwendung der Kammermethode evaluiert werden. Nach erneuter Reduzierung der Überzüge mit der entwickelten Methode auf einer Probefläche in Joch 5, kann diese Anwendung in Zukunft auch an den übrigen Flächen zur Anwendung kommen.

Nur durch die interdisziplinäre Arbeit im Forschungsprojekt konnten die Schadensmechanismen und die daraus resultierenden konservatorischen Aufgaben in dieser Tiefe durchdrungen werden. Auch in Zukunft wird es darum gehen die unterschiedlichen Fachdisziplinen an den Objekten zusammenzubringen. Neue Techniken, Verfahren, Methoden, Materialien und Erkenntnisse zum Erhalt können nur im Rahmen von Vorhaben in der praktischen Denkmalpflege entwickelt und erprobt werden. Unsere gemeinsame Anstrengung gilt dem Erhalt der Wandmalereien im Schwahl in ihrer Authentizität.

Abbildungsnachweis

Titel

Ostflügel, Aufn. 2018, *Alexander Voss*

S. 8

Nordflügel, Joch 12, Gewölbmalerei, Aufn. 2007, *Alexander Voss*

S. 34

Westflügel, Joch 5, Kindermord, Aufn. 2007, *Alexander Voss*

S. 95

Restaurierungsarbeiten im Westflügel, Aufn. 2011, *Dirk Jonkanski*

Vorwort

Cornelia Fehre

Zur heutigen Nutzung des Schwahls aus Sicht der Kirchengemeinde

Dirk Jonkanski

Ziele des Forschungsprojektes

1 – *Dirk Jonkanski*

2 – *Birgid Löffler-Dreyer*

Abriss zur Bau- und Kunstgeschichte

1 – *Dirk Jonkanski*

2-3 – *Plansammlung LDSH*

4 – Reproduktion aus: *Die Minnesinger in Bildern der Manessischen Handschrift (Insel-Bücherei Nr. 450), Leipzig o.J.*

5 – *Fotoarchiv LDSH*

6 – *Sönke Wurr*

7 – *Alexander Voss*

Bauliche Situation

1, 4, 8, 10-11 – *Arnulf Dahm*

2, 5-6 – *Fotoarchiv LDSH*

3 – *Plansammlung LDSH*

7, 12 – *Dirk Jonkanski*

9 – *Archiv Landeskirchenamt Kiel*

Restaurierungsgeschichte der Wand- und Gewölbmalereien

1 – *Michaela Becker*

2-6, 11-17 – *Fotoarchiv LDSH*

7-9 – *Plansammlung LDSH*

10 – *Alexander Voss*

Rückblick auf die konservatorischen Maßnahmen bis 2015

1-7 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel*

Erfassung der Bestandsmaterialien – Schadensphänomene und Schadensmechanismen

1-6, 8 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel*

7 – aus: *Henrik Schulz: Analysebericht 26.10.2007, Archäometriellabor, Hochschule für Angewandte Wissenschaft und Kunst (HAWK), Hildesheim 2007*

Evaluation baulicher Veränderungen und konservatorischer Maßnahmen bis 2015

1-2, 8-10 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel*

3-4 – aus: *Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger: Analysebericht 08.09.2016, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg, 2016*

5 – aus: *Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger: Analysebericht Februar 2017, Lehrstuhl für anorganische Chemie, Universität Hamburg, Hamburg 2017*

6 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel nach Analyseergebnissen 2011 bis 2016 von Amelie Stahlbuhk und Michael Steiger, Lehrstuhl für anorganische Chemie der Universität Hamburg*

7 – *Labor des Lehrstuhls für anorganische Chemie der Universität Hamburg, Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR in Zusammenarbeit mit Dr. Steiger*

7 – *Labor des Lehrstuhls für anorganische Chemie der Universität Hamburg, Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR in Zusammenarbeit mit Dr. Steiger*

Klimatische Einflüsse

1-4 – *Grafiken aus der im Projekt verwendeten Monitoring-Software Nagios*

Salz und Klima

7-8, 11 – *Universität Hamburg, Amelie Stahlbuhk*

Die Verwendung der Kammermethode zur Untersuchung des Wasseraufnahme- und des Wasserabgabeverhaltens poröser Materialien
2-4 – *Universität Hamburg, Amelie Stahlbuhk*

Identifizierung und Bewertung der Schädigungswirkung der gelben Oberflächenverfärbung

1-6 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel*

9 – *Universität Hamburg, Amelie Stahlbuhk*

10-12 – aus: *Carlo Lalli und Federica Innocenti: Unpublished Report, Opificio delle Pietre Dure, Firenze 2016*

Erarbeitung eines Konzeptes zur Reduzierung gealterter Fixiermittel auf Putz- und malereioberflächen

1-2, 5-9 – *Werkstatt für Kunst und Denkmalpflege GbR, Kiel*

3-4 – *Universität Hamburg, Amelie Stahlbuhk*

Ultraschall-Oberflächen- und thermografische Messungen in Joch 5

2, 4, 6-7, 10-12 – Foto: *Detlef Schulte-Kortnack*

9 – aus: *Kalle Jepsen: Quantitative Analyse aktiver Thermographie: Schmutzkrusten an der Porta Nigra. Masterarbeit, Institut für Geowissenschaften, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Kiel 2013*

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Michaela Becker

Danksagung

Alexander Voss

Verwendete Abkürzung:

LDSH – *Landesamt für Denkmalpflege Schleswig-Holstein*

Danksagung

Die Projektpartner des Forschungsprojekts danken ganz besonders der Redaktionsleitung, Diana Härtrich, die zusammen mit Andrea Kelb (Layout) das komplexe Themenheft bis zur Drucklegung betreut hat. Erst durch die fotografischen Neuaufnahmen von Alexander Voss und durch die digitale Bildbearbeitung von Cornelia Fehre und Annabelle Fürstenau wurde die Publikation anschaulich. Neben den beteiligten Institutionen,

Autoren und den bereits im Vorwort genannten Personen haben wir ganz besonders Frau Ingrid Wenk und Frau Sabine Leonhardt für ihre Mithilfe bei der Koordination der Arbeiten und deren Dokumentation zu danken. Ohne die geduldige Unterstützung der Domgemeinde wäre das Projekt nicht realisierbar gewesen. Hier gilt unser Dank besonders den beiden Küstern, Herrn Tim Schröder und Herrn Albrecht Buttmann.



Westflügel, Joch 3,
Anbetung der
Heiligen Drei
Könige, Zustand
im Mai 2018.