

UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau

Die Wandmalereien in der Kirche St. Georg
Interdisziplinarität als Schlüssel zu einer
nachhaltigen Denkmalpflege

Arbeitsheft 33
Regierungspräsidium Stuttgart
Landesamt für Denkmalpflege

 THORBECKE
Fraunhofer IRB  Verlag

UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau
Die Wandmalereien in der Kirche St. Georg
Interdisziplinarität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Denkmalpflege

UNESCO-Weltkulturerbe Reichenau

Die Wandmalereien in der Kirche St. Georg

Interdisziplinarität als Schlüssel zu einer nachhaltigen Denkmalpflege

Tagungsband des DBU-Abschlusskolloquiums 22.–24. März 2017

Herausgegeben von Dörthe Jakobs und Harald Garrecht

Mit Beiträgen von

Paul Bellendorf, Francesca Capanna, Heidrun Feldmann, Jürgen Frick, Peter Fornaro,
Harald Garrecht, Cornelia Gehrmann-Janßen, Antonio Guglielmi, Péter Hegedüs, Dörthe Jakobs,
Petra Möhlenhoff, Elka Neycheva, Boaz Paz, Karin Petersen, Simone Reeb, Manuela Reichert,
Christian Renner, Gisbert Sacher, Stefanie Scheerer, Dirk Scheuven, Lothar Schmitt,
Anna Schönemann, Susann Seyfert, Gunnar Siedler, Dana Ullmann, Sebastian Vetter,
Stephan Weinbruch, Werner Weinzierl, Claus Wolf, Jean Michel Zapf, Judit Zöldföldi

Arbeitsheft 33

Regierungspräsidium Stuttgart
Landesamt für Denkmalpflege

Fraunhofer IRB Verlag
Jan Thorbecke Verlag

Gefördert vom Ministerium für Wirtschaft, Arbeit und Wohnungsbau Baden-Württemberg –
Oberste Denkmalschutzbehörde

Die Publikation entstand in Kooperation mit der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU)
und der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA).

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie;
detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, Esslingen 2017
Herausgeber: Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart
Schriftleitung: Andrea Bräuning
Fachredaktion und Lektorat: Grit Koltermann
Redaktion: Dörthe Jakobs, Harald Garrecht

Umschlaggestaltung: Martin Kjer

Umschlagabbildung:

Vorderseite: Detail aus der Bildszene der Auferweckung des Lazarus mit Messsonde für Nahfeldklima und Oberfläche
(LAD, Dörthe Jakobs).

Rückseite von links nach rechts und von oben nach unten: Hebebühne zur Ausführung von Messungen an den Wand-
malereien im Mittelschiff, Oktober 2015 (MPA, Judit Zöldföldi), Nordwand, Bildszene der Beruhigung des Sturms auf
dem See Genezareth (Theodor Keller jun., Reichenau), Röntgenfluoreszenzanalysen an den Wandmalereien im Mit-
telschiff, Oktober 2015 (LAD, Dörthe Jakobs), Südwand, Ausschnitt aus der Bildszene der Auferweckung von Jairi
Töchterlein (fokus GmbH Leipzig), Staub und Spinnweben auf der Maleroberfläche (Abt B 2.2.1/19, LAD, Dörthe
Jakobs), Schimmelpilz-Isolate der Luftkeimmessung in St. Georg (BioPhil, Stefanie Scheerer), Mikroskopische Auf-
nahme einer Penicillium-Art aus der Luftkeimsammlung in St. Georg (BioPhil, Stefanie Scheerer), Nordwand, Detail
aus der Bildszene der Heilung des Wassersüchtigen (D 4.1.2/16, LAD, Dörthe Jakobs), Krypta, Ostwand, Installation
eines Digitalmikroskops zur Beobachtung der Malschicht (LAD, Dörthe Jakobs), Krypta, Ostwand E 50.0, Salzausblü-
hungen (LAD, Dörthe Jakobs).

Herstellung: Andreas Preising
Satz: Manuela Gantner | Punkt, STRICH.
Druck: Westermann Druck Zwickau GmbH, Zwickau
Hergestellt in Deutschland

ISBN 978-3-8167-9889-7 (Print | Fraunhofer IRB Verlag)
ISBN 978-3-8167-9891-0 (E-Book | Fraunhofer IRB Verlag)
ISBN 978-3-7995-1228-2 (Print | Thorbecke)

Alle Rechte vorbehalten. Jegliche Vervielfältigung einschließlich fotomechanischer Wiedergabe nur mit ausdrücklicher
Genehmigung des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart.

Die hier zitierten Normen sind mit Erlaubnis des DIN Deutsches Institut für Normung e. V. wiedergegeben. Maßgebend
für das Anwenden einer Norm ist deren Fassung mit dem neuesten Ausgabedatum, die bei der Beuth Verlag GmbH,
Burggrafenstraße 6, 10787 Berlin, erhältlich ist.

Die Wiedergabe von Warenbezeichnungen und Handelsnamen in diesem Buch berechtigt nicht zu der Annahme, dass
solche Bezeichnungen im Sinne der Warenzeichen- und Markenschutz-Gesetzgebung als frei zu betrachten wären
und deshalb von jedermann benutzt werden dürften.

Sollte in diesem Werk direkt oder indirekt auf Gesetze, Vorschriften oder Richtlinien (z. B. DIN, VDI, VDE) Bezug ge-
nommen oder aus ihnen zitiert werden, kann der Verlag keine Gewähr für Richtigkeit, Vollständigkeit oder Aktualität
übernehmen. Es empfiehlt sich, gegebenenfalls für die eigenen Arbeiten die vollständigen Vorschriften oder Richtli-
nien in der jeweils gültigen Fassung hinzuzuziehen.

Für die Schwabenverlag AG ist Nachhaltigkeit ein wichtiger Maßstab ihres Handelns.
Wir achten daher auf den Einsatz umweltschonender Ressourcen und Materialien.

© Fraunhofer IRB Verlag, 2017
Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau IRB
Nobelstraße 12, 70569 Stuttgart
Telefon +49 711 970-2500
Telefax +49 711 970-2508
irb@irb.fraunhofer.de
www.baufachinformation.de

*Kommissionsverlag des Landesamts für Denkmalpflege
für die Reihe Arbeitshefte:*
Jan Thorbecke Verlag der Schwabenverlag AG
Senefelderstraße 12, D-73760 Ostfildern
Telefon +49 711 44 06-0
Telefax +49 711 44 06-199
kundenservice@verlagsgruppe-patmos.de
www.thorbecke.de

Inhalt

Tagungsprogramm	8
Vorwort des Präsidenten <i>Claus Wolf</i>	11
Vorwort der Herausgeber <i>Dörthe Jakobs und Harald Garrecht</i>	13

Einführungen

Wie lässt sich ein Vorhaben zum Erhalt der Wandmalereien in St. Georg in den Förderkanon einer Umweltstiftung einordnen? <i>Paul Bellendorf</i>	15
Die Bedeutung des DBU-Projektes aus Sicht der Landesdenkmalpflege <i>Claus Wolf</i>	21
Das DBU-Projekt aus Sicht der Antragsteller. Seine Bedeutung für die Natur- und Ingenieurwissenschaften <i>Harald Garrecht</i>	25
Die Klosterinsel Reichenau: Denkmalpflege im UNESCO-Weltkulturerbe <i>Susann Seyfert</i>	27
Die ottonischen Wandmalereien von St. Georg. Zur Vorgeschichte des DBU-Projektes <i>Dörthe Jakobs</i>	31
Projektziele und offene Fragen <i>Harald Garrecht</i>	43
Die Scrovegni-Kapelle in Padua: Giotto's Fresken 15 Jahre nach Einführung einer Klimasteuerung und Besucherlenkung <i>Einführung von Dörthe Jakobs</i>	55
Das Programm für die Erhaltung und Wartung der Scrovegni-Kapelle – Planung, Ergebnisse und Perspektiven <i>Francesca Capanna, Antonio Guglielmi</i>	57

Dokumentation

Die Dokumentation der Wandmalereien in den 1980er Jahren und Anforderungen an ihre Fortschreibung <i>Dörthe Jakobs</i>	63
Die hochauflösende photogrammetrische Dokumentation des Wandmalereizyklus im Mittelschiff <i>Gisbert Sacher, Gunnar Siedler, Sebastian Vetter</i>	73
Reflectance Transformation Imaging (RTI). Eine digitale Reproduktionstechnik zur Dokumentation von Wandmalereien <i>Peter Fornaro, Lothar Schmitt, Heidrun Feldmann</i>	81
Systematisches und nachhaltiges Management der materialwissenschaftlichen Daten von St. Georg <i>Judit Zöldföldi, Péter Hegedüs</i>	89

Material

Material und Erscheinungsbild: Alte und neue Erkenntnisse zu den Ausmalungen des 10. Jahrhunderts im Mittelschiff und in der Krypta <i>Dörthe Jakobs</i>	95
Pigmentanalytische Untersuchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf Reichenau <i>Anna Schönemann, Boaz Paz</i>	105
Zerstörungsfreie und minimalinvasive Untersuchungen zu Feuchte- und Salzbelastungen in der Krypta von St. Georg auf der Reichenau <i>Judit Zöldföldi</i>	111

Mikrobiologie

Die Gefährdung von Wandmalereien durch mikrobiellen Befall. Möglichkeiten der Prävention und der Abtötung von Schimmel <i>Cornelia Gehrman-Janßen, Petra Möhlenhoff, Karin Petersen</i>	125
Mikrobiologische Untersuchungen in der Krypta und an den Wandmalereien im Kirchenschiff <i>Stefanie Scheerer</i>	143
Raumluft-Monitoring in St. Georg auf der Reichenau: Leichtflüchtige organische Verbindungen, Staubpartikel und deren Quellen <i>Manuela Reichert, Jürgen Frick, Dirk Scheuvens, Jean Michel Zapf, Werner Weinzierl</i>	157
Möglichkeiten und Herausforderungen der Einzelpartikelanalyse in denkmalgeschützten Innenräumen <i>Stephan Weinbruch, Dirk Scheuvens</i>	177

Klima

Restauratorische Begleitung von Klimamessungen <i>Dörthe Jakobs</i>	181
20 Jahre Klimamessungen in St. Georg. Auswertung, Ergebnisse und Bewertung – Werkzeuge, Methoden und Bewertungstool <i>Elka Neycheva</i>	185
Thermisch-hygrisches Verhalten der Wandmalereien unter realen Klimalasten <i>Harald Garrecht, Simone Reeb, Christian Renner, Dana Ullmann</i>	195
Klimamonitoring und kontrollierte Maßnahmen zur Raumlufverbesserung <i>Harald Garrecht</i>	211

Ausblick

Fazit und Ausblick <i>Dörthe Jakobs, Harald Garrecht</i>	223
---	-----

Anhang

Bildpläne mit Kartierungen	227
Autoren/Adressen	245



VERANSTALTUNGSORT

Insel Reichenau
 Tagungsstätte Haus Insel Reichenau
 Markusstraße 15, 78479 Reichenau
www.familienferien-freiburg.de/kontakt-anfahrt/

VERANSTALTER

Landesamt für Denkmalpflege
 im Regierungspräsidium Stuttgart
 Berliner Straße 12
 73728 Esslingen am Neckar
www.denkmalpflege-bw.de

PROJEKTPARTNER



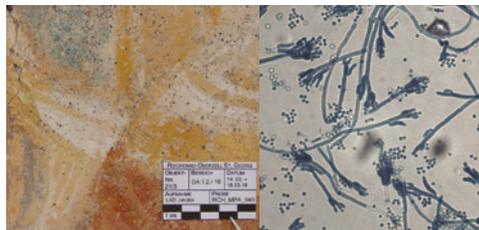
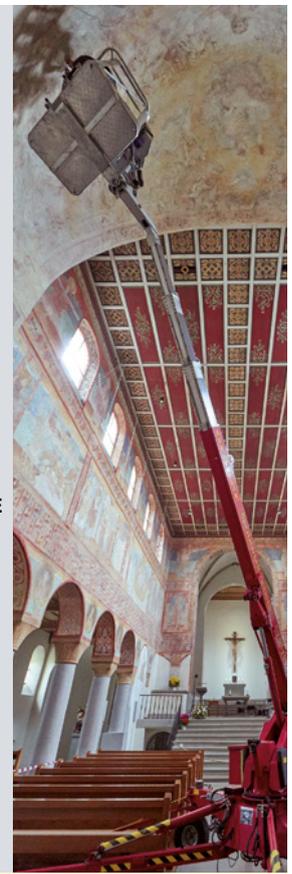
DENKMALPFLEGE DENKMALPFLEGE FACHTAGUNG

UNESCO- WELTKULTURERBE REICHENAU

Die Wandmalereien in
 der Kirche St. Georg

Interdisziplinär
 als Schlüssel zu
 einer nachhaltigen
 Denkmalpflege

22.-24. März 2017



ABSCHLUSSKOLLOQUIUM

Die Tagung befasst sich mit den Untersuchungsergebnissen aus einem zwei Jahre dauernden Forschungsprojekt zu den Wandmalereien von St. Georg auf der Insel Reichenau (UNESCO Welterbe). In einem DBU-Projekt haben sich die Projektbeteiligten, ausgehend von den Untersuchungen der 1980er Jahre, mit dem Bestand und dessen Materialität befasst. Im Zentrum standen Überlegungen zu Möglichkeiten der Fortschreibung der Dokumentation und die Bewertung von mikrobiellem Befall infolge von starken Klimaschwankungen. Ein Schwerpunkt war auf die Frage der Zusammenhänge zwischen Raumlufthumidität und Besucherintensität gelegt, gekoppelt an ein Raumlufthumiditäts-Monitoring. Hauptbestandteile des DBU-Projektes waren ein Klima-Monitoring sowie die Klimastabilisierung in Krypta und Mittelschiff als Beitrag zum langfristigen Erhalt der Wandmalereien. Zum Abschluss der Tagung werden vor Ort in der Kirche St. Georg die angewandten Vorgehensweisen und Maßnahmen erläutert: Die gewählten, erprobten sowie teils weiterentwickelten Arbeitsmethoden zur Zustandserfassung und die ausgearbeiteten Maßnahmen zur Verbesserung der Raumlufthumiditätsverhältnisse.

TAGUNGSGEBÜHR

- 130,00 € regulär
- 100,00 € Mitglieder VDR
- 60,00 € Studenten, Praktikanten, Volontäre
 Mitarbeiter LAD BW und MPA

Die Tagungsgebühr enthält den Tagungsband mit den Beiträgen der Tagung sowie das Catering (Abendessen 22.-23. März, Mittagessen 23. März, Kaffeepausen)

ANMELDUNG

Wir bitten um Anmeldung bis zum 08. März 2017 unter:
www.denkmalpflege-bw.de/service/veranstaltungen

Die Teilnehmerzahl ist begrenzt, die Bearbeitung erfolgt nach Anmeldeeingang. Die Bankverbindung für die Überweisung der Tagungsgebühr wird Ihnen in der Anmeldebestätigung genannt.

ANSPRECHPARTNER

reichenau-dbu@denkmalpflege-bw.de

BILDNACHWEIS

Gisbert Sacher, fokus GmbH Leipzig
 Dörthe Jakobs, LAD
 Stefanie Scheerer, BioPhil Stuttgart



TAGUNGSPROGRAMM

MITTWOCH 22. MÄRZ 2017

12:00 **ERÖFFNUNG** TAGUNGSBÜRO

13:30 **GRUSSWORTE**

Pater Stephan Vorwerk OSB
Pfarrgemeinde Reichenau
Dr. Wolfgang Zoll
Bürgermeister Insel Reichenau
Stefan Bertels
Leiter des Erzbischöflichen Bauamts Konstanz

EINFÜHRUNGEN

Moderation: Dr. Ulrike Plate, LAD

14:00 **Das DBU-Projekt aus Sicht des Fördermittelgebers:
Wie lässt sich ein Vorhaben zum Erhalt der Malereien
in St. Georg in den Förderkanon einer Umweltstiftung
einordnen?**
Dr. Paul Bellendorf, Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU)

14:30 **Das DBU-Projekt aus Sicht der Antragsteller.
Seine Bedeutung für Denkmalpflege und Wissenschaft.**
Prof. Dr. Claus Wolf
Präsident des Landesamtes für Denkmalpflege im
Regierungspräsidium Stuttgart (LAD)
Prof. Dr. Harald Garrecht
Direktor der Materialprüfungsanstalt (MPA),
Universität Stuttgart

15:00 **Die Klosterinsel Reichenau: Denkmalpflege im
UNESCO-Weltkulturerbe**
Susann Seyfert, LAD

15:30 Kaffeepause

16:00 **Die ottonischen Wandmalereien von St. Georg:
Zur Vorgeschichte des Projektes**
Dr. Dörthe Jakobs, LAD

16:30 **Projektziele und offene Fragen**
Prof. Dr. Harald Garrecht, MPA

17:00 **Die Scrovegni-Kapelle in Padua:
Giotto's Fresken 15 Jahre nach Einführung einer
Klimasteuerung und Besucherlenkung**
Francesca Capanna, Istituto Superiore per la Conservazione
ed il Restauro Roma, Italien

17:30 Diskussion

18:00 Abendessen

ABENDVERANSTALTUNG

**Reichenau-Oberzell, St. Georg
Der ottonische Wandmalereizyklus:
Zum kunsthistorischen Forschungsstand**
Dr. Matthias Exner, Bayerisches Landesamt für
Denkmalpflege, München

20:30 **Klingende Wände**
Roland Uhl (Orgel), Ines Happel-Lung (Flöte und Gesang)

DONNERSTAG 23. MÄRZ 2017

DOKUMENTATION

Moderation: Andreas Menrad, LAD

08:30 **Die Dokumentation der 1980er Jahre und Anforderungen
an ihre Fortschreibung**
Dr. Dörthe Jakobs, LAD

09:00 **Die hochauflösende photogrammetrische
Dokumentation des Wandmalereizyklus im Mittelschiff**
Gisbert Sacher, Gunnar Siedler, Sebastian Vetter,
fokus GmbH Leipzig

09:30 **Reflectance Transformation Imaging (RTI): eine
digitale Reproduktionstechnik zur Dokumentation von
Wandmalereien**
Dr. Peter Fornaro, Digital Humanities Lab, Universität Basel

10:00 **Systematisches und nachhaltiges Management der
materialwissenschaftlichen Daten von St. Georg**
Dr. Judit Zöldföldi, MPA
Péter Hegedüs, Bóly, Ungarn

10:30 Kaffeepause



(2) Reichenau, Krypta, Halle, 2 Arten, 7 Tage alt



MATERIAL

Moderation: Otto Wölbart, LAD

11:00 **Was darf man von Materialanalysen aus
restauratorischer Sicht erwarten?**
Prof. Roland Lenz, Staatliche Akademie der Bildenden
Künste Stuttgart (ABK), Lehrstuhl für Konservierung
und Restaurierung von Wandmalerei, Architekturober-
fläche und Steinpolychromie

11:30 **Zu den Pigmentanalysen der Wandmalereien. Verfahren
und neue Erkenntnisse für die Kunstwissenschaft**
Prof. Dr. Anna Schönemann, Hochschule für Technik und
Wirtschaft, Berlin
Dr. Boaz Paz, Paz-Laboratorien für Archäometrie,
Bad Kreuznach
Dr. Dörthe Jakobs, LAD

12:15 **Zerstörungsfreie und minimalinvasive Untersuchungen
zu Feuchte- und Salzbelastungen**
Dr. Judit Zöldföldi, MPA

12:45 Mittagessen

MIKROBIOLOGIE / LUFTKEIMMESSUNGEN

Moderation: Prof. Dr. Harald Garrecht, MPA

14:00 **Die Gefährdung von Wandmalereien durch mikrobiellen
Befall. Möglichkeiten der Prävention und der Abtötung
von Schimmel**
Prof. Dr. Karin Petersen, Dr. Cornelia Gehrmann-Janßen,
Dr. Petra Möhlenhoff
Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst
(HAWK), Fakultät Bauen und Erhalten, Hildesheim,
Holzminden, Göttingen

14:30 **Mikrobiologische Untersuchungen in der Krypta und
an den Wandmalereien im Kirchenschiff**
Dr. Stefanie Scheerer, BioPhil Stuttgart

15:00 **Raumluft-Monitoring: Leichtflüchtige organische
Verbindungen, Staubpartikel und deren Quellen**
Dr. Manuela Reichert, Dr. Jürgen Frick, MPA
Dr. Dirk Scheuvsen, Technische Universität Darmstadt
Dr. Werner Weinzierl, Landesamt für Geologie, Rohstoffe
und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg

15:45 **Möglichkeiten und Herausforderungen der Einzel-
partikelanalyse in denkmalgeschützten Innenräumen**
Prof. Dr. Stephan Weinbruch, TU Darmstadt

16:15 Kaffeepause

KLIMA

Moderation: Dr. Ulrike Henes-Klaiber
Büro für Bauphysik, Bauchemie und Denkmalpflege, Forbach

16:45 **20 Jahre Klimamessungen in St. Georg
Auswertung, Ergebnisse und Bewertungen –
Werkzeuge, Methoden und Bewertungstool**
Elka Neycheva, Institut für Werkstoffe im Bauwesen (IWB),
Universität Stuttgart

17:15 **Thermisch-hygrisches Verhalten der Wandmalereien
unter realen Klimabelastungen**
Simone Reeb, IWB

17:45 **Klimamonitoring und kontrollierte Maßnahmen zur
Raumluftverbesserung**
Prof. Dr. Harald Garrecht, MPA

18:15 Abschlussdiskussion
Moderation: Dr. Dörthe Jakobs, LAD
Prof. Dr. Harald Garrecht, MPA

19:00 Abendessen

FREITAG 24. MÄRZ 2017

09:00 **Besichtigung von St. Georg**
Themenführungen mit Posterpräsentationen

12:00 Tagungsende



*Luftbild von St. Georg
(LAD, Braasch).*

Vorwort des Präsidenten

Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Modellvorhaben mit dem Titel „Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg – UNESCO-Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau. Anforderungen, Konzeptentwicklung, Umsetzung und Erprobung einer prädiktiven Raumluftkonditionierung“ findet mit der Tagung vom 22.-24. März 2017 auf der Reichenau seinen Abschluss.

Das DBU-Projekt ist nicht isoliert zu betrachten, sondern es führt das nunmehr über 35 Jahre andauernde Engagement der Denkmalpflege für das kulturelle Erbe auf der Reichenau konsequent fort.

In den 1980er Jahren wurde unter Leitung des damaligen Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg ein Pilotprojekt initiiert, das eng verbunden ist mit den Namen der damaligen Kollegen: August Gebeßler, Helmut F. Reichwald und Wolfgang Stopfel. Ziel dieses Projektes war eine umfassende Bestandsaufnahme und Untersuchung von St. Georg. Hier wurden Maßstäbe für die Denkmalpflege und Restaurierung inner- und außerhalb Baden-Württembergs gesetzt. Bis heute bildet die in ihrer Methodik wegweisende Dokumentation die Grundlage für sämtliche Nachfolgeprojekte (vgl. Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg in Baden-Württemberg 9, 1999).

Im Jahr 2000 folgte die Aufnahme der Klosterinsel Reichenau in die UNESCO-Weltkulturerbeliste. Der Antrag für die Aufnahme der Reichenau in die Liste des Weltkulturerbes wurde im Auftrag des Landes Baden-Württemberg vom Landesdenkmalamt erarbeitet und der Öffentlichkeit im Jahr 2001 in einer eigenen Publikation vorgelegt (Klosterinsel Reichenau im Bodensee. UNESCO Weltkulturerbe, Arbeitshefte Landes-

amt für Denkmalpflege 8, Stuttgart 2001). Seitdem befassten sich mehrere Tagungen und Workshops auf der Reichenau mit den Chancen und Risiken des Welterbe-Titels. Im Jahr 2003 war dies die Arge-Alp-Tagung mit dem Thema: „UNESCO-Welterbe: Lust und Last?!“ (Arbeitshefte Landesamt für Denkmalpflege 14, Stuttgart 2004). Erstmals wurden hier die Zusammenhänge und Wechselwirkungen von Tourismus und Klimaproblemen durch Helmut F. Reichwald thematisiert.

2004 organisierte das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg gemeinsam mit ICOMOS Deutschland ein wissenschaftliches Kolloquium zum Thema „Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes“. Hier wurde der Tagungsort „Reichenau“ mit Bedacht gewählt, da Klimaprobleme und mikrobieller Befall die Wandmalereien zunehmend gefährdeten. Erstmals widmete sich damit eine Tagung ausschließlich dem Thema „Klimastabilisierung und Bauphysik“ (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees, XLII, 2005). In den Vorträgen wurden u. a. raumklimatische Untersuchungen und klimatische Auswirkungen von Besucherströmen, Besucherlenkung, Klimatisierung und Klimaregulierung sowie Einhausung und Schutzverglasungen thematisiert. Zu Recht darf man im Rückblick feststellen, dass diese Tagung die Initialzündung für das bis heute in zahlreichen Tagungen und internationalen Forschungsprojekten ungebrochen aktuelle Thema „Klimaproblematik“ war.

Nur wenige Jahre später erreichte das Thema eine breitere Öffentlichkeit, wie die Fachtagung der Deutschen Stiftung Denkmalschutz „Neue Wege des Denkmaltourismus in Baden-Württemberg“ mit der Sektion „UNESCO und die Folgen“ im Oktober 2007 in Berlin zeigte, die sich in den Themenblock der kritischen Auseinandersetzung von

Welterbetitel, Tourismus und deren Auswirkungen auf die Denkmalsubstanz einfügte.

Wieder auf der Reichenau selbst fand im Juni 2011 ein vom Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart organisierter internationaler Workshop zum Thema Klimastabilisierung unter dem Titel „Monitoring for Culture and Tourism“ statt. Bedauerlicherweise wurde ein in diesem Zusammenhang beantragtes Interreg-Forschungsprojekt zum Thema Klimawandel und stetig anwachsender Tourismus im Alpenraum abgelehnt, obwohl das Problem der aus der zunehmenden Besucherfrequenz resultierenden negativen Einflüsse auf die Raumklimata, verbunden mit Verschmutzung und potentieller Gefährdung durch Schimmel bis heute aktuell ist. So hat die Reichenau jährlich ca. 250.000 Übernachtungsgäste, die Tagestouristen werden mangels Erfassungsmöglichkeiten nicht gezählt, die Anzahl dürfte um ein vielfaches höher liegen. Welche Auswirkungen diese zunehmende Besucherintensität auf das einzelne Bauwerk hat, wird im vorliegenden Tagungsband eindrücklich beleuchtet.

Um die nachhaltige Nutzung von Kulturdenkmälern sicherzustellen, muss über die Möglichkeiten der Lenkung von Besucherströmen nachgedacht werden. Grundlage hierfür bilden umfassende Raumklimamessungen sowie ein weitreichendes und übertragbares Lenkungsverfahren für die Besucher.

Teil des Forschungsvorhabens und somit des DBU-Antrags war unter anderem auch die Ermittlung der Anforderungen für eine Schadensvermeidung und daraus resultierend die Steuerung des Raumklimas innerhalb eines Klimakorridors, der in der Krypta beispielsweise sowohl die Kristallisation von Salzen als auch das Schimmelwachstum verhindert.

An dieser Stelle möchte ich den am Projekt beteiligten Kollegen ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit danken. Allen voran Prof. Dr. Harald Garrecht (Direktor der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart) und Dr. Dörthe Jakobs aus unserem Hause. Beide sind seit Jahren bestrebt, die mit den klimatischen Einwirkungen verbundenen Beanspruchungen der Wandmalereien zu identifizieren, um geeignete Lösungsansätze zur Vermeidung einer weiteren Schädigung zu entwickeln und auf deren Wirkung hin zu erproben. Als Folge der vorgenannten Arbeiten und der noch ungeklärten Fragen fassten beide den Beschluss, nach einem Förderer zu suchen und sich mit dessen Unterstützung in einem interdisziplinären Team der offenen und ungeklärten Themen anzunehmen.

So entstand das DBU-Forschungsvorhaben, dessen inhaltlichen, strukturellen und organisatorischen Arbeitsinhalte und die im Förderzeitraum erzielten Ergebnisse im Verlauf der Tagung vorgestellt werden. Wir sind dankbar, dass die Deutsche Bundesstiftung Umwelt zum 1. Januar 2015 den Förderantrag bewilligt hat, sodass sich ein interdisziplinäres Team aus Denkmalpflegern und Denkmalpfleger/innen, Restauratoren/innen, sowie Natur- und Ingenieurwissenschaftler/innen seither den im Förderantrag adressierten Aufgaben annehmen konnte. Die Arbeitsergebnisse aller beteiligten Disziplinen werden themenspezifisch in den folgenden Beiträgen präsentiert, bei deren Lektüre ich allen Lesern und Leserinnen viel Freude und Erkenntnisgewinn wünsche.

Claus Wolf
Esslingen im Februar 2017

Vorwort der Herausgeber

Ein Forschungsprojekt mit vielen beteiligten Disziplinen bringt neben zahlreichen spannenden Aspekten auch Überraschungen und sportliche Leistungen mit sich. Die Idee, Ihnen als Leser und Teilnehmer an der Tagung noch vor dem Abschluss des Projektes und fristgerecht zur Tagung einen Tagungsband mit den wesentlichen Inhalten liefern zu können, war eines der sportlichen Unterfangen. Das wäre nicht möglich gewesen, ohne Kompromisse einzugehen, für die wir um Verständnis bitten.

Zunächst sind da die Redaktionsrichtlinien für die Reihe der Arbeitshefte des Landesamtes für Denkmalpflege. Bereits mit Eingang der ersten Beiträge für den Band wurde deutlich, dass wir die verschiedenen Herangehensweisen von Naturwissenschaftlern und Geisteswissenschaftlern nicht ohne einen immensen redaktionellen Aufwand unter einen Hut bringen würden. Die Entscheidung, jeder Disziplin ihre Zitierweise zu belassen, war außerdem damit zu begründen, dass sich auch das Lager der Leser aus verschiedenen Disziplinen zusammensetzen würde und sich somit schneller eine Vertrautheit mit den jeweiligen Fachbeiträgen ihrer Disziplin einstellen würde. Auf eine formale Vereinheitlichung der Beiträge wurde also verzichtet.

Hingegen haben wir versucht die Schreibweise für bestimmte, immer wiederkehrende Begriffe zu vereinheitlichen. Dazu gehört z. B. der Begriff Photogrammetrie. In der Fachwelt und im deutschsprachigen Raum ist diese Schreibweise ein gesetzter Begriff und wird gleichlautend als Titel von Fachzeitschriften geführt. Dagegen haben wir uns bei dem Verweis auf Fotografien für die neue Rechtschreibung entschieden. Die Bildnachweise finden Sie jeweils in den Abbildungsunterschriften.

Für den Beitrag der italienischen Kollegen Francesca Capanna und Antonio Guglielmi haben wir uns erlaubt, eine Einführung in Form

eines Abstracts aus dem Bericht von Giuseppe Basile und seinen Kollegen zur Scrovegni-Kapelle aus dem Jahr 2005 mit den entsprechenden Verweisen voranzustellen. Dieser Beitrag erschien uns für das Verständnis der Maßnahmen in der Scrovegni-Kapelle grundlegend.

Der Zeitdruck, der auf dem Tagungsband lag, schlägt sich leider auch darin nieder, dass nicht alle Beiträge rechtzeitig zur Drucklegung vorlagen. Aufgrund des knappen Zeitrahmens sind bis zur Drucklegung auch noch nicht alle Ergebnisse der Untersuchungen vollständig ausgewertet. Dies ist bis zur Tagung geplant, da auch der Projektabschluss in diesen Zeitraum fällt. Besonders zu nennen ist hier die Auswertung der Röntgenfluoreszenzanalysen und der Raman-Spektroskopie an den Wandmalereien im Mittelschiff sowie weitere naturwissenschaftliche Analysen von archivierten Proben der 1980er Jahre und von wenigen neu genommenen Proben. In Abhängigkeit des Erkenntnisgewinns planen die Beteiligten eine weitere Fachpublikation in einer einschlägigen Zeitschrift.

Abschließend möchten wir allen Projektpartnern danken, allen voran der Katholischen Kirchengemeinde und dem Erzbischöflichen Bauamt, insbesondere Pater Stephan Vorwerk OSB, der mehrere „Unruhezeiten“ in der Kirche mit Hebebühne und vielen Wissenschaftlern in Kauf genommen hat. Dank auch an Robert Lung, der als Restaurator bereits in das Team der 1980er Jahre eingebunden war und nun im Forschungsprojekt alle naturwissenschaftlichen Einsätze vor Ort restauratorisch betreut hat. Ulrike Piper-Wölbert, ebenfalls in den 1980er Jahren als Restauratorin beteiligt, ist die Erfassung sämtlicher Probeentnahmen der 1980er Jahre mit der Auswertung von Hermann Kühn und deren Übertragung in die neuen Übersichtspläne zu verdanken. Auch die Mikrobiologin Stefanie Scheerer war bereits an einer Kampagne im Jahr 2009 zu



v. l. n. r. Simone Reeb, Judit Zöldföldi, Manuela Reichert, Stefanie Scheerer, Dirk Scheuven, Jörg Bowitz, Christian Renner, Anna Schönemann, Paul Bellendorf, Robert Lung, Dörthe Jakobs, Harald Garrecht (Magdalena Hinze, Hannover)

Ermittlung vergleichender Daten (Luftkeimmessungen u. a.) in den Phasen mit und ohne Besucherlenkung beteiligt. Zum Glück konnten wir auch Erwin Selig und Thomas Selig jun. (Fa. Infera) gewinnen, die uns zu der in den 1980er Jahren (Bankstrahlerheizung) und 2004 (Lüftungsfügel Fenster mit Steuerung) in St. Georg eingebauten Technik mit allen erforderlichen Informationen freundlicherweise versorgten. Dank auch an MOCult, die die seit 2011 betriebene Klimamessstation für das DBU-Vorhaben weiter ausgebaut und fortentwickelt haben sowie die Übernahme der Regelaufgaben zur Raumluftoptimierung in der Krypta und Kirche umsetzten.

Gisbert Sacher, Gunnar Siedler und Sebastian Vetter (fokus GmbH Leipzig) haben die neuen, hochaufgelösten Messbilder der Mittelschiffmalereien hergestellt und dabei die Kartierungen der 1980er Jahre in diese neuen Pläne zu übertragen. Stefanie Reling (Mediengestalterin, Stuttgart) ist die digitale Bearbeitung aller Pläne zu den Probenahmen der 1980er Jahre und die digitale Kartierung aller Messstellen und Proben der jetzigen Kampagne im Rahmen des DBU-Projektes zu verdanken. Auch Teresa Kolar, Volontärin im Fachgebiet Restaurierung am Landesamt für Denkmalpflege, unterstützte das Publikationsprojekt wo eben möglich mit ihren Kompetenzen in der Bild- und Planbearbeitung.

Dank auch an die Kolleginnen und Kollegen, die ihre jeweiligen Fachkompetenzen mit großem Engagement für die Sache auf Anfrage von Pro-

jektpartnern eingebracht haben. Zu nennen sind hier Boaz Paz (Paz-Laboratorien für Archäometrie), Dirk Scheuven und Jean Michel Zapf (Technische Universität Darmstadt), Werner Weinzierl (Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg) und Stephan Weinbruch (Technische Universität Darmstadt).

Ein besonderer Glücksfall im Rahmen des DBU-Projektes war es, Peter Fornaro, Lothar Schmitt und Heidrun Feldmann sowie das Team von Digital Humanities Lab der Universität Basel kennenzulernen, die just dabei waren, in einem anderen Forschungsprojekt die Möglichkeiten und Grenzen der Reflectance Transformation Imaging (RTI), einer digitalen Reproduktionstechnik, auszuloten. Dass sie die Wandmalereien von St. Georg gerne in ihr Forschungsprojekt aufgenommen haben und uns um eine technisch hochinteressante fotografische Dokumentationsform bereichert haben, dafür sei ihnen herzlich gedankt.

Ein herzlicher Dank geht an alle im Projekt beteiligten Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Materialprüfungsanstalt (MPA), und des Instituts für Werkstoffe im Bauwesen (IWB), Universität Stuttgart: Jürgen Frick, Friedrich Grüner, Corinna Luz, Manuela Reichert, Judit Zöldföldi, Simone Reeb und Christian Renner sowie Anna Schönemann, die während des Projektes an die Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW) Berlin, Fachbereich 5, Konservierung/Restaurierung gewechselt ist.

Allen Autorinnen und Autoren, Referentinnen und Referenten sei gedankt, denn ohne sie gäbe es weder eine Tagung noch ein Tagungsband. Danken möchten die Herausgeber auch Grit Koltmann vom Landesamt für Denkmalpflege, ohne deren tatkräftige Unterstützung die Publikation nicht hätte termingerecht erscheinen können.

Ein besonderer Dank gebührt Paul Bellendorf von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU), dessen Interesse und positive Einstellung zu den komplexen Fragestellungen des Projektes eine Förderung überhaupt erst möglich gemacht haben.

Dörthe Jakobs und Harald Garrecht
Esslingen und Stuttgart im Februar 2017

EINFÜHRUNGEN

Wie lässt sich ein Vorhaben zum Erhalt der Wandmalereien in St. Georg in den Förderkanon einer Umweltstiftung einordnen?

Paul Bellendorf

Deutsche Bundesstiftung Umwelt

Die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) wurde am 18.7.1990 mit einem Gesetz des Deutschen Bundestages als rechtsfähige Stiftung des bürgerlichen Rechts mit Sitz in Osnabrück gegründet. Das Stiftungsvermögen in Höhe von 2.519.123.500 DM stammte aus der Privatisierung der bundeseigenen Salzgitter AG. Zu den Aufgaben der DBU zählt gemäß Stiftungsgesetz die Förderung von „Forschung, Entwicklung und Innovation im Bereich umwelt- und gesundheitsfreundlicher Verfahren und Produkte unter besonderer Berücksichtigung kleiner und mittlerer Unternehmen“, der „Austausch von Wissen über die Umwelt zwischen Wissenschaft, Wirtschaft und anderen öffentlichen oder privaten Stellen“, die „Bewahrung und Sicherung national wertvoller Kulturgüter im Hinblick auf schädliche Umwelteinflüsse (Modellvorhaben)“ sowie die „Bewahrung und Wiederherstellung des nationalen Naturerbes (Vorhaben mit herausragender gesamtstaatlicher Bedeutung)“.¹

Die Gründungsväter der DBU waren sich bewusst, dass durch den Einfluss anthropogenen Wirkens auf die Umwelt nicht nur die Natur negativ beeinflusst wird, sondern dass auch das (national wertvolle) Kulturgut dadurch zum Teil massiv in seinem Bestand bedroht ist. Die Gründer folgten damit den Erfahrungen u. a. aus der Zeit des Waldsterbens, als man erkannte, dass der saure Regen nicht nur negative Auswirkungen

auf das Wachstum des Waldes hat, sondern auch z. B. Steinoberflächen von bedeutenden Denkmälern angreift. Von der Bundesregierung sind daraufhin von 1986 bis 1994 im Rahmen des damaligen BMFT-Förderbereichs „Bausubstanzerhaltung und Denkmalpflege“ nicht unerhebliche Mittel u. a. in die Erforschung des Natursteinzerfalls, der Erforschung zu Feuchte und Salzbelastung oder zu Wandmalereischäden investiert worden.² Viele der heute noch im Bereich der Konservierungs- und Restaurationsforschung tätigen Akteure hatten ihre erste Begegnung mit den Fragestellungen der Denkmalpflege im Rahmen eines BMFT-Förderprojektes. Seit Beginn der Förderung im Jahr 1991 konnte die DBU, Stand Juni 2016, über 9.200 Projekte mit einem Fördervolumen von über 1,6 Mrd. Euro unterstützen.³ Alleine im Bereich des Kulturerbes konnten bis Oktober 2016 über 800 Projekte mit einer Fördersumme von über 137 Mio. Euro in die Förderung gebracht werden. Die Bandbreite reicht dabei vom Erhalt national wertvoller Garten- und Parkanlagen, über den Schutz von national wertvollen Gebäuden nebst Ausstattung, bis hin zum Schutz und Erhalt historischer Kulturlandschaften.

Seit dem 1.1.2016 bilden neue Leitlinien die Basis der Arbeit der DBU. Die Förderung gliedert sich seitdem in 13 thematische sowie einen themenoffenen Bereich.⁴ Die neuen Themen bauen auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den Planetaren Grenzen sowie auf den Zielen nach-

1 Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Förderleitlinien. Osnabrück 2016, S. 42f.

2 Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) (Hrsg.), Boue, Andreas (Hrsg.): Quellennachweis zur Forschung für die Denkmalpflege. BMFT-Förderprojekte 1986 -1994. Stuttgart 1996.

3 <https://www.dbu.de/2415.html>, abgerufen am 6.12.2016.

4 Eine komplette Übersicht der jeweils aktuellen Förderbereiche findet sich unter <https://www.dbu.de/index.php?menuecms=2505>, abgerufen am 3.1.2017.

haltiger Entwicklung der UNO auf. Beide haben auch für den Kulturgüterschutz eine nicht unerhebliche Bedeutung und sollten daher bei allen Aktivitäten auf dem Gebiet des Kulturerbeerhaltes berücksichtigt bzw. entsprechend mitbedacht werden.

Planetare Grenzen und Ziele nachhaltiger Entwicklung

Ein Team aus internationalen Forschern, zu dem auch der Umweltpreisträger der Deutschen Bundesstiftung Umwelt aus dem Jahr 2015, der schwedische Resilienzforscher Johan Rockström zählt, hat 2009 die Auswirkungen menschlichen Handelns auf die Umwelt analysiert. Im Ergebnis wurden neun Prozesse und deren Grenzen identifiziert, welche das Leben auf der Erde bedrohen. Vier dieser Prozesse der Planetaren Grenzen gelten heute bereits als überschritten: der Klimawandel, der Verlust an Biodiversität, der Eintrag von Stickstoff und Phosphor in die Biosphäre und die Landnutzungsänderung.⁵ Bei den anderen Faktoren, der Versauerung der Ozeane, der Süßwassernutzung, dem Abbau der stratosphärischen Ozonschicht, den atmosphärischen Aerosolen und dem Eintrag neuer Stoffe, wie Chemikalien, radioaktive Materialien, Nanomaterialien und Mikroplastik, bewegt sich das System Erde entweder in einem sicheren Handlungsraum oder die Gefährdung konnte bis heute noch nicht abschließend quantifiziert werden. Die Generalversammlung der Vereinten Nationen hat im September 2015 insgesamt 17 Ziele für eine nachhaltige Entwicklung (Sustainable Development Goals, kurz SDGs) verabschiedet. Diese lösen die Millenniums-Entwicklungsziele (MDGs) ab, welche im Jahr 2000 beschlossen wurden und zum Ziel hatten, die weltweite Armut bis zum Jahr 2015 zu halbieren. Während sich die MDGs vor allem auf die Dritte-Welt-Staaten konzentrierten, sollen die SDGs auf glo-

baler Ebene eine nachhaltige Entwicklung fördern, unter Berücksichtigung von ökonomischen, sozialen und ökologischen Gesichtspunkten. Die 17 Ziele der SDGs reichen dabei in quasi alle Bereiche des täglichen Handelns der gesamten Menschheit hinein (Tabelle 1)⁶

Folgen für den Kulturgüterschutz

Sowohl das Modell der Planetaren Grenzen als auch die Ziele nachhaltiger Entwicklung haben einen Bezug zum Kulturgüterschutz. Dabei geht vor allem vom anthropogen induzierten Klimawandel sowie von den Stickstoff- und Phosphorkreisläufen eine direkte Gefahr für den Kulturerbeerhalt aus. Steigende Temperaturen und geänderte Niederschlagsmengen mit einer Zunahme von Wetterextremereignissen beeinflussen nicht nur frei bewitterte Kunst- und Kulturgüter, und hier insbesondere Objekte der Gartendenkmalpflege, sondern haben auch einen direkten Einfluss auf das Klima in Innenräumen und somit auch auf den Erhalt von Wandmaleereien.⁷ Es ist daher unerlässlich, dass sowohl bestehende als auch neue Konzepte der Konservierung und Restaurierung in Zukunft diese Herausforderungen berücksichtigen bzw. daran angepasst werden.

Mit dem Unterziel 11.4 der SDGs haben die Vereinten Nationen allen Staaten der Welt den Auftrag erteilt, „die Anstrengungen zum Schutz und zur Wahrung des Weltkultur- und -naturerbes [zu] verstärken“⁸. Zusammen mit den Forderungen, die weltweite Energieeffizienz zu verdoppeln und die Umweltbelastung pro Kopf zu senken, kommen auf den Erhalt des Kulturerbes ganz neue Herausforderungen zu. Zum einen wird in Zukunft vermehrt gefordert werden, dass auch das Kulturerbe einen verstärkten Beitrag bei der Ressourceneffizienz leisten muss, Stichwort Wärmedämmung, zum anderen ist gerade das gebaute Kulturgut mit seinen Standzeiten

5 Steffen, Will et al: Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: Science. Vol. 347, no. 6223, 2015.

6 Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ): Agenda 2030 – 17 globale Ziele für nachhaltige Entwicklung. http://www.bmz.de/de/ministerium/ziele/ziele/2030_agenda/17_ziele/index.html, abgerufen am 2.1.2017.

7 Der Einfluss des Klimawandels auf historische Gebäude und deren Ausstattung wurde z. B. umfangreich im Rahmen des von der EU geförderten Vorhabens „Climatefor Culture“ untersucht. Nähere Informationen dazu finden sich auf der Projektwebseite unter <http://www.climateforculture.eu/>, abgerufen am 2.1.2017.

8 Martens, Jens / Obenland, Wolfgang: Die 2030-Agenda – Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Bonn/Osnabrück 2016.

Tabelle 1: Ziele für nachhaltige Entwicklung.

Ziel	Kurztitel	Langtitel
1	Keine Armut	Armut in jeder Form und überall beenden.
2	Keine Hungersnot	Den Hunger beenden, Ernährungssicherheit und eine bessere Ernährung erreichen und eine nachhaltige Landwirtschaft fördern.
3	Gute Gesundheitsversorgung	Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern.
4	Hochwertige Bildung	Inklusive, gerechte und hochwertige Bildung gewährleisten und Möglichkeiten des lebenslangen Lernens für alle fördern.
5	Gleichberechtigung der Geschlechter	Geschlechtergerechtigkeit und Selbstbestimmung für alle Frauen und Mädchen erreichen.
6	Sauberes Wasser sanitäre Einrichtungen	Verfügbarkeit und nachhaltige Bewirtschaftung von Wasser und Sanitärversorgung für alle gewährleisten
7	Erneuerbare Energie	Zugang zu bezahlbarer, verlässlicher, nachhaltiger und zeitgemäßer Energie für alle sichern.
8	Gute Arbeitsplätze und wirtschaftliches Wachstum	Dauerhaftes, inklusives und nachhaltiges Wirtschaftswachstum, produktive Vollbeschäftigung und menschenwürdige Arbeit für alle fördern.
9	Innovation und Infrastruktur	Eine belastbare Infrastruktur aufbauen, inklusive und nachhaltige Industrialisierung fördern und Innovationen unterstützen.
10	Reduzierte Ungleichheiten	Ungleichheit innerhalb von und zwischen Staaten verringern.
11	Nachhaltige Städte und Gemeinden	Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig machen.
12	Verantwortungsvoller Konsum	Für nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sorgen.
13	Maßnahmen zum Klimaschutz	Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen.
14	Leben unter dem Wasser	Ozeane, Meere und Meeresressourcen im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung erhalten und nachhaltig nutzen.
15	Leben an Land	Landökosysteme schützen, wiederherstellen und ihre nachhaltige Nutzung fördern, Wälder nachhaltig bewirtschaften, Wüstenbildung bekämpfen, Bodenverschlechterung stoppen und umkehren und den Biodiversitätsverlust stoppen.
16	Frieden und Gerechtigkeit	Friedliche und inklusive Gesellschaften im Sinne einer nachhaltigen Entwicklung fördern, allen Menschen Zugang zur Justiz ermöglichen und effektive, rechenschaftspflichtige und inklusive Institutionen auf allen Ebenen aufbauen
17	Partnerschaften, um die Ziele zu erreichen.	Umsetzungsmittel stärken und die globale Partnerschaft für nachhaltige Entwicklung wiederbeleben.

von vielen Jahrhunderten ein Vorbild hinsichtlich der effektiven Nutzung natürlicher Ressourcen. Bei einer reinen Betrachtung der Energieverbräuche bei der Nutzung von Gebäuden schneiden Denkmale in der Regel sehr schlecht ab. Bezieht man in die Berechnungen aber auch den Anteil der für die Erstellung notwendigen grauen Energien mit ein, so werden aus den vermeintlichen „Energieschleudern“ im Vergleich zu vielen Neubauten energie- und ressourceneffiziente Gebäu-

de. Es bedarf also unbedingt ein Umdenken in der Betrachtung von Kulturgütern, weg von der reinen Nutzung hin zu ganzheitlichen Konzepten. Dies gilt nicht nur für Denkmale. Die Notwendigkeit von ganzheitlichen Konzepten ist generell eine der Voraussetzungen für einen langfristigen Erhalt von Kulturgütern. Nur wenn das komplette System aus Kulturgut und Umfeld in die Betrachtungen und Planungen mit einbezogen wird, ist ein dauerhafter Erhalt von Kunst-

und Kulturgut möglich, auch und gerade aufgrund unterschiedlicher ökologischer und ökonomischer Anforderungen.

DBU-Vorhaben zum Schutz von Wandmalereien

Von der DBU im Bereich des Kulturgüterschutzes geförderte Projekte zeichneten sich schon immer durch ein hohes Maß an Interdisziplinarität aus. Hier forschen Denkmalpfleger z. B. gemeinsam mit Chemikern, Geologen, Bauphysikern, Archäologen oder Kunsthistorikern. Mit diesem interdisziplinären Ansatz wurden in der Vergangenheit auch mehrere Projekte zum Erhalt von national bedeutenden Wandmalereien unterstützt. Allen Projekten gemein ist, dass die Objekte durch anthropogene Umwelteinflüsse in ihrem Bestand gefährdet und innovative Methoden, Verfahren oder Produkte modellhaft zur Anwendung gekommen sind.⁹

So werden z. B. im Rahmen eines aktuellen Vorhabens zum Erhalt der spätmittelalterlichen Außenwandmalereien der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain präventive Maßnahmen evaluiert und umgesetzt.¹⁰ In einem Vorgängerprojekt wurde bereits das Ausmaß der durch anthropogene Emissionen aus der Verfeuerung von schwefelhaltiger Braunkohle hervorgerufenen Schäden festgestellt.¹¹ Durch die in den Wandmalereien und im Trägermaterial gespeicherten Schadsalze kommt es durch Kristallisationswechselprozesse zu einer kontinuierlichen Verschlechterung des Bestandes. Ziel des aktuellen Vorhabens ist daher die Installation einer minimal temperierten Einhausung, die sowohl die Anforderungen des Denkmal- als auch des Klimaschutzes erfüllt.

Ebenfalls mit der Fragestellung des Umgangs von bauschädlichen Salzen beschäftigte sich ein Vorhaben zur Bewahrung der Wandmalereien im Musensaal des Augsburger Fuggerhauses.¹² Durch kriegsbedingte Schäden konnten schadhafte Agenzien eindringen, es bildeten sich Gipsflecken auf den Oberflächen. Das Vorhaben hat gezeigt, dass durch die Anwendung von Ammoniumcarbonat der Gips zwar mobilisiert werden konnte, dass aber auch nach Abschluss der Maßnahmen noch stark hygroskopische, leicht lösliche Nitrate in hohen Konzentrationen im Mauerwerkskern vorhanden waren. Zur Reduzierung der Kristallisationswechselprozesse wurde daher ein Klimakorridor von 60 % bis 70 % relativer Feuchte vorgeschlagen. Neben der Nutzung von Be- und Entfeuchtern wurde zusätzlich ein Besucherkonzept erarbeitet, welches einen einmaligen Besuch von 20 bis 25 Personen für die Dauer einer Stunde als noch tolerierbar vorsah. Der dauerhafte Erhalt von wertvollen Wandmalereien geht normalerweise einher mit einer regelmäßigen Kontrolle des Be- und Zustandes. Vor allem im ländlichen Raum ist dies aber von Seiten der Denkmalpflege flächendeckend nicht immer leistbar. Im Rahmen eines Modellvorhabens werden daher von Seiten des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege aktuell kosten- und ressourcenschonende Erhaltungskonzepte für mittelalterliche Wandmalereien im Nordosten Brandenburgs erarbeitet.¹³ Ziel des Vorhabens ist die Ausarbeitung von Grundlagen für Strategien der Wartung und Pflege, die der Qualitätssicherung der erforderlichen Maßnahmen und damit dem ressourcenschonenden Erhalt des Kulturgutes dienen. Nachhaltigkeit in der Restaurierung bedeutet hier, dass die Abstände zwischen den Restaurierungszyklen durch Monitoring, Wartung und Pflege möglichst lange gedehnt werden und somit der Einsatz von Material, Energie und Beanspruchung des Kulturgutes möglichst gering gehalten werden kann.

9 Weiterführende Informationen zu den DBU-Projekten finden sich auf der Webseite www.dbu.de. Bei abgeschlossenen Vorhaben finden sich dort in der Regel auch die vollständigen Abschlussberichte.

10 DBU-Aktenzeichen 32669: „Modellhafte präventive Konservierung von anthropogen umweltgeschädigten spätmittelalterlichen Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain durch den Einsatz klimapuffernder ökologischer Bauprodukte in einer Einhausung“.

11 DBU-Aktenzeichen 24522: „Modellhafte Bestandserhaltung stark anthropogen umweltgeschädigter

spätmittelalterlicher Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain“.

12 DBU-Aktenzeichen 27800: „Modellhafte Bewahrung umweltgeschädigter Wandmalereien im Musensaal im Augsburger Fuggerhaus unter Nutzung einer innovativen Klimasteuerung“.

13 DBU-Aktenzeichen 31390: „Entwicklung modellhafter Erhaltungskonzepte durch Erfassung und Monitoring anthropogen umweltgeschädigter mittelalterlicher Wandmalereien im Nordosten Brandenburgs“.

Wandmalereien in St. Georg

Das Vorhaben zum Erhalt der gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau entspricht den Förderbedingungen der DBU für innovative Vorhaben zum Schutz national wertvoller Kulturgüter vor schädigenden Umwelteinflüssen.¹⁴

Die Malereien im Langhaus und an der Ostwand der Krypta der Kirche St. Georg in Oberzell gehen auf das 10. Jahrhundert zurück und sind durch anthropogene Umwelteinflüsse in ihrem Bestand gefährdet. Vor allem schadhafte Agenzien aus der Düngung von den direkt benachbarten, landwirtschaftlich genutzten Flächen stellen dabei in Kombination mit hohen und wechselnden Luftfeuchten ein beträchtliches Schadenspotenzial dar.

Ziel des Modellvorhabens war es daher, die Wechselwirkung zwischen Raumklima und Wandmalerei unter Berücksichtigung der objekt-spezifischen Dynamik sich ändernder Raumklimata zu untersuchen. Dabei wurden die sich aus der Witterung, der Nutzung, dem Betrieb der haustechnischen Anlagen wie auch dem Tourismus ergebenden Beanspruchungen in Form experimenteller, theoretischer und numerischer Untersuchungen herausgearbeitet, um so die Anforderungen an eine schadensvermeidende, präventive Raumklimastabilisierung sicherstellen zu können. Das Vorhaben konnte dabei auf einer bestens dokumentierten Ausgangssituation aufbauen. Die bestehende Datenlage wurde durch Untersuchungen mittels aktueller und über den Stand der Technik hinausgehenden Methoden und Techniken ergänzt. So wurde z. B. eine zeit- und tiefenaufgelöste Feuchtzustands-

analyse der Obergadenwand mittels TDR-Feuchtemessverfahren durchgeführt.¹⁵ Aufbauend auf den Ergebnissen wurde im Rahmen des Vorhabens für die Krypta und den Kirchenraum ein auf die Bedürfnisse angepasstes präventives Klimakonzept erarbeitet, modellhaft umgesetzt und abschließend evaluiert.

Das Vorhaben an der national bedeutenden Kirche St. Georg in Oberzell zur Untersuchung des Klimaeinflusses auf die Wandmalereien sowie zur Stabilisierung der Raumbedingungen hat nicht nur das Verständnis über die Schadensprozesse anthropogener Umwelteinflüsse verbessert, sondern hat darüber hinaus modellhafte Lösungsvorschläge zur Klimastabilisierung auch für andere Malereibestände aufgezeigt.

Das Vorhaben zum Erhalt der Wandmalereien in St. Georg trägt maßgeblich zum Schutz und zur Wahrung des Weltkulturerbes bei und erfüllt damit vollumfänglich das Unterziel 11.4 der SDGs. Durch die Betrachtung von eingetragenen, schadhafte Agenzien aus der Landwirtschaft in Kombination mit der Reaktion dieser auf wechselnde Klimaverhältnisse im Innenraum besteht darüber hinaus ein direkter Zusammenhang zu den Herausforderungen aus dem Modell der Planetaren Grenzen.

Durch das Vorhaben an den Wandmalereien in der Kirche St. Georg wurde ein weiterer wichtiger Schritt zu dessen dauerhaften Erhalt unternommen. Mit den neu gewonnenen wissenschaftlichen Ergebnissen und Erkenntnissen ist es nun möglich, die Malereien im Langhaus und an der Ostwand der Krypta noch besser vor den Auswirkungen anthropogenen Handelns zu schützen und damit für die Nachwelt zu erhalten.

¹⁴ DBU-Aktenzeichen 32712: „Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg (UNESCO-Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau)“.

¹⁵ TDR steht für „Time-Domain-Reflektometrie“, also für Zeitbereichsreflektometrie.

Literatur

- Deutsche Bundesstiftung Umwelt: Förderleitlinien. Osnabrück 2016.
- Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie (BMBF) (Hrsg.), Boue, Andreas (Hrsg.): Quellennachweis zur Forschung für die Denkmalpflege. BMFT-Förderprojekte 1986/1994. Stuttgart 1996.
- Steffen, Will et al: Planetary Boundaries: Guiding human development on a changing planet. In: Science. Vol. 347, no. 6223, 2015.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (BMZ): Agenda 2030 – 17 globale Ziele für nachhaltige Entwicklung.
- Martens, Jens / Obenland, Wolfgang: Die 2030-Agenda – Globale Zukunftsziele für nachhaltige Entwicklung. Bonn/Osnabrück 2016.
- DBU-Aktenzeichen 32669: „Modellhafte präventive Konservierung von anthropogen umweltgeschädigten spätmittelalterlichen Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain durch den Einsatz klimapuffernder ökologischer Bauprodukte in einer Einhausung“.
- DBU-Aktenzeichen 24522: „Modellhafte Bestandserhaltung stark anthropogen umweltgeschädigter spätmittelalterlicher Außenwandmalereien an der Kirche St. Nicolai in Jena-Lichtenhain“.
- DBU-Aktenzeichen 27800: „Modellhafte Bewahrung umweltgeschädigter Wandmalereien im Musensaal im Augsburger Fuggerhaus unter Nutzung einer innovativen Klimasteuerung“.
- DBU-Aktenzeichen 31390: „Entwicklung modellhafter Erhaltungskonzepte durch Erfassung und Monitoring anthropogen umweltgeschädigter mittelalterlicher Wandmalereien im Nordosten Brandenburgs“.
- DBU-Aktenzeichen 32712: „Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg (UNESCO-Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau)“

Die Bedeutung des DBU-Projektes aus Sicht der Landesdenkmalpflege

Claus Wolf

Die Denkmalpflege hat den staatlichen Auftrag, Kulturdenkmale zu schützen und zu pflegen, ihren Zustand zu überwachen sowie auf die Abwendung von Gefährdungen hinzuwirken. Dies leistet sie zum einen durch die Beratung der Denkmaleigentümer und mithilfe finanzieller Förderung bestimmter Maßnahmen an Kulturdenkmälern. Zum anderen kommt sie diesem Auftrag durch Grundlagenforschung nach, die aber niemals Selbstzweck ist, sondern stets in Handlungsleitfäden für die beteiligten Akteure wie z. B. Architekten, Restauratoren und Handwerkern einfließt. Die Organisation, Durchführung und Auswertung dieser konservatorischen Grundlagenforschung ist in Baden-Württemberg originäre Aufgabe des Landesamtes für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart und eines ihrer Alleinstellungsmerkmale. Die verschiedenen konservatorischen Projekte, die federführend von der Baden-Württembergischen Landesdenkmalpflege seit nunmehr gut 35 Jahren auf der Reichenau durchgeführt werden, sind insofern beispielhaft für das Zusammenwirken von staatlich geförderter Grundlagenforschung, Entwicklung von Leitlinien und deren Umsetzung in der Praxis zum Wohle der Allgemeinheit, in dem identitätsstiftende Kulturdenkmale von internationaler Bedeutung der Nachwelt erhalten werden. In den 1980er Jahren wurde im Rahmen eines Pilotprojektes des damaligen Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg eine umfassende Bestandsaufnahme und Untersuchung in St. Georg auf der Insel Reichenau vorgenommen. Dieses Projekt setzte Maßstäbe sowohl für die Denkmalpflege und Restaurierung in Baden-Württemberg als auch weit über deren Grenzen hinaus. Als Grundlage für eine Konservierung des Malereibestandes wurden zunächst eine über ein Jahr dauernde Untersuchung und eine

tation vorgenommen. Diese methodisch wegweisende Dokumentation bildet bis heute die Basis für alle Nachfolgeprojekte.¹

Wesentliches Ziel war dabei, dass mit Hilfe einer Bestandserfassung/Dokumentation der Wandmalereien auch zukünftige Veränderungen am Malereibestand nachvollziehbar und kontrollierbar sein und auf diese Weise subjektive Wertungen möglichst ausgeschlossen werden sollten. So ist ein vermeintlich fortschreitender Verfall eben nur über eine sehr genaue und nachvollziehbare sowie kontinuierlich fortzuschreibende Dokumentation des Objektes überprüfbar.

Wandmalereien sind komplexe Verbundsysteme, deren Verfallserscheinungen sowohl auf systemimmanenten Parametern als auch auf äußeren Einflüssen beruhen. Für die Bewertung von Zerfallsprozessen reichen allein die Kenntnis der komplexen Materialität von Mauerwerk, Putzen, Malerei sowie die der dynamischen Prozesse physikalischer, chemischer und mikrobieller Art jedoch nicht aus. Entscheidend für das Verständnis dieser komplexen Wechselwirkungen ist die Vernetzung der verschiedenen Daten und Mechanismen, was wiederum nur durch einen interdisziplinären Forschungsansatz zu erlangen ist und in einem Team aus Kunsthistoriker/innen, Architekten/innen, Bauforschern/innen, Restauratoren/innen sowie Ingenieurs- und Naturwissenschaftlern/innen bewerkstelligt werden kann. Dabei ist die institutionelle Denkmalpflege auf die Unterstützung von Drittmittelförderung von Forschungsprojekten angewiesen und wir sind der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) sehr dankbar, dass sie uns entsprechend gefördert hat.

¹ Vgl. Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.

Die im Forschungsprojekt um St. Georg erzielten Ergebnisse trugen zur Erweiterung des Kenntnisstands hinsichtlich Gefährdungspotentiale und Strategien zu deren Vermeidung bei. Von besonderer Bedeutung sind hier die Forschungsergebnisse zum thermisch-hygrischen Verhalten von Wandmalereien und der Beschleunigung von Alterungsprozessen zu nennen. Aufbauend auf diesen können modellhafte Anforderungskataloge gleichsam als Schnittstelle zwischen Denkmalpflege und natur-/ingenieurwissenschaftlichen Untersuchungen entwickelt werden, ebenso wie datenbasierte Arbeitsmittel („Tools“). Das „Klimatool“ etwa lieferte verlässliche Zustandsbewertungen klimabedingter Schäden.

Auf dem Gebiet der nichtinvasiven Untersuchungsmethoden, die seit den 1980er Jahren stetig weiterentwickelt werden, konnten im Rahmen des Projektes ebenfalls weiterführende Erkenntnisse gewonnen werden: Genannt seien hier nur die auch in den folgenden Beiträgen beschriebenen Verfahren der Röntgenfluoreszenzanalyse, der Raman-Spektroskopie und der transportablen Infrarotspektroskopie.

Die Bedeutung der erwähnten „Tools“ und der damit verbundenen Entwicklung standardisierter Verfahren und neuer Methoden für die Denkmalpflege erschließt sich aber besonders hinsichtlich ihrer Übertragbarkeit auf andere interdisziplinär angelegte konservatorische Projekte, was folgendes Beispiel eindrücklich illustriert: Eines der Hauptziele des Forschungsprojektes St. Georg war, maximale Kenntnisse über die Materialität der Wandmalereien zur erlangen. Dabei wurde die den Restauratoren bekannte mittelalterliche Pigmentpalette mit den von den im Projekt eingebundenen Chemikern durch zerstörungsfreie Untersuchungen am Objekt (bspw. RFA) nachgewiesenen Elementzusammensetzungen abgeglichen. Sodann wurden sie von den Restauratoren dem jeweiligen verwendeten Pigment zugeordnet und in einem letzten Schritt das gesamte Erscheinungsbild in den kunsthistorischen Kontext gebracht. Für die Wandmalerei der Reichenau konnte so erstmals die Verwendung von Arsen nachgewiesen werden. Dieses wurde in der restauratorischen Bewertung als Auripigment und somit als strahlend goldgelbe Farbe identifiziert, was die kunsthistorisch bedeutende Neuinterpretation des Aussehens der Kreuzigungen in der Krypta nach sich zog.

Neben den geschilderten fachlichen und arbeitsorganisatorischen Erkenntnissen, die mit dem Projekt St. Georg erzielt werden konnten, konfrontierte dieses aber die Denkmalpflege auch mit neuen Fragen. Eine zentrale Herausforderung ist dabei, künftig einen Ausgleich zwischen den Ansprüchen der heutigen Öffentlichkeit auf Besichtigung des Welterbes Reichenau und dem Recht des Denkmals und einer zukünftigen Öffentlichkeit auf Schutz und langfristigen Erhalt zu finden. Wesentliche Erkenntnisse konnten im Laufe des Projektes zur Genese und Zusammensetzung der starken Verschmutzung der Wandmalereien gewonnen werden, ebenso zu den u.a. von Besucherströmen hervorgerufenen negativen Einflüssen auf die Raumklimata und die damit verbundene potentielle Gefährdung der Wandmalereien durch Schimmel. Eine Lösung nach dem Vorbild der Scrovegni-Kapelle in Padua ist aus denkmalpflegerischer Sicht für St. Georg nicht anzustreben.

Hier ist die Besucherlenkung seit nunmehr 15 Jahren mit einer hochtechnisierten Klimatisierung in der Kapelle kombiniert. Zudem werden die Besucher über einen Vorraum und einen Verbindungsgang geleitet, wo Staub und Verschmutzungen mittels Unterdruck bereits vor Betreten der Kapelle aufgefangen werden, um die berühmten Wandmalereien von Giotto zu schützen. Einem solchen umfassenden Maßnahmenkatalog steht die liturgische Bedeutung und Nutzung St. Georgs entgegen, schließlich handelt es sich bei dem Bauwerk um einen für den Gottesdienst genutzten Sakralbau.

Mit Unterstützung der Kirchengemeinde von St. Georg konnte nach einer Testphase im Sommer 2009² ab 2013 eine Besucherlenkung eingerichtet werden. Die Kirche ist nun von Mai bis Ende September für den Individualtourismus geschlossen und nur über täglich stattfindende Führungen zugänglich. Damit wird versucht, einen Mittelweg zwischen der in Padua angewandten Maximallösung und einer an die örtlichen Bedürfnisse auf der Reichenau angepassten Lösung zu finden.

Darüber hinaus nimmt ein Messnetzsystem von ca. 160 Sensoren seit 2011 die Daten der Nahfeld-

² Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S.155–161.

und Oberflächenklimata an den Wandmalereien sowie die Luftströme und die Öffnungsintervalle von der Zugangstür und den Fenstern auf. Die hochmoderne Messtechnik wurde von MOCult (Monitoring and Optimization of Climate in Cultural Heritage) in Zusammenarbeit mit der Universität Stuttgart (Institut für Werkstoffe im Bauwesen/Materialprüfungsanstalt) entwickelt. Das Messsystem zur Erfassung der Klimadaten wurde im Rahmen des DBU-Projektes weiterentwickelt und ausgebaut, um Maßnahmen zu Verbesserung der Raumluftverhältnisse einleiten zu können. Hierzu wurden Regelstrategien entwickelt, mit denen durch eine gezielte Zuführung von Wärme oder eine kontrollierte Querbelüftung ein Raumklima in der Kirche und in der Krypta geschaffen werden kann, das für den Erhalt der Wandmalereien förderlich ist. Zur Querbelüftung werden die bereits mit elektrischen Kippmechanismen ausgestatteten Fensterflügel gezielt geöffnet oder geschlossen. Zur Wärmezufuhr, die eine leichte Absenkung der relativen Feuchte im Nahfeld der Wandmalerei bewirkt, werden die in der Kirche bereits vorhandenen Bankstrahlerheizungen und in der Krypta elektrische Radiatoren eingesetzt. Den automatischen Regelbetrieb übernimmt eine im DBU-

Vorhaben programmierte Steuerungssoftware, die mit diesen einfachen Maßnahmen im unmittelbaren Umfeld der Wandmalereien ein Nahfeldklima an den Wandmalereien sicherstellen soll, das eine Schädigung durch Salze oder Pilzbefall künftig ausschließt.

Dennoch ist festzuhalten, dass der Verzicht auf umfassende konservatorische Schutzmaßnahmen bei gleichzeitig vermehrter Beanspruchung durch die Besucherströme zunehmend kürzere Restaurierungsintervalle nach sich zieht, die immer auch einen Eingriff in das Denkmal mit sich bringen und so dem Nachhaltigkeitsprinzip entgegenstehen. Diese Intervalle von Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen – und dazu gehört auch eine Oberflächenreinigung – mit allen zur Verfügung stehenden Mitteln so lange wie möglich zu verlängern, ist Ziel der Denkmalpflege, deren Grundmaximen die Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit immer schon waren und bis heute sind. Gerade die interdisziplinären Studien der modernen Landesdenkmalpflege auf der Reichenau haben dies eindrücklich verdeutlicht und zeigen auf, dass hier auch in Zukunft weiterhin Forschungsbedarf besteht.



Abb. 1:
Museum Oberzell
(LAD, Pilz).

Literatur

Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.

Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S. 155-161.

Das DBU-Projekt aus Sicht der Antragsteller. Seine Bedeutung für die Natur- und Ingenieurwissenschaften

Harald Garrecht

Ziel des DBU-Projektes war und ist es, die Wechselwirkung zwischen Raumklima und Wandmalerei unter Berücksichtigung der sich fortwährend ändernden Raumlufthverhältnisse modellhaft zu untersuchen. Hierzu müssen die aus der Witterung, aus der kirchlichen und aus der touristischen Nutzung resultierenden Beanspruchungen zuverlässig erfasst und bewertet werden können, um geeignete Maßnahmen auszuarbeiten und auf deren verbessernde Wirkung hin zu erproben, die einen weiteren Schadensfortschritt zuverlässig unterbinden und einen langfristigen Erhalt der wertvollen Wandmalereien in der Kirche und der Krypta von St. Georg sicherstellen.

Die Förderzusage der Deutschen Bundes Umweltstiftung ermöglichte den am Vorhaben beteiligten Natur- und Ingenieurwissenschaftlern, innovative und noch nicht hinreichend für den Einsatz am Baudenkmal erprobte Verfahren und Methoden der Zustandsanalyse am Bauwerk vor Ort zum Einsatz zu bringen und in ihre Anwendbarkeit für die unterschiedlichen denkmalspezifischen Fragestellungen zu überprüfen. Ziel ist es dabei, eine möglichst geschlossene Charakterisierung der Zusammensetzung und des Gefüges der Malschichten wie auch des Malgrundes vornehmen zu können. Eine solche Vorgehensweise bietet der Denkmalpflege eine Reihe von Vorteilen. Der größte Vorteil dürfte darin gesehen werden, dass auf eine für die Materialcharakterisierung erforderliche Probenahme für viele im Vorhaben adressierte Fragestellungen weitestgehend verzichtet werden kann. Zudem kamen eine Reihe neuer zerstörungsfreier Analyseverfahren an den malereitragenden Wandoberflächen zum Einsatz, sodass sich die durchgeführten Untersuchungen nicht auf wenige und nicht immer repräsentative Untersuchungsstel-

len beschränken mussten. Vielmehr konnte mit den zerstörungsfreien Verfahren in situ eine Material- bzw. Schadenskartierung über den gesamten malereitragenden Wandbereich in beliebiger Untersuchungsdichte vorgenommen werden.

Über die Materialcharakterisierung hinaus war und ist es Ziel der modellhaften Untersuchungen, die Folgen der umwelt- und nutzungsbedingten Einwirkungen auf die Malerei zu analysieren. So ist hinlänglich bekannt, dass eine Veränderung der raumklimatischen Verhältnisse im unmittelbaren Umfeld der Malerei zu komplexen Prozessen im oberflächennahen Verbundbereich von Malschichten und Malgrund führen. Schließlich lösen Änderungen der Temperatur- und Feuchteverhältnisse physikalische und chemische Prozesse aus, die bei hohen Feuchtelasten meist gravierende Änderungen des Zustands von mineralisch und organisch gebundenen Materialschichten zur Folge haben. So können gerade bei hohen Feuchtelasten im Umfeld der Wandmalerei die physikalischen, mechanischen und optischen Eigenschaften der Pigmente und Bindemittel beeinträchtigt werden. Zudem bedingen starke Veränderungen des Feuchte- und Temperaturzustands hygisch und thermisch bedingte Formänderungsbestrebungen: Diese führen im Falle einer Befeuchtung zum Quellen, also einer Expansion und im Falle einer Trocknung zum Schwinden, also einer Kontraktion der betreffenden Materialschichten.

Bei ständig wechselnden klimatischen Verhältnissen im unmittelbaren Umfeld der Wandmalerei kommt es aufgrund der damit einhergehenden Formänderungen zu einer allmählichen Materialermüdung, die mit zunehmender Lastwechselzahl eine Schädigung der Malschicht nach sich ziehen.

Eine hohe relative Feuchte im Nahfeld der Wandmalerei bietet aber auch Mikroorganismen ideale Wachstumsbedingungen, wenn ein entsprechendes Nährstoffangebot an der Wandoberfläche verfügbar ist. Das sich so einstellende Schimmelpilzwachstum kann gleichermaßen zur Gefährdung und Schädigung der Wandmalerei führen.

Nicht zuletzt hat auch das große touristische Interesse dazu beigetragen, dass mit den Besuchern nicht nur die Raumklimaverhältnisse in der Kirche St. Georg ungünstig beeinflusst werden, sondern auch Feinstaub in erhöhter Form die Kirche belastet und dieser sich auf der malereitragenden Wandoberfläche ablagert. Die Partikel- und Schadstoffanalyse bildete folglich einen weiteren wissenschaftlichen Schwerpunkt des DBU-Projektes. Über die Verschmutzungsproblematik hinaus bewirkt die Anreicherung der Staubpartikel aber auch, dass sich ein sorptionsfähiges Partikelhaufwerk ausbildet. Somit kann an der malereitragenden Wandoberfläche sorptiv eine größere Feuchtmenge angelagert werden, die entsprechend des hohen Feuchteangebots nicht nur physikalische und chemische Umbildungen auslösen kann oder auch ein feuchtebedingtes Formänderungsbestreben in der Malschicht bewirkt, sondern in Verbindung mit dem in den Feinstäuben enthaltenen Nährstoffangebot kann die erhöhte Feuchtesituation auch das Mikroorganismenwachstum begünstigen.

Das DBU-Projekt bietet den beteiligten Natur- und Ingenieurwissenschaften folglich vielfältige Möglichkeiten, die komplexen Problemstellungen einer klimabedingten Beanspruchung von bemalten Wandoberflächen in situ unter realen Einwirkungen zu erforschen. Dabei stellt das Vorhaben die beteiligten Wissenschaftler vor große Herausforderungen. Schließlich fehlt es bislang an erprobten und validierten Verfahren und Methoden, mit denen die zuvor aufgezeigten Mechanismen vor Ort unter den real gegebenen Witterungs- und Nutzungseinflüssen auf zerstörungsfreie Weise analysiert und bewertet werden können.

Über die interdisziplinäre Abstimmung der von den beteiligten Natur- und Ingenieurwissenschaften durchzuführenden Bauwerks- und Laboruntersuchungen hinaus stellt der stete und intensive Dialog mit der Denkmalpflege einen wichtigen Schlüssel zum Erfolg für das DBU-Projekt dar. Schließlich gilt es, am Bauwerk

vor Ort denkmalverträgliche Untersuchungsmethoden einzusetzen, mit denen ein sicheres Verständnis des komplexen Verbundverhaltens der Wandmalerei mit dem Malgrund gewonnen werden kann. Zudem bedarf es neben der natur- und ingenieurwissenschaftlichen Deutung der in situ und im Labor erhaltenen Ergebnisse auch einer kontextbezogenen denkmalpflegerischen Bewertung, um die Arbeitsergebnisse über die wissenschaftliche Grundfragestellung hinaus auch einer nachhaltigen Sicherung und Konservierung des wertvollen Wandmalereizyklus zu führen zu können.

Gleich der „Präventiven Konservierung“, die anstrebt, optimale Bedingungen für das Kunst- und Kulturgut in Museen zu schaffen, um künftige restaurierende und konservierende Eingriffe zu vermeiden, ist es auch ein wesentliches Ziel des DBU-Projektes, die Voraussetzungen für eine nachhaltige Verbesserung des in der Kirche und der Krypta von St. Georg vorherrschenden Raumklimas zum Erhalt der bedeutsamen Wandmalereien zu schaffen.

Lassen sich in Museen und Depots bessere Raumluftverhältnisse mit mehr oder weniger aufwendigen anlagentechnischen Systemen schaffen, so ist die Sicherstellung präventiver Klimaverhältnisse in der Kirche St. Georg um ein Vielfaches schwieriger, schließlich soll ein baulicher Eingriff in das Denkmal vermieden und die Kosten für die erforderlichen Maßnahmen so gering wie möglich gehalten werden. Um den Erfolg der Maßnahmen zur Raumluftverbesserung zu maximieren und gleichzeitig den wirtschaftlichen Aufwand für deren Umsetzung zu minimieren, muss eine eingehende Klärung des Zusammenhangs zwischen Nahfeldklima und Beanspruchung der Wandmalerei herbeigeführt werden.

Die im DBU-Projekt angewandten und weiterentwickelten Methoden und Verfahren lassen sich auf andere Baudenkmale mit ähnlichen Problemstellungen übertragen. Nicht zuletzt können die Erkenntnisse und Erfahrungen des DBU-Projektes nach positiver Validierung auch in die Arbeitsgruppen z. B. von ICOMOS, WTA, RILEM und auch vom CEN 346 „Erhalten kulturellen Erbes“ eingebracht werden, um neben der wissenschaftlichen Publikation in Fachzeitschriften die im DBU-Projekt gewonnenen Arbeitsergebnisse auch nationalen, europäischen und internationalen Merkblättern, Sachstandsberichten und Regelwerken zuzuführen.

Die Klosterinsel Reichenau: Denkmalpflege im UNESCO-Weltkulturerbe

Susann Seyfert

Vor 17 Jahren wurde die Klosterinsel Reichenau (Abb. 1) in die Liste der UNESCO Welterbestätten aufgenommen. Fast sollte man meinen, mit dem Prädikat Welterbe wurde ein Ziel erreicht, bei dem für alle die Erfordernisse zu dessen Erhalt klar definiert sind und die beteiligten Akteure einen nicht immer geraden, aber dennoch gemeinsamen Weg beschreiten. Können wir also die Hände in den Schoß legen, uns zurücklehnen und die Lorbeeren genießen?

Aus Sicht der Denkmalpflege muss diese Frage klar verneint werden. Die Anforderungen und Interessen, die seitens ganz verschiedener Gruppen immer wieder aufeinander treffen, zeigen, dass die bereits über Jahrzehnte währende Arbeit der Landesdenkmalpflege und ihrer Partner auch in Zukunft weiter Bestand haben wird. Im Gegenteil, neue Aufgaben werden uns zuwachsen und die Komplexität vieler Fragestellungen wird weiter zunehmen. Ein Beispiel dafür ist das Projekt der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) zu den Wandmalereien in der Kirche St. Georg, dessen Arbeit und Ergebnisse in den nachfolgenden Beiträgen publiziert werden.¹ Es zeigt sich aber auch in der anhaltenden und vor allem steigenden Nachfrage nach denkmalpflegerischer Beratung, insbesondere durch die Fachbereiche der Feuchtboden- und Mittelalterarchäologie, der Inventarisierung und städtebaulichen Denkmalpflege, der Restaurierung, der Gartendenkmalpflege, der Bautechnik und der allgemeinen konservatorischen Betreuung. Weder auf den Anlass noch auf die Einzelheiten des DBU-Projektes soll an dieser Stelle eingegangen werden. Es ist ein wichtiger, aber nicht



der einzige Baustein im Umgang mit dem Weltkulturerbe. Die folgenden Anmerkungen zeigen einen kurzen Überblick zu den Themen, die uns aktuell und vor allem in Zukunft auf der Insel Reichenau beschäftigen werden.

Abb. 1:
Luftbild der Insel Reichenau (LAD, Braasch).

Welterbemanagementplan

Ein Desiderat der letzten Jahre ist die Erarbeitung eines Welterbemanagementplans für die Insel Reichenau. Gemäß den Richtlinien für die Durchführung der Welterbekonvention ist jede Welterbestätte dazu verpflichtet, einen Managementplan zum Schutz des außergewöhnlichen universellen Wertes (Outstanding Universal Value) vorzulegen und fortzuschreiben. Die Ausarbeitung eines solchen Managementplanes ist ebenso komplex wie sein Inhalt: Auf der einen Seite dient er als „integriertes Planungs- und Handlungskonzept zur Festlegung der Ziele und

¹ Vgl. auch Garrecht, Harald / Jakobs, Dörthe / Reeb, Simone: DBU-Forschungsprojekt - Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 6 (2015), S. 46–52.

Abb.2:
Museum Reichenau-Mittelzell, rechts der 2007 eingeweihte Neubau. Zusammen mit den Museumseinheiten in Ober- und Niederzell können sich die Besucher anhand unterschiedlicher Themenschwerpunkte über das UNESCO-Welterbe Klosterinsel Reichenau informieren (LAD, Pilz).

Abb.3:
Museum Reichenau-Oberzell, Blick auf einen Teil der Ausstellung (LAD, Jakobs).

Maßnahmen, mit denen der Schutz, die Pflege, die Nutzung und Entwicklung von Welterbestätten verwirklicht werden sollen“². Auf der anderen Seite erfordert er eine gewisse Flexibilität, um einer erfolgreichen Weiterentwicklung der Reichenau nicht im Wege zu stehen. Neben der eigentlichen Welterbestätte werden lokale Akteure und Netzwerke eingebunden, um der Vermittlungsarbeit Rechnung zu tragen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass es sich bei der Reichenau um eine kontinuierlich genutzte Welterbestätte handelt.

Seit Oktober 2016 widmet sich eine auf vier Jahre befristete Stelle, angesiedelt beim Landesamt für Denkmalpflege, der Erarbeitung des Welt-

erbmanagementplans für die Reichenau. Für die kontinuierliche Betreuung und Weiterentwicklung über die Fertigstellung des Managementplans hinaus und seine Implementierung wäre eine Verstetigung der Stelle wünschenswert.

Denkmalpflege versus Tourismus?

Ein weiterer Punkt, der denkmalpflegerische Belange immer wieder berührt, ist die touristische Erschließung der Reichenau. Das Prädikat Welterbe dürfte überall für ein verstärktes öffentliches Interesse sorgen, auf der Reichenau sind insbesondere die drei Kirchen von St. Georg in Oberzell, St. Maria und Markus in Mittelzell und St. Peter und Paul in Niederzell betroffen. Die Auswirkungen für die Kirchen selbst waren in den vergangenen Jahren immer wieder Thema, Fachkollegen aus unterschiedlichen Bereichen der Denkmalpflege haben sich in zahlreichen Beiträgen dazu geäußert³, seit März 2007 stehen drei Informationszentren mit unterschiedlichen Themenschwerpunkten den Besuchern zur Verfügung (Abb. 2, 3) und ab 2013 konnte zumindest für St. Georg (Oberzell) in Abstimmung zwischen Kirchengemeinde und Denkmalpflege eine Besucherlenkung in den Sommermonaten dauerhaft eingeführt werden.

Dennoch bleibt die Besucherlenkung ein Thema, dass die Denkmalpflege über St. Georg hinaus im Hinblick auf Verkehrsführung und Parkierung beschäftigen wird, insbesondere wenn weitere



2 Albert, Marie-Therese / Ringbeck, Birgitta: 40 Jahre Welterbekonvention. Zur Popularisierung eines Schutzkonzeptes für Kultur- und Naturgüter, Berlin/ München/Boston 2015, S. 40.

3 Overlack, Anne: Weltkulturerbe Insel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 2, 2001, S. 63–84; Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252–257; Zimdars, Dagmar / Jakobs, Dörthe / Roth, Erik / Schmidt-Thomé, Peter: Bildungsauftrag, Vermittlung, Zukunftssicherung. Konzepte der Denkmalpflege zur Präsentation der UNESCO-Welterbestätte Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 1, 2004, S. 23–29; Nocke, Bettina / Roth, Erik / Schütze, Edith: Entwicklungskonzept für die Klosterinsel Reichenau. Welterbe und informelle Planung. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2010, S. 154–160; UNESCO-Welterbe: Lust und Last?! Arge-Alp-Tagung Insel Reichenau, 20.–22. März 2003 (Arbeitsheft Landesamt für Denkmalpflege 14), Stuttgart 2004; „Was haben wir aus dem See gemacht?“ Kulturlandschaft Bodensee. Tagung der Projektgemeinschaft des Arbeitskreises Denkmalpflege am Bodensee im Rahmen der Europarat-Kampagne „Europa – ein gemeinsames Erbe“ 22. September 2000, Stuttgart 2001.

anstehende Projekte wie z. B. die Neuordnung der Schatzkammer in St. Maria und Markus oder die Umgestaltung des Klostergartens in Mittelzell ihre Umsetzung finden.

Auch eine Beleuchtung der drei Kirchen bei Nacht ist seit einigen Jahren im Gespräch und wird zwischen den beteiligten Akteuren sehr kontrovers diskutiert, vor allem weil es gerade den Kirchen sicher nicht an Aufmerksamkeit mangelt. Die Chance für eine Lösung kann vielleicht mithilfe der ebenfalls von der UNESCO geforderten Vermittlungsarbeit gelingen.⁴ Bislang stehen vor allem die Kirchen im Mittelpunkt. Wenn man es schafft, weitere Aspekte der gesamten Klosterinsel in den Fokus zu rücken, deren Vielschichtigkeit aufzuzeigen (Abb. 4, 5) sowie nach innen und außen zu vermitteln, besteht die Möglichkeit, den Strom der Besucher anders zu verteilen. Der Entwicklung einer nachhaltigen, denkmalverträglichen touristischen Erschließung wird sicher ebenso im Managementplan Rechnung getragen wie dem Erhalt der prägenden Kulturlandschaft unter Berücksichtigung einer behutsamen Weiterentwicklung des Gartenbaus.

Allgemeine konservatorische Fragestellungen

Neben den übergreifenden Themen gibt es auf der Reichenau eine ganze Reihe von allgemeinen konservatorischen Fragestellungen. Es ist kein Geheimnis, dass die gesamte Region unmittelbar am See eine sehr attraktive Wohnlage ist. Neben der Infrastruktur an Schulen, Ärzten, Geschäften usw. ist die Freizeitqualität durch die Nähe zu See und Bergen sehr hoch. Es gibt nahezu keinen Leerstand und die Nachfrage nach Wohnraum auf der Insel ist groß. Das scheint zunächst erfreulich – ist eine kontinuierliche Nutzung eines Denkmals doch auch Voraussetzung für dessen Erhalt. Daraus ergeben sich jedoch konservatorische Fragestellungen, für die nicht immer Patentrezepte zur Beantwortung vorliegen.

Da wäre vor allem die Schaffung von neuem Wohnraum zu nennen. Mit der weiter steigen-

den Attraktivität der Region wird dem Thema Nachverdichtung eine immer größere Rolle zukommen. Damit sind weniger Baulücken, sondern die Nachverdichtung innerhalb eines Gebäudes gemeint. Der Druck auf die Dächer wird steigen und neben dem ersten oder zweiten Dachgeschoss zunehmend sämtliche vorhandenen Dachgeschosse betreffen. Im Bereich der Nicht-Denkmale werden durchaus auch Aufstockungen um ein bis zwei Geschosse angestrebt. Damit einhergehen natürlich Fragen nach der Belichtung und die Auswirkungen auf die vorhandene Dachlandschaft.



Abb. 4, 5:
Neben den Gebäuden veranschaulichen auch landwirtschaftliche Traditionen wie der Gemüse- und Weinanbau oder die Fischzucht die Geschichte der Klosterinsel Reichenau. Ein Großteil des Gemüseanbaus erfolgt in den Gewächshäusern (LAD, Pilz).



⁴ Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“ Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S. 154–161.

Auch die energetische Ertüchtigung von Gebäuden oder der Anbau von Balkonen sind immer wieder Gegenstand. Eines der lautesten Argumente ist dabei die Finanzierbarkeit der Gesamtmaßnahme.

Neben der energetischen Ertüchtigung von Gebäuden sind es Fragestellungen wie die Barrierefreiheit und der Brandschutz, denen die Landesdenkmalpflege insbesondere in den letzten Jahren durch Tagungen und Publikationen einen Schwerpunkt gesetzt hat. Durch die Zusammenarbeit mit den entsprechenden Fachbehörden und -verbänden kann inzwischen in der täglichen Praxis auf einen Pool an denkmalgerechten Lösungen zurückgegriffen werden. Regelmäßig betroffen, doch nicht immer sichtbar, ist die Arbeit der Archäologie. Sämtliche Maßnahmen, die in den Boden eingreifen oder Keller von älteren Gebäuden anbelangen, sind im Vorfeld mit den Kollegen abzustimmen. Nicht selten wird eine fachgerechte Begleitung und Dokumentation der Vorhaben notwendig.

Auch die kontinuierliche Fortschreibung der Denkmalliste für die Reichenau auf der Grundlage neuer Kenntnisse gehört zum Arbeitsalltag der Denkmalpflege.

Literatur

Albert, Marie-Therese / Ringbeck, Birgitta: 40 Jahre Welt-erbekonvention. Zur Popularisierung eines Schutzkonzeptes für Kultur- und Naturgüter, Berlin/München/Boston 2015.

Garrecht, Harald / Jakobs, Dörthe / Reeb, Simone: DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 6 (2015), S. 46-52.

Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“ Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S. 154-161.

Nocke, Bettina / Roth, Erik / Schütze, Edith: Entwicklungskonzept für die Klosterinsel Reichenau. Welterbe und informelle Planung. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2010, S. 154-160.

Fazit

Die anstehenden denkmalpflegerischen Themen innerhalb oder an einer Welterbestätte unterscheiden sich zunächst nicht wesentlich gegenüber der Arbeit an anderen Denkmälern. Der Druck, der insbesondere aus den Folgen von Nutzungen und im Zusammenhang mit der Vermarktung der Welterbestätte entsteht, kann schwer auf den betroffenen Denkmälern lasten. Das Landesamt für Denkmalpflege trägt dem auf verschiedene Art und Weise Rechnung. Neben der Beantragung und fachlichen Begleitung von Forschungsprojekten und der Ausrichtung von Fachtagungen sowie der Beteiligung in Gremien wie der Kommission „Welterbekoordination Klosterinsel Reichenau“ und in der Stiftung „Welterbe Klosterinsel Reichenau“ ist es vor allem die Einrichtung eines Arbeitsbereiches Welterbe innerhalb des Fachgebietes der Spezialisten, Schwerpunkte und Welterbe im Landesamt für Denkmalpflege selbst. Hier ist auch die Stelle zur Erarbeitung des Managementplans für die Reichenau angesiedelt, der nach seiner Fertigstellung für alle Beteiligten fester Bestandteil des Arbeitsalltags und damit Wegweiser sein wird.

Overlack, Anne: Weltkulturerbe Insel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 2, 2001, S. 63-84.

Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252-257.

UNESCO-Welterbe: Lust und Last?! Arge-Alp-Tagung Insel Reichenau, 20.-22. März 2003 (Arbeitsheft Landesamt für Denkmalpflege 14, Stuttgart 2004.

„Was haben wir aus dem See gemacht?“ Kulturlandschaft Bodensee. Tagung der Projektgemeinschaft des Arbeitskreises Denkmalpflege am Bodensee im Rahmen der Europarat-Kampagne „Europa – ein gemeinsames Erbe“ 22. September 2000, Stuttgart 2001.

Zimdars, Dagmar / Jakobs, Dörthe / Roth, Erik / Schmidt-Thomé, Peter: Bildungsauftrag, Vermittlung, Zukunftssicherung. Konzepte der Denkmalpflege zur Präsentation der UNESCO-Welterbestätte Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 1, 2004, S. 23-29.

Die ottonischen Wandmalereien von St. Georg

Zur Vorgeschichte des DBU-Projektes

Dörthe Jakobs

Die Kirche St. Georg ist ein Kulturdenkmal von besonderer, nationaler Bedeutung. Mit der Anerkennung der Insel Reichenau als UNESCO-Welterbe im Jahr 2000 erhielt St. Georg mit seinem frühmittelalterlichen Baubestand und seinem einzigartigen, monumentalen Wandmalereizyklus aus der zweiten Hälfte des 10. Jahrhunderts, der als hervorragendstes Denkmal einer ganzen Epoche gilt, den ihm ohne Frage gebührenden Platz im Kreise der bedeutendsten Kulturdenkmale der Welt.

Der Bau von St. Georg wird allgemein mit einer zeitgenössischen Nachricht des St. Galler Mönchs Notker in dem von ihm angelegten Martyrologium, einem Verzeichnis von Märtyrern und Heiligen, in die Regierungszeit des Abtes Hatto (888–913) gesetzt. Hatto war ab 888 Abt der Reichenau und seit 891 auch Erzbischof von Mainz.¹ Demnach soll Hatto die anlässlich der Kaiserkrönung Arnulfs im Februar 896 in Rom von Papst Formosus erhaltenen Reliquien des Hl. Georg in sein „*novum monasterium*“ nach Alemannien überführt haben. Hatto gehörte zu den bedeutendsten Kirchenfürsten im ostfränkischen Reich. Ein weiteres, vor 899 zu datierendes Martyrologium in Zürich vermerkt den 18. November als Weihedatum von St. Georg. Die historischen Hintergründe zu diesem Weihedatum lassen auf eine wohl kalkulierte Festigung politischer Konstellationen zwischen dem Erzbistum Mainz und dem Reichskloster Reichenau schließen.² Am 11. November findet das



Hochfest des Hl. Martin von Tour statt, der nicht nur der Patron des fränkischen Reichs war sondern auch der Patron der Kathedrale von Mainz. Das Hochfest seines Kirchenpatrons feierte Hatto als Erzbischof von Mainz sicher – wenn eben möglich – in Mainz. Am 18. November aber wird die Octav des Hl. Martin gefeiert. Mit der Festlegung des Weihedatums von St. Georg auf den 18. November verband Hatto seine Bischofskirche in Mainz mit seiner Gründung in „Oberzell“ wie das Hochfest des fränkischen Nationalheiligen und Patrons der Bischofskirche mit der Octav des Hl. Martin.

Das heutige Erscheinungsbild (Abb. 1) der außen schlicht verputzten und seit ihrer Erbauung um 896 in Teilbereichen mehrfach veränderten Kirche ist geprägt von einem dreischiffigen, basilikalischen Langhaus mit einer westlich gelegenen

Abb. 1:
St. Georg von Südosten,
Oktober 2015
(LAD, Jakobs).

1 Ausführliche Diskussion der Literatur zu den historischen Quellen: Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Bd. 1, Stuttgart 1999, S. 17–22.

2 Vgl. Jakobs, Dörthe: Zum Weihedatum von St. Georg, Reichenau-Oberzell. In: Kunstchronik 49, 1996, Heft 4, S. 141–144.

Eingangskonche und einer davor gelagerten zweigeschossigen Vorhalle. Im Obergeschoss befindet sich die Michaelskapelle. Nach Osten schließt sich der erhöhte und abgeschnürten Vierung mit Turm ein nochmals um vier Stufen erhöhter, quadratischer Chorraum an. Nördlich und südlich der Vierung verweisen viertelkreisförmige Mauerfragmente auf ehemals vorhandene Konchen. Wesentlicher Bestandteil des Bauwerkes ist eine unter dem Chor gelegene Hallenkrypta. Seitliche Zugänge im Osten des Mittelschiffes führen in einen unter dem Vorchor gelegenen Querstollen. Nach Osten setzt sich der Quergang in einen axial unter der Vierung verlaufenden Längsstollen fort, an dessen Ende die unter dem Chor gelegene, quadratische Hallenkrypta liegt.

Der Grundriss von St. Georg hat immer wieder Fragen nach der Einordnung einzelner Bauteile, wie beispielsweise der Krypta oder den nördlich und südlich der Vierung anschließenden Konchen aufgeworfen, auf die hier nicht weiter eingegangen werden kann.³

Ebenso vieldiskutiert war die Frage, ob die Quellen mit der Baugeschichte in Einklang gebracht werden können. Dies darf, ohne sich hier in Details zu verlieren, bejaht werden, da die Summe der Befunde und die dendrochronologischen Datierungen der Hölzer in den Hochschiffwänden auf eine karolingische Bauentstehung hindeuten. Für die zeitliche Stellung des gesamten Bauwerks ist nicht zuletzt auch die dendrochronologisch zwischen 925 und 945 datierte und als Eingangskonche konzipierte Westapsis von Bedeutung, bei der es sich erwiesenermaßen um eine Bauveränderung handelt, die einen bisher nicht bekannten Westabschluss ersetzte.

Die Wandmalereien

Weniger der Bau hat St. Georg über die Grenzen hinaus zu Ruhm verholfen, als vielmehr der einzigartige, monumentale Wandmalereizyklus aus ottonischer Zeit mit den Wunderszenen aus dem Leben Jesu an den Hochschiffwänden des Langhauses (Abb. 2, 3).⁴ Gerahmt werden die Bildszenen von Mäandern und reich gestalteten Ornamentfriesen, im Obergaden sind stehende Apostelfiguren dargestellt, in den Arkadenzwickeln Tondi mit männlichen Büsten, vermutlich Äbten. Weitere, bedeutende Wandmalereien befinden sich an der Ostwand der Krypta: Zwei Kruzifixe mit adorierenden Heiligen stammen aus dem letzten Drittel des 10. Jahrhunderts. Die Darstellung der Wiederkunft Christi zum Jüngsten Gericht in der Michaelskapelle im Obergeschoss der Vorhalle – um 1050/60 entstanden – gilt als erste monumentale Parusiedarstellung nördlich der Alpen.

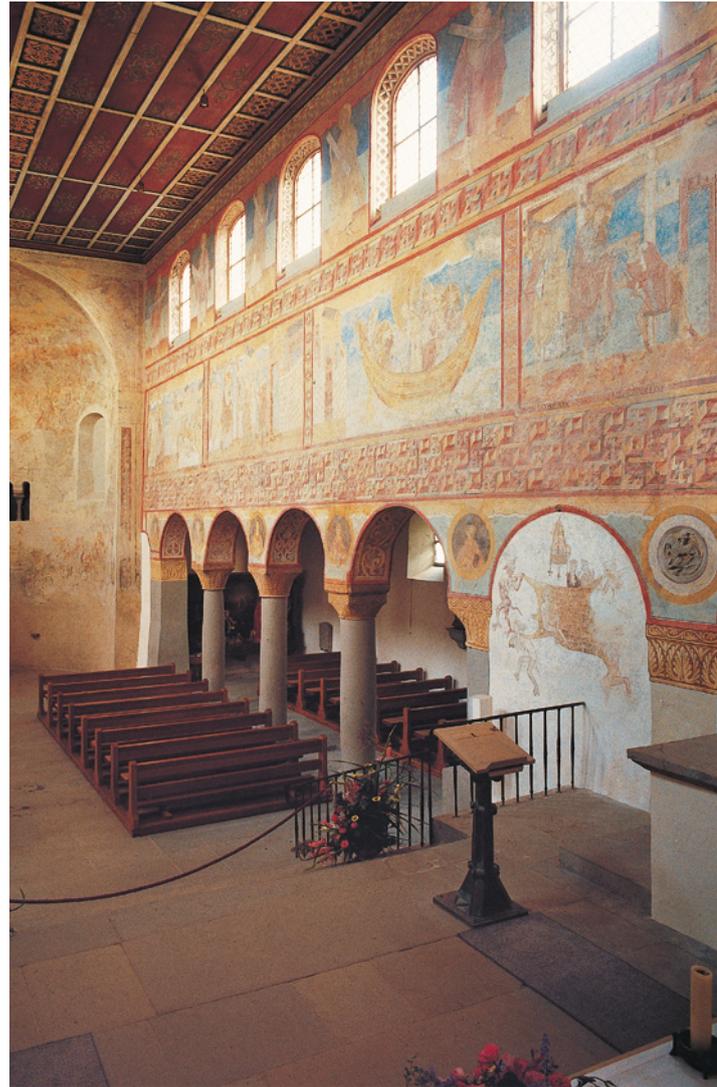
Im Rahmen eines Pilotprojektes unter der Leitung des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg fand in den Jahren 1982 bis 1990 eine Bestandserfassung und Restaurierung von St. Georg statt, die alle Raunteile der Kirche und die Wandmalereien verschiedener Entstehungszeiten einbezog. Dieses Pilotprojekt ermöglichte umfangreiche und in seiner Methodik damals wegweisende Untersuchungen.⁵ Bautechnische, restauratorische und naturwissenschaftliche Einzeluntersuchungen dienten der Klärung bestimmter Schadensphänomene, um ein auf das Objekt abgestimmtes Maßnahmenkonzept zu entwickeln. Einen besonderen Stellenwert nahm dabei der Wandmalereizyklus ein.

Alle Detailkenntnisse zu den Veränderungsphasen sowie zur Restaurierungsgeschichte und Übermalungen sind dieser Kampagne des Landesdenkmalamtes unter Leitung von Helmut F. Reichwald zu verdanken. Wie enorm wichtig die damalige Erfassung und Dokumentation für

3 Vgl. hierzu Zettler, Alfons: Die spätkarolingische Krypta von St. Georg in Reichenau-Oberzell. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 18, 1989, S. 97–105; Jakobs, Dörthe: Die Wandmalereien von St. Georg in Reichenau-Oberzell. Untersuchung – Dokumentation – Kontroversen. In: Exner, Matthias (Hrsg.): Wandmalerei des frühen Mittelalters. Bestand, Maltechnik, Konservierung (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXIII), München 1998, S. 161–190; Eggenberger, Peter: Beiträge zur Baugeschichte der Kirche St. Georg. In: Südwestdeutsche Beiträge zur historischen Bauforschung 5, 2001, S. 215–327.

4 Zur ersten Ausmalungsphase mit Literatur zur kontrovers diskutierten Datierung vgl. den Beitrag Jakobs unter der Rubrik „Material“ im vorliegenden Band.

5 Vgl. Reichwald, Helmut F.: Möglichkeiten der zerstörungsfreien Voruntersuchung am Beispiel der ottonischen Wandmalereien in St. Georg Reichenau-Oberzell. Historische Technologie und Konservierung von Wandmalerei. Bern 1985, S. 106–132; Ders. Die ottonischen Monumentalmalereien an den Hochschiffwänden in der St. Georgskirche auf der Insel Reichenau. Veränderungen – Bestand – Maltechnik. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2, 1988, Heft 1, S. 107–170.



das Verständnis der Malereien war und heute noch ist, soll im Folgenden kurz umrissen werden.⁶

Die nachfolgenden Beschreibungen zu Ausmalung, Veränderungsphasen und Restaurierungsgeschichte beschränkt sich auf Zeitangaben und inhaltliche Beschreibungen, ohne auf Detailfragen und Datierungsargumente näher eingehen zu können.⁷ Es geht darum, die Komplexität der Schichtensituationen vor Augen zu führen, ohne deren grundlegende Kenntnis jede Auseinandersetzung mit dem Objekt zum Scheitern verurteilt ist, egal welche Disziplin sich der Sache nähert.

6 Vgl. hierzu auch die Beiträge zum Thema Dokumentation.

7 Vgl. hierzu ausführlich Reichwald 1988, S. 107–170; Jakobs 1998, S. 175–181; Jakobs 1999, Bd. 1; Exner 2004, S. 93–115 (siehe jeweils dort zur älteren Literatur).

Der Lettner und die Übermalung der Wandmalereien im Schiff im 14. Jahrhundert

Bereits im 14. Jahrhundert erfolgte eine, nennen wir es „Modernisierung“ der Malerei unter Beibehaltung der Gesamtkonzeption mit Bildszenen und Rahmungen etc. Dabei wurden die Wandmalereien vollständig übermalt und dem neuen Stil angepasst. Die Ornamente zwischen den Bildszenen und die Mäander, aber eben auch die Gewänder und Teile der Architektur erhielten eine dem Zeitgeschmack angepasste Neugestaltung. Zudem erfolgten innerhalb der Bildszenen Umgestaltungen, Ergänzungen und Veränderungen. Genannt sei die Abdeckung der Bodenzone, die hinzugefügten Schweine in der Bildszene der Heilung des Besessenen von Gerasa (Abb. 4a, b),

[links] Abb. 2: Innenraum mit Wandmalereien der Südwand von Osten nach Westen, 1988 (Keller jun., Reichenau).

[rechts] Abb. 3: Innenraum mit Wandmalereien der Nordwand von Osten nach Westen, 1988 (Keller jun., Reichenau)



Abb. 4a, b:
Detail aus der Bildszene der Heilung des Besessenen von Gerasa (1986) im Auflicht (a) und im UV-Licht (b). Deutlich erkennbar die drei im Wasser „liegenden“ Schweine als gotische Übermalung, da sie auf den differenziert gemalten Wellen liegen (LAD, Reichwald).

das Ruderblatt in der Bildszene der Beruhigung des Sturms auf dem See Genezareth oder die Veränderungen am Bett in der Auferweckung von Jairi Töchterlein. Die Übermalung kann mit dem Einbau eines Lettners in Verbindung gebracht werden, der bis 1819 bestand und in den Plänen dieser Zeit auch aufgeführt wird.

Überarbeitung und Abdeckung der Wandmalereien ab dem 16. Jahrhundert

Anhand einer „Reparatur“ auf der Südwand lässt sich nachweisen, dass der Malereizyklus bis in das 16. Jahrhundert sichtbar gewesen sein muss. Gegen Ende des 15. Jahrhunderts wurde der östliche Apostel auf der Südwand gemalt, der vermutlich aufgrund eines Wasserschadens erneuert werden musste. Die Wiederaufnahme einer Aposteldarstellung macht natürlich nur Sinn, wenn der Bestand des 14. Jahrhunderts zu diesem Zeitpunkt noch sichtbar war. Für die Folgezeit sind zahlreiche Fassungsreste und fragmentarisch erhaltene Gestaltungselemente auf den Wänden nachzuweisen, die neue Raumgestaltungen ab 1620 nahelegen. 1708/09 erfolgte die Neuausmalung der auch baulich zuvor veränderten Westapsis. Mit dieser Neugestaltung müssen auch einschneidende Veränderungen an den Hochschiffwänden einhergegangen sein. Aus der Kombination von Archivalien und Befunden vor Ort ist eine Stuckdecke mit Bildfeldern des Malers Johann Rudolph Mohr zu rekonstruieren. Einschneidende bauliche Maßnahmen sind ab 1787/88 nachzuweisen. Zu diesem Zeitpunkt

wurden die Obergadenfenster vergrößert und auf die Achse der Arkadenbögen ausgerichtet. Spätestens ab diesem Zeitpunkt ist eine komplette Ausweißelung der Kirche nachzuweisen. Mit dem Abbruch des Lettners kurz nach 1819 ging nochmal eine bauliche Veränderung auf Höhe der Seitenaltäre einher, die Reparaturen der Stuckdecken, die Verlegung der Empore in die Westapsis und erneute Tünchungen der Wandflächen. Mit der barocken Ausstattung der Kirche bot St. Georg zum Zeitpunkt vor der Aufdeckung jedenfalls ein völlig anderes Bild als wir es heute kennen, wie eine frühe Fotografie von 1868 belegt (Abb. 5).

Freilegungs- und Restaurierungsgeschichte

Den umfangreichen Instandsetzungen im Chor sollten wenig später auch Maßnahmen im Mittelschiff folgen. 1879 war man mit der Dacherneuerung befasst, beantragt und genehmigt war auch bereits die Erneuerung des Verputzes im Mittelschiff (sic!). Dem damaligen Pfarrverweser Feederle ist zu verdanken, dass der Putz nicht abgeschlagen und auch die Wände nicht wie geplant abgekratzt und übertüncht wurden. Er hatte sich die Suche nach Wandmalereien zum Ziel gesetzt und nach seinen ersten Funden auch umgehend das Erzbischöfliche Ordinariat informiert.⁸ Dem Fund folgte die Freilegung der Wandmalereien zwischen Juni 1879 und Mai 1881 durch Maurermeister aus Allensbach und dem

⁸ Zu Details Jakobs 1999, Bd. 1, S. 241–255.



Abb. 5:
Innenansicht von
St. Georg vor 1868 mit
barocken Altären und
weiß getünchten Wän-
den (Stadtarchiv Kons-
tanz, Nachlass Wolf).

Pfarrerverweser Feederle höchstpersönlich. Begleitet wurde die Maßnahme durch den Architekten Franz Baer vom Erzbischöflichen Bauamt in Freiburg, der sich bereits 1880 mit dem Vorwurf einer unsachgemäßen Freilegung durch ungeschulte Kräfte konfrontiert sah, dies aber vehement bestritt. Aber natürlich hat die Freilegung zu zahlreichen Schichtvermischungen der Ausmalung des 10. Jahrhunderts und der Übermalungen des 14. Jahrhunderts geführt, ganz zu schweigen von den schweren Malschichtredu-

zierungen, die durch das Abtragen pastoser Höhen und Binnenzeichnungen zu beklagen sind. Die sich der Freilegung anschließende Diskussion über die Frage einer Restaurierung mündete zwar in dem Bekenntnis, dass der Wert der Malereien für die Kunstgeschichte gerade in seinem unverfälschten Zustand, in seiner Ursprünglichkeit und ohne „alle Zuthaten“ liege, dennoch entwickelte sich das Konzept bekanntlich in eine etwas andere Richtung, zumindest was das gesamte Rahmenwerk der Bildszenen angeht. Tat-

Abb. 6:
Innenansicht von St. Georg nach 1882 und vor 1890 (Stadtarchiv Konstanz, Nachlass Wolf).



Abb. 7:
Innenansicht von St. Georg nach der Instandsetzung von 1890/92 mit den von Carl Ph. Schilling kopierten Bildszenen auf Tapeten und dem komplett übermalten Umfeld (Stadtarchiv Konstanz, Nachlass Wolf).



sächlich führte die unterschiedliche Wertung von Bildszenen und Rahmenwerk zu dem von dem Maler Carl Philipp Schilling ausgeführten neuen Raumkonzept zwischen 1890 bis 1892, bei dem

die Bildszenen auf Tapeten kopiert und vor die Wand gehängt wurden, das gesamte Umfeld mit Mäandern, Ornamenten und Äbten jedoch komplett in einer Leimtechnik übermalt wurde



Abb. 8:
Innenansicht von
St. Georg nach der Res-
taurierung von 1921/22.
Die Bildtapeten wurden
entfernt und die Über-
malungen des Umfelds
patiniert (Landesbildstel-
le Baden-Württemberg).

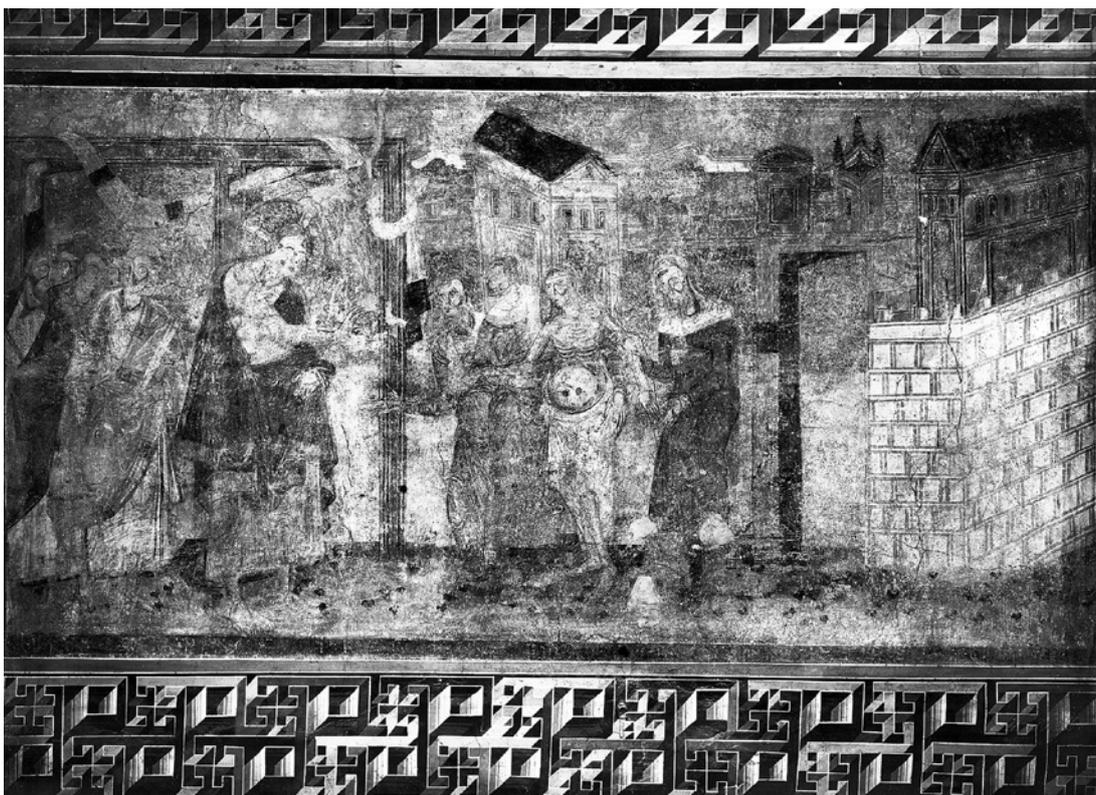


Abb. 9:
Bildszene der Heilung des
Wassersüchtigen, Auf-
nahme 1908/10 von
W. Kratt mit übermal-
tem Umfeld (Schilling
1890/91) und der nicht
restaurierten Bildszene
(Generallandesarchiv
Karlsruhe, Nachlass
Kratt).

(Abb. 6–9). Bestandteil dieser stilgerechten Wiederherstellung waren auch die Apostel im Obergaden, die jedoch aufgrund der veränderten Fenstersituation neu zu positionieren waren.

Entscheidend war, das Raumerlebnis als Ganzes wiederherzustellen. Zwischen 1906 und 1908 folgten Restaurierungsmaßnahmen an den Bildszenen, die zwar archi-

valisch belegt sind, deren tatsächlicher Umfang am Bestand sich jedoch bisher schwer greifen ließ. Außer Mörtelergänzungen und Hinterfüllungen von Putz soll zu diesem Zeitpunkt eine Fixierung der Bildszenen durchgeführt worden sein. Alle Rechnungen beinhalten eine Behandlung der Wandmalereien mit „Tränkungs-lack“, die zu einer erhöhten Leuchtkraft der Malereien geführt haben sollen. Das sogenannte „Richard'sche Fixativ“ sei aber selbstverständlich erst nach Überprüfung seiner positiven Wirkung an anderen Objekten, wie beispielsweise den Rethelschen Fresken in Aachen, angewendet worden. Bis heute ist unklar, um was es sich gehandelt haben könnte, denkbar wäre eine verdünnte Kaseinlösung. Dass es sich um ein organisches Material gehandelt haben könnte, lassen die Sporenbildungen vermuten.

Bereits zu diesem Zeitpunkt lässt sich eine gewandelte Denkmalauffassung in der kritischen Haltung zu den damals durchgeführten Übermalungen erkennen, einhergehend mit einer zunehmenden Auseinandersetzung über die Stellung der Tapeten. All dies mündete 1921/22 in einer erneuten, dieses Mal aber „zeitgemäßen“ Restaurierung“ der Wandmalereien. Dieses Konzept beinhaltete die Abnahme der bereits seit längerem ungeliebten Tapeten, zurück zum „Original“ war die Devise. Mit der Abnahme der Tapeten sah man sich dem Problem konfrontiert, dass Schilling alle Flächen außerhalb der Tapeten komplett im Stil des 19. Jahrhunderts übermalt hatte. Eine entscheidende Frage dieses Restaurierungskonzeptes war also „wie weit man hier gehen will“, die bestehende Dissonanz auszuglei-

chen. Das hieß einerseits die Malereien von Schilling zu reduzieren, andererseits den unrestaurierten und „nur“ fixierten Bestand der Bildszenen wieder anzugleichen. Aufgrund der Verwendung von „Wasserfarben“ könne man, so der damalige Konservator Sauer, die Farben der Übermalung bereits mit der Hand wegreiben. Gleichzeitig bediente sich der Restaurator Victor Mezger aus Überlingen erneuter Lasuren und Übermalungen, um jene Differenzen zwischen den verschiedenen Zuständen auszugleichen. Gleichzeitig kam eine gründliche Reinigung der Bildszenen zur Ausführung. Fehlstellen, die man 1908 noch unberührt gelassen hatte, wurden mit Gips gekittet und großflächig überretuschiert. Die wiedergewonnene Farbintensität der Malereien nach der Restaurierung schrieb Sauer der „durchgreifenden Säuberung“ und der anschließenden Fixierung zu, was auch immer letztere nicht näher beschriebene Maßnahme beinhaltete.

Das Pilotprojekt der Denkmalpflege in den 1980er Jahren

Die Grundlage für denkmalpflegerische Maßnahmen bilden umfangreiche Kenntnisse über den zu behandelnden Gegenstand. Die vorherigen Ausführungen zu Veränderungs- und Restaurierungsgeschichte werden deutlich gemacht haben, wie komplex der Malereibestand im Mittelschiff von St. Georg ist und dass sich jedes Handanlegen verbietet, bevor diese grundlegenden Erkenntnisse gesammelt, zusammengestellt und dokumentiert sind.⁹

Der Politik und der Öffentlichkeit eine über ein Jahr dauernde Untersuchung und Dokumentation zu vermitteln, war Anfang der 1980er Jahre ein durchaus schwieriges Unterfangen. Die Denkmalpflege sah sich seinerzeit einem massiven öffentlichen Druck ausgesetzt, nachdem ein Amateurforscher eine Holzkonsole aus dem Mauerwerk der Mittelschiffwand von St. Georg entwendet hatte, was eine größere Ausbruchsstelle in der Wandmalerei der Nordwand zur Folge hatte (Abb. 10). Eine sofortige Sicherungsmaßnahme im Umfeld der Ausbruchsstelle durch die Restaurierungswerkstatt des Landesdenkmalamtes sowie erste Untersuchungen am Malereibestand kamen seinerzeit zu dem Ergebnis, dass zwar starke Verschmutzungen und Ver-

Abb. 10:
Mittelschiff, Nordwand,
Schaden im mittleren
Mäander zwischen den
beiden westlichen Ober-
gadenfenstern, 1978
(LAD, Reichwald).



9 Vgl. hierzu den Beitrag zur Dokumentation.



änderungen an den Malereien vorlagen, der ottonischen Malereibestand jedoch nicht gefährdet war. Während das Landesdenkmalamt ein Konzept für eine umfangreiche Untersuchung und Bestandsaufnahme an den Wandmalereien als Grundlage für jede weitere Entscheidungsfindung im Hinblick auf ein Restaurierungskonzept erarbeitete, warf die Presse der Bau- und Kunstdenkmalpflege massive Versäumnisse vor und sprach vom Verfall eines abendländischen Kleinods.¹⁰ Erst der sachlichen Aufklärung der Öffentlichkeit durch die Pressarbeit der Denkmalpflege folgte ein positiver Beitrag mit dem Titel: „St. Georg auf der Reichenau – ein Kleinod wird gerettet“.¹¹

In der Folgezeit konnte auch dank der Unterstützung der politischen Gemeinde der Reichenau und der Pfarrgemeinde ein sehr ambitioniertes Programm umgesetzt werden, das eine über ein Jahr dauernde Untersuchung und eine entspre-

chend umfangreiche Bestandsdokumentation beinhaltete. Die Dokumentation ist Thema eines eigenen Beitrags. Ein wesentlicher Punkt der damaligen Herangehensweise zur Ermittlung von Grundlagen war die Zielformulierung, dass mit einer Bestandserfassung der Wandmalereien auch zukünftige Veränderungen am Malereibestand nachvollziehbar und kontrollierbar sein sollten und nicht subjektiven Wertungen unterliegen. So ist ein vermeintlich fortschreitender Verfall eben nur über eine sehr genaue Dokumentation des Objektes überprüfbar.

Die Dokumentation zu den Untersuchungen wie auch zu den durchgeführten Maßnahmen bildete auch heute wieder die Grundlage für das DBU-Forschungsprojekt. Rückblickend wird man behaupten können, dass es kein vergleichbar dokumentiertes Objekt weltweit aus dieser Zeit geben wird.

Die eigentliche Restaurierung der 1980er beschränkte sich überwiegend auf konservatorische Maßnahmen, auf eine Reinigung der Oberflächen – immerhin waren seit der letzten Reinigung 60 Jahre vergangen, auf Mörtel- und Malschichticherungen, auf Herausnahme der Gipskittungen der Restaurierung von 191/22 und

Abb. 11: Wartung im Jahr 2001, hier Helmut F. Reichwald, Leiter des Pilotprojekts der 1980er Jahre (LAD, Jakobs).

¹⁰ Badische Neueste Nachrichten, 2. 12.1980, Nr. 279 und Stuttgarter Zeitung vom 6.12.1980, Nr. 283: zit. nach Jakobs Bd. 1, 1999, S. 13 f.

¹¹ Südkurier, Osterausgabe 18./19./20.04.1981 (Jakobs 1999, S. 14).



Abb. 12: Darstellung der Parameter, die Raumklima und Staubentwicklung beeinflussen können (nach Garrecht). Im grauen „Hintergrund“ zeichnet sich vage St. Georg im Novembernebel ab (LAD, Jakobs).

eine Punktretusche, die sich auf die Neukittungen in Kalktechnik bezog.¹²

Klimakontrollen und Wartungen

Seit Beginn der 1980er Jahre werden Klimamessungen durch das Landesdenkmalamt Baden-Württemberg in verschiedenen Raumteilen von St. Georg durchgeführt.¹³ Nach Abschluss der Restaurierung fanden Wartungen an den Wandmalereien im September 1992, im Juni 1994, im Juli 1998 und im September 2001 statt (Abb. 11). Einhergehend mit bedenklichen Messwerten war ab 1998 eine zunehmende Neuverschmutzung durch aufgewirbelten Staub sowie ein beschleunigtes Wachstum von Pilzbefall festzustellen. 2003 war ein Zustand erreicht, der eine erneute Einrüstung erforderlich machte, um den Befall so weit möglich zu entfernen. Zu diesem Zeitpunkt erfolgten eine komplette Oberflächen-

reinigung der Mittelschiffwände und eine separate Behandlung der mit Schimmel befallenen Bereiche mit Isopropanol. Um die Nachhaltigkeit dieser Maßnahme zu gewährleisten, kam 2004 ein Klimakonzept für den Raum zur Ausführung, das eine gesteuerte Be- und Entlüftung sowie eine thermische Abluft beinhaltet.¹⁴

Die Ursachen für die Klimaschwankungen sind vielschichtig (Abb. 12). Der Mensch spielt dabei ebenso eine Rolle, wie die technische Ausrüstung mit Heizung und Lüftung u. a. sowie Raum, Bautechnik/Baumaterial und Standort/Lage des Gebäudes. So schlägt sich die unmittelbare Seenähe von St. Georg deutlich in den Klimadaten nieder, bekanntlich auch in den 100 % nebligen Herbst und Wintertagen.

Resümee

Die Wandmalereien von St. Georg haben eine sehr wechselvolle Geschichte hinter sich, die eine Übermalung im 14. Jahrhundert, mehrere Überfassungen ab dem 16. Jahrhundert, eine Freilegung von 1879 bis 1881, eine Teilübermalung 1881/82 und mehrere Restaurierungen beinhaltet. Umfangreiche Untersuchungen von 1982 bis 1990 haben erstmals eine differenzierte Erfassung des Bestandes und eine am Objekt orientierte Restaurierung ermöglicht. Die Erfassung und Dokumentation des Bestandes der 1980er Jahre sucht ihresgleichen. Wachsende Probleme mit dem Innenraumklima und immer kürzer werdende Intervalle von Restaurierungen durch die zunehmende Verschmutzung der Wandmalereien machen aber auch deutlich (Abb. 13, 14), dass zukünftig über Wartungszyklen nachzudenken ist, die mit der tournusmäßigen Abnahme von starken Verschmutzungen einhergehen müssen. Die seit 2013 etablierte

12 Zum Restaurierungskonzept vgl. Jakobs 1999, Bd. 2, S. 534–540 und Jakobs, Dörthe: Drei Kirchen auf der Insel Reichenau und ihre Restaurierungsgeschichte: St. Georg in Oberzell, Marienmünster in Mittelzell, St. Peter und Paul in Niederzell. In: Klosterinsel Reichenau im Bodensee. UNESCO Weltkulturerbe, hg. vom Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Arbeitsheft 8), Stuttgart 2001, S. 69–84 sowie Jakobs, Dörthe: Restaurierungskonzepte für die Wandmalereien von St. Georg in Reichenau-Oberzell. In: Die Restaurierung der Restaurierung? Zum Umgang mit Wandmalereien und Architekturfassungen des Mittelalters im 19. und 20. Jahrhundert; hg. von M. Exner und U. Schädler-Saub (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXXVII), München 2002, S. 39–48.

13 Vgl. den Beitrag von Elka Neycheva.

14 Vgl. Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252–257 und Ders.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? In: UNESCO-Welterbe: Lust und Last?! (Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Arbeitsheft 14), Stuttgart 2004, S. 89–95 sowie Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S. 155–161.



Besucherlenkung in den besucherreichen Monaten ist ein erster Schritt in die richtige Richtung, auch hier wird man sich Gedanken über eine Ausweitung machen müssen, will man die Wandmalereien nicht permanenten Reinigungszyklen unterziehen. Zuletzt bleibt die Aufgabe, einen Klimakorridor zu etablieren, der eine langfristige Erhaltung der Wandmalereien gewährleistet. Eine Aufgabe, die im Rahmen dieses DBU-Projektes begonnen und geprüft wurde. Unser Wissen über St. Georg ist dank der verschiedenen Untersuchungskampagnen enorm

angewachsen. Dennoch sind bis heute bestimmte Mechanismen nur ansatzweise in der Theorie erkannt und wir sind weit weg davon, alle Wechselwirkungen und gegenseitigen Einflüsse exakt erfassen zu können. So wertvoll Forschungsprojekte für die vielen Fragestellungen an ein Objekt sind, bei der Komplexität der zu berücksichtigenden Themen bedürfte es nicht nur eines, sondern mehrerer Forschungsprojekte und vor allem einer intensiveren Befassung mit den einzelnen Themen, die jetzt im Rahmen des Projektes angegangen wurden.

[links] Abb. 13: Detail aus dem Titulus unterhalb der Bildszene der Beruhigung des Sturms auf dem See Genezareth (DS DORMIT [...]). Deutlich erkennbar die Neuverschmutzung seit 2003 (LAD, Jakobs).

[rechts] Abb. 14: Detail von Abb. 13, neue Oberflächenverschmutzung seit 2003, März 2016 (LAD, Jakobs).

Literatur

- Eggenberger, Peter: Beiträge zur Baugeschichte der Kirche St. Georg. In: Südwestdeutsche Beiträge zur historischen Bauforschung 5, 2001, S. 215–327.
- Exner, Matthias: Die ottonischen Wandmalereien der Reichenau. Aspekte ihrer chronologischen Stellung. In: Zeitschrift des Deutschen Vereins für Kunstwissenschaft 58, 2004, S. 93–115.
- Jakobs, Dörthe: Zum Weihedatum von St. Georg, Reichenau-Oberzell. In: Kunstchronik 49, 1996, Heft 4, S. 141–144.
- Jakobs, Dörthe: Die Wandmalereien von St. Georg in Reichenau-Oberzell. Untersuchung – Dokumentation – Kontroversen. In: Exner, Matthias (Hrsg.): Wandmalerei des frühen Mittelalters. Bestand, Maltechnik, Konservierung (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXIII), München 1998, S. 161–190.
- Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.
- Jakobs, Dörthe, Drei Kirchen auf der Insel Reichenau und ihre Restaurierungsgeschichte: St. Georg in Oberzell, Marienmünster in Mittelzell, St. Peter und Paul in Niederzell. In: Klosterinsel Reichenau im Bodensee. UNESCO Weltkulturerbe, hg. vom Landesdenkmalamt Baden-Württemberg (Arbeitsheft 8), Stuttgart 2001, S. 69–84.
- Jakobs, Dörthe, Restaurierungskonzepte für die Wandmalereien von St. Georg in Reichenau-Oberzell. In: Die Restaurierung der Restaurierung? Zum Umgang mit Wandmalereien und Architekturfassungen des Mittelalters im 19. und 20. Jahrhundert; hg. von M. Exner und U. Schädler-Saub (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXXVII), München 2002, S. 39–48.
- Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2014, 3, S. 155–161.
- Reichwald, Helmut F.: Möglichkeiten der zerstörungsfreien Voruntersuchung am Beispiel der ottonischen Wandmalereien in St. Georg Reichenau-Oberzell. Historische Technologie und Konservierung von Wandmalerei, Bern 1985, S. 106–132.
- Reichwald, Helmut F.: Die ottonischen Monumentalmalereien an den Hochschiffwänden in der St. Georgskirche auf der Insel Reichenau. Veränderungen – Bestand – Maltechnik. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2, 1988, Heft 1, S. 107–170.
- Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252–257.
- Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? In: UNESCO-Welterbe: Lust und Last?! (Landesdenkmalamt Baden-Württemberg, Arbeitsheft 14), Stuttgart 2004, S. 89–95.
- Zettler, Alfons: Die spätkarolingische Krypta von St. Georg in Reichenau-Oberzell. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 18, 1989, S. 97–105.



*Hebebühne in der West-
apsis von St. Georg
(fokus GmbH Leipzig).*

Projektziele und offene Fragen

Harald Garrecht

Anstoß und Motivation

Seit den umfassenden Untersuchungen des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg in den Jahren 1982 bis 1990 und im Zuge der seit 1990 vorgenommenen Wartungen wird das Raumklima in der Kirche und in der Krypta von St. Georg systematisch erfasst. Trotz der Sicherung der ottonischen Wandmalereien wurde bei den Wartungen von 1998 und 2001 Schimmelpilzwachstum festgestellt. Die Ursache wurde in unzureichenden Klimaverhältnissen und in den mit der Fixierung 1908 und der Restaurierung 1921/22 aufgetragenen kaseingebundenen Lasuren gesehen, da letztere von Pilzen als Nährstoffe genutzt werden. Die Bedrohung des Malereibestands durch den Pilzbefall führte 2003 zur Entscheidung, den Befall abzunehmen und die Oberflächen zu behandeln.

In der Folgezeit wurden weitere Maßnahmen ergriffen, das ungünstige Raumklima durch eine Raumbelüftung zu verbessern. Hierzu wurden die Seitenschiff-Fenster in der Kirche wie auch die beiden sich gegenüberliegenden Fenster in der Krypta mit sich automatisch öffnenden und schließenden Lüftungsflügeln ausgestattet, um abhängig des Innen- und Außenklimas einen Luftaustausch zur Verringerung der hohen Raumluftfeuchte herbeizuführen. Des Weiteren wurde eine Entlüftungsmöglichkeit zum Dachraum in der Decke der Kirche geschaffen.

Mit der Realisierung einer Klimaschleuse konnte eine wirksame Verbesserung erreicht werden. Hierzu wurden die Eingangsportale zur Vorhalle und zur Kirche mit einem automatischen Schließsystem ausgestattet. Zudem wurde eine Besucherlenkung eingeführt, um den wachsenden Problemen des Individualtourismus zu begegnen. Der Besuch der Kirche ist in den Sommermonaten nur noch mit einer Gruppenführung möglich. Die Gruppe sammelt sich in der Vorhalle und alle Teilnehmer treten gemeinsam über das Westportal in die Kirche ein.

Auch wenn die vorgenannten Maßnahmen eine leichte Verbesserung der Raumklimaverhältnisse erreichen konnten, so zeichnete sich auch in den Folgejahren über weite Zeiträume des Jahres hinweg eine sehr hohe Raumluftfeuchte in der Kirche und in der Krypta ab. Diese führte zur großen Sorge, dass die einzigartigen Wandmalereien durch die hohen Feuchtelasten einer weiteren Gefährdung und Schädigung ausgesetzt sein könnten. Daher sollten weitere Anstrengungen unternommen werden, um Maßnahmen zu entwickeln, mit denen zuverlässig und nachhaltig der weiteren Schädigung der ottonischen Wandmalereien vorgebeugt werden kann (vgl. Garrecht/Jakobs/Reeb 2015 sowie den Beitrag Jakobs zur Vorgeschichte des Projekts).

Zielsetzung und Vision

Entwicklung und Umsetzung einer präventiven Klimastabilisierung

Um Raumklimaverhältnisse zu schaffen, die einen nachhaltigen Erhalt der Wandmalereien sicherstellen, sind die zutreffenden Anforderungen an das Raumklima zu definieren. So wird ein tolerabler Klimakorridor gesucht, der mit möglichst einfachen anlagentechnischen Maßnahmen sicherzustellen ist. Eine große Herausforderung stellt die Entwicklung geeigneter Lösungsansätze dar, deren Umsetzung zur ziel sichereren Verbesserung des Raumklimas führen. Zur Bewertung der im Jahres- und Tagesverlauf in St. Georg vorherrschenden Klimaverhältnisse wurde bereits 2003 ein Klimamonitoring mit elektrischen Datenloggern installiert. 2011 wurde das Klimamesssystem erneuert und ein umfassendes Messsystem mit mehr als 160 Sensoren realisiert, mit dem über die detaillierte Erfassung der Klimaverhältnisse in der Kirche und Krypta hinaus auch eine Bewertung im Nahfeld der ottonischen Wandmalereien ermöglicht

wurde. Die Messsignale werden seither in Abständen von einer Minute erfasst, ausgewertet, abgespeichert und bewertet. Alle Messdaten stehen auf einem Webportal zur weiteren Nutzung als Rohdaten wie auch bewertet in grafisch visualisierter Form zur Verfügung.

Identifizierung objektspezifischer Einflüsse auf die Wandmalerei

Auch wenn es sich bei der Kirche und Krypta um vergleichsweise kleine Räume handelt, so herrschen in den verschiedenen Raumbereichen recht unterschiedlich Klimaverhältnisse vor. Insbesondere die Süd- und Nordwand des Obergadens, die den ottonischen Wandmalereizyklus tragen, weisen unterschiedliche Temperatur- und Feuchteverhältnisse auf, die zu unterschiedlicher Beanspruchung führen. So findet an sonnenreichen Tagen die solare Einstrahlung über die Südfenster des Obergadens Zugang in den Raum. Dabei wird die gegenüberliegende Wandfläche mit den Malereien abhängig der Jahres- und Tageszeit über einen mehr oder weniger langen Zeitraum hinweg besonnt und erwärmt sich. Die Erwärmung führt zu einer deutlichen Veränderung des Nahfeldklimas. Physikalische und chemische Prozesse werden aktiviert, die eine Materialveränderung bewirken können. Sind die Wandoberflächen verschmutzt, können die Staubablagerungen mit der veränderlichen Nahfeldfeuchte in Wechselwirkung treten. Zu berücksichtigen ist auch, dass im Zuge früherer Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen ergänzende Materialien zum Einsatz kamen, die bei hohen Feuchte- und Temperaturlasten in komplizierter Weise reagieren. Diese Vorgänge sind bis heute nur in Ansätzen erforscht und verstanden.

Ziel des DBU-Projektes war es folglich, mit den heute zur Verfügung stehenden Werkzeugen und wissenschaftlichen Methoden den Ist-Zustand der Wandmalereien zu analysieren. Dabei gilt es, ein sicheres Verständnis für die sich unter den hohen Feuchtelasten in der Kirche und Krypta einstellenden Mechanismen der Gefährdung und Schädigung der malereitragenden Wandoberflächen zu schaffen, das Voraussetzung dafür ist, die Anforderungen an einen präventiven Klimakorridor zu definieren. Erst die Kenntnis der oberen Grenze der Raumluftfeuchte macht es möglich, diejenigen Maßnahmen herauszuarbeiten,

mit denen sich eine präventive Klimastabilisierung realisieren lässt.

Grundlagen einer präventiven Klimastabilisierung

Vermeidung von biogenem Wachstum auf der Wandmalerei

1998 wurde ein dunkler Pilzsporenbefall auf der Nordwand festgestellt, der vermutlich mit der Fixierung von 1908 und der Restaurierung von 1921/22 in Zusammenhang steht. Damals wurden kaseingebundene Lasuren auf die kalkgebundene Wandmalerei aufgebracht, die der Pilz als Nährstoffquelle nutzt. Infolge des zunehmenden Befalls wurde der Pilz 2003 abgenommen.

Auch in den Folgejahren konnte es nicht ausgeschlossen werden, dass aufgrund der sehr hohen Raumluftfeuchten zu einem erneuten Schimmelfall kommt. Folglich sollten Maßnahmen ergriffen werden, die trotz des verfügbaren Nährstoffangebots ein erneutes Auskeimen von Sporen und Wachstum der Pilzmyzelen wirksam unterbinden.

Um die Anforderungen an das Raumklima zu benennen, die ein erneutes Schimmelpilzwachstum zuverlässig verhindern, bedarf es der sorgfältigen Identifizierung aller Schimmelpilzarten, die die malereitragenden Wandoberflächen besiedeln können. Zur Bestimmung der Pilzarten wurden Luftkeimmessungen durchgeführt. Hier werden die Keime definiert auf einen Filter gesaugt und anschließend mit verschiedenen Nährböden zusammengeführt. Im Inkubator wachsen die aufgesaugten Mikroorganismen und abhängig der sich auf den Nährböden Kolonie bildenden Einheiten (KBE) können die Pilzarten nach Art, Gattung und Anzahl bestimmt werden.

Werden die Pilzstämme isoliert und auf Nährmedien mit unterschiedlicher Wasseraktivität gegeben, lassen sich aus der zeitlichen Entwicklung der Pilzkolonie die abhängig des Feuchteangebots und der Umgebungstemperatur im Inkubator einstellenden Wachstumsaktivitäten bestimmen.

Somit können auf Basis der mikrobiologischen Untersuchungen die für die Vermeidung eines weiteren Wachstums erforderlichen Anforder-

rungen an das Nahfeldklima der Wandmalereien benannt werden (vgl. den Beitrag von Stefanie Scheerer).

Vermeidung sorptionsbedingter Zwangsbeanspruchungen

Ändern sich die raumklimatischen Verhältnisse im Nahfeld der kalkgebundenen Malerei, stellen sich sorptionsbedingte Feuchtezustandsänderungen in den Malschichten und im Malgrund ein, mit denen physikalisch bedingte Formänderungsbestrebungen einhergehen. Das Sorptionsverhalten ist materialspezifisch und hängt von der Mikrostruktur und Zusammensetzung der Materialien ab.

Laufende Forschungen der präventiven Konservierung widmen sich dem Sorptionsverhalten von Museumsobjekten. Verfahren und Methoden, mit denen das Sorptionsverhalten kalkgebundener Malereien untersucht werden können, sind hingegen nur vereinzelt Gegenstand der Forschungen. Erschwerend kommt hinzu, dass mit der Restaurierung der ottonischen Wandmalerei in St. Georg 1908 und 1921/22 kaseinhaltige Lasuren aufgebracht wurden, die das Sorptionsverhalten der Malschicht beeinflussen, da Kasein mit der Raumluftfeuchte wechselwirkt.

Sorptionsanalysen werden vornehmlich anhand von Laboruntersuchungen vorgenommen. Im DBU-Projekt sollte darüber hinaus aber auch erstmals eine Charakterisierung des Sorptionsverhaltens der Malerei in situ mit einem bildoptischen Messsystem vorgenommen werden, um die abhängig mit den im Nahfeld vorherrschenden Klimaverhältnisse einhergehenden sorptionsbedingten Formänderungen in situ zu analysieren. Hierzu wurden zwei speziell auf die Problemstellung der Wandmalereien in St. Georg angepasste Versuchseinrichtungen vor Ort installiert, um die sich unter den zeitveränderlichen Nahfeldverhältnissen einstellenden Formänderungen der Malschichtoberfläche zu beobachten.

In den Laboruntersuchungen kamen modernste Analysetechniken zum Einsatz, um an kleinsten Mengen an Probematerial (wenige Milligramm) und an Proben mit kleinster Geometrie (wenige Millimeter) das Sorptionsverhalten zu analysieren. Vorteil der geringen Probenabmessung ist, dass eine probengrößenabhängige Behinderung von Wasserdampfdiffusionsprozessen entfällt

und sich daher rasch ein Sorptionsgleichgewicht einstellt. Schließlich müssen die gasförmigen Wassermoleküle nur geringe Wege zum Feuchteausgleich ins Probeninnere zurücklegen. Andererseits verlaufen die sich bei einer Feuchteänderung einstellenden Formänderungen nahezu zwängungsfrei.

Unter realen Bauwerksverhältnissen hat die Änderung der Nahfeldfeuchte an der Wandoberfläche aber keine zwängungsfreie Formänderung zur Folge. Hier liegen die Malschichten im mehr oder weniger festen Verbund auf dem Malgrund auf. Daher entscheidet das Verhalten des mehrschichtigen Verbundsystems darüber, in welchem Maße das mit der Feuchteänderung einhergehende sorptionsbedingte Formänderungsbestreben, z. B. an der oberen Malschicht, behindert wird. Die Verformungsbehinderung führt zur Beanspruchung der Wandmalerei, die nachfolgend erläutert wird: Nimmt die Raumluftfeuchte im Umfeld der Wandmalerei ab, ist die äußere Malschicht bestrebt, durch die sorptionsbedingte Feuchteabgabe zu schwinden. Die darunter gelegene Materialschicht bzw. der Malgrund folgen diesem Formänderungsbestreben aber nicht, solange die Feuchteänderung sich hier noch nicht in gleichem Maße wie an der Oberfläche eingestellt hat. Der Untergrund verharrt in seinem Formzustand. Da sich die Malschicht aber an der Oberfläche zusammenziehen möchte, kommt es an der Oberfläche durch den Verbund mit den darunter gelegenen Schichten zu einer Behinderung, die eine Zugbeanspruchung in der Malerei bewirkt. Die Malschicht erfährt dabei so hohe Zugkräfte, dass deren Zugfestigkeit überschritten wird, und sich sogleich eine Rissbildung einstellt. Mit zunehmender Steifigkeit und alterungsbedingter Versprödung der Malschicht nimmt dabei die Rissbildungsgefahr zu. An restaurierten Wandoberflächen gestalten sich die Verhältnisse noch wesentlich komplexer, weshalb im DBU-Vorhaben den kaum erforschten sorptionsbedingten Formänderungsbestrebungen von Wandmalereien nachgegangen werden sollte (vgl. den Beitrag von Simone Reeb).

Vermeidung physikalisch und chemisch bedingter Schäden

Wirken hohe Feuchtelasten auf Malschichten ein, können sich unterschiedlichste physikalische und chemische Materialveränderungen

einstellen, die verschiedenartige Mechanismen der Schädigung auslösen können. Bei hohem Wasserangebot an der Oberfläche wird Wasser in flüssiger oder gasförmiger Form an den Mineraloberflächen adsorbiert oder gar chemisch gebunden. Bei manchen mineralischen Stoffen werden die Wassermoleküle auch in das Kristallgitter eingebaut.

Finden sich an der Bauteiloberfläche gar schädigende Stoffe, lösen diese bei veränderlichen Feuchteverhältnissen physikalische und chemische Umwandlungsprozesse aus. Besonders bei bauschädlichen Salzen kann es bei Änderungen der Nahfeldfeuchte zu einem Salzphasenwechsel kommen. So geht bei einer Veränderung des Raumklimas hin zu hoher Raumluftfeuchte das zuvor kristalline Salz in Lösung. Umgekehrt können Salze bei einer Abnahme der Umgebungsfeuchte in die kristalline Phase wechseln. Einige Salze können abhängig von Temperatur und relativer Feuchte in verschiedenen Hydratstufen vorliegen. Mit dem Phasen- und Hydratstufenwechsel geht einher, dass bei der Kristallisation bzw. bei einer Zunahme des Volumens der Hydratstufe eine Volumenzunahme zu verzeichnen ist. Steht kein ausreichender Porenraum zur Verfügung, stellt sich infolge der Volumenanspruchnahme der Kristallisationsprodukte bzw. an Volumen zunehmenden Hydratprodukte eine hohe mechanische Beanspruchung im Porengefüge der salzbelasteten Materialschicht ein. Führen die steten Veränderungen der Nahfeldklimare zu einem steten Wechsel des Salzphasenzustands zwischen in Lösung gehen und Kristallisation, kommt es zu einer allmählichen Ermüdung des Materialgefüges, sodass mit zunehmender Zahl an Phasenwechsel die oberflächennahen Putz- und Malschichten aufbrechen, reißen oder abplatzen.

Ziel des DBU-Projekts war es folglich, das feuchteabhängige Verhalten der malereitragenden Wandoberflächen zu analysieren. Zudem sollten mit Blick auf die Salzbelastung des Krypta-Mauerwerks deren Einflüsse auf das Materialverhalten untersucht werden. Dabei sollten möglichst zerstörungsfreie Messverfahren zum Einsatz kommen, deren Aussagefähigkeit mit Laborverfahren überprüft wurde (vgl. die Beiträge von Judit Zöldföldi, Anna Schönemann und Boaz Paz).

Vermeidung von Verschmutzungen und schädigenden Ablagerungen

Durch Besucher werden Partikel und Schadstoffe in historische Räume eingetragen. Im Zuge eines Tests wurde die Kirche im Sommer 2009 für den Individualtourismus geschlossen und Besuchern nur in Gruppen zur Besucherlenkung Zugang in die Kirche gewährt. Vergleichsmessungen konnten dabei zeigen, welchen Einfluss die Besucher auf das Raumklima haben. Hierzu wurden neben Klimamessungen vor allem auch Messungen zur Feinstaub- und Luftkeimbelastung durchgeführt. Im Zuge der Besucherlenkung wurden zwei öffentliche Führungen täglich angeboten. Die Messungen zeigten, dass der Feinstaubgehalt der Raumluft während der Zeiten mit Besucherlenkung im Tagesmittel um ca. ein Drittel niedriger als bei freiem Besucherverkehr lag. Die Feinstaubbelastungen waren während der Führungen doppelt bis dreifach höher als bei Schließzeiten ohne Einlass der Kirche. Wie zu erwarten, lagen die niedrigsten Werte bei Schließung der Kirche ohne Besucherverkehr vor. Zudem zeigte die frühere Messreihe, dass der Feinstaubgehalt in der Kirche nicht von der Außenluft beeinflusst wird.

Ziel des DBU-Projekts war es folglich, die Feinstaubbelastung und die Luftkeimmessung systematisch über den Jahresverlauf hinweg zu untersuchen. Dankenswerterweise unterstützte die TU Darmstadt die Messkampagnen, die zu verschiedenen Jahreszeiten und an verschiedenen Stellen in der Kirche und der Krypta wie auch im Freien vorgenommen wurden.

Mit einem von der TU Darmstadt zur Verfügung gestellten Laborgerät wurden Partikelmessungen durchgeführt. Neben der Anzahl, Masse und Größe der Partikel konnte hiermit auch die jeweilige Partikelart direkt bestimmt werden. Die Messreihen wurden in der Kirche über dem Eingangportal im Nordfenster der West-Apsis vorgenommen, um die von den Besuchern eingetragenen Feinstäube zu erfassen. In der Krypta wurde das Labormessgerät auf dem Altar platziert. Zusätzlich erfassten die an zahlreichen Stellen in der Kirche und Krypta aufgestellten Passivsammler weitere Daten.

Darüber hinaus wurden in der Kirche und Krypta zu verschiedenen Zeiten an mehreren Stellen

Staubproben auf Filter gesaugt, die anschließend mit dem Stereomikroskop und dem Elektronenmikroskop auf die Feinstaubbelastung hin analysiert wurden. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten dabei, dass die kleineren Partikel neben Calcium und Silizium auch Spuren von Chlor aufweisen und stellen somit einen Zusammenhang zur Salzproblematik in der Krypta her.

Einen weiteren Schwerpunkt bildete die Erprobung von neuartigen Sensoren, mit denen Hinweise auf mikrobielles Wachstum gewonnen werden sollten. Neben der CO₂- und VOC-Messung geben die Sensoren auch Hinweise zu leichtflüchtigen organischen Verbindungen (VOC) wie auch zu Microbial Volatile Organic Compounds (MVOC). Entsprechend wurden die Sensoren innerhalb und außerhalb der Kirche und Krypta installiert. Um die Messsignale bewerten zu können, wurde im Umfeld der Messsensoren auch die Raumluft auf Proberöhrchen gezogen. Im Labor konnten die dabei im Proberöhrchen erfassten Schadstoffe mit einer Labor-GC/MS-Analyseeinheit bestimmt und die jeweils gewonnenen Ergebnisse verglichen werden. Die ersten Ergebnisse ermutigen, dass mit einer weiteren Sensoranpassung und einer Weiterentwicklung der Signalanalyse der neue Sensor durchaus geeignet ist, MVOC-Signale zu nutzen, um Hinweise auf aktives Schimmelpilzwachstum zu geben (vgl. den Beitrag von Jürgen Frick, Dirk Scheuven, Werner Weinzierl und Jean Michael Zapf).

Ein derartiger Sensor wäre hilfreich, einen vom Schimmelpilzwachstum abhängigen Betrieb von anlagentechnischen Systemen zu realisieren, der immer dann z. B. den Betrieb von Heizregistern, mit denen die Raumluftfeuchte auf einen Zielwert abgesenkt werden soll, aktiviert, wenn im Nahfeld der Wandmalereien eine Zunahme des MVOC-Signals auf eine beginnende Schimmelpilzaktivität hinweist.

Arbeitsprogramm

Grundlagenermittlung

Um die grundlegenden Zusammenhänge der Wechselwirkung zwischen malereitragender Oberfläche und den im Nahfeld einwirkenden Klimaverhältnissen herauszuarbeiten, sollten mit dem DBU-Projekt die nachfolgenden Untersuchungen vorgenommen werden:

die Analyse und Aufbereitung bereits vorhandener aber noch nicht ausgewerteter Daten, wie sie im Rahmen der bisherigen Untersuchungen seit 1982 gewonnen wurden

die Analyse des Verhaltens der malereitragenden Oberflächen als Folge dauerfeuchter Umgebungsverhältnisse bzw. als Folge steter Nahfeldklimaänderungen

die Analyse des anthropogenen Einflusses von Nutzung und Tourismus auf das Raumklima und die daraus resultierende Schadstoffbelastung und Verschmutzung der Wandmalerei

die Analyse des Einflusses einer kontrollierten und bedarfsabhängigen Belüftung und Wärmebereitstellung in der Krypta und Kirche auf die Wandmalerei zur Ausarbeitung von geeigneten Maßnahmen zur Verbesserung der Raumklimaverhältnisse.

Präventive Klimastabilisierung

Hohe Raumluftfeuchten bedingen eine potenzielle Gefährdung der ottonischen Wandmalereien. Mit den Untersuchungen können die noch tolerierbaren Klimaverhältnisse benannt werden, bei denen die malereitragenden Wandoberflächen nicht durch die aufgezeigten Prozesse gefährdet oder geschädigt werden. Damit ist die Basis geschaffen, auf das Baudenkmal abgestimmte und die Betriebskosten begrenzende Maßnahmen zu entwickeln, mit denen im Nahfeld der Wandmalereien ein Raumklima sichergestellt werden kann, das einer Schädigung vorbeugt. Gesucht werden dabei einfache und leicht kontrollierbare Anlagenkonzepte, die ohne größere bauliche Eingriffe und möglichst mit den ehemals vorhandenen haustechnischen Systemen die Raumklimasituation im Sinne einer präventiven Klimastabilisierung verbessern. Über die technischen Maßnahmen hinaus trägt die in St. Georg eingeführte Besucherlenkung zur Klimastabilisierung bei und hilft, den Eintrag und die Mobilisierung von Feinstäuben und Schadstoffen zu minimieren.

Im DBU-Projekt wurde eine zweigestufige Vorgehensweise gewählt. So wurden zunächst für die Krypta geeignete Maßnahmen ausgearbeitet, umgesetzt und erprobt. Die hierbei gewonnenen Erfahrungen sollten dann auf die Maßnahmenfindung in der Kirche übertragen werden, um hier unter Einbeziehung der vorhandenen Sitzbankheizung ein geeignetes Maßnahmenkonzept zu entwickeln und umzusetzen

(vgl. die Beiträge von Harald Garrecht und Elka Neycheva zum Klima).

Validierung der installierten Maßnahmen und Anpassung des Mess- und Regelkonzepts

Mit der Umsetzung und Inbetriebnahme der anlagentechnischen Maßnahmen sollten im DBU-Projekt die Folgen der Raumklimaverbesserung auf das Verhalten der malereitragenden Wandoberflächen von den beteiligten Projektpartnern untersucht werden, um eine ganzheitliche Erfolgsbewertung vornehmen zu können.

Abhängig der diversen Bewertungsergebnisse kann dann die für den Betrieb der technischen Anlagen erforderliche Regelstrategie ausgearbeitet, angepasst und optimiert werden. Hierbei kann das MSR-Konzept einen steten Abgleich aller messdatenbasierten Informationen nutzen, um die aktuelle Ist-Situation zur Nahfeldsituation an den Wandmalereien zu überprüfen und je nach Erfordernis eine bedarfsgerechte Anpassung des Anlagenbetriebs zur Verbesserung und Stabilisierung der vorherrschenden Klimaverhältnisse vornehmen.

Mit dem Abschluss des DBU-Projektes sollten verlässliche Maßnahmen umgesetzt und erprobt werden, mit denen zukünftig der bisherigen hohen Feuchtelastung der Wandmalereien und den daraus resultierenden Beanspruchungen und Schädigungen entgegengetreten werden kann, indem die Raumklimaverhältnisse trotz des ungünstigen Seeklimas verbessert werden (vgl. Beitrag Harald Garrecht).

Dokumentation der Forschungsergebnisse

Eine wichtige Aufgabe des DBU-Projektes war auch, alle von den Projektbeteiligten erzielten Ergebnisse in einer geeigneten Form zu dokumentieren, damit auch in zukünftigen Untersuchungskampagnen auf diesen Ergebnissen aufgebaut werden kann. Über die Sammlung, Archivierung und Dokumentation der wissenschaftlichen Arbeitsergebnisse hinaus sollten

die im DBU-Projekt gewonnenen Erkenntnisse der interdisziplinären Zusammenarbeit auch in wissenschaftlichen Publikationen den interessierten Fachkreisen vorgestellt werden.

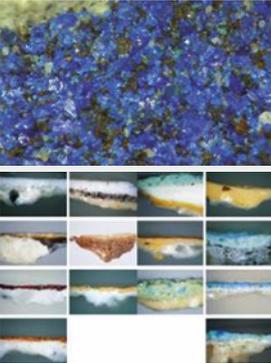
Schlussbemerkung

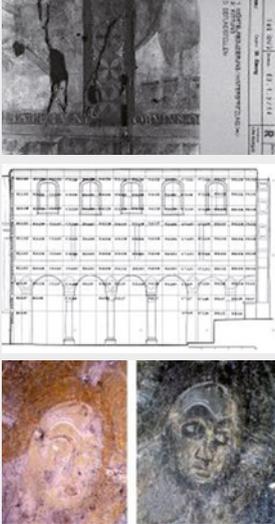
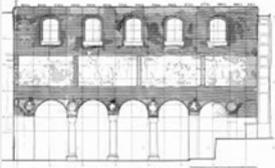
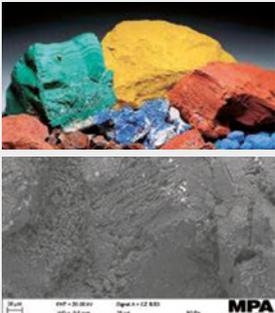
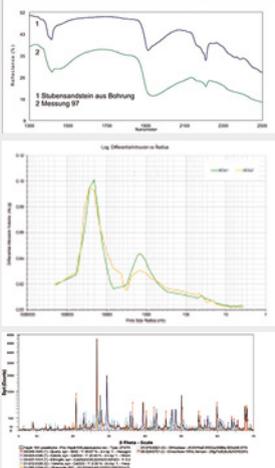
Mit Abschluss des DBU-Forschungsvorhabens sollte der Einfluss des Nahfeldklimas auf das Verhalten der Wandmalereien in der Kirche und Krypta von St. Georg weitgehend nachvollziehbar sein. Damit können die für den Erhalt des Wandmalereizyklus erforderlichen Anforderungen an einen einzuhaltenden Klimakorridor benannt werden. Die Entwicklung, Umsetzung und Erprobung einer dauerhaften Klimastabilisierung ist infolgedessen Grundlage für die nachhaltige Konservierung der Wandmalereien.

Die Herausforderung bestand aber auch darin, mit möglichst minimal in die Bausubstanz eingreifenden Maßnahmen und unter Verwendung der ehemals vorhandenen Systeme zur Raumluftkonditionierung, nämlich den elektrisch öffnen- und schließbaren Kippfenstern und der Sitzbankheizung, unter Einsatz geeigneter Regelstrategien ein Nahfeldklima im Umfeld der Wandmalereien zu schaffen, das zukünftig die weitere Gefährdung und Schadensbildung an der ottonischen Wandmalerei unterbindet.

Die so ausgearbeiteten Maßnahmen zur Raumluftverbesserung konnten bereits im Spätsommer 2015 umgesetzt, erprobt und in ihrer Wirkung optimiert werden. In der Kirche kann die Umsetzung der Maßnahmen erst Mitte Februar abgeschlossen werden. In der verbleibenden Zeit bis zur Abschlusstagung können die Maßnahmen noch hinsichtlich Funktionstauglichkeit erprobt und ersten Anpassungen und Optimierungen vorgenommen werden. Doch werden auch nach Abschluss des DBU-Projektes weitere Optimierungen vorgenommen werden, um einen bestmöglichen und nachhaltigen Betrieb der Maßnahmen zur passiven Klimastabilisierung in der Krypta und der Kirche sicherzustellen. Die im DBU-Projekt gewonnenen Erkenntnisse können auch auf andere Bauwerke mit vergleichbarer Problemstellung in Verbindung mit einer hohen Feuchtelast übertragen werden.

Tabellarische Übersicht über den Projektarbeitsplan

AP 1	Grundlagenermittlung
<p data-bbox="256 371 320 394">AP 1.1</p> 	<p data-bbox="443 371 807 394"><i>Aufarbeitung bisheriger Untersuchungen</i></p> <p data-bbox="443 445 1015 468">Aufarbeitung Bestandsdokumentation und Zustandserfassung</p> <ul data-bbox="443 470 1193 613" style="list-style-type: none"> - Sichtung Bestandsdokumentation - Auswertung des früheren Probeentnahmeplans - Sichtung früher durchgeführter naturwissenschaftlicher Analysen - Vergleich der früher eingesetzten und heute verfügbaren Analysemethoden - Sichtung Materialarchiv mit originalen Mauer- und Deckmörteln, Veränderungsmörteln sowie Mikroproben der Wandmalereien
<p data-bbox="256 922 320 945">AP 1.2</p> 	<p data-bbox="443 922 807 945"><i>Aufarbeitung bisheriger Untersuchungen</i></p> <p data-bbox="443 996 807 1019">Auswertung bisheriger Klimamessdaten</p> <ul data-bbox="443 1021 1230 1162" style="list-style-type: none"> - Sichtung aller seit 1980 verfügbaren Klimamessdaten - Feststellung des Witterungseinflusses auf das Raumklima auf Basis des Abgleichs mit Daten des Deutschen Wetterdienstes - Versuch der Korrelation von Klimamessdaten mit den sich im Betrachtungszeitraum einstellenden Schäden - Analyse der Tauwasser- und Schimmelpilzbeanspruchung
<p data-bbox="256 1386 320 1408">AP 1.3</p> 	<p data-bbox="443 1386 807 1408"><i>Aufarbeitung bisheriger Untersuchungen</i></p> <p data-bbox="443 1460 1123 1509">Aufarbeitung archivierter naturwissenschaftlicher Analysen aus bisherigen Untersuchungsreihen sowie archivierter Proben</p> <ul data-bbox="443 1512 1214 1628" style="list-style-type: none"> - Sichtung der vorhandenen Analysen zur Bindemittelproblematik - Gegenüberstellung Bindemittel aus der Entstehungszeit, aus Restaurierungen und Übermalungen bis in Gegenwart - Sichtung Kenntnisse zu Bindemittelproblematik und Raumklima - Ableitung Übertragungsfaktoren und Übertragungsfunktionen

AP 2	Dokumentation und zukünftiges Monitoringkonzept
<p data-bbox="459 241 523 264">AP 2.1</p> 	<p data-bbox="651 241 794 264"><i>Dokumentation</i></p> <ul data-bbox="651 315 1423 600" style="list-style-type: none"> - systematisches optisches Monitoring der Wandmalerei - Einbettung der bisherigen Erkenntnisse in künftige Befunderhebung und Abgleich mit Primärdokumentation - früher als kritische Bereiche beschriebene Befundstellen mit Makroaufnahmen digitalisieren und überprüfen - neue fotogrammetrische Dokumentation Langhauswände und Stirnwand mit Farbmessbildern - hochauflösende fotografische u. geometrische Dokumentation 50 Aufnahmen mit digitaler Mittelformatkamera (Maßstab 1:5) - 12 UV-Fluoreszenz-Aufnahmen von Ausschnitten Wandmalerei - 12 zugehörige Farbbilder (1:1) mit Vollformat Spiegelreflex - fotogrammetrische Entzerrung und bereichsweise Montage
<p data-bbox="459 819 523 842">AP 2.2</p> 	<p data-bbox="651 819 826 842"><i>Monitoringkonzept</i></p> <ul data-bbox="651 898 1117 965" style="list-style-type: none"> - wiederkehrende Befunderhebung - Dokumentation aller Befunde - Vergleich der neuen mit den bisherigen Befunden
AP 3	Materialkundliche Analysen Malschichten und Malgrund
<p data-bbox="459 1097 523 1120">AP 3.1</p> 	<p data-bbox="651 1097 1193 1120"><i>Pigment- und Bindemittelanalyse von originaler Wandmalerei</i></p> <ul data-bbox="651 1176 1284 1317" style="list-style-type: none"> - stereomikroskopische in-situ-Untersuchung zur Probenauswahl - Mikroskopie im Dunkelfeld kombiniert mit Fluoreszenzmikroskopie - Niedervakuum-Rasterelektronenmikroskopie ESEM mit EDX - FTIR und Raman-Mikrospektroskopie - Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie (GCMS) - Röntgendiffraktometrie
<p data-bbox="459 1460 523 1482">AP 3.2</p> 	<p data-bbox="651 1460 1372 1516"><i>Untersuchung späterer Übermalungen und Restaurierungsmaterialien des 19. und 20. Jahrhunderts</i></p> <ul data-bbox="651 1561 1332 1753" style="list-style-type: none"> - physikalischen Charakterisierung Malereimaterial und Malgrund - Porenstrukturanalyse (Hg- Porosimetrie, BET) - Adund Desorptionskurven durch Dynamic Vapor Sorption (DVS) - μ-Wert, Wasseraufnahme, Wasserkapazität und Sättigungsfeuchte - λ-Wert, spez. Wärmespeicherfähigkeit, spektraler Emissionsgrad ϵ - hygrothermische Formänderung - Dynamisches Formänderungsverhalten bei kleinen Zugwechsellasten bei veränderlichen Temperatur und Feuchtelasten

AP 3.3



Verhalten der Wandmalerei gegenüber biogener Besiedelung

- mikrobiologische Analyse der auf Malerei zu findenden Spezies
- Züchtung von Pilzproben
- Luftproben über gezüchteten Pilzproben mit Sammelröhrchen
- Luftproben im Zuge der Kontroll- und Wartungsphasen
- Analyse und Vergleich der Luftproben
- Einsatz und Erprobung von TVOC-Sensoren
- Einsatz VOC-Sensoren und Vergleich Schimmelpilzanalyse
- Analyse dotierter Fassungen nachgestelltes Klima im Labor
- Auslagerungsversuche dotierter Proben in der Kirche

AP 3.4



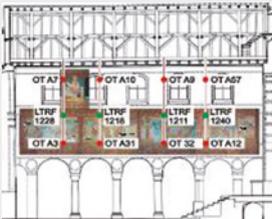
Analyse salzbelasteter Mauerwerksbereiche

- nasschemische, photometrische und ionenchromatographische Analysen zur Bestimmung der Anionen
- nasschemische Analysen und Atomabsorptionsanalysen zur Bestimmung der Kationen
- Röntgendiffraktometrie und Infrarotspektroskopie zur Charakterisierung der Mineralzusammensetzung und zur Bestimmung der Salzart

AP 4

In-Situ-Untersuchungen

AP 4.1



Erweiterung des bestehenden Klimamesskonzepts

- Online-Portal zur web-Visualisierung aller Messdaten
- Ergänzung von CO₂- und VOC-Sensoren zur Besuchererfassung
- Installation von je einem Strahlungsgeber auf Süd- und Nordseite
- Installation von je einem digitalen Mikroskop auf Süd- und Nordseite
- Erweiterung des Messnetzes für Raum- und Nahfeldklima in interessierenden Bereichen in der Kirche und der Krypta

AP 4.2



Partikelmessungen

- Partikelmessung und Partikelanalyse mit Laborpartikelmessgerät
- Kalibrierung von Kleinmessgeräten mit Laborpartikelmessgerät
- Auswahl Partikelsammelmethode und Einsatz
- Analyse von CO₂- und VOC-Sensorsignalen zur Besucheranalyse

AP 4.3



Analyse der Einflüsse aus kirchlicher Nutzung und Besucherlenkung

- Erfassung der Öffnungs- und Schließvorgänge der Portale in Vorhalle und Kirche
- Erfassung VOC- und CO₂-Konzentrationen
- Erfassung der Raumluftpartikel abhängig der Besucherintensität
- Analyse des Zusammenhangs zwischen Besucherindikatoren und Beeinflussung des Nahfeldklimas
- Entwicklung weiterer Methoden für Besucherzählung

AP 5

Präventive Klimastabilisierung in der Krypta

AP 5.1



Aufbereitung und Auswertung archivierter Untersuchungsdaten

- Analyse Dokumente zur Restaurierungsgeschichte
- Analyse der naturwissenschaftlichen Untersuchungen
- Analyse der bisherigen Klimamessdaten
- Bewertung der bisherigen Regelstrategie Kryptafenster
- Bewertung der bisherigen Klimasituation in Stollen

AP 5.2

Entwicklung Maßnahmenkonzept zur Raumklimastabilisierung

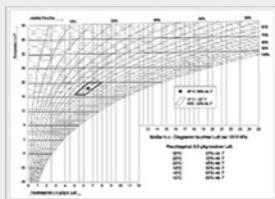


- differenzierte Bewertung bisheriger Regelbetrieb in Krypta
- Analyse Wirkung Querbelüftung auf Klimastabilität
- Analyse Betrieb von Rippenheizrohre auf Klimastabilität
- Festlegung Anzahl/Anordnung Rippenheizrohre Krypta/Stollen
- Einfluss Glasflügeltüren im Zutritt von Kirche zum Stollen
- Überlegungen zur geeigneten Regelstrategie
- Simulation zum Einfluss Mauerwerksfeuchte auf Raumklima

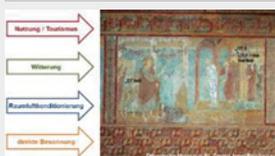


AP 5.3

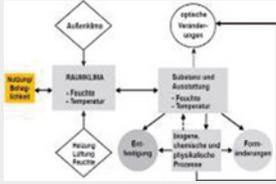
Umsetzung des Konzepts zur Raumklimastabilisierung



- Festlegung der Anforderungen an das Raumklima in Krypta
- Planung der anlagentechnischen Maßnahmen
- Umsetzung Fensteransteuerung mittels Schnittstelle zu Invera
- Installation und Realisierung Ansteuerung Rippenheizrohre in Krypta und Stollen
- Entwicklung und softwaretechnische Umsetzung des Regelbetriebs für Fenstersteuerung und Rippenheizrohre
- Entwicklung Regelstrategie Glastüren im Zugang zur Krypta zur Visualisierung im web-Portal



AP 5.4



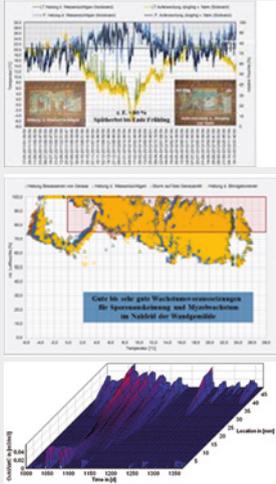
Entwicklung, Inbetriebnahme und Optimierung Regelbetrieb

- Umsetzung Regelstrategie, Inbetriebnahme Soft- u. Hardware
- Erprobung des Anlagenbetriebs und Kontrolle Auswirkungen
- Optimierung Regelstrategie

AP 6

Präventive Klimastabilisierung in der Kirche

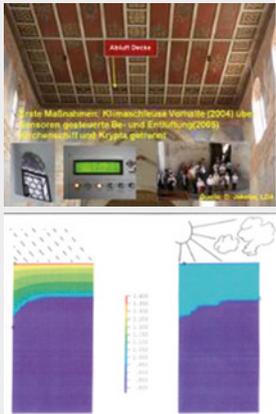
AP 6.1



Beanspruchung der malereitragenden Wandflächen im Obergaden Koppelung von Monitoring und Simulation

- Installation von neuen ergänzenden Sensoren
- automatische Analyse der Klimadaten und Bewertung der Beanspruchung der Wandmalereien
- numerische Berechnungen zum hygrothermischen Bauteilverhalten
- Einfluss des Solarenergieeintrags auf Wandmalerei
- Vergleich Messung und Simulation Feuchtehaushalt des Obergadenmauerwerks im Jahresgang
- Bewertung der Beanspruchung durch Schlagregeneinwirkung

AP 6.2



Arbeitsweise geeigneter Maßnahmen zur Raumluftoptimierung bzw. Raumklimastabilisierung

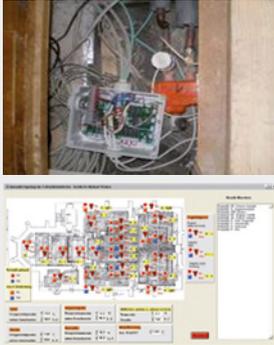
- Analyse und Bewertung der bestehenden Anlagenbestandteile
- Bewertung der Funktionsweise der Einzelkomponenten
- Analyse des witterungsbedingten Feuchteverhaltens des Obergadenmauerwerks abhängig Raumklimasituation
- Überprüfung der Funktionsweise der Lüftungskamine
- Entwicklung einer Regelstrategie für Fensterbetrieb
- Einbindung der Bankheizung in konservatorisches Konzept

AP 6.3



Konzept der präventiven Raumklimastabilisierung

- Analyse der dynamisch sich verändernden Einwirkungen
- Integration der Wetterprognosen in Regelstrategie
- vereinfachtes Modell für die Integration des dynamischen Bauteilverhaltens in die Regelstrategie
- Erprobung der prädiktiven Regelstrategie
- Kontrolle der Wandmalerei und Abgleich mit Klimaeinwirkung

<p>AP 6.4</p> 	<p><i>Kopplung des Monitoringsystems mit bisheriger Steuerungseinheit für automatische Fenstersteuerung und Bankheizung</i></p> <ul style="list-style-type: none"> - Schaffung Schnittstelle zw. System MOCult und Infera - Entwicklung und Installation MSR-Software - Erprobung der MSR-Software mit Überprüfung der Wirkung auf Wandmalerei - Optimierung der Regelstrategie
<p>AP 7</p>	<p>Validierung der installierten Maßnahmen und des problemangepassten Mess- und Regelkonzepts</p>
<p>AP 8</p>	<p>Dokumentation aller Forschungsergebnisse, Publikation und Fachveranstaltung</p>

Danksagung

Die Antragsteller und Projektbeteiligten danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Förderung des Vorhabens, dessen Erkenntnisse auf weitere Objekte mit vergleichbarer Problemstellung übertragbar sind. Dank gilt auch allen Projektpartnern für die konstruktive und fruchtbare interdisziplinäre Zusammenarbeit. Ein besonderes Dankeschön ist aber an alle im Projektantrag zunächst nicht berücksichtigten Partner zu richten, die aus Interesse am Vorhaben und

der gemeinsamen Verpflichtung des Erhalts von wichtigem Kulturgut geschuldet, sich trotz fehlender Projektförderung mit großem Engagement in das Projekt einbrachten und einen wesentlich Beitrag zum erzielten Ergebnis und Erfolg des Vorhabens geleistet haben. Besonderer Dank gilt dem Landesamt für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart, das über die im DBU-Projekt vorgesehene Unterstützung hinaus auch die Kosten für die Erstellung und den Druck des Tagungsbandes wie auch die Organisation der Tagung übernommen hat.

Literatur

Garrecht, Harald/Jakobs, Dörthe/Reeb, Simone: DBU-ForschungsprojektRaumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der

Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 6 (2015), S. 46-52.

Die Scrovegni-Kapelle in Padua: Giottos Fresken 15 Jahre nach Einführung einer Klimasteuerung und Besucherlenkung

Einführung von Dörthe Jakobs

Auf der Reichenauer Tagung zum Thema „Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes“ im Jahr 2004 berichtete Giuseppe Basile vom Zentralinstitut für Restaurierung (ICR)¹ über Untersuchungen und Maßnahmen an der Scrovegni-Kapelle in Padua, die eine neue Ära in der Herangehensweise der Restaurierung in Italien veranschaulichen sollten.² Drei wesentliche Aspekte standen im Vordergrund: Untersuchungen und naturwissenschaftliche Analysen, um die Ursachen für die voranschreitenden Schäden festzustellen. Im Vorfeld eines Eingriffs das Umfeld der Malereien zu prüfen, um ideale Rahmenbedingungen sicherzustellen und bezüglich der Eingriffe in kleinen Schritten vorzugehen und nicht zwingend immer die großen Maßnahmen voranzustellen.

Auslöser für verschiedene komplexe Untersuchungskampagnen waren erneute Schäden im Jahr 1971, nur acht Jahre nach der letzten Restaurierung. Dabei erkannte man, dass die Schäden nicht auf eine „falsche Restaurierung“ zurückzuführen waren, sondern dass der Raum und die Rahmenbedingungen eine große Rolle spielen mussten. Es sollte dann aber noch bis nach dem

Erdbeben 1976 in Friaul dauern, bei dem die Kapelle erneute Schäden aufwies, bis es zu einer Kooperation der verantwortlichen Denkmalschützer und dem ICR (Zentralinstitut für Restaurierung Rom) zur Entwicklung eines Restaurierungskonzeptes für den Malereizyklus von Giotto kommen sollte. Als Grundlage für die Arbeiten in der Kapelle sollte eine detaillierte Untersuchung der Schadensursachen durchgeführt werden. Im Fokus standen dabei minimalinvasive Techniken (Klimamessungen, X-Ray, FTIR, etc.).

Die Studien fanden im Wesentlichen in den Jahren von 1977 bis 2002 statt, eine erste umfangreiche Publikation erschien 2003,³ sie enthält

Abb. 1:
Der Anbau („Technikraum“ / *Corpo Tecnologico Attrezzato, CTA*) auf der Nordseite der der Scrovegni-Kapelle, zum Teil verdeckt durch die Vegetation (<http://padovacultura.padovanet.it/it/musei/il-corpo-tecnologico>).

1 Heute „Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro (ISCR)“.

2 Basile, Giuseppe / Mancinelli, Eugenio / Marabelli, Maurizio / Santopadre, Paola / Ioele, Marcella / Fassina, Vasco / Stevan, Antonio G. / Cesareo, Roberto / Castellano Alfredo: *The Scrovegni Chapel. Multidisciplinary Research and Environmental Protection*. In: Exner, Mathias/Jakobs, Dörthe (Hrsg.): *Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte – Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS – Heft des deutschen Nationalkomitees XLII)*. 2005, S. 85–98.

3 Basile, Giuseppe (Hrsg.): *Il Restauro della Capella degli Scrovegni: indagini, progetto, risultati*. Milano 2003.





Abb. 2:
Der Warteraum im An-
bau des CTA: hier können
die Touristen Filmmate-
rial ansehen, das über
Giotto und die Konservie-
rung der Wandmalereien
informiert
(<http://padovacultura.padovanet.it/it/musei/il-corpo-tecnologico>).

eine Synopse aller Untersuchungen, Studien und Eingriffe, die sich auf das Umfeld, das Gebäude selber und die Wandmalereien bezogen. Gegenstand der damaligen Analysen war auch die Evaluierung der chemischen und physikalischen Rahmenbedingungen in Bezug auf den Erhaltungszustand der Wandmalereien, die Bewertung der Luftqualität und das Mikroklima des Gebäudes, dies als Ausgangspunkt für Maßnahmen, die einen weiteren Verfall der Wandmalereien verhindern sollten. Langfristiges Ziel der Forschung war die Einrichtung eines technisch ausgerüsteten Raums (in Italien „Corpo Tecnologico Attrezzato“, abgekürzt CTA genannt), der mit einer Temperierung, einer Kühlung und einer Luftfiltereinheit für die präventive Konservierung der Kapelle ausgestattet sein sollte (Abb. 1, 2).⁴ Hauptproblem seinerzeit schien der ungehinderte Luftaustausch zwischen Kapelleninnenraum und Umgebung durch die Eingangstür der Kapelle zu sein, was zu einer erhöhten Konzentration von Schwefeldioxid in der Luft führte. Dies wirkte sich wiederum binnen weniger Stunden auf die Wandmalereien aus, an denen man einen hohen Gipsgehalt feststellen musste (Abb. 3).⁵ Der damalige Direktor des Zentralinstituts für Restaurierung (ICR) machte seinerzeit darauf aufmerksam, dass mit wenigen Maßnahmen geringen Aufwands bereits ein präventiver Schutz erreicht werden könnte, so bspw. die Anbringung eines IR- und UV-Schutzes an den Fenstern (Schutzverglasung), der Austausch der Leuchtmittel im Innenraum usw. Wesentlich

4 Zu den Details vgl. Basile et al. 2005, S. 85–98.

5 Die Ergebnisse sind im Bolletino d'arte 63, seconda serie speciale unter dem Titel: „Giotto a Padova“,

umfangreichere und weitgehendere Maßnahmen wurden auf die Zeit nach der Evaluierung verschiedener, präventiver Eingriffe vertagt.

In den Jahren von 1988 bis 1996 folgten weitere komplexe Untersuchungskampagnen.⁶ Dabei ergaben verschiedene Messungen, dass die Luftverschmutzung, das Mikroklima und die hohe Anzahl von Besuchern eine wesentliche Rolle für den zunehmenden Verfall der Wandmalereien spielten.

Daraus entwickelte sich ein Konzept der „kleinen Schritte“ mit dem Ziel, die Rahmenbedingungen für die Wandmalereien sukzessive zu verbessern. Teil dieses Konzepts war ab 1999 die Einführung einer Besucherlenkung, die Schließung des Haupteingangs und die Installation einer „Schleuse“ auf der Nordseite der Kapelle unter Verwendung eines alten Zugangs (CTA – Corpo Tecnologico Attrezzato) (vgl. Abb. 1, 2). Somit wurde das Außenklima vom Klima des Kapelleninnenraumes über drei getrennte Räume abgekoppelt und die Außenluft vor Eintritt in den Innenraum gereinigt. Die Klimatisierung des Innenraumes, welche aufgrund von relativer Feuchte, Temperatur und dem Einfluss der Besuchergruppen gesteuert wird, steht in Verbindung mit dem CTA.

Erst nachdem die Maßnahmen dieses gesteuerten Klimas (Belüftung, Regulierung der relativen Feuchte, Besucherlenkung über CTA und begrenzten Gruppengrößen von max. 25-35 Personen) ca. ein Jahr angewandt wurden, konnte anhand der kontinuierlichen, messtechnischen Überwachung nachgewiesen werden, dass die Maßnahmen zu einer definitiven Verbesserung der Malereiumgebung geführt hatten.

Nach einer gesamten Laufzeit dieses Projekts mit den Voruntersuchungen von 20 Jahren waren somit die Voraussetzungen geschaffen, um mit den Arbeiten an der Malerei im Jahr 2001 zu beginnen. Das Schadensphänomen der Vergipsung des Kalkputzes aufgrund klimatischer Einflüsse konnte nun gestoppt und die Malereien konserviert werden.

Teil des damaligen Restaurierungskonzeptes waren neben regelmäßigen Kontrollen auch jährlich durchzuführende Erhaltungsmaßnahmen, über die der folgende Abschnitt informieren wird.

1982, S. 119–220, 59–67, 69–110 publiziert.

6 Zu Details vgl. Anm. 2.

Das Programm für die Erhaltung und Wartung der Scrovegni-Kapelle – Planung, Ergebnisse und Perspektiven

Francesca Capanna, Antonio Guglielmi

Die Scrovegni-Kapelle mit den Wandmalereien von Giotto im Inneren der Kapelle zählt ohne Zweifel zu den wichtigsten Denkmälern auf italienischem Staatsgebiet (Abb. 4).⁷ Im „Istituto Superiore per la Conservazione ed il Restauro“ (ISCR) wurde immer die enge Verbindung zwischen dem historischen, künstlerischen und kulturellen Wert des Denkmals mit der Region und mit der Stadt gesehen, in der die Kapelle steht und zu der sie gehört. Mit ihnen hängt sie einerseits historisch zusammen, da sie Teil ihrer Vergangenheit und Zukunft ist, andererseits natürlich auch physisch durch ihren Standort. Auf diesen Grundlagen wurde die methodische Herangehensweise der Konservierung des ISCR für dieses Kulturgut immer aufgebaut bis ungefähr 1976, als einige Untersuchungen infolge des Erdbebens durchgeführt wurden, das die Region Friaul verwüstet hatte. Im gleichen Jahr wurde ein „Pilotplan für die gezielte Erhaltung des Kulturguts in Umbrien“ veröffentlicht, in dem Giovanni Urbani, der damalige Direktor des ISCR, die Leitlinien für ein sachgerechtes „Konservierungskonzept“ umriss, in der sich Planung und Wartung gegenseitig bedingen und stärken. Sicherlich Dank der großen historischen und künstlerischen Bedeutung der Kapelle wurden die von Giovanni Urbani skizzierten methodologischen Grundsätze im Konservierungsprojekt so verwirklicht, wie sie an allen Kulturgütern systematisch angewendet werden sollten.

Viele Jahre wurden in die Untersuchung investiert, um zu einem umfassenden Wissen über das Denkmal, die vorhandenen Materialien, die Struktur und die Geschichte der Kapelle, die Umgebung sowie über die Wechselwirkung zwischen den erwähnten Teilaspekten zu gelangen (Abb. 5). Die Planung der Restaurierung wurde in enger Zusammenarbeit mit dem wissenschaftlich-technischen Team auf Grundlage der Ergebnisse der Untersuchungen durchgeführt. Die ersten Schritte für die Behebung der Schadensursachen waren sogenannte „passive“ Maßnahmen, die lediglich das Umfeld der Kapelle betrafen. Die Restaurierung der Architekturoberflächen erfolgte erst im Anschluss an die

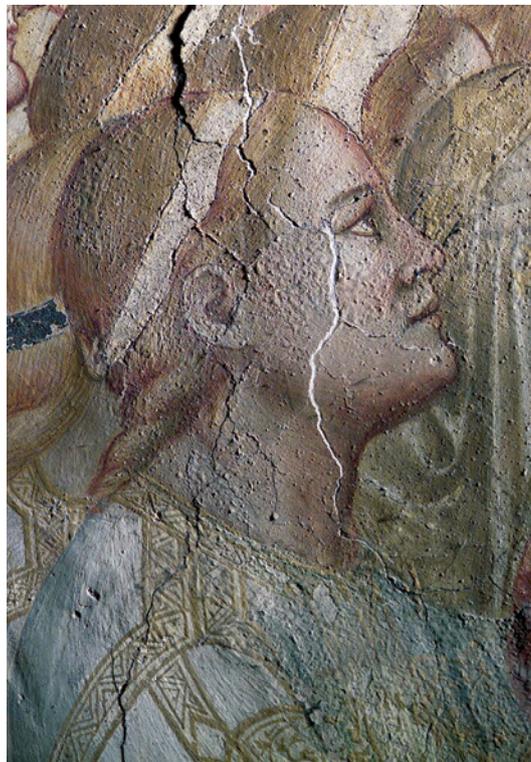


Abb. 3:
Westwand (Fassaden-
rückwand), Detail aus
dem Jüngsten Gericht
mit dem Zug der Seligen
ins Paradies, Kopf im
Streifenlicht mit deutlich
sichtbaren Gipsaus-
blühungen (ISCR, Angelo
Raffaele Rubino).

⁷ Der folgende Text wurde von Francesca Capanna und Antonio Guglielmi auf einem Studententag zum Thema „Die Scrovegni-Kapelle zehn Jahre nach ihrer Restaurierung“ in Padua am 25. Juni 2012 vorgestellt. Die Übersetzung nahmen Nadia Thalgueter und Dörthe Jakobs vor.

Abb. 4:
Südwand, Darbringung
Christi im Tempel (ISCR,
Angelo Raffaele Rubino).



nachgewiesene Stabilisierung des Systems und nach Absprache mit einer Expertenkommission ab Juli 2001 bis März 2002.

Zu betonen ist, dass bereits in der Planungsphase regelmäßige Erhaltungsmaßnahmen vorgesehen waren. Dies bringt im Wesentlichen zwei Vorteile mit sich, die im Folgenden dargelegt werden sollen.

Bereits zu Beginn wurde die Bedeutung einer qualifizierten und detaillierten grafischen sowie fotografischen Dokumentation des Erhaltungszustandes des Denkmals sowie der auszuführenden Konservierungsmaßnahmen unterstrichen. Während der Planungsphase war die grafische Dokumentation das Hauptwerkzeug für die Zustandsuntersuchung und für das Aufmaß, das für die Kostenkalkulation der Maßnahme nötig war. Von Anfang an war auch geplant, dass die grafische Dokumentation zukünftig das Hauptüberwachungswerkzeug der folgenden Phase der Wartung sein sollte.

Es wurde eine Standardsoftware (AutoCAD) verwendet und eine logische Struktur der speziell

Themen für Wandmalerei entwickelt, die nach einem einheitlichen Modell eingeteilt wurden, das üblicherweise in der Dokumentations-Abteilung des ISCR angewendet und durch die didaktische Tätigkeit der Hochschule des ISCR in Italien verbreitet wird, sodass sie tatsächlich zu einem Standard geworden ist (Abb. 6).

Es soll daran erinnert werden, dass sowohl Giovanni Urbani als auch Michele Cordaro immer großen Wert auf die institutionelle Rolle des ISCR für die Standardisierung der Fachbegriffe gelegt haben und sich die Veröffentlichung der Systematik der grafischen Dokumentation mit Legende und verwendeten Symbolen als NorMaL UNI⁸ erhofft haben. Dazu ist es bislang trotz Vorliegen besagter Legende nicht gekommen.

⁸ Aktuell finden in Italien Standardisierungen für Steinmaterialien (NorMaL1/88, norma UNI 11182/2006, für Keramik (norma UNI 10739/1998) und für Putze (norma UNI 10924/2001) Anwendung.

Die Dokumentation der Scrovegni-Kapelle war immer ein Überwachungswerkzeug, ein unersetzbarer Wegweiser für die Erhaltung, eine Karte für die festgestellten Probleme, eine grafische, fotografische und textliche Darstellung der Schwachpunkte des Bauwerkes und eine Beschreibung der sorgfältigen Entscheidungen für den geringstmöglichen Eingriff, die durch das Wissen um die Wiederholung der Untersuchungen in absehbarer Zeit ermöglicht wurden.

Daraus folgt der zweite Vorteil: Die Sicherheit der häufigen Überprüfung der ausgeführten Maßnahmen in regelmäßigen Abständen ermöglicht es den Restauratoren, ihre Eingriffe auf das Allernötigste zu begrenzen.

Beispielsweise sind Bereiche der bemalten Architekturoberflächen bekannt, die bei einer Zustandsuntersuchung des Putzes durch Abklopfen hohl klingen. Die Vertrautheit mit den Oberflächen hat es uns erlaubt, dieses Phänomen auf Unregelmäßigkeiten im darunter liegenden Mauerwerk zurückzuführen. Die Sicherheit, dass die Untersuchungen in absehbarer Zeit wiederholt werden, um zu überprüfen, ob diese Bereiche ihre Größe verändern oder ob sie in ihrer Dimension stabil bleiben, erlaubt es uns, eine Festigung durch Injektionen in den betroffenen Bereichen zu verschieben.

Ein weiteres, hochaktuelles Beispiel betrifft das Thema Erdbeben: In diesem Falle können bei der regelmäßigen Wartung einfach die Kittungen der vorhandenen Fehlstellen in der Nähe von Öffnungen, wie Fenstern und Türen, beobachtet werden. Letztere sind bekanntlich die gefährdeten Bereiche im Gefüge eines Gebäudes. Das Wissen um den einfachen regelmäßigen Zugriff auf die Oberflächen erlaubt die Auswahl von besonders leichten Füllmaterialien, genauer gesagt von Materialien mit einer Festigkeit, die kleiner als die der originalen Materialien ist, sodass den natürlichen Bewegungen und dem Austausch der Putze nicht entgegengewirkt wird. Der Austausch von Kittungen, die gegebenenfalls durch ein Erdbeben beschädigt werden, kann in kurzer Zeit durchgeführt werden. Außerdem kann das geschädigte Ergänzungsmaterial in diesen Bereichen ein nützlicher Indikator für die Belastungen sein, denen das Mauerwerk ausgesetzt war, auch ohne offensichtliche Schäden des Bauegefüges.

Seit den Jahren nach der Restaurierung von 2001 bis 2002 wurde jährlich die Wartung und Pflege sowohl der Malereimörtel und der bemalten Oberflächen der Kapelle als auch der Skulpturen



(das Grabmal des Enrico Scrovegni, die von Giovanni Pisano geschaffenen Skulpturen sowie die Altäre im Kirchenschiff) durchgeführt. Diese Maßnahmen erfolgten in Zusammenarbeit mit der freiberuflichen Restauratorin Valentina Piovani und im Jahre 2009 mit Alfeo Michieletto, dem Restaurator der öffentlichen Verwaltung mit örtlicher Zuständigkeit.

Die Arbeiten an den Oberflächen werden Dank einer Hubarbeitsbühne, einer sogenannten „Spinne“ ausgeführt, die auf einer beweglichen Plattform positioniert ist. Letztere kann auf zwei

Abb. 5: Roberto Ciabattoni (ISCR) bei der Durchführung einer endoskopischen Untersuchung an der Westwand zur Feststellung der Breite und Tiefe eines Risses in der Mauer (ISCR, Angelo Raffaele Rubino).

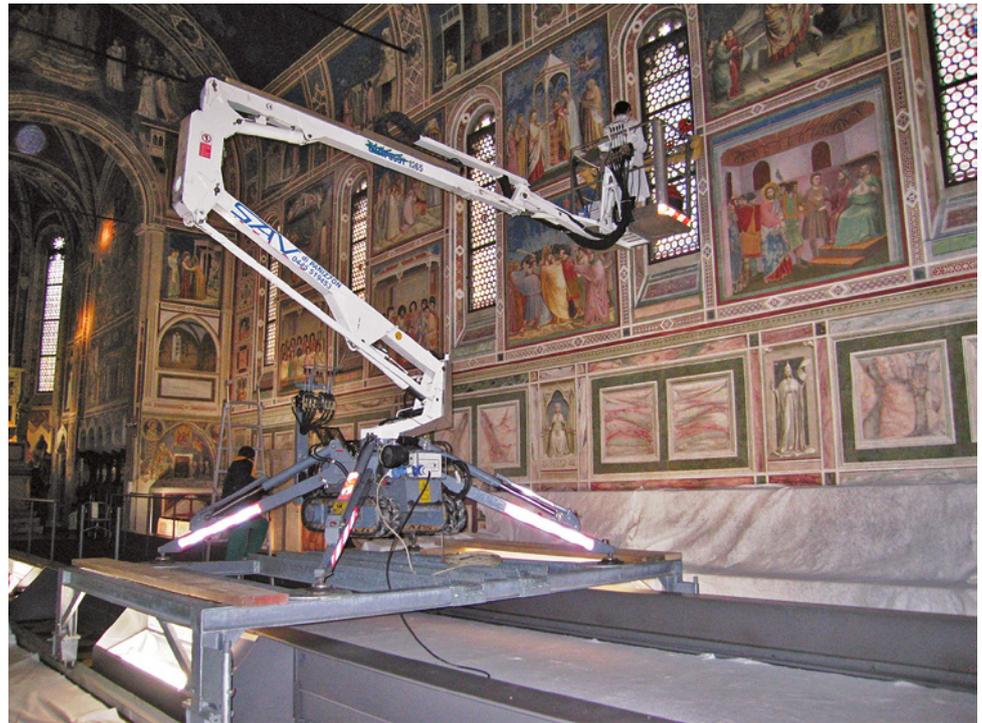


Abb. 6: Studierende des ISCR bei der grafischen Dokumentation während der Restaurierungskampagne von 2001/2002 (ISCR, Angelo Raffaele Rubino).



Abb. 7, 8:
Untersuchung und Wartung des Gewölbes und der Südwand mit der Hubarbeitsbühne (ISCR, Angelo Raffaele Rubino).

Abb. 9:
Abnahme von lose aufliegendem Staub, der sich hauptsächlich auf der Oberseite der als Relief ausgebildeten Nimben ansammelt (ISCR, Antonio Guglielmi).



Gleisen bewegt werden, die die Kapelle in ihrer gesamten Länge durchziehen. So ist es durch einfache aber präzise Steuerung möglich, die Fresken vom Arbeitskorb aus zu überprüfen. Dieser kann maximal zwei Personen aufnehmen (Abb. 7, 8). An dieser Stelle gilt ein besonderer Dank Antonio Bianchin der Firma Valente für seine jahrzehntelange zehnjährige und termingerechte Unterstützung im Umgang mit der Hebebühne.

Die Begutachtung der bemalten Oberflächen wird vom Chor, in dem aufgrund des eingeschränkten Bewegungsraumes mehr Schwierig-

keiten im Vergleich zum Kirchenschiff auftauchen, zur Westwand ausgeführt. So können die bereits überprüften Bereiche allmählich wieder der Öffentlichkeit zugänglich gemacht werden. Dank des mechanischen Armes ist es zudem möglich, die Öffnungen, wie die in der Mitte des Bogenfeldes des Triumphbogens, zu erreichen und zu untersuchen.

Die Maßnahmen der Wartung und Pflege der Oberflächen verlaufen immer von oben nach unten, sie beinhalten die Reinigung mit weichen Pinseln (Abb. 9) und tragbaren Staubsaugern und werden erst nach einer sorgfältigen Untersuchung im Streiflicht durchgeführt. Auf diese Weise ist es möglich, lose aufliegende organische und anorganische Ablagerungen (Spinnweben und Staub) zu entfernen. Solche Partikel neigen natürlich dazu, sich vermehrt auf Vorsprüngen anzusammeln. Beispielsweise betrifft dies die reliefartig ausgebildeten Nimben, wie sie zahlreich an der Westwand anzutreffen sind (Abb. 10, 11), oder den Bereich unterhalb der bemalten Fenstergewände der Südwand, wo nach den konservierenden Maßnahmen an den Glasfenstern 2011 eine deutliche Verminderung der Ablagerungen festgestellt werden konnte.

Nachdem die Reinigung in den Bereichen ausgeführt wurde, in denen sie möglich war, werden der Zustand des Putzes und der Malschicht überprüft und im Falle von lokalen Ablösungen punktuelle Festigungen durchgeführt. Dies gibt den



Maßnahmen, die bereits 2001 während der Restaurierung ausgeführt wurden, Dauerhaftigkeit. Für die Hohlstellen werden vorgemischte Mörtel und für die Schäden der Malschicht Festigungsmittel auf Acrylbasis verwendet (Abb. 12).

Andere Bereiche, die als nicht gefährdet eingestuft wurden, werden überprüft und Jahr für Jahr einem Monitoring unterzogen, um gegebenenfalls Veränderungen in ihrem Erhaltungszustand festzustellen. Die Wartungskampagnen haben immer den geringstmöglichen Eingriff zum Ziel, sodass die Maßnahmen auf das Allernötigste reduziert werden. In jedem Fall werden alle durchgeführten Maßnahmen und die Bereiche, die unter besonderer Beobachtung stehen, sowohl fotografisch als auch grafisch mithilfe einer Digitalisierung in CAD dokumentiert.

Dank der schon genannten Hubarbeitsbühne ist es auch möglich, naturwissenschaftliche Überprüfungen (zum Beispiel Röntgendiffraktometrien oder Farbmessungen; Kontrolle der Klimamessgeräte) und dokumentierende Maßnahmen (fotografische Aufnahmen in Auf- und Streiflicht) durchzuführen.

Abschließend ist die Bilanz der ersten zehn Jahre ermutigend. Dies betrifft einerseits das positive Fazit für die Restaurierungsmaterialien von 2001/2002, die immer noch bei den beschriebenen Wartungsmaßnahmen eingesetzt werden.



[oben] Abb. 10:
Die Westwand mit dem
Jüngsten Gericht,
Gesamtansicht (ISCR,
Angelo Raffaele Rubino).

[unten] Abb. 11:
Detail der Westwand:
Christus als Weltenrichter.
Ablagerungen von
Staub befinden sich vor-
wiegend auf der Ober-
seite der reliefartig aus-
gebildeten Nimben wie
hier am Nimbus Christi
(ISCR, Angelo Raffaele
Rubino).



Abb. 12:
Festigung von abgelöstem Intonaco mit vorgemischtem Injektionsmörtel (ISCR, Angelo Raffaele Rubino).

Abb. 13:
Der gepflasterte Weg zum Eingang der Kapelle (ISCR, Antonio Guglielmi).

Andererseits hat sich auch das System der Überwachung des Umgebungs- und des Mikroklimas als erfolgreich in Bezug auf den guten Erhaltungszustand der Wandmalereien von Giotto erwiesen.

Die regelmäßige Wartung ist nicht nur eine fundamentale Grundlage zur Überprüfung einer erfolgreichen Restaurierungsmaßnahme, sondern auch eine Methode für die Untersuchung und das Verständnis von eventuellen Verschiebungen des Gleichgewichts, die sich im Laufe der

Zeit zwischen der Umwelt und dem Objekt entwickeln können. Deshalb ist es von grundlegender Bedeutung, dass neben der optischen Überprüfung auch berührungsfreie Untersuchungen erfolgen. Beispielsweise ist das die oben schon erwähnte Farbmessung, die es ermöglicht, eventuelle Farbveränderungen der Malerei wissenschaftlich zu bewerten.

Wie bekannt, ist die Degradation ein natürlicher und nicht umkehrbarer Prozess. Das Ziel unserer Untersuchungen kann einzig in der gezielten Reduzierung der Schadensursachen liegen, was vor allem heißt, die idealen Rahmenbedingungen für die längere Haltbarkeit der Materialien herzustellen, aus denen das Kunst- und Kulturgut besteht. Damit können im Laufe der Zeit immer verfeinerte, indirektere, also vom Objekt „entfernte“ Methoden der präventiven Konservierung realisiert werden. Als signifikantes Beispiel hierfür kann der Ersatz des Kiesbelages im Zugangsbereich der Kapelle durch ein Steinpflaster gelten. Diese Maßnahme verminderte zusätzlich die Menge an Staub, die durch die Besucher transportiert und ins Innere des Denkmals eingebracht wird (Abb. 13). Dies sind kleine, aber wichtige und nützliche Maßnahmen, die als Anzeichen einer wachsenden Aufmerksamkeit und Sensibilität im Hinblick auf die funktionalen ökologischen Gleichgewichte in der Konservierung von Kunst- und Kulturgut anzusehen sind.



Literatur

Basile, Giuseppe / Mancinelli, Eugenio / Marabelli, Maurizio / Santopadre, Paola / Ioele, Marcella / Fassina, Vasco / Stevan, Antonio G. / Cesareo, Roberto / Castellano, Alfredo: The Scrovegni Chapel. Multidisciplinary Research and Environmental Protection. In: Exner, Mathias / Jakobs, Dörthe (Hrsg.): Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte – Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS – Heft des deutschen Nationalkomitees XLII), München 2005, S. 85–98.

Basile, Giuseppe (Hg.): Il Restauro della Cappella degli Scrovegni: indagini, progetto, risultati, Milano 2003.

Giotto a Padova. In: Bolletino d'arte 63, seconda serie speciale, Roma 1982, S. 119–220, 59–67, 69–110.

Basile, Giuseppe (Hg.): Giotto alla Cappella Scrovegni, Materiali per la tecnica pittorica. In: „Bollettino d'Arte, volume speciale“. Roma 2005.

DOKUMENTATION

Die Dokumentation der Wandmalereien in den 1980er Jahren und Anforderungen an ihre Fortschreibung

Dörthe Jakobs

Grundlagen für jede Maßnahme an einem Objekt sind heute selbstverständlich die Bestandsaufnahme und eine damit verbundene Dokumentation des Objektes in Wort und Bild, um unser Handeln am Objekt auch für nachfolgende Generationen nachvollziehbar darzustellen. Was heute so selbstverständlich daherkommt und meist mit der Erstellung von Planmaterial als Grundlage für die verschiedenen Kartierungen von Restauratoren, Naturwissenschaftlern und allen am Objekt tätigen Disziplinen beginnt, ist Basis wissenschaftlicher Konservierung und Restaurierung. Die Dokumentation ist heute als integraler Bestandteil jeder restauratorischen Bestandsaufnahme, Voruntersuchung oder Maßnahme nicht mehr wegzudenken. Das war nicht immer so, ganz zu schweigen von Qualitätsunterschieden im Informationsgehalt von Dokumentationen.

Die auf dem II. Internationalen Kongress der Architekten und Techniker für historische Denkmäler im Jahr 1964 verfasste „Charta von Venedig“ hat mit Art. 16 wesentlich dazu beigetragen, dieses Ziel zu erreichen. Dokumentationen mit unterschiedlichsten Zielsetzungen hat es zu jeder Zeit gegeben, nur indem die Dokumentation zum unverzichtbaren Postulat erhoben wurde, sollte mit der Charta von Venedig der Beliebigkeit auf diesem Gebiet ein Ende gesetzt werden.¹ Das Konzept für die Dokumentation der Wand-

malereien in St. Georg geht auf den damaligen Leiter der Restaurierung des Landesdenkmalamtes Baden-Württemberg, Helmut F. Reichwald zurück.² Ausgangspunkt war die Erfahrung, dass Kulturdenkmale mehrfache Restaurierungen erfahren und oft erneut erhebliche Schäden aufweisen, ohne dass deren Ursachen im Einzelnen genau erforscht wurden. Die Differenzierung von spezifisch objektabhängigen Schadensursachen, Restaurierungsschäden und Umweltschäden wurde damals meist durch fehlende Aufzeichnungen über den angetroffenen Zustand und durch fehlende Berichte über durchgeführte Maßnahmen, Verwendung von Materialien wie auch durch das Fehlen einer begleitenden fotografischen Dokumentation erschwert.

Speziell für St. Georg kam hinzu, dass ein Mischzustand von historischen Ausmalungen, durch unsachgemäße Freilegungen verursachte Zerstörungen und Phasenvermischungen, jüngere Übermalungen und Restaurierungen eine Bewertung von Schadensprozessen, den Ursachen und dem Zeitpunkt der Entstehung nur mit einer aufwendigen Voruntersuchung möglich war.

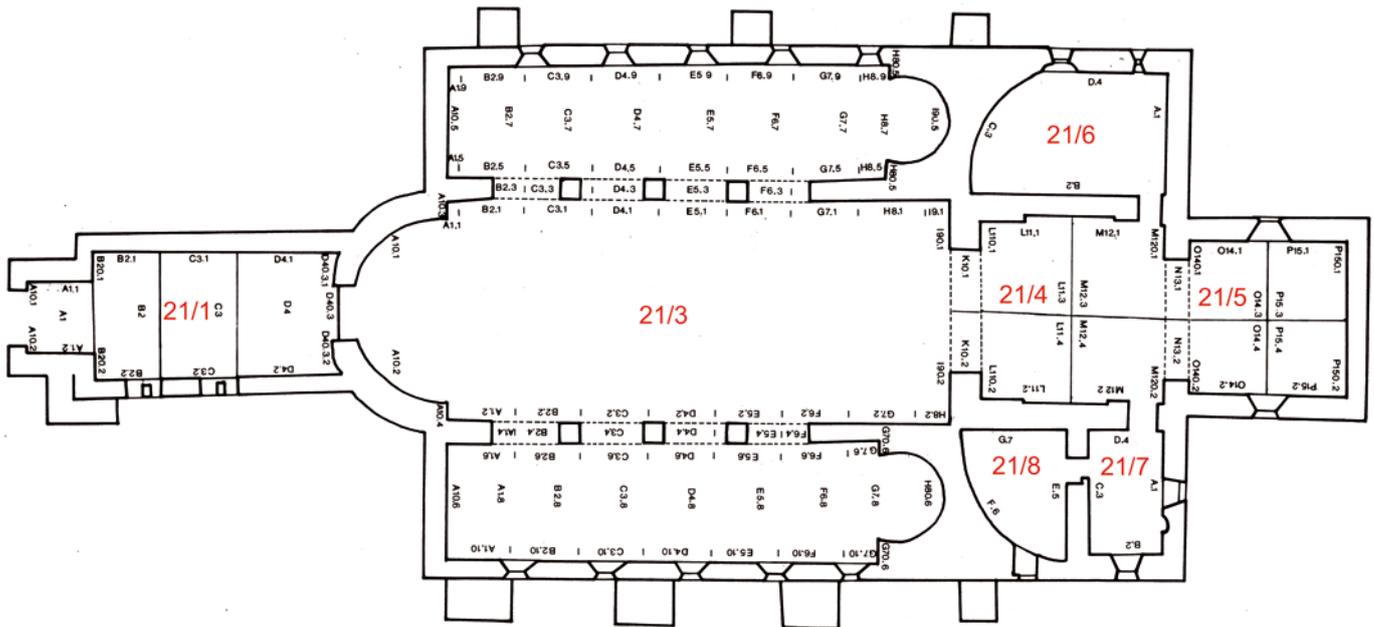
Je nach Aufgabenstellung kann nur das Wissen um den tatsächlich vorliegenden Bestand einschließlich aller Veränderungsphasen eine Grundlage für die Erarbeitung eines objektbezogenen Restaurierungskonzepts bilden.³ Nur mit allen verfügbaren Daten und Fakten über den

1 Charta von Venedig. In: Principles of Monument Conservation (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXX), München 1999, S. 67–71.

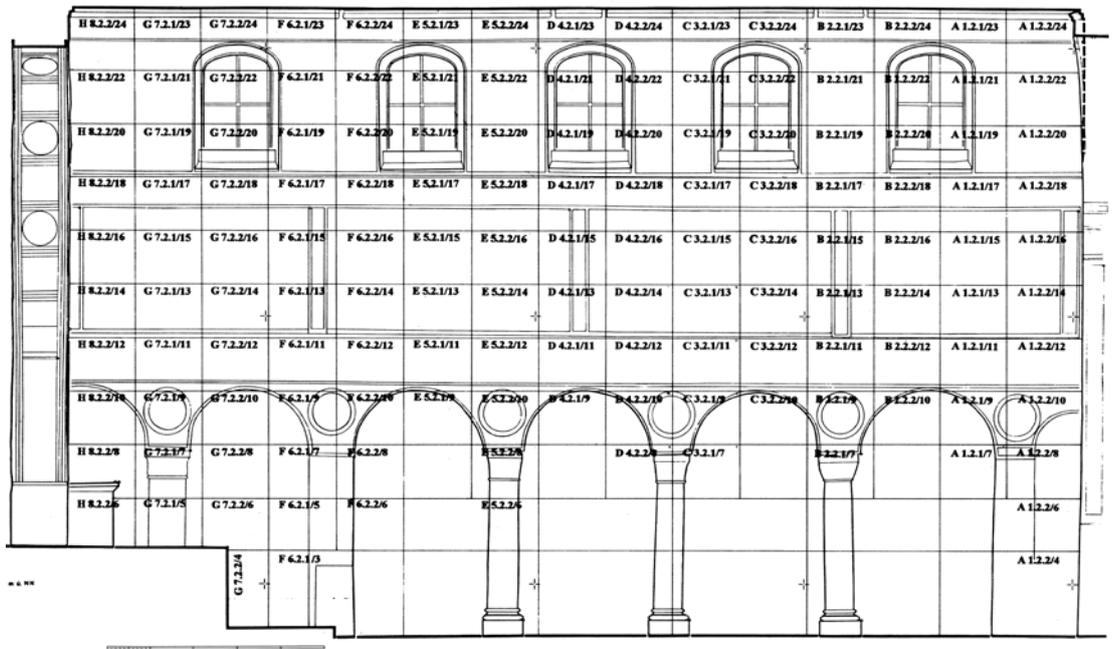
2 Reichwald, Helmut F.: Möglichkeiten der zerstörungsfreien Voruntersuchung am Beispiel der ottonischen Wandmalereien in St. Georg Reichenau-Oberzell. In: Historische Technologie und Konservierung von Wandmalereien. Vortragstexte der 3. Fach- und Fortbildungstagung der Fachklasse

Konservierung und Restaurierung, Schule für Gestaltung Bern, 5. und 6. November 1984, Bern 1985, S. 106–132.

3 Vgl. Reichwald, Helmut F.: Über Sinn und Unsinn restauratorischer Untersuchungen. Zur Befunderhebung als Teil einer Konzeption. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 1, 1987, Heft 1, S. 25–31.



[oben] Abb. 1:
Grundriss von St. Georg
(LAD, Fachgebiet Bau-
dokumentation) mit der
Bezeichnung der Objekt-
nummer (21), angehängt
die einzelnen Raumteile
(21/1 Vorhalle, 21/2
Michaeliskapelle, 21/3
Mittelschiff und Seiten-
schiffe etc.) und inner-
halb der Räume die
Nummerierung der
Wandflächen
(LAD, Archiv).



[rechts] Abb. 2:
Südwand mit dem Raster
der Bereichseinteilung
(LAD, Archiv).

Status quo eines Objekts ist die Einleitung der weiteren Schritte möglich. Da auch zukünftige Wartungen und Maßnahmen dieser Grundlagen bedürfen, ist eine Dokumentation der verschiedenen Zustände unerlässlich.

Methodik der Dokumentation

In St. Georg wurde 1982 erstmals in der Geschichte der Restaurierung von Wandmalereien eine so umfassende und systematische Doku-

mentation angelegt. Sie diente seinerzeit auch dem Zweck der Schulung von Restauratoren, da es eine seit Jahrzehnten in Deutschland angestrebte Ausbildung auf Hochschulebene für den Fachbereich Wandmalerei noch nicht gab. Im Vorfeld der Bestandsaufnahme wurden die Daten zu Bestand und Veränderungen aus den bisherigen Publikationen zusammengestellt und auf dieser Basis ein Fragenkatalog entwickelt, der für alle beteiligten Restauratoren die Grundlage bildete.⁴

Ausgehend vom Grundriss und der Vergabe von Raumnummern (Abb. 1) für die einzelnen Raumeile erfolgte eine Einteilung in Bereichsfelder (Abb. 2), die jeden Raum mit entsprechender Wandabfolge berücksichtigte – die sogenannte „Bereichseinteilung“. Sie ist in Baden-Württemberg noch heute zu Beginn jedes zur Voruntersuchung anstehenden Projektes üblich und ermöglicht eine Lokalisierung sämtlicher Daten, die zu einem bestimmten Bereich ermittelt werden. Die Bereichseinteilung ist so angelegt, dass sie auch für zukünftige Datenbanken nutzbar ist. Jedes Schriftstück, jede Folienzeichnung, jede Aufnahme, jede Befundstelle oder Probeentnahme usw. wird mit der entsprechenden Bereichsnummer versehen. Damit ist eine Zuordnung und Wiederauffindung auch kleinster Ausschnitte gewährleistet.

Auf der Basis photogrammetrischer Pläne, angefertigt von der Photogrammetrie des Landesdenkmalamtes, erfolgte eine Unterteilung der Langhauswände, die sich an den Maßen der heutigen Normgerüste orientierte. Über die Wände des Mittelschiffs konnte somit ein Raster von jeweils 125 cm (Breite) × 100 cm (Höhe) großen Feldern gelegt werden, das lediglich in den Eckbereichen variierte.⁵

Jedes Bereichsfeld war eine Untersuchungseinheit (Abb. 3), nach der sich auch die fotografische Erfassung richtete. Jeder Bereich wurde unter gleichbleibenden Bedingungen im gleichen Abstand⁶ in Schwarzweiß und Farbe, in Auf- und Streiflicht in Mittelformat aufgenommen (Abb. 4, 5). Auf Folien zu den jeweiligen Schwarzweiß-Abzügen wurden dann alle am Objekt getätigten Beobachtungen eingetragen (Abb. 6). Alle „gesonderten Beobachtungen“ sind in Kleinbilddias erfasst, die wiederum die Bereichsnummer tragen sowie die Befundnummer (Abb. 7), die auf den Folien entsprechend verzeichnet ist. Ein nach gleichen Kriterien geordneter Fragenkatalog war Grundlage für den

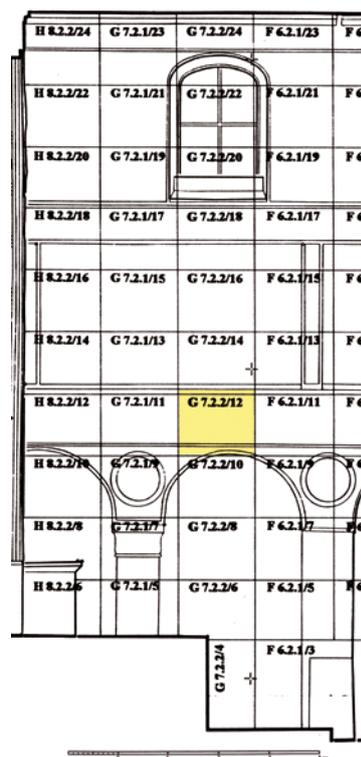


Abb. 3: Detail von Abb. 2 mit dem Raster der Bereichseinteilung, hier beispielhaft gelb markiert der Bereich G 7.2.2/12 (vgl. die nachfolgenden Abbildungen).

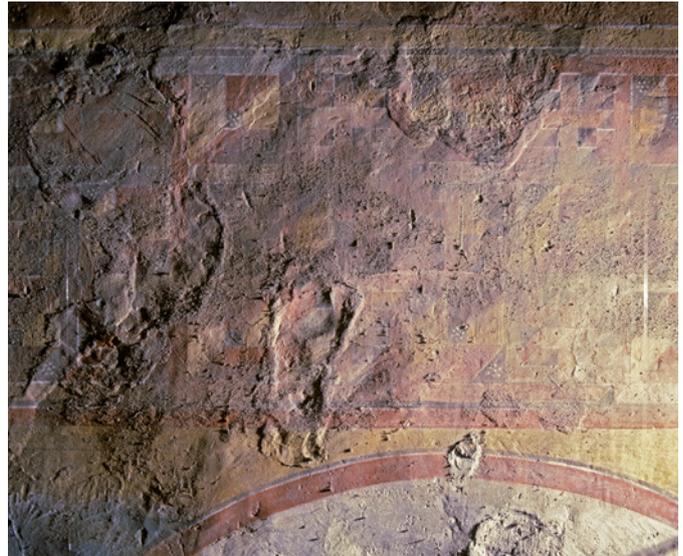
Bericht über den angetroffenen Bestand, den Zustand und die Schäden.

Dieses für alle Bereiche gleichbleibende Raster diente bei der Bestandsaufnahme einer systematischen Vorgehensweise und trug der Tatsache Rechnung, dass verschiedene Restauratoren somit an eine einheitliche Terminologie gebunden waren. Alle Teile der Dokumentation wie Schriftstücke, Zeichnungen, Fotografien, Folien und später auch Probeentnahmen und naturwissenschaftliche Auswertungen erhielten die jeweilige Bereichsnummer. Das gleiche Vorgehen fand im Zuge der Maßnahmen statt, auch hier erfolgte die Kartierung wiederum über die Folien über s/w-Abzüge. Dank der Sortierung und Beschriftung der gesamten Dokumentation nach Raumeilen und Bereichsnummern ist ein schneller Zugriff auf kleinste Bildausschnitte und Details möglich, ohne die gesamte Dokumentation in Anspruch nehmen zu müssen. Darüber hinaus erleichterte diese Dokumentationsform eine Fortschreibung auch während der Restaurierung, indem alle Maßnahmen bereichsweise und wiederum über Folien und Fotografien festgehalten wurden (Bsp. Abb. 8a-f). Trotz eines enormen technischen Aufwands wurden damals auswahlweise Aufnahmen im ultravioletten Licht angefertigt, die für die Bewertung von künstlerischen Details und für die Zuord-

4 Ausführlich Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Bd. 2, Stuttgart 1999, S. 313–326 und Reichwald 1985.

5 Einteilung mittels von der Decke herabhängender und mit Bleigewichten beschwerter Perlonfäden für die Senkrechten, Kennzeichnung mit Klebebändern an den Perlonfäden für die Waagerechten.

6 Damit ist einmal ein Aneinanderreihen der Fotografien möglich, außerdem können alle eingemessenen Standpunkte entsprechend wiederholt werden (mit Erfassung von Gerätetyp, Objektiv, Film etc.).



[links] Abb. 4:
Südwand, Dokumentation von Bereich G 7.2.2/12 im Auflicht (Diapositiv 6 × 7, LAD, Reichwald).

[rechts] Abb. 5:
Südwand, Dokumentation von Bereich G 7.2.2/12 im Streiflicht (Diapositiv 6 × 7, LAD, Reichwald).

nung der gotischen Übermalungen von großer Bedeutung waren (Abb. 9 a, b).⁷

Nach Abschluss jeder Phase (Untersuchung/ Maßnahmen) wurden die auf Einzelfolien dokumentierten Ergebnisse in einen photogrammetrischen Übersichtsplan eingetragen (Bsp. Abb. 10, 11). Für spätere Kontrollen, Maßnahmen o. ä. gibt die Dokumentation Aufschluss über Bestand, Zustand (zum Zeitpunkt der Kartierung) und bereits durchgeführte Maßnahmen. Eine vergleichbare Vorgehensweise fand auch in den anderen Raumteilen statt (bspw. Krypta oder Michaelskapelle).

An dieser Stelle kann nicht auf den Fragenkatalog zu den einzelnen Phasen eingegangen werden, da der Umfang hier den Rahmen sprengen würde. Zusammenfassend darf aus heutiger Sicht festgehalten werden, dass die Dokumentation der 1980er Jahre auch heute noch eine herausragende Grundlage bildet und es – soweit bekannt – aus jener Zeit überhaupt keine vergleichbare Dokumentation von dieser Systematik und Tiefe sowie in diesem Umfang von einem Kulturdenkmal geben dürfte.

Anforderungen an die Fortschreibung der Dokumentation

Die Dokumentation der 1980er Jahre ist für uns heute nicht nur Vorbild und Vorlage, sondern auch eine Verpflichtung, sich in ein bereits existierendes System einzufinden und es fortzuschreiben. Die Datenmengen, die wir heute bei Untersuchungen produzieren, müssen in Form

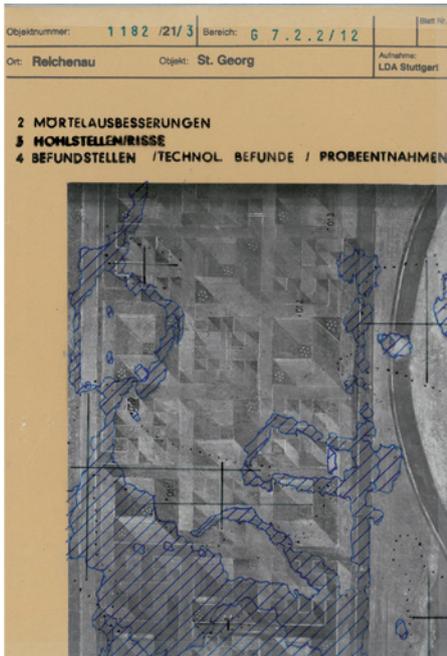
einer systematischen Erfassung und Dokumentation verarbeitet werden, um einer zukünftigen Generation wiederum als Grundlage dienen zu können. Nur wenn klar nachvollziehbar ist, was, wann, wo gemessen wurde, sind die ermittelten Daten und Informationen auch in Zukunft weiter verwertbar.

So galt es im Rahmen des DBU-Projektes alle Beteiligten auf eine Dokumentation einzuschwören, die auf den ersten Blick durchaus spröde ist und es einem beim Arbeiten nicht immer leichtmacht, ein Problem – das erstmals bereits während der Wartungen auftrat.

Hierzu ein Beispiel: Während man die Bereichseinteilung zur Zeit der Einrüstung durch die mit Bleigewichten beschwerten Perlonfäden in der Senkrechten und durch Klebestreifen an den Perlonfäden in der Waagerechten markierte, waren wir bis heute auf die photogrammetrischen Pläne angewiesen (vgl. Abb. 2). Da in diesen Plänen nur die Bildrahmen und die Gliederung der Wände eingezeichnet sind, konnte die Kennzeichnung und Zuordnung einer Makroaufnahme im Plan zu einem bestimmten Bereich durchaus schwierig werden. Zudem bedeutete es einen enormen Aufwand, die Fotos einzeln nach Bereichen zu beschriften, sodass man sich noch zu Diapositivzeiten als Zwischenlösung auch mal damit beholfen hat, die Bildszenen beim Namen zu nennen, was aber niemals auf Antrieb eine

7 Die Belichtung dauerte damals bis zu 40 Minuten (gegenüber wenigen Sekunden heute). Die Ausfilterung erfolgte mittels Gelatinefiltern (yellow, red und orange).

8 Zu allen technischen Details vgl. den Beitrag von Gisbert Sacher, Gunnar Siedler und Sebastian Vetter.



sofortige Zuordnung zu einem eingegrenzten Bereich ermöglichte.

Im Rahmen des DBU-Projektes bestand nun die Anforderung, die Systematik der Dokumentation der 1980er Jahre wieder aufzugreifen und diese gleichzeitig mit den Möglichkeiten der heutigen Technik zu verbinden. Konkret hieß dies, die Wandflächen fotografisch komplett neu aufzunehmen und diese mittels der Messnetzdaten der Photogrammetrie des Landesamtes für Denkmalpflege zu entzerren und alle relevanten Kartierungen in die neuen Pläne zu übertragen.⁸

Begonnen wurde mit der Bereichseinteilung, da somit auch während der Arbeit der verschiedenen Naturwissenschaftler ein Messnetz mit Koordinaten auf den Wandbildern vorlag (Abb. 12), dass die Eintragung der Beobachtungen, Proben oder Messungen auf die Bildpläne erleichterte. Dabei erhielt jede Kampagne und jedes Untersuchungsverfahren von Beginn eine festgelegte Nummernserie für das jeweilige Untersuchungsverfahren (Röntgenfluoreszenz, Staubuntersuchungen, Salzuntersuchungen etc.).⁹ Desweiteren wurden alle am Objekt tätigen Naturwissenschaftler angehalten, so ungewohnt und mühsam es bei der Vielzahl der Messungen mitunter war, für jede Befundstelle, jeder Mess-

stelle, jeder Staubprobe usw. einen Probenzettel mit Maßstab, Bereichsnummer, Probennummer, Messnummer etc. auszufüllen und eine Digitalaufnahme von der Messstelle mit diesem Probenzettel anzufertigen (Bsp. Abb. 13). Gleichzeitig mussten alle Messstellen, Probestellen etc. auf die Übersichtspläne eingetragen werden. (Bsp. Abb. 14) Das galt für die Mittelschiffwände gleichermaßen wie für die Krypta.

Die in einem gesonderten Beitrag behandelte Planerstellung ermöglichte auch in einigen Punkten über das hinauszugehen, was in den 1980er Jahren möglich war. So wurde endlich eine Gesamtplan der Nord- und Südwall im Streiflicht erstellt, der weit deutlicher als die damaligen Schwarzweißfotos die Gesamtsituation der bauzeitlichen Mörtelgrenzen und der Mörtelergänzungen aufzeigt (Abb. 15) und das in einer Auflösung, die es uns am Rechner ermöglicht, die Wandmalereien-Bildpläne in einem Maßstab von annähernd 1:2 zu betrachten.¹⁰

Ein besonderer Glücksfall im Rahmen des DBU-Projektes war es, Peter Fornaro und sein Team von Digital Humanities Lab der Universität Basel kennenzulernen, die in einem anderen Forschungsprojekt die Möglichkeiten und Grenzen der Reflectance Transformation Imaging (RTI), einer digitalen Reproduktionstechnik, austes-

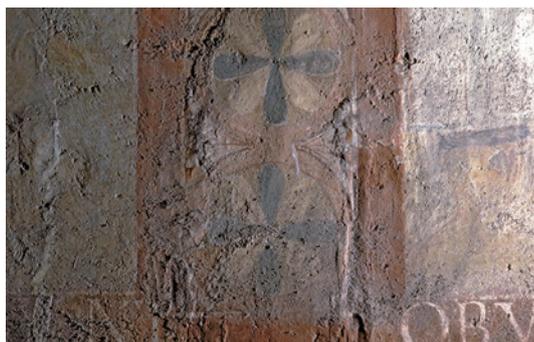
[links] Abb. 6: Südwall, Dokumentation 1182 (Nov. 1982)/21/3 (St. Georg, Mittelschiff) von Bereich G 7.2.2/12, Beispiel für eine Folie der Voruntersuchung mit Eintragung der angetroffenen Mörtelergänzungen (LAD, Archiv/Kampmann).

[rechts] Abb. 7: Diajournal mit Kleinbild- diapositiven zu Befundstellen 015-020 auf der Nordwall im Bereich der Weihetrone in G 7.1.2/10 (LAD, Jakobs).

9 Dank an Judit Zöldföldi, die das System nicht nur schnell verinnerlicht, sondern sofort dessen Fortschreibung für jedes Projekttreffen vor Ort perfekt vorbereitet hat, vgl. hierzu auch ihren Beitrag zum Datenmanagement.

10 Zu den technischen Details und zur Übertragung der Kartierungen der 1980er Jahre sei auf den Beitrag von Gisbert Sacher, Gunnar Siedler und Sebastian Vetter verwiesen.

[links] Abb. 8 a-e: Beispiel aus der Foto-dokumentation der Kleinbilddias zu den Maßnahmen während der Restaurierung von 8/1985-12/1986, hier Südwand Bereich C 3.1.2/14: Vorzustand (a), Zustand nach Abnahme der Übermalung mit sichtbarer Gipskittung von 1921/22 in der ehemaligen Verankerung der Tapetenschiene (b), Zustand nach konservatorisch begründeter Herausnahme der Gipskittungen (c), Zustand nach Neukittung mit materialgerechtem Kalkmörtel (d), Zustand nach der Punktretusche (e) (LAD, Archiv /Alber).

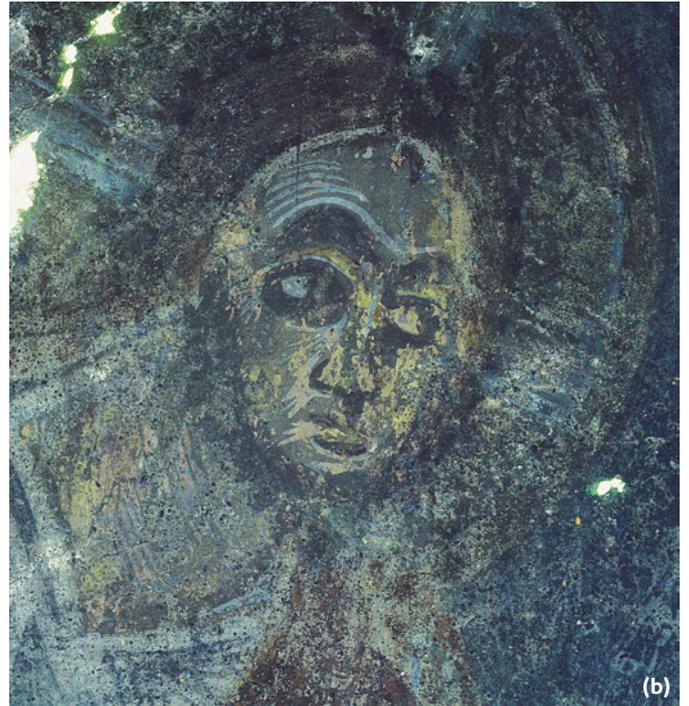


[rechts] Abb. 8 f: Bereich C 3.1.2/14 mit der Kartierung der Maßnahmen und der Befundstellen (Nummern) über drei Folienebenen ab 1/1985 (LAD, Archiv/Alber).



teten. Gerne haben sie die Wandmalereien von St. Georg in ihr Forschungsprojekt aufgenommen und uns um eine technisch hochinteressante, fotografische Dokumentationsform bereichert, dafür sei ihnen herzlich gedankt.¹¹ Wem diese heutige Dokumentation als ein hoher Aufwand erscheint, der vergegenwärtige sich die Situation in den 1980er Jahren. Man darf daran erinnern, dass im vordigitalen Zeitalter die Kartierungen von den Handeintragungen auf den Folien der Schwarzweiß-Fotoabzüge mittels Pantografen auf die photogrammetrischen 1:20 Pläne maßstäblich übertragen wurden, dass die Texte der Berichte durch eine Sekretärin auf der Schreibmaschine geschrieben wurden: abends gebracht, am nächsten Abend abgeholt und korrigiert, wieder zurückgebracht, neu geschrieben und oft genug mehrfach korrigiert. Dass die Dias mit den Bereichsnummern und den Befundstellen mit Datum mit stempelochter Farbe gestempelt wurden (vgl. Abb. 7), dass alle Schwarzweißfotoabzüge für die Voruntersuchung und für die Maßnahmen im Aufricht und im Streiflicht (insgesamt ca. 600) auf Kartons mit Fotoecken zu befestigen waren, dass jeder Karton wieder mit dokumentenechten Stempeln beschriftet wurde usw. Es ist unbestritten: Alle, die an diesem Projekt beteiligt waren, verdienen

¹¹ Der Beitrag von Peter Fornaro informiert über alle technischen Details.



Resümee

unseren höchsten Respekt. Dagegen haben wir es im digitalen Zeitalter meistens einfacher, außer, wenn die digitalen Daten nicht durch Datenpflege in die Zukunft gerettet werden, ein Thema, das uns sicher auch in Zukunft noch beschäftigen wird.

Die Datenerfassung und die Dokumentation waren auch in diesem DBU-Projekt nicht Selbstzweck, sondern dienten der Bewertung verschiedener objektspezifischer und fremder Materialien, um daraus Parameter für das Verhalten der Materialien bei verschiedenen Klimata ableiten

Abb. 9 a, b: Kopf Christi aus der Bildszene der Heilung des Wassersüchtigen im Auflicht (a) und im UV-Licht (b). Im ultravioletten Licht tritt die Gesichtszeichnung der ersten Ausmalung deutlich hervor, daneben auch die stark fluoreszierenden Fragmente der gotischen Übermalung im Inkarnat (LAD, Reichwald).

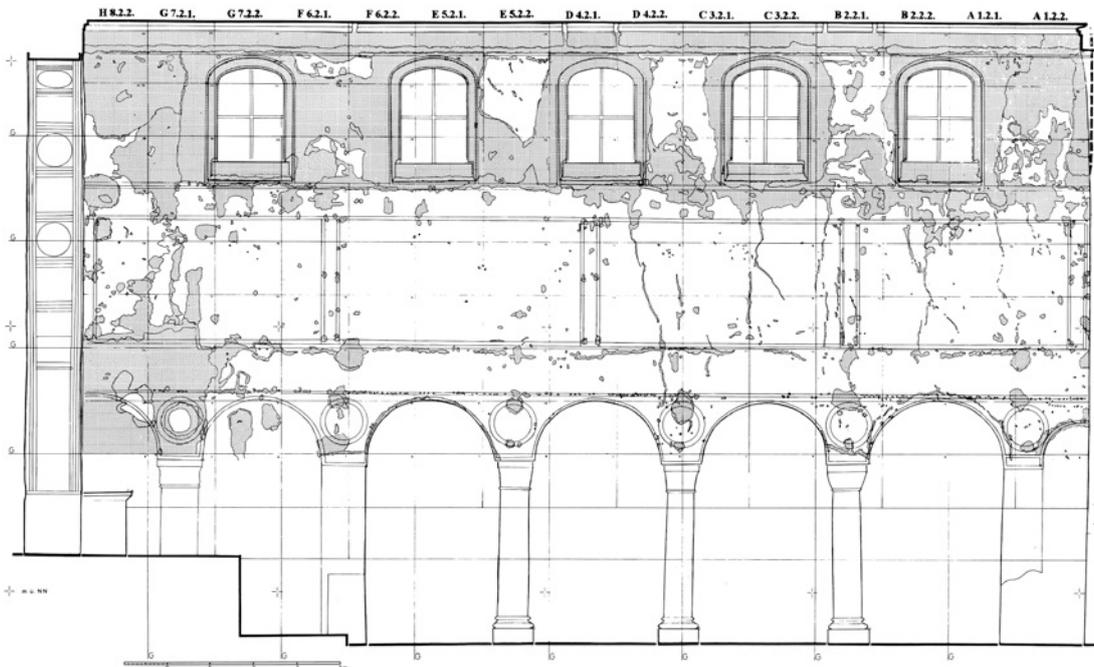


Abb. 10: Südwand mit Eintragung der Ergebnisse aus den Voruntersuchungen, hier die angetroffenen Mörtelergänzungen (LAD, Archiv).

Abb. 11:
Südwand mit Eintragung
der Ergebnisse aus den
Voruntersuchungen, hier
die angetroffenen Über-
malungen verschiedener
Entstehungszeiten (LAD,
Archiv).

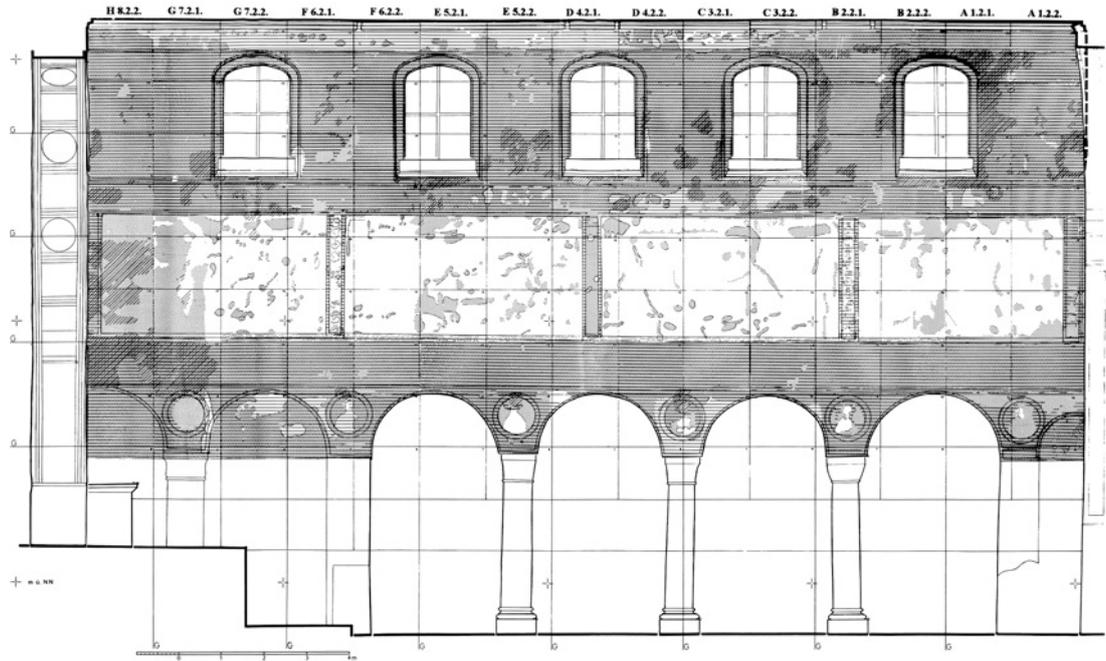


Abb. 12:
Im Rahmen des DBU-
Projektes neu erstellter
Bildplan der Südwand
mit Übernahme der
Bereichseinteilung aus
den photogrammetri-
schen Plänen der 1980er
Jahre (fokus GmbH,
Leipzig); vgl. mit Abb. 2
und Planmaterial im
Anhang.

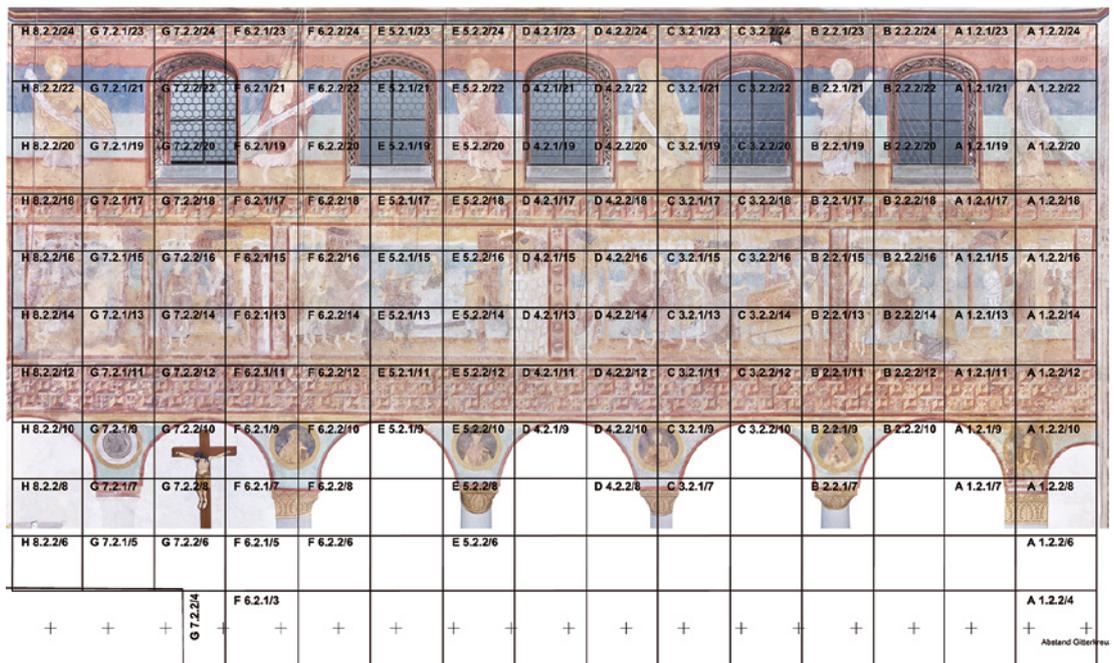
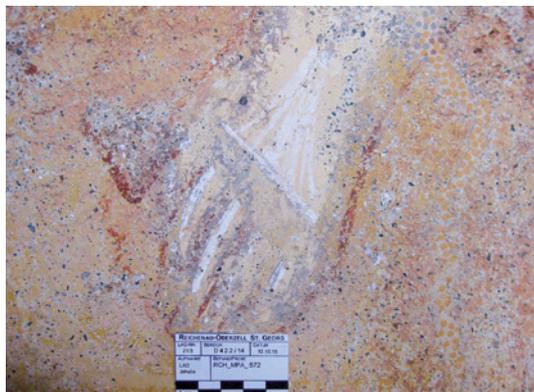


Abb. 13:
Südwand, Bereich
D 4.2.2/14, FüÙe, Rönt-
genfluoreszenzanalyse
(RFA) der geschwärzten
Partien, hier mit entspre-
chender Bezeichnung
(Messpunkt 572)/MaÙ-
stab/Datum etc. (LAD,
Jakobs).



zu können.¹² Darüber hinaus sind alle Unter-
suchungsergebnisse auch Grundlage für zukünf-
tige Bewertungen und möglicherweise auch für
andere Fragestellungen, die uns heute noch
nicht bewegen. Jedes Monitoring bedarf einer

¹² Zu Details vgl. den Beitrag zum Klima von Harald
Garrecht.



Abb. 14: Südwand, Übersicht zu den Messpunkten der Röntgenfluoreszenzanalysen (RFA) in der Bildszene der Auferweckung von Jairi Töchterlein (Keller jun., Reichenau; Eintragungen Judit Zöldföldi und Boaz Paz), vgl. auch die Pläne im Anhang.



Abb. 15: Nordwand, Detail des neu erstellten Bildplans der Nordwand im Streifenlicht zur Verdeutlichung der Mörtelgrenzen im Verlauf der Gerüste, der Unebenheiten im Verlauf des Mauerwerks und der späteren Mörtelergänzungen (fokus GmbH, Leipzig), vgl. auch die Bildpläne im Anhang.

nachvollziehbaren Erfassung und Dokumentation, um in der Vergangenheit erhobene Daten überhaupt mit zukünftig zu erfassenden Daten vergleichen zu können.

Im Ergebnis umfasst das „Reichenau-Archiv“ im Landesamt für Denkmalpflege ca. 200 Leitzordner zu Archivalien, Literatur, Schriftverkehr, Analysen, Klimamessungen, Inventar, sowie Vorun-

tersuchungs-, Restaurierungs- und Wartungsberichten zu allen Raumteilen (Abb. 16), ca. 30.000 Kleinbilddias, geschätzte 2.000 Mittelformataufnahmen (s/w und Farbe) und ca. 2.000 Schwarzweiß-Abzüge sowie einen kompletten Planschrank mit Kartierungen, Zeichnungen und 1:1 Pausen.



[links] Abb. 16: Reichenau-Ordner mit Schriftstücken, Dokumentation im Archiv des Landesamtes für Denkmalpflege, Esslingen, Fachgebiet Restaurierung (LAD, Jakobs).



[rechts] Abb. 17: Reichenau-Dias im Archiv des Landesamtes für Denkmalpflege, Esslingen, Fachgebiet Restaurierung (LAD, Jakobs).

Dieses Dokument „Dokumentation Reichenau“ ist unersetzlich. Zwar ist ein Großteil der Schriftstücke mikroverfilmt, aber die Diapositive, Dokumente und Pläne sind bis heute nur in Auszügen digitalisiert. Um all diese Daten, die jetzt und in der Vergangenheit erhoben wurden für die Zukunft zu bewahren, sollten diese dringend

in anderer Form archiviert und zugänglich gemacht werden. Die komplette Digitalisierung des Reichenau-Archivs, bevorzugt in ein Datenbanksystem, das die Arbeit mit den Informationen erleichtert, ist ein Projekt, das auf der Agenda der Landesdenkmalpflege für die kommenden Jahre steht.

Literatur

- Charta von Venedig. In: Principles of Monument Conservation (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXX), München 1999, S. 67–71.
- Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.
- Reichwald, Helmut F.: Möglichkeiten der zerstörungsfreien Voruntersuchung am Beispiel der ottonischen Wandmalereien in St. Georg Reichenau-Oberzell. In:

- Historische Technologie und Konservierung von Wandmalereien. Vortragstexte der 3. Fach- und Fortbildungstagung der Fachklasse Konservierung und Restaurierung, Schule für Gestaltung Bern, 5. und 6. November 1984, Bern 1985, S. 106–132.
- Reichwald, Helmut F.: Über Sinn und Unsinn restauratorischer Untersuchungen. Zur Befunderhebung als Teil einer Konzeption. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 1, 1987, Heft 1, S. 25–31.

Die hochauflösende photogrammetrische Dokumentation des Wandmalereizyklus im Mittelschiff

Gisbert Sacher, Gunnar Siedler, Sebastian Vetter

Die fokus GmbH Leipzig wurde im Rahmen des DBU-Forschungsprojektes mit der hochauflösenden photogrammetrischen Dokumentation im Maßstab 1:5 der Wandmalerei an Nord- und Südwand im Mittelschiff der Kirche St. Georg in Oberzell beauftragt.

Die maßstäblichen Bildpläne in fotografischer Qualität sollen den Zustand der Malerei zum Zeitpunkt der Aufnahmen abbilden und sind Grundlage für eine vergleichende Auswertung von vorhandenem und neu aufzunehmendem Bildmaterial. Im weiteren Verlauf der Arbeiten ist es vorgesehen, die bei der bisherigen Befunddokumentation entstandenen graphischen Pläne mit den Bildplänen zu kombinieren und historische Fotografien deckungsgleich zu entzerren.

Photogrammetrische Grundlagen

Die im Herbst 2015 vor Ort ausgeführten Arbeiten umfassten die photogrammetrische Aufnahme von Nord- und Südwand mit zunächst je fünf Einzelaufnahmen pro Wand. Diese Teilbilder wurden im Maßstab 1:20 bei 400 dpi Auflösung auf der Grundlage tachymetrisch gemessener Passpunkte projektiv entzerrt und zu Gesamtansichten montiert. Die Größe eines Bildpunktes am Objekt beträgt bei einem Maßstab von 1:20 und 400 dpi Auflösung etwa 1,3 mm. Diese beiden Bildpläne bildeten die photogrammetrische Grundlage für die Entzerrung aller nachfolgenden Aufnahmen der bemalten Wandbereiche. Für die Detailauswertung wurde der Maßstab 1:5 bei 300 dpi Auflösung festgelegt. Dabei ergibt sich für einen Bildpunkt eine Größe von etwa 0,4 mm am Objekt. Diese Auflösung erlaubt die digitalen Arbeiten bis zu einem Maßstab von min-

destens 1:2 ohne am Computerbildschirm sichtbare Pixel.

Die Ausdehnung einer Wandfläche beträgt ca. 8×19 m. Aufgrund der in den älteren Versionen von Adobe Photoshop auf 30.000 Zeilen und Spalten begrenzten Bildgröße wurden je Wand zwei Teilbildpläne erzeugt. Diese weisen mit den auf einem Blatt befindlichen Gitterkreuzen und Maßstabsleiste eine Dateigröße von jeweils 25.984×25.984 Bildpunkte bei 1,1 GByte auf. Zum Erreichen der Zielauflösung wurden von jeder Wand 54 Aufnahmen in sechs Reihen und neun Spalten mit einer großzügigen Überlappung angefertigt.

Alle Aufnahmen entstanden mit der digitalen Mittelformat-Kamera Phase One 645 AFD [1]. Der $53,9 \text{ mm} \times 40,4 \text{ mm}$ große CCD-Sensor des digitalen Rückteils 65+ hat eine Auflösung von 8984×6732 Bildpunkten, das ergibt etwa 61 Mio. Bildpunkte. Als Aufnahmeplattform diente eine Arbeitsbühne (Abb. 1). Es wurden Festbrennweiten von 80 bis 150 mm verwendet. Dies ermöglichte, alle Teilbilder weitgehend frontal und aus

*Abb. 1:
Arbeitsbühne für die
photogrammetrischen
Aufnahmen im Mittel-
schiff (fokus GmbH
Leipzig, Sacher).*



der maximal möglichen Entfernung aufzunehmen. Somit konnten perspektive Fehler bei der Bildentzerrung minimiert werden. Diese Konfiguration war erforderlich, da die Oberfläche der Wand zum Teil erhebliche, unter anderem tagwerksbedingte Tiefenunterschiede aufweist. Die gleichmäßige und schattenfreie Ausleuchtung der Flächen wurde mit einer leistungsstarken, professionellen Blitzanlage realisiert.

Die Entwicklung der in einem systemeigenen RAW-Format aufgezeichneten Daten zu TIFF-Dateien wurde im Programm Phase One-Capture One Pro vorgenommen. Die Farbabstimmung mit einer Aufnahme einer Kalibrierfarbtafel sowie die Kontrastanpassung und Schärfung erfolgten für alle Aufnahmen bei der abschließenden Bildmontage in Adobe Photoshop.

Die Kamera wurde mit allen verwendeten Objektiven photogrammetrisch kalibriert, sodass die objektivbedingte Verzeichnung vor Beginn der Bildentzerrung und -montage im Kartierungsprogramm metigo® MAP korrigiert werden konnte. Die für die Entzerrungen der Aufnahmen im Maßstab 1:20 (400 dpi) erforderliche Passpunkt-messung wurde mit einem Leica Tachymeter ausgeführt. Für die angestrebte Verknüpfung der

vorhandenen Unterlagen wurde das vom Landesdenkmalamt Baden-Württemberg in den 1980er Jahren angelegte Koordinatensystem der stereo-photogrammetrischen Dokumentation über die damals dauerhaft in der Kirche vermarkten Polygonpunkte aufgegriffen. Neben der Messung von natürlichen Neupunkten wurden auch Passpunkte von damals mitbestimmt.

Für die Bearbeitung der aufgenommenen Teilbilder im Maßstab 1:5 liegt die erforderliche Passpunktgenauigkeit unter 0,5 mm. Eine Verwendung von signalisierten Passpunkten ist an diesem Objekt nicht möglich. Die subjektive Identifizierung und Messung von Referenzpunkten in diesem Genauigkeitsbereich sind weder mit einem Tachymeter am Objekt noch später im digitalen Bild zu realisieren. Daher wurden zunächst als Grundlage für die Herstellung der Gesamtaufnahme im Maßstab 1:20 etwa 90 markante Punkte direkt an jeder Wand tachymetrisch gemessen (Abb. 2).

Die Referenzpunkte für die Entzerrung der Detailaufnahmen im Maßstab 1:5 wurden anschließend automatisiert in der Software metigo® MAP auf der Grundlage der entzerrten Gesamtaufnahme mit Unterstützung einer

Abb. 2:
Ansicht der Nordwand –
(Original: Bildplan 1:20
bei 400 dpi Auflösung)
(fokus GmbH Leipzig).



Geo-WN 04020

fokus
gmbh Leipzig
Rathenau - Oberzell
St. Georg
Digitaler Bildplan

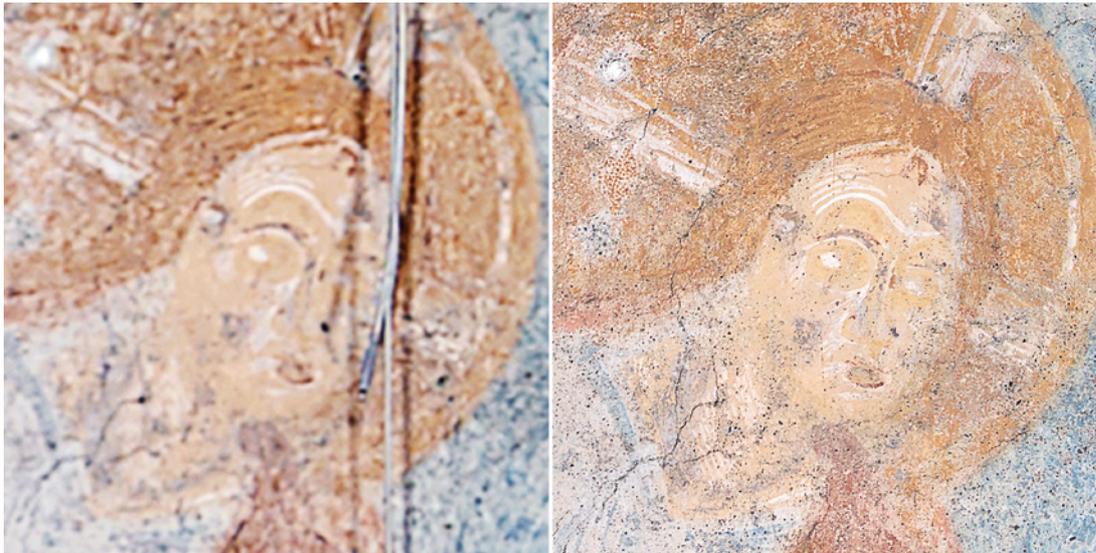


Abb. 3:
Vergleich der Auflösung
Bildplan 1:20 bei 400 dpi
(links) und Bildplan 1:5
bei 300 dpi (rechts)
(fokus GmbH Leipzig).

Punkt-Matching-Funktionalität mit Subpixelgenauigkeit bestimmt.¹

Die auf diese Weise entstandenen Bildpläne im Maßstab 1:5 mit der Auflösung von 300 dpi bieten nun eine gute Grundlage zum Beispiel für die Entzerrung von Wiederholungsaufnahmen im Rahmen eines Monitoring-Prozesses. Ebenso sind auf dieser Basis weitgehend deckungsgleiche Entzerrungen von Aufnahmen unterschiedlicher Spektralbereiche und von historischen Bildvorlagen möglich. Außerdem können während anderer Untersuchungen angefertigte Detailbilder ebenfalls entzerrt werden (vgl. Abb. 3).

Streiflichtaufnahmen

Im folgenden Arbeitsabschnitt wurden die beiden Wände für zwei Gesamtansichten der Malerei im Maßstab 1:20 bei 400 dpi im Streiflicht aufgenommen. Diese Größe wurde gewählt, da auch die Befundkartierungen in diesem Maßstab ausgeführt worden sind.

Dafür wurden fünf leistungsstarke Halogenstrahler am Fuß der aufzunehmenden Wand so positioniert, dass sich eine weitgehend gleichmäßige Ausleuchtung der gesamten Wandfläche ergab. Im Vorfeld hatte sich das Licht verschiedener Foto-Tageslichtleuchten aufgrund der in

den Geräten verwendeten Reflektoren als zu „weich“ bzw. als zu gering gerichtet herausgestellt. Anschließend wurde der Abstand der Halogenstrahler von der Wand so eingestellt, dass die zu dokumentierenden Phänomene, wie zum Beispiel die Mörtelgrenzen der Gerüstebenen, deutlich sichtbar wurden (Abb. 4).

Je Wand wurden dann insgesamt 18 Einzelaufnahmen in zwei Reihen mit der Kamera Phase One 645 AFD angefertigt. Aufgrund der langen erforderlichen Belichtungszeiten erfolgten diese Aufnahmen von Bodenstandpunkten aus. Diese befanden sich unterhalb der Arkaden der jeweils gegenüber liegenden Wand. Die Aufnahme in zwei übereinander liegenden Reihen war notwendig, um den sich aus der Beleuchtungssituation ergebenden Lichtabfall bereits bei der Aufnahme weitgehend kompensieren zu können. Bei Aufnahmen großer Flächen mit sehr hohen Kontrasten erweist sich der hohe Dynamikumfang des Kamera-Sensors von 12,5 Blenden-Stufen bei 50 ISO Empfindlichkeit und die Pixelgröße von 6 µm als besonders wertvoll.² Nur so erhält man unter schwierigen Bedingungen detailreiche Ergebnisse mit guter Durchzeichnung (Abb. 5).

Die Entzerrung und Montage der Teilbilder erfolgten wiederum auf der Grundlage der Bildpläne 1:20.

1 Siedler, Gunnar/Vetter, Sebastian: Moderne Methoden der Dokumentation für die Restaurierung – Digitale Kartierung und automatisierte 3D-Objektdokumentation mit der Software metigo®. In: Patitz, Gabriele/Grassegger, Gabriele/Wölbart, Otto (Hrsg.): Natursteinsanierung Stuttgart 2013. Neue

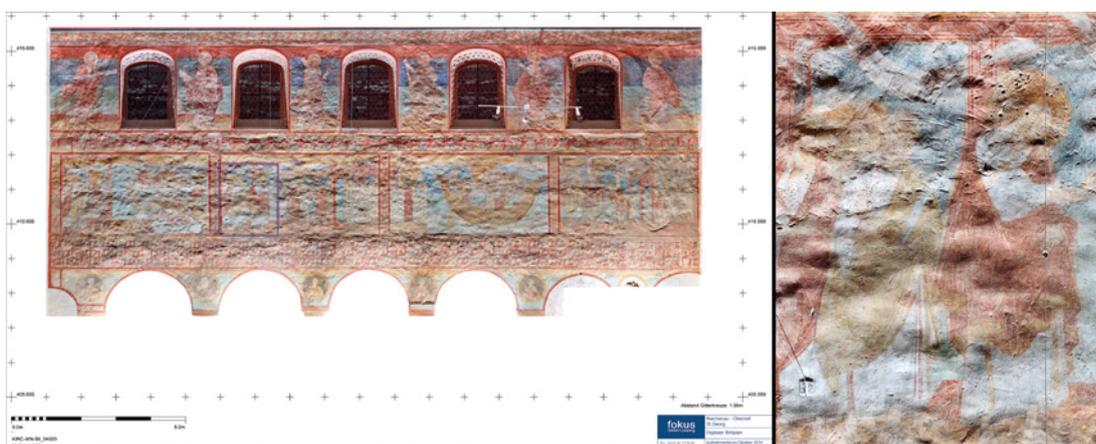
Natursteinrestaurierungsergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele, Stuttgart 2013, S. 77–87.

2 Datenblatt der Kamera Phase One 645DF und des Digital Backs 65+.

Abb. 4:
Ausleuchtung der
Südwand (fokus GmbH
Leipzig).



Abb. 5:
Links: Bildplan der Nord-
wand im Streiflicht (Original im Maßstab 1:20 bei
400 dpi Auflösung),
rechts: Ausschnitt aus
diesem Bildplan (fokus
GmbH Leipzig); vgl. auch
Planmaterial im Anhang.



Übernahme von Stereo- auswertung und Folien der Befundkartierungen

Da die Passpunktmessung für die Bildentzerrung im Koordinatensystem der Stereoauswertung des Landesamts für Denkmalpflege Baden-Württemberg erfolgte, konnte die grafische Stereoauswertung direkt als CAD-Datei importiert werden. Minimale Abweichungen zwischen Zeichnung und Bildplan werden exemplarisch in Abbildung 7 im oberen Bereich der Südwand gezeigt. Diese Differenzen resultieren u. a. aus einer dem Maßstab von 1:20 gegenüber geringeren Auswertegenauigkeit bei der graphischen Stereoauswertung im Maßstab 1:50 sowie aus den teilweise erheblichen Tiefenunterschieden an

den Wänden. Diese Tiefenunterschiede sind in den Streiflichtaufnahmen gut sichtbar (Abb. 5). Bei der graphischen Stereoauswertung entstehen Pläne in Orthogonalprojektion, Bildpläne werden über die projektive Entzerrung auf eine mathematische Ebene entzerrt (Abb. 6). Die Dokumentation aller Befunde orientierte sich seit Beginn der Arbeiten in den 1980er Jahren an einem Blattschnitt, der für jede Wand definiert wurde. Damit sind alle Kartierungsfolien und fotografische Dokumentationen an diesem Blattschnitt ausgerichtet.³

³ Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, Bd. 1, S. 26f.

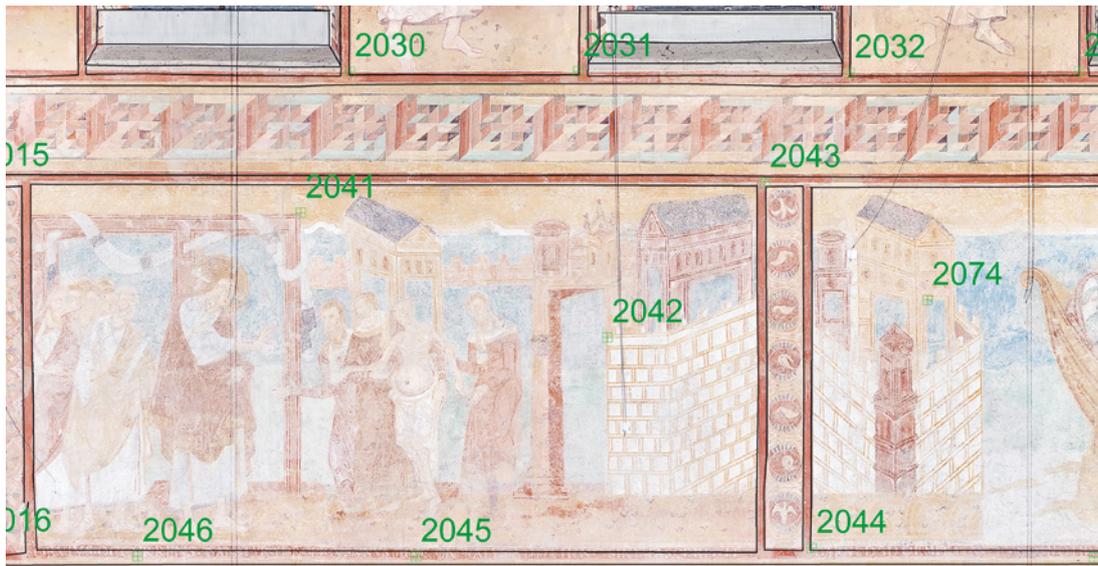


Abb. 6:
Nordwand, Überlagerung der graphischen Stereoauswertung mit Bildplan 1:20 und tachymetrisch gemessenen, natürlichen Passpunkten (fokus GmbH Leipzig).

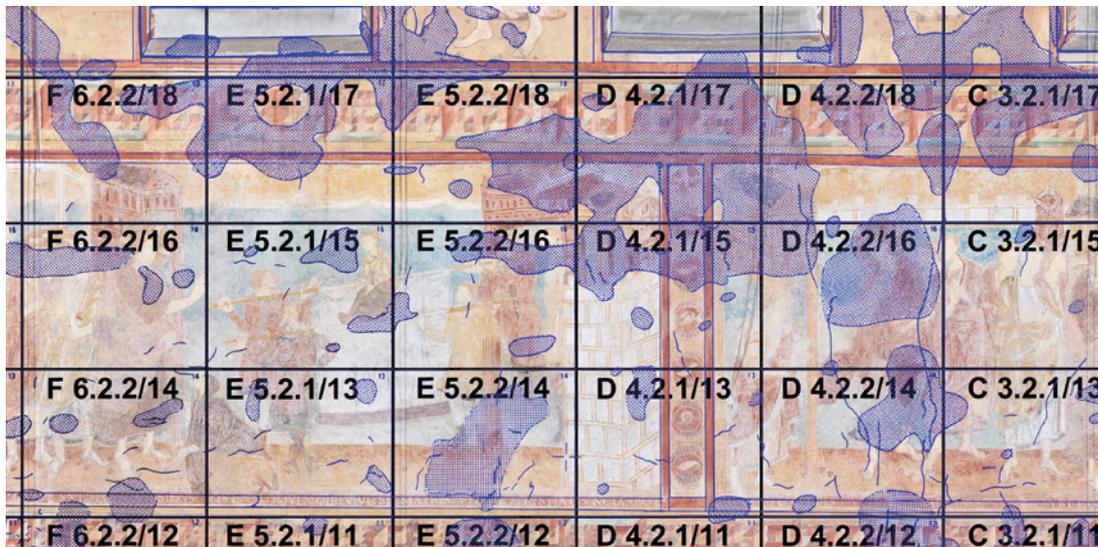


Abb. 7:
Südwand, Entzerrung der Folie „Hohlstellen und Risse“ auf Basis des Blattschnitts (fokus GmbH Leipzig).

Dieser Blattschnitt wurde aus den vorliegenden graphischen Plänen für jede Wand neu konstruiert und dient nun als Grundlage für die deckungsgleiche Entzerrung der fotografischen Reproduktionen der Befundkartierungen. Abbildung 7 zeigt exemplarisch die Einarbeitung der Folie „Hohlstellen und Risse im Deckmörtel“ für die Südwand (Abb. 7). Die Festlegung der Farben für die einzelnen Folien ist noch nicht endgültig. Diese Arbeiten sind zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen.

Digitale Entzerrung historischer fotografischer Aufnahmen

Zum Zeitpunkt der Drucklegung dieses Berichts wurde mit der Auswertung von Farbdias des „Führerauftrag Monumentalmalerei“ aus dem Bestand Zentralinstituts für Kunstgeschichte München, Farbdiaarchiv deutscher Wand- und Deckenmalerei, begonnen. Zu Geschichte und Arbeit mit diesem Bildbestand fand 2005 die

Abb. 8:
Nordwand, vier Dias
einer Motivreihe –
unbearbeitet
(ZI München).



Tagung des Zentralinstituts für Kunstgeschichte mit dem Thema „Dokumentation – Digitalisierung – Kunstgeschichte. Das Farbachiv zur Wand- und Deckenmalerei“ statt.⁴

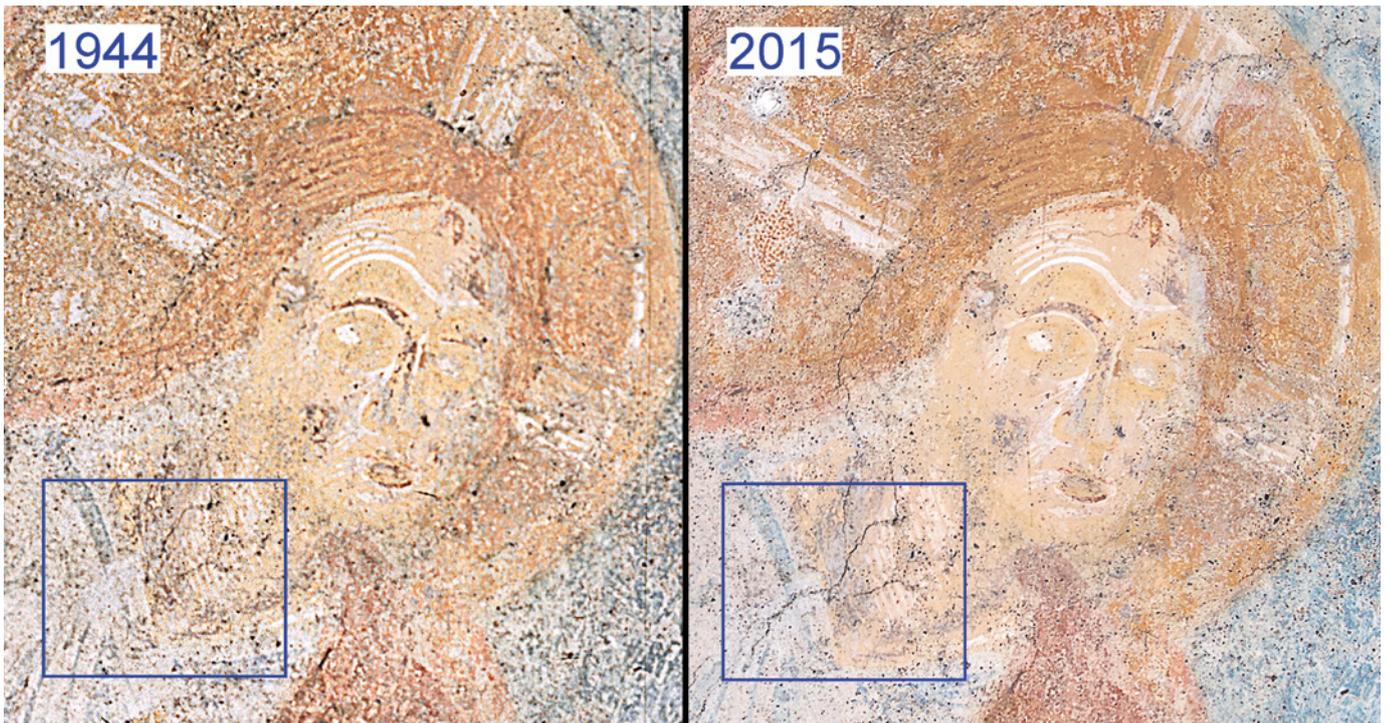
Die Erfahrung aus verschiedenen Projekten hat gezeigt, dass die Farbdias aufgrund der geometrischen Abbildungsqualität für eine eigenständige 3D-Auswertung oder Bildentzerrung und Montage nur bedingt geeignet sind. Die Gründe liegen u. a. in unzureichender geometrischer Stabilität der Filmträger sowie den damals verwendeten Objektiven. Ist hingegen eine durchgehende geometrische Grundlage vorhanden, können

diese Farbdias sehr gut transformiert werden. Diese Grundlage ist im vorliegenden Fall mit den Bildplänen der Wandansichten 1:20 gegeben.⁵ Der Bestand für die Kirche St. Georg beläuft sich auf insgesamt 182 Kleinbilddias. Von diesen betreffen 54 die Nord- und 55 die Südwand.

Die Aufnahmen erfolgten damals mit dem Farbdiafilm „AGFACOLOR-Neu“, der 1936 auf den Markt gekommen war. Der Grundaufbau des Dreischicht-Farb-Films entspricht weitgehend dem noch heute verwendeter Diafilme. Das Material wurde sowohl in der Ausführung als Kunstlicht- als auch als Tageslichtfilm eingesetzt. Als Aufnahmegерäte kamen hochwertige Kleinbildkameras der Marken Leica und Contax

4 Fuhrmeister, Christian / Klingen, Stephan / Lauterbach, Iris / Peters, Ralf (Hrsg.): Führerauftrag Monumentalmalerei. Eine Fotokampagne 1943–1945 (Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Kunstgeschichte in München XVIII), Köln/Weimar 2006. Der Bestand ist online recherchierbar: <http://www.zikg.eu/photothek/bestaende/farbdia-archiv>. Letzter Zugriff am 6.1.2017.

5 Siedler, Gunnar / Sacher, Gisbert: Photogrammetrische Auswertung historischer Fotografien und Messbilder. In: Fuhrmeister et al. 2006, S. 189–198.



mit Objektiven verschiedener Brennweiten zum Einsatz.⁶

Für die Bearbeitung der Dias im Projekt werden diese hochauflösend mit 4000 dpi, bezogen auf das Kleinbildformat von 24 × 36 mm und 16 Bit Farbtiefe gescannt. Dabei entstehen Dateien von etwa 5500 × 3700 Bildpunkten und 120 MB Größe. Bei dieser Scannauflösung ist bereits das Filmkorn im Bild sichtbar. Damit wird die auswertbare Auflösung übertroffen und auch die Grenzen der Interpretation der Bildinhalte sind erreicht. Die Bildserien sind so angelegt, dass von einer Szene eine Übersichtsaufnahme und in zwei oder drei Stufen Detailaufnahmen zum Beispiel einer Personengruppe, einer Person und eines Kopfes angefertigt wurden (Abb. 8).

Aus diesen Serien sind meist nur Aufnahmen der Dias 3 und 4 sowie in Ausnahmefällen auch der Dias 2 aus Abbildung 8 mit einem signifikanten Informationsgewinn zu verwenden. Auch hier wird die deckungsgleiche Entzerrung mit Unterstützung einer Punkt-Matching-Funktionalität zur Bestimmung der Referenzpunkte vorgenommen. Mit den Aufnahmen 3 und 4 aus Abbildung 8 kann ein Maßstab von bis zu 1:5 bei 300 dpi Auflösung erreicht werden.

Die Farbabstimmung der historischen Dias erfolgt anhand der Aufnahmen von 2015 in Adobe

Photoshop. Eine vollständige Rekonstruktion der Farben zum Zeitpunkt der Aufnahmen um 1944 – etwa für einen Farbvergleich – ist aber auf diesem Wege nicht erreichbar. Die Farbpigmente der Originaldias unterliegen einem unterschiedlichen Alterungs- bzw. Ausbleichprozess, der nicht objektiv vollständig rückgängig gemacht werden kann (Abb. 9).

Die aus den Unebenheiten der Wandflächen resultierenden Abweichungen in den entzerrten Aufnahmen verschiedener Epochen fallen in allen bisher betrachteten Fällen vernachlässigbar klein aus. Dies liegt zu einem großen Teil daran, dass die Ausgangsbilder meist frontal auf die Szenen und aus einem größeren Abstand erfolgen konnten.

Im weiteren Verlauf der Übernahme von Bilddaten für eine übergreifende Auswertung ist u. a. noch die Bearbeitung von historischen Schwarz-Weiß-Aufnahmen (Glasplatten) aus verschiedenen Phasen der Freilegung (ab 1890) und aus vorangegangenen Restaurierungen vorgesehen.⁷ Denkbar ist auch die Entzerrung von Detailaufnahmen besonders relevanter Bereiche aus den verschiedenen Phasen der Untersuchung und Überwachung der Wandbilder.

Abb. 9: Veränderung eines Rissverlaufs zwischen 1944 und 2015 (ZI München, fokus GmbH Leipzig).

6 Ebd.

7 Jakobs 1999, Bd. 3, S. 86–115.

Datenübergabe

Alle entstandenen Messbilder werden sowohl als TIFF-Dateien als auch als Mehrebenen-TIFF- bzw. PSB-Dateien in den Bearbeitungsmaßstäben an den Auftraggeber geliefert. Das PSB-Format ist ein neues Adobe Photoshop-Format (ab Adobe PhotoShop CS), das Dateigrößen von

mehr als 2 GB erlaubt, die bei der Überlagerung mehrerer Bildebenen schnell erreicht werden. Parallel dazu werden am Ende der Arbeiten metigo® MAP-Projekte übergeben, die neben den Bildplänen auch die tachymetrisch gemessenen Passpunkte, die graphische Stereoauswertung und die bearbeiteten Kartierungsfolien enthalten.

Literatur

Datenblatt der Kamera Phase One 645DF und des Digital Backs 65+.

Fuhrmeister, Christian / Klingen, Stephan / Lauterbach, Iris/Peters, Ralf (Hrsg.): Führerauftrag Monumentalmalerei. Eine Fotokampagne 1943–1945 (Veröffentlichungen des Zentralinstituts für Kunstgeschichte in München XVIII), Köln/Weimar 2006.

Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalspflege in Baden-Württemberg 9). 3 Bde, Stuttgart 1999.

Siedler, Gunnar / Sacher, Gisbert: Photogrammetrische Auswertung historischer Fotografien und Messbilder. In: Fuhrmeister et al. 2006, S. 189–198.

Siedler, Gunnar / Vetter, Sebastian: Moderne Methoden der Dokumentation für die Restaurierung – Digitale Kartierung und automatisierte 3D-Objektdokumentation mit der Software metigo®. In: Patitz, Gabriele / Grassegger, Gabriele / Wölbert, Otto (Hrsg.): Natursteinreparaturergebnisse und messtechnische Erfassungen sowie Sanierungsbeispiele, Stuttgart 2013, S. 77–87.

Reflectance Transformation Imaging (RTI). Eine digitale Reproduktionstechnik zur Dokumentation von Wandmalereien

Peter Fornaro, Lothar Schmitt, Heidrun Feldmann

Als Instrument und Medium der kunsthistorischen Forschung sind Fotografien unverzichtbar. Sie dienen einerseits der Dokumentation von Objekten und sind andererseits wesentliche Voraussetzung, um Kunstwerke ortsunabhängig vergleichend zu betrachten. Darüber hinaus können Fotografien helfen, Unsichtbares sichtbar zu machen. Dadurch können zum Beispiel wertvolle Zusatzinformationen über den Erhaltungszustand und die Materialkomposition eines Originals erfasst werden. Um diese Aufnahmen möglichst präzise und valide herstellen zu können, waren die Anforderungen der Kunstgeschichte an die Aufnahmetechnik bereits im Zeitalter der Analogfotografie ebenso hoch, wie sie es heute im Digitalen weiterhin sind. Auch die fotografischen Prinzipien sind trotz des Wandels von der analogen zur digitalen Fotografie gleich geblieben: Dazu gehören Aufnahmemethoden, wie z. B. die Makro- und Mikrofotografie, die optimale Ausleuchtung der Originale sowie der Einsatz von Wellenlängen, die im unsichtbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums liegen, z. B. für die UV-Lumineszenz.

Der Einsatz von Fotografien zur Dokumentation von Kunstwerken war jedoch mit analogen Verfahren aufwendig und oft nur eingeschränkt möglich. Es fehlte die unmittelbare Bildkontrolle und die Wiedergabe von Farbe war stark mit den Eigenschaften des Mediums verbunden; die Chemie des Films definierte die Farbwiedergabe. Mit dem Durchbruch der Digitalfotografie hat sich das Spektrum hingegen vielfach erweitert. Digitale Bilder übertreffen heute die Qualität analoger Aufnahmen in allen Belangen und ihre Verbreitung über Datennetze ist so einfach wie nie zuvor. Hinzu kommen gänzlich neue Möglichkeiten der Computational Photography, mit deren Hilfe zum Beispiel dreidimensionale Ober-

flächen aus Fotografien berechnet werden können und sich unterschiedliche Materialeigenschaften sichtbar machen lassen. Hier sind Techniken wie das nachfolgend vorgestellte Reflectance Transformation Imaging (RTI) bzw. spezifischer das Polynomial Texture Mapping (PTM) besonders zu nennen.

Bei der Beurteilung von Kunstwerken spielt die Beleuchtung eine wesentliche Rolle, denn erst durch die Interaktion von Licht, Objekt und Betrachter entsteht der visuelle Gesamteindruck. Wird zum Beispiel der Standort, die Geometrie oder die Farbtemperatur einer Lichtquelle verändert, verändert sich entsprechend auch die Erscheinungsweise des Motivs. Bei allen Arten von Kunstwerken, seien es Gemälde, Skulpturen oder gar Gebäude, besitzt das Licht deshalb einen entscheidenden Stellenwert. Für die Reproduktion von Kunstwerken wird Licht dazu verwendet, charakteristische Merkmale der Oberflächenbeschaffenheit von Materialien hervorzuheben, aus denen das Objekt besteht, oder die erlauben, Rückschlüsse auf den Herstellungsprozess anzustellen. Durch eine geeignete Beleuchtung lassen sich zum Beispiel die Pinselstriche eines Gemäldes deutlich hervorheben – mit Streiflicht – oder aber zum Verschwinden bringen – mit mehreren Lichtquellen und geeignetem Einstrahlwinkel. In der konventionellen Fotografie dient die Beleuchtung oft auch dazu, den fehlenden räumlichen und plastischen Eindruck auszugleichen. Gewisse Eigenschaften wie etwa der Glanz eines Materials werden im Normalfall mit Polarisationsfiltern möglichst unterdrückt, da dieser auf die Darstellung von Farbe störend wirkt; Glanz entsteht durch Totalreflexion des Lichts auf der Oberfläche, das heißt Glanzstellen besitzen immer die Farbe der Lichtquelle.



Abb. 1:
Kopf des Bischofs Lüt-
hold von Aarburg, Detail
der Wandmalerei in der
Krypta des Basler Mün-
sters bei normaler Be-
leuchtung und im Streif-
licht (Digital Humanities
Lab, Universität Basel,
2016).

Ein gutes Beispiel, an dem sich solche Effekte in der Fotografie von Kunstwerken veranschaulichen lassen, ist das Detail einer Wandmalerei in der Ostkrypta des Basler Münsters (Abb. 1). Der Kopf gehört zu einer Darstellung der Bischöfe Lütbold von Aarburg (1191–1213) und Adalbero II. (999–1025), die sich zu beiden Seiten der Mittelapsis befindet. Eine begleitende Inschrift erwähnt die 1202 erfolgte Altarweihe. Das wohl von einer oberrheinischen Werkstatt geschaffene Fresko war Teil einer nur in wenigen Resten erhaltenen Ausmalung. Bei gleichmäßiger Beleuchtung kommen das Motiv des dargestellten Kopfs von Bischof Lütbold und die dafür verwendeten Farben deutlich zur Geltung. Bei Streiflicht zeigt sich jedoch, dass der als Malgrund auf der Wand aufgetragene Putz, die als Vorzeichnung dienenden Ritzungen und sogar die verwendete Farbe ein spezifisches Oberflächenrelief mit optisch wirksamen Materialeigenschaften besitzen (Abb. 1). Da sie typische Merkmale des Kunstwerks sind, lohnt es sich, sie fotografisch zu

erfassen, um die bildliche Dokumentation zu vervollständigen. Das Beispiel macht deutlich, warum die beiden in diesem Beispiel gezeigten Beleuchtungssituationen je nach Fragestellung ihre Berechtigung haben. Welche Lichtwirkung genutzt wird, hängt davon ab, welche Merkmale eines Kunstwerks mit fotografischen Mitteln dokumentiert werden sollen. Dies verweist auf ein Problem, das zum Wesen der konventionellen Fotografie gehört: Unabhängig davon, ob in der analogen oder digitalen Domäne gearbeitet wird, ist es notwendig, eine Aufnahmesituation im Vorfeld zu definieren. Prinzipbedingt muss also zum Zeitpunkt der Aufnahme bereits feststehen, welches Bild endgültig realisiert werden soll, es ist prinzipiell ein statisches Verfahren. Ein weiteres Kennzeichen konventioneller Fotografien ist, dass der dreidimensionale, materiell gebundene Objektcharakter des Originals nur zweidimensional wiedergegeben werden kann. Nachträgliche Veränderungen des räumlichen Wechselspiels zwischen Objekt, Beleuchtung und Kamera sind also ausgeschlossen. Das beeinträchtigt den wissenschaftlichen Nutzen fotografischer Reproduktionen von Kunstwerken erheblich.

Durch den Wechsel in die digitale Domäne lassen sich jedoch neue Methoden anwenden, die in vergleichbarer Form in der analogen Welt nicht realisierbar wären. Eine vielversprechende Herangehensweise, um die statische Erscheinung der Fotografie zu umgehen, ist das „Polynomial Texture Mapping“ (PTM). Es wurde in den 1990er Jahren von Tom Malzbender während seiner Tätigkeit an den HP Labs in Palo Alto entwickelt und 2001 publiziert.¹ Seither ist das Verfahren vor allem zur Dokumentation von Kulturgütern verwendet worden.

Es erlaubt, die Lichtreflexion in Abhängigkeit vom Lichteinfallswinkel und der Oberflächenstrukturen zu messen, um so die dreidimensionale Wirkung der optischen Materialeigenschaften eines Objekts deutlicher wiederzugeben. Dafür wird von einem festen Kamerastandpunkt eine Serie deckungsgleicher Einzelaufnahmen angefertigt, bei der die Beleuchtung für jede Einzelaufnahme aus einer anderen Richtung erfolgt.

1 Malzbender, Tom / Gelb, Dan / Wolters, Hans: Polynomial Texture Maps. In: Siggraph 2001 proceedings (<http://www.hpl.hp.com/research/ptm/papers/ptm.pdf>).

Reflectance
Transformation
Imaging (RTI)

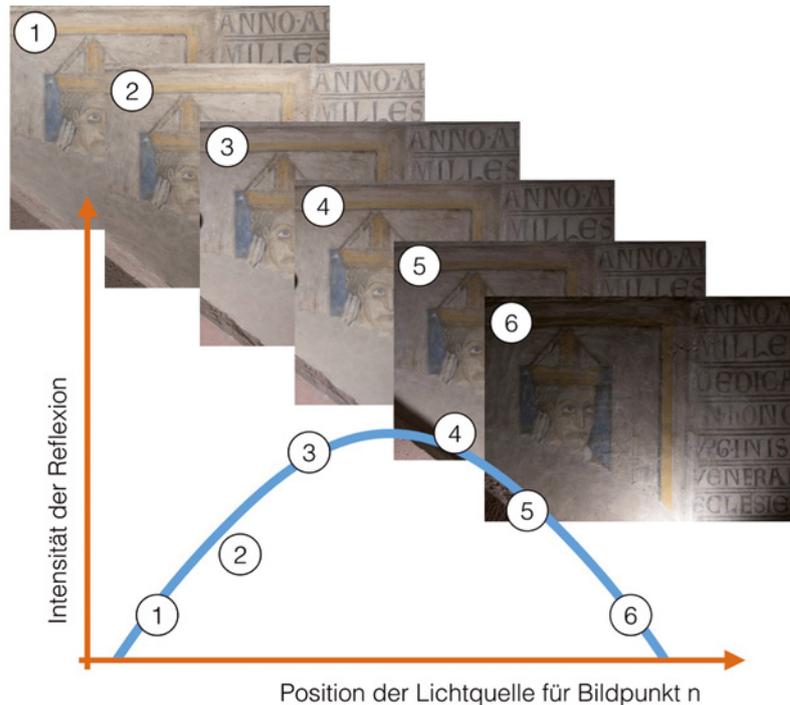


Abb. 2:
Schema der Berechnung
des PTM-Modells aus
einer Messreihe von
Helligkeitswerten bei
einer Serienaufnahme.
(Digital Humanities Lab,
Universität Basel, 2016).

Um PTM-Aufnahmen von Wandmalereien anzufertigen, ist es sinnvoll, die Kamera mit einem frei beweglichen Blitz zu verwenden, der während der Aufnahmen von Hand um das Motiv geführt werden kann. Dabei ist es zum einen wichtig, die Blitz-Positionen in möglichst gleichbleibendem Abstand um das Zentrum des fotografierten Motivs anzuordnen, da die Beleuchtungsstärke quadratisch von der Distanz abhängig ist. Zum anderen sollte der Kamerastandpunkt so gewählt werden, dass optische Verzerrungen vermieden werden und die Schärfenebene möglichst parallel zur Objektebene liegt. So kann mit relativ großer Blendenöffnung gearbeitet werden. Das verringert die Beugungsunschärfe und steigert damit die generelle Schärfe.

Die so erstellten Bilder dienen in einem zweiten Schritt als Datengrundlage für eine nachträgliche pixelbasierte Modellierung. Dafür werden zunächst die einzelnen Bilder einer Aufnahmeserie deckungsgleich übereinander gelegt. Danach wird für jeden spezifischen Ort, welcher die Menge aller Bildpunkte aus den unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen darstellt, ein mathematisches Modell – im Normalfall eine Kugelfunktion – gefittet, das heißt so parametrisiert, dass die Abweichung aller Datenpunkte zur Funktion minimal wird (Abb. 2).

Diese Parameter zur Funktion werden in einer entsprechenden Datei gespeichert. Die so abge-

legten Daten repräsentieren also nicht mehr eine Fotografie im eigentlichen Sinne, sondern ein Computermodell, das in eine entsprechende Betrachter-Applikation geladen werden kann, wo es gerendert wird. Der große Unterschied zur konventionellen Computergrafik liegt darin begründet, dass mit dieser Software das Aussehen des Objekts während der Betrachtung am Computer bei wechselnden Lichtsituationen interaktiv simuliert werden kann. Außerdem können aus der Computergrafik bekannte Beleuchtungsmodelle wie Phong oder Ward der visuellen Repräsentation überlagert werden. Solche Beleuchtungsmodelle sind unter anderem in der Lage, eine stark glänzende Oberfläche zu simulieren. Im Porträt von Bischof Lüthold (Abb. 3) zeigt sich bei einer entsprechenden Einstellung, wie der hinzugefügte Glanz dazu beiträgt, Ungleichmäßigkeiten in der Oberfläche des Freskos stärker hervorzuheben, um so die visuelle Wirkung zu verstärken.

Die bisher übliche Modellierung im PTM-Verfahren verfügt allerdings nur über eine relativ geringe Komplexität – das mathematische Modell entspricht im Normalfall einer einfachen Funktion zweiter Ordnung. Der quadratische Verlauf einer Oberflächenreflexion beschreibt matte Oberflächen gemäß dem Lambert'scher Strahler sehr genau. Bei Glanz aber versagt dieses Modell, da es nicht den physikalischen Gesetzmäßigkeiten entspricht. Ein zweiter Nachteil ist, dass das



Abb. 3: Kopf des Bischofs Lüt- hold von Aarburg, Detail der Wandmalerei in der Krypta des Basler Mün- sters bei Verwendung des Phong-Modells zur Stei- gerung der Lichtreflekti- on (sog. „specular en- hancement“). (Digital Humanities Lab, Univer- sität Basel, 2016).

Verfahren zwar eine Interaktion zulässt, diese aber nur in der eigens dafür vorgesehenen Viewer-Applikation möglich ist. Im Rahmen eines Forschungsprojekts des Schweizerischen Nationalfonds, welches das Digital Humanities Lab der Universität Basel zu- sammen mit dem Seminar für Kunstgeschichte durchführt, wird das Verfahren weiterentwickelt. Denn in der bisher verwendeten Form stößt es vor allem bei Oberflächen mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften an seine Grenzen. Um bessere Ergebnisse zu erzielen, wird das bis- lang verwendete mathematische Modell in sei- ner Komplexität erhöht, um so dem Reflexions- verhalten unterschiedlicher Materialien Rech- nung zu tragen. Durch diese Verbesserung ist es möglich, in ein und demselben Bild Materialien mit unterschiedlicher Glanzstärke darzustellen. Eine weitere Einschränkung des bisher einge- setzten PTM-Verfahrens ist, dass es lediglich die visuelle Wirkung der Oberflächenbeschaffenheit darstellen kann, nicht aber die Oberflächen- struktur selbst. Es ist also kein 3D-Verfahren, sondern es zeigt lediglich die Wirkung der Drei- dimensionalität in einem zweidimensionalen Bild, einer Projektion, dies obschon die Norma- lenvektoren für jeden Ort der Oberfläche mathe- matisch ermittelt werden. Hier versuchen wir im Projekt einen Schritt weiter zu gehen, um das

Reflexionsmodell auf ein entsprechendes 3D- Netz zu legen, um so eine fotorealistische, räumliche Darstellung zu erhalten.

Ein weiterer Fokus des Basler Projekts liegt auf der Nutzung und Verbreitung digitaler Quellen. Während die Betrachtung von PTM-Aufnahmen bisher nur mit einer eigens zu installierenden Viewer-Software möglich war, stehen für die Darstellung von Bilddateien heute leistungs- fähige, standardisierte Web-Technologien zur Verfügung. Ein besonders vielversprechender Ansatz ist WebGL. Diese von OpenGL abgeleite- te Grafikkbibliothek ist in aktuellen Web-Brow- sern bereits integriert und ermöglicht die perfor- mante, realistische, farbtreue Darstellung von zwei- und dreidimensionalen Oberflächen, ohne auf ein spezielles Programm oder ein plug-in zurückgreifen zu müssen. So lassen sich zum Beispiel die Einstellungen einer spezifischen Betrachtungssituation als Metadaten speichern und kollaborativ diskutieren.

Es zeigt sich, dass genau diese Erweiterungen in der Messung und Darstellung von Kunstwerken viele Vorteile bringen. Im Speziellen solche Ob- jekte, die in erster Linie dazu dienen, unter dem Einfluss von spezifischen Lichtsituationen be- trachtet zu werden, zeichnen sich oft durch eine differenzierte Oberflächenstruktur aus, wozu auch Wandmalereien gehören. Sie sind als Aus- stattung eines Gebäudes in einen räumlichen Kontext integriert, auf den sie reagieren. Dies betrifft vor allem die Sichtbarkeit und Wirkung der Malerei auf den Betrachter, die sich je nach Lage und in Abhängigkeit von Beleuchtung, Blickwinkel und Bewegung innerhalb des Raums verändern. Dieser Aspekt wird in liturgischen Quellen erwähnt und ist deshalb für die kunst- historische Beurteilung von besonderem Inter- esse. Im Weiteren unterliegen die Malereien durch ihre Verortung innerhalb eines Jahrhun- derte alten Kirchenraums auch dem Wandel der klimatischen Bedingungen. Sie wirken sich – wie das DBU-Projekt „Raumklimastabilität zum Er- halt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau“² zeigt – auf den Erhaltungszustand der Bilder maßgeblich aus und stellen hohe Anforderungen an die Konser- vierung und Restaurierung. Für beide Zusam-

2 Siehe dazu: Garrecht, Harald / Jakobs, Dörthe / Reeb, Simone: DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabi- lität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausub- stanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerk- serhaltung und Denkmalpflege 6 (2015), S. 46–52.

menhänge bedarf es fotografischer Verfahren, die in der Lage sind, die Malereien innerhalb ihres räumlichen Kontextes so genau wie möglich zu dokumentieren und deren visuelle Wirkung digital zu simulieren.

Um die Anwendbarkeit des PTM-Verfahrens auf die Ausmalung eines Sakralbaus weiter zu erproben, wurden wir von Dörthe Jakobs eingeladen, Aufnahmen von einem Teil des Zyklus im Mittelschiff der Georgskirche in Reichenau-Oberzell anzufertigen. Ziel war es zu ermitteln, inwiefern PTM-Modelle einen Beitrag zur Dokumentation von Wandmalereien dieser Größe und Qualität leisten können. Nach einer ersten Besichtigung der Kirche im Dezember 2015 und den anschließenden Vorbereitungen, reiste das Team des Digital Humanities Lab am 16. März 2016 erneut an den Bodensee, um die Aufnahmen durchzuführen.

Die Ausmalung von St. Georg stammt nach heutiger Kenntnis aus der zweiten Hälfte des zehnten Jahrhunderts, wurde aber in ihrer langen Geschichte wiederholt verändert, bis sie schließlich unter einer Putzschicht verschwand. Erst Ende des 19. Jahrhunderts wurden die Malereien wieder entdeckt und freigelegt, wobei sie, wie auch in der darauffolgenden Zeit unter Einfluss verschiedener denkmalpflegerischer Ansätze, immer wieder Eingriffen ausgesetzt waren. Trotz dieser wechselvollen Überlieferungsgeschichte hat sich in St. Georg ein herausragendes Beispiel frühmittelalterlicher Wandmalerei erhalten – das bedeutendste nördlich der Alpen.

Ein achtteiliger Zyklus, der Wundertaten Jesu zeigt, bedeckt die Wände des Mittelschiffs. Für die fotografischen Aufnahmen, die das Basismaterial der PTM-Modelle bilden, wurden zwei Szenen ausgewählt: die „Heilung des Wassersüchtigen“ und die „Beruhigung des Sturms auf dem See Genesareth“. Beide befinden sich an der Nordwand. Um Störungen durch einfallendes Tageslicht zu vermeiden, welches die Ergebnisse beeinträchtigen könnte, wurden die Aufnahmen nach Einbruch der Dunkelheit durchgeführt.

Die Ausmaße der Bildszenen sowie die Höhe ihrer Platzierung sollten sich als zusätzliche Herausforderung erweisen (Abb. 4). Die Kamera wurde deshalb auf ein bis zu 6 m hohes Stativ montiert und parallel zum jeweiligen Bildfeld aufgestellt. Von beiden Szenen wurden auf diese Weise jeweils ca. 50 Aufnahmen gemacht, wobei die Beleuchtung für jedes einzelne Bild verändert wurde, indem ein Blitz, der an einer langen Stange befestigt worden war, von einer Hebebühne



aus manuell um die Kamera herum in gleichbleibender Distanz über den Bildausschnitt geführt wurde.

Im Vergleich mit gleichmäßig ausgeleuchteten Aufnahmen zeigen die aus diesen Fotografien berechneten PTM-Modelle in der Viewer-Software unter Hinzufügung von Glanz besonders deutlich das aus dem Putz- und Farbauftrag resultierende Relief der Oberfläche.

Einige Beobachtungen, die im Zuge der 1999 publizierten Dokumentation³ bereits beschrieben wurden, sind durch die PTM-Aufnahmen deutlich sichtbar zu machen. So werden in einem

Abb. 4: Vorbereitung für die Aufnahmen der Wandmalereien in St. Georg unter Verwendung eines hohen Kamerastativs und einer Hebebühne zur manuellen Ausleuchtung der Fotoserie. (Digital Humanities Lab, Universität Basel, 2016).

3 Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung. Bestand, Veränderungen, Restaurierungsgeschichte (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9). 3 Bde. Stuttgart 1999, hier besonders Bd. 2, S. 393–419.

Abb. 5:
Unebener Putzauftrag,
Risse und Verlauf der
Mörtelgrenze (Detail der
„Heilung des Wasser-
süchtigen“). Vergleich
der Ausgangsaufnahme
und dem nachträglichen
„specular enhancement“
im PTM-Viewer. (Digital
Humanities Lab, Univer-
sität Basel, 2016).

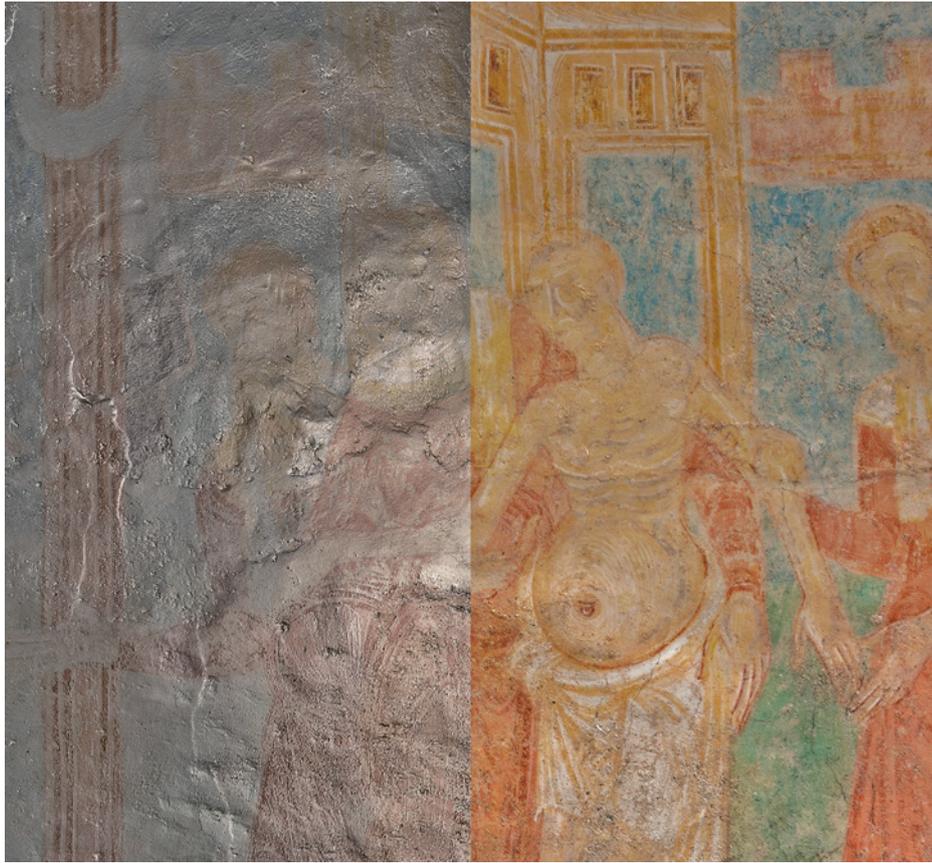
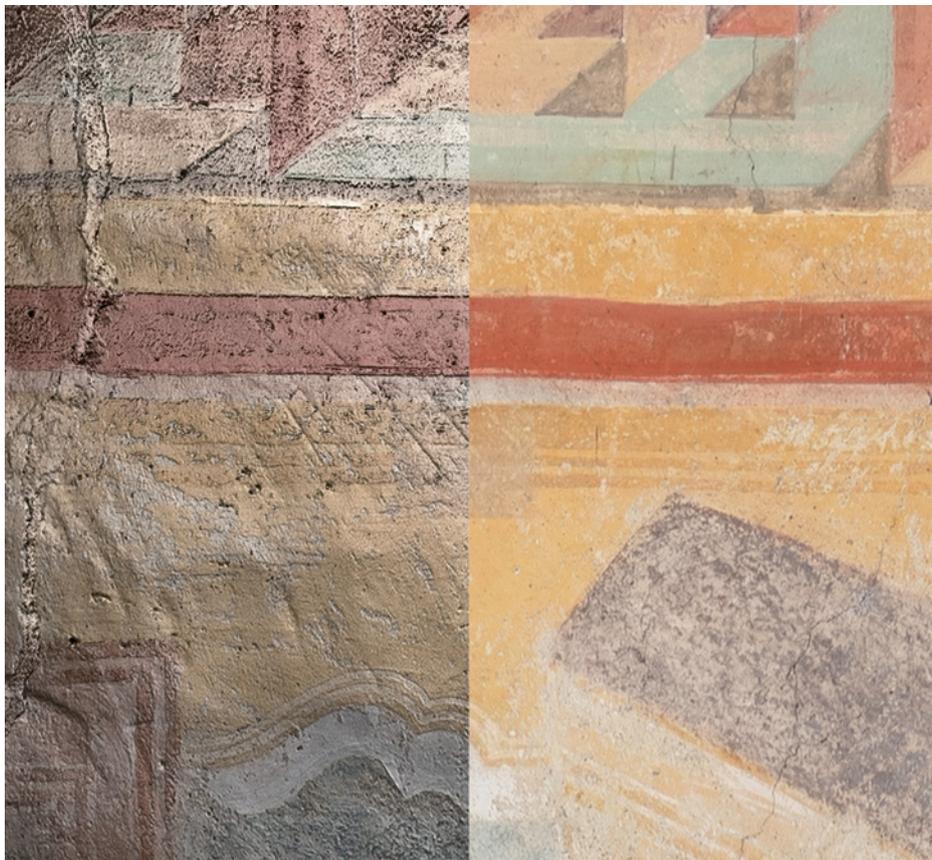


Abb. 6:
Kratzer und Risse im Putz
(Detail der „Heilung des
Wassersüchtigen“). Ver-
gleich der Ausgangsauf-
nahme und dem nach-
träglichen „specular
enhancement“ im PTM-
Viewer. (Digital Human-
ities Lab, Universität
Basel, 2016).



Ausschnitt aus der „Heilung des Wassersüchtigen“ zahlreiche Unebenheiten und Risse in der Oberfläche sowie in der Mitte der Abbildung die horizontale Mörtelgrenze sichtbar (Abb. 5). Auch weitere Auffälligkeiten, die auf Fotografien mit Aufricht durch die gleichmäßige Beleuchtung weitgehend zum Verschwinden gebracht werden, sind in dieser Einstellung besonders gut nachvollziehbar. Durch die Möglichkeit den Beleuchtungswinkel in der Viewer-Software manuell zu variieren, kann jeweils eine Einstellung gewählt werden, die spezifische Merkmale hervorhebt. So zeigt ein weiteres Detail aus dieser Szene diagonale Kratzer sowie Risse in der Oberfläche und das feine, durch den Auftrag der Farben erzeugte Relief. Deutlich wird zudem, dass die Farboberfläche an bestimmten Stellen sehr glatt und an anderen wiederum eher rau ist. (Abb. 6).

Diese Merkmale der Malerei veranschaulicht auch das Detail des Christuskopfes aus dem PTM-Modell der „Heilung des Wassersüchtigen“ (Abb. 7). Der Farbauftrag lässt sich insbesondere am Nimbus und im Gesicht gut nachvollziehen. Die feinen Linien der Weißhöhlungen erscheinen an der Stirn und um die Augen besonders plastisch. Darüber hinaus zeigt dieses Beispiel ebenfalls Risse und vor allem die klar erkennbaren Vertiefungen im Nimbus, in denen Metall-Applikationen befestigt waren.

Das Beispiel von St. Georg in Reichenau-Oberzell macht deutlich, wie gut sich die Oberflächenstruktur der Wandmalereien mithilfe von PTM-Modellen darstellen lässt. Das Relief des Farbauftrags sowie Beschädigungen, für deren Dokumentation bisher statische Streiflichtaufnahmen verwendet wurden, können nachgewiesen und interaktiv festgehalten werden. Aufgrund der Möglichkeit, die Beleuchtung in der Ansicht des Modells zu verändern, lässt sich zudem nachträglich und ortsunabhängig die jeweils ideale Einstellung wählen, um einzelne dieser Charakteristika hervorzuheben.

Als problematisch erwiesen sich jedoch die Dimension der Bildflächen sowie ihre Position in großer Höhe. Dies erschwerte die gleichmäßig verteilte Belichtung der gesamten Szene aus verschiedenen, um die Kamera verteilten Winkeln. Aus diesem Grund ist die Ausleuchtung im errechneten Modell an den äußeren Rändern nur schwach. In diesem Bereich lässt sich deshalb die Oberflächenstruktur nicht so deutlich hervorheben wie im Zentrum der Abbildung. Eine Möglichkeit, diesen Mangel zu beheben, besteht



in der segmentweisen Aufnahme der ganzen Oberfläche. Die von diesen Segmenten berechneten RTI-Aufnahmen könnten nachträglich zusammengesetzt werden, um so eine homogene Wirkung über die ganze Mauerfläche zu erhalten.

Wichtig ist auch bei dem hier vorgestellten Verfahren eine kritische Betrachtung der Validität und Präzision der erzielten Resultate. Durch den visuell ansprechenden Charakter der RTI-Aufnahmen können rechnerisch erzeugte Artefakte oder Ungenauigkeiten nicht sofort als solche festgestellt werden und so einen falschen Eindruck der realen Oberfläche verursachen. Dasselbe gilt, wie bei allen fotografischen Farbverfahren, auch für die Farbtreue, welche durch eine geeignete Farbprofilierung sichergestellt werden muss. Auch die technischen Metadaten zu den ursprünglichen fotografischen Aufnahmen müssen unbedingt gespeichert werden, um so zu einem späteren Zeitpunkt die Nachvollziehbarkeit sicherstellen zu können. Eine Möglichkeit, dies zu erreichen, ist sicherlich die Integration in eine entsprechende digitale Forschungsumgebung, welche auch diese wichtigen Metadaten langfristig zur Verfügung stellt und sichert.

Abb. 7: Befestigungsspuren der Metallauflagen im Nimbus und Relief des Farbauftrags der Weißhöhlungen (Kopf Christi; Detail der „Heilung des Wassersüchtigen“). Vergleich der Ausgangsaufnahme und dem nachträglichem „specular enhancement“ im PTM-Viewer. (Digital Humanities Lab, Universität Basel, 2016).

Es zeigte sich also, dass das RTI-Verfahren eine interessante Möglichkeit darstellt, um bereits bestehende Dokumentationen zu ergänzen, um

so eine interaktive Form der nachträglichen Bildauswertung nutzen zu können.

Literatur

Garrecht, Harald / Jakobs, Dörthe / Reeb, Simone: DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 6 (2015), S. 46–52.

Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung. Bestand, Veränderungen,

Restaurierungsgeschichte (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.

Malzbender, Tom / Gelb, Dan / Wolters, Hans: Polynomial Texture Maps. In: Siggraph 2001 proceedings (<http://www.hpl.hp.com/research/ptm/papers/ptm.pdf>).

Systematisches und nachhaltiges Management der materialwissenschaftlichen Daten von St. Georg

Judit Zöldföldi, Péter Hegedüs

Einführung

Während der intensiven interdisziplinären Studien im DBU-Forschungsprojekt „Raumklima-stabilisierung zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg – UNESCO-Weltkulturerbe auf der Klosterinsel Reichenau“ wurden zahlreiche Vor-Ort-Messungen durchgeführt, Proben entnommen, Fotos und Skizzen erstellt, Informationen und Dokumente geschaffen. Bereits kurz nach Projektstart wurde klar, dass diese Datenmenge einer sorgfältigen Struktur bedurfte und ein Konzept für die Datenablage notwendig war. Für die strukturierte Speicherung der eruierten Informationen wurde ein Datenbanksystem installiert, welches von allen Projektbeteiligten – ohne zeitaufwendige Einarbeitung in eine neue Software – bedient werden kann. Die Reichenau-Datenbank wurde als Client-Server-Anwendung implementiert. Der Daten-server läuft unter dem Betriebssystem Linux mit dem Datenbanksystem MySQL. Die Web-basierte Client-Anwendung wurde mit der PHP-Skriptsprache entwickelt.

Nutzung von Datenbank-technologien

„Ein Datenbanksystem (DBS) ist ein System zur elektronischen Datenverwaltung. Die wesentliche Aufgabe eines DBS ist es, große Datenmengen effizient, widerspruchsfrei und dauerhaft zu speichern und benötigte Teilmengen in unterschiedlichen, bedarfsgerechten Darstellungsformen für Benutzer und Anwendungsprogramme bereitzustellen.“¹

Treffender kann man den Bedarf des laufenden Forschungsprojektes nicht formulieren, welchem ein Instrument zur elektronischen Speicherung, Strukturierung, Suche und Sicherung seiner Daten fehlte.

Die für das Projekt installierte Datenbankanwendung ist nach der „Drei-Schichten-Architektur“ aufgebaut mit den folgenden Schichten:

- Präsentationsschicht (client tier) – Diese Benutzerschnittstelle, auch als „Front-End“ bezeichnet, ist für die Repräsentation der Daten und Benutzereingaben verantwortlich.
- Logikschicht (application-server tier, Business-schicht) – Sie beinhaltet alle Verarbeitungsmechanismen. Hier ist die Anwendungslogik vereint.
- Datenhaltungsschicht (data-server tier, „back end“) – Sie enthält die Datenbank und ist verantwortlich für das Speichern und Laden von Daten.

Als Vorteile dieser Trennung und somit der Benutzung eines DBS zur Datenablage sind vor allem folgende Aspekte zu nennen: Die Verwaltung der Daten kann effizient gestaltet werden, die Recherche innerhalb der Daten ist einfach, die Daten können kontrolliert gesichert werden, eine nutzerspezifische Bereitstellung und Aufbereitung der Daten kann erfolgen, die standardisierte Migration in andere DBS ist gewährleistet und grundlegende Voraussetzungen für die Aufbereitung und Auswertung (grafisch, statistisch, analytisch) sind gegeben.

Nutzung von Webtechniken

Ausgehend von der klaren und logischen Trennung der einzelnen Komponenten bei der kon-

¹ <https://de.wikipedia.org/wiki/Datenbank>, Datum des Abrufs am 30.12.2016.

zeptuellen Herangehensweise an die Entwicklung einer (für das Reichenau-Projekt) brauchbaren Lösung musste überlegt werden, welche Benutzerschnittstelle(n) umgesetzt werden sollen. Von Anfang an wurde die Anforderung für mehrere Schnittstellen definiert. Deren Funktionalitäten können wie folgt umrissen werden:

- die Dateneingabe und -verwaltung durch einen eingeschränkten Personenkreis sowie
- die Datenrecherche für die (Fach-)Öffentlichkeit.

Die logische Konsequenz für die Entwicklung der Datenspeicherung, auf die mehrere Schnittstellen zugreifen können, lag in einem Datenbanksystem. Bezüglich der Schnittstellentechnologie für die Benutzung boten sich vorhandene und etablierte client- und serverseitige Webtechniken an. Durch die Verwendung von Webtechniken entfällt die Entwicklung eines Anwendungsprogramms,

- da bereits auf existierende Web-Browserprogramme zurückgegriffen werden kann;
- ein großer Personenkreis unproblematisch Zugriff auf die Daten erhalten kann;
- von nahezu jedem Ort der Welt über das Internet auf die Datenbank zugegriffen werden kann;
- nur geringer bis gar kein Wartungsaufwand der Anwendung nötig ist;
- die langfristige Nutzung und Pflege des Datenbestandes möglich ist;
- eine betriebssystemübergreifende Anwendungsprogrammierung möglich ist.

Im Einzelnen sollten im Rahmen des Projekts folgende Ziele verfolgt werden:

- Datenerhebung und Datenermittlung sowie Bereitstellung unterschiedlicher Daten aus der restauratorischen und naturwissenschaftlichen Praxis (Archiv-, Literatur- und Kartierungsdaten, Messergebnisse am Objekt, Probenentnahme, Aufbereitung und Analyse von Proben im Labor, Testreihen, etc.);
- Konzeption und Entwicklung von Informationslösungen zur nachhaltigen Bereitstellung und Nutzung von wissenschaftlichen Projektdaten auf der Grundlage von Datenbank- und Web-Technologien;
- Einsatz automatisierter Verfahren zur Datenaufbereitung und Gewinnung von Information aus Daten (Data Mining);

- Entwicklung von Strategien zur langfristigen Aufbewahrung wissenschaftlicher Daten (digitale Langzeitarchivierung);
- Transfer und Nutzung für die restauratorische Praxis (Nutzung der Daten für definierte Fragestellungen).

Anforderungen aus restauratorischer Sicht

Um die Web-Anwendung effektiv erstellen bzw. umsetzen zu können, wurden zuerst die Bedürfnisse der mit der Web-Anwendung arbeitenden Personen eruiert. Essenzielle Anforderungen, die auch als einfaches Pflichtenheft während der Entwicklung dienen, sind:

- eine einfache Handhabung seitens der TeilnehmerInnen des Projekts (oder eines Nachfolgeprojekts);
- die Daten sollen durch die Projektmitglieder gepflegt und erweitert werden, die über dementsprechende Nutzerrechte verfügen;
- eine gute Übersichtlichkeit, inklusive Hilfestellungen, soll gegeben sein, um z. B. Fehler schon bei der Dateneingabe zu verhindern;
- die Konsistenz, Authentizität und Integrität der Daten muss durch eine angemessene Dokumentation aller Vorgänge oder Veränderungen gewährleistet sein;
- die Eingabe verschiedener Datenformate (Zahlenwerte, beschreibende Erklärungen, Bilder, Dateien) muss ermöglicht werden;
- eine Möglichkeit der Angaben unterschiedlicher Quellen (Literatur oder Interview) zu jeder eingegebenen Information.

Zugangskontrolle

Vor dem direkten Zugriff auf die Dateneingabe und/oder -modifikation, die in den folgenden Kapiteln dokumentiert sind, steht die Eingabe eines Passwortes. Diese Zugangskontrolle ist zwingend notwendig, da der interne Bereich direkt über das Internet zugänglich ist und nicht alle Zugriff erhalten dürfen. Konzeptuell wurde eine einfache dreistufige Zugriffskontrolle umgesetzt. Abhängig vom verwendeten Passwort können Nutzer folgende Rechte erhalten: Leseberechtigung, Lese- und Schreibberechtigung für die Datenpflege oder Administration.

Beschreibung des Datenbestandes

Die gesammelten Informationen stammten vornehmlich aus restauratorischen Dokumentationen, aus veröffentlichten Artikeln, Diplom-, Fach- bzw. Semesterarbeiten, aus dem Reichenau-Archiv des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart (LAD), zahlreichen Messungen vor Ort während des DBU-Projektes und Untersuchungen an entnommenen Proben während des DBU-Projektes.

Im Rahmen des DBU-Projektes haben Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftler unterschiedlicher Disziplinen häufiger parallel zu unterschiedlichen Fragestellungen am Objekt gearbeitet. Dies hat uns dazu bewegt, ein für das laufende Projekt geltendes, von der üblichen restauratorischen Dokumentationsweise (Objekt/Bereich/Fundstelle) abweichendes Schema für Mess- und Probennummern einzuführen. Deshalb wurden die von der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart (MPA) durchgeführten Messungen und entnommenen Proben mit dem Präfix RCHMPA, die von der Firma Biophil durchgeführten Messungen und untersuchten Proben mit dem Präfix RCHBIO versehen.

Die RCHMPA-Proben wurden weiter nach den jeweiligen Fragestellungen und BearbeiterInnen unterteilt:

- RCHMPA001-100, Pigmente und Bindemittel, Dr. Schönemann
- RCHMPA101-200, Salzbelastung, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA201-300, Staubproben, Dr. Frick / Dr. Reichert
- RCHMPA301-400, Klimamessungen, Reeb
- RCHMPA401-500, in-situ Raman-Messungen, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA501-600, in situ RFA-Messungen, Dr. Paz
- RCHMPA601-700, in situ NIR-Messungen, Dr. Bowitz, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA701-800, in situ NIR-Messungen, Dr. Bowitz, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA801-900, in-situ Raman-Messungen, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA901-1000, Staubproben, Dr. Frick / Dr. Reichert
- RCHMPA1001-1100, in-situ Raman-Messungen, Dr. Zöldföldi
- RCHMPA2001, Sorptionsmessung, Reeb / Ullmann.

Eingabe

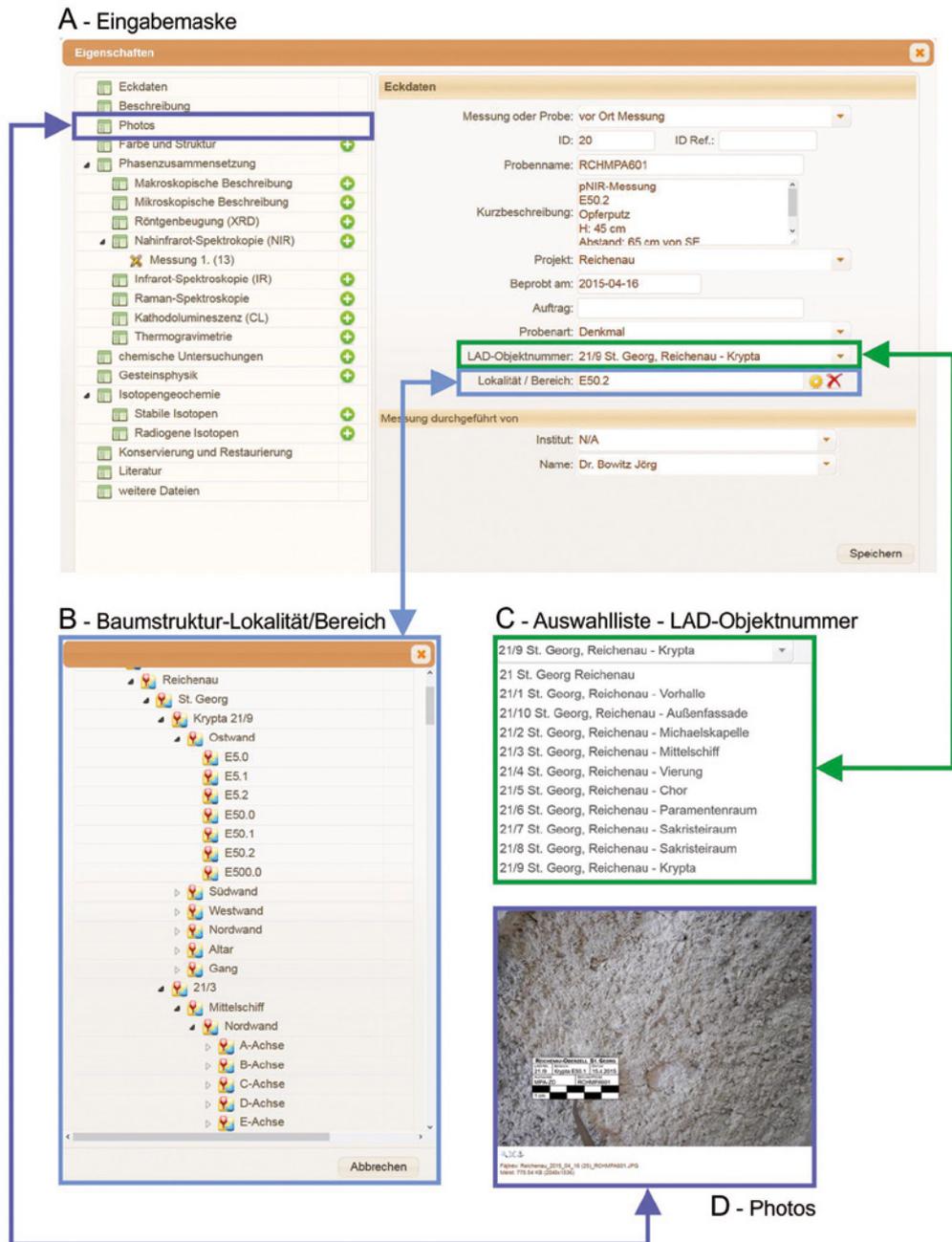
Im Folgenden werden durch einige Bildschirmfotos der Aufbau und Inhalt des Datenbanksystems vorgestellt.

Die Erfassung von Daten erfolgt über Erfassungsmasken (Abb. 1-A). Dabei sind Eingaben in einigen Feldern, wie Probenname, Projekt, Probenart, Denkmal und Bereich (Lokalität obligatorisch). Nur wenige der Eingaben erfolgen als Freitext (Probenname und Kurzbeschreibung). Viele Angaben – wie Projekt, Probenart, Denkmal – werden aus einer Auswahlliste mit Dropdown-Menü gewählt (Abb. 1-C). Der Angabe zur Lokalität/Bereich der Messung oder Probenentnahme wird aus einer hierarchisch aufgebauten Baumstruktur gewählt, in dem die Datenobjekte ausschließlich in einer Eltern-Kind-Beziehung zueinander stehen können (Abb. 1-B). Als Grundlage der Aufbau für die Baumstruktur diente die von Helmut F. Reichwald in den 1980er Jahren festgelegte Bereichseinteilung. Zu den Messpunkten oder Probeentnahmepunkten ist das Hinterlegen von Fotos oder Skizzen möglich.

Die Messungen werden ebenfalls über Eingabemasken dokumentiert: Obligatorisch ist hier die Angabe zur Art des Prüfgegenstandes: z. B. Messung auf der Oberfläche, die gesamte entnommene Probe, Teilprobe (wie z. B. Bindemittel von Mörtel), Körnung, etc. Weiterhin ist die Angabe von Prüfverfahren aus einer Auswahlliste verpflichtend. Datum der Messung und Name des Mitarbeiter, der die Messung durchgeführt hat sowie weitere Angaben können hinzugefügt werden.

Messergebnisse (z. B. in Form von Rohdaten der Messungen) und Auswertungen sollen von den jeweiligen Projektbeteiligten auch in die Datenbank über Eingabemasken eingepflegt werden (Abb. 2). Vorhandene Komponenten im Mörtel oder bauschädliche Salze werden aus einer Auswahlliste eingetragen. Man hat die Option, eine reine Aufzählung von Komponenten zu geben oder eine Aufzählung mit Wertung (+++ für Hauptkomponenten, ++ für NebenkompONENTEN, +- für Komponenten, die in Spuren vorhanden sind). Wenn das Prüfverfahren genauere Angaben zu Konzentration der Komponenten erlaubt, können hier auch prozentuale Zahlenangaben zu den jeweiligen Bestandteilen gegeben werden.

Abb. 1:
Eingabemaske für die
Eckdaten zu Messungen
oder Proben.



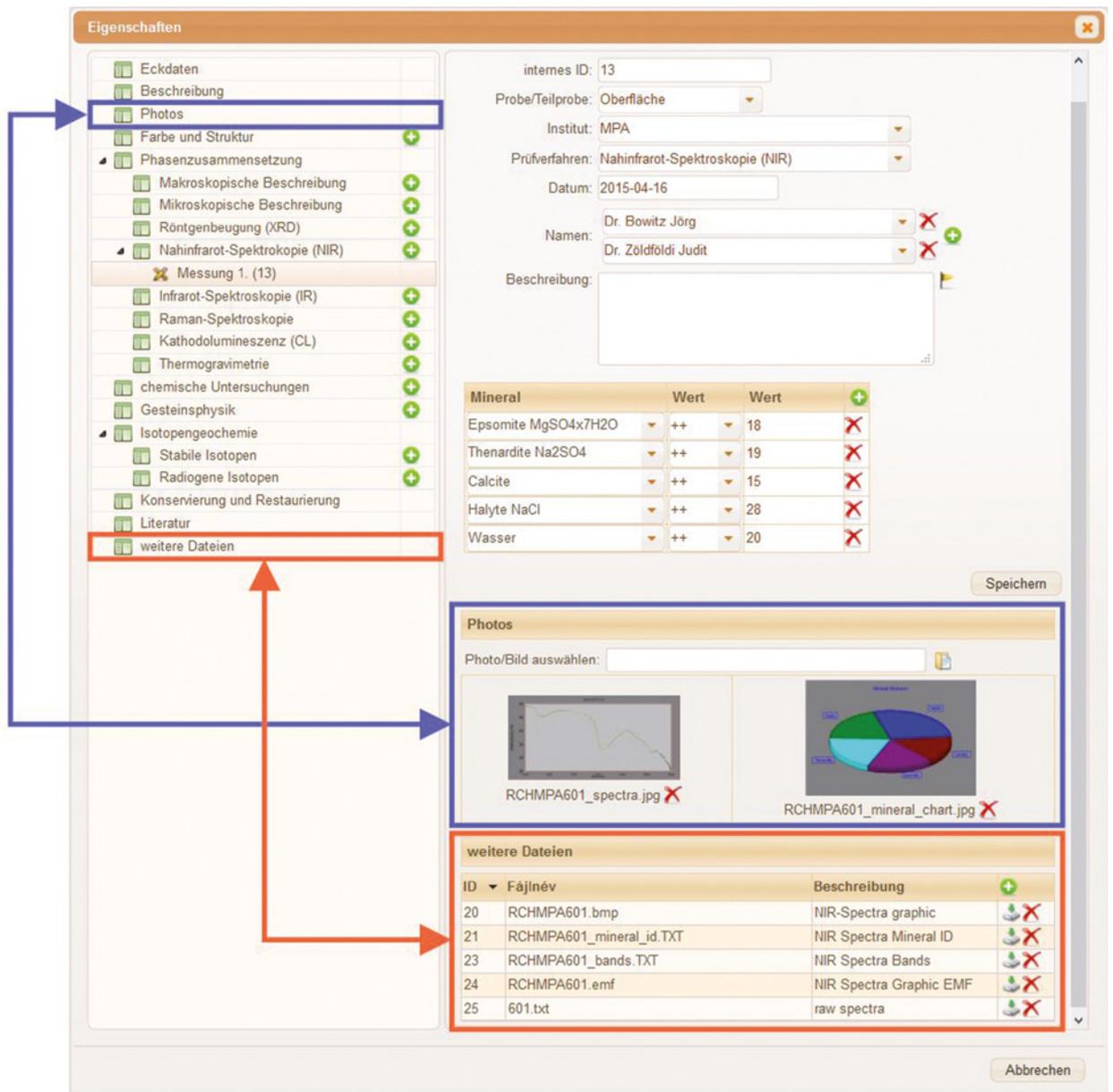
Auch hier kann man Bilder oder Skizzen den Messungen zuordnen bzw. Rohdaten oder Auswertungen in verschiedenen Dateiformaten hinzufügen (z. B. txt-, xls-, doc-, jpg-, emf-, pdf-Dateien). Abhängig von dem Prüfverfahren sind die Eingabemasken unterschiedlich aufgebaut.

Einfache und erweiterte Suche

Nach erfolgreicher Eingabe der Daten besteht die Möglichkeit zu einer Schnellsuche nach verschiedenen Auswahlkriterien: z. B. eine Auflistung aller Messungen und entnommene Proben

aus einem Bereich. Andererseits kann vom Anwender eine erweiterte Suche durchgeführt werden. Suchergebnisse können gespeichert und exportiert werden.

Die grundlegenden Anforderungen für eine erweiterte Suche wurden im Hinblick auf unterschiedliche restauratorische Fragestellungen konzipiert. Die folgenden Beispiele sollen hierzu einen kleinen Einblick geben. So stellen sich beispielsweise eine Reihe von Fragen: Welche Pigmente und Bindemittel sind während zeitlich unterschiedlicher Bau- und Ausmalungsphasen eingesetzt worden? Von besonderem Interesse sind Antworten zu diesen Fragen für eine zu-



künftige Objektrestaurierung. Weiterhin gibt es verschiedenste physikalische Einflüsse, zum Beispiel aufsteigende oder hygroskopische Feuchte bzw. Salze und deren Konzentrationen im Mauerwerk, die einerseits Schlussfolgerungen zur Gefährdung der historischen Substanz ermöglichen, andererseits auch als Grundlage für die Klimasteuerung im Projekt dienen.

Ausblick

Auf Fortschritt und Veränderungen vorbereitet sein – das ist das Motto der vorliegenden Arbeit:

Die Lösungen des systematischen und nachhaltigen Managements der materialwissenschaftlichen Daten von St. Georg auf der Insel Reichenau bleiben jederzeit flexibel und werden stetig auf veränderte Gegebenheiten und Anforderungen angepasst.

Ziel ist es, alle vorhandene Informationen aus bisher nicht digitalisierten Aufschrieben, Protokollen, Dokumentationen, Laborbüchern, Analyseberichten, Maßnahmenprotokolle und weitere Informationen in das Datenbankmanagementsystem einzuarbeiten. Auch weitere Themenbereiche, wie z. B. mikrobiologische Untersuchungen sollen aufgenommen werden.

Abb. 2: Eingabemaske für Messparameter und Messergebnisse.



Abb. 1 a:
Nordwand, die Heilung
des Besessenen von Ger-
asa, Detail Streiflicht
(fokus GmbH Leipzig).

MATERIAL

Material und Erscheinungsbild: Alte und neue Erkenntnisse zu den Ausmalungen des 10. Jahrhunderts im Mittelschiff und in der Krypta

Dörthe Jakobs

Die Wandmalereien im Mittelschiff sowie dazu gehörige Malereifragmente in der Vierung (Palmettenfries), in den Seitenschiffen (Mäander Südseite) und im Chor (Fensterornamente) werden mit Argumenten bautechnischer, ikonographischer, stilistischer und maltechnischer Natur in der Forschung überwiegend in die zweite Hälfte des 10. Jahrhunderts datiert (Abb. 1).¹

Die Ausmalung der Krypta mit zwei Kreuzigungsszenen und adorierenden Heiligenfiguren an der Ostwand der Kryptahalle zeigt gegenüber den Wandmalereien im Mittelschiff eine reduzierte Farbpalette und folgt im Detail anderen formalen Merkmalen, aber auch hier überzeugen die Vergleiche mit den Handschriften der Ruod-

prechtgruppe hinsichtlich einer Datierung in das letzte Drittel des 10. Jahrhunderts.²

Das Wissen über Material, maltechnische Besonderheiten und das ursprüngliche Erscheinungsbild kann für kunsthistorische Vergleiche bedeutende Informationen liefern. Auch heute noch spielen technologische Besonderheiten eine nicht unwesentliche Rolle bei der Zuschreibung an einen Künstler oder bei der Einstufung von Fälschungen.

So stellt sich bei vielen Untersuchungen an Wandmalereien die Frage nach den verwendeten Pigmenten und Bindemitteln. Dabei ist uns bewusst, dass die Malereien Veränderungen durch verschiedenste Beeinträchtigungen in ihrer Ge-

Abb. 1 b:
Nordwand, die Heilung
des Besessenen von
Gerasa, 1988 (Keller jun.,
Reichenau).

- 1 Zuletzt Labusiak, Thomas: Die Ruodprechtgruppe der ottonischen Reichenauer Buchmalerei. Bildquellen – Ornamentik – stilgeschichtliche Voraussetzungen. Berlin 2009; hier bes.: Die Miniaturen im Kontext der ottonischen Wandmalerei des Bodenseegebietes, S. 100–113 und Exner, Matthias: Die ottonischen Wandmalereien der Reichenau. Aspekte ihrer chronologischen Stellung. In: Zeitschrift des Deutschen Vereins für Kunstwissenschaft 58, 2004, S. 93–115. Dagegen Koshi, Koichi: Die frühmittelalterlichen Wandmalereien der St. Georgskirche zu Oberzell auf der Bodenseeeinsel Reichenau. Berlin 1999 sowie Berschin, Walter (unter Mitarbeit von Ulrich Kuder): Reichenauer Wandmalerei 840–1120 (Reichenauer Texte und Bilder 15), Heidelberg 2012, S. 58–64 sehr sophisticated, was die Schlussfolgerungen aus den Befunden zu Oberzell (insbesondere zur Westapsis) angeht; vgl. hierzu bereits Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), 3 Bde., Stuttgart 1999, Bd. 1, S. 224, Anm. 351.
- 2 Auch hier zuletzt Labusiak 2009, S. 110–111 und ausführlich Exner, Matthias: Die Wandmalereien der Krypta von St. Georg in Oberzell auf der Reichenau. In: Zeitschrift für Kunstgeschichte, 58. Jg., Heft 2, 1995, S. 153–180.





Abb. 2 a, b:
Apostelgruppe aus der
Bildszene der Heilung des
Besessenen von Gerasa
im Auflicht und im UV-
Licht (LAD, Reichwald).

schichte erfahren haben, sodass jeder Versuch, sich ein Bild über das ursprüngliche Erscheinungsbild zu machen, mit einer der Kriminalistik vergleichbaren naturwissenschaftlichen, restaurierungswissenschaftlichen und kunsthistorischen Spurensuche zu vergleichen ist. Veränderungen von Pigmenten und Bindemittelabbau können sowohl die Folge von verschiedenen Schadquellen aus der Umgebung (Klima, Mikrobiologie, Salze) als auch anthropogener Natur sein. Nicht selten haben auch restauratorische Maßnahmen mit dem Einbringen von neuen Materialien zu Veränderungen der Materialität des Kunstwerkes geführt. Ganz zu schweigen davon, dass die Suche nach „ursprünglich“ verwendeten Materialien, insbesondere bei der Frage von Bindemitteln, zu einem besonders schwierigen Unterfangen wird.

Ein von der DBU gefördertes Forschungsprojekt ist der Frage von umweltbedingten Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien bereits vor nahezu zehn Jahren nachgegangen. Die Ergebnisse und die vorbildliche Publikation³ haben gezeigt, dass Erkenntnisse vor allem durch die Kombination von restauratorischen Fragestellungen mit der Systematik der natur-

wissenschaftlichen Analysen bis hin zu Laborversuchen zu den Ursachen von Umwandlungsprozessen gewonnen werden können. Aber auch in der interdisziplinären Herangehensweise haben wir noch nicht das gesamte Spektrum des Zusammenspiels der technischen Möglichkeiten ausgeschöpft, das in der Kombination und im Abgleich der verschiedenen Untersuchungsmöglichkeiten liegt, die sich keineswegs nur auf Materialproben am Objekt beschränken. Eine enge Verzahnung und der Abgleich von optischen und bildgebenden Untersuchungen mit zerstörungsfreien naturwissenschaftlichen Untersuchungsverfahren dürfte große Chancen auf dem Feld der Materialerkennung über Fluoreszenzen bieten, da die Materialien in Abhängigkeit der Anregungsenergien durch ultraviolettes Licht zu spezifischen Emissionen längerwelliger Strahlung führen. Eine besondere Rolle spielen hierbei u. a. gut dokumentierte Testplatten, wie sie vom Getty Conservation Institute aus der Sammlung von Leonetto Tintori, Florenz, genutzt wurden, um in einem groß angelegten Forschungsprojekt die organischen Bindemittel und Bindemittelkombinationen in der Wandmalerei systematisch zu untersuchen.⁴

3 Vgl. das DBU-Projekt „Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 24), Worms 2009.

4 Während sich das Arbeitsheft „Zerstörungsfreie Oberflächenuntersuchungsmethoden. Stand der Technik, Grenzen und Ausblicke“ (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 25), Worms

2010 überblicksartig verschiedenen zerstörungsfreien Untersuchungsverfahren, inklusive Bauwerksuntersuchungen nähert, verfolgt die Publikation des Getty Conservation Institute „Organic Materials in Wall Paintings“ ed. by Piqué, Francesca / Verri, Giovanni, Los Angeles 2015 den hier gemeinten Ansatz durch die Kombination der verschiedenen noninvasiven und invasiven Techniken und Verfahren zur Identifizierung organischer Materialien.

Damit wird aber auch deutlich, dass wir Fragen zu Materialien, deren ursprünglichem Erscheinungsbild, den zahlreichen Ursachen für Farbveränderungen und dem weitgehenden „Dunkel“ der Bindemittelanalysen in der Wandmalerei nur durch groß angelegte Forschungsprojekte beantworten können, die das Wissen aus den verschiedenen bisherigen internationalen Projekten miteinander kombinieren. Hierzu wäre einerseits eine umfangreiche Datenerfassung in Form einer Datenbank erforderlich und andererseits ein Abgleich und eine ständige Überprüfung von Daten während laufender Untersuchungen an Wandmalereien. Mit dem fortlaufenden Abgleich der Ergebnisse dürfte auch das Spektrum der Erfahrungswerte für bestimmte Phänomene hinsichtlich ihrer Bewertung aus restauratorischer Sicht einen enormen Zuwachs bekommen. Gemeint ist die Entschlüsselung von verschiedenen Fluoreszenzen bei Wandmalereien im ultravioletten Licht. Nur auf dem Wege einer systematischen Erfassung dieser und durch einen Abgleich mit anderen naturwissenschaftlichen Untersuchungsverfahren lassen sich Erkenntnisse zur Deutung der verschiedenen Fluoreszenzen von Pigmenten und Bindemitteln langfristig gewinnen (Abb. 2 a, b).

Im Rahmen des Reichenauer DBU-Projektes standen ebenfalls vermehrt Fragen im Vordergrund, die sich mit der Materialität der Wandmalereien und deren Trägern sowie den möglichen Ursachen für Veränderungen aus Umwelteinflüssen, wie Feuchte, Klima, Mikrobiologie, Salzen u. a. befasste.

Erstes Ziel war es, die Fragestellungen und die Ergebnisse der Analysen der 1980er Jahre zusammenzufassen, um sie zukünftig einer Neubewertung unterziehen zu können. Hierzu wurden sämtliche Probeentnahmen (darunter fallen auch zahlreiche Ergänzungsmaterialien, Kittungen etc.) in die neuen Übersichtspläne der Nord- und Südwand eingetragen (vgl. Pläne im Anhang), um einen schnellen Zugriff auf die Bereiche, die Beschreibungen der Probeentnahmen in den Dokumenten und den seinerzeit von Hermann Kühn ausgewerteten Proben zu haben.⁵

Parallel wurden alle Probeentnahmen mit Fragestellungen und analytischen Ergebnissen in einer Übersichtstabelle erfasst. Die Ergänzung der tabellarischen Auflistung mit den Fotos der jeweiligen Probeentnahmestelle und Querschliffe der 1980er Jahre steht noch aus.

Einzelne Probeentnahmen, die im Landesamt für Denkmalpflege archiviert sind, wurden einer erneuten naturwissenschaftlichen Auswertung (Lichtmikroskopie, REM/EDX, Raman-Spektroskopie u. a.) unterzogen. Hinzu kamen ergänzende zerstörungsfreie Messungen mittels Raman-Spektroskopie und Röntgenfluoreszenzanalysen in situ. Für weitere Auswertungen sind zukünftig auch die von Helmut F. Reichwald vor über 30 Jahren angelegten und gut dokumentierten Testplatten zur Maltechnik von Reichenau-Oberzell St. Georg mit einzubeziehen (vgl. Abb. 10).⁶ Leider lagen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung noch nicht alle Auswertungen vor, sodass auf eine in Planung befindliche, gesonderte Publikation verwiesen werden muss. Die Beiträge zu den Themen: „Was darf man von Materialanalysen aus restauratorischer Sicht erwarten“ (Roland Lenz) sowie zu den Röntgenfluoreszenzanalysen, weiteren Untersuchungen mittels Rasterelektronenmikroskopie mit energiedisperser Röntgenanalyse (REM/EDX) und der Raman-Spektroskopie an den Wandmalereien im Mittelschiff (Boaz Paz, Anna Schönemann und Judit Zöldföldi) konnten bis zur Drucklegung nicht fertiggestellt werden. Diese Lücke zur Einführung in die Untersuchungsmethoden und zur Auslotung ihrer Möglichkeiten und Grenzen kann der hier vorliegende Beitrag nicht schließen.

Die folgenden Ausführungen können sich nur auf zusammenfassende Angaben zu den Analyseergebnissen der 1980er Jahre und auf einige neue Erkenntnisse beschränken, die sich aus den im Projektverlauf getätigten Analysen bis zum Zeitpunkt der Drucklegung des Tagungsbandes ergeben haben.⁷

5 Die Übertragung sämtlicher Daten sowohl in die Pläne als auch tabellarisch ist Ulrike Piper-Wölbart zu verdanken, die in den 1980er Jahren in St. Georg an der Restaurierung beteiligt war. Zur Dokumentation und den Plänen vgl. den Beitrag von Sacher, Siedler und Vetter in diesem Band.

6 Reichwald, Helmut F.: Die ottonischen Monumentalmalereien an den Hochschiffwänden in der St. Georgskirche Oberzell auf der Insel Reichenau. Veränderungen – Bestand – Maltechnik. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 2. Jg., Heft 1, 1988, S. 107–170, zur Maltechnik S. 159–164.

7 Siehe hierzu auch den Beitrag von Anna Schönemann und Boaz Paz.

Die Wandmalereien im Mittelschiff

Die naturwissenschaftlichen Analysen der 1980er Jahre im Mittelschiff wurden von Kühn durchgeführt, wobei der Naturwissenschaftler während der Untersuchungen immer auch am Objekt eingebunden wurde. D. h. zunächst erfolgte die Bündelung der Fragestellungen seitens der Restauratoren, der sich die Konsultierung des Naturwissenschaftlers vor Ort anschloss. Die Untersuchungen von Probenmaterial erfolgten anhand von Querschliffen (Mikroaufnahmen) und durch Abtragen von Schichten unter dem Stereomikroskop. Die Analyse von Pigmenten und Bindemitteln nahm Kühn laut seinen Berichten mithilfe physikalischer Methoden (Emissionsspektralanalyse, Debye-Scherrer-Aufnahmen u. a.) sowie mikrochemischer und mikroskopischer Verfahren vor.⁸

Nach den Untersuchungen der 1980er Jahre kann die Palette der im Mittelschiff verwendeten mittelalterlichen Pigmente wie folgt zusammengefasst werden:⁹ Neben Kalk (Weiß) und Pflanzenschwarz kamen vor allem die natürlich vorkommenden Farberden zum Einsatz, wie gelbes und rotes Eisenoxid. Daneben wurde Mennige nachgewiesen sowie die basischen Kupferpigmente

Malachit und Azurit. In einigen Proben analysierte Kühn Proteine als Bindemittel. Eine Herausforderung auch für die zukünftige Analytik liegt in der gesicherten Zuordnung von Bindemitteln der ersten Ausmalungsphase gegenüber den Behandlungen durch spätere Restaurierungen, u. a. mit nicht näher bekannten Fixiermitteln und kaseinhaltigen Übermalungen.

Die Malerei ist auf abgetrockneten Putz ausgeführt und kann als eine Kalkmalerei mit organischem Bindemittelzusatz angesprochen werden. In der mikroskopischen Auswertung stellte Kühn Unterschiede des weißen Farbmittels (Kalk) in Kristallform, Dichte und Transparenz fest, die er als Zusatz von Kalkgestein oder Marmor interpretierte, so bspw. an den Weißhöhlungen. In den weißen Gewändern hingegen (bspw. Apostel) scheint Bianco di San Giovanni, also gelöschter, getrockneter und dann verriebener Kalk mitverwendet worden zu sein. In den UV-Fluoreszenzaufnahmen (vgl. Abb. 2 a, b und Abb. 9 b S. 69) fällt auf, dass sowohl die weißen Gewandflächen als auch die Weißhöhlungen deutlich hell fluoreszieren. Ob dafür Zusätze wie Bianco di San Giovanni und Kalkstein oder aber Bindemittel verantwortlich sind, ist bisher unklar.

Bei den roten Farbmitteln konnten trotz der changierenden Palette von hellrot bis dunkelrot nur Eisenoxid und Mennige nachgewiesen werden, deren Farbnuancierungen durch Beimengungen von Holzkohle, Kalk oder gelbem Eisenoxid erreicht wurden.

Die Verfärbungen von Mennige durch Oxidation in Bleidioxid weisen in Oberzell eine Farbpalette von dunkelbraun-schwarz bis hellgrau auf und sind abhängig von den Beimischungen anderer Pigmente. Sämtliche Dächer der Architekturdarstellungen (Abb. 3) waren ehemals brillantrot und sind heute dunkelbraun-schwarz verfärbt. Folgt man den Analysen der 1980er Jahre müssen sie ehemals zudem eine differenzierte Gliederung und Modellierung aufgewiesen haben, wie sich u. a. aus den Hinweisen zusätzlicher Bestandteile von Eisenoxidrot, Ruß und Calciumcarbonat auf der geschwärzten Mennigeschicht rekonstruieren ließ (Abb. 4 a, b).

Auch für die Modellierung der Inkarnate verwendeten die Maler Mennige (Abb. 5). Durch die Ausmischung von Mennige mit Calciumcarbonat

Abb. 3:
Architektur im rechten Teil der Bildszene der Heilung des Wassersüchtigen, das ehemals brillantrote Dach ist durch die Pigmentverfärbung von Mennige heute dunkelbraun-schwarz (Jakobs, LAD).



8 Zu allen Details vgl. Kühn, Hermann: Untersuchungsberichte 19982/1983, Reichenau-Archiv LAD, Ordner 7.2 und 7.3.

9 Jakobs 1999, Bd. 2, S. 493–501.

ist diese Modellierung heute grau verfärbt. Im Querschliff zeigt sich der Malschichtaufbau (Abb. 6 a, b). Auf dem Grundton aus gelbem Eisenoxid erfolgte der Auftrag von Mennige, ausgemischt mit Calciumcarbonat, darauf liegend die Weißhöhung. Die zuletzt aufgebrachte dunkelrote Kontur oder Binnenzeichnung ist in der Probe nicht erfasst. Was also heute wie graue Schattierungen in den Inkarnaten wirkt, muss man sich ehemals als hellrote Modellierungen vorstellen, die im Zusammenspiel von gelbem Grundton, dunkelroter Kontur, einer grünen Schattierung (in den Gesichtern) und den virtuos gezeichneten Weißhöhlungen eine beeindruckende Gesamtwirkung erzielt haben müssen. Ein weiteres Beispiel für die Farbveränderung von Mennige ist die Binnenzeichnung des roten Mantels Christi (Abb. 7 a). Die fächerartigen Linien, u. a. in der Armbeuge, zeigen eine heute bläulich verschwärzte Farbigekeit. Für die Binnenzeichnung wurde bisher eine Mischung aus Mennige, Calciumcarbonat, geringen Anteilen von Eisenoxid und einzelnen Holzkohleteilchen nachgewiesen, während es sich bei der dunkelroten Grundfläche der Tunika um ein natürlich vorkommendes, rotes Eisenoxid (Hämatit) handelt.¹⁰ In der Röntgenfluoreszenzanalyse konnte Bleioxid, Eisenoxid und Calcium erfasst werden, die Analyse einer nun entnommenen Probe zum Abgleich mit den bisherigen Untersuchungen und ggf. zur Klärung des Bindemittels steht aus.¹¹ Demnach hat man sich die dunkelrote Tunika bzw. den Umhang Christi, die Bekleidung wechselt mit und teils auch innerhalb der Bildszenen, mit ehemals leuchtend orangefarbenen Binnenzeichnungen vorzustellen. In optischer Umkehrung muss man sich bspw. das Gewand der vor Christus niederknienenden weiblichen Figur in der Bildszenen der Auferweckung des Lazarus vorstellen. Hier brillierte die gesamte Gewandfläche ehemals in Mennigerot, während sich die Binnenzeichnungen mit einer Ausmischung von Hämatit, rotem Ocker und Holzkohle dunkel absetzte.

Bei fast allen in St. Georg auftretenden gelben Farbflächen konnte in den Untersuchungen der 1980er Jahre nur gelber Ocker analysiert werden. Überraschend dagegen die Ergebnisse der jetzigen Röntgenfluoreszenzanalysen, die Hinweise



Abb. 4 a:
Das Dach der Architektur in der Mitte der Bildszenen „Auferweckung von Jairi Töchterlein“ (aus Bildplan fokus GmbH, Leipzig).



Abb. 4 b:
Probeentnahme 1985 aus der Malschicht vom Dach in Abb. 4a (C 3.2.1/17, 0029, LAD, Archiv).

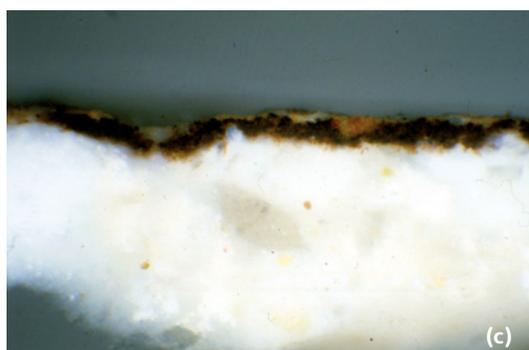


Abb. 4 c:
Querschliff der Probe von Abb. 4 a (C 3.2.1/17, 0029), Malschichtaufbau: Bleidioxidschicht (verschwärzte Mennige), darauf vereinzelt dünne rote Schicht mit Eisenoxidpigment, Calciumcarbonat, Ruß und Holzkohleteilchen (LAD Archiv, Kühn).

auf einen hohen Anteil an Arsen lieferten. Hier sind jedoch noch Nachuntersuchungen erforderlich, um eine Ausmischung beider Farbmittel zu verifizieren. Eine Mischung von Eisenoxidgelb und Auripigment, worauf Arsen hindeutet, würde die Brillanz des gelben Hintergrundes erklären. Abschließend sei in aller Kürze auf die blauen und grünen Farbmittel eingegangen, Azurit und Malachit, deren sichtbare Farbveränderungen auf hohe Luftfeuchten und dem Vorhandensein löslicher Chloride zurückzuführen sind.¹² Bildprägend für die Wandmalereien in St. Georg sind

10 Vgl. auch Jakobs 1999, Bd. 1, S. 183 und Bd. 2, S. 444 mit Abbildungen.

11 Anna Schönemann HTW Berlin.

12 Man ging bisher davon aus, dass es sich um natürliche Mineralpigmente handelt. Tatsächlich wäre das

nach Arnold, Bäbel / Ullrich, Detlef / Dobianer, Boris / Grunz, Rico: Historische Herstellung von Kupferpigmenten. In: Umweltbedingte Pigmentveränderungen 2009, S. 20–22, zu überprüfen.

Abb. 5:
Detail des Wassersüchtigen: die mit Mennige und Calciumcarbonat ausgemischten, ehemals hellroten Modellierungen an Rippen, Bauch und Gesicht wirken durch die Verfärbung der Mennige heute grau (LAD, Jakobs).

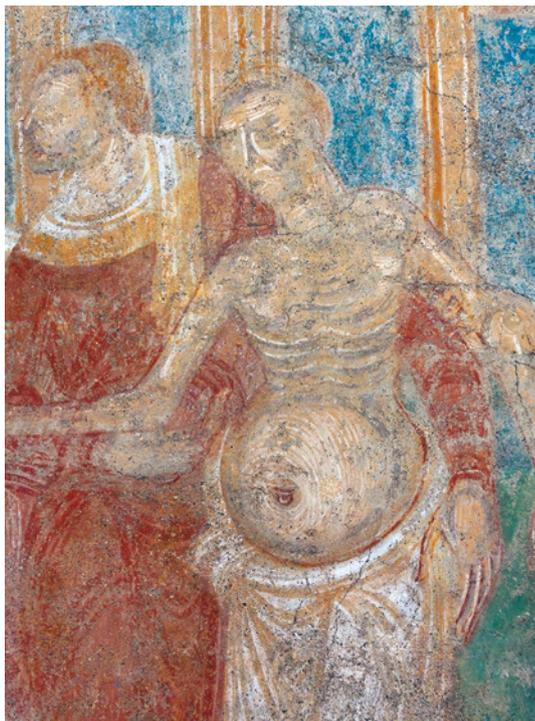


Abb. 6 a:
Probeentnahme 1985 am Fuß eines Apostels aus der Bildszene der Auferweckung von Jairi Töchterlein (C 3.2.1/13, 0028, LAD, Archiv).

Abb. 6 b:
Querschliff der Probe von Abb. 6 a (C 3.2.1/13, 0028), Malschichtaufbau: Inkarnat gelb, Modellierung Mennige (Bleioxid) mit Calciumcarbonat und Weißhöhung (LAD Archiv, Kühn).



die großen Flächen der grünen und blauen Hintergründe in den Bildszenen. Für beide Farben sind Untermalungen in Form einer sogenannten „Veneda“ vorhanden, die sich aus Holzkohleteilchen, Calciumcarbonat und Ruß, zusammensetzt (Abb. 8 a–9).¹³ Geringe Beimengungen von roten und gelben Ockerpigmenten können auf Verunreinigungen zurückzuführen sein.

Als grüne Farbe wurde für die erste Ausmalung des Mittelschiffs bisher ausschließlich Malachit, ein basisches Kupfercarbonat, nachgewiesen.

¹³ Vgl. Knoepfli, Albert / Emmenegger, Oskar / Koller, Manfred / Meyer, André: Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken, Bd. 2, Wandmalerei, Mosaik, Stuttgart 1990, S. 90–92.

Dies fand Verwendung für die Hintergründe und für die grüne Binnenzeichnung gelber Gewänder sowie für die Wolken im Bereich der Windgeister in der Bildszene der Beruhigung des Sturms auf dem See Genezareth. Vermutlich fand Malachit auch Verwendung für die Schattierungen in den Inkarnaten der Gesichter, die sich in den gut erhaltenen Bereichen sehr markant abzeichnet. Wo diese Modellierung nicht erhalten ist, zeichnet sie sich in der UV-Fluoreszenz als dunkle, „gelöschte“ Partie ab (vgl. Abb. 2 a, b und Abb. 9 b S. 69).

Als blaues Farbmittel wurde für die Hintergründe und für die Binnenzeichnung u. a. weißer Gewänder Azurit analysiert. Für die Verfärbung von blauen Flächen nach grün ist eine chemische Umwandlung von Azurit in Paratacamit verantwortlich. Kühn hat hier in den 1980er Jahren einen erhöhten Anteil von Chloriden bis in tiefer gelegene Schichten nachgewiesen.¹⁴ Auch bei Malachit waren in einzelnen Proben die gleichen Umwandlungsmechanismen zu Paratacamit, einem basischen Kupferchlorid, nachzuweisen. Für die ebenfalls vorkommenden Verschwärzungen von Azurit wies Kühn seinerzeit Kupfer-I- und Kupfer-II-oxide nach, eine Pigmentumwandlung, die ebenfalls mit löslichen Chloriden einhergehen soll.

Einen wichtigen Aspekt zur Verarbeitung der nicht alkalibeständigen Pigmente lieferte die von Helmut F. Reichwald im Zuge der maltechnischen Untersuchungen angelegte Musterplatte (Abb. 10).¹⁵ Neben den Experimenten mit Bindemitteln ging es um den Nachweis, dass sich

¹⁴ Vgl. hierzu auch Schlütter, Frank / Ziemann, Martin / Laue, Stefan / Schlütter, Frank / Hahn, Oliver: Veränderungen an Kupferpigmenten. In: Umweltbedingte Pigmentveränderungen 2009, S. 55–64.
¹⁵ Reichwald 1988, S. 160–163.



Abb. 7 a:
Christusfigur aus der
Bildszene der Heilung des
Besessenen von Gerasa
(LAD, Jakobs).

Abb. 7 b:
Faltenwurf des Mantels
in der rechten Armbeuge
Christ aus Abb. 7a: roter
Grundton des Mantels
(Eisenoxidrot) und Blei-
dioxid enthaltende Bin-
nenzeichnung, ehemals
vermutlich brillant rote
Binnenzeichnung (LAD,
Jakobs).

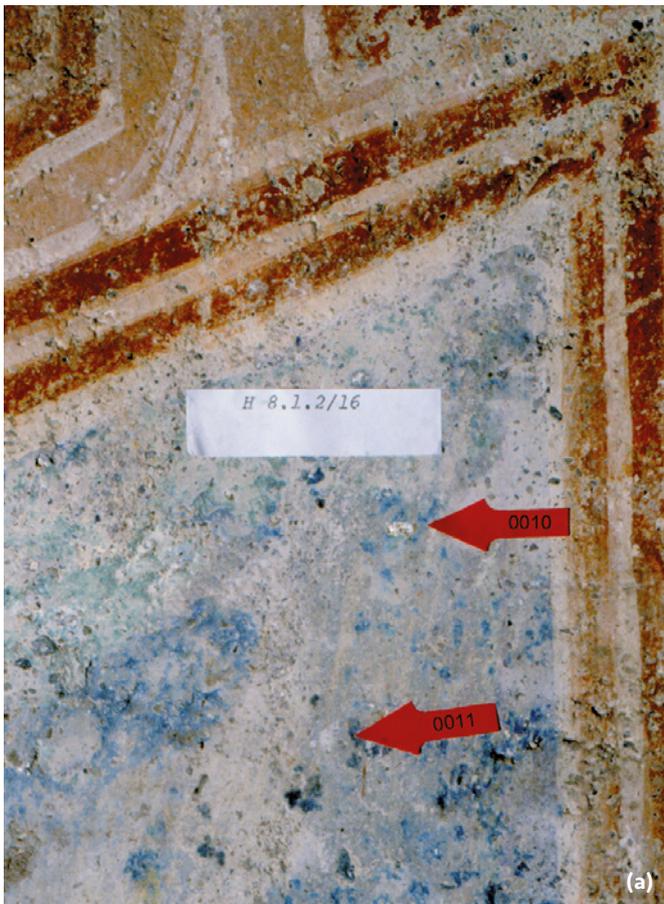
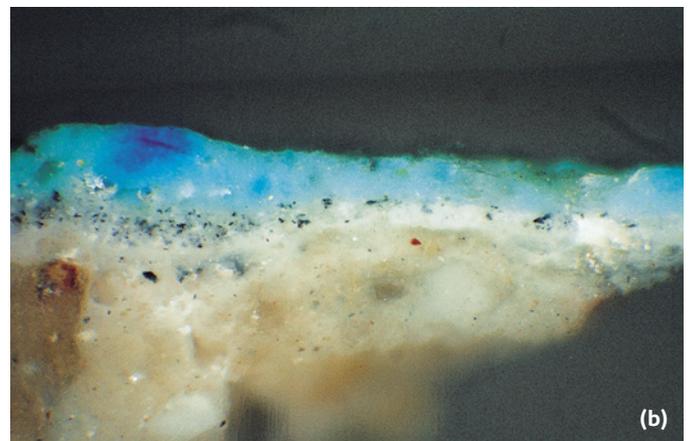


Abb. 8 a:
Blauer Hintergrund in der
Bildszene der Heilung des
Blindgeborenen
(H 8.1.2/16), Probeent-
nahme 1985 (0010, LAD,
Archiv).

Abb. 8 b:
Querschliff der Probe
0010 von Abb. 8a: eine
graue Untermalung
(Veneda) aus Calcium-
carbonat, Ruß und Holz-
kohle liegt unter einer
Azuritschicht (LAD
Archiv, Kühn).



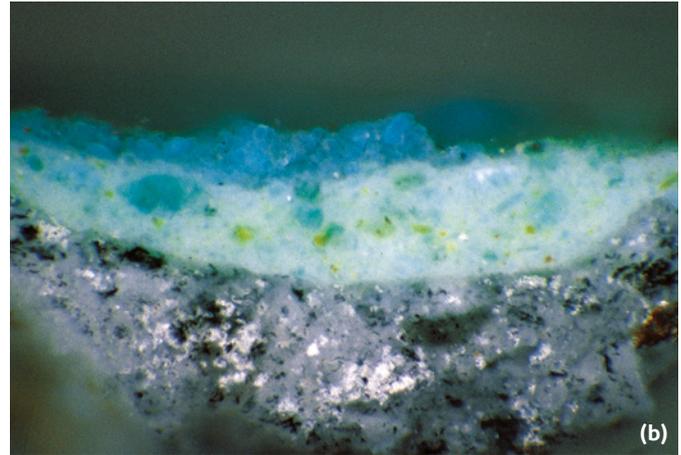


Abb. 9 a:
Grüner Hintergrund in
der Bildszene der Auf-
erweckung von Jairi Töch-
terlein (C 3.2.1/13), Probe-
entnahme 1985 (0025
LAD Archiv).

Abb. 9 b:
Querschliff der Probe
0025 von Abb. 9 a: eine
graue Unterma-
lung (Veneda) aus Calcium-
carbonat, Ruß und Holz-
kohle liegt unter einer
Schicht aus basischem
Kupfercarbonat (Mala-
chit mit geringen Men-
gen Azurit), geringen
Mengen basischem Kup-
ferchlorid (Paratacamit)
sowie Eisenoxid und
Quarz, darauf eine grob-
körnigere Schicht Mala-
chit, wiederum mit gerin-
gen Mengen von Azurit
und Paratacamit (LAD
Archiv, Kühn).

Malachit und Azurit sowie Mennige bei freska-
lem Auftrag binnen weniger Stunden bis nach
schwarz verfärbten.

Die Wandmalereien in der Krypta

In der Krypta von St. Georg befinden sich auf der
Ostwand zwei Kreuzigungsdarstellungen mit
adorierenden Heiligen.¹⁶ In den 1980er Jahren
fanden hier optische Untersuchungen u. a. mit-
tels UV-Fluoreszenz statt (Abb. 11 a, b), wenige
von Kühn analysierte Proben behandelten vor-
rangig das Thema der 1968/1969 im Zuge der
Aufdeckung der Malereien punktuell aufge-
brachten Kunstharzfixierungen.

Spannend und sehr ergiebig waren die erneuten
Untersuchungen der Wandmalereien in der
Krypta. Wie im folgenden Beitrag von Anna
Schönemann und Boaz Paz aus naturwissen-
schaftlicher Sicht ausgeführt, konnte u. a. die
Verwendung eines arsenhaltigen Pigmentes
nachgewiesen werden, das bisher nicht im Fokus
der in St. Georg verwendeten mittelalterlichen
Pigmentpalette war. Das zunächst in den Röntgen-
fluoreszenzanalysen ermittelte Arsen und
dann aufgrund der Bedeutung des Befundes
durch eine Mikroprobe in der Röntgenbeugung
(EDX) analysierte Arsensulfid lässt auf ein Auri-
pigment schließen, auch Realgar oder Königs-
gelb genannt, einer brillant goldgelben Farb-
igkeit. Dabei handelt es sich um ein künstliches
Mineralpigment, das seit dem Altertum bekannt
ist.¹⁷ Arsen konnte im Hintergrund beider Kreu-
zigungen, d. h. im Fond der Kreuzbalken, nach-

gewiesen werden. Das ist umso erstaunlicher,
als dass optisch überhaupt keine Farbe mehr
erkennbar ist.

Ergänzend zu dem Nachweis von Arsen ergaben
sich auch neue Erkenntnisse zu der Rahmung der
Kreuzbalken. Winzige schwarze Partikel sind als
Verfärbung eines bleihaltigen Pigmentes und
damit als ein Oxidationsprodukt von Mennige,
also einem ursprünglich brillanten Rotton, zu
interpretieren. Die Kombination von einem
arsenhaltigen Pigment im Fond des Kreuzbal-
kens mit einer mennigefarbenen Umrahmung
lässt damit erstmals Rückschlüsse auf das ehe-
malige Erscheinungsbild der Kreuze zu, die bis-
her nicht möglich waren (Abb. 12). Das Auri-
pigment dürfte in seinem Aussehen einer Ver-
goldung des Kreuzes, vergleichbar mit den
Kreuzdarstellungen im Codex Egberti, sehr
nahegekommen sein und ist sicher auch als ein
Pigmentersatz für eine „gedachte“ Vergoldung
anzusehen. Diesem Bild aus dem Codex Egberti
entspricht auch das Ergebnis zu der ehemals
brillant-rotten Kreuzrahmung in Oberzell.

Nicht zu klären waren die unterschiedlich star-
ken Fluoreszenzen der Binnenfläche des Kreuz-
rahmens, der Innenlinie des Rahmens – sehr
deutlich ablesbar am oberen Querbalken des
Kreuzes – und am Lententuch sowohl in der
Modellierung als auch an den Weißhöhen
(vgl. Abb. 11 b). Hier wurden bisher keine Proben
genommen, auch im Hinblick auf die Weiterent-
wicklung von zerstörungsfreien Untersuchungs-
methoden.

Die bleihaltige Mennige, die im Kreuzrahmen
nachgewiesen wurde, wirkt im UV-Licht dunkel

16 Exner 1995, S. 153–180; zur Maltechnik Jakobs 1999,
S. 501–509.

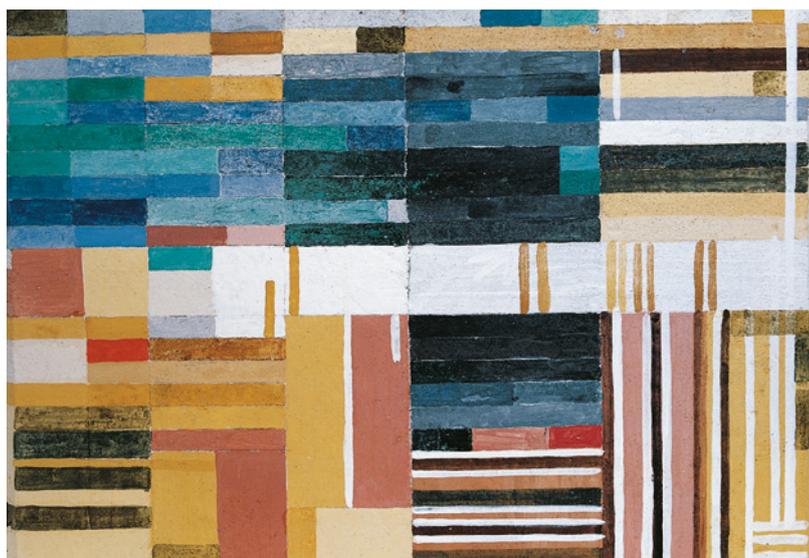
17 Vgl. Schramm, Hans-Peter / Hering, Bernd: Histori-
sche Malmaterialien und ihre Identifizierung. Berlin
1989, S. 39.

bzw. „gelöscht“, es weist aufgrund seines Blei-
 gehalts aus den eigenen Erfahrungen keine Flu-
 oreszenz auf.¹⁸ Ob es sich also um Bindemittel
 oder ein anderes, bisher nicht geklärtes Materi-
 al handelt, muss einstweilen offen bleiben.

Es wäre es wünschenswert, den bisher nur an-
 satzweise geklärten materialtechnischen Beson-
 derheiten des sich farblich verändernden bzw.
 abbauenden Arsensulfids in einer gesonderten
 Studie nachzugehen.

Die aus den naturwissenschaftlichen Unter-
 suchungen resultierenden Erkenntnisse bezüg-
 lich der Verwendung von Realgar/Auripigment
 in der Krypta zeigen, dass optisch nicht erken-
 bare maltechnische Besonderheiten kunsthisto-
 risch von hoher Relevanz sein können mit Folgen
 für die ikonographische Interpretation und mit-
 unter auch für die Datierung. Erst eine interdis-
 ziplinäre Herangehensweise vermag hoch-
 komplexe materialtechnische Zusammenhänge
 zu entschlüsseln. Die Kombination verschiede-

18 Dagegen die Interpretation von Burger, Hans: Farb-
 veränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien
 in Brandenburg. In: Umweltbedingte Pigmentverän-
 derungen 2009, S. 11-16, hier S. 13, Abb. 4 a und b;
 wahrscheinlicher scheint, dass die Fluoreszenz auf
 ein Bindemittel oder eine Lasur bspw. Krapplack, zu-
 rückzuführen ist.

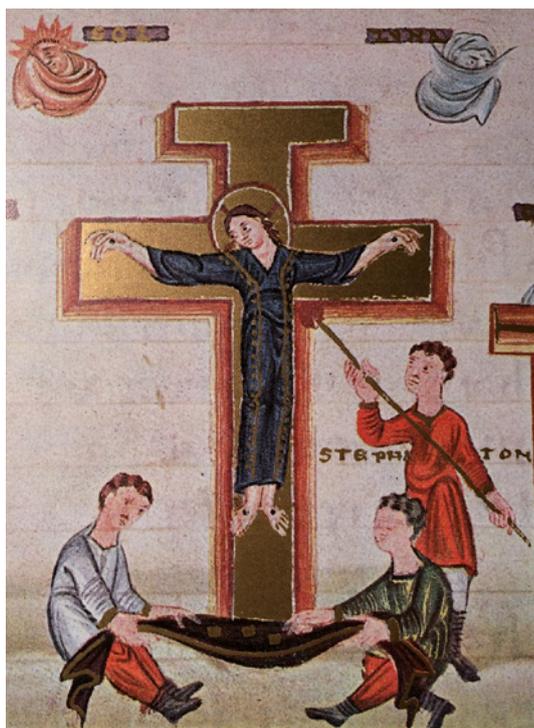


[oben] Abb. 10:
 Testplatte mit Versuchs-
 reihen zur Maltechnik,
 Malschichtauftrag fres-
 kal und al secco mit und
 ohne Bindemittel, bei
 freskalem Auftrag von
 Azurit und Malachit
 stellten sich Verschwär-
 zungen binnen weniger
 Stunden ein (LAD,
 Reichwald).

[unten] Abb. 11 a, b:
 Krypta, Kreuzigung im südlichen Bereich der Ostwand
 im Auflicht 1990 (a) und in der UV-Fluoreszenz (b).
 Deutlich erkennbar der stark fluoreszierende, ehemals
 mennigerote Rahmen des Kreuzes (LAD, Reichwald).
 Ob die Fluoreszenz auf ein Bindemittel hinweist,
 konnte bisher nicht geklärt werden. Die ehemals vor-
 handene Mennige ist in weiten Teilen verloren, es sind
 nur wenige geschwärzte Partikel in situ verblieben.



Abb. 12:
Fol. 85v aus dem Codex
Egberti, Kreuzabnahme.
Das vergoldete Kreuz mit
roter Rahmung vermag
eine Vorstellung vom
ursprünglichen Erschei-
nungsbild des Kreuzes in
der Krypta von St. Georg
zu vermitteln (Reproduk-
tion aus Teilfaksimile des
Codex Egberti, vgl.
Literatur).



ner naturwissenschaftlicher Untersuchungsverfahren mit den Kompetenzen der Restaurierungs- und Kunstwissenschaften liefert uns einen entscheidenden Beitrag zum Verständnis der Wandmalereien. Dabei soll nicht unerwähnt bleiben, dass wir uns sehr wohl auch der zahlreichen nicht gelösten Fragen bewusst sind. In der Summe kann man davon ausgehen, dass unsere Kenntnisse von den verwendeten Materialien, den Malprozessen und dem ursprünglichen Erscheinungsbild trotz umfangreicher naturwissenschaftlicher, restauratorischer und kunsthistorischer Untersuchungen – und dies gilt sicher nicht nur für die Wandmalereien in St. Georg – immer noch sehr lückenhaft sind. Keineswegs können wir die Hände in den Schoß legen und glauben, wir hätten alle Fragen zu den mittelalterlichen Wandmalereien längst geklärt.

Literatur

- Arnold, Bärbel / Ullrich, Detlef / Dobianer, Borris / Grunz, Rico: Historische Herstellung von Kupferpigmenten. In: Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 24), Worms 2009, S. 20–22.
- Berschlin, Walter (unter Mitarbeit von Ulrich Kuder): Reichenauer Wandmalerei 840–1120 (Reichenauer Texte und Bilder 15), Heidelberg 2012, S. 58–64.
- Burger, Hans: Farbveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien in Brandenburg. In: Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 24), Worms 2009, S. 11–16.
- Codex Egberti. Teilfaksimile-Ausgabe des Ms. 24 der Stadtbibliothek Trier, Textband von Gunther Franz und Franz J. Ronig, Wiesbaden 1983 (Textband und Tafelband), fol. 83v, 84v, 85v.
- Exner, Matthias: Die Wandmalereien der Krypta von St. Georg in Oberzell auf der Reichenau. In: Zeitschrift für Kunstgeschichte, 58. Jg., Heft 2, 1995, S. 153–180.
- Exner, Matthias: Die ottonischen Wandmalereien der Reichenau. Aspekte ihrer chronologischen Stellung. In: Zeitschrift des Deutschen Vereins für Kunstwissenschaft 58, 2004, S. 93–115.
- Jakobs, Dörthe: Die Wandmalereien von St. Georg in Reichenau-Oberzell. Untersuchung – Dokumentation – Kontroversen. In: Exner, Matthias (Hrsg.): Wandmalerei des frühen Mittelalters. Bestand, Maltechnik, Konservierung (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XXIII), München 1998, S. 161–190.
- Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalpflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.
- Koshi, Koichi: Die frühmittelalterlichen Wandmalereien der St. Georgskirche zu Oberzell auf der Bodenseeinsel Reichenau, Berlin 1999, 2 Bde.
- Labusiak, Thomas: Die Ruodprechtgruppe der ottonischen Reichenauer Buchmalerei. Bildquellen – Ornamentik – stilgeschichtliche Voraussetzungen, Berlin 2009.
- Piqué, Francesca / Verri, Giovanni (Hrsg.): Organic Materials in Wall Paintings (The Getty Conservation Institute), Los Angeles 2015.
- Download: http://www.getty.edu/conservation/publications_resources/pdf_publications/pdf/omwp_report.pdf
- Reichwald, Helmut F.: Die ottonischen Monumentalmalereien an den Hochschiffwänden in der St. Georgskirche Oberzell auf der Insel Reichenau. Veränderungen – Bestand – Maltechnik. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 2. Jg., Heft 1, 1988, S. 107–170.
- Umweltbedingte Pigmentveränderungen an mittelalterlichen Wandmalereien (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 24), Worms 2009.
- Zerstörungsfreie Oberflächenuntersuchungsmethoden. Stand der Technik, Grenzen und Ausblicke (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 25), Worms 2010.

Pigmentanalytische Untersuchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf Reichenau

Anna Schönemann, Boaz Paz

In der Kirche St. Georg auf der Insel Reichenau (Oberzell) erfolgten Untersuchungen der Wandmalereien im Mittelschiff und in der Krypta (vgl. auch Jakobs 1999). In der Krypta sind mehrere Fragmente von freigelegter Wandmalerei vorhanden, die vergleichend betrachtet wurden. Für die Bearbeitung vor-Ort wurden optische und röntgenfluoreszenzanalytische Verfahren angewandt, die auf einer „zerstörungsfreien“ Arbeitsweise basierten, in dem Sinne, dass keine Probenentnahme erfolgte. Darauf aufbauend wurden an wenigen Stellen minimale Einzelproben entnommen, an welchen im Labor weiterführende Analysen durchgeführt wurden. Die Untersuchung wurde mit dem Ziel durchgeführt, detaillierte Informationen zum Zustand und zur Zusammensetzung der Wandmalerei zu erhalten. Durch die Ergebnisse wurden kunsttechnologische Fragen zur Verwendung von Pigmenten und Malmaterialien geklärt. Ein weiterer Schwerpunkt war die Analyse möglicher Pigmentveränderungen und anderer Schäden an den Wandmalereien. Dieser Aspekt wurde mit dem Ziel verfolgt, Schadensmechanismen und deren Ursachen zu klären und festzustellen, ob möglicherweise raumklimatische Faktoren einen Einfluss auf Veränderungsprozesse haben, die durch ein geeignetes Klimakonzept günstig beeinflusst werden können. Außerdem erfolgte die Untersuchung der Wandmalerei hinsichtlich historischer Restaurierungs- und Konservierungsmaterialien, um deren heutige Wirksamkeit auf die behandelte Wandmalerei einzuschätzen und mögliche ungünstige Auswirkungen auf die Malerei festzustellen.

Untersuchungsmethoden

Optische Untersuchung

Es erfolgte eine visuelle Beurteilung mit der Stereolupe an der gesamten Ostwand der Krypta, um charakteristische Bereiche festzustellen. Parallel wurden diese unter UV-Licht mit Hilfe der Reskolux Lampe (Wellenlänge 365 nm) durchgemustert. Außerdem wurde eine Fluoreszenzuntersuchung in den vier Wellenlängenbereichen violett, blau, blau/grün und grün mit den entsprechenden Crime lite-Lampen (Fa. Mason Vactron) durchgeführt, die eine schmale Bandbreite besitzen und bei denen – um nur die Fluoreszenzerscheinung auszuwerten – zur Betrachtung mit Langpass-Betrachtungsfiltren gearbeitet wird. Folgende Wellenlängenbereiche wurden verwendet und getestet: Violett 400–430 nm, Blau 430–470 nm, Blau/Grün 460–510 nm, Grün 500–550 nm. Auf der Basis der optischen Untersuchung wurden relevante Probestellen für die Röntgenfluoreszenzuntersuchung ausgewählt, die Vor-Ort gemessen wurden.

Portable Röntgenfluoreszenzanalyse (p-RFA)

Zur Bestimmung der verwendeten Pigmente, wurde eine qualitative Elementanalyse mit der zerstörungsfreien Methode der p-RFA durchgeführt (Abb. 1). Die analytischen Informationen stammen aus der Probenoberfläche bzw. aus den oberflächennahen Zonen.



sung des Detektors liegt für Mn-Ka bei ca. 150 eV. Mit der im Analysator eingebauten CCD-Kamera kann die analysierte Probenoberfläche während der Messung dokumentiert werden.

Rasterelektronenmikroskopie mit energiedisperser Röntgenanalyse (REM/EDX)

In wenigen Ausnahmefällen erfolgte eine gezielte Probeentnahme an repräsentativen Stellen auf der Grundlage der Ergebnisse der zerstörungsfreien Untersuchung. Nach der lichtmikroskopischen Auswertung wurden für diese Proben weitere instrumentelle Analyseverfahren herangezogen. Dazu gehörte die rasterelektronenmikroskopische Untersuchung mit energiedisperser Röntgenanalyse (REM/EDX) mit Hilfe eines ZEISS Evo LS 15 Gerätes unter Niedervakuumbedingungen, um Informationen zu enthaltenen Elementen und zur Elementverteilung zu erhalten (Raitzig).



Raman-spektroskopische Untersuchung

Die Raman-Messungen wurden mit einem Renishaw Raman-Mikroskop mit einer Anregungslaserwellenlänge von 785 nm durchgeführt und dienten der Identifizierung charakteristischer Verbindungen [Richter].

Untersuchungsergebnisse

Die untersuchten Wandmalereien liegen auf einem Kalkgrund. Für die einzelnen Farbbereiche wurden repräsentative Messpunkte ausgewählt, die durch Röntgenfluoreszenzanalyse gemessen wurden. Aufgrund der nachgewiesenen Elementzusammensetzung konnten in der Krypta Rückschlüsse auf die Verwendung folgender Pigmente gezogen werden: Calciumcarbonat, Gelbe und Rote Erdpigmente, kohlenstoffhaltige Schwarzpigmente. Schwärzungen durch Ruß können mit der Röntgenfluoreszenzanalyse nicht ermittelt werden. Aufgrund des hohen Calciumanteils aus dem Kalkgrund können keine Aussagen zum Einsatz von Beinschwarz getroffen werden (Phosphorpeak interferiert mit dem Escape-Peak des Calciums). An zwei Stellen der Krypta wurden Hinweise auf Pigmentveränderungen gefunden. Es handelte

Abb. 1:
Messung der Wandmalerei mit portablem Röntgenfluoreszenzgerät (LAD, Jakobs).

Abb. 2:
Krypta, Kruzifix, heller Fond; zwischen Lendentuch und Rahmen RFA-Messpunkt mit charakteristischem Arsengehalt und Probe-stelle der Mikroprobe (LAD, Jakobs).

Nach Anregung der Probe mit Röntgenstrahlung wird eine sekundäre, für das jeweilige Element charakteristische Röntgenfluoreszenzstrahlung, von den Atomen der Probe ausgesendet und mittels eines Halbleiter-Detektors aufgenommen. Aus der Anzahl und der Energie der detektierten Röntgen-Photonen kann der jeweilige Elementgehalt in der Probe bestimmt werden. Der portable Röntgenfluoreszenzanalysator NITON XL3t der Firma THERMO Fisher Scientific verfügt über einen Siliziumdrift-detektor und einer Röntgenröhre mit Silberanode (50 kV, 40 µA, 2 Watt). Elemente mit einer niedrigeren Ordnungszahl als Magnesium (wie z. B. Natrium, Kohlenstoff, Stickstoff etc.), können bei Messungen an Luft nicht detektiert werden. Die Auflö-

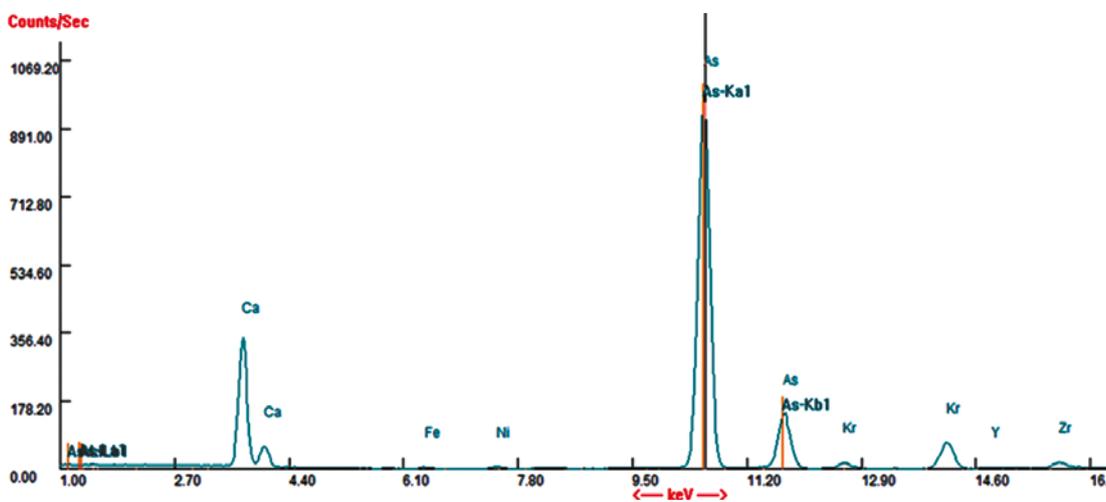
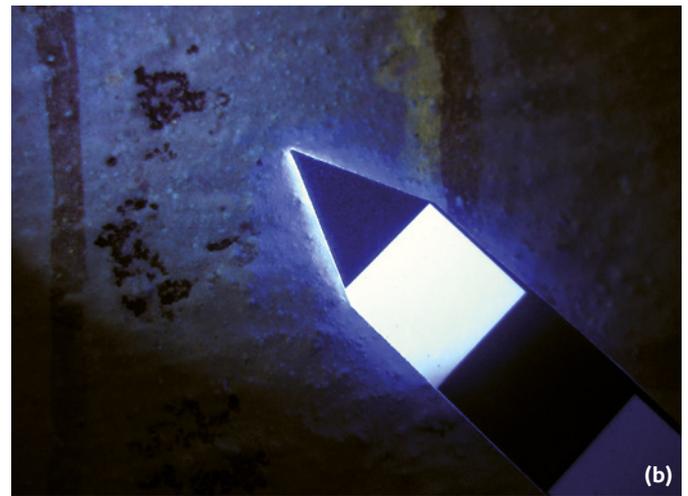
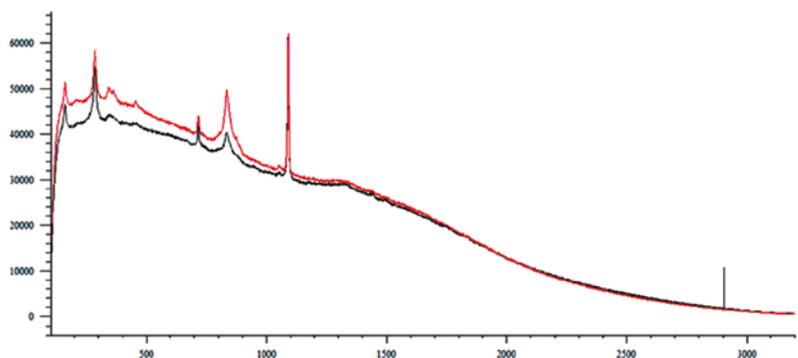
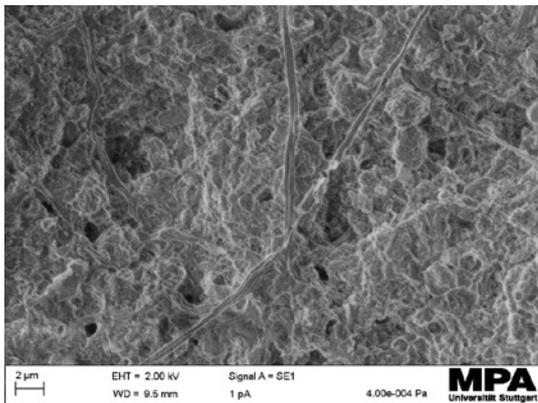
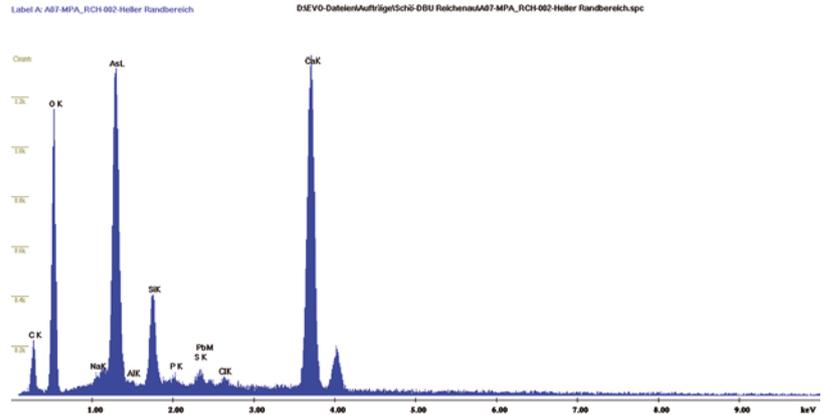
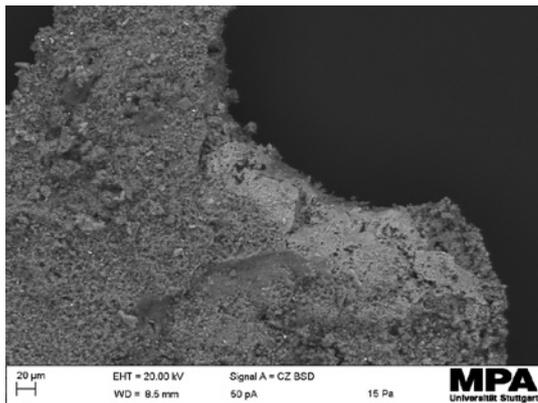


Abb. 3 a und b:
RFA-Messpunkte im
Detail am äußeren
Rahmen; Messdokumen-
tation unter Normallicht
(li) und UV-Licht (re)
(MPA, Schönemann).

Abb. 4:
RFA-Spektrum, heller
Fond des Kreuzes (MPA).

sich um kleine, fleckenartige Bereiche, die dunkel bis schwarz waren (Abb. 3 a, b). Bei der RFA-Analyse wurde ein charakteristischer Bleigehalt festgestellt, was als Hinweis auf die mögliche Verwendung von Mennige als Pigment gewertet, das einer Umwandlung unterlag, einem Phänomen, das in der Literatur häufig dargestellt wurde (Kühn, Aze). Daher wurde hier von einer Farbveränderung von Rot nach Schwarz ausgegangen. In weißlich-grauen Bereichen im Fond des Kreuzifixes (Abb. 2) wurde ein charakteristischer Arsengehalt nachgewiesen, der deutlich begrenzt in diesem Farbbereich vorlag, so dass angenommen wird, dass arsenhaltige Pigmente zum Einsatz kamen (West Fitzhugh 1997, Keune 2016, Trentelman 1996, Hensel 2014, Rötter 2007). Auch hier wird von einer Pigmentveränderung ausgegangen. Es wird angenommen, dass ursprünglich Arsensulfide als Pigmente eingesetzt wurden und je nach gewähltem Arsensulfid Farbigkeiten von gelb, orange oder rot denkbar wären. Die Untersuchung der Wand-

malereien wird exemplarisch an den weißlich-grauen Fondbereichen der Krypta vorgestellt. Durch die RF-Analyse wurde im hellen Fond des Kreuzifixes ein auffälliger Arsengehalt festgestellt (Abb. 4). Zur weiteren Untersuchung wurde eine Mikroprobe vom grauen Fond entnommen (Abb. 2), wobei in der lichtmikroskopischen Untersuchung keine gelben, orangefarbenen oder roten Pigmentpartikel gefunden wurden. Die weiterführende Analyse erfolgte durch rasterelektronenmikroskopische Untersuchung (REM/EDX). Im Rückstreuerelektronenbild bei der rasterelektronischen Untersuchung wurden helle und dunkle Bereiche gefunden (Abb. 5) und durch EDX-Analyse untersucht. In den hellen Bereichen des Rückstreuerelektronenbilds erhält man bei der EDX-Untersuchung ein Spektrum mit hohem Arsengehalt bei geringem Schwefelgehalt neben Calcium als weiterem Hauptbestandteil (Abb. 6). Der Schwefelgehalt variiert und korreliert nicht mit dem Arsengehalt.



[oben links] Abb. 5: REM/EDX, Rückstreuungsbild, heller Fond (MPA)

[oben rechts] Abb. 6: EDX-Spektrum, heller Fond, deutlicher Gehalt an Arsen (MPA)

[unten links] Abb. 7: REM/EDX, SE-Image, heller Fond (MPA)

[unten rechts] Abb. 8: Raman-Spektren, heller Fond, Laser: 785 nm, an zwei benachbarten Stellen

Im Sekundärelektronenbild zeigt sich eine Schicht mit auffälligen Strukturen, die auf mikrobiellen Befall hinweisen (Abb. 7). Raman-Messungen an der Probe belegen die Anwesenheit von Calcit (Abb. 8). Weiterhin liegt eine starke Fluoreszenz vor, was in Zusammenhang mit organischem Material im gemessenen oberflächlichen Bereich stehen kann oder auch mit Bestandteilen der Wandmalerei. Es wird davon ausgegangen, dass ursprünglich ein Arsensulfid vorlag, das als Pigment für den Fond Verwendung fand und abgebaut wurde. Ein solcher Abbauprozess würde mit einer Verringerung des Schwefelanteils in dem Farbbereich einhergehen und die geringen Schwefelgehalte in unserem Fall erklären. In der Literatur wurden verschiedene Umwandlungs- und Abbauprozesse beschrieben (Keune, Trentelman, Hensel, Rötter), jedoch findet sich kein Beispiel eines Arsensulfidabbaus an Wandmalereien. In Quellschriften findet sich bei Plinius der Hinweis auf die Unverträglichkeit von Auripigment auf feuchtem Putz (West Fitzhugh). Kühn erwähnt Reaktionen in wässrigen Bindemitteln mit blei- und kupferhaltigen Pigmenten (Kühn). Daraus

kann abgeleitet werden, dass Abbauprozesse von Arsensulfiden denkbar sind, die eher in wässrigen Bindemitteln und bei hohen Luftfeuchten zu erwarten sind. Diese Arbeitshypothese ist momentan Gegenstand unserer weiteren Forschungsaktivitäten. Geht man davon aus, dass ursprünglich ein Arsensulfid verwendet wurde, das einem Abbau unterlag, würde das bedeuten, dass sich die Farbigkeit grundsätzlich verändert hat. Für unser Beispiel hieße das, dass der Fond, der heute weißlich-grau erscheint, ursprünglich farbig war, bei der Verwendung von Auripigment gelb.

Schlussfolgerung

Durch die Kombination verschiedener Untersuchungsverfahren konnten grundsätzliche Informationen zu den verwendeten Pigmenten der Wandmalereien sowohl im Mittelschiff als auch in der Krypta erhalten werden. Die Untersuchung der Proben hat gezeigt, dass an zwei Farbbereichen von einer Pigmentumwandlung ausgegangen wird und ursprünglich eine andere Farbigkeit



Abb. 9:
Krypta, Kruzifix zeigt den
heutigen Zustand der
Farbigkeit: einem weiß-
lichen (grauen) Fond des
Kreuzes und einen hellen
Rahmen mit schwarzen
Spuren (LAD, Reichwald).

vermutet wird. Besonders wesentlich für die Kenntnis der originalen Farbigkeit war der Nachweis von Arsengehalten in den hellen Fondflächen des Kruzifixes in der Krypta, da hier auf eine Farbveränderung geschlossen werden konnte. Denkbar ist eine Umwandlung von Arsensulfiden zu Arsenoxiden, eine Überlegung, die in fortführenden Studien verifiziert werden soll. Diese naturwissenschaftlichen Ergebnisse wurden im kunsthistorischen Kontext gemeinsam interpretiert und führten zu einer neuen Bewertung der originalen Farbigkeit (vgl. Beitrag Jakobs).

Es wird angenommen, dass der jetzt weißlich-graue Fond ursprünglich gelb war. Eine weitere Pigmentumwandlung findet sich im Bereich des Kreuzes, wo heute leicht schwarze Partikel sichtbar sind. Es wird davon ausgegangen, dass ursprünglich Mennige verwendet wurde und dieser Bereich rot war. Die Schlussfolgerung aus den Analyseergebnissen auf eine mögliche veränder-

te Farbigkeit wurde nach kunsthistorischen Aspekten von Dörthe Jakobs bestätigt und von ihr freundlicherweise mit historischen Darstellungen aus dem Egbert Codex belegt. Zur Veranschaulichung der Farbigkeit ist der jetzige Zustand in Abbildung 9 dargestellt. Es wird angenommen, dass der Fond des Kreuzes, der heute weißlich-grau ist, ursprünglich gelb war. Im Vergleich dazu zeigt die Darstellung aus dem Egbert Codex in Abbildung 10 einen vergoldeten Fond, was dem Gelbton entsprechen würde. Bei dem anderen untersuchten Farbbereich handelte es sich um den Rahmen des Kreuzes, der vermutlich rot angelegt worden ist. Im Egbert Codex findet sich in der ausgewählten Darstellung das vergoldete Kreuz mit einer roten Umfassung. Die historische Darstellung gibt die Farbigkeit wieder, die durch die aktuell durchgeführte naturwissenschaftliche Pigmentanalytik nahegelegt wurde.

Literatur

Die REM/EDX-Messungen wurden von S. Raitzig, MPA Uni Stuttgart durchgeführt.

Die Raman-Messung erfolgte freundlicherweise durch M. Richter, Fa. Renishaw.

Aze, S. / Vallet, Jean-Marc / Detalle, V. / Grauby, Olivier / Baronnet, A.: Chromatic alterations of red lead pigments in artworks: a review, *Phase Transitions* 81, 2-3, 2008, S. 145-154.

Codex Egberti, Gunther Franz / Franz J. Ronig, Teilfaksimile-Ausgabe des Ms. 24 der Stadtbibliothek Trier, Wiesbaden 1983, hier fol. 85v; [https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Codex_Egberti#/media/File:Codex_Egberti_fol._85v.jpg, zugegriffen am 29.04.2016].

Hensel, Jessica: Toxic pigments in Historic Interiors, 5th International Architectural Paint Research conference in Stockholm, 2014, http://www.conservation-restoration-training.nl/wp-content/uploads/2015/03/Jessica_Hensel_Toxic-pigments-in-Historic-Interiors.pdf, accessed 5.01.2017.

Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalspflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.

Keune, Katrien / Mass, Jennifer / Mehta, Apurva / Church, Jonathan / Meirer, Florian: Analytical imaging studies of the migration of degraded orpiment, realgar, and emerald green pigments in historic paintings and related conservation issues, *Heri Sci* 4, 10, 2016, DOI: 10.1186/s40494-016-0078-1.

Kühn, Hermann: Farbmaterialeien, Pigmente und Bindemittel. In: *Reclams Handbuch der künstlerischen Techniken*, Hermann Kühn, Heinz Roosen-Runge, Rolf Straub, Manfred Koller, Bd. 1, Farbmittel, Buchmalerei, Tafel- und Wandmalerei, Stuttgart (1997), 7-54.

Rötter, Carolin / Grundmann, Günter / Richter, Mark / van Loon, Annelies / Keune, Katrien / Boersma, Annetje / Rapp, Klaus: Auripigment / Orpiment, The occurrence of artificial orpiment (dry process) in northern European painting and polychromy and evidence in historical sources, in: Schuller, Manfred, Emmerling, Erwin, Nerdinger, Winfried (ed), *Auripigment/Orpiment: Studien zu dem Mineral und den künstlichen Produkten*, München 2007.

Trentelman, Karen / Stodulski, Leon / Pavlosky, Mark: Characterization of pararealgar, and other light-induced transformation products from realgar by Raman microspectroscopy. *Anal Chem* 68, 1996, S. 1755-61.

West Fitzhugh, Elisabeth: Orpiment and realgar, in: *Artists' Pigments: A Handbook of their History and Characteristics*, Elisabeth West Fitzhugh, ed. New York [u. a.] : Oxford Univ. Press Vol. 3 (1997), S. 47-80

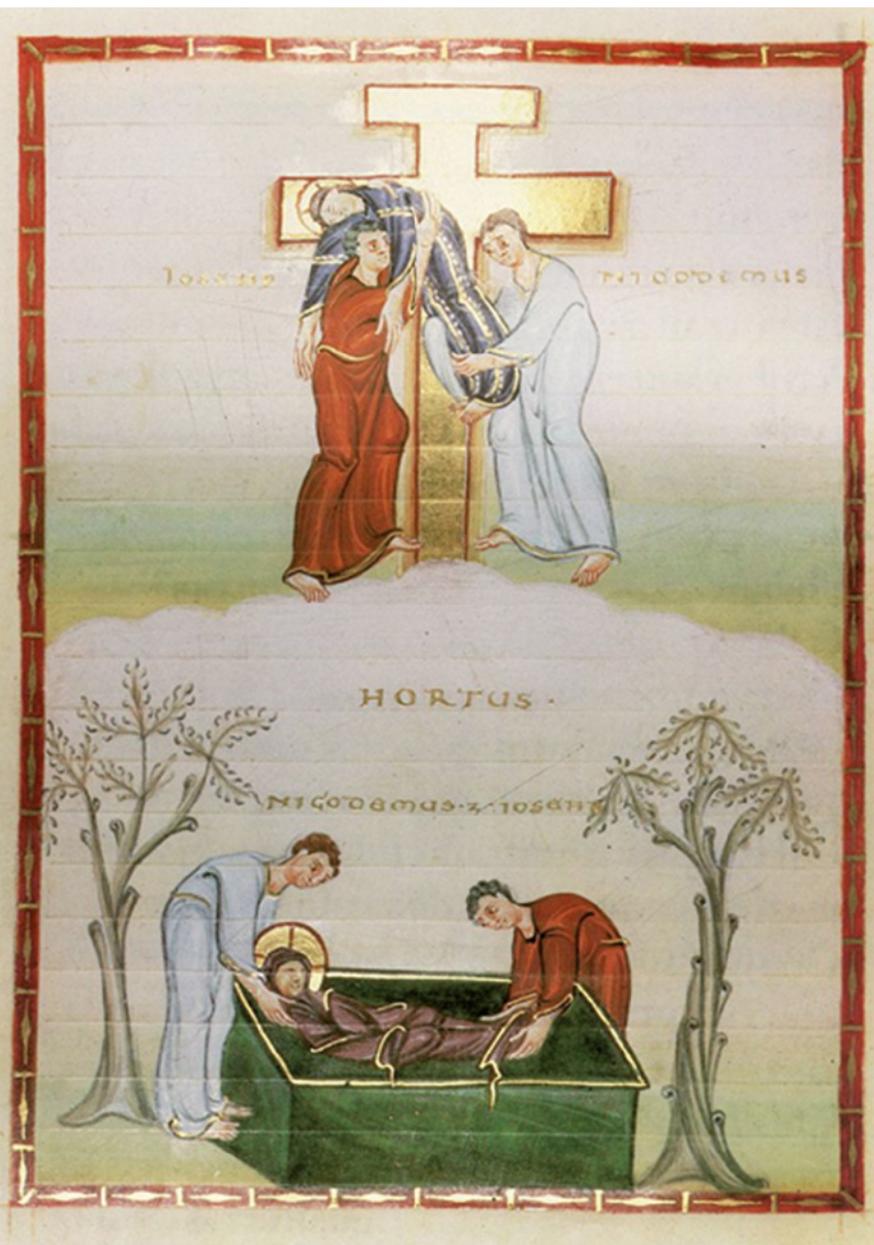


Abb. 10: Das Blatt 85v. mit der Kreuzabnahme aus dem Egbert Codex gibt eine Vorstellung von der Farbigkeit, die als ursprünglich angenommen wird: gelber Fond (für Gold in der Buchmalerei) und roter Rahmen (commons.wikimedia.org).

Zerstörungsfreie und minimalinvasive Untersuchungen zu Feuchte- und Salzbelastungen in der Krypta von St. Georg auf der Reichenau

Judit Zöldföldi

Einführung

Aus denkmalpflegerischer Sicht ist ein langfristiger Erhalt der Wandmalereien von St. Georg nur mit einem verantwortungsbewussten Umgang sowie mit umfassender Kenntnis der Parameter und Einflüsse möglich, die den Bestand gefährden. Dieser Erfolg ist maßgeblich von den Ergebnissen restauratorischer und materialtechnischer Voruntersuchungen sowie den Klimabedingungen, dem Feuchtehaushalt und der Salzbelastung der unmittelbar mit dem Bauwerk verbundenen Wandmalereien abhängig. Der Feuchtehaushalt von Fassungsflächen wird sowohl von Raum- und insbesondere Nahfeldklima als auch von den Feuchtelasten des Malgrundes bestimmt. Auch die etwaig vorhandenen, leichtlöslichen und bauschädlichen Salze spielen bei der Zerstörung von Wandmalereien eine entscheidende Rolle. Bei jeder salzgeschädigten bzw. salzbelasteten Wandmalerei stellt sich nicht nur aus diagnostischen sondern auch aus Gründen der Ursachenbehebung die Frage nach der Herkunft der Salze. Entsprechend kommt der im Gründungsmauerwerk vorhandenen Salzbelastung eine besondere Bedeutung zu, will man zur wirksamen Vermeidung weiterer Schimmelpilzbildungen die Raumluftverhältnisse in der Krypta deutlich verbessern. So herrschen bis heute in der Krypta eigentlich stets dauerfeuchte Verhältnisse, die eine Kristallisation bauschädlicher Salze nur in Zeitfenstern erlaubt, in denen vergleichsweise trockene Außenluftmassen dominieren. Würde im Sinne einer Vermeidung eines weiteren Schimmelpilzwachstums aber die Raumluftfeuchte im Zuge einer künftigen Raumklimastabilisierung abgesenkt, so könnten erstmals entsprechende Salzphasen auskristallisieren. Abhängig von Art

und Konzentration der Kationen und Anionen könnte dies zu komplexen Mischsalzen führen, die auch in verschiedenen Hydratstufen auftreten würden. Im Vorfeld der Umsetzung von Maßnahmen zur Raumluftverbesserung, z. B. mittels einer kontrollierten Raumbelüftung und Raumtemperierung in der Krypta musste eine sorgfältige Analyse der im Mauerwerk befindlichen Salze vorgenommen werden. Nur so lässt sich sicherstellen, dass die zur Vermeidung eines weiteren Schimmelwachstums in der Krypta, durchgeführten Raumklimaanpassungen keine sekundären Schädigungen in Form eines verstärkten Auskristallisierens der im Mauerwerk befindlichen Salze zur Folge hat.

Im aktuellen Forschungsvorhaben kamen ergänzend zur üblichen Laboranalytik – wie Ionenchromatographie zur Feststellung der Konzentrationen bauschädlicher Salze bzw. Röntgenbeugung zur Identifikation der Salzminerale – zerstörungsfreie in-situ-Methoden zum Einsatz. Diese erlauben eine möglichst schonende Untersuchung der empfindlichen Oberflächen und eine auf ein Minimum reduzierte Beprobung. Durch ein bedarfsgerechtes Monitoring können die vorhandenen Salzphasen zu unterschiedlichen Zeitpunkten qualitativ und halbquantitativ bestimmt werden und es lässt sich deren Zerstörungspotenzial einschätzen. Die Anwendung unterschiedlicher zerstörungsfreier und zerstörungssarmer Analyseverfahren lieferte komplementäre Ergebnisse und erlaubte, möglichst viel an analytischer Information zu den Materialeigenschaften zu gewinnen. Diese Kenntnisse konnten wiederum bei der Ausarbeitung der Parameter eines Klimakorridors berücksichtigt werden und dadurch ließen sich die Raumklimaverhältnisse auf einem gefährdungsfreien/gefährdungsarmen Niveau einstellen. Wie

immer im dauerfeuchten Milieu sind die hochwertigen originalen Malschichten und Fassungen in der Krypta vor einer weiteren Schimmelpilzbildung durch die Reduzierung der relativen Feuchte zu schützen. Allerdings müssen die Gefährdungspotenziale durch die in der Porenlösung im Mauerwerk gelösten Salze berücksichtigt werden. Schließlich könnte eine deutliche Absenkung der Raumluftfeuchte in der bislang nahezu dauerfeuchten Krypta zu unerwünschten Salzphasenwechseln führen, Vorgänge, die rasch eine tiefgreifende Schädigung zur Folge haben. Außerdem sollten naturwissenschaftliche Untersuchungen die Schadensphänomene klären, um abhängig von den Schadensursachen ein auf das Objekt abgestimmtes Maßnahmenkonzept zu entwickeln.

Methodik

Zerstörungsfreie in-situ-Untersuchungen

TDR

Materialfeuchtemessungen in der Krypta von St. Georg erfolgten von Zeit zu Zeit mit Time Domain Reflectometry-Mikrowellen Laufzeit Reflexionsmessung (Stacheder 1996). Hierfür

wurde ein im Hochfrequenzbereich (Gigahertz) arbeitendes Messgerät TRIME FM der Firma IMKO Elektronik verwendet. Bei dieser Messmethode beeinflusst die Feuchtigkeit vor allem die Laufzeit und der Salzgehalt die Amplitude der Signale. Zwei Sonden wurden eingesetzt: Sonde 4 erfasst oberflächennahe Bereiche bis in etwa 2 cm Tiefe, Sonde 2 bis in etwa 5 cm Tiefe. Bei bekannter Rohdichte wird die Feuchtigkeit in Masse-Prozent ausgegeben. Die Dämpfung der Signalamplitude ergibt eine Information zum Salzgehalt. Ohne Salze beträgt die Dämpfung etwa 65 Skalenteile. Dieser Wert verringert sich in Gegenwart von Salzen.

Nahinfrarot-Spektroskopie

Als zerstörungsfreies Verfahren basierend auf der Reflexionsspektroskopie wurde das mobile Nahinfrarot-Spektroskop TerraSpec4 des Herstellers ASD eingesetzt, mit dem die diffuse Reflexion im Bereich von 800 bis 2500 nm detektiert wurde. In diesem Bereich liegen Oberton- und Kombinationsschwingungen der Grundschnwingungen von kovalenten Molekülbindungen des mittleren Infrarot (MIR). Aufgrund der höheren Energie des nahen infraroten Lichts im Vergleich zum mittleren Infrarot und der geringeren Absorptionskoeffizienten ergibt sich eine größere Eindringtiefe (Millimeter statt Mikrometer). Dies ermöglicht eine einfache, schnelle und zerstörungsfreie Messung in diffuser Reflexion. Im NIR-Bereich können u. a. Tonminerale, Sulfate, Hydroxide und Karbonate schnell und unmittelbar vor Ort bestimmt werden. Zusätzlich ist die Identifikation von Ergänzungsmassen möglich.

Raman-Spektroskopie

Um möglichst viele Informationen zur Art und Verteilung von Salzen zu erhalten, wurde ein zerstörungsfreies Verfahren basierend auf der Reflexionsspektroskopie mittels eines mobilen Raman-Spektrometers (MIRA-1 der Firma Metrohm, Laser 780 nm) zur Klärung der Phasenzusammensetzung herangezogen. Die Messungen können vor Ort, zerstörungsfrei und relativ schnell (wenige Sekunden bis zu 1 Minute) durchgeführt werden. Eine große Anzahl der Messstellen konnte überprüft werden, auch an Stellen, an denen eine Probenentnahme nicht möglich gewesen wäre.

Abb. 1:
Zerstörungsfreie Messungen zur Ermittlung der Materialfeuchte mittels TDR-Sonde (LAD, Jakobs).



Laboruntersuchungen

Röntgenbeugung

Die Phasenzusammensetzung der entnommenen Salzrasen und Putzproben wurde mittels Röntgenbeugung bestimmt: Teile der entnommenen Proben wurden röntgenfein gemahlen und mit einem Bruker AXS D8 Diffraktometer mit Cu-K α -Strahlung untersucht. Da die Probenmenge sehr gering war, wurde für die Messungen ein Si-Einkristallträger verwendet. Die Auswertung erfolgte mit der Software Diffracplus von Bruker und der JCPDS-Kartei des ICDD.

Ionenchromatographie

Aus Teilproben wurden wässrige Auszüge hergestellt, die elektrische Leitfähigkeit am Eluat und die evtl. vorhandenen, bauschädlichen, leichtlöslichen Salze mittels Ionenchromatographie (Anionenkonzentrationen mit Dionex ICS 1500; Kationenkonzentrationen mit Metrohm 881 Compact IC) untersucht.

Ergebnisse

Materialfeuchte in der Krypta

In der Krypta wurden in regelmäßigen Abständen zerstörungsfreie Feuchtemessungen mittels TDR an den Außenwänden, an der nordöstlichen Säule im Altarbereich und im Gang durchgeführt (Tab. 1 und Abb. 1–5).

Gravierende Unterschiede sind in den Feuchtegehalten festzustellen: Generell ist die Westwand mit bis zu 15 M-% extrem feucht, insbesondere in Höhen von 60 bis 120 cm (Abb. 2, 4).

Tabelle 1: Lokalisierung der TDR-Messprofile

Messstelle	Lokalisierung/Kurzbeschreibung
RCHTDR Profil 1	21/9-Krypta, Westwand, Bereich C30.2, 150 cm von der SW-Ecke
RCHTDR Profil 2	21/9-Krypta, Nordwand, Bereich C3.3, 100 cm von der NW-Ecke
RCHTDR Profil 3	21/9-Krypta, Ostwand, Bereich E50.1, 45 cm von der NO-Ecke
RCHTDR Profil 4	21/9-Krypta, Südwand, Bereich E5.4, 60 cm von der SO-Ecke
RCHTDR Profil 5	21/9-Krypta, Westwand, Bereich C30.1, 150 cm von der NW-Ecke
RCHTDR Profil 6	21/9-Krypta, Altar, nordöstliche Säule, Bereich D4.1
RCHTDR Profil 7	21/9-Krypta, Mittelstollen Nordseite, Bereich B2.1, rechts von der Ausbruchsstelle
RCHTDR Profil 8	21/9-Krypta, Mittelstollen Nordseite, Bereich B2.1, in der Ausbruchsstelle

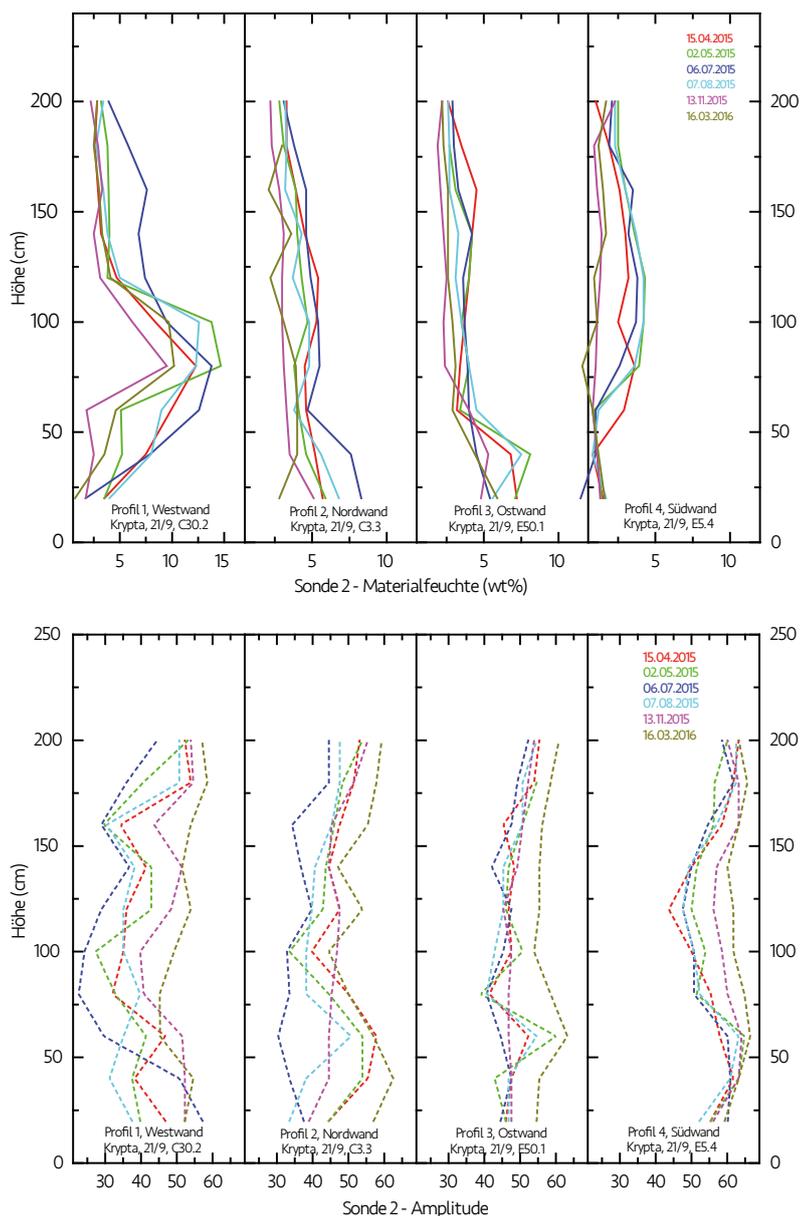


Abb. 2: Vergleichende Messungen der Feuchtegehalte an der Innenseite der Außenwände während eines Jahres (April 2015 bis März 2016) in der Oberflächentiefe bis ca. 5 cm Tiefe (MPA, Zöldföldi).

Abb. 3: Vergleichende Messungen der Amplitude und damit indirekt des Salzgehaltes an der Innenseite der Außenwände während eines Jahres (April 2015 bis März 2016) in der Oberflächentiefe bis ca. 5 cm Tiefe (MPA, Zöldföldi).

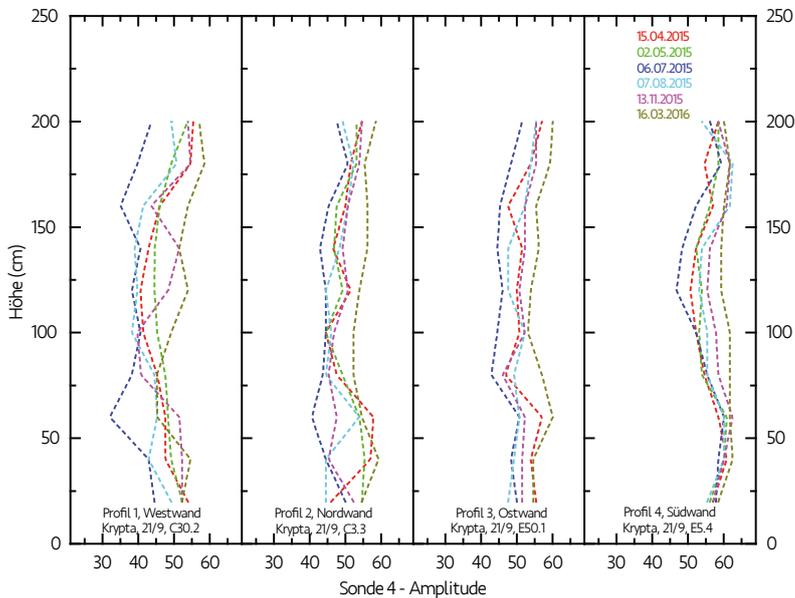
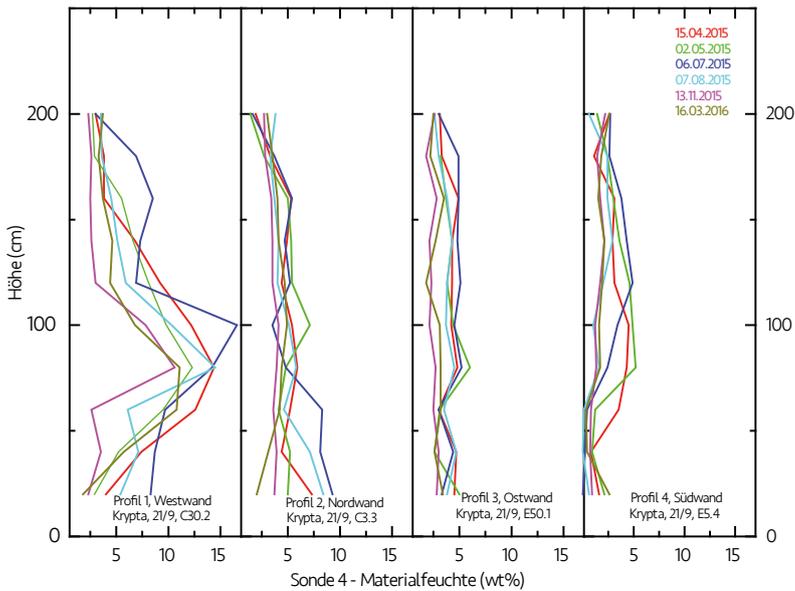


Abb. 4: Vergleichende Messungen der Feuchtegehalte an der Innenseite der Außenwände während eines Jahres (April 2015 bis März 2016) in der Oberfläche bis ca. 2 cm Tiefe (MPA, Zöldföldi).

Abb. 5: Vergleichende Messungen der Amplitude und damit indirekt des Salzgehaltes an der Innenseite der Außenwände während eines Jahres (April 2015 bis März 2016) in der Oberfläche bis ca. 2 cm Tiefe (MPA, Zöldföldi).

An der West- und Südwand sind die Feuchtegehalte von Mai bis Juli 2015 im Vergleich zu den anderen Messzeiten sichtlich erhöht. An der Nord- und Ostwand ist dies weniger stark ausgeprägt. Sehr trocken sind die Bereiche bis zu ca. 60 cm Höhe im Profil 4 an der Südwand während der gesamten Messkampagne. Die erhöhten Feuchtwerte an der Ostwand bis zu 40 cm Höhe im Profil 3 sind auf die langsame Austrocknung der im Jahr 2014 aufgetragenen Opferputze zurückzuführen. Dagegen trocknete der aufgetragene Opferputz an der Südwand deutlich schneller aus. Die Feuchtegehalte vom November 2015 und März 2016 zeigen in allen gemessenen Profilen sowohl im oberflächennahen Bereich bis 2 cm Tiefe (Sonde 2, Abb. 2) als

auch bis zu etwa 5 cm Tiefe (Sonde 4, Abb. 4) eine deutliche Austrocknung.

Die Amplitudenwerte zeigen sehr hohe Salzbelastungen (in gelöster Form vorliegend) an der Westwand, die Werte sinken bis zu 23 Skalenanteile und zeigen die höchste Dämpfung (vgl. unbelastete Untergründe zeigen 64 Skalenanteile, Abb. 3, 5), wobei die Belastung in einer Höhe von 60 bis 100 cm und in der Höhe von ca. 160 cm am stärksten ist. Die Nordwand zeigt ähnliche Phänomene wie die Westwand. Die Ost- und Südwand enthalten weniger gelöste Salze, eine stärkere Belastung liegt in einer Höhe von ca. 80 cm vor. Die hohen Amplitudenwerte an der Südwand bis zu ca. 60 cm Höhe deuten darauf hin, dass in diesem Bereich die Salze hauptsächlich in Kristallform vorhanden sind.

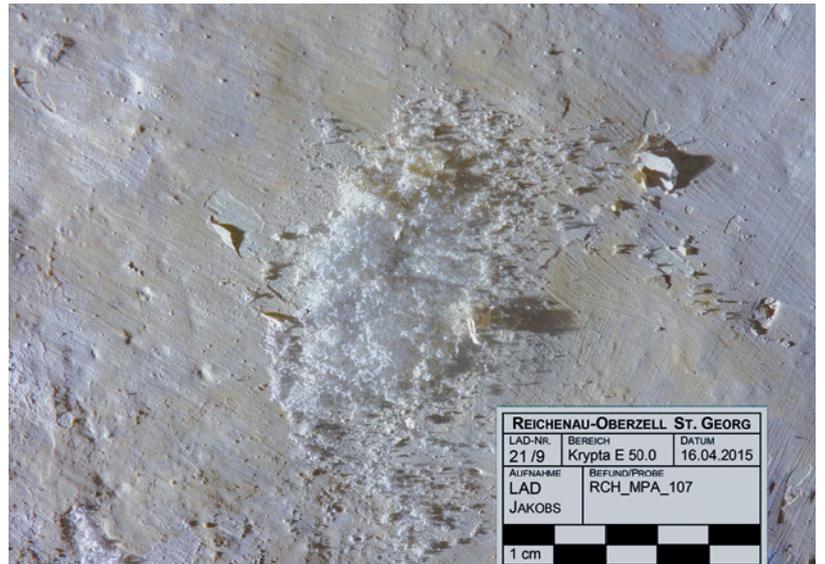
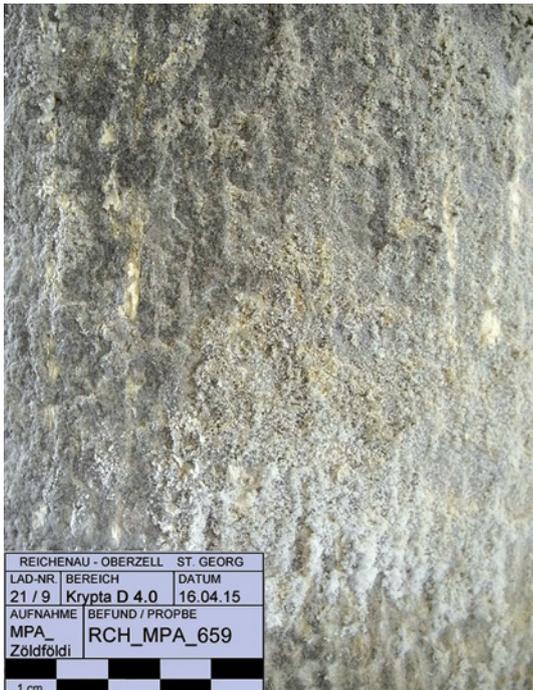
Salzausblühungen und Salzbelastung

Abhängig von der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Mauerwerkstoffe, Mauersteine und Putze können sich in Verbindung mit der hohen Mauerfeuchte Belastungen bauschädlicher Salzen ergeben. Dies kann durch den Eintrag aus Düngemitteln und deren Lösung infolge der intensiven landwirtschaftlichen Nutzung der angrenzenden Äcker östlich und südlich der Krypta und Kirche ergänzt werden.

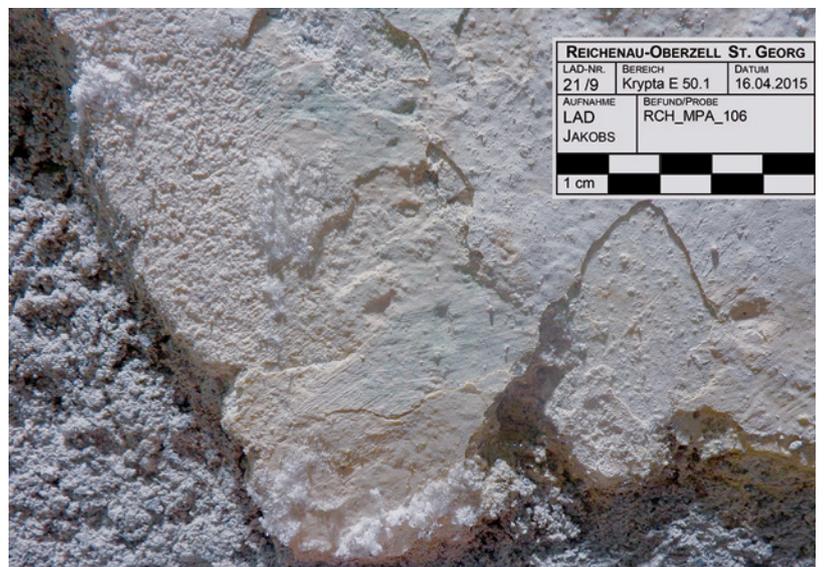
Bohrmehl- und Kratzproben

Im Rahmen des Ortstermins am 15. und 16. April 2015 konnten Salzausblühungen an der nordöstlichen Säule aus Molassesandstein, insbesondere im Bereich D 4.0, beobachtet werden (Abb. 6). Bei diesen handelte es sich einerseits um weiße, fäulartige Salzkristalle, andererseits um gelbliche, flächig aufliegende Salzausblühungen. Weiterhin konnten Ausblühungen (hauptsächlich weiße, nadelartige Salzkristalle) am historischen Putz an der Ostwand im Bereich E 50.0 (Abb. 7) bzw. in der Randzone zwischen dem Originalputz aus dem 10. Jh. und dem im Jahr 2014 aufgetragenen Opferputz im Bereich E 50.1 (Abb. 8) bzw. festgestellt werden. Ein weiteres Schadensbild stellen bis zu wenige Zentimeter große Aufwölbungen, Abplatzungen und kraterartige Ausbrüche am historischen Putz dar (Abb. 9).

Die mit einem Pinsel abgenommenen Salzausblühungen bzw. mit einem Mikrobohrer entnommenen Bohrmehlproben der Ausbrüche wurden mittels Röntgenbeugung analysiert.



Weiterhin wurden – in den Bereichen, wo es restauratorisch vertretbar war – tiefengestaffelte Bohrmehlproben an der Ostwand im Bereich des im Jahr 2014 angebrachten Opferputzes, vom 1980er Jahre Putz und vom historischen Putz entnommen und mittels Ionenchromatographie unter Laborbedingungen auf ihre Salzbelastung im Tiefenprofil hin untersucht. Ziel war einerseits die Feststellung der Salzbelastung zur Tiefe, andererseits die Validierung der zerstörungsfreien Messmethoden in situ.



[links] Abb. 6:
Salzausblühungen an der nordöstlichen Säule aus Molasandesandstein im Altarbereich, Bereich D 4.0 (MPA, Zöldföldi).

[oben] Abb. 7:
Salzausblühungen an der Ostwand im Bereich der historischen Putze, Bereich E 50.0 (LAD, Jakobs).

[mitte] Abb. 8:
Salzausblühungen und Abplatzungen am Rand zwischen älteren und neueren Ergänzungen an der Ostwand im Bereich E 50.1 (LAD, Jakobs).

[unten] Abb. 9:
Fleckenbildung, Aufwölbung der Oberfläche mit darunter liegender Salzzakkumulation und Ausbrüche im Altputzbereich an der Südwand im Bereich E 5.4 (LAD, Jakobs).



Phasenbestimmung mittels Röntgenbeugungsanalytik

Die Salzausblühungen von der nordöstlichen Säule des Altares (Bereich D 4.0) und vom historischen Altputz (Bereich E 50.0) wurden mittels Röntgenbeugung auf ihre Phasenzusammensetzung untersucht (Abb. 10). Die weiße, nadelförmige Salzausblüfung in Höhe von 132 cm (Probe RCHMPA101) besteht hauptsächlich aus Thenardit und Syngenit, begleitet von wenig Gips. Bei den gelblichen, flächigen Salzausblühungen (RCHMPA102 in 140 cm Höhe und RCHMPA103 in 110 cm Höhe) handelt es sich um Gips und Syngenit mit weniger Thenardit. Die feinen weißen Ausblühungen (RCHMPA104 in 170 cm Höhe) bestehen aus Niter und Syngenit, mit wenig Gips und Thenardit. Die Probe RCHMPA106, aus nadeligen Salzkristallen im Randbereich zwischen historischem Putz und Opferputz an der Ostwand im Bereich E 50.1, besteht überwiegend aus Thenardit und Aphthitalit, in Begleitung von Gips. Die Proben aus der Salzaakkumulation im Bereich von Abplatzungen und Ausbrüchen (RCHMPA107-108 und 165-169,

Ostwand, Bereich E 50.0) setzen sich aus Gips, Thenardit, Syngenit und Niter zusammen.

Salzbelastung im Tiefenprofil: Bestimmung der Ionenkonzentration an den Bohrmehlproben

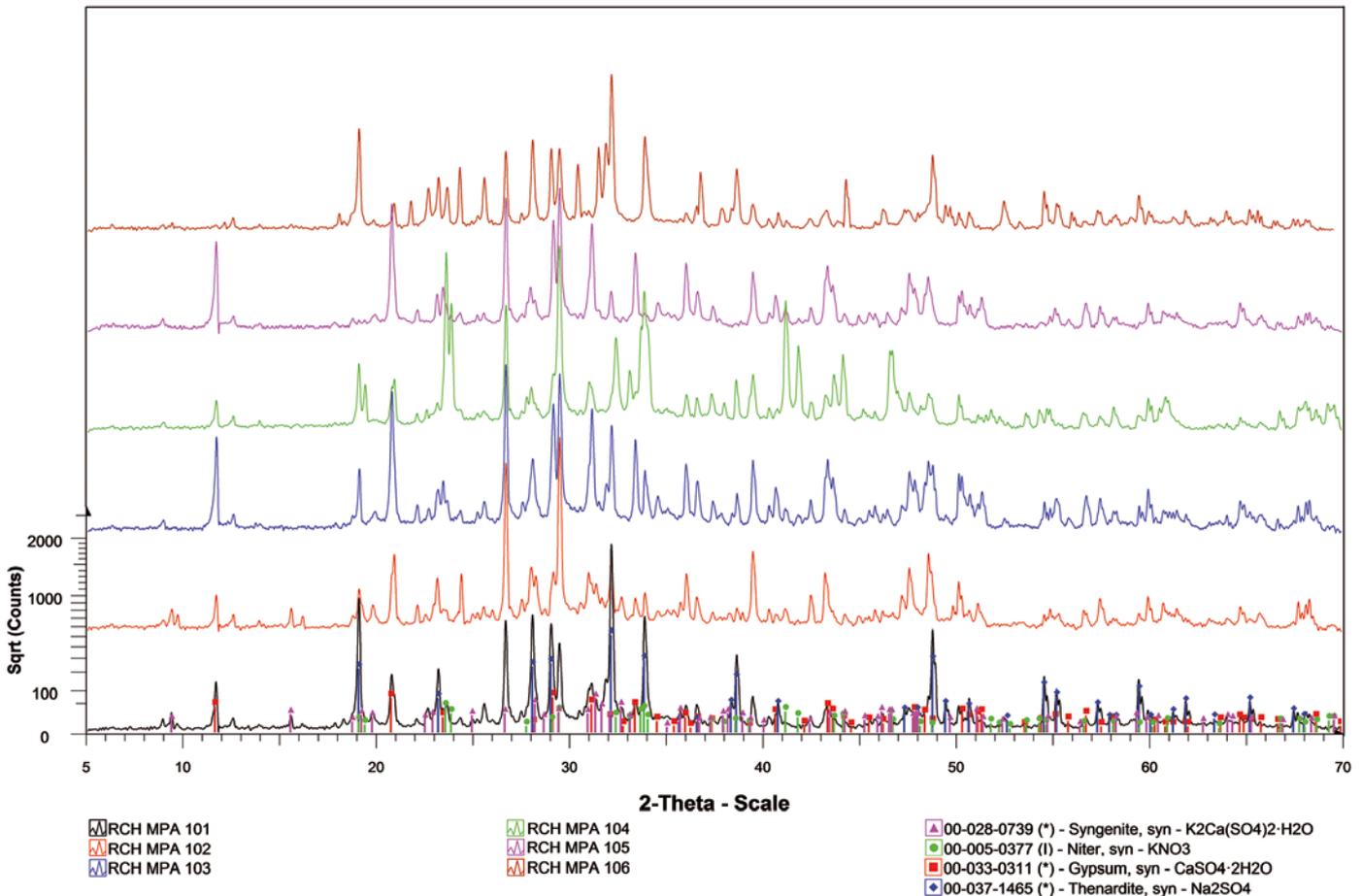
Bohrmehlproben – E 50.1 Ostwand

Die Ergebnisse der ionenchromatographischen Untersuchungen, sowohl die Anionen- als auch Kationenkonzentrationen sind in Abbildung 11 dargestellt. Die Bohrmehlproben der Opferputze aus dem Jahr 2014 zeigen geringe Belastungen, lediglich die Nitratwerte sind in einer Höhe von 42 cm und in der Tiefe zwischen 1–6 cm erhöht. Dagegen zeigen die Putzergänzungen aus den 1980er Jahren sehr hohe Nitratbelastungen über die gesamte Probenentnahmetiefe (bis zu 8 cm). In oberflächennahen Bereichen kommen sehr hohe Sulfatbelastungen hinzu.

Bohrmehlproben – E 50.2 Südost-Ecke

Die Ergebnisse der Bohrmehlproben aus der Südost-Ecke (Bereich E 50.2) zeigen bereits im Opferputz in einer Höhe von 36 cm erhöhte

Abb. 10:
Phasenzusammensetzung mittels Röntgenbeugungsanalytik an den entnommenen Salzausblühungen (MPA, Zöldföldi).



Nitrat- und Chloridkonzentrationen (Abb. 12). Sowohl Nitrate als auch Chloride konzentrieren sich an der Oberfläche und die Konzentration sinkt bis zu einer Tiefe von 6 cm. Sulfate sind in geringen Mengen vorhanden, die Konzentration nimmt mit zunehmender Tiefe zu. Die Putzproben der 1980er Jahre aus einer Höhe von ca. 80 cm weisen dagegen deutlich erhöhte Nitratwerte sowie geringfügig erhöhte Chlorid- und Sulfatkonzentrationen auf.

Bohrmehlproben – Mittelstollen B 2.1

Im Vergleich zur Krypta ist der Untergrund im Mittelstollen sowohl in bodennahen als auch in höheren Bereichen extrem hoch mit Nitraten und hoch mit Chloriden belastet, wobei die Kon-

zentration zur Tiefe kontinuierlich abnimmt (Abb. 13).

Ermittlung der Salzbelastung mittels zerstörungsfreier Nahinfrarot-Spektroskopie in situ

Um großflächige Informationen zur Art und Verteilung der Salze zu erhalten, wurden knapp 200 Einzelmessungen während zweier Kampagnen im April 2015 und Oktober 2015 mittels Nahinfrarot-Spektroskopie in der Krypta durchgeführt (Abb. 14, 15). Da die Nahinfrarot-Spektroskopie erst seit kurzem für Salzuntersuchungen an Kulturdenkmälern eingesetzt wird, wie z. B. zur Herkunftsbestimmung von Sandsteinen (Bowitz/Ehling 2008 2010) oder Salzausblühungen am Ölbergrelief in den Salvatorkapellen in

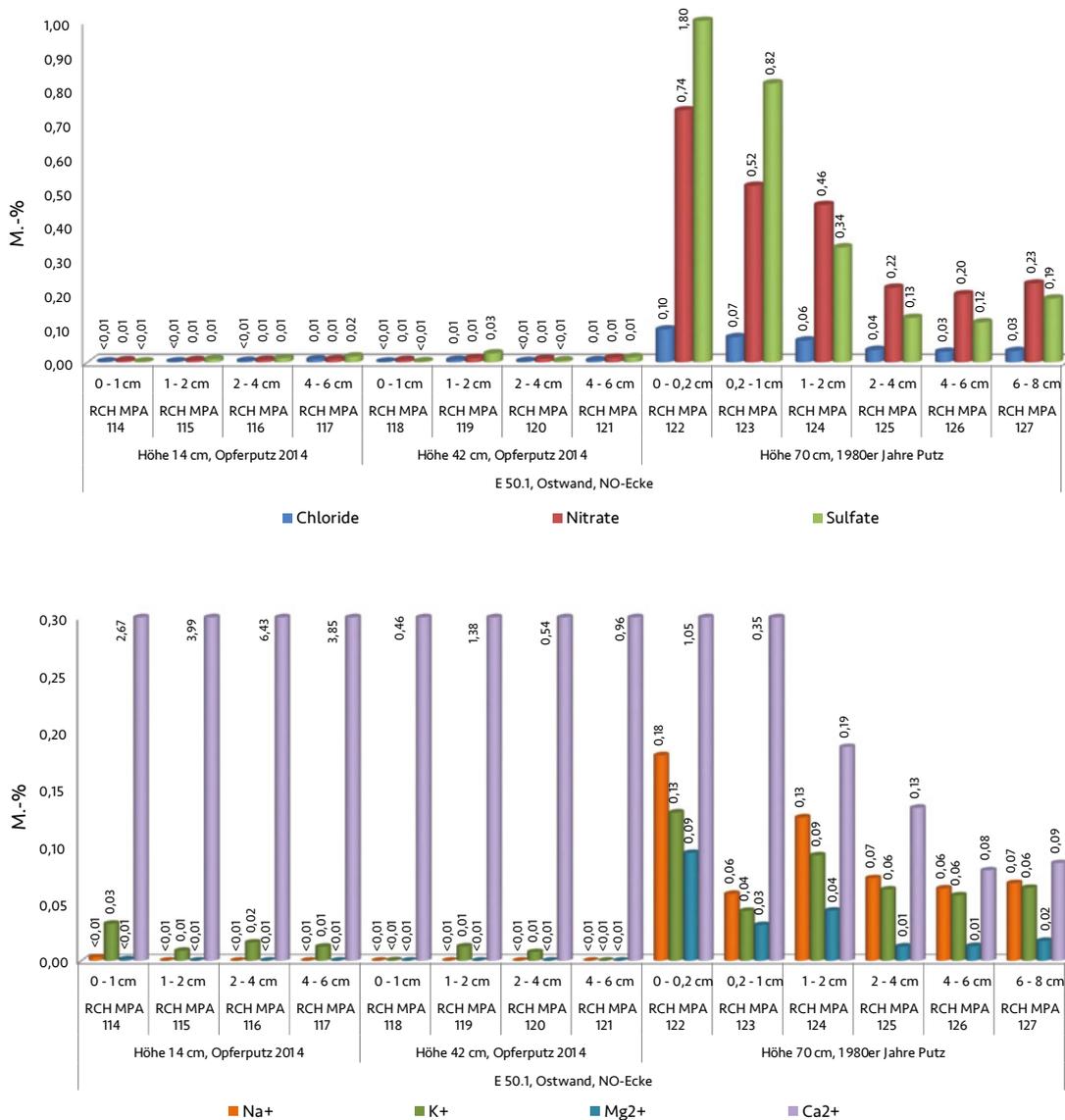


Abb. 11: Salzbelastung des Opferputzes aus dem Jahr 2014 und des Putzes aus den 80er Jahren in verschiedenen Höhen und Tiefen an der Ostwand, Bereich E 50.1 (MPA, Zöldföldi).

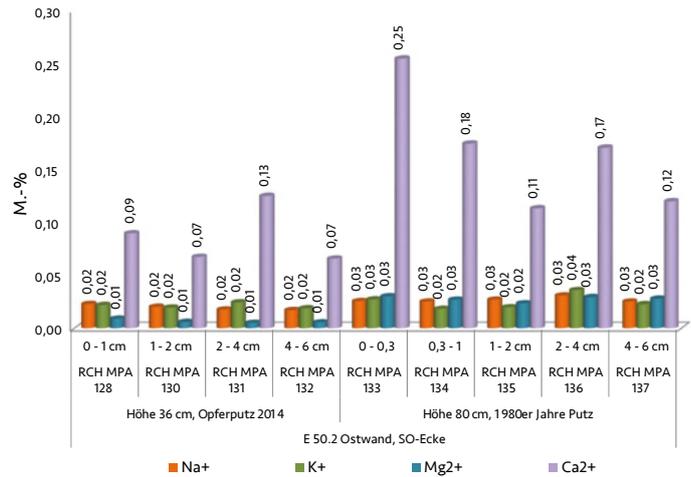
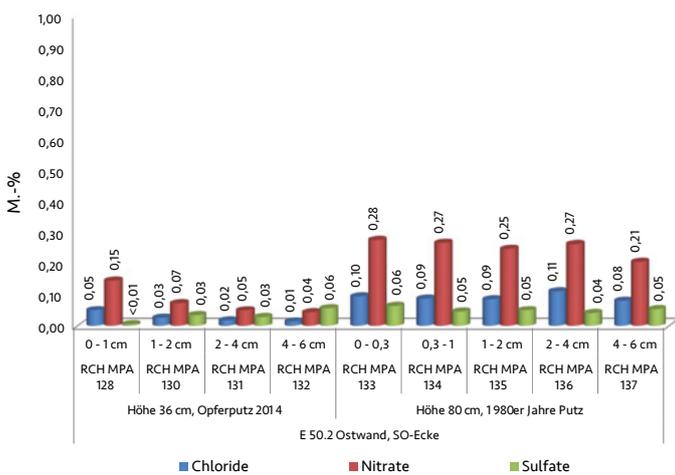


Abb. 12: Salzbelastung des Opferputzes aus dem Jahr 2014 und des Putzes aus den 80er Jahren in verschiedenen Höhen und Tiefen in der südöstlichen Ecke, im Bereich E 50.2 (MPA, Zöldföldi).

Schwäbisch Gmünd (Zöldföldi et al. 2015), musste eine Referenzdatenbank speziell für die Oberflächenfassungen in der Krypta von St. Georg entwickelt werden. Zu dieser Referenzdatenbank wurden Spektren der Bestandteile des aufgebrauchten Putzmörtels und möglicher Salze hinzugefügt (Tab. 2). Anschließend wurden die Mineral- und Salzgehalte mit dem Analyseprogramm PimaView berechnet. Eine besondere Schwierigkeit bei den Auswertungen in der Krypta besteht durch die z. T. sehr starke Durchfeuchtung des Untergrundes. Deshalb musste die Zuverlässigkeit von Salzanalysen mittels NIR-Spektroskopie mit anderen Methoden (Raman-Spektroskopie, Röntgenbeugung, Ionenchromatographie) überprüft werden. Die fortschreitende Austrocknung förderte Salze an die

Oberfläche und verursachte Salzkristallisation. Diese wurden mittels Röntgenbeugung analysiert und haben die Richtigkeit der Auswertung von NIR-Spektren gezeigt. Weiterhin muss darauf hingewiesen werden, dass zum jetzigen Zeitpunkt die Ergebnisse als halbquantitativ verstanden werden müssen.

Die Messpunkte an der Ostwand sind in Abbildung 14, die Ergebnisse als Balkendiagramme dargestellt (Abb. 16–19). In der Legende sind nur diejenigen Salze aufgeführt, die in der Krypta tatsächlich identifiziert wurden: Kalziumsulfate (Bassanit und Gips), Magnesiumsulfate (Kieserit, Epsomit), Natriumsulfate (Thenardit und Mirabilit) und Mischsulfate (Aphthitalit, Syngenit, Polyhalit, Glauberit, Blödit) neben Chloriden (Halit) und Nitraten (Niter und Nitratin).

Tabelle 2: Liste der Salze und Minerale der Spektrenbibliothek

Anhydrit CaSO_4	Eugsterit $\text{Na}_4\text{Ca}(\text{SO}_4)_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Kalzit CaCO_3
Bassanit $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$	Blödit $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Dolomit $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$
Gips $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Löweit $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot \text{MgSO}_4 \cdot 2,5\text{H}_2\text{O}$	Albit $\text{Na}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
Glauberit $\text{Na}_2\text{Ca}(\text{SO}_4)_2$	Konyait $\text{Na}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	Mikroklin $\text{K}(\text{AlSi}_3\text{O}_8)$
Kieserit $\text{MgSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$	Niter KNO_3	Muscovit $\text{KAl}_2[(\text{OH},\text{F})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
Starkeyit $\text{MgSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	Nitratin NaNO_3	Clinochlor $(\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Al})_3[(\text{OH})_2\text{AlSi}_3\text{O}_{10}] \cdot (\text{Mg},\text{Fe}^{2+},\text{Al})_3(\text{OH})_6$
Hexahydrat $\text{MgSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	Trona $\text{Na}_3(\text{HCO}_3)(\text{CO}_3) \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Chamosit $(\text{Fe}^{2+},\text{Mg},\text{Fe}^{3+})_5\text{Al}[(\text{OH},\text{O})_8\text{AlSi}_3\text{O}_{10}]$
Epsomit $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	Soda $\text{Na}_3(\text{CO}_3)_2$	Glaukophan $\text{Na}_2(\text{Mg},\text{Fe})_3\text{Al}_2[(\text{OH})_2\text{Si}_8\text{O}_{22}]$
Arcanit K_2SO_4	Nitrocalcit $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	
Aphthitalit $\text{K}_3\text{Na}(\text{SO}_4)_2$	Nitrobaryt $\text{Ba}(\text{NO}_3)_2$	
Syngenit $\text{K}_2\text{Ca}(\text{SO}_4) \cdot \text{H}_2\text{O}$	Nitromagnesit $\text{Mg}(\text{NO}_3)_2$	
Polyhalit $\text{K}_2\text{Ca}_2\text{Mg}(\text{SO}_4)_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	Sylvin KCl	
Mascaguit $(\text{NH}_4)_2(\text{SO}_4)$	Halit NaCl	
Thenardit Na_2SO_4	Karnalit $\text{KMgCl}_3 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	
Mirabilit $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$	Kainit $\text{KMg}(\text{Cl}/\text{SO}_4) \cdot 3\text{H}_2\text{O}$	
Darapskit $\text{Na}_3(\text{SO}_4)(\text{NO}_3) \cdot \text{H}_2\text{O}$		

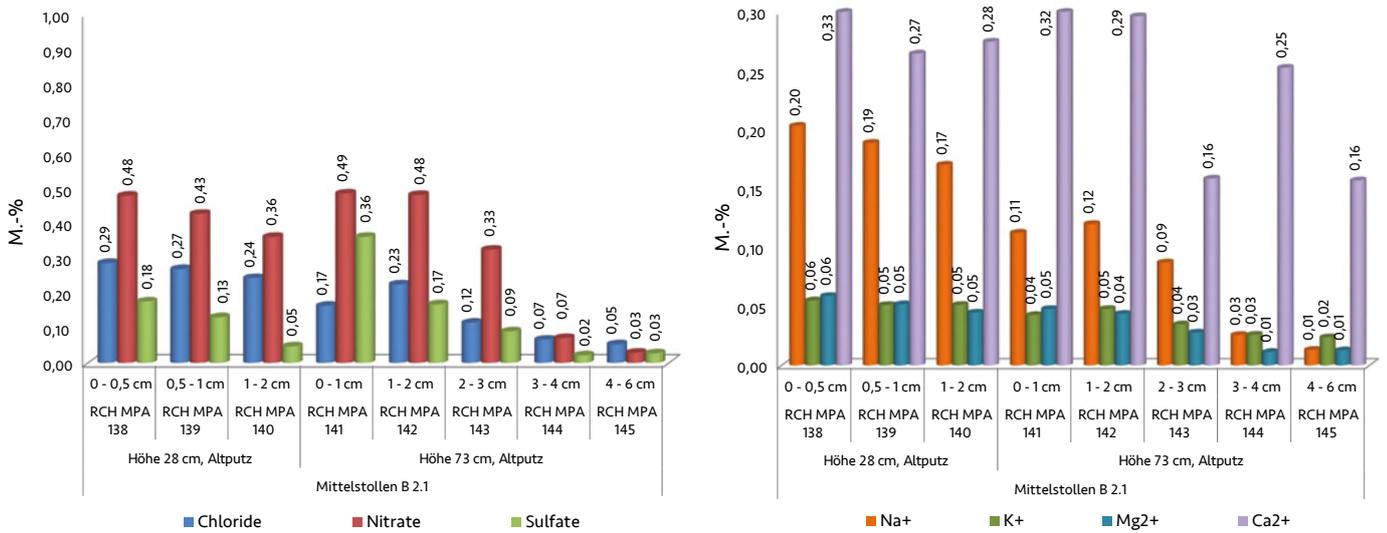


Abb. 13: Salzbelastung des originalen Putzes (Krypta bauzeitlich) in verschiedenen Höhen und Tiefen im Mittelstollen im Bereich B 2.1 (MPA, Zöldföldi).

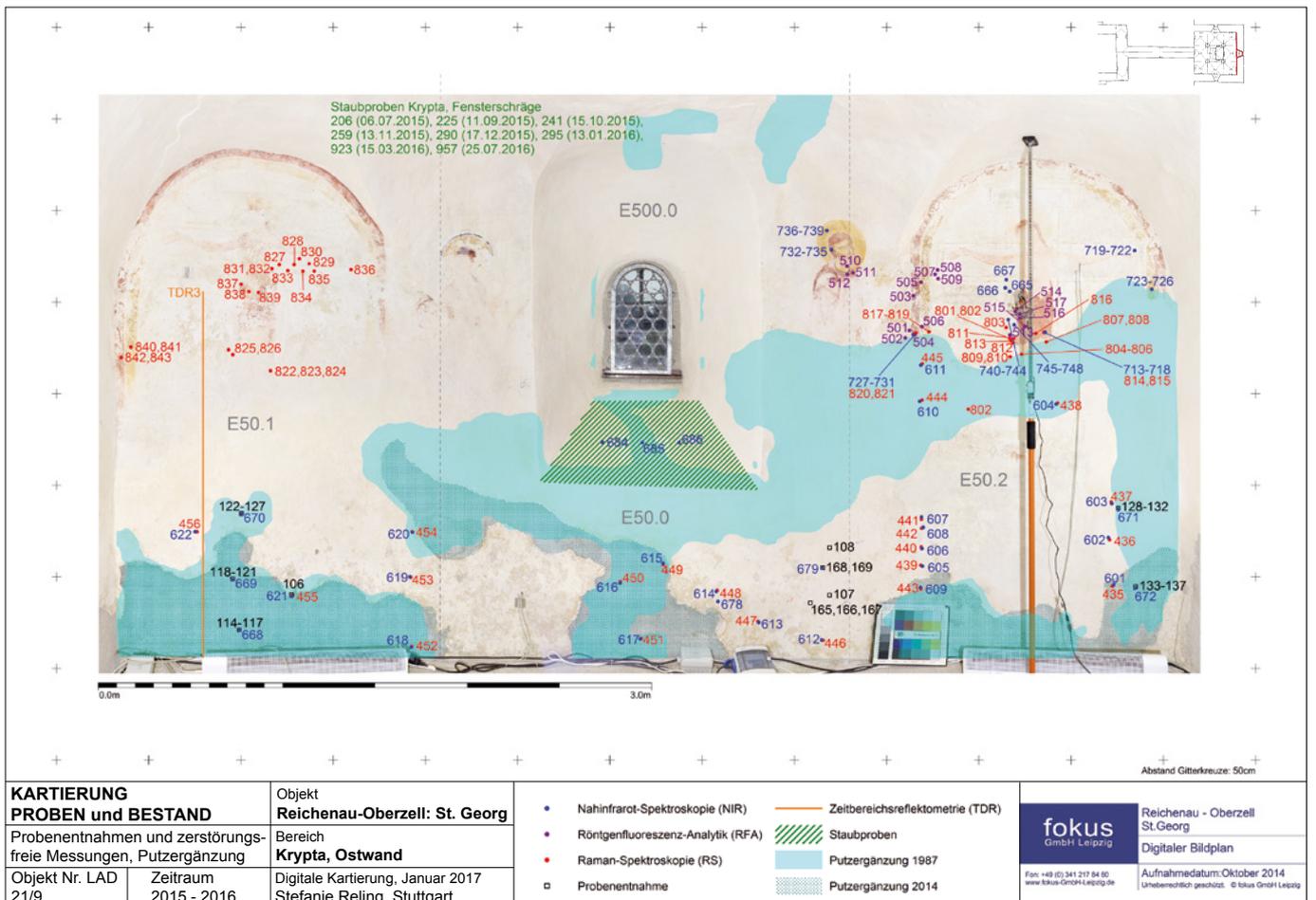
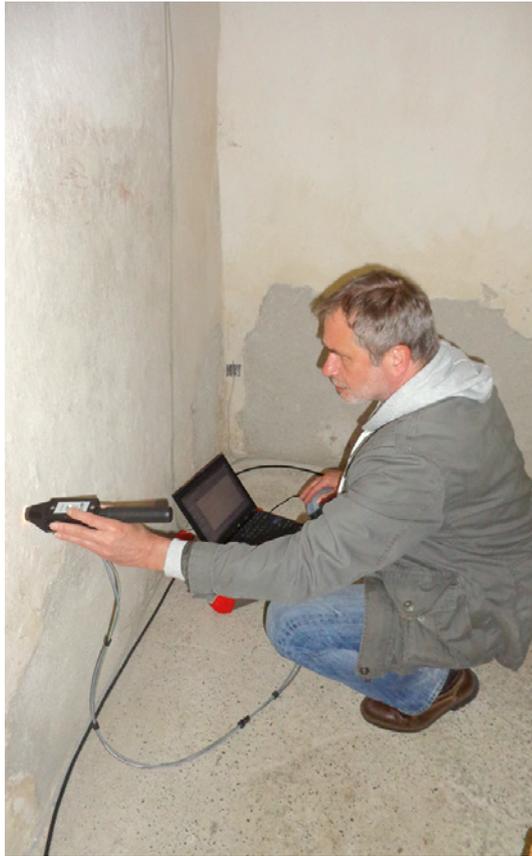


Abb. 14: Kartierung Proben und Bestand (Planerstellung fokus GmbH Leipzig, Digitale Kartierung Reling, Stuttgart).

Abb. 15:
Zerstörungsfreie Mes-
sungen zur Bestimmung
der bauschädlichen Salze
mittels Nahinfrarot-
Spektroskopie (LAD,
Jakobs).



Ostwand

Die Messungen der ersten Kampagne im April 2015 zeigten, dass im Bereich E 50.2 insbesondere die Putze aus den 1980er Jahren stark mit Sulfaten, wie Gips, Bassanit, Epsomit und Thenardit, belastet sind. Geringe Mengen an Niter sind fast überall vorhanden (Abb. 13). Die älteren Putze in diesem Bereich enthalten Gips, Glauberrit, seltener Epsomit und nur an einigen Stellen Thenardit. Die Analysen an der Wandmalerei zeigten die Anwesenheit von Epsomit und Niter. Der Bereich E 50.0 an der Ostwand, unterhalb des Fensters zeigte eine bunte Mischung an Sulfaten (Thenardit, Mirabilit, Blödit, Syngenit, weniger Gips) in Begleitung mit hohen Feuchtegehalten. Diese Zusammensetzung deutet auf ein instabiles System hin, eine Umkristallisation muss hier andauernd stattfinden. Im nördlichen Drittel der Ostwand sind in den älteren Putzen wiederum Glauberrit und Gips, in Begleitung von Niter und seltener Thenardit, vorhanden. Auch die im Jahr 2014 aufgebrachte Opferputze erhalten Glauberrit, Gips und teilweise Thenardit. Während der zweiten Kampagne durchgeführte Messungen zeigten bereits, dass die im Jahr 2014 aufgebrachten Opferputze in der Nordost-Ecke

der Krypta (Bereich E 50.1) immer noch sehr hohe Materialfeuchten aufweisen (Abb. 17). Trotzdem sind bereits Magnesiumsulfate auskristallisiert. Im Bereich des älteren Putzes konnten Gips, Glauberrit, Thenardit und untergeordnet Niter und Nitratin identifiziert werden. Im Bereich E 50.2, im südlichen Drittel der Ostwand, unterhalb der Kreuzigungsgruppe sind die Opferputze von 2014 so gut wie abgetrocknet, hier konnten leider schon große Mengen an Epsomit, Thenardit und in bodennahen Bereichen auch Niter auskristallisieren. Im Altputz ist zusätzlich Gips und vereinzelt Polyhalit vorhanden. Im Bereich E 50.0 an der Ostwand, unterhalb des Fensters ist – ähnlich wie im April 2015 – eine bunte Mischung an Sulfaten (Gips, Epsomit, Mirabilit, Thenardit und Blödit) vorhanden. Das Vorhandensein der unterschiedlichen Hydratphasen deutet auf die hohe Gefährdung hin, die durch Umkristallisationen und Phasenänderungen verursacht werden kann.

West- und Südwand

Die Messungen an der West- und Südwand wurden in Ausbruchstellen durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen ein einheitliches Bild, neben Gips ist Epsomit immer, Thenardit häufig, Glauberrit nur an wenigen Stellen und Niter fast überall in geringen Mengen vorhanden (Abb. 16, 17).

Mittelstollen

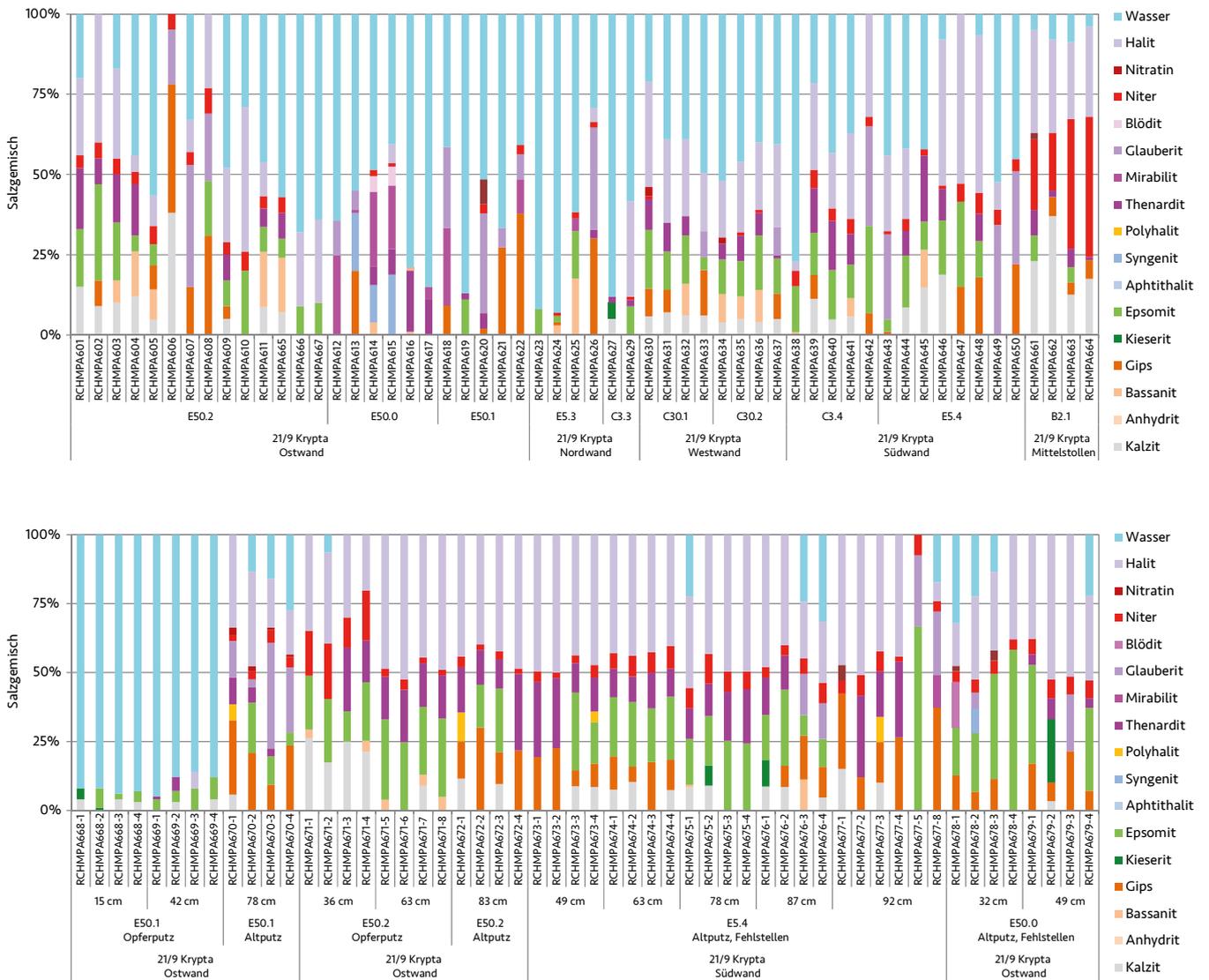
Im Vergleich zur Kryptahalle ist das Mauerwerk im Mittelstollen sehr stark mit Nitraten belastet. Untergeordnet kommen Sulfate, wie Gips, Epsomit und Thenardit vor (Abb. 16).

Wandmalerei

Während der zweiten Messkampagne erfolgten Messungen mittels Nahinfrarot-Spektroskopie auch im Bereich der Wandmalereien (Bereich E 50.2) (Abb. 19). Neben Kalziumsulfat (Bassanit und Gips) wurden Magnesiumsulfate (Epsomit und Kieserit) und geringe Mengen von Nitraten gefunden. Hier muss darauf hingewiesen werden, dass nicht alle Pigmente und Bindemittel bzw. frühere Festigungsmittel identifiziert sind und deshalb in die Referenzdatenbank nicht aufgenommen werden konnten. Dies hat eine Unsicherheit in der Auswertung der Nahinfrarot-Spektren zur Folge.

Sandsteinsäulen

Während beider Messkampagnen (April und Oktober 2015) wurden die gleichen Stellen der



nordöstlichen Säule am Altar (Bereich D 4.0) mittels Nahinfrarot-Spektroskopie untersucht (Abb. 19). Eine Höhendifferenzierung der auftretenden Salze ist deutlich ablesbar. In bodennahen Bereichen (bis zu ca. 40 cm Höhe) sind Gips und Thenardit vorhanden, zwischen 60 und 100 cm Höhe hauptsächlich Glauberit, neben Gips, wenig Polyhalit und Thenardit. Während der zweiten Messkampagne im Oktober 2015 ist in dieser Höhe zusätzlich noch Epsomit detektiert worden. Dies deutet auf einen niedrigeren relativen Feuchtegehalt im Nahfeldbereich hin. In einer Höhe von ca. 140 bis 160 cm erscheint zusätzlich Syngenit und Niter. Im Vergleich zu den Messungen vom April 2016 konnte im Oktober in dieser Höhe kein Thenardit mehr gefunden werden. Polyhalit wurde in Höhen von 60 bis 120 cm identifiziert.

Die Abbildung 20 zeigt das Nahfeldklima (Temperatur vs. relative Luftfeuchte) zu den jeweiligen Messkampagnen im Altarbereich. Die Temperaturen sind mit um die 10 °C sehr ähnlich, allerdings sind die relativen Luftfeuchten unterschiedlich: Während die relative Luftfeuchte am 15. April 2015 zwischen 92 und 100 % lag, schwankten die Werte am 15. Oktober 2015 zwischen 81 und 88 %. Vergleicht man die Messwerte des Raumklimas mit dem Phasendiagramm von Magnesiumsulfat, so ist das Vorhandensein von Epsomit bei der zweiten Messkampagne am 15. Oktober 2015 nachvollziehbar. Die Ergebnisse für Natriumsulfat sind nicht mehr so eindeutig (Abb. 21). Aufgrund der Klimadaten sollten auch die wasserhaltige Phase Mirabilit und Natriumsulfatlösung an der Wandoberfläche bzw. in oberflächennahen Bereichen

Abb. 16: Art und Verteilung der vorhandenen bauschädlichen Salze an der Innenseite der Außenwände der Krypta. Die Messungen wurden mittels Nahinfrarot-Spektroskopie am 16.4.2015 durchgeführt (MPA, Zöldföldi).

Abb. 17: Art und Verteilung der vorhandenen bauschädlichen Salze an der Innenseite der Außenwände der Krypta. Die Messungen wurden mittels Nahinfrarot-Spektroskopie am 15.10.2015 durchgeführt (MPA, Zöldföldi).

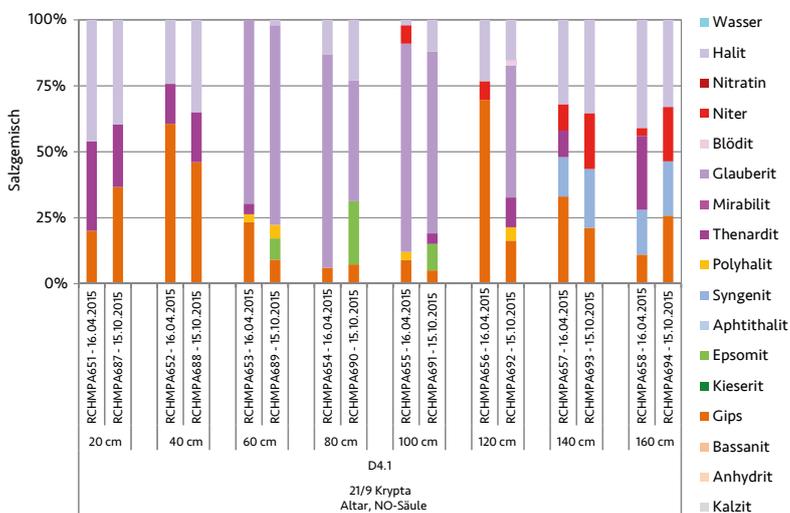
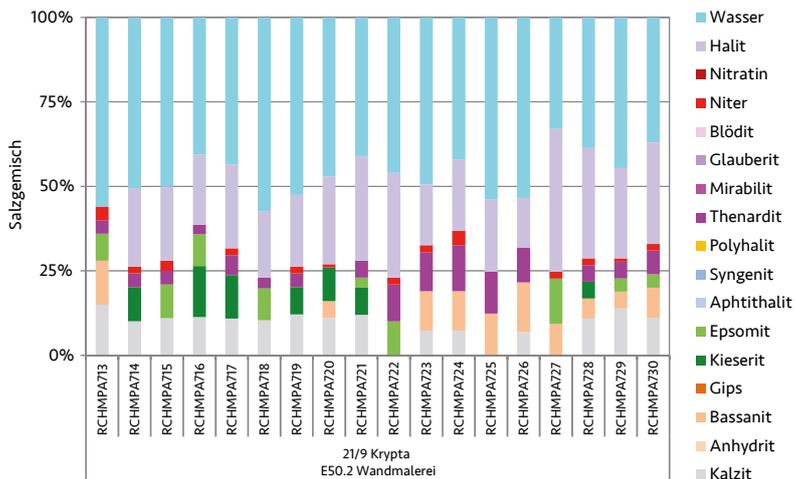


Abb. 18:
Art und Verteilung der vorhandenen bauschädlichen Salze im Bereich der Wandmalereien (Bereich E 50.2). Die Messungen wurden mittels Nahinfrarot-Spektroskopie am 15.10.2015 durchgeführt (MPA, Zöldföldi).

Abb. 19:
Art und Verteilung der vorhandenen bauschädlichen Salze an der nordöstlichen Säule am Altar in der Krypta (Bereich D 4.0). Die Messungen wurden mittels Nahinfrarot-Spektroskopie sowohl am 16.4.2016 als auch am 15.10.2015 durchgeführt (MPA, Zöldföldi).

vorhanden sein. Allerdings konnten die Messungen Thenardit nachweisen. Wird das Klima der vorangegangenen Tage mitberücksichtigt, so ist eine rasche Phasenumwandlung von Natriumsulfatlösung zu Mirabilit und Thenardit sowie zurück nachvollziehbar. An drei darauffolgenden Tagen, jeweils zwischen 16:30 und 17:00 Uhr steigt die Temperatur und sinkt die relative Luftfeuchte (am 8. April 2015 bis auf ca. 54 % r. F., Abb. 22). Die Ursachen für diese Ereignisse konnten bisher nicht geklärt werden, möglich wäre Sonneneinstrahlung, eine Fensteröffnung und dadurch das Eindringen von trockener Luft oder eine hohe Besucherfrequenz. Die Werte zeigen eine rasche Klimaänderung in der Krypta an, dies verursachte einen raschen Phasenwechsel von Natriumsulfat.

Ramanspektroskopische Untersuchungen

Die Raman-Spektroskopie hat in den letzten Jahren stark an Bedeutung gewonnen. Sie wird weltweit auch immer häufiger zur Untersuchung von Kulturgütern und in der Konservierungsforschung eingesetzt. Bei dieser Methode werden die Moleküle der Probe über Streuprozesse mit dem monochromatischen Licht eines Lasers zu Schwingungen angeregt. Eine genaue Analyse des Streulichtes erlaubt Rückschlüsse auf die charakteristischen Energien dieser Schwingungsprozesse und somit auf die Natur der Moleküle. So können damit beispielsweise Pigmente, Farbsysteme, Bindemittel, mineralische und organische Grundbestandteile sowie Umwandlungsprodukte untersucht werden. Viele bauschädliche Salze lassen sich auf diese Weise auch eindeutig identifizieren: U. a. können Sulfate, Nitrate und Karbonate bestimmt werden. Vorteil gegenüber der Nahinfrarot-Spektroskopie ist, dass der Feuchtegehalt die Messungen und Auswertungen nicht beeinflusst.

Um die Verteilung von bauschädlichen Salzen in der Krypta zu kartieren und die Ergebnisse der Nahinfrarot-Spektroskopie zu validieren, wurden in der Krypta ca. 80 Messungen, hauptsächlich an denselben Messstellen wie bei NIR durchgeführt. Die Auswertungen erlauben die qualitative Aussage der vorhandenen Komponenten (Bestandteile des Baumaterials und Salze). Ein relativer Vergleich zwischen Spektren ist bei gleicher Messzeit möglich, eine quantitative Auswertung ist mit der eingesetzten Methodik nicht durchführbar. Eine vollkommene Übereinstimmung der Ergebnisse zwischen Raman- und Nahinfrarot-Spektroskopie ist aus gerätetechnischen und methodischen Gründen nicht zu erwarten: Die Eindringtiefe der Methoden ist unterschiedlich, die Identifikation von NaCl ist mit Raman-Spektroskopie nicht möglich, andererseits wäre Quarz mit NIR-Spektroskopie schwer zu detektieren. Sulfate, Nitrate und Karbonate sind mit beiden Methoden gut detektierbar.

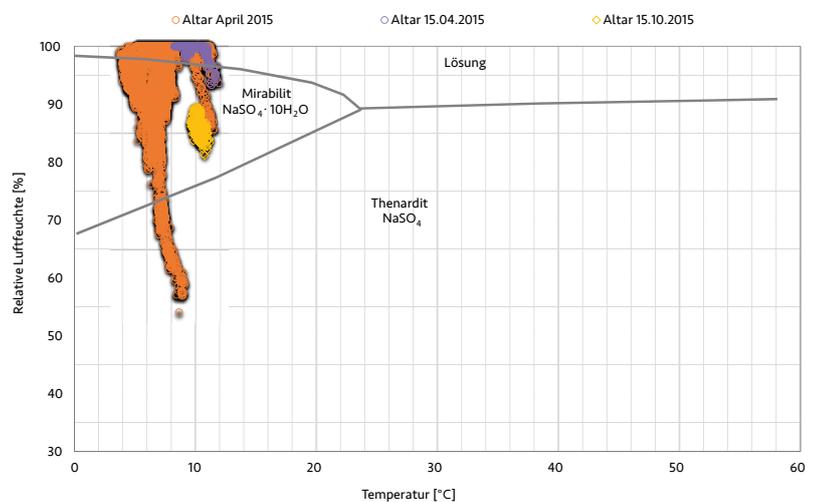
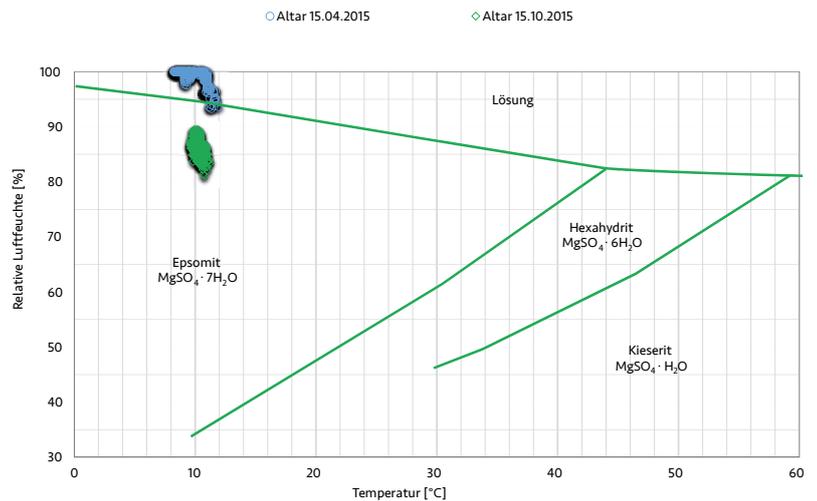
Zusammenfassung

Schäden durch Salze in Kombination mit Feuchte gehören zu den häufigsten und leider auch wirksamsten Schadensprozessen, die an Baudenkmalern auftreten. Das Erkennen von Salz-

schäden, die qualitative und quantitative Analyse der Salze, die Bestimmung der Verteilung am Objekt, die Einleitung und die Kontrolle von Maßnahmen sind Schritte, die fundiertes Wissen verlangen.

In der vorliegenden Studie wurden schwerpunktmäßig folgende Fragen behandelt: Welche Salze werden beobachtet? Wie sind die Salzmischungen zusammengesetzt? Wo treten sie auf? Zu welchen Zeitpunkten, unter welchen Klimabedingungen treten sie verstärkt auf? Wie reagieren die Salze auf natürlich oder anthropogen verursachte Änderungen der Klimaverhältnisse? Welche Schäden werden durch die Salze verursacht?

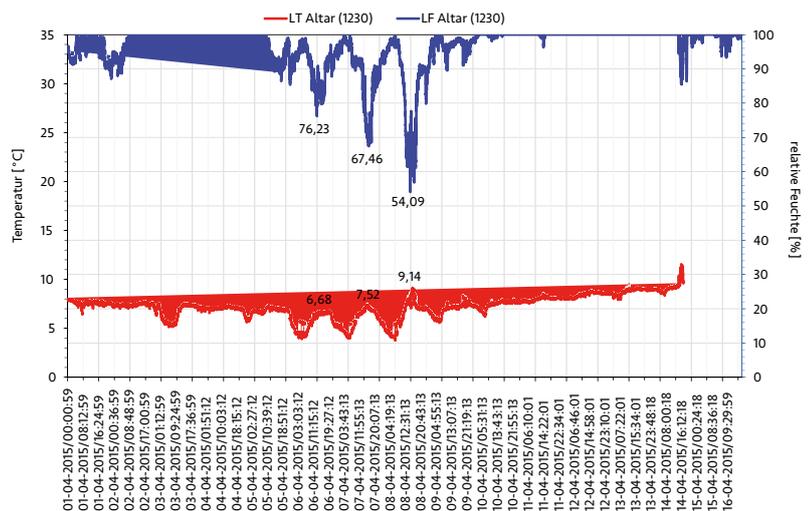
Um diese Fragen beantworten zu können, wurden wohlbekannte Methoden unter Laborbedingungen mit zerstörungsfreier In-situ-Analytik ergänzt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Krypta unter ständig aufsteigender Feuchtigkeit in Kombination mit dem für die Insel Reichenau typischen, oft feuchten und nebligen Klima leidet, und sich dadurch ein dauerfeuchtes Milieu eingestellt hatte. Der enge Kontakt des Gründungsmauerwerks mit dem außenseitig anstehenden Erdreich befördert eine direkte Aufnahme der anstehenden Bodenfeuchte. Raumseitig wird im Bereich der Krypta ein direkter Feuchte-transport bis zur Wandoberfläche erreicht, wobei eine Trocknung infolge der hohen Raum-



[oben] Abb. 20: Raumklima am Altar in der Krypta am 15.4.2015 und 15.10.2015. Vergleichend ist das Phasendiagramm vom Magnesiumsulfat eingezeichnet (MPA, Reeb/Zöldföldi).

[mitte] Abb. 21: Raumklima am Altar in der Krypta am 15.4.2015 und 15.10.2015, bzw. im Laufe des Monats April 2015. Vergleichend ist das Phasendiagramm von Natriumsulfat eingezeichnet (MPA, Reeb/Zöldföldi).

[unten] Abb. 22: Raumklima am Altar in der Krypta in der ersten Hälfte im April 2015. Am 6.4, 7.4 und 8.4 steigt die Temperatur und sinkt die Feuchtigkeit jeweils zwischen 16:30 und 17:00 Uhr (MPA, Reeb).



feuchteverhältnisse sich bisher auf bestimmte Witterungs- und Klimaverhältnisse sowie hauptsächlich auf die Ost- und Südwand beschränkt hat. Die Situation wurde durch die im Mittelalter sowie in den 1860er Jahren durchgeführte Instandsetzungen im aufgehenden Gründungsmauerwerk verschlechtert. Im Umgebungsbereich der Krypta erfolgte seinerzeit aus statischen Gründen eine Erdaufschüttung, die auch heute nicht entfernt werden kann. Die in den 1980er Jahren durchgeführte Sanierung hat das Schadenspotential in der ohnehin stark feuchtebelasteten Krypta durch eine zwischen Mauerwerk und Aufschüttung eingebrachte Teerpappe im Außenbereich nochmals erhöht. Während der jüngst durchgeführten Sanierung (2013/2014) wurde unter anderem die Teerpappe im erdberührten Bereich des Mauerwerks beseitigt, um die weitgehend natürlichen Verdunstungsverhältnisse wiederherzustellen. Auf eine Abdichtung von außen wurde verzichtet. Weiterhin ist eine komplette Neuverputzung der Kirche außen in den 1960er Jahren zu nennen. Dabei wurde ein hochhydraulischer Kalkzementputz verwendet. Dieser Außenputz wurde bei den letzten Restaurierungen belassen, da er weitgehend intakt war und eine Abnahme ohne genaue Kenntnis der konkreten Gefährdungen für den Innenbereich nicht gerechtfertigt schien. Allerdings ist dieser nicht nur für den veränderten Feuchtehaushalt mitverantwortlich, sondern auch als Lieferant für die bauschädlichen Salze nicht zu unterschätzen. Die aktive landwirtschaftliche Nutzung bringt weitere Schadenspotenziale mit sich. Die Zusammensetzung und Verteilung der Salze scheint diese Potenziale widerzuspiegeln. Hohe Belastungen durch Sulfate und teilweise durch Nitrate und Chloride

konnten mithilfe der analytischen Verfahren belegt werden. Mittels zerstörungsfreier In-situ-Methoden wurden häufig verschiedene Hydratphasen von Sulfaten identifiziert. Dabei bringen Natriumsulfate, wie Thenardit und Mirabilit, bzw. die Phasenumwandlung zwischen diesen beiden Phasen ein in hohen Maßen zerstörerisches Potential mit sich, da der Einbau von 10 Wassermolekülen in das Kristallgitter mit einer Volumenexpansion von rund 320 % verbunden ist. Weiterhin wurden die Hydratphasen Epsomit und Kieserit von Magnesiumsulfat, Gips, Bassanit und Anhydrit von Kalziumsulfat bzw. Mischsalze, wie Aphthitalit, Syngenit, Polyhalit, Glauberit und Blödit eindeutig identifiziert. Zusätzlich wurden in vielen Bereichen hygroskopische Salze wie Halit, Niter und Nitratin detektiert, die sich auf den Feuchtehaushalt in oberflächennahen Bereichen auswirken. Das bunte Salzgemisch und die ungleichmäßige Verteilung der Salze lassen wenig Spielraum für die Definition eines neuen Klimakorridors. Die vorhandenen Salze, Salzgemische und übersättigten Salzlösungen reagieren rasch auf jegliche Änderungen des Raumklimas bzw. auf die Ab- und Zunahme der Materialfeuchte des Untergrundes.

Um weitere Schäden durch die bauschädlichen Salze zu mindern, ist ein engmaschiges Monitoring unabdingbar, auskristallisierte Salze sollten umgehend von der Oberfläche abgenommen und aus der Krypta entfernt werden. Da die Opferputze aus dem Jahr 1987 mit bauschädlichen Salzen stark belastet sind, ist ein Austausch all dieser Opferputze notwendig. Weiterhin müssen Maßnahmen zur Salzreduzierung an den originalen Putzen erfolgen.

Literatur

- Bowitz, Jörg / Ehling, Angela: Non-destructive infrared analyses: a method for provenance analyses of sandstones. *Environmental Geology*, 56, 3-4, Berlin 2008, S. 623-630.
- Bowitz, Jörg / Ehling, Angela: Zerstörungsfreie Infrarotspektroskopie – Einsatzmöglichkeiten in der Denkmalpflege, Archäologie und Bauforschung. (Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologischen Landesmuseums 25), Worms 2010, S. 42-46.
- Stacheder, Markus: Die Time Domain Reflectometry in der Geotechnik (TDR for Geotechnical Applications). PhD Thesis. *Schr. Angew. Geol. Karlsruhe*, Vol. 40, Karlsruhe 1996, S. 170.
- Zöldföldi, Judit / Bowitz, Jörg / Grüner, Fritz / Larsich, Sara: St. Salvator – Materialtechnische Analysen am Stubensandstein der Ölbergruppe. *Naturwissenschaftliche Untersuchungen zu Festigungsmaßnahmen*. In: Frick, Jürgen / Zöldföldi, Judit (Hrsg): *Modellhafte Konservierung der anthropogen umweltgeschädigten Felsenkapellen von St. Salvator in Schwäbisch Gmünd*. Abschlussbericht, Stuttgart 2015, S. 93-104.

MIKROBIOLOGIE

Die Gefährdung von Wandmalereien durch mikrobiellen Befall. Möglichkeiten der Prävention und der Abtötung von Schimmel

Cornelia Gehrmann-Janßen, Petra Möhlenhoff, Karin Petersen

Einleitung

Verstärkt seit den 1980er Jahren wird neben anderen auch eine mögliche mikrobielle Schädigung von Wandgemälden diskutiert. Bildet Schimmel auf der Malschicht dunkel pigmentierte Kolonien aus, sind diese in der Regel leicht zu erkennen (Abb. 1). Weitere Besiedlungsformen, wie grüne Algen- oder Cyanobakterienbeläge sind meist ebenfalls offensichtlich, während flächige rosa Verfärbungen (Abb. 2, 3) in manchen Fällen makroskopisch nicht von vergleichbar erscheinenden Fassungen zu unterscheiden sind und daher gar nicht als biogen erkannt werden. Punktuelle Vergrauungen werden hingegen kaum als Schimmelbefall erkannt. Häufig, aber nicht immer kann in solchen Situationen die Beobachtung unter UV-Anregung das Ausmaß der Besiedlung verdeutlichen. Noch schwieriger wird die Zuordnung bei nicht pigmentierten Mikroorganismen, die sehr leicht mit Salzausblühungen verwechselt werden können.

Zur Schadensproblematik

Oberflächenbesiedlung

Bleibt eine Besiedlung auf die Oberfläche des Wandgemäldes begrenzt, kann es sich teilweise um ein rein ästhetisches Problem handeln, das im Wesentlichen die Lesbarkeit der Darstellung beeinträchtigt. Sofern jedoch auch die Ausbildung eines Biofilms in Form einer schleimigen Matrix um die Zellen herum erfolgt, liegt quellfähiges Material der Maleroberfläche auf und

überträgt somit das Quellen und Schrumpfen im Verlauf von Klimaschwankungen auf die Malschicht. Dies kann einerseits zur Schwächung bis hin zur Ablösung führen, andererseits aber durch die Wassereinlagerung in diesem Biofilm auch die Phasen mikrobieller Aktivität verlängern, weiteren Keimen, die aus der Umgebung auf die Oberflächen treffen, das Anhaften erleichtern und zudem auch Stäube mit Nahrungsfunktion aus der Luft aufnehmen und den Mikroorganismen als zusätzliches Substrat zur Verfügung stellen.

Typische Beispiele für eine derartige Oberflächenbesiedlung durch Algen und Cyanobakterien zeigen die Wandmalereien in St. Petri, in Eilsum, Krumhörn, sowie im Herculaneum, Ercolano, Neapel, Italien (Abb. 4).

Abb. 1:
Dunkle Schimmelkolonien, St. Martin, Kreiensen-Greene, Niedersachsen (Hochschule für angewandte Wissenschaft und Kunst – Fachhochschule Hildesheim/Holz-minden/Göttingen).





Mechanische Schädigung und Tiefenbesiedlung

In anderen Situationen bleibt die Besiedlung nicht auf die Oberflächen beschränkt, sondern zieht entweder in tiefere Schichten ein oder bildet sich direkt dort aus. Ebenfalls in St. Petri, Eilsum, ergab sich die Möglichkeit, im Bereich der Kalotte die deutlich markierten Stellen zu untersuchen, an denen im Zuge der Freilegung und Restaurierung Anfang der 1960er Jahre Kaseinhinterspritzungen erfolgt waren, um den Putz wieder am Träger zu fixieren. Hier zeigte sich eine ausgeprägte Besiedlung sowohl durch Bakterien als auch durch Schimmelpilze in der so mit organischem Substrat angereicherten Schicht zwischen Putzrückseite und Träger (Abb. 5). In vergleichbaren Fällen wird hier also die mechanische Schwächung des Gemäldes einerseits durch das injizierte organische Material aber auch durch die in der Folge ausgebildete massive Besiedlung hervorgerufen, da sowohl einige der organischen Festigungsmaterialien als auch der Biofilm selbst mit Quellungs- und Schrumpfbewegungen auf Klimawechsel reagieren und so eine Lockerung und Trennung der Schichten bewirken können.

Zwischen diesen beiden Möglichkeiten der Besiedlung sind Fälle anzusiedeln, bei denen eine spätere Oberflächenfixierung der Malereien durch organische, häufig filmbildende Konservierungsmaterialien erfolgt ist. Es ist davon auszugehen, dass sich unter derartigen Fixierungen ein leicht abweichendes Mikroklima ausbilden kann, das es den Mikroorganismen ermöglicht, sich entweder unter der Fixierung auszubilden



Abb. 2:
Filialkirche St. Jacobus
d. Ä. Urschalling, Prien,
Bayern (HAWK-HHG).

Abb. 3:
Flächiger bakterieller
Befall in St. Jacobi,
Lüdingworth, Cuxhaven,
Niedersachsen
(HAWK-HHG).

Abb. 4:
massive Algen- und
Cyanobakterienbeläge,
Herculaneum, Ercolano,
Neapel, Italien
(HAWK-HHG).

oder aber eine bereits vorhandene und vor dem Auftrag der Oberflächenfixierung nicht vollständig abgereinigte Besiedlung zu verstärktem Wachstum anregt (Abb. 6). Auch in diesen Fällen treten die zuvor beschriebenen Schadensprozesse auf.

Die Ausbildung von Algenbelägen unter frischen Putzergänzungen belegt einerseits die Alkalitoleranz der Algen, aber auch, dass durch diese Putzplomben für die Photosynthese ausreichend viel Licht in tiefere Schichten eindringt.

Säurebildung

Hinreichend bekannt ist die Möglichkeit der Bildung und Ausscheidung von Säuren durch Bakterien und Schimmelpilze, die teilweise auch in technischen Prozessen wie in der Lebensmittelindustrie genutzt wird. In diesem Zusammenhang sei nur verwiesen auf die Herstellung von Zitronensäure aber auch von Sauermilchprodukten, da dies zu einem späteren Zeitpunkt im Zusammenhang mit diskutierten Konservierungsverfahren erneut aufgegriffen werden soll.

Insbesondere Oxalsäure kann von vielen auch Wandgemälde besiedelnden Schimmelpilzen gebildet werden. Auf einigen Objekten konnte das Vorhandensein von Kalziumoxalaten direkt an Pilzhyphen nachgewiesen und daher mit hoher

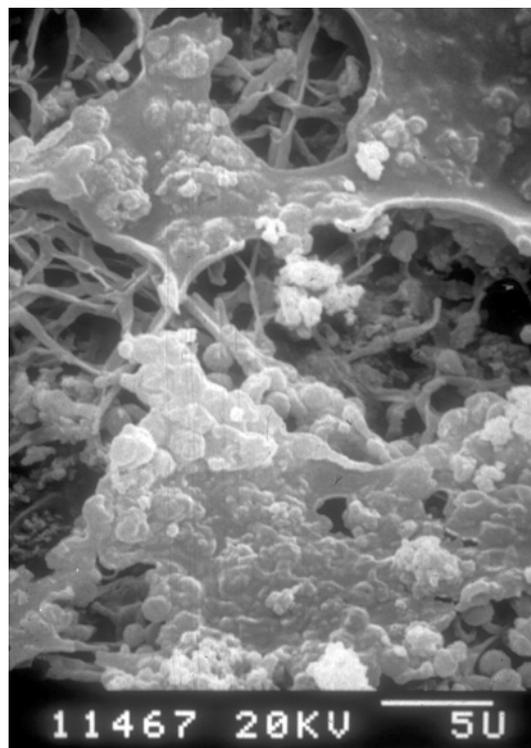
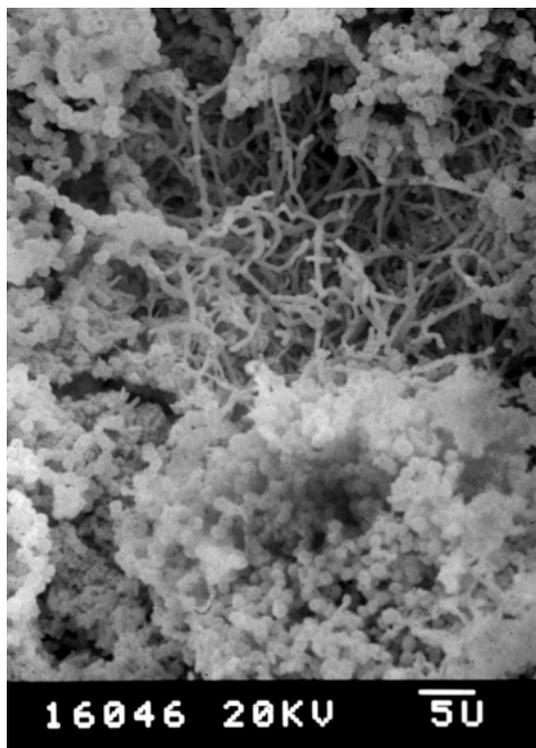
Wahrscheinlichkeit auch der Aktivität der Pilze zugeschrieben werden. In anderen Fällen müssen jedoch gerade für Oxalsäure als Verbrennungsprodukt organischer Materialien andere Quellen angenommen werden (Kilchhofer 2005), insbesondere dann, wenn sich eine entsprechend ausgebildete Besiedlung durch Schimmelpilze nicht feststellen oder aus früheren Situationen nicht ableiten lässt.

Inwieweit auch die für Naturstein beschriebene Bildung von Mineralsäuren durch nitrifizierende oder Schwefel oxidierende Bakterien (Mansch/Bock 1998) auf Wandgemälden eine Rolle spielt, ist nicht ausreichend untersucht.

Bindemittelabbau

Die Substratwirkung natürlicher Bindemittel ist jedem geläufig. Natürlich lassen sich diese Schadensprozesse auch auf Wandgemälden nachvollziehen, wobei sowohl die originalen Bindemittel als auch nachträglich zur Konsolidierung auf- oder eingebrachte Materialien bei entsprechendem Klima das Wachstum heterotropher Mikroorganismen fördern können. Auf diesen Aspekt der Tiefenbesiedlung in Eilsaum wurde bereits hingewiesen.

Testungen zum Abbau von Naturstoffderivaten oder synthetischen Polymeren erlauben es in der



[links] Abb. 5:
Tiefenbesiedlung in Bereichen mit Kalkkasein-hinterspritzung, St. Petri, Eilsaum, Krumhörn, Niedersachsen (HAWK-HHG).

[rechts] Abb. 6:
Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Besiedlung unter einer Klucelfixierung, ev. Kirche Salzhemmendorf, Niedersachsen (HAWK-HHG).

Diagramm 1:
Verwertung unterschiedlicher Substrate durch Isolate der Gattung *Eurotium* (HAWK-HHG).

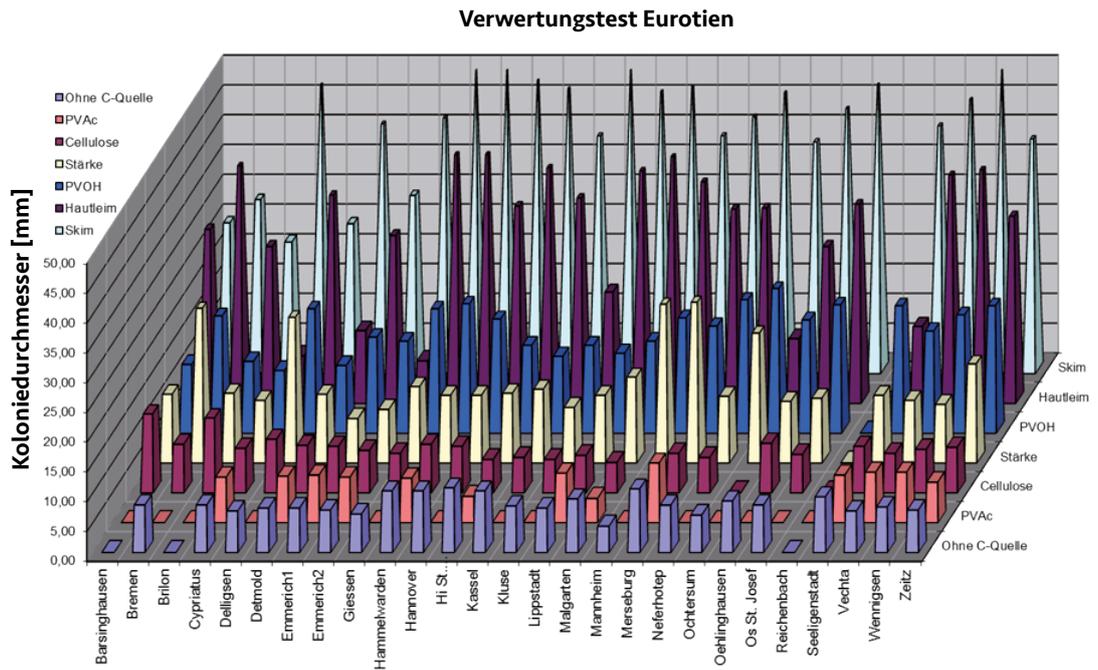
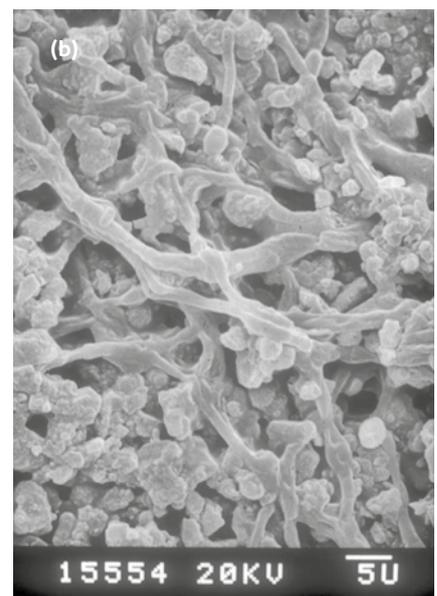


Abb. 7 a:
massive Besiedlung eines modernen Wandgemäldes nach Fixierung mit Paraloid B 72, Salvador de Bahia, Brasilien (HAWK-HHG).

Abb. 7 b:
Detail aus Abb. 7 a, Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme des Schimmels (HAWK-HHG).

Regel nicht, unterschiedliche Ergebnisse ausschließlich auf das jeweilige Polymer zurückzuführen (Diagramm 1), da die Hersteller zugesetzte Hemmstoffe zur Konservierung aber auch andere organische Zusatzstoffe ihrer Produkte nicht ausweisen. Den Zusatz nicht deklarierter Hemmstoffe belegte Christiane Heyn (2002) durch ihre Untersuchungen. In fünf der sechs darauf getesteten Produkte wurde nicht angegebenes Formaldehyd nachgewiesen. Methylisothiazolol fand sich in zwei der drei getesteten Polymerprodukte, ebenfalls nicht deklariert. Auch gilt daher das Ergebnis von Testungen auf

die Substratwirkung der Festigungsmittel streng genommen nur für das jeweils getestete Gebinde, da bei anderen Chargen durchaus nicht deklarierte veränderte Zusätze möglich sind. Als Beispiele für die Besiedlung synthetischer Polymere in situ seien hier Wandmalereien in Salvador de Bahia, Brasilien, nach einer Festigung mit Paraloid B 72 (Abb. 7) sowie an den Deckengemälde in St. Mauritius, Ibbenbüren, St. Petri, Eilsun, und der Sigwardskirche, Idensen-Wunstorf (Abb. 8), nach Acrylatfestigung genannt. Im Hinblick auf Zellulosederivate wird auf die Besiedlung in der Benediktinerinnen-

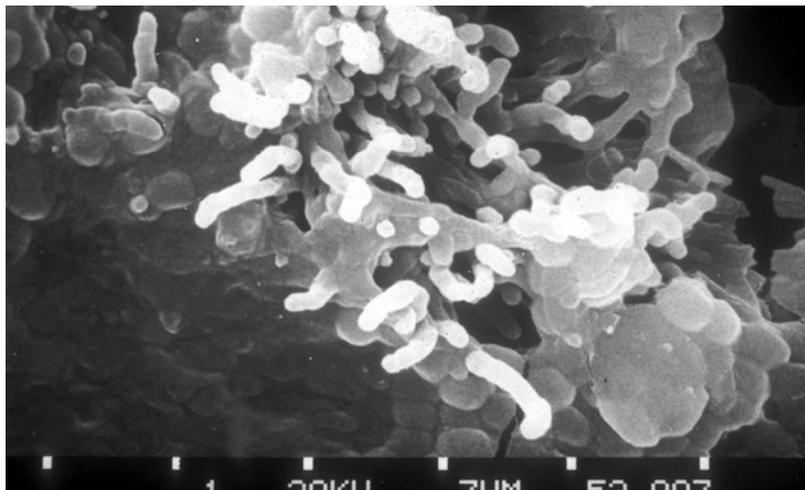


Abtei am Nonnberg, in Salzburg, Österreich, nach einer Festigung mit Klucel E sowie auf Laboruntersuchungen in anderem Zusammenhang zur Substratwirkung verschiedene Zelloseether und Methylzellulosen (Gerling 2012; Sindling-Maushardt/Petersen 2007) verwiesen.

Veränderungen von Pigmenten

Durch verschiedene mikrobielle Prozesse sind Farbveränderungen von Pigmenten möglich. Seit Langem beschrieben sind die durch Schwefelwasserstoff bildende Bakterien hervorgerufenen Verschwärzungen von Bleiweiß (Petrushkova/Leilikova 1986). Es muss jedoch betont werden, dass es sich in situ bei derartigen Verdunklungen von Bleiweiß durchaus auch um Bleidioxid handeln kann, entsprechende Analysen wären hier also unerlässlich, bevor dieser Schadensprozess postuliert wird.

So ließ sich für das verbräunte Bleiweiß in der Deckenausmalung der Sala Terrena von Schloss Weißenstein, Pommersfelden, Kr. Bamberg, auch nach intensiver Bearbeitung von 80 Probenstellen ein Zusammenhang zwischen der Verbräunung und den von diesen Stellen erzielten Isolaten nicht aufzeigen. Keines der Isolate führte in entsprechenden Labortestungen zu der am Objekt nachgewiesenen Bleidioxidbildung. Die Oxidation von Eisen und Mangan durch Pilzisolat konnte dagegen in Laboruntersuchungen nachgewiesen werden (Petersen et al. 1987). Gerade diese Prozesse werden auch für die Ausbil-



dung von Petroglyphen – hier im positiven Sinne – zumindest mitverantwortlich gemacht (Grote/Krumbein 1993).

Die Vergrünung von Azurit konnte im Laborversuch durch *Cladopsorium* sp. erreicht und auf die Exkretion von Essigsäure durch dieses Isolat zurückgeführt werden. Ob diese Prozesse auch am Objekt erfolgten, bleibt wegen fehlender Analysen offen, kann aber angenommen werden.

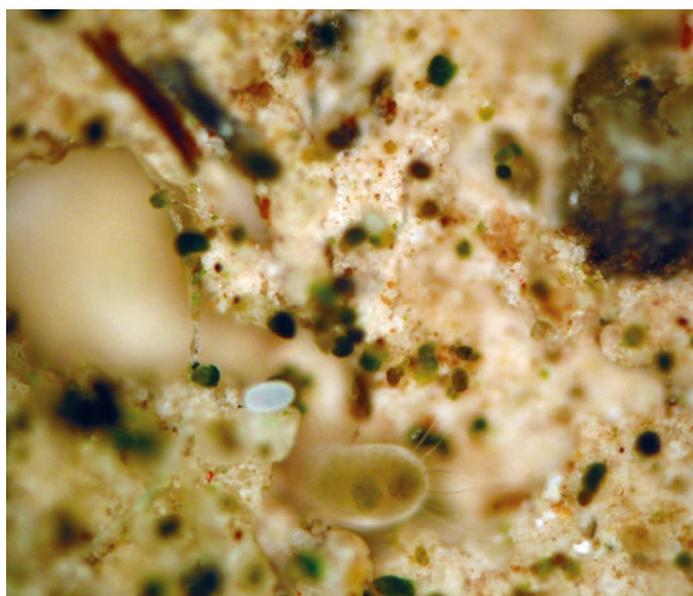
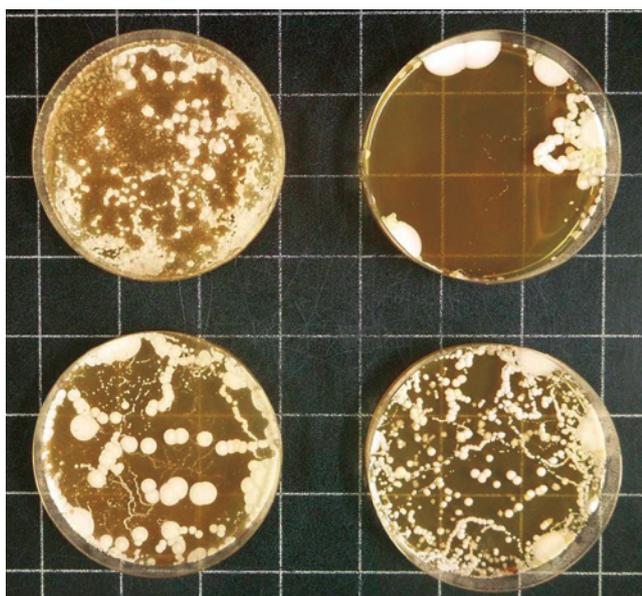
Einfluss von Insekten

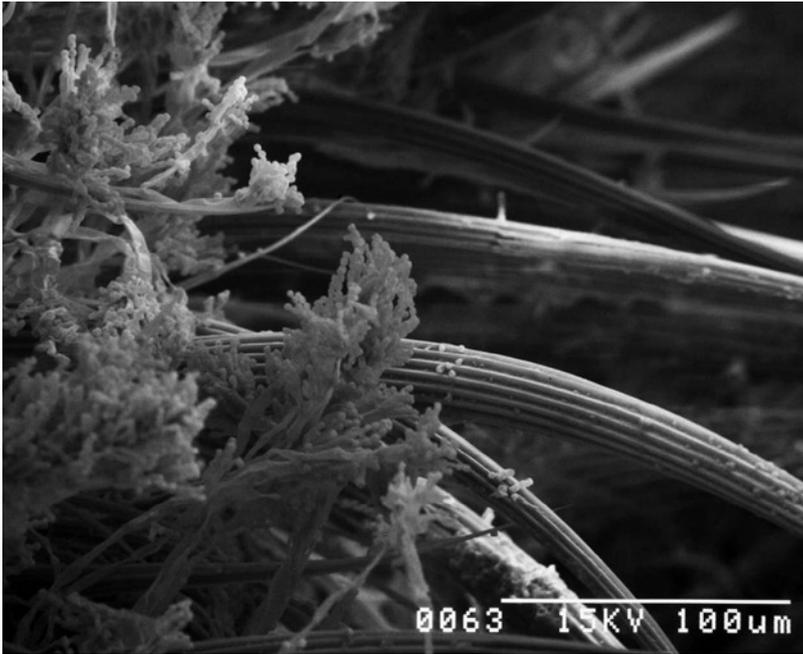
Nicht übersehen werden sollte auch der Einfluss, den Insekten auf eine mikrobielle Besiedlung nehmen können. Lebende gesunde wie auch bereits geschwächte Tiere können zunächst einmal für die Verbreitung von Sporen aber auch von

[oben] Abb. 8: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme der Besiedlung unter einer Acrylatfixierung, Sigwardskirche, Idensen-Wunstorf, Niedersachsen (HAWK-HHG).

[unten links] Abb. 9: Entwicklung von Bakterienkolonien auf nicht beimpften Nährmedien durch die Verbreitung von Bakterienzellen auf den Laufwegen von Milben (HAWK-HHG).

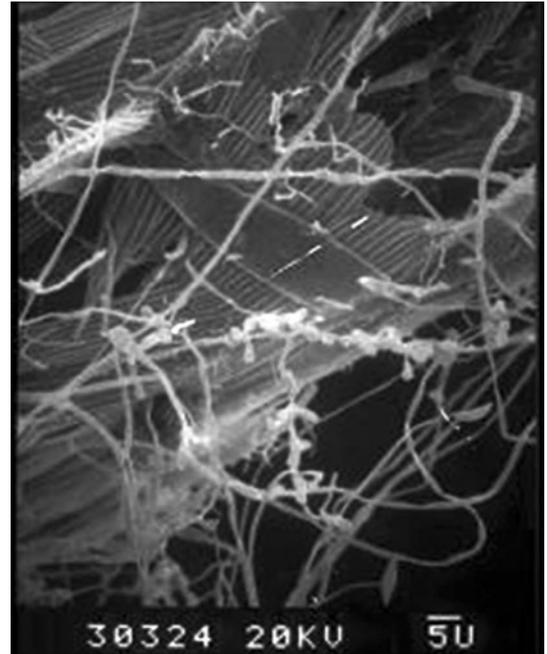
[unten rechts] Abb. 10: Milbe nach der Aufnahme kokkaler Algenzellen (HAWK-HHG).





[links] Abb. 11:
Entwicklung von *Penicillium* sp. auf Insektenresten (HAWK-HHG).

[rechts] Abb. 12:
Entwicklung von Schimmelpilzen an einem Flügel abgestorbener Insekten, Krypta St. Kodersdorf, Sachsen (HAWK-HHG).



Bakterien auf der Malerei sorgen (Abb. 9). Den Tieren dienen die Keime zum Teil als Nahrungsquelle (Abb. 10).

Andererseits werden die Insekten auch parasitär befallen oder die nach ihrem Absterben auf der Malerei verbleibenden Tiere werden saprophytisch als Nahrungsquelle von den Mikroorganismen genutzt (Abb. 12, 13). Auch die teils von den Insekten exkretierten Verdauungsenzyme spalten die Polymere der Malschicht oder von Fixierungen und diese Spaltprodukte wie auch Exkremente der Insekten können als Substrat von Mikroorganismen genutzt werden (Burghard 2009).

Grundsätzliches zu den Lebensbedingungen verschiedener Mikroorganismen

Bei den Lebens- und Wachstumsbedingungen der verschiedenen Mikroorganismen ist zunächst die ausreichende Verfügbarkeit von Feuchte zu erwähnen, wobei diese nicht zwingend in Form von flüssigem Wasser vorliegen muss. Alle anderen Parameter können in geeigneter Weise zur Verfügung stehen, dennoch wird sich bei fehlendem Feuchteangebot keine mikrobielle Aktivität einstellen und damit eine Besiedlung nicht aufbauen, was jedoch keineswegs

heißt, dass Zellen ohne diese Feuchtigkeit absterben.

Bei ausreichender Versorgung mit anorganischen und organischen Nährstoffen lässt sich die gegenseitige Beeinflussung von Feuchte- und Temperaturansprüchen in entsprechenden Laboruntersuchungen verdeutlichen (Diagramm 2). Auch zeigt sich, dass Prozesse wie das Quellen von Sporen und Auswachsen von Hyphen sowie die Ausbildung ungeschlechtlicher Sporen (Konidien) oder von Fruchtkörpern bei Pilzen durchaus in ihren Ansprüchen an das Klima abweichen können (Diagramm 3). Diese Abweichungen wurden in Langzeitversuchen für ein von der Ausmalung der Kuppel in St. Joseph, Osnabrück, erzieltes *Aspergillus restrictus* Isolat untersucht, wobei für letzteres auch die Bildung von Fruchtkörpern belegt ist.

Auf diese gegenseitige Beeinflussung der Parameter Feuchte und Temperatur soll unter dem Aspekt der Prävention erneut eingegangen werden.

Restauratorisch/konservatorische Eingriffe und deren mögliche Auswirkungen

Nach Darlegung der wichtigsten Voraussetzungen für mikrobielle Aktivität und damit einher-

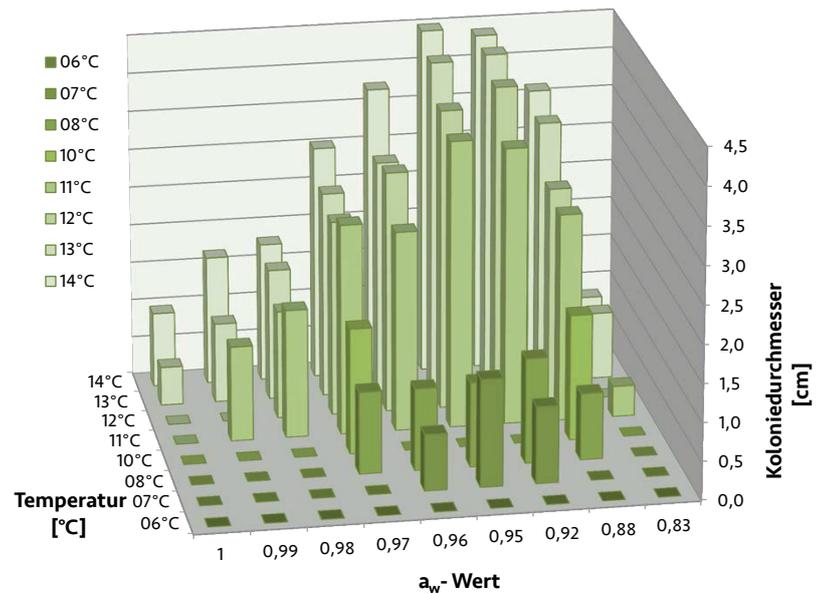
gehende Schadensprozesse sollen nun die wesentlichen Auswirkungen gängiger restauratorisch/konservatorischer Eingriffe beschrieben werden, um für möglicherweise daraus resultierende wachstumsfördernde Effekte zu sensibilisieren.

Feuchtezufuhr

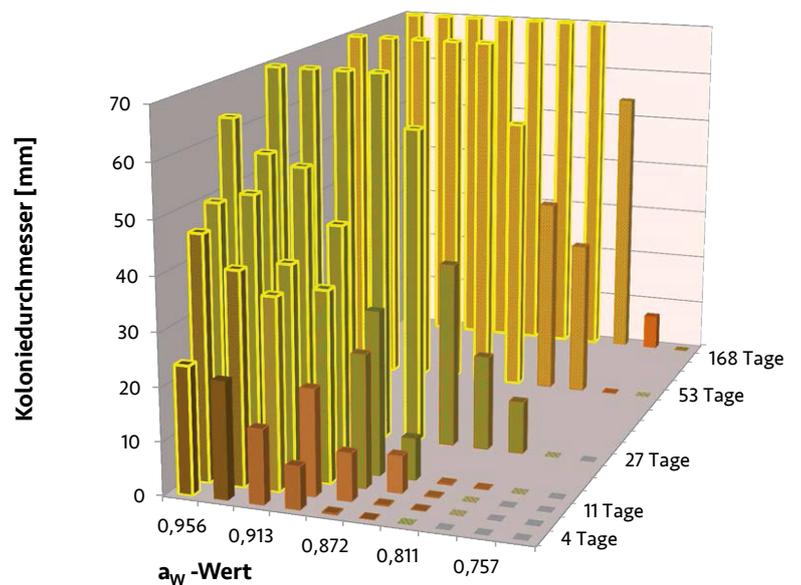
Die auf den ungereinigten teils über Jahrzehnte verstaubten Oberflächen abgelagerten Keime können wegen der durch konservatorische Eingriffe erhöhten Feuchte aktiviert und deren Wachstum ermöglicht werden. Diese Effekte benötigen häufig weniger als 48 Stunden, um eine massive Besiedlung zu erzeugen. Dass diese Phänomene auch auf nicht gefassten Natursteinoberflächen auftreten, belegt die ausreichende Substratwirkung von Stäuben, die neben der Nahrungsfunktion auch Mengen keimfähiger Zellen enthalten können. In eigenen Untersuchungen konnten aus Kirchen mit stark pilzbelasteten Wandmalereien bis zu 4.000.000 keimfähige (Kolonie bildende Einheiten: KBE) Schimmelsporen pro Gramm Staub in Kultur gebracht werden.

Weitere Feuchtequellen sind natürlich durch typische Baumängel wie aufsteigende Feuchtigkeit, fehlende Wasserableitungssysteme, defekte Fenster und Türen, über das Dach eindringendes Regenwasser oder Schnee aber auch durch Eingriffe in das Klima gegeben, deren Auswirkungen häufig durch entsprechende Simulationen nicht vorhergesehen und kaum über entsprechende Vorhersagefunktionen im Detail berechnet werden können, weder für sich ausbildende Mikroklimata noch für die Reaktion der verschiedenen Materialien, aus denen ein Wandgemälde aufgebaut ist.

In diesem Zusammenhang sollte auch der Einfluss direkter Sonnenbestrahlung auf das Mikroklima der betroffenen Malereiflächen und damit auf die Beeinflussung eines Besiedlungsaufbaus nicht unerwähnt bleiben, was keineswegs nur für die phototrophen, lichtabhängigen Mikroorganismen gilt.



A. restrictus, Kultur bei 20 °C



[oben] Diagramm 2:
Wachstum von *Eurotium* sp. in Abhängigkeit von der Temperatur und Feuchtigkeit (Wasseraktivität, a_w -Wert) (HAWK-HHG).

[unten] Diagramm 3:
Entwicklung von *Aspergillus restrictus* bei unterschiedlicher Feuchteverfügbarkeit (a_w -Werten) Markierte Bodenflächen belegen Sporenquellung, einfarbige Balken die Entwicklung von Kolonien, punktierte Balkenflächen die Ausbildung ungeschlechtlicher Konidien, umrandete Balken zudem die Ausbildung von Fruchtkörpern (HAWK-HHG).

Salzverminderung

Als häufig zu beobachtende Auswirkung von Salzverminderungskompressen wird das Auftreten von teils massivem Schimmelbefall beobachtet. Dies erklärt sich im Wesentlichen daraus, dass den Oberflächen massiv Feuchtigkeit zugeführt wird, die auf den Oberflächen aufliegende Überdauerungsformen, wie Sporen sie darstellen, aktiviert und so für die Ausbildung einer Besiedlung sorgt. Auch nach Abnahme der Kompressen verbleibt die Feuchtigkeit für einen län-

Abb. 13:
von links nach rechts
Substratwirkung von
Ethanol 0,1%ig (Glas 1
und 2) und Methanol
0,1%ig (Glas 3 und 4)
auf *Cladosporium
cladosporioides* (HAWK-
HHG).



geren Zeitraum in der Malerei, was zu einer weiteren Ausbreitung des Befalls führen kann, es sei denn, es werden nur wiederholt kurzzeitig Kompressen aufgebracht und die Erhöhung der Materialfeuchte tritt aus diesem Grund nicht in nennenswertem Ausmaß ein.

Festigung/Konsolidierung

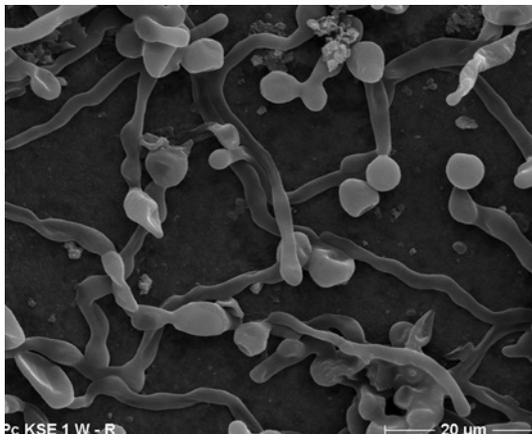
Einbringen von Konsolidierungsmaterialien mit Substratwirkung

Organische Bindemittel sind als Nahrungsquellen für Mikroorganismen geeignet. Laborbestungen belegen als kritische Phase das Einbringen der Materialien insbesondere in wässrig gelöster Form, da hier zeitgleich sowohl ausreichende Feuchtigkeit als auch das noch nicht ausgehärtete organische Material vorliegen. Zur Wirkung organischer Lösemittel in geringerer Konzentration ist ebenfalls auf deren mögliche Nahrungsfunktion zu verweisen. Aber auch die Langzeitwirkung von organischen Materialien ist zu beachten. Selbst ausgehärtete Polymerfilme – nicht nur natürliche Polymere, sondern auch synthetische Polymere besitzen nachgewiesenermaßen eine Nahrungsfunktion. Auch dies wurde in Laboruntersuchungen wie in situ belegt (Heyn et al. 1996; Köstler 2001) und im Abschnitt Bindemittelabbau diskutiert. Auch auf die mögliche Beeinflussung des Mikroklimas durch organische Festigungsmittel wurde im Abschnitt Oberflächenbesiedlung verwiesen.

KSE-Problematik

Ist bekannt, dass ein Eingriff in das Klima aus den verschiedensten Gründen nicht erfolgen kann, um über diese Veränderung das mikrobielle

[links] Abb. 14:
Rasterelektronische Aufnahme der Schimmelentwicklung (*Penicillium* sp.) auf KSE gefestigtem Dummie (HAWK-HHG).



[rechts] Abb. 15:
Perjodschißsäure Anfärbung des besiedelten Bereichs (*Penicillium* sp.) auf nicht KSE gefestigtem Bereich des Dummies, Versuchsdauer 7 Tage (HAWK-HHG).



Wachstum zumindest deutlich zu verzögern, wenn nicht sogar vollständig zu unterbinden, ergibt sich die Frage nach dem Einsatz von Materialien, die das Wachstum von Mikroorganismen nicht fördern. In derartigen Situationen ist die Anwendung von Kieselsäureestern zu überlegen, da diese einerseits nach dem Abbinden keine organischen Materialien hinterlassen und zudem in der Regel ein als biozid wirksam bekannter Katalysator enthalten ist.

Mehrfach wurde jedoch in der Vergangenheit über intensive Schimmelbildung nach dem Einsatz verschiedener KSE Produkte berichtet, was zum Anlass für umfangreiche Laboruntersuchungen genommen wurde.

Zunächst einmal zeigte sich, dass die biozide Wirkung von Dibutyltinnlaurat deutlich geringer ausfiel, als erwartet.

Für den bei der Anwendung von Methyl KSE entstehenden Methylalkohol konnte im Laborversuch ebenso wie für den aus Ethyl KSE entstehenden Äthylalkohol eine Substratwirkung für solche Isolate gezeigt werden (Abb. 13), die von zuvor KSE gefestigten Objekten erzielt worden waren (Scheer 2007; Pohl/Reibold-Mühebach 2007).

Allerdings fiel die Wachstumsförderung für Äthylalkohol deutlich stärker aus. Im Laborversuch ließ sich das Wachstum auf KSE gefestigten Dummies nachweisen (Abb. 14). Messungen der Alkoholkonzentration im Material ergaben bereits sieben Tage nach der Festigung Konzentrationen, die als das Wachstum fördernd angesehen werden müssen. Zur Desinfektion ausreichende Konzentrationen wurden dagegen zu keinem Zeitpunkt erreicht.

Da sich in situ insbesondere in geschlossenen Räumen häufig die infolge der Anwendung eintretende Besiedlung auch auf solchen Flächen zeigte, die nicht gefestigt worden waren, ergab sich die Frage nach der Substratwirkung über die Raumluft.

Ebenfalls im Laborversuch wurden daher Dummies nur teilweise mit KSE behandelt und in diesen Bereichen aber auch an Stellen über dem gefestigten Bereich mit Sporen beimpft und die Proben in geschlossenen Behältern bei geeigneter Feuchte inkubiert. Nach drei Wochen erfolgte der Nachweis, dass sich auch in den nicht gefestigten Bereichen eine Besiedlung aufgebaut hatte. Der bei der Reaktion frei werdende Alkohol hat also auch an den nicht direkt behandelten Bereichen den Aufbau einer Besiedlung ermöglicht. Abbildung 15 zeigt den besiedelten

Bereich nach einer Anfärbung (Pohl/Reibold-Mühebach 2007).

Die hier aufgezeigte Problematik ergibt sich nicht mehr, nachdem der entstehende Alkohol entwichen ist. Langfristig wird also durch die KSE Festigung kein weiteres organisches Substrat mit Substratfunktion eingebracht. Der Einsatz eines Alkoholabsorbers konnte bei den Festigungsmaßnahmen in der Stiftskirche Gernrode einen Pilzbefall vollständig unterbinden (DBU-Projekt, AZ: 26289).

Abnahme von Überzügen durch Spaltung von Polymeren

Die Ausdünnung von Oberflächenfixierungen kann auf unterschiedliche Weise erfolgen. Werden hier teils giftige Lösungsmittel in konzentrierter Form eingesetzt, so ist zunächst nicht mit einer Aktivierung von Mikroorganismen zu rechnen. Längerfristig könnten jedoch diese Lösungsmittel, wenn sich die Konzentrationen im Material deutlich verringert haben, selbst eine Substratfunktion übernehmen, wie diese für Alkohol bei der KSE Anwendung gezeigt wurde.

Sind derartige Eingriffe geplant, sollte bei nachgewiesener Besiedlung durch Schimmelpilze zuvor ausgeschlossen werden, dass durch diesen Schimmel am Objekt Mykotoxine gebildet wurden, da sich diese in einigen der gängigen organischen Lösungsmittel ebenfalls lösen lassen. Benannt werden soll die Lösung von Ochratoxin in Ethylacetat, das zum Ausdünnen von Acrylaten eingesetzt werden kann. Neben der grundsätzlichen Gesundheitsproblematik beim ungeschützten Umgang mit organischen Lösungsmitteln, ist hier zudem die Mobilisierung des Mykotoxins zu erwarten.

Gerade in derartigen Situationen bietet sich der Einsatz von geeigneten Enzymen zur Reduzierung schädigender Oberflächenfixierungen an. Bei der Anwendung von Enzymen zur Spaltung der Polymere sind verschiedene Aspekte zu berücksichtigen. Einerseits erfolgt diese in der Regel wässrig, erhöht damit die Materialfeuchte und fördert somit die mikrobielle Aktivität. Zudem erfolgt die Spaltung der Polymere in die einzelnen Monomere, was zur Folge hat, dass auch Mikroorganismen, die selbst nicht über entsprechende Enzyme zur Verwertung der ursprünglichen Polymere verfügen, nun die gebildeten Monomere als Substrate verwerten

Abb. 16:
Klimaboxen mit definierter Luftfeuchte zur in situ Kontrolle der mikrobiellen Aktivität und möglicher Salzkristallisation im Jahreszyklus (HAWK-HHG).

Abb. 17:
Nebelversuch in St. Joseph, Osnabrück, zur Verdeutlichung der Luftbewegung (HAWK-HHG).

können. Hier wäre es also erforderlich, die gebildeten Spaltprodukte möglichst vollständig aus dem Objekt zu entfernen, was einen enormen technischen Aufwand bedeuten kann.

Sascha Beutel (2000) belegt in seinen Untersuchungen die technische Machbarkeit, die bis zur Anwendungsreife ausgearbeitet werden konnte (Beutel et al. 2002). Hier wurde nicht nur durch eine geeignete Form der Enzymapplikation durch das Immobilisieren an Membranen ein Eindringen der Enzyme in tiefere Schichten des Wandgemäldes verhindert, sondern auch die als freie Aminosäuren leicht verwertbaren entstehenden Spaltprodukte des abzubauenen Kaseinfilms kontrolliert von der Wandmalerei abgeführt. Nicht zuletzt ist mit der erarbeiteten

Anlage auch die exakte Bestimmung des Endpunkts der Spaltung des Kaseinfilms gelungen. Seit einigen Jahren wird bereits die mehr oder weniger gezielte Anwendung von Mikroorganismen zur Materialverbesserung (Bioremediation) auch im Rahmen von groß angelegten EU-Projekten erprobt (Biobrush), wobei auf die konsolidierenden Eigenschaften Biocalzit oder Kalziumoxalat bildender Mikroben oder die Salzverminderung durch Nitrat reduzierende oder Sulfat reduzierende Bakterien hier nicht näher eingegangen werden soll. Allerdings wäre zu bemerken, dass hier aus Sicht der potentiellen Anwender durchaus noch offene Fragen verbleiben, so im Hinblick auf die Materialverträglichkeit aber auch auf die möglichen Einschränkungen z. B. durch das Vorhandensein giftiger Pigmente in der Malschicht, die zu einer Hemmung der biochemischen Prozesse in situ führen können (Berger-Tomajér 2006).

Ausführlicher soll die Problematik des Aufbringens von Mikroorganismen zur Reduzierung von organischen Festigungsmitteln erörtert werden. Es wurde hier sowohl die Möglichkeit gezielt aufgebraachter Mikroorganismen als Reinkulturen angedacht, als auch die Anwendung sogenannter „effektiver Mikroorganismen“ in einer mehr oder weniger undefinierten Mischung.

Es steht außer Frage, dass sich in derartigen Mischkulturen auch Organismen befinden, welche die störenden Polymerfilme spalten und diese als Nahrungsquelle nutzen können. Weniger klar wird jedoch die Frage untersucht, ob und wie sich die aufgebraachten Mikroorganismen nach getaner Arbeit wieder vom Objekt entfernen lassen – das empfohlene Abwischen mit einem Lappen führt hier definitiv nicht zur Reinigung – oder ob im Anschluss an diese Anwendung mit giftigen Bioziden eine Abtötung erfolgen muss.

Die Tatsache, dass in der genannten Mischung „effektiver Mikroorganismen“ zu großen Teilen auch Bakterien enthalten sind, die zur Gruppe der Milchsäurebakterien gehören und die – wie der Name besagt – Milchsäure produzieren, sollte bei der Empfehlung dieser Mikroben auf calzitischen Systemen wie Wandgemälden bereits aufhorchen lassen, insbesondere da im Begleitschreiben vermerkt ist, dass eine Anwendung nur erfolgen sollte, solange der pH Wert der Mischung unter 4,5 liegt. Eine Kontrolle, welche Mikroben sich am Objekt nach dem Aufbringen entwickeln, ist bei dieser Applikationsform nicht gegeben, auch dies spricht gegen das



vorgeschlagene Verfahren, obwohl wie bereits eingangs bemerkt sicherlich ein Ausdünnen der Festigungsmaterialien erwartet werden kann. Zusammenfassend scheint hier der Weg, mit gebundenen Enzymen gezielt zu arbeiten, der deutlich für das Objekt sicherere zu sein, auch wenn bis zur Routineanwendung für unterschiedliche Situationen und Festigungsmittel noch weitere Grundlagenforschungen erforderlich wären.

Möglichkeiten der Prävention und Abtötung

Klimaveränderung

Der logischste Ansatz besteht darin, das Klima im Objekt so zu beeinflussen, dass mikrobielle Aktivität unterbunden wird. Es stellt sich jedoch gleich die Frage nach einer möglichen Salzbelastung der Gebäude, da Wand- und Deckengemälde in der Regel integraler Teil der sie tragenden Architekturoberflächen sind und daher nicht losgelöst von diesen betrachtet werden können. Im realen Objekt lassen sich derartige Wechselwirkungen in Mikroklimate mit über gesättigte Salzlösungen definiert eingestellten Luftfeuchten für einen längeren Zeitraum beobachten (Abb. 16) und danach auch die Anforderungen formulieren, bei denen die mikrobielle Aktivität soweit möglich verringert werden kann, ohne dass dies zu Kristallisationszyklen der vorhandenen Salze führt.

Die Erfahrung zeigt zudem, dass sich die Auswirkung derartiger Eingriffe nicht unbedingt vorausberechnen lassen, zumindest nicht, was die sich einstellenden Mikroklimate angeht.

Auch wird dringend angeraten, z. B. die Effektivität von Lüftungsanlagen in situ durch entsprechendes Sichtbarmachen der sich ergebenden Strömungsverhältnisse zu überprüfen. Nebelversuche in St. Joseph, Osnabrück (Abb. 17), belegten so, dass die installierte Lüftungsanlage die Kuppel und die darauf ausgeführten Deckenmalereien zumindest zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführung nicht erreicht.

Ob sich durch ein leichtes Anheben der Raumtemperatur und die damit einhergehende Absenkung der relativen Luftfeuchte die Lebensbedingungen für Schimmelpilze tatsächlich verschlechtern, bleibt im Einzelfall zu prüfen, da sich im Bereich der in Kirchen realisierbaren Temperaturen bei moderatem Anheben der

Temperatur die Ansprüche an die erforderliche Feuchte verringern (Diagramm 2, 3). Hier ist auch darauf hinzuweisen, dass in den bisher untersuchten Objekten mit entsprechenden Klimaschwankungen die Spanne für mikrobielle Aktivität im Hinblick auf die verfügbare Feuchte deutlich breiter ist, als dies nach den Ergebnissen von Laborversuchen bei konstanten Wachstumsparametern zu erwarten wäre.

UV-C Bestrahlung

Mehrfach auch in Objektsituationen erprobt wurde die Anwendung von UV-C Strahlung, die durchaus sowohl im Laborversuch als auch in situ erfolgreich verlief (Tinzl et al. 1995; Hilge et al. 1998). In jüngster Zeit konnten im Rahmen eines DBU-Projektes (AZ: 31440) in der Crodellhalle der Moritzburg, Halle, erneut Testflächen behandelt werden, wobei hier die Möglichkeit bestand, tatsächlich auch Material zu entnehmen und auf den Keimgehalt hin zu untersuchen, da die entsprechenden Putzflächen außerhalb des eigentlichen Wandgemäldes ohnehin abgenommen werden mussten. Es wurden ein feuchter und ein eher trockener Bereich zunächst sowohl auf der Oberfläche durch das gezielte Aufsprühen als auch durch die Injektion definierter Keimsuspensionen in der Tiefe (2 cm) infiziert und nach der Anwendung auf die Auswirkung der Behandlung mit einer handelsüblichen germiciden Leuchtstoffröhre im Abstand von 30 bis 40 cm hin untersucht, wobei eine Energie von 2.100 mW/m² erreicht wurde. Es zeigte sich eine starke Verringerung der Oberflächenbelastung nach 24 stündiger UV-C Bestrahlung (Tabelle 2). Auch bei einer vergleichbaren Anwendung an mit Algen besiedelten Putzflächen wurden Verringerungen der Photosyntheseleistung um bis zu 74 % erreicht.

Untersuchungen zur Materialverträglichkeit für die gängigsten freskal tauglichen Pigmente sind bereits erfolgt, müssten aber vor einer generellen Empfehlung zur Anwendung auf Malschichten ergänzt werden.

Auch im Zusammenhang mit Salzverminderungskompressen ließ sich das Risiko eines Schimmelbefalls durch die vorherige UV-C Bestrahlung deutlich reduzieren, wie in situ Versuche im Heiligen Grab in Gernrode und begleitende Laboruntersuchungen belegen (DBU-Projekt AZ: 26289). Wobei hier auch gezeigt werden konnte, dass bei der Anwendung mineralischer

Tabelle 1: Temperaturerhöhung an den Probenflächen nach Anwendung der Mikrowelle in situ.

Musterfläche	MFL 5	feuchte Wand Ostseite				
Probestelle	0	1	2	3	4	5
Art der Probe	ohne Keiminjektion und Keimbelegung und ohne Mikrowellenbestrahlung	mit Keiminjektion und Keimbelegung und ohne Mikrowellenbestrahlung	mit Keiminjektion und Keimbelegung und mit Mikrowellenbestrahlung			
Bestrahlungsdauer in Minuten	0	0	5	15	45	125
Erwärmung an der Oberfläche von x auf y in °C	-	-	16-32	16-85	16-94	16-96
Temperaturdifferenz in °C	-	-	16	69	78	80
Durchmesser des Fleckes, der wärmer ist als die Hälfte der Temperaturdifferenz, ca. in cm	-	-	20	20	20	23
Stempelprobe						
Materialprobe						

Tabelle 2: Effekt der Mikrowellenbehandlung in situ (KBE/25 cm²).

Behandlung	Fläche 2 trockener Bereich	Fläche 5 feuchter Bereich
ohne Keimsuspension, ohne Mikrowelle	160	>1.000
ohne Keimsuspension, ohne Mikrowelle	>1.000	>1.000
mit Keimsuspension, 5 Minuten Mikrowelle	> 350	>1.000
mit Keimsuspension, 15 Minuten Mikrowelle	315	>1.000
mit Keimsuspension, 45 Minuten Mikrowelle	310	150
mit Keimsuspension, 125 Minuten Mikrowelle	150	47

Tabelle 3: Effekt der p-Chlorometacresol Anwendung über die Gasphase auf eine Schimmelpilzmischkultur durch Anzucht auf Malzextraktmedium (MEA) oder Dichloranmedium (DG 18).

Mischkultur	Dauer pCMK	KBE/7,5 cm ² MEA	KBE/7,5 cm ² DG 18
	0 h	> 500	> 500
Oberseite, feucht	24 h	> 500	> 500
Oberseite, feucht	48 h	306	486
Oberseite, feucht	7 Tage	260	279
Oberseite, feucht	10 Tage	1	2
Unterseite, feucht	10 Tage	98	97
Oberseite, trocken	10 Tage	370	> 500
Unterseite, trocken	10 Tage	436	> 500

Komponenten die Gefährdung ebenso geringer ist (Diagramm 4), wie nach einer gründlichen Staubabnahme vor dem Aufbringen der Kompressen.

Ionisation

Eine weitere Möglichkeit der Desinfektion und der Vermeidung eines Besiedlungsaufbaus ergibt sich durch die Anwendung von Ionisationsgeräten. Ebenfalls in der Crodellhalle konnte an gezielt beimpften, trocken oder feucht gelagerten Dummies nach 21 Tagen Versuchsdauer mit der Ionisationsanlage RL 200 der 3FP GmbH, Leipzig, eine vollständige Abtötung der Keime auf den Oberflächen der Versuchskörper erreicht werden (Diagramm 5). Die im Raum erzielte Sauerstoffionenkonzentration lag zwischen 2.000.000 direkt an der Anlage und 1.000.000 Ionen in der Raummitte.

In parallel verlaufenden Testungen (Birresborn 2016) zeigten sich jedoch sowohl eine chemische Veränderung an einigen Festigungsmaterialien als auch für einige Pigmente leichte Aufhellungen. Es gilt in ergänzenden Laboruntersuchungen zu überprüfen, ob es sich tatsächlich um Veränderungen der Pigmente oder nur um ein Ausdünnen der Pigmente auf den bestrichenen Glaträgern handelt.

Die hier vorgestellte Desinfektionsmaßnahme stellt eine vielversprechende Alternative dar, muss jedoch in weiteren Untersuchungen zwingend auf ihre Materialverträglichkeit und damit auf mögliche Einschränkungen in der Anwendbarkeit hin geprüft werden.

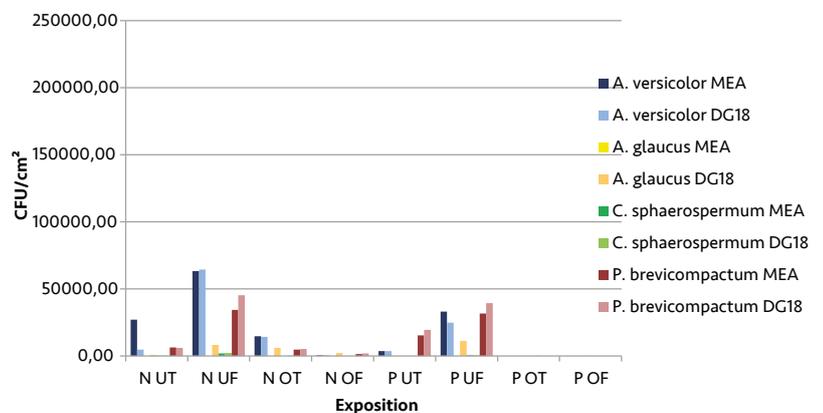
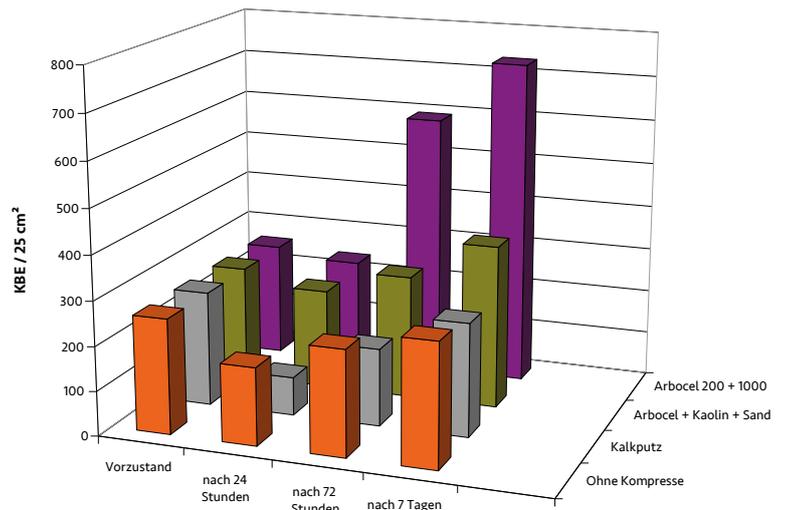
Einen positiven Effekt zeigt die Ionisation auch im Hinblick auf den Abbau von Mykotoxinen, was im Laborversuch gezeigt wurde (Abb. 18).

Mikrowelle

Auch die Anwendung mobiler Mikrowellengeräte zur Desinfektion wurde mehrfach diskutiert und in Laborexperimenten untersucht (Strätling 2007). Die Ergebnisse für die Behandlung des Echten Hausschwamms mit dieser Methode wurden als bedingt erfolgreich eingestuft. Für die Anwendung auf gefassten Holzoberflächen erschien diese Methode nach den erzielten Ergebnissen jedoch nicht geeignet.

An Flächen, die entsprechend denen für die UV-C Bestrahlung in der Crodellhalle eingerichtet

Keimbelastung unter den Kompressen auf beimpften Probekörper



[oben] Diagramm 4: Besiedlungsintensität der Testflächen nach Anwendung verschiedener Kompressenmaterialien (HAWK-HHG).

[unten] Diagramm 5: Effekt der Luftionisation nach 21 Tagen Versuchsdauer auf die Keimbelastung (KBE/cm²) der Probekörper
 N: unbehandelte Nullproben P: behandelte Proben; untersucht wurden jeweils die Oberseiten (O) und die Unterseiten(U) der trocken (T) oder feucht (F) gelagerten Proben
 Schimmelpilzisolat *Aspergillus versicolor*, *Aspergillus glaucus*, *Cladosporium sphaerospermum* und *Penicillium brevicompactum*, die Anzucht erfolgte auf Malzextraktagar (MEA) und Dichloranaga (DG 18) (HAWK-HHG).

wurden, erfolgte mit dem mobilen Gerät eine Probeanwendung in situ. Hier wurde für die Probenoberseiten zwar nach 125 Minuten Behandlungsdauer ein ausreichender Abtötungseffekt erreicht (Tabelle 2), allerdings führt die Anwendung auch zu einer erheblichen Erhöhung der Materialtemperatur, die bei den meisten Objekten gegen eine Anwendung sprechen dürfte (Tabelle 3).

Zudem sind Sicherheitsmaßnahmen zur Abschirmung der Strahlung erforderlich und der

Abb. 18:
Effekt der Ionisation auf
den Mykotoxinabbau;
linke Dünnschichtplatte
nach 96 Stunden Be-
handlungsdauer rechts
unbehandelte Kontrolle;
aufgetragen wurden von
links nach rechts jeweils:
1 µg, 5 µg, 0,1 µg, 0,5 µg
Ochratoxin A (HAWK-
HHG).



Umgang mit den Geräten erfordert eine entsprechende Genehmigung. Zusammenfassend wird in dieser Technik eher keine Methode für den Einsatz an Wandgemälden gesehen.

Kaltplasma

Ebenfalls in der Erprobung befindet sich der Einsatz von Kaltplasma, wie er im medizinischen Bereich verstärkt untersucht wird, auch um den zunehmenden Antibiotikaresistenzen zu begegnen. Erste Labortestungen belegen die fast vollständige Abtötung von Schimmelpilzsporen bereits nach 6 Sekunden Dauer der Anwendung (Abb. 19, 20).

Ein Abbau von Mykotoxinen ist auch mit dieser Methode bereits belegt (ten Bosch et al. 2016). Ob und für welche Malschichtaufbauten die Technik eingesetzt werden kann und wie der erforderliche gleichmäßige Abstand für die Zündung des Plasmas bei den unebenen Oberflächen von Wandgemälden sowie bei den im Objekt unterschiedlichen Material- und Luft-

feuchten erreicht werden kann, muss in weiteren Versuchen geklärt werden. Diese Aspekte sind u. a. Inhalt eines laufenden interdisziplinären Forschungsprojekts („Alltagsplasma“, Niedersachsen Vorab).

Vergrünung

Das Wachstum von Algen, phototrophen Bakterien und Flechten ist über den Prozess der photosynthetischen Fixierung von Kohlenstoff lichtabhängig.

Jedoch ist bekannt, dass die Photosynthesepigmente Licht im Bereich um 550 nm kaum absorbieren, woraus sich eine Wirklücke der Photosynthese ergibt.

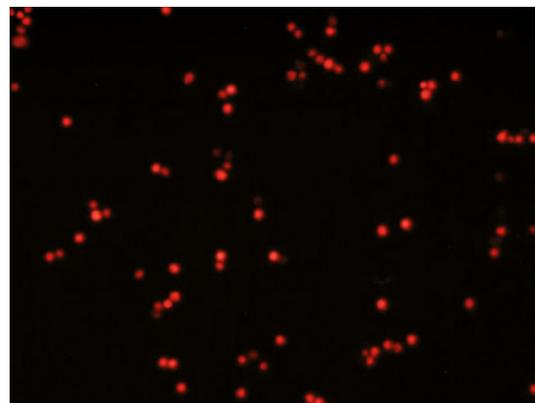
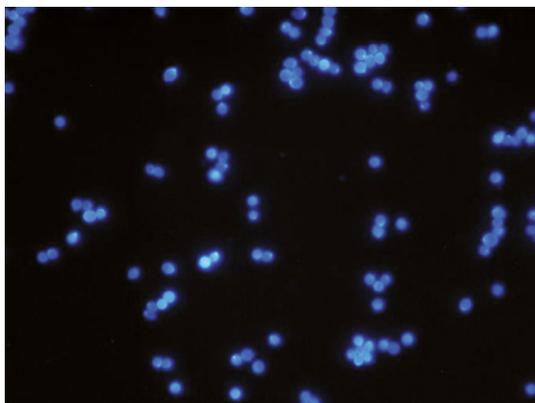
In Objekten, für die nicht ununterbrochen mit Besuchern zu rechnen ist und die eine teilweise Verdunklung erlauben, wäre es somit möglich, außerhalb der Momente, in denen Besucher die Malereien betrachten wollen, eine Sicherheitsbeleuchtung mit Licht der Wellenlängen um 550 nm als Sicherheitslicht zu installieren, um Unfälle zu vermeiden. Interessant könnte diese Technik insbesondere in dauerfeuchten Objekten wie Grotten und Ausgrabungen werden, da hier eine Verringerung des Algenbefalls durch entsprechende Eingriffe in das Klima kaum realisierbar sein dürfte. Möglicherweise entspräche der unter dem „Sicherheitslicht“ erreichte optische Eindruck sogar eher der historischen Situation, in der selbstverständlich keine Beleuchtung durch Tageslichtleuchten verfügbar war. Gezielte Untersuchungen mit Isolaten aus einem realen Objekt ergaben die positive Beeinflussung der Algenausbreitung auf Dummys.

Diese vielversprechende Technik ist natürlich auf Situationen begrenzt, die nicht eine dauerhafte Präsentation im Tageslicht erfordern.

Abb. 19 und 20:
Behandlung von *Eurotium herbariorum* Koni-
dien mit Plasma 0,01 bis
0,02 Joule (HAWK-HHG).

[links] Abb. 19:
Markierung aller Zellen.

[rechts] Abb. 20:
Markierung aller abge-
töteten Zellen.



Zudem ist auch die mögliche Auswirkung verschiedener Wellenlängen auf die Entwicklung von Schimmelpilzen zu berücksichtigen. Obwohl diese grundsätzlich sowohl unter den verschiedensten Beleuchtungssituationen wie auch bei Dunkelheit wachsen, unterliegen bestimmte Prozesse, wie die Bildung oder die Keimung von Sporen, durchaus einer Regulation durch das Licht. Erste Forschungsansätze zu diesem Thema erfolgten insbesondere für den Bereich der Lebensmittellagerung (Schmidt-Heydt 2011). Auch für den häufig auf Wandgemälden anzutreffenden Schimmelpilz *Aspergillus versicolor* zeigen sich derartige Beeinflussungen (Kruzger 2016). In Objekten, in denen nicht nur phototrophe Organismen sondern auch Pilze vertreten sind, muss daher vor einer Veränderung der Beleuchtungssituation auch die mögliche Auswirkung auf diese Pilze untersucht werden.

Trotz der dargestellten Einschränkungen und der Notwendigkeit der Wiederholung solcher Maßnahmen, da sie keinen präventiven Charakter besitzen, sollte hier verstärkt geforscht werden, um den Einsatz von giftigen Chemikalien auf die Situationen zu begrenzen, in denen andere Wege sich aus den verschiedensten Gründen ausgeschlossen werden müssen.

Hemmstoffe

Viele der zuvor angesprochenen Einschränkungen, insbesondere zur Materialverträglichkeit gelten auch für den Einsatz von Bioziden. Keineswegs liegen hier umfassende Untersuchungen zu möglichen Farbveränderungen oder Beeinflussungen von Bindemitteln vor, ebenso wenig wie es vollständige Untersuchungen zu Anwendungskonzentrationen z. B. in unterschiedlich feuchten Situationen gibt, da hier ein Verdünnungseffekt zu berücksichtigen ist. Die Beobachtung, dass sich bestimmte handelsübliche Biozide (o-Phenylphenol und Natrium-2-Phenylphenolat) bereits nach wenigen Wochen im Licht dunkel verfärben, sollte zur Vorsicht bei der Anwendung an Objekten führen. Alle Testungen mit Bioziden, falls nicht der reine Wirkstoff getestet werden kann, sind streng genommen auf das untersuchte Produkt begrenzt, da die Formulierungen von Produkten ohne entsprechenden Hinweis geändert werden können. Auch Untersuchungen zum Langzeitverhalten also zur Nachhaltigkeit bei unveränderter klimatischer Situation fehlen weitgehend.

Ebenso bleibt die Gesundheitsgefährdung bei unsachgemäßem Umgang mit größeren Mengen der Biozide, wie sie die Anwendung auf teils mehrere hundert Quadratmeter Wand- oder Deckengemälde erfordert, weitgehend unklar. Es ist besonders darauf zu verweisen, dass unbedingt auf eine angepasste persönliche Schutzausrüstung zu achten ist, auch wenn dies das unbequeme Tragen einer Atemschutzmaske auf dem Gerüst bedeutet.

Als nur zur Abtötung geeignet ist in diesem Zusammenhang die Anwendung von p-CMK über die Gasphase anzusehen, da nach Ausdunsten des Wirkstoffs aus dem Material keine präventive Wirkung gegen Wiederbefall des Wandgemäldes bestehen bleibt. Eine gute Wirkung auf einen Oberflächenbefall konnte an gezielt beimpften Dummies zwar festgestellt werden, jedoch wurde eine Desinfektionswirkung gegenüber Keimen auf der Probenunterseite nicht in ausreichendem Maße erreicht (Tabelle 3).

Gerade von dieser Methode hatte man einen Effekt gegenüber in der Tiefe ausgebildeten Besiedlungsanteilen erhofft, da sich bereits zuvor gezeigt hatte, dass Besiedlungsanteile unter Acrylatfixierungen aber auch unter Gipskrusten durch die Applikation gelöster Biozide über die Maleroberfläche – wie es in der Regel bei Wandgemälden nur möglich ist – nicht zu einer Abtötung der Tiefenbesiedlung führten.

Unbeachtet bleibt auch, dass sich durch die Zugabe von Bioziden zu Kulturansätzen bereits in geringsten Konzentrationen sowohl die Freisetzung von Mykotoxinen (Böer 2004) als auch von Schimmelpilzallergenen (Knobbe 2001) zeigen ließ.

Sowohl um die Nachhaltigkeit zu steigern als auch, um die mögliche Gesundheitsgefährdung zu verringern, erfolgten Versuche, die Giftstoffe an Oberflächenbeschichtungen oder Bindemittel zu koppeln, um eine kontinuierliche oder nur dann, wenn mikrobielle Aktivität einsetzt, eine Freisetzung des Hemmstoffs in geringen Mengen zu erreichen.

Derartige Versuche erfolgten sowohl für natürliche Hemmstoffe aus marinen Bakterien (Tebben 2004) als auch für übliche Biozide (Göttingen, Herrmann). Auch zu berücksichtigen ist, dass, obwohl die nach entsprechender Kopplung erfolgende kontinuierliche Freisetzung von H_2O_2 zu einer fast vollständigen Abtötung ausgewählter Bakterienarten führt, (Wu et al. 2016), durch Anwendung selbst hochkonzentrierten Wasserstoffperoxids (bis 15 %ig) an realen Wandgemäl-

den nach Salzverminderungskompressen keineswegs eine vollständige Abtötung von Schimmelpilzen erreicht werden konnte. Materialien aus der Medizintechnik werden ebenfalls für den Einsatz an Kulturgütern vorgeschlagen, aber auch hier ist die Materialverträglichkeit wie auch die mögliche Beeinflussung des optischen Eindrucks zu untersuchen. Eine erfolgreiche Kopplung von Benzimidazol an Zellulosederivate konnte zwar erreicht und der Nachweis einer ausreichenden Hemmwirkung des Produkts belegt werden, jedoch musste festgestellt werden, dass die nicht ausreichende reduzierte Klebekraft des Kopplungsprodukts einen Einsatz nicht mehr erlaubt.

Zusammenfassung

Für die hier erwähnten neuen Techniken wie auch bereits etablierten, insbesondere die Anwendung von Bioziden, gilt, dass ergänzende Untersuchungen zur Wirksamkeit und Nachhaltigkeit aber auch zur Materialverträglichkeit erforderlich sind und dass diese keineswegs auf Laboruntersuchungen begrenzt werden dürfen. Gerade die jeweilige Objektsituation wird die Wirkung eines Eingriffs maßgeblich beeinflussen. Neben den bereits erwähnten Verdünnungseffekten durch die Materialfeuchte ist auch eine mögliche Beeinflussung der Desinfektionswirkung durch Salzbelastungen in der Malerei zu berücksichtigen, aus denen sich nicht nur unterschiedliche Empfindlichkeiten der Mikroorganismen gegenüber den Hemmstoffen ableiten, sondern auch eine pH-Wert abhängige Dissoziation und damit u. U. deutlich verringerte Effektivität der Wirkstoffe ist zu berücksichtigen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es die allgemeingültige Herangehensweise bei mikrobiellem Befall von Wandgemälden nicht gibt, auch erscheint es unrealistisch, eine derartige Möglichkeit in naher Zukunft zu erwarten. Vielmehr ist jedes Wandgemälde mit seinen Besonderheiten im Hinblick auf den originalen Malschichtaufbau, spätere Konsolidierungsmaßnahmen und -materialien, durch unterschiedliche Nutzung und andere Faktoren bedingte Klimasituation aber auch sehr individuelle Faktoren gesondert zu betrachten und die jeweiligen Bedürfnisse und Möglichkeiten für erforderliche und wünschenswerte Eingriffe sind gegeneinander abzuwägen.

Es ist anzuraten, vor Eingriffen zunächst den Klimaverlauf zu kontrollieren und sowohl die Feuchte als auch Temperatur in der Luft wie an besiedelten und nicht besiedelten Bereichen der Malschicht zumindest oberflächennah zu messen. Da hier ein längerer Zeitraum erfasst werden sollte, um spezifische Klimasituationen einzelner Jahre nicht zu stark zu bewerten, z. B. heiße und feuchte oder besonders trockene Klimaphasen, könnten und sollten die Zeiten der Planung von größeren Eingriffen für ein derartiges Monitoring dieser wichtigen Basisinformationen genutzt werden. Auch wäre es generell sinnvoll, zu klären, ob es sich um einen eher im Ruhezustand befindlichen Altbefall oder um eine aktive Befallssituation handelt, auch dies kann in der Vorbereitungs- und Planungsphase geschehen. Die Summe dieser Erkenntnisse hilft im Einzelfall zu entscheiden, wie gravierend eine Maßnahme ausfallen muss. Vielfach würde sicherlich auch die Vergabe regelmäßiger Wartungsverträge an mit dem Objekt vertraute Restauratoren und Restauratorinnen helfen, die erforderlichen Eingriffe zu begrenzen.

Literatur

- Berger-Tomajér, Vanessa: Untersuchungen zu Möglichkeiten und Grenzen der mikrobiellen Nitratreduzierung auf Wandmalereien. Diplomarbeit HAWK Hildesheim, 2006.
- Beutel, Sascha: Innovative Verfahren zur schonenden Abnahme von schädigenden Casein-Überzügen auf Wandmalereien PD Thesis, Institut f. Technische Chemie, Universität Hannover, 2000.
- Beutel, S. / Klein, K. / Knobbe, G. / Königfeld, P. / Petersen, K. / Ulber, R. / Scheper, T.: Controlled enzymatic removal of damaging casein layers on medieval wall paintings. In: *Biotechnol Bioeng* 80, 2002, S. 13–21.
- Birresborn, Lilli: Ionisierte Luft – Untersuchungen zur Wirkung auf Mikroorganismen, Pigmente und Bindemittel der Wandmalerei. Masterthesis, FH Potsdam, 2016.
- Böer, Simone: Untersuchung der Mykotoxinfreisetzung aus ausgewählten Schimmelpilzen unter besonderer Berücksichtigung denkmalpflegerischer Aspekte. Diplomarbeit FB7 Dipl.-Biol., Universität Oldenburg, 2004.
- Burghard, Elisa: Überlegungen zu Insekten auf Oberflächen von Kunst- und Kulturgut – Versuche mit Fliegenexkrementen. Bachelorthesis, HAWK Hildesheim, 2009.
- Gerling, Christine: Celluloseether für die Festigung von Mal- und Fassungsschichten auf Gemälden und gefassten Holzobjekten – Untersuchungen zur mikrobiellen Resistenz und Wasseraufnahmefähigkeit bei hoher Luftfeuchtigkeit. Bachelorthesis, HAWK Hildesheim, 2012.
- Grote, Gabriele / Krumbein, W.E.: Pilze und chemoorganotrophe Bakterien auf Felsbildern in der Wüste. In: *Restauro* 2, 1993, S. 111–114.
- Heyn, Christiane: Mikrobieller Angriff auf synthetische Polymere – Untersuchungen im Rahmen der Denkmalpflege. PD Thesis, Fachbereich Biologie, Geo- und Umweltwissenschaften, Carl von Ossietzky Universität Oldenburg, 2002.
- Heyn, C. / Häfner, K. / Krumbein, W. E. / Petersen, K.: Synthetische Polymere für die Festigung von Wandmalereien? Mikrobieller Befall in der Krypta von St. Maria im Kapitol. In: *Restauro* 4, 1996, S. 254–259.
- Hilge, C. / Petersen, K. / Krumbein, W. E.: Auswirkungen von UV-Bestrahlungen und Ozon auf die Stoffwechselaktivität von Gestein und Putz besiedelnden Mikroorganismen. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 12, 1998, S. 162–173.
- Kilchofer, Matthias: Calciumoxalate auf Oberflächen von Natursteinen und Putzen. Diplomarbeit, Hochschule der Künste Bern, 2005.
- Knobbe, G.: Gesundheitsgefährdung durch Schimmelpilze am Arbeitsplatz – Erkennung und Vorsorge. Tagung: Schimmel – Gefahr für Mensch und Kulturgut durch Mikroorganismen. Mutec München, 21.–24.6.2001.
- Robert, J. Koestler: Polymers and Resins as Fodd for Microbes. In: *Orio chiffieri, Tiano, Piero / Mastromei, Giorgio (Hrsg.): Of Microbes and Art. New-York, Boston / Dordrecht / London / Moscow* 2000, S. 153–167.
- Krutzger, Ragna: Untersuchungen zur Entwicklung von *Aspergillus glaucus* bei Bestrahlung mit ausgewählten Wellenlängen. Masterthesis, HAWK Hildesheim, 2016.
- Mansch, R. / Bock E.: Biodeterioration of natural stone with special reference to nitrifying bacteria. In: *Bio-degradation* 9/1, 1998, S. 47–64.
- Petersen, K. / Kurozkin, J. / Strzekczyk, A. / Krumbein, W. E.: Distribution and Effects of Funghi on and in Sandstones. In: *Biodeterioration* 7. hrsg. von Houghton, D.R. / Smith, R.N. / Eggins, H.O.W., Elsevier Applied Science. London / New York 1987, S. 123–128.
- Pohl, Markus / Reibold-Mühebach, Katia: Untersuchungen zur mikrobiellen Besiedlung von Kieselsäureestern- und kieselsolgefestigten Architekturoberflächen. Bachelorthesis, HAWK Hildesheim, 2007.
- Petrushkova, Julia P. / Lyalikova, Natalia N.: Microbiological degradation of lead-containing pigments in mural paintings. *Studies in Conservation* 31, 1986, S. 65–69.
- Scheer, Malaika: Kieselsäureester auf Architekturoberfläche – Wechselwirkung mit mikrobieller Besiedlung. Masterthesis, HAWK Hildesheim, 2007.
- Schmidt-Heydt, M. / Rüfer, C. / Raupp, F. / Bruchmann, A. / Perrone, G. / Geisen, Rolf: Influence of light on food relevant fungi with emphasis on ochratoxin producing species. In: *International Journal of Food Microbiology*, 2011, S. 229–237.
- Sindlinger-Maushardt, K. / Petersen, K.: Methylzellulose als Klebemittel für Malschichtfestigungen auf Leinwandbildern – Untersuchungen zur Klebekraft und mikrobieller Resistenz. In: *Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung* 2, 2007, S. 371–382.
- Strätling, Merle: Orientierende Untersuchungen zur Abtötung von Myzel des Echten Hausschwamms durch Mikrowellen. Masterthesis, HAWK Hildesheim, 2007.
- Tebben, Mareike: Untersuchungen zur Anwendungsmöglichkeit eines isolierten hochmolekularen Hemmstoffs aus *Pseudoalteromonas luteoviolacea* gegen verschiedene Mikroorganismen aus dem Bereich der Restaurierung. Diplomarbeit FB7 Universität Oldenburg, 2004.
- ten Bosch, Lars / Avramidis, Georg / Pfohl, Katharina / Viöl, Wolfgang: Decay of fungal metabolites by atmospheric pressure plasma. Poster · presentation, at: Bratislava, , Ordinal: 6, Conference: International Conference on Plasma Medicine, Affiliation: Zdenko MACHALA and Karol HENSEL Comenius University, Bratislava, Slovakia, 2016.
- Tinzl, C. / Oldenbourg, C. / Petersen, K. / Fricke-Tinzl, H. / Hilge, C. / Katkov, M.: UV-C-Strahlung zur Entfernung und Kontrolle von Algenbelägen an wandgebundenen Kunstwerken und Steinskulpturen: eine Alternative zur Biozid-Anwendung? In: *Restauratorenblätter* 16, 1995, S. 127–138.
- Wu, Changzhu / Schwibbert, Karin / Achazi, Katharina / Landsberger, Petra / Gorbushina, Anna, A. / Haag, Rainer: Active Antibacterial and Antifouling Surface Coating via a Facile One-Step Enzymatic Cross-linking. *Biomacromolecules*. Downloaded from <http://pubs.acs.org> on December 7, 2016.

Zitierte Forschungsprojekte

EU project BIOBRUSH (Bioremediation for Building Restoration and the Urban Stone Heritage)

DBU Projekt: „Erstellung und Erprobung eines Architekturkonzepts zur nachhaltigen Fortentwicklung historischer Kirchenbauwerke – Innovative Maßnahmen zur langfristigen Sicherung der Decken- und Wandmalerei am Beispiel der Katholischen Kirche St. Joseph in Osnabrück“. AZ: 30699

DBU Projekt: „Praxisorientierte Versuche zur modellhaften Dekontaminierung einer starken Schimmelbesiedlung auf Putzen, Wandmalereien und Naturstein in der Crodel-Halle der Moritzburg Halle“. AZ: 31440

DBU Projekt: „Entwicklung von Konservierungsmaterialien und -techniken zum Schutz von Kulturgut vor anthropogen induzierter mikrobieller Zerstörung am Beispiel der Ev.-ref. Dorfkirche zu Sonneborn“, AZ: 26217

DBU Projekt: „Entwicklung einer Schutzeinhausung für das stark anthropogen geschädigte Heilige Grab in der Stiftskirche Gernrode (einschließlich Restaurierungsmaßnahmen)“. AZ: 26289

Niedersachsen Vorab Projekt: „Plasmagestützte Schädlingsbekämpfung im Alltag“

Mikrobiologische Untersuchungen in der Krypta und an den Wandmalereien im Kirchenschiff

Stefanie Scheerer

Einleitung

Die Kirche St. Georg in Oberzell weist in vielen Bereichen des Gebäudes einen zum Teil massiven Befall durch verschiedene Arten von Mikroorganismen auf. Wann der erste mikrobielle Befall auftrat, lässt sich nicht mehr rekonstruieren. Zahlreiche Untersuchungen durch Mikrobiologen in den letzten 20 Jahren weisen darauf hin, dass die von Mikroorganismen ausgehende Schädigung kein neues Phänomen in St. Georg ist.

Während der umfassenden Dokumentation des Bestands in den 1980er Jahren wurde bereits ein Befall durch dunkle Schimmelpilze auf den Wandmalereien bzw. ein weißer flaumiger Pilzbefall in der Bogenlaibung unterhalb der ersten Bildszene festgestellt. Alle durch Schimmelpilze befallenen Stellen wurden im Verlauf der 1980er Jahre trocken gereinigt. Weiterhin wurde ein „rosa Befall“, also eine Besiedlung durch rosa pigmentierte Bakterien oder Archaeen in der Westapsis festgestellt, welcher nach mündlicher Aussage von Dörthe Jakobs (2016) Anfang der 1990er Jahre mit Kalksinterwasser behandelt wurde. Helmut F. Reichwald berichtete 2003, dass „in jüngster Zeit an der Westapsis vermehrt ein bakterieller Befall (sogenannter „rosa Befall“) auftrat“ (Reichwald 2003). Im Zuge mehrerer Wartungen seit 1992 wurde ab Mitte der 1990er Jahre eine zunehmende Verschmutzung der Wandmalereien festgestellt. Während der Wartung 1998 wurde schließlich ein Wiederbefall, vermutlich durch die gleichen, vor der Trockenreinigung aufgetretenen, dunkelgrau pigmentierten Schimmelpilze an der Nordwand des Kirchenschiffs beobachtet. Der dunkle Pilzbefall konzentrierte sich am oberen Bereich des Bilderzyklus der Nordwand in den ocker-gelben Hintergrundflächen sowie auf Architekturdarstellungen. Die Nährstoffgrundlage der Pilze

wurde in einer für 1908 belegten Fixierung der Wandmalereien oder in den 1921/22 aufgetragenen kaseingebundenen Lasuren vermutet (vgl. Beitrag Jakobs). Weiterhin können Kaseinfilme die Feuchteaufnahme und -abgabe negativ beeinflussen, was ein mikrobielles Wachstum fördern kann (Petersen 2002). Der Bilderzyklus der durchschnittlich 3 °C wärmeren Südwand war dagegen nicht von Schimmelpilzen befallen (Jakobs 2014). Die unbefallene Südwand wurde in der Restaurierungsgeschichte gleich behandelt, sie dürfte somit auch kaseingebundene Lasuren in ungefähr dem gleichen Ausmaß aufweisen, wie die Malereien der Nordwand (Jakobs, mündliche Aussage 2016). Mikrobiologische Untersuchungen des Befalls wurden Anfang der 1980er Jahre von Prof. Dr. Franz Lingens von der Universität Hohenheim durchgeführt; schriftliche Unterlagen dazu liegen jedoch nicht vor. Die erste schriftliche Dokumentation eines Pilzbefalls an den Wandmalereien der Nordwand fand 1982 durch Hermann Kühn im Rahmen einer Pigmentanalyse statt. Schwarze Hyphen und Sporen lagen oberflächlich vor und waren stellenweise auch unterhalb von nicht befallenen Schichten in einer grauen Schicht mit pflanzlichen Fasern vorhanden (Kühn 1982). Makroskopisch waren die befallenen Bereiche als „schwarze Pünktchen“ (B 2.1.2/24) bzw. als „dunkle Flecken bis Quadratzentimetergröße“ (D 4.1.2/18) sichtbar (Abb. 1).

1998 wurde eine weitere mikrobiologische Untersuchung von einer Probe vom Bilderzyklus der Nordwand (D 4.1.2/18) und einer Probe von der Laibung der Südseite des Chorbogens (K 10.2) von Dr. Jürgen Eberspächer von der Universität Hohenheim durchgeführt. Eine eindeutige Identifizierung der relevanten, dunkel pigmentierten Pilze an der Nordwand bzw. des weißen Befalls am Chorbogen anhand der Anzucht von zwei Klebestreifenproben konnte nicht durchgeführt

Abb. 1:
Pilzbefall sichtbar als
„dunkle Flecken bis
Quadratmeter-
größe“ aus dem Bereich
D 4.1.2/18, Dokumenta-
tionsfoto während der
Probenahme am 30. Juni
1982 für die Pigment-
analyse durch Kühn
(LAD, Archiv/Sauter).



werden. Die wenigen angewachsenen Pilzkolonien, bei denen es sich um je eine Kolonie „*Penicillium*-artige, *Monilia*-artige und *Trichoderma*-artige“ Schimmelpilze handelte, waren alle unter Laborbedingungen nicht zur Säureproduktion fähig, während einige Organismen beider angezuchteten Proben fähig waren, Kasein zu verwerten (Eberspächer 1998). Da es sich um Proben stark befallener Oberflächen handelte und lediglich eine einzige Kolonie von sehr unterschiedlichen Pilzen anwuchs, von denen keiner dunkel pigmentiert ist, liegt es nahe, dass es sich dabei um eine Kontamination und nicht um die *in situ* wachsenden Pilze handelte.

Nachdem sich der Pilzbefall weiter ausgebreitet hatte, was ein tieferes Eindringen und damit größeres mechanisches Schädigungspotential der Hyphen mit sich bringen kann, wurde 2003 beschlossen, diesen abzunehmen. Während an solchen Oberflächen, die keinen sichtbaren Schimmelpilzbefall aufwiesen, die Reinigung durch Abrollen mit durch *Aqua dest.* angefeuchtete Wattestäbchen erfolgte, wurden schimmelpilzbelastete Oberflächen mit durch 70 %igen Isopropanol angefeuchtete Wattestäbchen gereinigt (Lung Wartung 2003). An mehreren Stellen wurden ungereinigte Primärdokumente stehengelassen, die den ehemals großflächig ver-

teilten dunklen Schimmelpilzbelag eindrücklich dokumentieren.

Vor der Abnahme des Pilzbefalls 2003 wurden weitere mikrobiologische Untersuchungen veranlasst. Fünf Proben wurden vom Bilderzyklus der Nordwand mit „dunkler Sporenbildung“, zwei Proben von der Westapsis mit „rosa Befall“, zwei Proben vom ersten Arkadenbogen der Nordwand im Kirchenschiff mit „weißem Schimmelflaum“ und eine Probe von der Nordwand des Kryptagangs mit „weißem Schimmelflaum“ entnommen und dem Labor Dr. Frans Spaaij, Tübingen, zur Untersuchung der Vitalität sowie der Identifikation übergeben. Obwohl zahlreiche sehr unterschiedliche Pilze im Labor angezchtet werden konnten, bleibt es trotz der Untersuchung fraglich, ob es sich dabei um die *in situ* gewachsenen Organismen des mikrobiologischen Bewuchses an den Probenahmestellen in St. Georg handelte (Spaaij 2003). Dies unterstreicht die Notwendigkeit, dass der untersuchende Mikrobiologe stets den *in situ* Befund an der Probenahmestelle und dessen Umfeld kennen sollte, um eine fundierte Interpretation der Ergebnisse vornehmen zu können.

Da eine nachhaltige Entfernung von Schimmelpilzen mit einer klimatischen Verbesserung einhergehen muss, wurde 2004 ein interdisziplinär abgestimmtes Konzept mit gesteuerter Be- und Entlüftung zur Stabilisierung des Kirchenklimas umgesetzt. Dafür wurden die Seitenschiffenster nach absoluter Feuchte und Temperatur gesteuert geöffnet, eine thermische Entlüftung wurde in der Decke realisiert und die Vorhalle der Kirche als Klimaschleuse genutzt, um während klimatisch ungünstiger Umgebungsbedingungen ein minimales Eindringen der Außenluft direkt ins Innere des Kirchenschiffs zu gewährleisten.

Das umfassende Klimakonzept wurde 2009 durch eine Besucherlenkung erweitert, welche in den klimatisch kritischen Sommermonaten, während derer der Besucherandrang besonders hoch ist, das häufige Öffnen der Eingangstüren verhindern soll, indem die Kirche nur für Führungen, nicht aber für den Individualtourismus geöffnet wird. Im Zuge der erstmaligen Einführung der Besucherlenkung wurden umfassende naturwissenschaftliche Untersuchungen zur klimatischen Auswirkung auf das Klima, (Fein-) Staubentwicklung und der mikrobiologischen Belastung der Oberflächen und der Raumluft unternommen. Im Zuge dessen wurde auch erstmalig die Krypta umfassend mikrobiologisch durch die Verfasserin gemeinsam mit Thomas

Gabrio vom Landesgesundheitsamt Baden Württemberg untersucht. Ein mikrobiologischer Befall an den Wandflächen der Krypta war vermutlich ebenfalls ein weit in die Vergangenheit reichendes Phänomen. Ab Mitte der 1980er Jahre wurde die Krypta umfassend saniert. Der Zementputz in Teilen der Sockelzonen war entfernt und durch einen Kalkputz mit Kalktünche ersetzt worden. Jeglicher Befall außerhalb der mittelalterlichen Malereien entstand nach diesen Sanierungsarbeiten und nach der Teilverglasung der Gittertüren, also der Zugänge zur Krypta. Die Ergebnisse der Luftkeimmessungen von 2009 in der Krypta und dem Kirchenschiff zeigten, dass die mikrobiologische Belastung der Krypta-Luft stark erhöht war und damit wesentlich über der Belastung der Luft im Kircheninnern lag, welche im Vergleich zur Außenluft nicht belastet war. Insbesondere die hohe Konzentration des Schimmelpilzes *Engyodontium album*, einem Feuchteindikator-Pilz, war auffallend. Oberflächenuntersuchungen mittels mikroskopischer Untersuchung von Klebestreifenproben und Anzucht von Abstrichen von der Nordwand des Kryptagangs zeigten, dass sich dort ein sehr dichter und großflächiger Befall durch *E. album* befand, der die Quelle der vielen Sporen von *E. album* in der Krypta-Luft war. Die mittelalterlichen Wandmalereien der Krypta waren dagegen erfreulicherweise nur sehr geringfügig belastet (Scheerer 2009). Eine Reinigung der mikrobiell befallenen Oberflächen der Krypta im Jahr 2011 durch Feuchtreinigung mit 70 %igem Isopropanol wirkte sich zwar günstig auf die mikrobielle Belastung der Krypta-Innenluft aus, konnte jedoch einen Wiederbefall der Wände, insbesondere im Kryptagang, nicht verhindern.

Während Bakterien, Hefepilze sowie unterschiedliche Schimmelpilzarten in der Luft der Krypta im Vergleich zur Außenluft in wesentlich größerer Anzahl vertreten waren, was ebenfalls eine Indikation für eine erhöhte Feuchte in der Krypta ist, war die Innenluft des Kirchenschiffs im Vergleich zur Außenluft nicht belastet. Die vom Kirchenschiff genommenen Staubproben waren hingegen stark durch Schimmelpilze (insbesondere der Gattung *Cladosporium*) und in geringerem Maß durch Bakterien (insbesondere mycelbildende Actinomyceten) belastet. Dabei ist auffallend, dass nur die Probe, welche von einem Absatz direkt unterhalb des Bilderzyklus (Bereich F 6.1.1/9, 4. Abt von W) der Nordwand stammt, eine sehr hohe Anzahl von *Cladospo-*

rium Sporen aufwies. Andere Staubproben aus dem Bereich der Seitenschiffe wiesen zwar auch viele Schimmelpilzsporen auf, jedoch war die starke *Cladosporium*-Sporen Belastung hier nicht vorhanden (Scheerer 2009). Dies könnte ein Hinweis auf eine in der Vergangenheit liegende erhöhte *Cladosporium* Belastung der Kircheninnenluft in der Nähe des Bilderzyklus sein, welcher bis ca. 2004 stark besiedelt war mit einem bis dahin noch nicht identifizierten dunkelgrauen Schimmelpilz. Bei der Untersuchung 2011 durch Karin Petersen im Bereich der Wandmalereien des Kirchenschiffs an unterschiedlichen Stellen wurde erstmals der *in situ* Befund an den Wandmalereien mittels mikroskopischer Untersuchung von Klebestreifenproben zusätzlich zur der Anzucht von Abstrichen untersucht, wodurch eindeutig die Besiedlung der ungereinigten Primärdokumente durch Schimmelpilze der Gattung *Cladosporium* nachgewiesen werden konnten. Weiterhin zeigte Petersen, dass die mikrobielle Aktivität an den gereinigten Stellen zwar geringfügig vorhanden, jedoch wesentlich geringer war als in den ungereinigten Primärdokumenten (Petersen 2012).

Im Innern der Orgel wurde während derselben Untersuchungskampagne ein starker Befall durch *Aspergillus restrictus* sowie geringfügig durch *Alternaria sp.* und *Cladosporium sp.* nachgewiesen. In der Krypta war neben dem starken Befall durch *Engyodontium album* im Kryptagang mit extrem hoher mikrobieller Aktivität ein Befall durch eine *Cladosporium*-Art am Gewölbe am Übergang zum Nordfenster der Krypta festgestellt worden (Petersen 2012).

Mikrobiologische Untersuchungen im Rahmen des DBU-Projektes

Auf diesen Grundlagen aufbauend sollten im Rahmen des Forschungsprojekts von 2014 bis 2016 folgende mikrobiologische Untersuchungen stattfinden:

- Kontrolle der mikrobiellen Belastung der Innenraumluft der Krypta und des Kirchenschiffs im Vergleich zur mikrobiellen Belastung von 2009
- Qualitative und semiquantitative Bestandsaufnahme der Mikroorganismen der Wandoberflächen in der Krypta
- Bestandsaufnahme der mikrobiellen Aktivität an Wandoberflächen in der Krypta vor Inbetriebnahme der Wandbeheizung und Monito-



Abb. 2:
Stefanie Scheerer und
Robert Lung bei der Pro-
benahme an der Bogen-
laibung im Oktober 2015
(LAD, Jakobs).

- ring der Veränderung der Aktivität während des Betriebes der Wandbeheizung
- Untersuchung der Effektivität verschiedener Reinigungs- beziehungsweise Desinfektionsmethoden an der Wand des Kryptagangs (Putze historisch und neu, beide mit neuzeitlicher Kalkschlemme aus den 1980er Jahren)
- Mikrobiologische Untersuchungen an den Wandmalereien im Kirchenschiff, insbesondere der Höhe der mikrobiellen Aktivität im Vergleich zu 2011
- Bestandsaufnahme von neu entwickeltem mikrobiologischem Befall in der Kirche (Abb.2)

Methodik

Alle Klebestreifen zur mikroskopischen Untersuchung wurden mit Baumwollblau in Milchsäure angefärbt und bei 100-facher bis 1000-facher Vergrößerung untersucht. Zur Anzucht wurden die Proben auf verschiedenen Nährmedien (MEA und DG18) angelegt und bei $25\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und bei $36\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ bebrütet. Die Aktivitätsmessung erfolgte mittels ATP Messung (Lumitester HY-LiTE®, Fa. Merck) von Oberflächenproben. Das Ergebnis wird in RLU (Relative Light Units) angegeben. Die Untersuchung der anzüchtbaren Luftkeime wurde mittels Luftkeimsammler (MBASS30 mit Sammelkopf LKS100, Umweltanalytik Holbach GmbH) durchgeführt. Pro Probenahmeort wurden Luftvolumina von 50 l, 100 l und 200 l untersucht. Die luftge-

tragenen Keime wurden jeweils in Triplikaten auf zwei verschiedenen Nährmedien abgeschieden. Zur Bestimmung anzüchtbarer Pilze wurde MEA (Malzextrakt-Agar) und DG18-Agar (Dichloran 18 %-Glycerol-Agar mit Chloramphenicol) eingesetzt. Malzextrakt-Agar ist ein Standardpilznährboden und DG-18-Agar wird zum Nachweis von Pilzen mit geringen Feuchtigkeitsansprüchen (sog. xerophile Pilze) eingesetzt. Chloramphenicol dient der Hemmung von Bakterien. Die Bebrütung erfolgte bei $25 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$ und bei $36 \pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Ergebnisse wurden als koloniebildende Einheiten (KbE) pro Kubikmeter Luft angegeben. Die Zählung und morphologische Differenzierung erfolgte mehrmals in einem Zeitraum zwischen 3 und 20 Tagen. Die Partikelmessung fand mit dem Partikelsammler (MBASS30 mit Sammelkopf PS30, Umweltanalytik Holbach GmbH) auf adhäsiv beschichteten Objektträgern der Firma Holbach GmbH statt. Die Messungen umfassten pro Probenahmestelle 100 l, 200 l und 400 l. Im Labor wurden die Proben mit Baumwollblau in Milchsäure angefärbt und mikroskopisch bei 100-facher bis 400-facher Vergrößerung ausgewertet.

Ergebnisse

Untersuchung der luftgetragenen mikrobiellen Belastung der Innenraumluft

Luftkeimmessung

Luftkeimmessungen erfassen den anzüchtbaren Teil der luftgetragenen mikrobiologischen Belastung der Innenluft. Bekannte Luftvolumina werden angesogen und die darin befindlichen Partikel werden auf den Oberflächen von standardisierten Nährmedien abgeschieden. Nach der Bebrütung können diese als koloniebildende Einheiten (KbE) qualitativ und quantitativ ausgewertet werden. Zur Auswertung, ob eine Innenraumbelastung vorliegt, wird das Ergebnis mit der entsprechenden mikrobiellen Belastung der Außenluft als Referenzwert verglichen. Die Ergebnisse wurden gemäß der Bewertungshilfe des Umweltbundesamts (Umweltbundesamt 2002) sowie des Landesgesundheitsamts Baden-Württemberg (Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg 2004) ausgewertet. Insgesamt war die anzüchtbare mikrobielle Belastung während beider Untersuchungen im Jahr

2015 weder der Krypta-Innenluft noch der des Kircheninnenraums gegenüber der Außenluft erhöht.

Insbesondere in der Krypta-Innenluft war die 2009 vorhandene extrem große Anzahl von keimfähigen Sporen des Schimmelpilzes *Engyodontium album* im Jahr 2015 auf einen akzeptablen Wert zurückgegangen. Der starke Rückgang seit 2009 hängt vermutlich mit der Reinigung 2011 mit in 70 %igem Isopropanol getränkten Wattetupfern zusammen. Der weitere Rückgang der allgemeinen mikrobiellen Belastung der Krypta-Innenluft zwischen April und Oktober 2015 war vermutlich auf normale jahreszeitliche Schwankungen zurückzuführen. Der Rückgang von *E. album* auf einen nicht mehr detektierbaren Wert hingegen hängt höchst wahrscheinlich mit den großflächig an der Nordwand des Kryptagangs angelegten Reinigungsproben zusammen, für die ein Großteil des mikrobiellen Befalls abgenommen wurde sowie dem allgemeinen Rückgang der mikrobiellen Aktivität an den Oberflächen des Kryptagangs (siehe unten). Lediglich eine *Acremonium* Art, vermutlich *Acremonium potronii*, war in einem leicht erhöhten Anteil in der Raumluft der Krypta sowie im Kircheninnenraum vertreten, sodass ein Innenraumwachstum dieses Pilzes, der schlecht flugfähige Konidien besitzt, nicht auszuschließen ist. Ein oberflächliches Wachstum des Pilzes konnte jedoch nicht festgestellt werden.

Partikelmessung

Im Gegensatz zur Luftkeimmessung, bei der die mikrobiellen Partikel der Luft vor der Auswertung auf Nährmedien angezchtet werden müssen, wird bei der Partikelmessung ein bekanntes Luftvolumen auf einen beschichteten Objektträger abgeschiedenen und direkt mikroskopisch ausgewertet. Das hat den Vorteil, dass auch nicht keimfähige Sporen erfasst werden. Der Nachteil dieser Methode ist, dass die Sporen lediglich in Sporengruppen eingeteilt werden können und maximal bis zur Pilzgattung differenziert werden können. Die Ergebnisse wurden gemäß der Bewertungshilfe des Umweltbundesamts (Umweltbundesamt 2002) sowie des Landesgesundheitsamts Baden-Württemberg (Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg 2004) ausgewertet.

Partikelmessungen wurden in der Krypta im April 2015 und nochmals im Oktober 2015 durchgeführt; im Kircheninnenraum wurden lediglich im Oktober 2015 Partikelmessungen durch-

geführt. Die ausgezählten Werte der mikrobiellen Belastung mittels Partikelzählung waren um das bis zu 34-fache höher als die zur selben Zeit durchgeführte Luftkeimmessung. Das zeigt, dass der auf Labormedien nicht anzüchtbare Anteil der mikrobiellen Belastung bei weitem der größte war. Im Vergleich zur Außenluft waren jedoch weder die Werte der Krypta-Innenluft noch die des Kircheninnenraums erhöht. Im Kircheninnenraum fiel auf, dass sowohl die Sporenbelastung als auch die nicht durch Sporen verursachte partikuläre Belastung der Raumluft auf Höhe des Bilderzyklus etwas geringer war als auf ca. 1,5 m im westlichen Teil des Kirchenschiffs bzw. vor der Vierung.

Mikrobielle Oberflächenbesiedlung

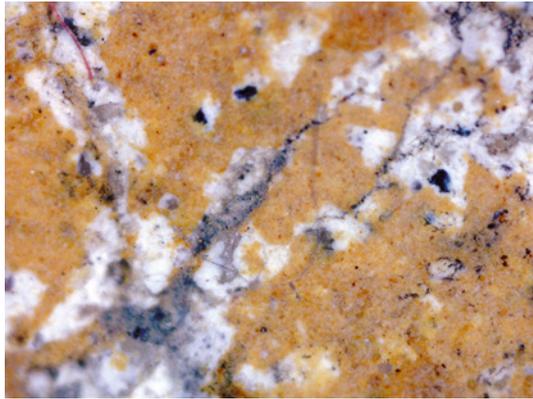
Oberflächenbesiedlung der Wandmalereien im Kirchenschiff

Im Kirchenschiff wurde eine mikrobielle Bestandsaufnahme mit Aktivitätsmessungen an den Wandmalereien durch die Verfasserin erst während der Untersuchungskampagne im Oktober 2015 durchgeführt, bei der eine Hebebühne den Zugang zu den Wandmalereien ermöglichte. Vergleichbare vorherige Untersuchungen mit Aktivitätsmessungen wurden von Karin Petersen durchgeführt.

Die Befundstellen zur Untersuchung der mikrobiellen Aktivität wurden so ausgewählt, dass sie mit den Untersuchungen von Petersen im Mai 2011 verglichen werden konnten. Die Fragestellung war zum einen der Vergleich der Aktivität von gereinigten und ungereinigten Bereichen und zum anderen die Höhe der Aktivität im Vergleich zu den Messungen von 2011 von Petersen. Bei diesem Vergleich ist jedoch zu beachten, dass sich die verwendeten Geräte unterschieden, wodurch die absoluten Werte nicht miteinander direkt verglichen werden konnten. Durch die Interpretation, ob es sich bei den Resultaten um keine, eine geringe, starke oder extreme Aktivität handelt, können die Ergebnisse unterschiedlicher Geräte dennoch miteinander verglichen werden.

Es war stets eine höhere Aktivität im ungereinigten Bereich des Primärdokuments vorhanden als in den 12 Jahren vor der Messung mit 70 %igem Isopropanol abgerollten Bereichen. Sowohl die makroskopische Erscheinung als auch die *in situ* mikroskopische Untersuchung zeigte deutlich

Abb. 3:
Ein mit 70%igem Isopropanol gereinigter Bereich an der Nordwand, 3. Bildszene (Die Beruhigung des Sturmes auf dem See Genezareth, F 6.1.2/18), 215-fache Vergrößerung (BioPhil, Scheerer).



mehr Rückstände des Pilzmycels in den ungerinigten Bereichen. Dadurch bleibt unklar, ob die geringere Aktivität in gereinigten Bereichen ausschließlich auf die mechanische Entfernung der Pilzstrukturen zurückzuführen ist oder ob der 70%ige Isopropanol zusätzlich zur mechanischen Entfernung noch eine desinfizierende Wirkung hatte.

An solchen Bereichen (gereinigt sowie ungerinigtes Primärdokument), wo 2011 durch Petersen eine mikrobielle Aktivität festgestellt wurde, war diese im Jahr 2015 zurückgegangen. In allen gereinigten Bereichen des Bilderzyklus war keine Aktivität mehr messbar, während im ungerinigten Primärdokument eine deutliche Reduktion im Vergleich zur Messung von 2011 verzeichnet werden konnte. Lediglich in der Bogenlaibung (C 3.3), die ebenfalls 2003 mit *Aqua dest.* und Isopropanol 30:70 mit Wattestäbchen gereinigt wurde, war eine geringe Aktivität vorhanden. Hier fand jedoch 2011 keine Aktivitätsmessung statt, sodass die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität erst in Zukunft beurteilt werden kann. Im Bilderzyklus der Südwand waren an keiner der stichprobenartig durch *in situ* Mikroskopie untersuchten Stellen Rückstände vom Pilzmycel sichtbar. An der Nordwand dagegen konnte die *in situ* mikroskopische Untersuchung an allen geprüften Stellen des Bilderzyklus deutliche Spuren von dunkelbraunen bis schwarzen Hyphen und Pilzsporen nachweisen. Besonders deutlich war dies im Primärdokument sichtbar, wo auch die makroskopische Erscheinung eine deutliche dunkelgraue Färbung hatte. Auch in den gereinigten Bereichen konnte durch die *in situ* mikroskopische Untersuchung ein geringer Rückstand des Pilzmycels festgestellt werden. Diese Rückstände befanden sich jedoch weitgehend in den Vertiefungen der Oberfläche (Abb. 3). Nach der Form und Farbe des *in situ* Befunds handelt es sich wahrscheinlich in allen

Fällen um dieselbe Pilzart. Da Petersen 2011 die Anzucht eines nicht näher bestimmten Vertreters der Gattung *Cladosporium* gelang, handelt es sich höchst wahrscheinlich um ebendiese *Cladosporium* Art. Bei Anzucht-Versuchen im Jahr 2015 konnten nur unterschiedliche Arten der Gattung *Cladosporium* angezchtet werden, jedoch war keine davon in solchen Mengen vorhanden, die auf ein *in situ* Wachstum an der beprobten Oberfläche schließen ließ.

Oberflächenbesiedlung der Wandflächen der Kryptahalle

In der Kryptahalle war makroskopisch 2014 kein mikrobieller Befall sichtbar. Im Sinne einer Bestandsaufnahme wurden die besonders schützenswerten mittelalterlichen Malereien an der Ostwand sowie Bereiche, die ein Klima mit besonderem Schimmelpilzrisiko aufwiesen, untersucht.

An der nördlichen Seite der Ostwand, im Bereich der mittelalterlichen Tünche unterhalb der Malerei (E 50.1) befand sich eine Stelle mit deutlich grüner Verfärbung. Diese Grünfärbung konnte auf einen Algenbefall zurückgeführt werden.

An der südlichen Seite der Ostwand (E 50.2) wurde aus dem Bereich der originalen Tünche eine Probe ohne sichtbaren Befall entnommen. Erstaunlicherweise waren bei der mikroskopischen Untersuchung verschiedene Mikroorganismen sichtbar, wenn auch lediglich in geringer Anzahl. Zum einen war ein leichter bakterieller Befall durch Actinomyceten, zum anderen waren Rückstände eines Pilzmycels vorhanden, der nach der *in situ* Morphologie zur Gattung *Scopulariopsis* gehört. Der starke Abbaugrad des Pilzmycels ließ auf einen Altbefall schließen. In der unmittelbaren Umgebung dieser mikrobiologisch untersuchten Stelle wurden durch Anna Schönemann (ehemals MPA Stuttgart) arsenhaltige Oberflächenbestandteile (vermutlich Auripigment) festgestellt. Eine REM Aufnahme des arsenhaltigen Bereichs zeigte in die Oberfläche eingebettete Hyphen und in der unmittelbaren Umgebung des arsenhaltigen Bereichs war wie oben erwähnt, das Wachstum einer *Scopulariopsis* Art, möglicherweise *Scopulariopsis brevicaulis*, nachgewiesen worden. Der Pilz *Scopulariopsis brevicaulis* kann in Verbindung mit arsenhaltigen Untergründen zur Bildung von giftigem Arsengas führen. Bei einer Untersuchung von Petersen im Jahr 2011 wurde an einer solchen, arsenhaltigen Stelle eine sehr hohe Aktivität festgestellt; zu jener Zeit war jedoch

der Arsengehalt des Untergrunds nicht bekannt. Im Oktober 2015 wurde daher repräsentativ an zwei arsenhaltigen Stellen die mikrobielle Aktivität gemessen. An beiden Stellen konnte keine mikrobielle Aktivität nachgewiesen werden. Da eine Probenahme zur labormikroskopischen Untersuchung nicht möglich war, wurde eine großflächige *in situ* Untersuchung mit einem Digitalmikroskop mit einer 215-fachen Vergrößerung durchgeführt. Dabei konnte keine Besiedelung durch Schimmelpilze aufgezeigt werden. Bei einer derartigen mikroskopischen Untersuchung könnte jedoch nur ein starker Befall festgestellt werden. Die hohe Aktivität von 2011 konnte durch Messungen im Jahr 2015 nicht bestätigt werden. Jedoch konnten auch im Bericht vom 25.2.2012 (Petersen 2012) die hohen Aktivitätswerte nicht erklärt werden, da die Anzucht der Probe eine vergleichbar geringe Kontamination aufwies und durch luftgetragenen Sporenflug hätte verursacht worden können. Die mittelalterlichen Wandmalereien müssen regelmäßig auf eine mikrobielle Besiedlung hin untersucht werden, wodurch auch eine Besiedlung der arsenhaltigen Bereiche frühzeitig erkannt würde. An der Westwand wurden repräsentativ zwei Stellen auf mikrobielle Besiedlung getestet. Die Probenahmestelle an der südlichen Seite der Westwand (C 30.2) wurde wegen der starken Feuchtebelastung gewählt, während an der nördlichen Seite der Westwand (C 30.1) gelblich-graue Verfärbungen sichtbar waren, die auf ihren mikrobiellen Ursprung hin untersucht wurden.

An beiden untersuchten Stellen der Westwand konnte kein mikrobieller Befall festgestellt werden.

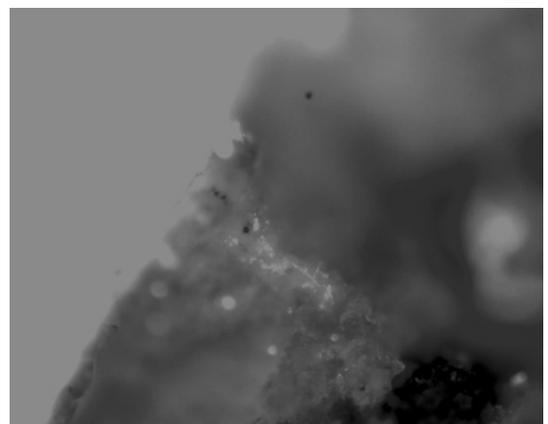
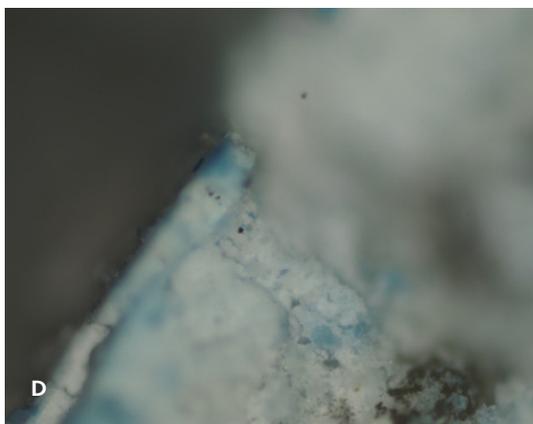
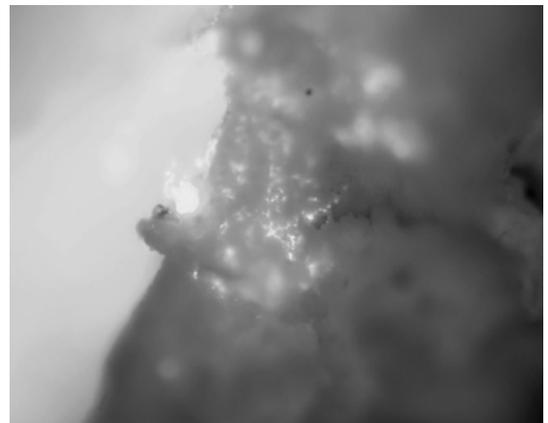
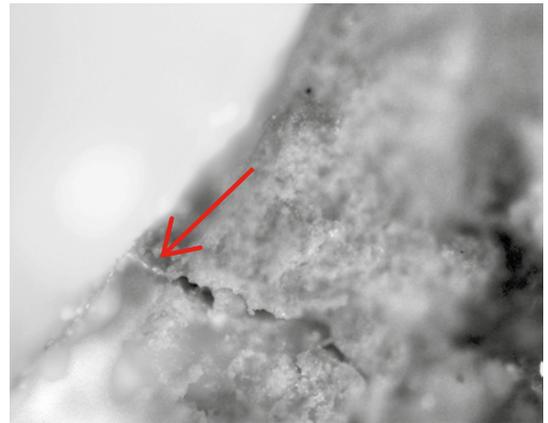
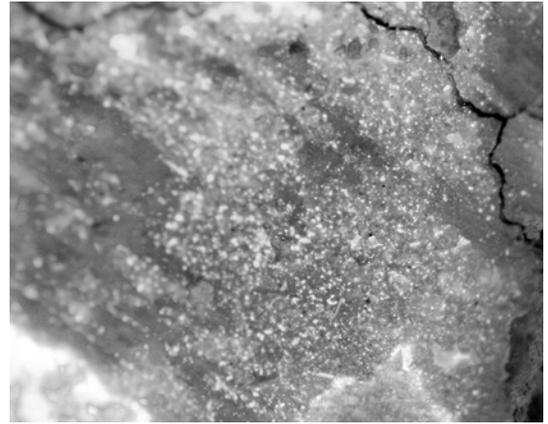
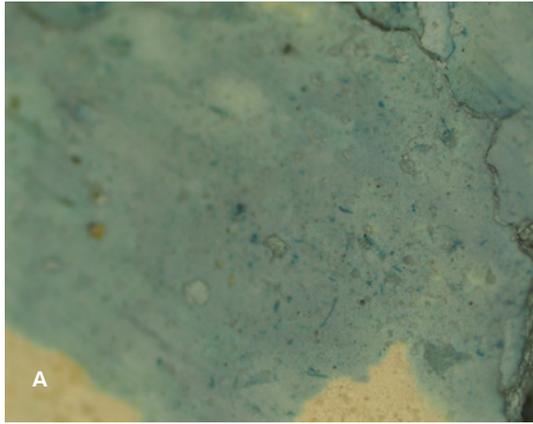
Oberflächenbesiedlung der Wandflächen des Kryptagangs

Die Wandoberflächen des Kryptagangs waren nach der Reinigung im September 2011 mittels 70 %igem Isopropanol wieder großflächig besiedelt, insbesondere auf den neu ergänzten Bereichen. Das Schadensbild (leichter Glanz im Gegenlicht) war dasselbe, wie bei der Untersuchung im Jahr 2009 (Abb. 4). Bei jener Untersuchung wurde die hohe Belastung der Kryptaluft durch *Engyodontium album* auf die großflächige Besiedlung der Wandoberflächen des Kryptagangs zurückgeführt. Eine erneute Untersuchung dieser Oberflächen im Frühjahr 2015 ergab, dass zusätzlich zu dem großflächigen Befall durch den Schimmelpilz *E. album* ein Befall durch Actinomyceten vorlag, also von Bakterien, welche ein Mycel ausbilden und damit den Schimmelpilzen sehr ähnlich sehen. Nach der morphologischen Beschreibung der häufigsten innenraumrelevanten Actinomyceten könnte es sich bei den auf dem Gang der Krypta vorkommenden Actinomyceten um die Gattung *Pseudonocardia* handeln (Gabrio et al. 2009). Eine Bruchkante der Materialprobe vom abgebrochenen Opferputz von der Nordseite des Kryptagangs wurde mit Calcofluorwhite angefärbt und mit UV-Anregung sowie im visuellen Licht mikroskopisch untersucht (Abb. 5). Der



Abb. 4:
Mikrobielle Besiedlung an den Glanzstellen der Nord- und Süd wand des Krypta-Gangs durch den Schimmelpilz *Engyodontium album* und Actinomyceten (BioPhil, Scheerer).

Abb. 5:
Mikroskopische Ansicht
einer Bruchkante des
Kalkputzes aus den
1980er Jahren bei
100-facher Vergrößerung
ohne (links) und mit
(rechts) UV Anregung
(Anfärbung mit Calco-
fluorwhite) (BioPhil,
Scheerer).



Befall, sichtbar an den hell fluoreszierenden Punkten, war vor allem auf der Oberfläche vorhanden (A). Die Untersuchung der Bruchkante (B–D) zeigte, dass die Mikroorganismen an den meisten Stellen nicht in die Tiefe wuchsen. An Rissen (B, D) und aufgelockerten Bereichen (C) waren die mikrobiellen Zellen jedoch auch unterhalb der Oberfläche sichtbar.

Monitoring der mikrobiellen Aktivität im Kryptagang

An der Südwand des Kryptagangs (B 2.2) wurde im April 2015 eine Monitoringstelle installiert, um die Veränderung der mikrobiellen Aktivität in Bezug auf klimatische Veränderungen zu kontrollieren. Die mikrobielle Aktivität an der Monitoringstelle der Südwand des Kryptagangs war während der ersten zwei Messungen im April und Mai 2015 sehr hoch und bei der Messung im Oktober 2015, ca. einem Monat nach der Installation der Heizregister, deutlich zurückgegangen auf eine minimale Aktivität. Seit jener Messung im Oktober 2015 ist die Aktivität bis Juli 2016 um das 2,44-fache angestiegen auf eine geringe Aktivität. Das Monitoring ist ein langfristiges Projekt, dessen Entwicklung weiter beobachtet werden muss (Abb. 6).

Der Grund für den drastischen Rückgang der mikrobiellen Aktivität im Oktober 2015 wird in der Veränderung des Krypta-Klimas durch die DBU-Projektbeteiligten der MPA Stuttgart vermutet. Die Klimaveränderung wurde umgesetzt durch die Installation von Rippenheizrohren vor den Wänden der Krypta sowie einer verbesserten Programmierung der geregelten Öffnung der Fenster in der Krypta-Halle. Beides (Rippenheizrohre und verbesserte Fensteröffnung) wurde im September 2015, also ca. einen Monat vor Messung im Oktober 2015 in Betrieb genommen. Der leichte Anstieg der mikrobiellen Aktivität bei der letzten Messung im Juli 2016 lag vermutlich an dem regenreichen Frühling 2016 und den höheren Innenraumtemperaturen im Vergleich zum Herbst.

Neubefall in der Kirche seit 2011

Regelmäßige Kontrollen im gesamten Gebäude ermöglichen das frühe Erkennen neuer mikrobiell belasteter Bereiche, bevor sich der Befall ausbreiten kann. Am Abgang zur Krypta (H 8.1.6)

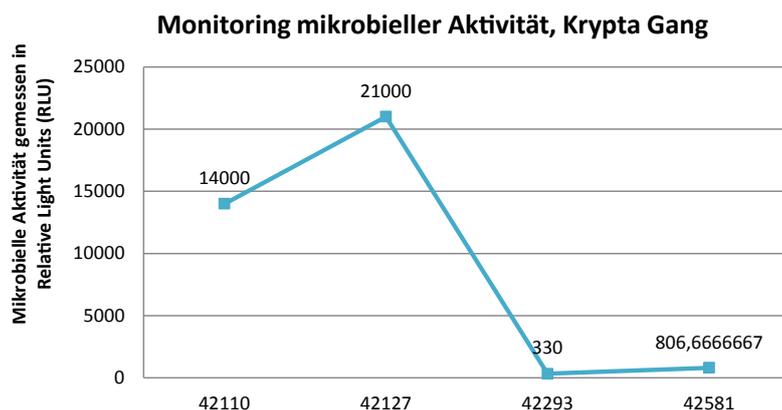


Abb. 6: Entwicklung der mikrobiellen Aktivität zwischen April 2015 und Juli 2016 (BioPhil, Scheerer).

und im rechten Beichtstuhlschrank (A 10.6) wurde im April 2015 erstmals ein Befall durch Schimmelpilze entdeckt. Am Abgang zur Krypta handelte es sich um eine stark degenerierte *Cladosporium*-Art, im rechten Beichtstuhlschrank, der als Putzschrank genutzt wird und neueren Datums ist, handelte es sich um eine *Geotrichum*-Art. Der Befall im Beichtstuhl wurde im April 2015 mittels „H“-Sauger gereinigt und mit dem Desinfektionsmittel Kohrsolin extra (3%ig) feucht gewischt. Der Befall am Abgang zur Krypta wurde nicht behandelt. Eine regelmäßige Überprüfung der Ausdehnung des Befalls findet statt.

Reinigungsproben

Ende der 1980er Jahre wurde der Zementputz in Teilen der Sockelzonen der Wandflächen gegen einen Kalkputz mit Kalktünche ausgetauscht. Im Jahr 2009 wurde ein massiver, großflächiger Befall der Wände des Kryptagangs festgestellt, welcher 2011 mit 70%igem Isopropanol gereinigt wurde. Da 2015 ein starker Wiederbefall nachgewiesen wurde, stellte sich die Notwendigkeit effektiverer Maßnahmen, den Befall zusätzlich zur klimatischen Verbesserung der Krypta zu verhindern. In Zusammenarbeit mit dem ausführenden Restaurator, Robert Lung, wurden Probefelder angelegt, an denen verschiedene Reinigungsmethoden auf ihre Effektivität hin getestet wurden, den Befall zu entfernen und einem Wiederbefall möglichst lange vorzubeugen. Die Probereinigungen beinhalteten folgende Methoden (Abb. 7 von links nach rechts):

1. Abgesaugt mit Staubsauger (Schutzklasse „H“) und Pinsel
2. Abgesaugt und zusätzlich mit Akapad gereinigt



Abb. 7:
 Probefelder an der Nordwand (Arbeitsproben: Lung, Reichenau) des Krypta-Gangs drei Monate nach der Reinigung mit verschiedenen Methoden (BioPhil, Scheerer).

3. Abgesaugt und zusätzlich mit Wattetupfer getränkt in 80 % Isopropanol gereinigt
4. Abgesaugt und zusätzlich mit Wattetupfer getränkt in 80 % Ethanol gereinigt
5. Abgesaugt und zusätzlich 1-maliger Auftrag von Kalksinterwasser
6. Abgesaugt und zusätzlich 5-maliger Auftrag von Kalksinterwasser
7. Abgesaugt und zusätzlich mit Wattetupfer getränkt in 15 % Wasserstoffperoxid gereinigt
8. Negativkontrolle unbehandelt
9. Abgesaugt und zusätzlich 100-stündige UV-Bestrahlung

Drei Monate nach der Reinigung war die mikrobielle Aktivität bei allen Reinigungsmethoden um ungefähr denselben Grad reduziert (Abb. 8). Während die unbehandelte Negativkontrolle einen durchschnittlichen Aktivitätswert von knapp über 3000 RLU hatte, lagen die Aktivitäts-

werte der gereinigten Probefelder zwischen 57 RLU und 105 RLU. Werte unter 100 RLU werden als „Messungenauigkeit“ bzw. „Hintergrundrauschen“ einer unbefallenen Oberfläche interpretiert. Da das Absaugen mithilfe eines Pinsels mit anderen Methoden den geringsten Aktivitätswert erzielte, wird davon ausgegangen, dass der Reinigungsmechanismus vor allem die mechanische Entfernung der Zellen war.

Ein Wiederbefall wird u. a. von der Menge der lebensfähigen Zellen im oberflächennahen Bereich des Objekts bestimmt. Eine erfolgreiche Abtötung von Zellen in Poren und Mikrorissen direkt unterhalb der Oberfläche, welche die Wattetupfer-Beprobung der Aktivitätsmessung nicht erfassen kann, kann das Risiko eines Wiederbefalls reduzieren.

Die mikrobielle Aktivität an den Probefeldern wurde erneut im Juli 2016, ca. ein Jahr nach der Erstellung der Probefelder mit der Trockenreinigung und teilweise weiterer Behandlungsmetho-

Monitoring mikrobieller Aktivität der Reinigungsproben

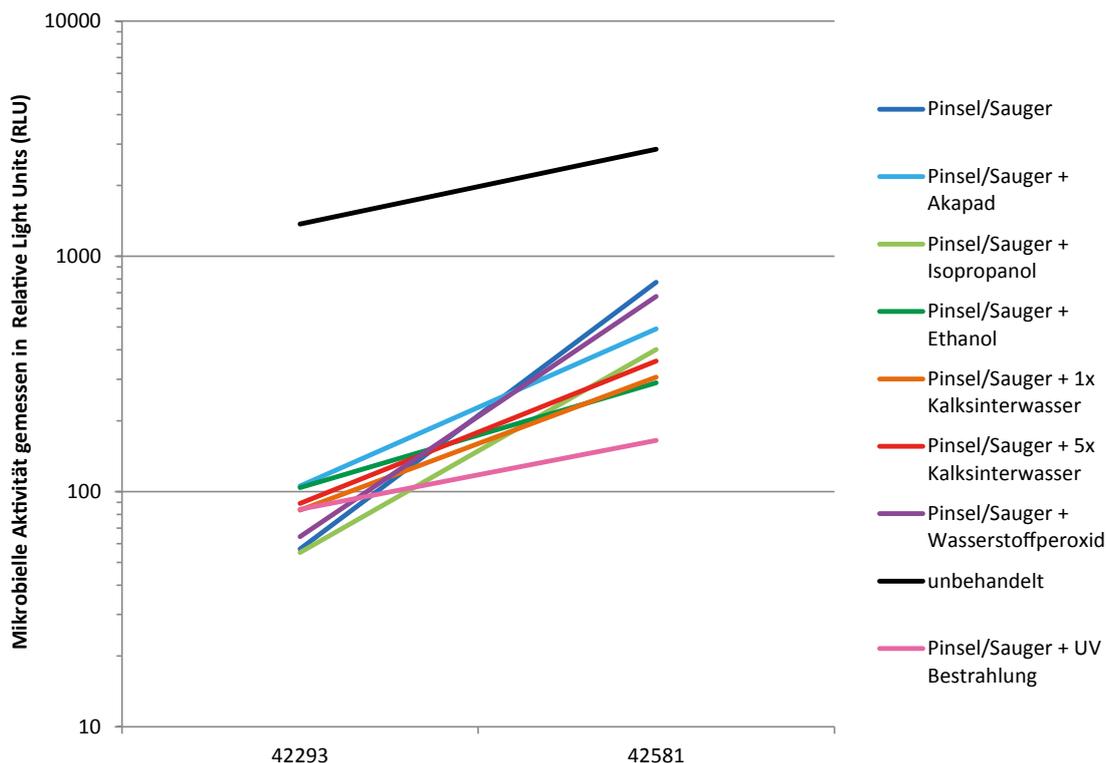


Abb. 8:
Die Entwicklung der mikrobiellen Aktivität nach der Reinigung mit verschiedenen Methoden im Juli 2015 (BioPhil, Scheerer).

den, gemessen. An allen gereinigten und behandelten Probeflächen war die mikrobielle Aktivität im Vergleich zur Messung im Oktober 2015 leicht erhöht. Dabei ist jedoch zu beachten, dass die Aktivität im Oktober 2015 an allen Stellen extrem gering war, was vermutlich an dem sehr trockenen Sommer sowie der Installation und Inbetriebnahme der Heizregistern zur Verringerung der Oberflächenfeuchte lag. Auch die mikrobielle Aktivität der unbehandelten Negativkontrolle war leicht erhöht, wenn auch in einem etwas geringeren Maß als an den gereinigten Stellen. Im Vergleich zur unbehandelten Negativkontrolle, welche sich lediglich um einen Faktor von 2,08 erhöhte (von 3170 RLU auf 2850 RLU), war die Aktivität an den meisten behandelten Proben deutlich stärker erhöht um einen Faktor zwischen 1,96 und 13,60.

Die geringste mikrobielle Aktivität zeigte die Probefläche, welche nach der Trockenreinigung mit UV-Licht bestrahlt wurde. Ebenso war die Aktivität an den Probeflächen, die nach der Trockenreinigung mit Alkohol (Ethanol und Isopropanol) und mit Kalksinterwasser gereinigt

wurden, nur leicht erhöht. Ein vergleichbares Ergebnis erzielte das Probefeld, welches nach der Trockenreinigung mit Pinsel und Staubsauger (womit alle Probefelder gereinigt wurden) mit Akapad nachgereinigt wurde. Die Behandlung mit Wasserstoffperoxid verbesserte das Reinigungsergebnis gemessen an der mikrobiellen Aktivität nicht, da diese an der mit Wasserstoffperoxid behandelten Stelle vergleichbar hoch war, wie an der ausschließlich mit Pinsel und Sauger trockengereinigten Probefläche. Ebenso verbesserte der mehrmalige Auftrag von Kalksinterwasser nicht das Reinigungsergebnis. Eine langfristige Kontrolle der Entwicklung der mikrobiellen Aktivität durch jährliche Messungen in den Sommermonaten, d. h. bei ungefähr gleichen klimatischen Bedingungen, ist geplant.

Schlussfolgerung und Ausblick

Insgesamt ist die mikrobielle Belastung der Kirche St. Georg in Oberzell rückläufig. Die biogene Belastung der Innenraumluft ist weder in der

Krypta noch im Kircheninnenraum gegenüber der Außenluft erhöht. Selbst in der Krypta, welche 2009 noch stark belastet war, ist trotz des Wiederbefalls auf den Wandflächen des Gangs eine mikrobielle Belastung der Luft weder durch Luftkeimmessung noch durch Partikelmessung nachweisbar.

An den mittelalterlichen Wandmalereien im Kirchenschiff hatte sich nach einem Schimmelpilzbefall, der in den 1980er Jahren mittels Trockenreinigung entfernt wurde, dieser ab ca. 1998 wieder entwickelt und in den folgenden Jahren so stark ausgebreitet, dass er 2003 durch mit 70 %igem Isopropanol getränkten Wattetupfern abgenommen wurde. Während bei einer Aktivitätsmessung 2011 durch Petersen im ungereinigten Primärdokument eine deutliche Aktivität und in gereinigten Bereichen zum Teil eine leichte und zum Teil keine Aktivität festgestellt wurde, waren 2015 in allen gereinigten Bereichen des Bilderzyklus keine Aktivität mehr messbar. Im ungereinigten Primärdokument dagegen war eine deutliche Reduktion im Vergleich zur Messung von 2011 erkennbar. Damit war eine nachhaltige Verbesserung des Schimmelpilzbefalls auf den Wandmalereien der Nordwand des Kirchenschiffs seit dem Ende der Reinigung 2004 und der Umsetzung des Klimakonzepts erreicht worden.

Im Bilderzyklus der Südwand, wo nie ein Schimmelpilzbefall dokumentiert wurde, war auch bei den 2015 untersuchten Stellen kein Schimmelpilzbefall sichtbar. An der Nordwand dagegen konnte die *in situ* mikroskopische Untersuchung an allen begutachteten Stellen des Bilderzyklus deutliche Spuren von dunkelbraunen bis schwarzen Hyphen und Pilzsporen nachweisen. Auch in den gereinigten Bereichen konnten geringe Rückstände des Pilzmycels weitgehend in den Vertiefungen der Oberfläche festgestellt werden. Es handelt sich vermutlich in allen Fällen um einen nicht näher bestimmten Vertreter der Gattung *Cladosporium*. Warum der Pilzbefall großflächig auf der Nordwand, nicht aber auf der Südwand vorhanden war, scheint sehr komplexen Mechanismen zu unterliegen. Da Pilze organische Materialien als Kohlenstoffquelle sowie als Energielieferant benötigen, wurde vermutet, dass die Fixierung von 1908 und die kaseingebundenen Übermalungen von 1921/22 die Nährstoffgrundlage für die Pilze darstellten und wegen des schlechteren Erhaltungszustands der Malereien an der Nordwand dort eventuell in größerem Maße aufgetragen wurden. Die Kartierung der

Übermalungen zeigt jedoch, dass diese auf der Nordwand und der Südwand in ungefähr demselben Umfang aufgebracht wurden. Ein weiterer Grund, warum die Wandmalereien der Südwand nicht durch Schimmelpilze befallen wurden, wurde in deren ca. 3 °C höheren Oberflächentemperatur vermutet (Jakobs 2014).

Eine neue, sehr intensive und differenzierte Auswertung der Klimadaten ergab weitere Erkenntnisse über die Oberflächentemperatur und damit die relative Luftfeuchtigkeit im Nahfeld der Wandmalereien der Nord- und der Südwand (Neycheva 2016). Diese Arbeit bewertet die klimatischen Verhältnisse ab 2001 bis 2016. Daraus geht hervor, dass zwischen 2001 und 2005, also vor den klimatischen Veränderungen durch den Einbau der Lüftungsanlage die relative Luftfeuchtigkeit in der Nähe der Wandmalereien an den westlichen und östlichen Außenbereichen des südlichen Bilderzyklus (Südwest- und Südostseite) die relative Luftfeuchte um ca. 3 % bis 5 % höher lag als an den entsprechenden Außenbereichen (Nordwest- und Nordostseite) der Nordwand. Im mittleren Bereich des Bilderzyklus war die Verteilung der relativen Luftfeuchtigkeit umgekehrt: in der Nähe der Nordwandmitte lag diese ca. 2 % über der der Südwandmitte. Die Ausbreitung des Befalls auf der Nordwand reicht jedoch über alle vier Szenen des Bilderzyklus. Weiterhin berichtet Neycheva, dass nach dem Einbau der Lüftungsanlage im Dezember 2005 „keine Verbesserung der Raumklimasituation hinsichtlich einer starken Senkung der relativen Luftfeuchte im Kirchenraum festgestellt werden“ konnte. Tatsächlich zeigte sich stattdessen ein langfristiger Anstieg der relativen Luftfeuchte bei leichtem Absinken der Innentemperatur (Neycheva 2016).

Der großflächige mikrobielle Befall in der Krypta beschränkte sich weitgehend auf den modernen Putz, während die mittelalterlichen Wandmalereien und Tünche nur sehr geringfügig durch unterschiedliche Mikroorganismen kontaminiert waren. In der Krypta war der in den 1980er Jahren neu eingebrachte Kalkputz schnell großflächig wiederbefallen. Nach der Reinigung 2003 mittels 70 %igen Isopropanol war 2009 wieder nahezu die gesamte Wandfläche des Kryptagangs durch einen weißlichen Schimmelpilz befallen, der im Gegenlicht glänzte. Dieser wurde 2011 auf dieselbe Weise abgenommen, jedoch waren die Wandflächen zu Beginn des DBU Projekts abermals nahezu vollständig besiedelt. Das Schadensbild (leichter Glanz im Gegenlicht) war das-

selbe, wie bei der Untersuchung im Jahr 2009 und auch die Verteilung des Befalls auf den Wandflächen des Kryptagangs war nahezu gleich geblieben. Es handelte sich dabei um einen Befall durch den Schimmelpilz *Engyodontium album* sowie durch Actinomyceten vermutlich der Gattung *Pseudonocardia*. Die Besiedlung der Wände des Kryptagangs durch *E. album* und Actinomyceten konzentrierte sich weitgehend auf die Oberfläche. Die Bakterien besiedelten jedoch auch Risse, welche Kontakt mit der Oberfläche hatten sowie aufgelockerte Zonen dicht unterhalb der Oberfläche. Sowohl der Schimmelpilz *E. album* als auch Actinomyceten werden häufig auf feuchtegeschädigtem Putz in Innenräumen angetroffen und gelten als Indikatororganismen für Feuchteschäden in Innenräumen. Beide haben ihren natürlichen Lebensraum im Erdreich, wo sie zur Materialverrottung und damit zur Bodenbildung beitragen. Obwohl *E. album* bei immungeschwächten Personen zu Krankheiten führen kann (de Hoog et al. 2000), wird davon ausgegangen, dass er gesunden Personen und solchen mit nur leicht geschwächtem Immunsystem nicht zum gesundheitlichen Problem wird. Über allergene Reaktionen auf *E. album* liegen keine Berichte vor. Die Ökologie von Actinomyceten auf Kulturgut ist ein nicht hinreichend beschriebener Bereich der Mikrobiologie. Das Vorkommen von Actinomyceten in feuchtegeschädigten bzw. ehemals feuchtegeschädigten Innenräumen ist ein häufig auftretendes, jedoch oft übersehenes Phänomen, dem bisher wenig Beachtung geschenkt wurde. Die Untersuchungen und Ergebnisse über Actinomyceten in Innenräumen ist noch zu lückenhaft,

um deren gesundheitliche Relevanz hinreichend darstellen zu können. Ähnlich wie Schimmelpilze haben einige Arten allergisches Potential und können Toxine ausbilden (Gabrio et al. 2009).

Da sowohl *Actinomyceten* als auch *Engyodontium album* ein hohes Feuchtebedürfnis haben, ist anzunehmen, dass eine langfristige Verbesserung des Innenraumklimas der Krypta mit einer Absenkung der relativen Feuchtigkeit im Nahfeld der Wandoberflächen ein weiteres Wachstum verhindern wird. Dabei ist ein Klimakorridor zu wählen, der sowohl die oberflächen-nahe Feuchte reduziert, mikrobiellen Wachstum verhindert und gleichzeitig auf die Salzmische in den Putzen reagiert, um Salzphasenwechsel und Kristallisationen an den Oberflächen zu verhindern. Zur nachhaltigen Bekämpfung des immer wiederkehrenden Befalls im Kryptagang wurden Probefelder angelegt, auf denen verschiedene Reinigungsmethoden auf ihre Effektivität hin untersucht werden. Die Auswertung dieser Reinigungsproben muss langfristig erfolgen; bisher zeigte sich, dass erwartungsgemäß keine der Reinigungsmethoden einem Wiederbefall vorbeugen konnte. Dennoch konnte auf manchen Probefeldern der Anstieg der mikrobiellen Aktivität verzögert werden.

Die langfristige Entwicklung der Wiederbesiedlung auf den Reinigungsfeldern gehört wie die Beobachtung der mikrobiellen Aktivität in Abhängigkeit zur klimatischen Veränderung in der Krypta und im Kirchenschiff ebenso zum mikrobiologischen Monitoring in St. Georg, wie die Kontrolle auf einen Neubefall an bisher unkontaminierten Stellen.

Literatur

- De Hoog, G. S. / Guarro, J. / Gené, J. / Figueras, M. J.: Atlas of Clinical Fungi. Utrecht 2000.
- Eberspächer, Jürgen: Unveröffentlichter Bericht der mikrobiologischen Untersuchung vom 20. August 1998, Archiv LAD.
- Gabrio, Thomas / Weidner, Ursula / Miljanic, Tina / Fischer, Guido / Groth, Ingrid / Martin, Karin / Kämpfer, Peter / Jäckel, Udo / Schäfer, Jenny / Lorenz, Wolfgang / Trautmann, Christoph / Dill, Ingrid: Untersuchungen zum Vorkommen und zur gesundheitlichen Relevanz von Bakterien in Innenräumen. Umweltbundesamt. Berlin 2009.
- Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Weltkulturerbe!“ Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2014, S. 155–161.
- Kühn, Hermann: Unveröffentlichter Bericht der Pigmentanalyse vom 9. August 1982, Archiv LAD.
- Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg: Schimmelpilze in Innenräumen – Nachweis, Bewertung, Qualitätsmanagement. Abgestimmtes Arbeitsergebnis des Arbeitskreises „Qualitätssicherung – Schimmelpilze in Innenräumen am Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg“. Stuttgart 2004.
- Lung, Robert: Bericht zur Wartung WM 2003, Archiv LAD.
- Neycheva, Elka: Analysen zur klimatischen Beanspruchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg

- (Reichenau) zur Entwicklung von Bewertungsstrategien. Unpublizierte Masterarbeit, Universität Stuttgart, Studiengang Bauingenieurwesen, 2016.
- Petersen, Karin: Mikrobieller Befall mittelalterlicher Wandmalerei – Der Einfluss konservatorischer und restauratorischer Behandlungen. ICOMOS Journals of the German National Committee. 2014, S. 259–264.
- Petersen, Karin: Unveröffentlichter Bericht der mikrobiologischen Untersuchung vom 25. Februar 2012, Archiv LAD.
- Reichwald, Helmut F.: Denkmalversleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg. 3, 2003, S. 252–257.
- Scheerer, Stefanie: Unveröffentlichter Bericht der mikrobiologischen Untersuchung vom 6. September 2009, Archiv LAD.
- Spaaij, Frans: Unveröffentlichter Bericht der mikrobiologischen Untersuchung vom 20. November 2003, Archiv LAD.
- Umweltbundesamt: Leitfaden zur Vorbeugung, Untersuchung, Bewertung und Sanierung von Schimmelpilzwachstum in Innenräumen („Schimmelpilz-Leitfaden“), Umweltbundesamt, Innenraumhygienekommission des Umweltbundesamts. Berlin 2002.

Raumluft-Monitoring in St. Georg auf der Reichenau: Leichtflüchtige organische Verbindungen, Staubpartikel und deren Quellen

Manuela Reichert, Jürgen Frick, Dirk Scheuevens, Jean Michel Zapf, Werner Weinzierl

Einleitung

Neben dem Raumklima-Monitoring in Kirche und Krypta wurde zusätzlich ein Monitoring gasförmiger Verbindungen und partikelförmiger Substanzen durchgeführt. Ziel war es hierbei, den anthropogenen Schadstoffeintrag und das daraus resultierende Schädigungspotenzial zu evaluieren. Hintergrund ist die Einführung einer Besucherlenkung seit 2013 in den Sommermonaten von Mai bis September, die den Besucherstrom mittels geführter Gruppen kanalisiert. Dies bedeutet eine Einschränkung für den Individualtourismus, da man sich für eine Führung anmelden muss oder nur zu festen Terminen an den öffentlichen Führungen teilnehmen kann. Diese Führungen und die Gottesdienste sind in dieser Zeit die einzigen Möglichkeiten, die Kirche zu besuchen. Mit der Erfassung des Schädigungspotenzials und möglicher Quellen soll eine Entscheidungshilfe gegeben werden, ob die Besucherlenkung auch künftig fortgesetzt wird. Im Einzelnen wurden Untersuchungen zur Charakterisierung der anthropogenen Umwelteinflüsse durchgeführt, bei denen die Belastung mit organischen Verbindungen mikrobiellen Ursprungs und die Ablagerung von Staubpartikeln sowie deren Quellen und Zusammensetzung im Vordergrund standen. Während es sich bei ersteren um punktuelle Messungen handelte, wurde die Staubentwicklung mehrere Monate lang kontinuierlich mit Hilfe von Laserpartikelzählern beobachtet und mit den Besucherströmen und stattfindenden Veranstaltungen korreliert. Die Partikelmessungen wurden mit den Daten der in Schiff, Krypta und außerhalb der Kirche installierten Klima- und CO₂-Sensoren in Beziehung gesetzt. Darüber hinaus wurden Staubproben sowohl aktiv entnommen als

auch auf Passivsammlern abgeschieden und im Labor analysiert. Ergänzend fand eine Untersuchung von Bodenproben aus der direkt angrenzenden Landwirtschaft statt.

Ergebnisse

Leichtflüchtige organische Verbindungen

Aufgrund des in der Vergangenheit aufgetretenen mikrobiellen Befalls wurde die Raumluft in Kirche und Krypta auf bestimmte Substanzen getestet, die beim Stoffwechsel von Mikroorganismen freigesetzt und nach der englischen Bezeichnung „Microbial Volatile Organic Compounds“ als MVOC bezeichnet werden. Allerdings sind nicht alle flüchtigen Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen eindeutig auch einer solchen Quelle zuzuordnen. Eine Vielzahl dieser Substanzen kommt ubiquitär vor, kann beispielsweise auch aus Reinigungsmitteln und Baumaterialien freigesetzt oder auf Tabakrauch etc. zurückgeführt werden. Darüber hinaus unterscheiden sich die MVOC je nach Schimmelpilzart und Substrat. Gegenwärtig werden vor allem Dimethylsulfid, 2-Methyl-1-butanol, 2-Pentylfuran, 1-Octen-3-ol, Dimethyldisulfid, 3-Methyl-1-butanol und 3-Methylfuran als Indikatoren für Schimmelschäden angesehen (AGÖF 2017, Legrum 2011).

Im April 2015 wurde vom Restaurator Robert Lung im Flur der Krypta eine befallene Stelle an der Südwand identifiziert, an der anschließend über eine Vorrichtung zur Anreicherung der emittierten Substanzen eine Luftprobe entnommen wurde (Abb. 1). Bei der Analyse dieser angereicherten Probe konnten zwei Indikatorsub-

Abb. 1:
Vorrichtung zur MVOC-
Probenahme in der
Krypta (LAD, Jakobs).



Bestimmungsgrenze (BG) der zweiten Entnahme konnten weitere MVOC nachgewiesen werden, allerdings in sehr geringen Konzentrationen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Chloranisole wurden bei der ersten Analyse nicht bestimmt (n. b.). Die bei der ersten Messung detektierte hohe Konzentration an Furfural (rot gekennzeichnet) konnte weder erneut bestätigt noch einer Quelle zugeordnet werden. MVOC sind blau markiert, das Minuszeichen kennzeichnet einen Wert unterhalb der Bestimmungsgrenze.

Staubpartikel

Aktive Staubentnahme

Im Laufe des Projekts wurden in den Arkadenfenstern der Westapsis und auf den Fensterbrüstungen der Kryptafenster wiederholt Staubproben auf Quarzglasfilter gesaugt und auf ihre Bestandteile hin untersucht. Weitere Proben stammen von den Fensterbrüstungen im Schiff (Abb. 2), von der Orgeloberfläche und zu Vergleichszwecken von einigen Fenstersimsen außerhalb der Kirche. Es handelte sich um horizontale oder schräge Flächen. Die Massen der gesaugten Staubproben bezogen auf die Sammeldauer in Tagen sind in Abbildung 3 (Krypta und Westapsis) und Tabelle 2 dargestellt. Zusätzliche Analysen erfolgten an Staubablagerungen von der Maleroberfläche (Probeentnahme Dörthe Jakobs / Robert Lung).

Die mittleren Tageswerte von 6,1 bis 6,8 mg/(m²d) in Krypta und Westapsis sind nahezu identisch, lediglich das Südfenster der Krypta hatte mit nur 3,5 mg/(m²d) einen deutlich niedrigeren Wert. Bemerkenswert sind die jahreszeitlichen Variationen in Krypta und Westapsis, die sich leicht unterscheiden (vgl. Abb. 3). Für den Außenbereich, in dem nur über eine Periode (25.7. bis 2.9.16) gesammelt wurde, ergaben sich mit 17,0 und 47,7 mg/(m²d) deutlich höhere Werte. An den Fenstern der Nord- und Südwand der Kirche, die sich noch etwas höher als die Arkadenfenster der Westapsis befinden, variieren die Mengen von Ost nach West von 3,7 bis 7,6 mg/(m²d) an der Südwand und von 2,9 bis 3,9 mg/(m²d) an der Nordwand (Sammelperiode 5 Monate). Im Labor wurden die Proben mit dem Stereomikroskop betrachtet und anschließend teilweise durch Ionenchromatographie und Röntgenbeugung analysiert.



Abb. 2:
Staubablagerung auf
einer Fensterbrüstung
der Kirche, hier: Nord-
wand, 2. Fenster von
Westen (Bereich D
4.1.1/19), linker Bereich
bereits gesaugt (LAD,
Jakobs).

stanzen in höherer Konzentration nachgewiesen werden, die in geringerer Konzentration auch im Kirchenschiff vorkamen, jedoch nicht in Vergleichsproben aus der Krypta und außerhalb des Gebäudes. Bei der Wiederholung der Messung im September 2016 wurden diese Substanzen nur noch in der angereicherten Probe mit deutlich geringerer Konzentration gemessen. Dies lässt auf einen Rückgang der mikrobiellen Aktivität schließen, was sich mit den Ergebnissen von Stefanie Scheerer deckt (vgl. Beitrag Scheerer im Tagungsband). Aufgrund der niedrigeren

Tabelle 1: Liste der quantifizierten VOC (schwarz) bzw. MVOC (blau). (n. b. = nicht bestimmt).

VOC/MVOC	außen		Kirche		Krypta Flur Süd		Krypta Altar	BG [$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	
	Apr 15 (Süd)	Sep 16 (Nord)	Apr 15 (Mitte)	Sep 16 (Nord)	Apr 15	Sep 16	Apr 15	Apr 15	Sep 16
1,4-Dimethylcyclohexan	-	-	1	-	2	-	2	1	1
1-Pentanol	-	-	-	0,03	-	0,03	-	0,12	0,03
1-Octanol	-	0,09	-	0,07	-	0,05	-	0,2	0,03
2-Ethyl-1-hexanol	-	-	-	-	1	-	-	1	1
1-Nonanol	-	0,06	-	-	-	-	-	0,2	0,06
2-Octanon	-	-	-	0,02	-	0,02	-	0,08	0,02
Furfural	-	-	-	-	7	-	-	1	1
2,4,6-Trichloranisol	n. b.	0,001	n. b.	0,001	n. b.	0,001	n. b.	-	0,001
2,3,4,6-Tetrachloranisol	n. b.	-	n. b.	0,002	n. b.	-	n. b.	-	0,001
2,3,4,5,6-Pentachloranisol	n. b.	-	n. b.	0,014	n. b.	0,002	n. b.	-	0,002
3-Methyl-1-butanol	-	-	-	-	-	-	0,08	0,08	0,02
2-Methylfuran	-	-	0,12	-	0,42	0,15	-	0,08	0,04
3-Methylfuran	-	0,02	-	-	-	0,04	-	0,08	0,02
2-n-Pentylfuran	-	-	-	-	-	0,06	-	0,08	0,02
2-Hexanon	-	-	-	0,03	-	0,04	-	0,08	0,03
3-Octanon	-	-	-	-	-	0,02	-	0,08	0,02
trans-2-Octen-1-ol	-	0,09	-	0,04	-	-	-	0,08	0,04
Dimethyldisulfid	-	-	0,12	-	0,63	0,01	-	0,08	0,01

Tabelle 2: Mittelwerte der gesaugten Staubproben in Milligramm pro Quadratmeter und Tag.

Zeitraum	Krypta Ost	Krypta Süd	Krypta Nord	Westapsis Nord	Westapsis Süd	Krypta Süd außen	Krypta Nord außen
	Mittelwerte über die jeweiligen Zeiträume in $\text{mg}/(\text{m}^2\text{d})$						
6.7.15–25.7.16	6,1	3,6	6,2	6,5	6,8	-	-
25.7.16–2.9.16	-	-	-	-	-	17	47,7
	Südwand		Nordwand				
	West	Ost	West	Ost			
13.10.15–15.3.16	7,6	-	3,9	-			
15.10.15–16.3.16	-	3,7	-	2,9			

Stereomikroskopische Untersuchungen

Gesaugte Proben

Während die Staubproben aus der Krypta eher grober Natur waren und sowohl deutlichen Putzabrieb in Form von „Schollen“ als auch organische Bestandteile (Pollen, Milben, Feder-

fragmente, etc.) aufwiesen, wurde in Arkadenfenstern der Westapsis sehr feiner, heller Staub gefunden, allerdings ebenfalls, wenn auch in geringerem Maße, mit feinen Fasern und teilweise biologischen Fragmenten durchsetzt. Verglichen mit der ersten Probennahme war die

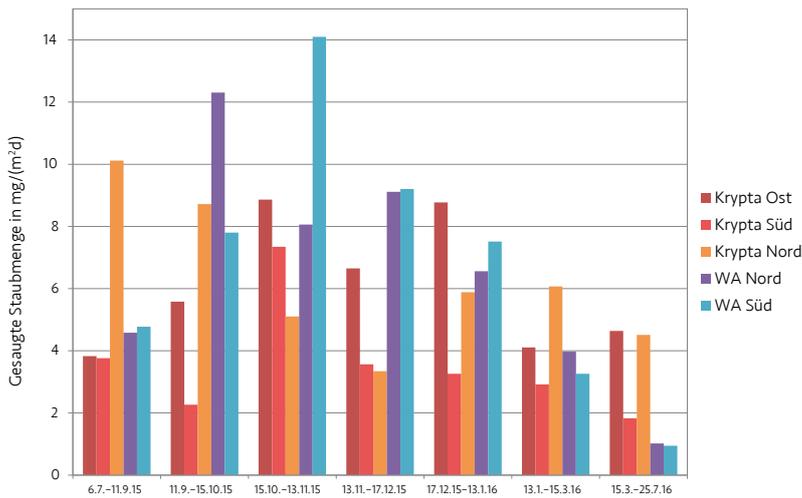


Abb. 3:
Gesaugte Staubproben
in Milligramm pro
Quadratmeter und Tag
für Krypta und Apsis
(MPA).

Staubmenge der Folgeproben aufgrund des mehrfachen Absaugens weniger mit sichtbaren organischen und faserigen Anteilen belastet.

Staubablagerungen auf der Malerei

Sämtliche Staubproben von der Oberfläche der Malerei wurden unter der Stereolupe betrachtet. Abgesehen von Fasern konnten je nach Untergrund verschiedenfarbige kugelige Pigmentpartikel beobachtet werden. Darüber hinaus wurden an einigen Stellen auch viele bräunliche Gebilde unbekannter Herkunft gefunden. Abbildung 4 zeigt eine besonders verschmutzte Stelle, Abbildung 5 gibt Einblick in die Zusammensetzung des abgepinselten Staubs. Einzelne Pigmentteilchen einer an der Südwand entnommenen Probe sind in Abbildung 6 dargestellt. Erste Untersuchungen mit konfokaler Raman-spektroskopie deuten auf Hämatit und Calcit

Abb. 4:
Verschmutzung auf der
Malerei im Bereich H
8.1.1/11 der Nordwand,
Probe RCHMPA944
(LAD, Jakobs).



hin. An anderen Proben konnten in blauen Partikeln Lazuritanteile (Ultramarin) nachgewiesen werden. Bei allen Pigmentpartikeln dürfte es sich um Abrieb der sehr schwach gebundenen Malerei des 19. Jahrhunderts handeln. Das Blaupigment der mittelalterlichen Malerei ist nachweislich Azurit (basisches Kupfercarbonat). Die Untersuchungen zu den Pigmentanalysen sind jedoch noch nicht abgeschlossen.

Salzanalyse durch Ionenchromatographie

Die mittels Ionenchromatographie bestimmten Salzgehalte zweier ausgewählter Serien von Staubproben sind in Tabelle 3 aufgeführt und in Abbildung 7 graphisch dargestellt.

Werte unterhalb 0,01 Masse-% wurden nicht weiter berücksichtigt. In der Krypta wurden vorwiegend Kalium und Nitrat, sowie Natrium, Chlorid und Sulfat gefunden, wohingegen auf der Brüstung des südlichen Arkadenfensters der Westapsis eine vergleichsweise höhere Konzentration an Ammonium und Phosphat vorlag. Die im Kirchenschiff von den Fensterbänken entnommenen Staubproben (Tab. 4) ergaben bei der Ionenchromatographie ihrer wässrigen Lösungen Konzentrationen in einer ähnlichen Größenordnung wie für die Fensterbänke der Arkadenöffnungen der Westapsis (vgl. Tab. 3). Allerdings ist die Konzentration an Ammoniumionen mit ca. 0,2 bis 0,9 Masse-% um ein Vielfaches höher. Darüber hinaus wurden vor allem an der Nordwand hohe Nitratwerte gemessen. An der Südwand fand sich dagegen bei der Erstbeprobung im Oktober 2015 mit 0,4 Masse-% sehr viel Nitrit, welches bei der Probenahme im März 2016 nur noch in Ansätzen vorhanden war. Chloride konnten insgesamt etwas weniger festgestellt werden. Bemerkenswert ist auch das Auftreten von Oxalaten in teilweise hohen Konzentrationen, wie z. B. im östlichen Bereich der Nordwand (F6.1.2/20) mit mehr als 0,3 Masse%. (Die Proben von den Fensterbänken der Westapsis und der Krypta wurden nicht explizit auf Oxalate untersucht, siehe Tab. 3.). Die ionenchromatographische Analyse ausgewählter Staubproben von der Wandmalerei (Tab. 4) ergab allgemein eine Belastung mit Sulfat, Nitrat und Oxalat. An der Südwand waren außerdem Phosphate und Chloride vorhanden. Aufgrund der sehr geringen Probenmenge sind die Ergebnisse für Fluorid, Chlorid, Nitrit nur qualitativ zu bewerten. Kationen konnten wegen eines Gerätedefekts nicht analysiert werden.

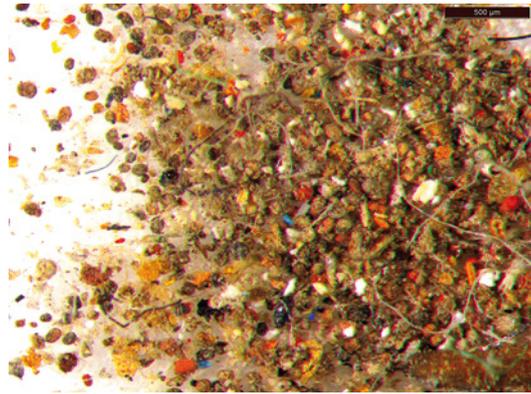
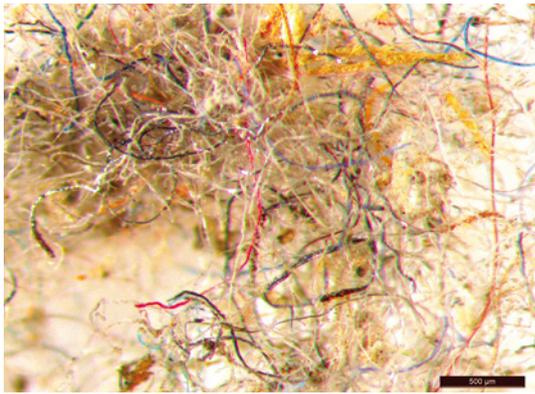


Abb. 5:
Fasern und Partikel einer
Staubprobe von der
Nordwand, Bereich
H 8.1.1/11,
Probe RCHMPA944
(MPA, Reichert).

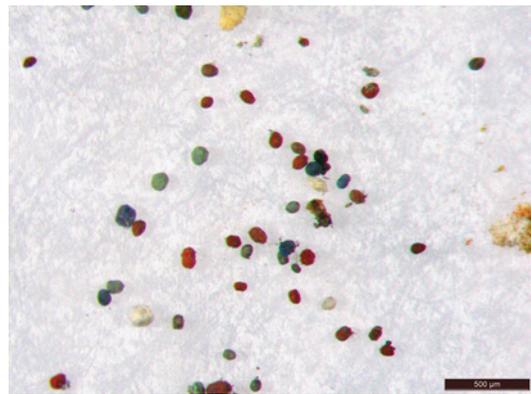
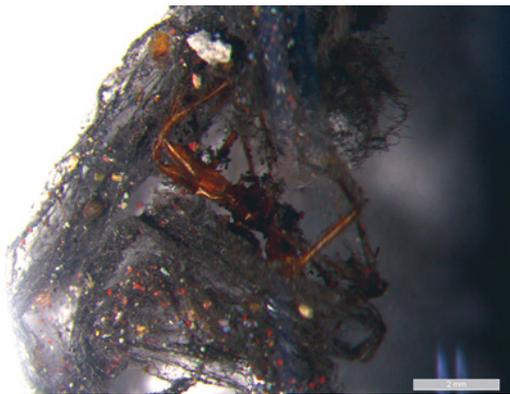


Abb. 6:
Bestandteile einer Staub-
probe von der Süd-
wand, Bereich H 8.2.2/14, Probe
RCHMPA946 (MPA,
Reichert).

Tabelle 3: Zusammensetzung ausgewählter Staubproben aus Kirche und Krypta (gerundet).

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻
	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
Krypta Ost										
06.07.15	1,07	< 0,01	11,30	0,33	2,64	0,93	< 0,01	9,78	n.b.	2,52
11.09.15	0,58	0,02	1,19	0,19	2,07	1,12	< 0,01	2,64	0,08	2,38
15.10.15	0,55	0,01	1,16	0,18	1,87	0,82	0,01	2,70	0,04	2,13
13.01.16	0,93	0,02	1,90	0,15	0,90	0,71	< 0,01	4,10	< 0,01	1,47
Westapsis Süd										
06.07.15	0,17	0,43	0,27	0,20	1,28	0,15	0,02	0,07	0,19	0,49
11.09.15	0,18	0,03	0,34	0,21	0,83	0,19	0,15	0,43	0,47	0,59
15.10.15	0,18	0,02	0,22	0,15	0,81	0,19	< 0,01	0,53	0,27	0,51
13.01.16	0,18	0,21	0,17	0,07	0,77	0,19	0,09	0,04	0,04	0,69

In Tabelle 4 sind zusätzlich die Werte für eine Staubprobe aufgeführt, die im September 2016 auf der Orgel entnommen wurde (Ablagerungszeitraum unbekannt). Natriumionen sind hier in sehr hoher, Ammoniumionen in hoher Konzen-

tration vorhanden. Calcium- und Sulfationen treten aufgrund des nicht vorhandenen Gips- und Kalkuntergrunds im Vergleich zu den anderen Proben erwartungsgemäß in deutlich geringeren Konzentrationen auf, die anderen Quellen

Tabelle 4: Salzanalyse der Ablagerungen auf Fensterbrüstungen, Orgel und Malerei.

	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Ca ²⁺	F ⁻	Cl ⁻	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	SO ₄ ²⁻	C ₂ O ₄ ²⁻
	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%	Masse-%
Südwand West												
Oktober 2015	0,13	0,37	0,16	0,08	1,14	0,02	0,10	0,43	0,06	< 0,01	1,21	0,03
März 2016	0,07	0,19	0,11	0,07	1,68	0,02	0,04	0,01	0,39	< 0,01	2,03	0,05
Südwand Ost												
Oktober 2015	0,17	0,42	0,19	0,08	1,42	0,03	0,12	0,40	0,15	< 0,01	1,39	0,04
März 2016	0,13	0,17	0,16	0,07	2,36	0,03	0,06	0,02	0,42	< 0,01	1,22	0,14
Nordwand West												
Oktober 2015	0,15	0,55	0,22	0,08	1,34	0,02	0,11	0,13	0,66	0,01	1,27	0,01
März 2016	0,15	0,93	0,20	0,08	2,15	0,02	0,08	0,02	0,61	0,01	0,96	0,10
Nordwand Ost												
Oktober 2015	0,14	0,34	0,15	0,07	1,32	0,03	0,12	0,01	0,92	< 0,01	1,04	0,08
März 2016	0,15	0,41	0,11	0,06	3,38	0,04	0,08	0,02	0,52	< 0,01	0,89	0,32
Orgel												
September 2016	0,79	0,50	0,13	0,05	0,64	0,05	0,04	0,02	< 0,01	0,03	0,47	0,04
Krypta Süd außen												
September 2016	0,16	0,50	0,13	0,05	0,64	0,01	0,09	0,02	0,03	0,22	0,26	< 0,01
Krypta Nord außen												
September 2016	0,19	0,76	0,27	0,06	2,15	0,01	0,07	0,17	0,03	0,25	0,30	< 0,01
Malerei												
März 2016	Südwand Ost (H8.2.2/14, RCHMPA946)					0,05	0,39	0,04	1,90	0,85	2,48	0,39
	Nordwand West (H8.1.1/11, RCHMPA944)					0,04	0,04	0,01	0,41	0,11	1,06	0,88
Staubproben aus Reinigungsarbeiten 2009 (Zöltzer 2010)												
	Formiate	Acetate	Propionate									
Juli/Aug. 2009	0,03	0,65	0,04				0,06		0,03		0,05	

zuzuordnen sind. Nitrationen konnten nicht, Nitritationen nur in sehr geringen Konzentrationen detektiert werden.

Ergänzend fand eine Analyse der auf den Filtern der Partikelzähler (Orgel, Westapsis und Krypta; siehe unten) zurückgebliebenen Staubbelastung statt. Dabei wurden Sulfat- und Nitrationen an allen Standorten identifiziert. Im abgelagerten Orgel-Staub konnten allerdings keine Nitrationen detektiert werden. Der Ablagerungszeitraum vom 2. September bis 20. Oktober 2016 war zu kurz und die am Filter haftende Probenmenge gering; deshalb sind diese Ergebnisse nur

qualitativ zu bewerten. Die Staubproben, die an den Kryptafenstern außen entnommen wurden, zeigten für den Ablagerungszeitraum vom 25. Juli bis 2. September 2016 ebenfalls höhere Konzentrationen an Ammonium- und Phosphationen, sodass ein Eintrag von außen nicht ausgeschlossen werden kann. Allerdings wurden die im Inneren der Kirche gemessenen erhöhten Werte für Ammonium- und Phosphationen nicht in der Krypta, sondern im Schiff im nördlichen Arkadenfenster gemessen.

In Tabelle 4 sind zum Vergleich die Ergebnisse von Salzanalysen von Staubproben aus dem Jahr

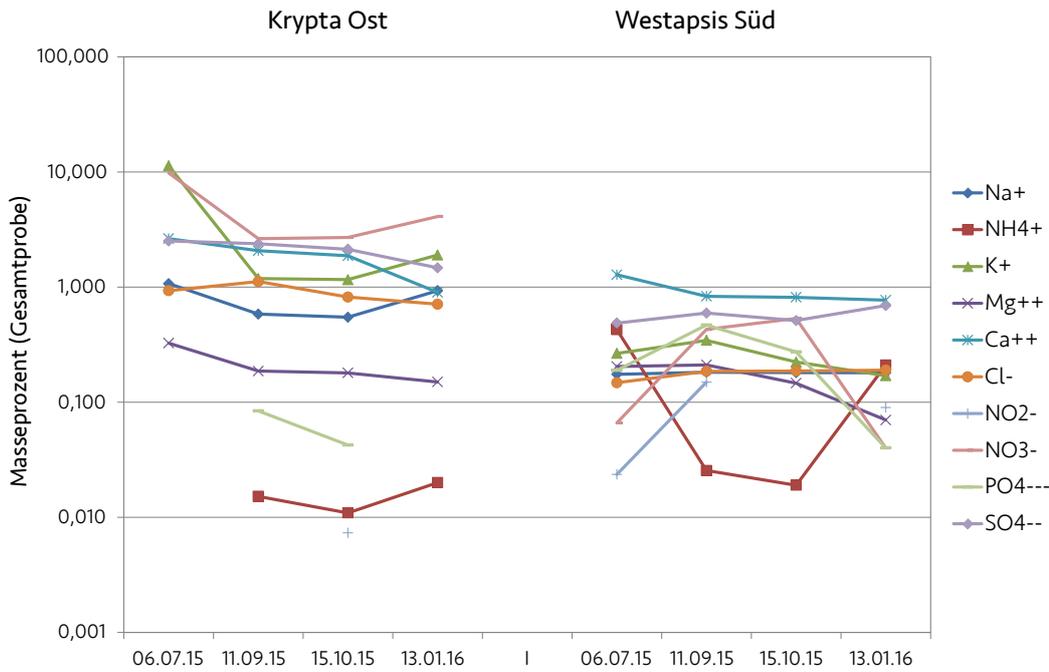


Abb. 7: Ergebnisse der Salzanalyse von ausgewählten Staubproben in Schiff und Krypta (MPA).

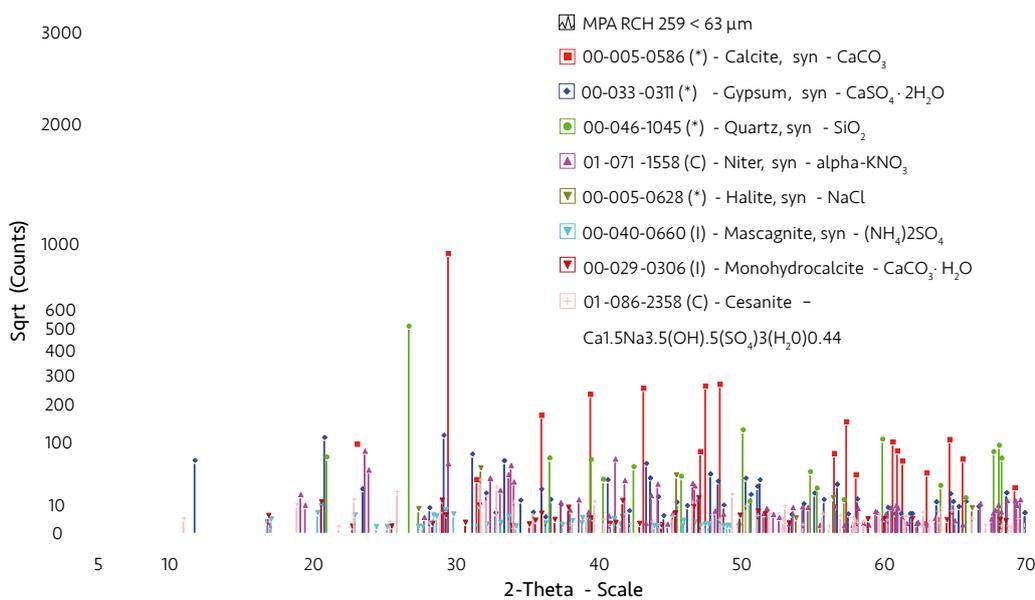


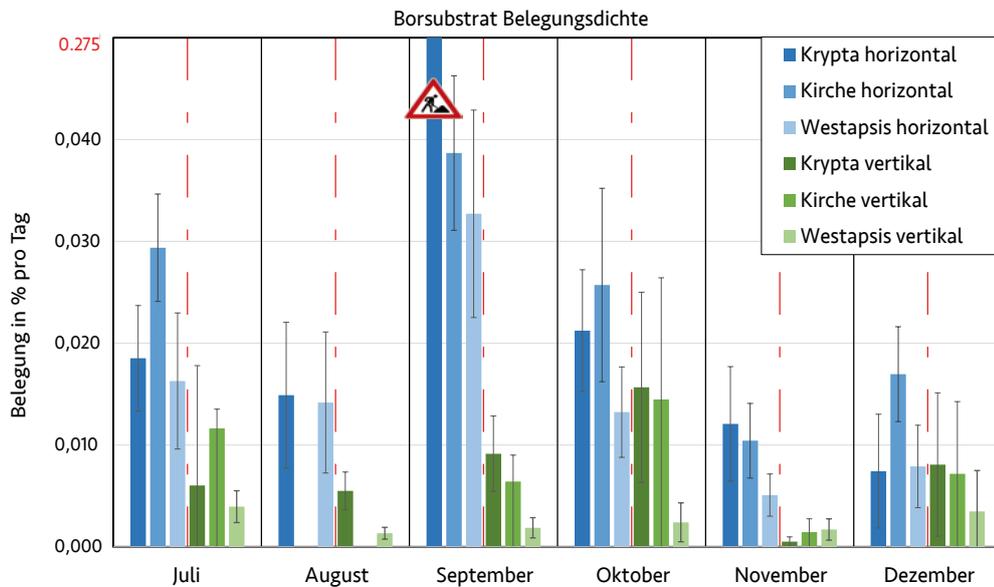
Abb. 8: Röntgenbeugung einer Staubprobe von der Brüstung des Krypta-Ostfensters (MPA).

2009 mit dargestellt, die über einen Zeitraum von zwei Wochen mittels eines Staubsaugers bei Reinigungsarbeiten vom Boden der Kirche gesammelt wurden (Zöltzer 2010). Die Gehalte an Chlorid sind vergleichbar, aber die Werte von Nitrat und Sulfat sind niedriger im Vergleich zu den Proben des Kirchenschiffs (vgl. Tab. 3 und Tab. 4). Zusätzlich treten Anteile an organischen Salzen auf (vor allem Acetate sowie Formiate und Propionate). Hinweise auf organische Salze wurden auch in den Analysen im Rahmen des Projekts gefunden. Aufgrund der geringen Probenmengen wurde eine quantitative Unter-

suchung derselben zugunsten der bauschädlichen anorganischen Salze zurückgestellt.

Zusammensetzung mittels Röntgenbeugung
 Einzelne Staubproben aus der südlichen Arkadenöffnung der Westapsis sowie aus der Krypta (Ostwand, Fensterschräge) wurden mit Röntgenbeugung auf ihre Zusammensetzung hin untersucht. Erwartungsgemäß konnten Calcit, Gips und Quarz sowie einige unspektakuläre Mischkristalle detektiert werden. Die Messungen bestätigten außerdem das Auftreten von Kaliumnitrat in der Krypta (Abb. 8); in der West-

Abb. 9:
Belegungsdichten 2015
der Passivsammler-
Borsubstrate (TU Darm-
stadt, Scheuvs).



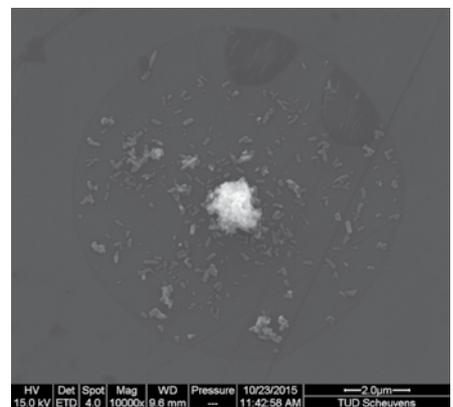
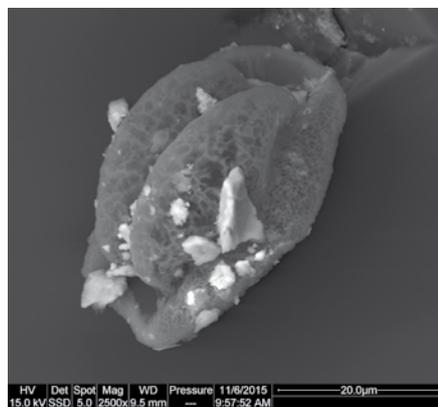
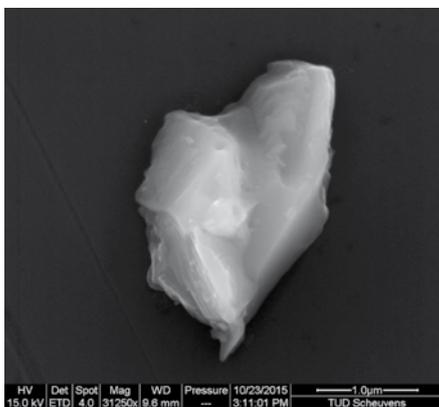
apsis-Fensteröffnung wurde u.a. ein Calciumoxalat-Hydrat gefunden.

Passivsammler

Um die Staubablagerung in der Kirche St. Georg sowohl zeitlich als auch in Bezug auf das Material näher zu untersuchen, wurden an mehreren Stellen sogenannte Passivsammler aufgestellt und in etwa monatlichen Abständen ausgetauscht. Bei diesen handelt es sich um Vorrichtungen, auf denen in horizontaler und vertikaler Ausrichtung jeweils zwei verschiedene Substrate (Bor und Kohlenstoff) fixiert sind, an welchen sich Staubpartikel aus der Luft ablagern. Bisher zeigte sich, dass an den vertikal angebrachten Substraten relativ wenig haften bleibt; in Bezug auf die Malerei in der Kirche kann dies aufgrund des unebenen Untergrunds jedoch nicht ausgeschlossen werden. Abbildung 9 gibt eine Übersicht über die Belegungsdichten von Juli bis Dezember 2015. Eine detaillierte elektronenmikroskopische Analyse der Staubpartikel zur

Bestimmung ihrer chemischen Natur wird an der TU Darmstadt im Rahmen einer Bachelorarbeit durchgeführt (Zapf 2017). In Abbildung 10 sind Aufnahmen ausgewählter Partikel dargestellt. Erste Ergebnisse zeigen, dass Sulfate und Nitrate auftreten. Während die Sulfate nahezu in jeder Probe mit etwa 2 bis maximal 15 % an der Gesamtflächenbelegung beteiligt sind, zeigen die Nitrate einzelne monatliche Peaks (z. B. im Oktober 2015 mit mehr als 20 %; vgl. Abb. 11). Bei den Sulfaten ist auch ein größerer Anteil Calciumsulfat-Partikel dabei (also Gips bzw. Anhydrit). Nitrate entstehen normalerweise als sekundäres Aerosol aus Vorläufergasen wie NO_2 und stammen damit vermutlich aus der Außenluft. Typische Nitrat-Partikel sind z. B. Ammoniumnitrat-Partikel oder Natriumnitrat-Partikel. Ammonium ist im Aerosol zumeist an sekundäres Aerosol gekoppelt, aber mittels EDX-Analytik nur schwer nachweisbar. Kohlenstoffreiche Partikel sind reichlich vorhanden und nehmen in einzelnen Proben mehr als 80 % der Fläche ein.

Abb. 10:
Einzelpartikelanalyse:
Aluminosilikat, Pollen/
Spore, getrockneter
Tropfen mit Sulfat (TU
Darmstadt, Scheuvs).



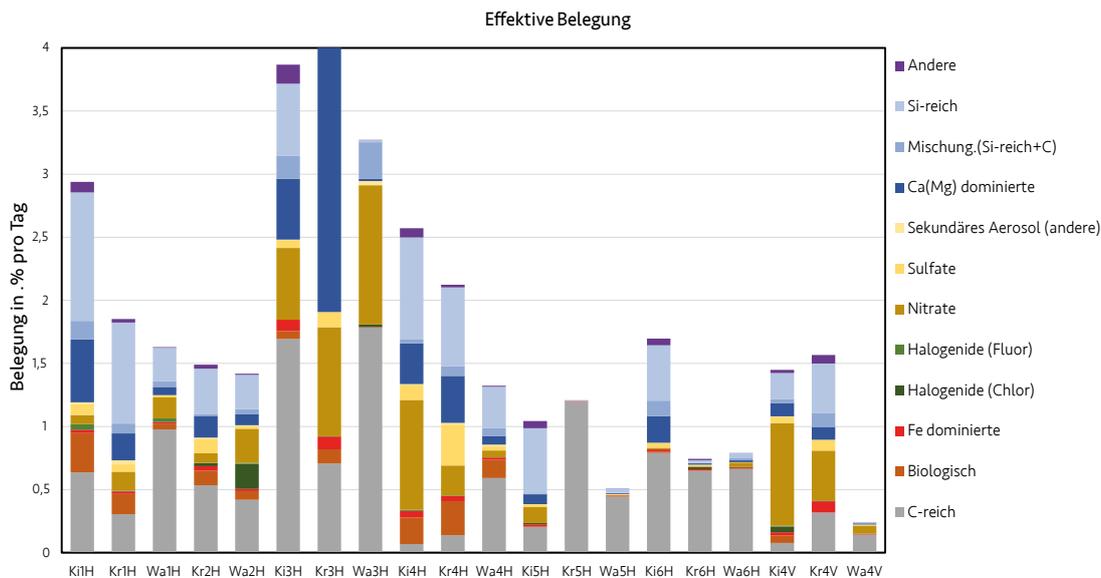


Abb. 11: Effektive horizontale Belegung der Passivsammler aus Kirche (Ki), Krypta (Kr) und Westapsis (Wa); Zeitraum jeweils ca. 1 Monat, beginnend mit Juli 2015 (Nr. 1) (TU Darmstadt, Scheuvsen).

In die Gruppe der kohlenstoffreichen Partikel fallen Stofffasern, sogenannte „Tarballs“ (evtl. von Weihrauch), einzelne Rußpartikel, einzelne Reifenabriebpartikel, nicht erkannte biologische Partikel, usw.. Inwieweit Humus-Partikel beteiligt sind, ist schwer abzuschätzen. Eindeutig zu identifizierende biologische Partikel (Pollen, Sporen, etc.) sind z. T. mit mehr als 10 % Flächenanteil an der Gesamtbelegung vorhanden und wurden getrennt klassifiziert. Diese biologischen Partikel weisen sehr oft erhöhte Phosphatgehalte auf. Die Silikate und calciumreichen Partikel stellen neben der Gruppe der kohlenstoffreichen Partikel die Gruppe mit den höchsten Flächenbelegungsanteilen.

Partikelzähler

Ein von der TU Darmstadt (TUD) ausgeliehener Laserpartikelzähler (Fa. Grimm, Optical Particle Counter OPC1.109) wurde im Kirchenschiff auf der Fensterbank der nördlichen Arkadenfensters der Westapsis positioniert und erfasste die luftgetragenen Staubpartikel der Klassen PM10, PM2.5 und PM1.0 im Zeitraum von April 2015 bis Dezember 2016, allerdings nicht durchgehend. Insgesamt stehen Messdaten für ca. 13 Monate zur Verfügung. PM10 bezeichnet die Gesamtheit aller Partikel (Particulate Matter) bis zu einem aerodynamischen Durchmesser von ca. 10 µm; PM2.5 und PM1 sind entsprechend definiert. Partikel der Klasse PM10 können beim Menschen in die Nasenhöhle, die der Klasse PM2.5 bis in die Bronchien und Lungenbläschen und ultrafeine Partikel (kleiner als 0,1 µm) bis in das Lungen-

gewebe und sogar in den Blutkreislauf eindringen (UBA 2017).

Um Vergleichsdaten erheben zu können, wurden von Mitte Dezember 2015 bis Mitte Januar 2016 sowie von Ende Juli bis Ende Oktober 2016 drei weitere Laserpartikelmessgeräte (Fa. Grimm, OPC1.108) kostenfrei vom Landesgesundheitsamt in Stuttgart (LGA) ausgeliehen und neben dem Gerät der TU Darmstadt in der Westapsis-Fensterische sowie auf der Orgel und in der Krypta platziert. Die Messdaten (Messintervall jeweils 5 Minuten) wurden mit den Veranstaltungsdaten (Gottesdienst, Führungen, andere Events), die freundlicherweise vom Tourismusbüro und dem Pfarrbüro zur Verfügung gestellt wurden, korreliert.

Messungen im nördlichen Arkadenfenster der Westapsis

Die mit dem OPC1.109 in der Fensteröffnung der Westapsis detektierten Untergrund-Massenkonzentrationen waren während der gesamten Messdauer generell sehr niedrig und lagen zumeist zwischen 3 und 20 µg/m³, wobei sich die drei Werte PM1.0, PM2.5 und PM10 kaum unterschieden. Die Jahresmittelwerte (PM10, gravimetrisch bestimmt) von ländlichem Hintergrund (LUBW: Messstelle Schwarzwald-Süd, Zeitraum 2001 bis 2014: 8 bis 14 µg/m³) liegen im gleichen Bereich, während der städtische Hintergrund in Konstanz (LUBW: Messstelle Konstanz, Zeitraum 2001 bis 2014: 16 bis 27 µg/m³) (LUBW 2017) höher liegt. Die Werte sind aufgrund der verschiedenen Messverfahren und Mittelungs-

Abb. 12:
Staubentwicklung während einer exemplarischen Woche mit Besucherlenkung. Die blaue Kurve zeigt die Differenz zwischen PM10 und PM2.5 (MPA).

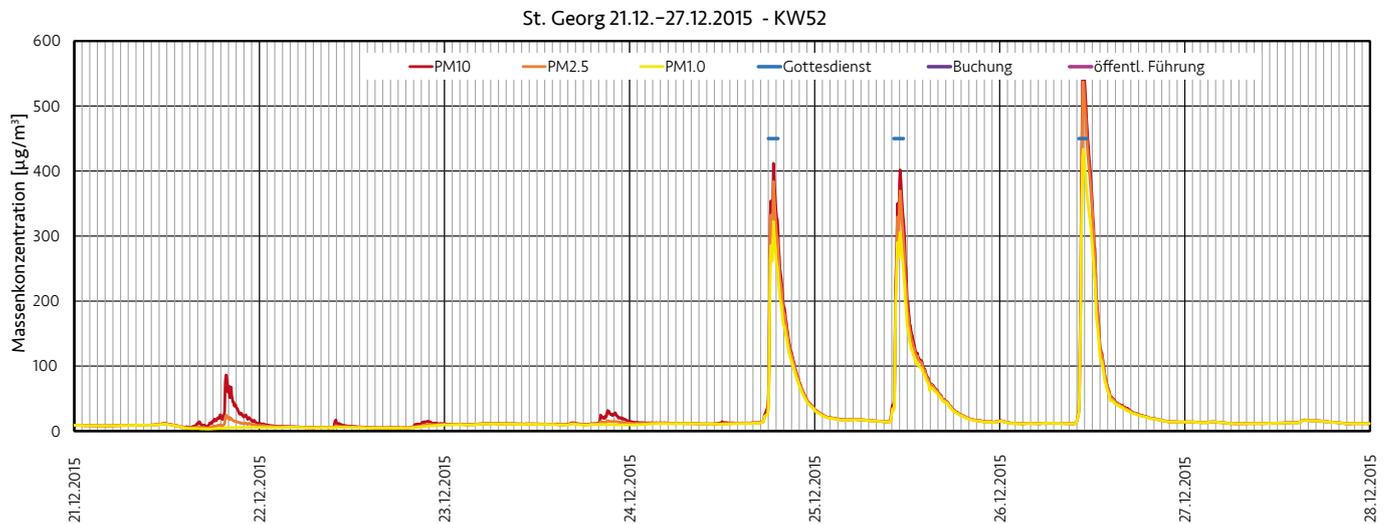
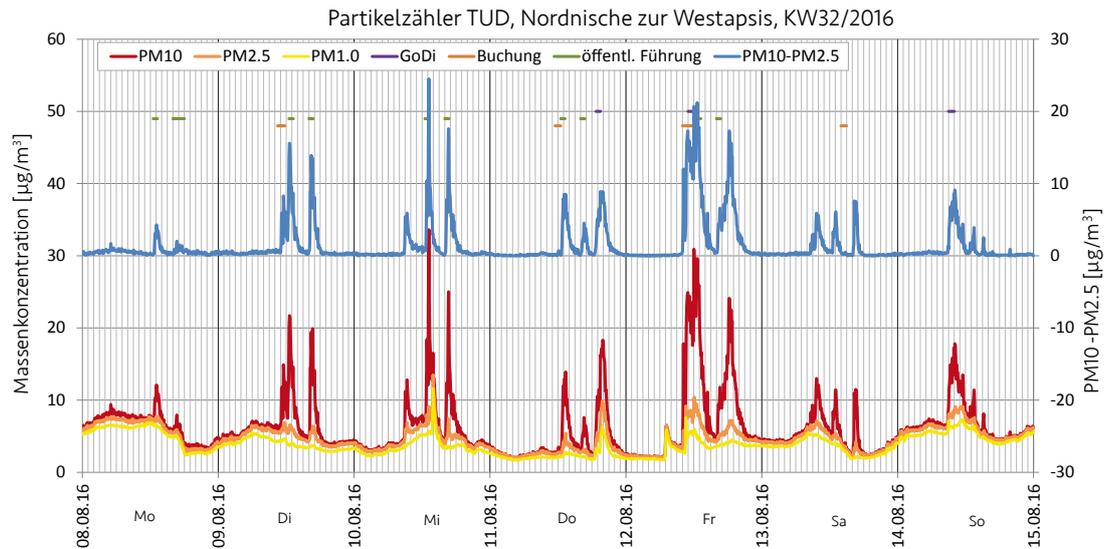


Abb. 13:
Hohe Massenkonzentrationen an bestimmten Tagen, hier: Weihnachten 2015 (MPA).

zeiträume nur bedingt vergleichbar, zeigen aber, dass die Reichenau eher einer ländlich geprägten Umgebung entspricht. Hinzu kommt noch die Filterwirkung durch die Innenraummessung. Unterschiede zwischen PM10 und PM2.5 bzw. PM1.0 traten vor allem bei Publikumsverkehr auf. Hier war eine Korrelation von erhöhten PM10-Werten während der Publikumszeiten erkennbar. Die Erhöhung der PM10-Werte geht weitgehend auf eine Erhöhung der „groben“ Fraktion – d. h. auf Staubpartikel mit einem aerodynamischen Durchmesser von mehr als 2,5 µm – zurück, was insgesamt auf eine Staubaufwirbelung durch die Besucher hinweist. Ohne weitere Störung gingen die PM10-Messwerte innerhalb von ca. 2 Stunden auf die Basiswerte zurück. Abbildung 12 zeigt die Partikelmassenkonzentration einer exemplarischen Woche im August 2016 mit den

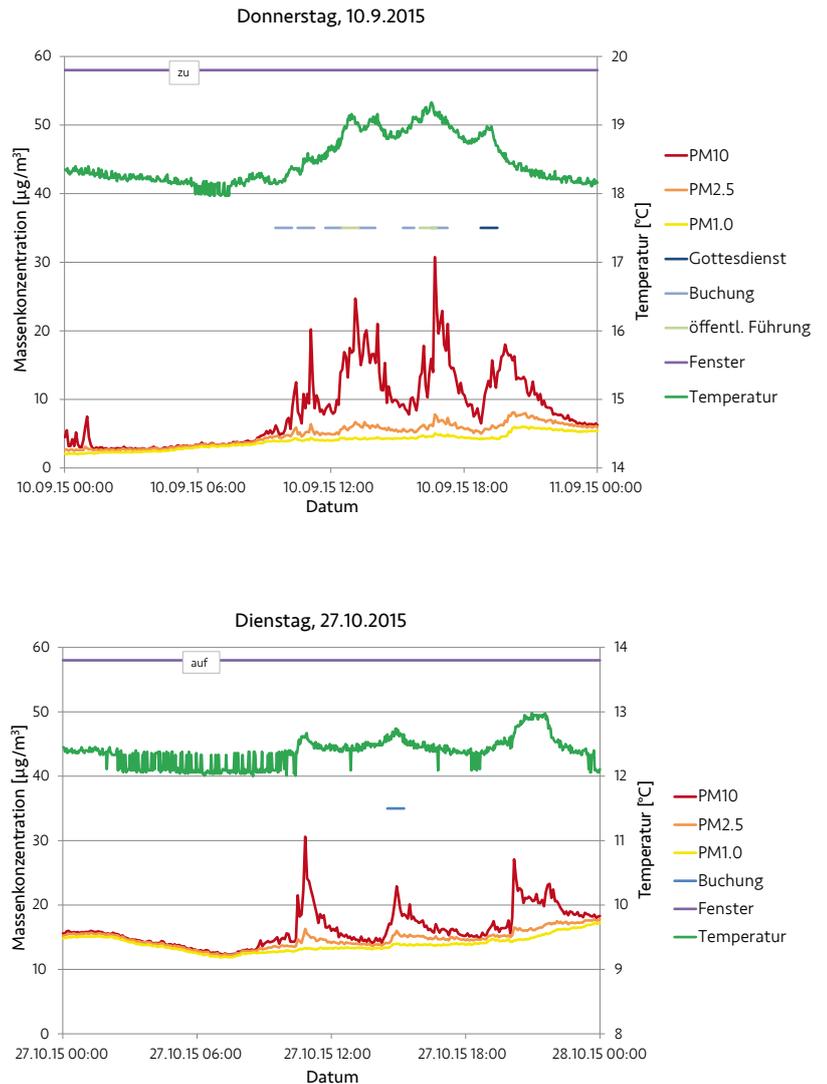
Terminen für Gottesdienste, öffentliche und gebuchte Führungen (soweit bekannt). Die blaue Kurve PM10-PM2.5 kennzeichnet den Anteil der „groben“ Teilchen an der Gesamtmassenkonzentration.

Daneben gibt es jedoch auch Einzelereignisse mit extrem hohen Massenkonzentrationen (bis 800 µg/m³), wie z. B. an Pfingsten, Weihnachten oder anderen besonderen Anlässen (Goldene Hochzeit etc.). Wie aus Abbildung 13 ersichtlich, werden hierbei nicht nur die größeren Partikel aufgewirbelt; der Anteil der kleinen Partikel (PM1.0, gelbe Kurve) an der Gesamtmassenkonzentration ist um ein Vielfaches höher. Die Relaxationszeit dieser kleinen Partikel ist mit 6 bis 10 Stunden deutlich länger. Die Abbildungen 14 und 15 zeigen die Staubentwicklungen an einem Werktag, einmal mit Besucherlenkung und

geschlossenem Fenster, einmal ohne Besucherlenkung und offenem Fenster. Die Events sind – soweit bekannt – ebenfalls in den Abbildungen vermerkt. Die Besucher beeinflussen die Entwicklung von feinem Staub ($< 2,5 \mu\text{m}$) nur wenig, und die Aufwirbelung größerer Teilchen ist an beiden Tagen vergleichbar. Die Spitzenwerte gehen vermutlich mit der Öffnung der Tür einher, was in Zeiten mit mehr Besuchern letztendlich doch zu höheren Belastungen führen könnte. Diese Extremwerte stehen auch in deutlichem Zusammenhang mit der im Raum gemessenen Temperatur.

Für die Zeitpunkte der höchsten PM10-Massenkonzentrationen des Beobachtungszeitraums wurden alle 31 Größenkanäle des Laserpartikelzählers im Bereich von $0,25$ bis $32 \mu\text{m}$ ausgelesen. In der doppeltlogarithmischen Auftragung von Massenkonzentration und Partikelgröße (Abb. 16) sind die einzelnen Veranstaltungsarten deutlich zu unterscheiden. Bei besonderen Feiertagsgottesdiensten tritt, wie bereits oben beschrieben, eine hohe Konzentration an sehr kleinen Teilchen auf, wohingegen die großen Partikel nicht viel mehr aufgewirbelt werden als zu den Zeiten der „normalen“ Gottesdienste oder der Buchungen/Führungen. Die grüne Kurve entspricht Tagen (20.6., 27.6., 16.10.2015), an denen ebenfalls eine hohe Konzentration an PM10 gemessen wurde, die jedoch keinem der anderen Events zuzuordnen sind. An diesen Tagen wurden die hohen Werte nahezu blitzartig erreicht und sanken verhältnismäßig schnell wieder ab, was auf eine Aufwirbelung infolge von geöffneten Türen und einen Luftzug hindeutet. Am 16.10.15 beispielsweise war zur Zeit der erhöhten PM10-Werte der Abbau der Hebebühne vorgesehen, bei dem die gleichzeitige Öffnung der Türen von Vorhalle und Kirche erforderlich war.

In mehreren Studien (siehe Pagels et al. 2009) wurden brennende Kerzen als Quelle feiner ($< 1 \mu\text{m}$, PM1.0) und ultrafeiner ($< 0,1 \mu\text{m}$) Partikel identifiziert. Weiterhin zeigte sich, dass dabei außer den erwarteten Rußpartikeln und organischen Verbindungen auch anorganische Bestandteile freigesetzt wurden, die möglicherweise auf Imprägniermittel des Kerzendochtes zurückzuführen sind (u. a. Ammonium, Phosphat, Alkalimetalle, Nitrate). Eine andere Untersuchung (Weber, 2006) ordnet insbesondere den Anteil der Partikel zwischen $0,3$ und $1 \mu\text{m}$ der Verwendung von Weihrauch zu.

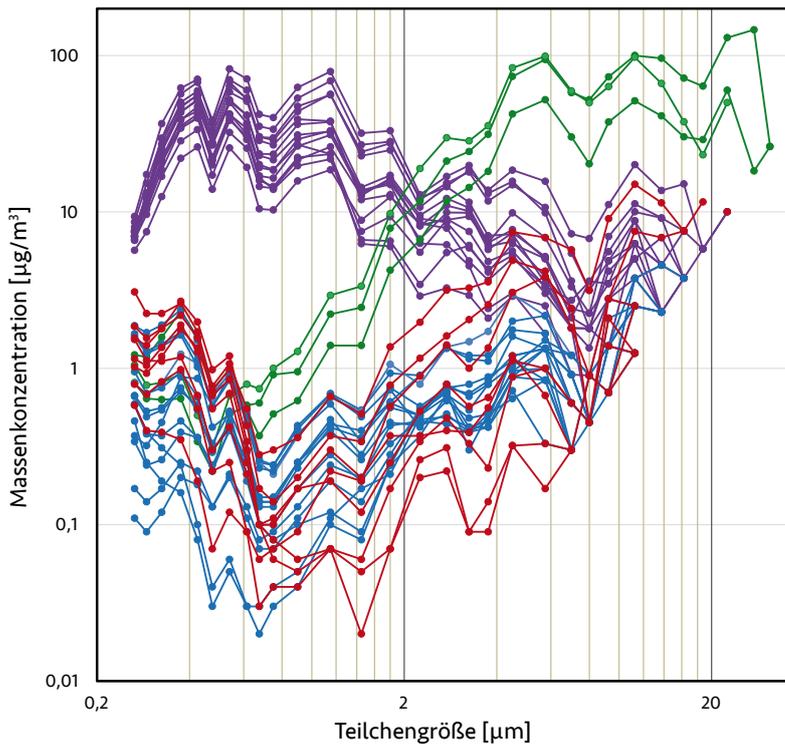


Vergleich unterschiedlicher Standorte

Die Partikelzähler OPC1.109 (TUD) und OPC1.108 (LGA) weisen unterschiedliche Gerätespezifikationen auf (z. B. Anzahl und Breite der Größenkanäle, Laserwellenlänge). Die gemessenen Werte sind deshalb nicht direkt vergleichbar, können aber für eine qualitative Bewertung herangezogen werden (Burkart et al. 2010). Die auf der Orgel (LGA) und im nördlichen Arkadenfenster der Westapsis (TUD) positionierten Geräte reagierten zeitgleich und zeigten im Wesentlichen die gleichen Peaks. Jedoch sind die auf der Orgel ermittelten PM-Werte um ein Vielfaches höher (Abb. 17). In der Krypta wurden insbesondere zwischen Weihnachten und Silvester 2015 bei relativ stabilen PM2.5- und PM1.0-Werten höhere PM10-Werte verzeichnet, die von den Partikelzählern in der Kirche nicht gemessen

Abb. 14: Staubentwicklung an einem Werktag mit Besucherlenkung und geschlossenen Fenstern (MPA).

Abb. 15: Staubentwicklung an einem Werktag ohne Besucherlenkung und offenen Fenstern (MPA).



OPC1.109 TUD und OPC1.108 LGA

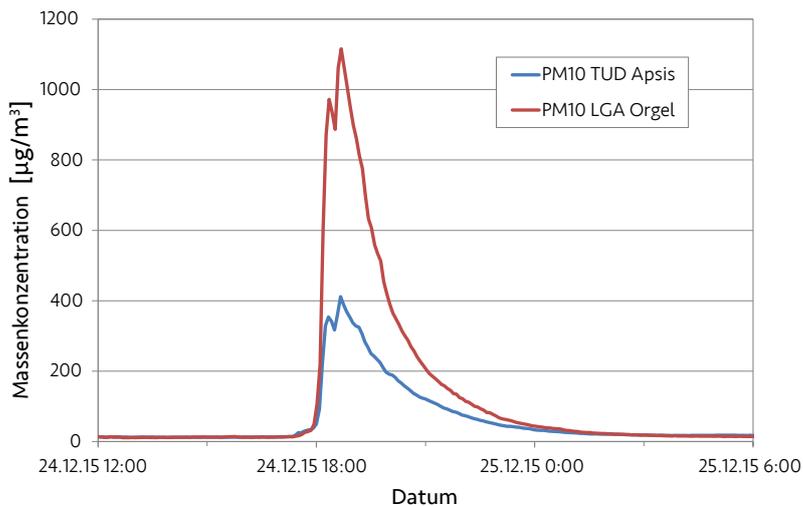


Abb. 16: Massenkonzentration und Partikelgröße bei verschiedenen Veranstaltungen (MPA / TU Darmstadt).

Abb. 17: Vergleich der im Kirchenschiff von verschiedenen Partikelzählern erfassten Daten an Heiligabend 2015 (MPA).

wurden (Abb. 18, grüne Kurve). Über die Ursache dieser Staubeentwicklung ist nichts bekannt; möglicherweise handelt es sich um einen Eintrag von außen, da in der Zeit vom 28.12.2015 bis 4.1.2016 die Fenster in der Krypta fast immer geöffnet waren.

Abbildung 19 zeigt einen Vergleich der Partikelzählersignale aus der Westapsis und Krypta vom 14.9.2016. Aufgrund der Gerätespezifikation sind auch hier vom OPC1.108 in der Krypta um einen Faktor 2 bis 4 höhere Werte zu erwarten. Gemessen wurden allerdings bis zu 20fache Werte! Dies legt die Vermutung nahe, dass es sich an diesem

Tag um ein Ereignis in der Krypta handelte, das sich im Kirchenschiff nur schwach auswirkte. Ende Juli 2016 wurden mehrere kostengünstige Feinstaubsensoren (OK-Lab, Stuttgart) testweise für ein Dauermonitoring installiert: zwei in der nördlichen Arkadenöffnung der Westapsis, einer auf der Orgel, zwei in der Krypta und einer an der Außenwand am Fenster der Sakristei. Die aufgezeichneten Daten wurden mit den Daten der Grimm-Partikelzähler verglichen. Die Signale, die in der Westapsis und in der Krypta mit den Sensoren erhalten wurden, sind in Abbildung 20 dargestellt. Sowohl die zeitliche Lage als auch die Form der Kurven entsprechen weitestgehend denen der Abbildung 19. Laut Hersteller (Nova 2015) sollen die Signale P1 und P2 den Größenbereichen PM10 und PM2.5 entsprechen. Vergleiche mit dem OPC1.109 bei Labor- und Vor-Ort-Messungen zeigten jedoch, dass P1 und P2 eher mit PM2.5 und PM1.0 korrelieren.

Die Sensormessungen bestätigen die Vermutung, dass es sich bei der Staubeentwicklung am 14.9.16 um ein Ereignis in der Krypta handelte (mit Massenkonzentrationen um ca. 800 µg/m³), das sich mit weit geringerer Konzentration von maximal ca. 60 µg/m³ in die Kirche überträgt. Zudem ergibt sich aus dem Vergleich dieser baugleichen Sensoren, dass die Messwerte von OPC1.109 und OPC1.108 etwa um den Faktor 2 auseinander liegen (vgl. Abb. 19, 20). Der Auslöser für die Staubeentwicklung konnte nicht ermittelt werden. Aufgrund der hohen PM2.5 und PM1.0 Werte entspricht die Charakteristik eher einer kirchlichen Veranstaltung mit Weihrauch oder Kerzen als einer Besuchergruppe (vgl. Abb. 16). Bei Gottesdiensten mit besonderem Anlass, wie z. B. an Feiertagen, zeigen sich höhere Feinstaubwerte zunächst im Kirchenschiff und bilden sich leicht zeitversetzt in geringerer Höhe auch in der Krypta ab.

Vergleich mit CO₂-Daten

In Abbildung 21 sind die Partikelmessungen während des Erntedankgottesdienstes am 2.10.2016 zusammen mit den ermittelten CO₂-Werten (Differenz zwischen innen und außen) dargestellt. Der CO₂-Anstieg beginnt früher und nimmt langsamer zu, während der Abfall, in einer Periode mit geöffneten Fenstern, bei Feinstaub- und CO₂-Messungen vergleichbar ist. Die Besuchergruppe am Nachmittag (laut Aufzeichnungen sechs Personen) zeichnet sich in den Daten nicht ab. Aus den CO₂-Daten kann prinzipiell die jeweils herrschende Luftaustauschrate

und mit dieser die Sedimentationsrate des Feinstaubes bestimmt werden (Mleczkowska et al. 2016, Mašková et al. 2016, Weber 2006). Diese Auswertungen sind in Arbeit.

Bodenanalysen

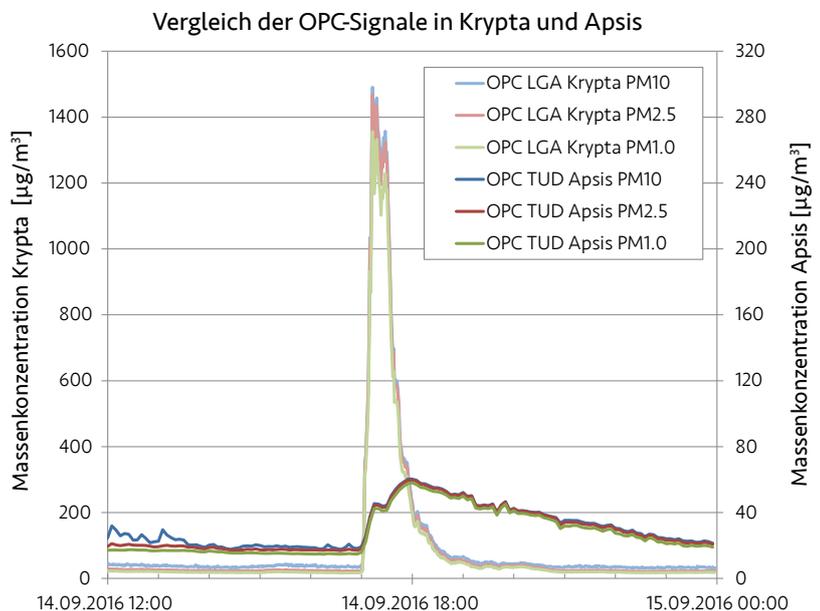
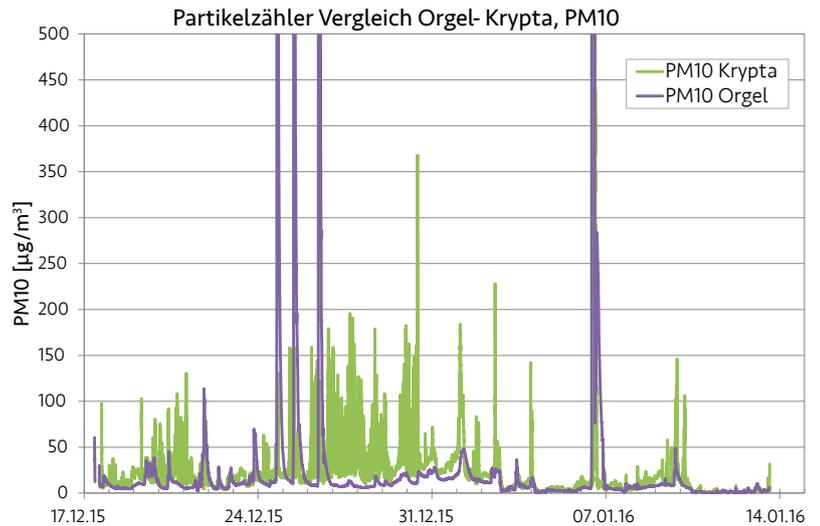
Aufgrund der ionenchromatographischen Analyse lässt sich vermuten, dass zumindest ein Teil der Schadstoffe von außen eingetragen wird. Deshalb wurde am 25.7.2016 durch das Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg (LGRB) eine Bodenprobe entnommen (Abb. 22) und anschließend im Labor analysiert. Die Kirche St. Georg befindet sich in einem Gebiet mit intensiver Bodennutzung durch Erwerbsgartenbau. Die Böden um die Kirche haben sich aus wärmzeitlichem Geschiebemergel entwickelt. Die Bodenform ist ein kalkhaltiger Hortisol mit der Bodenart im Oberboden: stark humoser kiesiger sandiger Lehm. Durch jahrhundertelange intensive garten- und weinbauliche Nutzung wurden die Böden vielfach tief umgegraben und mit organischer Substanz angereichert. Der untersuchte Oberboden hat mit 5,4 Masse-% Humus (stark humos) etwa den doppelten Humusgehalt als bei einer rein ackerbaulichen Nutzung zu erwarten wäre (siehe Tab. 5).

Der hohe Sand- (48 %) und Kiesgehalt (23 %) verhindern die Bildung stabiler Bodenaggregate (vgl. Tab. 6). In der Bodenmatrix liegen hier die Bodenteilchen lose in einem Einzelkorngefüge nebeneinander. Im vegetationsfreien Zustand besteht auf diesen Böden deshalb die Gefahr der Ausblasung leichter Bodenbestandteile wie Humus, Schluff und bei höheren Windgeschwindigkeiten auch Feinsand (vgl. Busch 2015, Suspension-Wikipedia).

Die vorwiegenden Düngemittel, die im Gemüseanbau wie auf der Reichenau eingesetzt werden, sind Stickstoffdünger: Ammoniumsulfatsalpeter, aber wohl doch überwiegend Kalkammonsalpeter und als Grunddünger: Superphosphat, Kaliumsulfat und Bittersalz (Magnesiumsulfat).

Diskussion

Für die Einschätzung des Gefährdungspotenzials werden im Folgenden die einzelnen Substanzklassen diskutiert.



Leichtflüchtige organische Substanzen

Die deutliche Verringerung der beiden charakteristischen Substanzen 2-Methylfuran und Dimethyldisulfid von April 2015 zu September 2016 (vgl. Tab. 1) in der angereicherten Krypta-Probe und dem Kirchenschiff deutet darauf hin, dass sich die Aktivität des mikrobiellen Befalls in 2016 verringert hat. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen der mikrobiologischen Untersuchungen (vgl. Beitrag Scheerer 2017). Eine Analyse der Gefährdung für das Nahfeld der Malereibereiche und das Mittelschiff wird bei Neycheva (2016) anhand der Klimadaten gegeben.

Abb. 18: OPC1.108 PM10-Messdaten-Vergleich Krypta – Orgel. Die Ordinate wurde auf 500 µg/m³ begrenzt. Die Werte auf der Orgel erreichten bis zu 3000 µg/m³ (MPA).

Abb. 19: Vergleich der Partikelzählersignale in der Krypta und in der Fensterische des nördlichen Arkadenfensters der Westapsis (MPA).

Tabelle 5: Bodenchemische Analysendaten

Horizont	Entnahmetiefe	pH-Wert	Carbonat	Organische Substanz				Sorptionsverhältnisse (mmol/z/kg)										
				C _{org}	N _t	C/N	Humus	KAK _{pot}	KAK _{eff}	BS	austauschbare Kationen							
	(cm)	(CaCl ₂)	(mg/g)	(mg/g)			%			%	H	Al	Fe	Mn	Ca	Mg	K	Na
Ap	0–30	7,2	7,4	3,2	0,23	14	5,4	216	n. b.	100					191	14	11	<1

Ap Horizontbezeichnung für einen gepflügten Oberboden
 KAK_{pot} potentielle Kationenaustauschkapazität
 BS Basensättigung an den Bodenaustauschern.

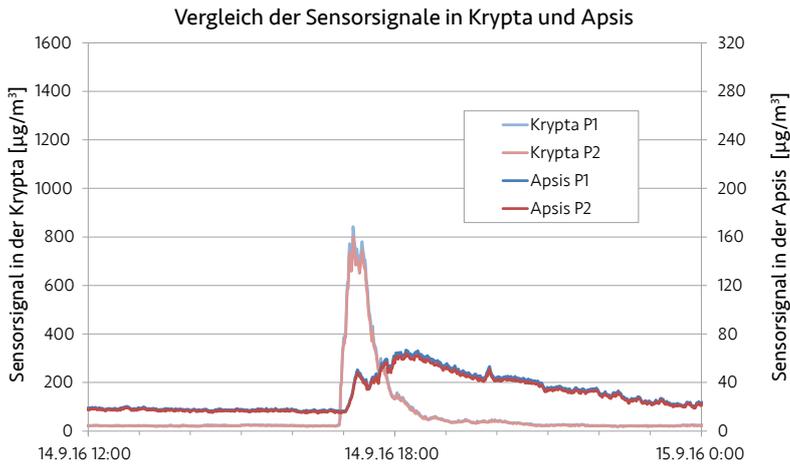


Abb. 20: Vergleich der Sensor-Signale in der Krypta und in der Fensternische des nördlichen Arkadenfensters der Westapsis (MPA).

Staub- und Feinstaubbelastung

Bei der Staub- und Feinstaubbelastung stellen sich die folgenden Fragen:

- Gefährden die im Staub enthaltenen Salze die wertvolle Denkmalsubstanz?
- Was sind die Quellen für diese Gefährdung?
- Welchen Einfluss haben die Besucher und die Nutzung der Kirche auf eine mögliche Gefährdung?

Salzgehalte im Staub

Die Salzgehalte in den Staubproben sind aufgrund ihrer Höhe relevant und stellen ein Gefährdungspotential für die Denkmalsubstanz dar. Die Ablagerung von im Mittel etwa 6 mg Staub pro Quadratmeter und Tag auf horizontalen bzw. schrägen Flächen (vgl. Tab. 2) stellt eine kontinuierliche Quelle dar. Die Salzanalysen der Serien in Westapsis und Krypta (vgl. Tab. 3) zeigen, dass die Salzgehalte bei den neu akkumulierten Proben der Folgeentnahmen vergleichbar zur Erstentnahme sind, obwohl dort die Ablagerungsdauer deutlich länger war. Auch im Staub von vertikalen Flächen an der Wandmalerei wurden vergleichbare Salzgehalte detektiert (vgl. Tab. 4). Zudem zeigen die Analysen der Proben

auf den Filtern der Laserpartikelzähler und der Orgel, dass ein größerer Anteil der Salze aus der Raumluft stammt und es sich nicht um aus dem Mauerwerk auskristallisierte Salze handelt.

Um die Gefährdung abzuschätzen, wurden Staubproben der Krypta (Ostfenster, Schräge) mit Bohrmehlproben aus der Ostwand in unmittelbarer Nähe verglichen. An zwei ausgewählten Proben (Staub vom 11.9.2015 und Bohrmehl aus 0 bis 0,2 cm Tiefe, rote Pfeile in Abb. 23) wurden Simulationen mit dem Programm ECOS/RUNSALT (Version 1.8 (ECOS/RUNSALT 2005)) durchgeführt. Hierzu wurden zuerst die Salzgehalte von Masseprozent auf Mole umgerechnet. In Abbildung 23 sind die Werte für Staub (umgerechnet aus Tab. 3) und Bohrmehl (umgerechnet aus Abb. 9 im Beitrag Zöldföldi „Zerstörungsfreie und minimalinvasive Untersuchungen zu Feuchte- und Salzbelastungen in der Krypta von St. Georg auf der Reichenau“ im Tagungsband) aufgetragen, wobei Ionen geringer Gehalte wie Ammonium-, Nitrit- und Phosphationen in der Staubprobe vernachlässigt wurden.

Das Programm ECOS/RUNSALT benötigt eine ausgeglichene Ladungsbilanz. Deshalb wurde bei den ausgewählten Proben zuerst der Calciumionengehalt so abgesenkt, dass die Bilanz ausgeglichen war. Dieses Vorgehen beruht auf der Annahme, dass überschüssiges Calcium in Form von Calciumcarbonat vorliegt.¹ In einem zweiten Schritt wurde Gips aus der Mischung herausgerechnet, da dieser in der Regel in fester Form vorliegt und das Programm ECOS/RUNSALT dies bei komplexeren Mischungen nicht berechnen kann. Die nach diesen Schritten erhaltenen Simulationen der Phasendiagramme sind in Ab-

¹ Carbonationen können ionenchromatographisch nicht nachgewiesen werden, da bei der Anionenanalyse eine Hydrogencarbonat-/Carbonat-Lösung als Eluent verwendet wird.

Tabelle 6: Bodenphysikalische Analysendaten

Horizont	Entnahmetiefe (cm)	Korngrößenverteilung der Feinerde < 2 mm (Gew.-%)							Grobboden > 2 mm (Gew.-%)
		Ton	Schluff			Sand			
		T	fU	mU	gU	fS	mS	gS	
Ap	0-30	20	6	9	17	24	16	8	23

Ap Horizontbezeichnung für einen gepflügten Oberboden

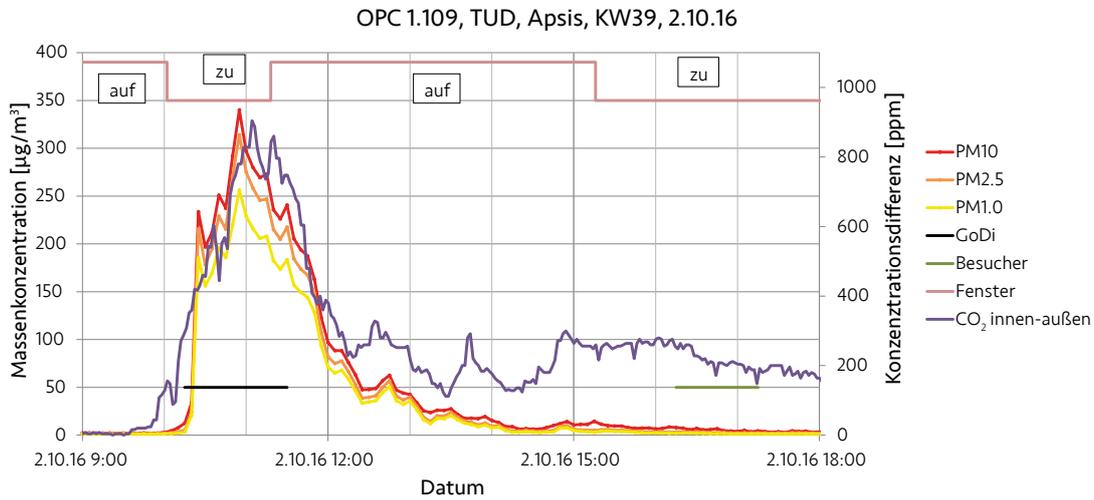


Abb. 21: Vergleich von Feinstaub- und CO₂-Messdaten (MPA).

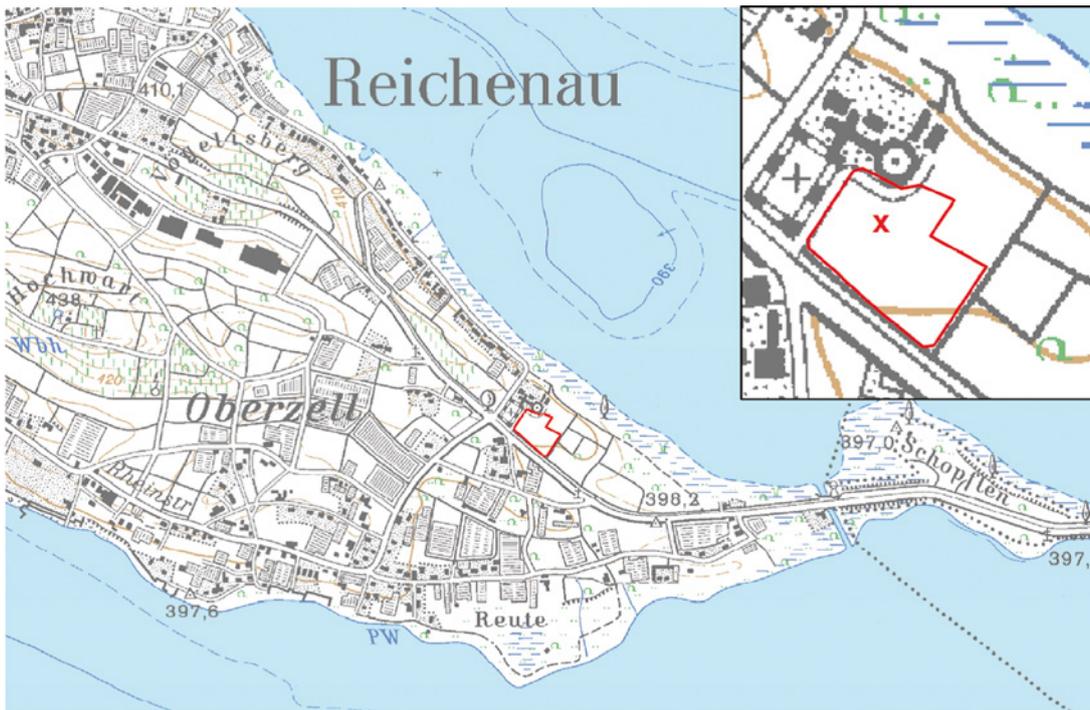


Abb. 22: Entnahme der Bodenprobe. Gemarkung 6670 Reichenau, Flurstück Nr. 9694, TK25 8320 Reichenau, Probennahme: 25.07.2016, Probenmenge, getrocknet bei 105 °C: 8,7 kg (LGRB, Weinzierl).

bildung 24 dargestellt. Über die Variation der Temperatur und Feuchte wurden die Deliqueszenzfeuchten der Komponenten der Salz-mischungen ermittelt, die oberhalb von 60 % relativer Feuchte flüssig werden. In Abbildung 25

sind diese Deliqueszenzfeuchten mit den Klimadaten in der Nähe der Ostwand der Krypta für den Zeitraum 6.7. bis 11.9.2015 verglichen. Dies entspricht der Akkumulationsdauer der Staubprobe.

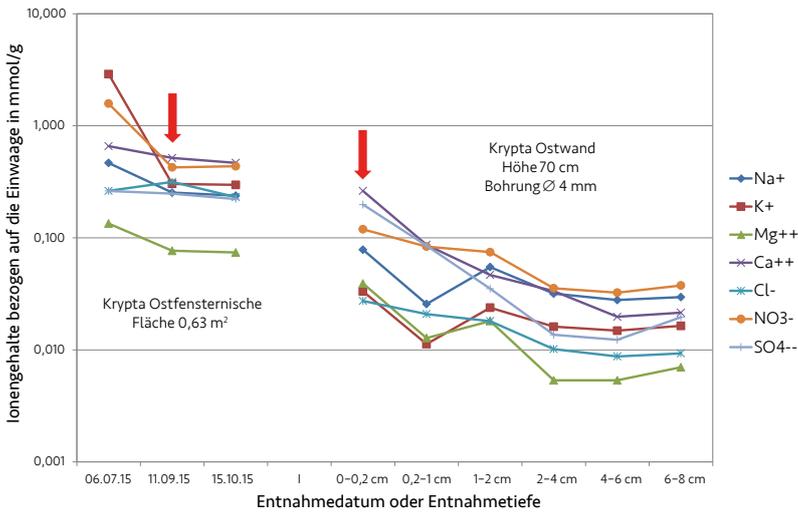
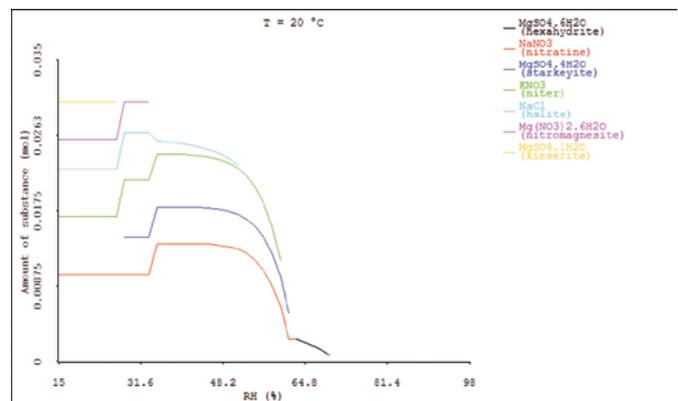
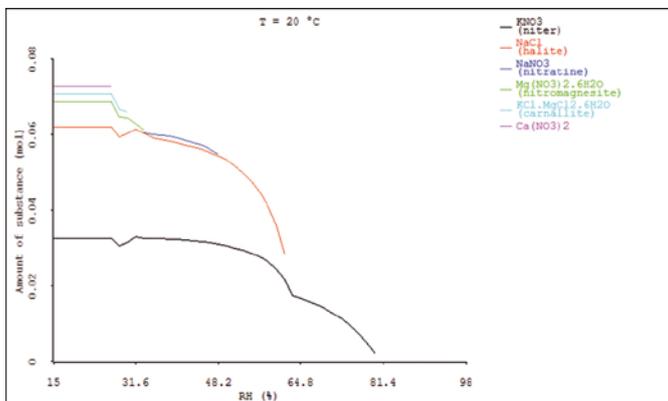


Abb. 23: Ionengehalte bezogen auf die Einwaage in mmol/g von gesaugtem Staub (Krypta Ostfenster) und von Bohrmehlproben (Abb. 9 im Beitrag Zöldföldi 2017, Bereich E50.1 Ostwand in 70 cm Höhe). Die roten Pfeile bezeichnen die für die Simulation ausgewählten Proben (MPA).

Abbildung 25 zeigt, dass die Deliqueszenzfeuchten der Salzkomponenten für die Mehrzahl der Zeiten überschritten werden, d. h. die Salze liegen zu diesen Zeiten in gelöster Form vor. Für die Staubprobe bedeutet dies, dass die Salzionen in den Untergrund einwandern können. Die im Staub vorhandenen Salze sind somit eine Quelle der Salzanreicherung für das Mauerwerk. Weiterhin erkennt man in beiden Proben Phasenwechsel von fest nach flüssig und umgekehrt. Für die Bohrmehlprobe stellt dies eine echte Gefährdung dar, da Phasenwechsel immer mit Volumenänderung verbunden sind und es dadurch zu nicht unerheblichen Spannungen im Material kommen kann. Die Simulation geht von Mischungen im thermodynamischen Gleichgewicht aus. Dies muss bei einzelnen Salzpartikeln in Staubproben nicht gegeben sein. Aber die Klimadaten zeigen, dass ausreichend Feuchtigkeit in der Luft vorhanden ist, um Salzpartikel zu verflüssigen und sich somit Salzmischungen im Staub bilden können. Um dies experimentell zu

Abb. 24: Simulierte Phasendiagramme der ausgewählten Staub- (links) und Bohrmehlprobe (rechts) (MPA / Runsalt).



verifizieren, sind dynamische Wasserdampfsorptionsmessungen an einer Staubprobe geplant, mit anschließender ionenchromatographischer Analyse derselben Probe.

Quellen der Salze im Staub

Wie oben erwähnt zeigen die Analysen der Proben auf den Filtern der Laserpartikelzähler und der Orgel, dass ein größerer Anteil der Salze aus der Raumluft stammt und es sich nicht um aus dem Mauerwerk auskristallisierte Salze handelt. Hierfür könnten zwei Quellen in Frage kommen, zum einen Nitratre und andere Düngersubstanzen aus dem Boden der umgebenden Landwirtschaft und zum anderen sekundäre Aerosole, die sich in der Außenluft bilden. Mit folgender Beispielrechnung kann ein möglicher Beitrag der Landwirtschaft abgeschätzt werden: Nach einer Gemüseernte liegen im Oberboden (0-30 cm) noch 100 kg Stickstoff pro ha bzw. 442 kg Nitrat pro ha als gleichmäßig verteilter Reststickstoff vor. Mit den Bodenkennwerten des Ackers an der Kirche (Dichte 1,5 g/cm³, Steingehalt 23 Masse-%) ergibt sich folgende Rechnung:

$10.000 \text{ m}^2 \times 0,3 \text{ m} \times 1,5 \text{ t/m}^3$ (Dichte) $\times 0,77$ (Steingehalt 23%) = 3.465 t/ha Feinboden (in dem das Nitrat diffus verteilt ist). Daraus folgt die Nitratkonzentration im Feinboden: $442 \text{ kg Nitrat} / 3.465.000 \text{ kg (Feinboden)} = 0,0128$ Masse-% Nitrat.

Im gesaugten Staub aus dem Innenraum liegen im Maximum 9,78 Masse-% Nitrat vor (Krypta Ostfenster, Probe vom 6.7.2015, vgl. Tab. 3); das sind um den Faktor 764 höhere Werte als im Boden. Dies weist darauf hin, dass die Staubquelle Acker nur einen unbedeutenden Beitrag zur Staubbelastung in der Kirche liefert. Gestützt wird diese Einschätzung auch von den deutlich geringeren Nitratgehalten in den Staub-

proben außerhalb der Kirche (vgl. Tab. 4), die in etwa der Größenordnung des obigen Rechenbeispiels nahekomen.

Fazit 1: Die Staubverfrachtung aus unbedecktem Ackerland in die Kirche St. Georg verursacht mit großer Wahrscheinlichkeit nur einen unbedeutenden Teil der Nitratbelastung des Kirchenstaubs. Allerdings könnte der nicht unerhebliche Feinschluff-Anteil im Boden, der hauptsächlich aus Silikaten besteht, zum Staub in der Kirche beitragen, da in der Einzelpartikelanalyse Silikate nachgewiesen wurden. Eine zweite Quelle von Nitrat und als Vorläufersubstanz Nitrit ist die Bildung als sekundäres Aerosol aus Vorläufergasen wie NO_2 in der Außenluft. Die NO_2 -Belastung auf der Reichenau wurde im Rahmen des Projekts nicht ermittelt. Die Jahresmittelwerte für NO_2 liegen an der LUBW-Messstation Schwarzwald-Süd bei 4 bis 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ und in Konstanz bei 19 bis 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Als maximale Stun-

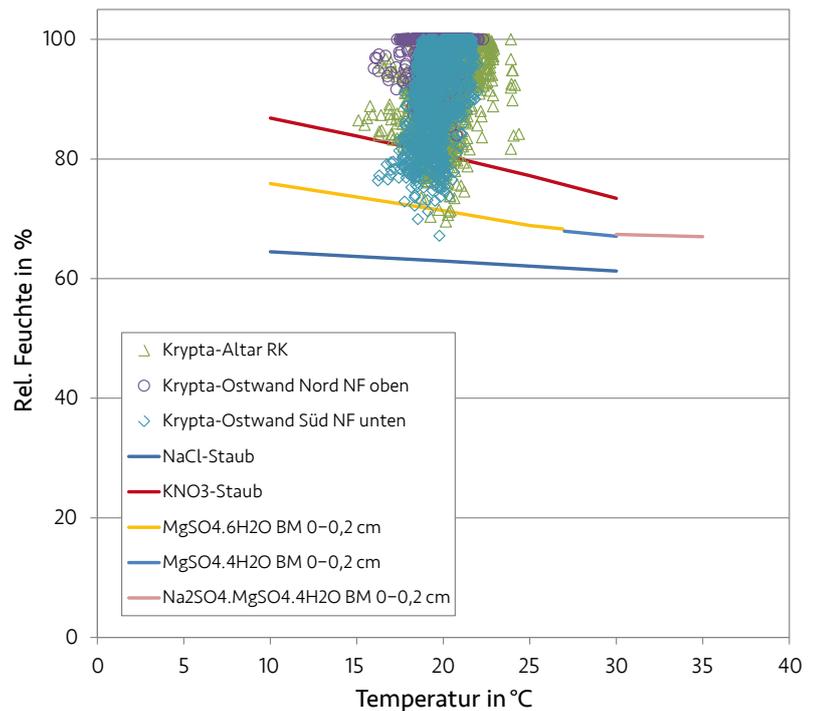


Tabelle 7: Depositionsdaten von St. Georg, ermittelt aus den Daten von Abbildung 3 und den Analysen von Tabelle 3, im Vergleich mit Daten aus (Bundschuh et al. 2015) vom Glockenturm der Mainzer Christuskirche (aus Tab. 7 (Daten wurden gemittelt und gerundet) und Abb. 10 (entsprechend Ablesegenauigkeit)).

	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Krypta Ost	mg/m²d	mg/m²d	mg/m²d
6.7.-11.09.2015	0,04	0,10	0,09
11.9.-15.10.2015	0,05	0,15	0,12
17.12.15-13.01.2016	0,06	0,36	0,13
Mittel	0,05	0,20	0,11
Westapsis Süd			
6.7.-11.09.2015	0,01	0,02	0,03
11.9.-15.10.2015	0,01	0,04	0,04
17.12.15-13.01.2016	0,01	0,00	0,05
Mittel	0,01	0,02	0,04
Mainz Glockenturm			
SAM-Filter	0,22	2,97	2,07
Portland Limestone	1,0	2,5	7,6
Baumberger Sandstein	2,5	3,3	5,1
Carrara-Marmor	0,0	1,2	2,1

Abb. 25: Vergleich von Klimadaten in der Nähe der Ostwand der Krypta (Zeitraum 6.7. bis 11.9.2015) mit Deliqueszenzfeuchten verschiedener Phasen der beiden simulierten Proben (MPA).

denmittelwerte werden 44 bis 76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Schwarzwald-Süd) bzw. 93 bis 135 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (Konstanz) (LUBW 2017) erreicht. Die Belastung auf der Reichenau dürfte auch aufgrund der nahen Bundesstraße am nördlichen Seeufer in etwa dazwischenliegen. Typische Nitrat-Partikel sind z. B. Ammoniumnitrat- oder Natriumnitrat-Partikel. Solche sekundären Aerosole sind in der Regel klein ($\leq 1 \mu\text{m}$) und werden daher weit verfrachtet. Ähnliches gilt für Sulfat-Aerosole (Sekundäre Aerosole 2017).

Im DBU-Projekt: Baudenkmäler unter dem Einfluss verkehrsbedingter Emissionen wurden von einer Arbeitsgruppe Passivsammler (sogenannte SAM-Filter (Surface Active Monitor = SAM)) und Steinproben an verschiedenen Bauwerken exponiert (Bundschuh et al. 2015). Eine Messstelle am Glockenturm der Mainzer Christuskirche war durch ein Vordach vor Niederschlag geschützt, d. h. dort war nur eine trockene Deposition wie im Inneren von St. Georg möglich. In Tabelle 7 sind die Depositionsraten von St. Georg und dieser Messstelle verglichen.

Die Depositionsraten an der Mainzer Christuskirche (SAM-Filter) sind um den Faktor 5 bis 100 höher gegenüber denjenigen in Krypta und Westapsis von St. Georg. Dies ist auch nicht verwunderlich, da die Christuskirche innerstädtisch gelegen und vom Verkehr umflossen ist und die Proben sich außen befanden. Auch wenn die Verkehrsimmissionen auf der Reichenau sicher geringer sind, so zeigt doch die mögliche Größenordnung von Depositionsraten im Außenraum, dass sekundäre Aerosole durchaus als Quelle infrage kommen. Die Analysen an den Steinplättchen des Mainzer Glockenturms, bei denen die Proben nach der Exposition aufgemahlen und analysiert wurden, zeigen, dass abhängig von der Porosität Gesteine unterschiedliche Mengen aufnehmen und durchaus höhere Werte als die SAM-Filter aufweisen können. In St. Georg ist der Putz vergleichsweise rau und porös, was die Gefährdung erhöht. Phosphate könnten von Dünger oder tierischen Exkrementen stammen. Die gesaugten Staubproben enthielten zum Teil Spinnen und Milben. Die Wände der Kirche sind besiedelt, wie die mikroskopische Analyse der Proben ergeben hat (vgl. Abb. 6 a).

Fazit 2: Sekundäre Aerosole, die über geöffnete Fenster und Türöffnungen beim Besucherverkehr in Kirche und Krypta gelangen, sind eine mögliche Quelle für die im Staub enthaltenen Salze. Das Klimatisierungskonzept funktioniert über

eine klimagesteuerte Fensterlüftung. D. h. durch die zeitweise geöffneten Fenster kann ein Anteil der Salz- und Staubbelastung ins Innere der Kirche gelangen. An den Fenstern im Kirchenschiff sind die Staubmengen in Richtung Westen, d. h. in Richtung des Eingangs zur Kirche, höher als in Richtung Osten (vgl. Tab. 2). Dies deutet darauf hin, dass ein zusätzlicher Staubeintrag durch den Besucherverkehr und die dabei geöffneten Türen erfolgt.

Fazit 3: Die Salzbelastung des Staubs ist in der tiefer liegenden Krypta deutlich höher als in den Arkadenfenstern der Apsis. Sekundäre Aerosole aufgrund verkehrsbedingter Immissionen sind in Bodennähe normalerweise höher, allerdings kann auch die Salzbelastung im Mauerwerk durch auskristallisierte Salze zu den Gehalten im Staub beitragen. Eine Klärung dieser Frage ist durch die Exposition einer neutralen Fläche möglich.

Gefährdung durch Besucher und Nutzung

Die Feinstaubmessungen zeigen, dass bei normalen Gottesdiensten und Besuchen die Feinstaubwerte zwar ansteigen, aber im Wesentlichen größere Partikel (PM₁₀) überwiegen. Wie oben ausgeführt führt dies durch die Türöffnung zu einem Staubeintrag, insbesondere wenn sowohl die Tür zur Kirche als auch die zur Vorhalle geöffnet ist und die Schleusenwirkung verloren geht (z. B. Abbau Hebebühne). Zusätzlich tragen die Besucher Staub an Schuhen und Kleidung ein und wirbeln vorhandenen Staub am Boden auf. Dies führt zu einer weiteren Verteilung des in der Kirche angesammelten Staubs. In Mašková (2016) weist der Vergleich von gemessenen und simulierten Daten darauf hin, dass der Anteil des Feinstaubs, der durch Besucher in die barocke Halle der Nationalbibliothek in Prag eingetragen wird, bei 35 % liegt. Durch die Besucherlenkung im Sommerhalbjahr wird die Anzahl der Besucher und ein damit möglicher Schadstoffeintrag limitiert. Solange der Beitrag der Besucher für St. Georg nicht genauer quantifiziert werden kann, sollte die Lenkung beibehalten werden. Bei Festgottesdiensten steigen alle Feinstaubwerte (PM_{1.0}, PM_{2.5} und PM₁₀) an, was vermutlich mit der Verwendung von Weihrauch und Kerzen zusammenhängt. Der Zeitanteil der Festgottesdienste ist allerdings über das Jahr betrachtet klein; es erscheint deshalb eher unwahrscheinlich, dass diese nennenswert zur Salzbelastung im Staub beitragen.

Zusammenfassung

Der Feinstaub- und Staubeintrag in die Kirche St. Georg trägt zur Salzbelastung des Mauerwerks bei. Aufgrund der klimatischen Bedingungen sind Lösungsprozesse von Salzpartikeln im Staub und damit ein weiterer Eintrag ins Mauerwerk möglich. Quellen des Staubs und der Salze sind zum einen vermutlich sekundäre Aerosole und zum anderen Partikel, die durch geöffnete Fenster und Türen sowie durch die Besucher in die Kirche getragen werden. Silikatische Anteile können vom leicht suspendierbaren Feinschluffanteil der umliegenden Böden stammen. Gefährlich sind insbesondere Sondersituationen, mit gleichzeitig geöffneten Türen in Vorhalle und Kirche. Innerhalb der Kirche tragen die Besucher zur Durchmischung und Verteilung des Staubs bei.

Die Verteilung des Staubs und die Salzdepositionsraten sind für Krypta und Kirchenschiff sowie innerhalb des Kirchenschiffs unterschiedlich. Für eine genaue Abschätzung empfiehlt es sich, die Strömungssituation in der gesamten Kirche zu erfassen und zu simulieren. Analog zu Mašková (2016) sollten ergänzend die partikelgrößenabhängigen Sedimentationsraten ermittelt werden. Diese Ergebnisse könnten einen

wichtigen Beitrag zur Analyse der Gefährdungssituation leisten. Bis dahin sollte die Besucherlenkung und damit die Schleusenwirkung der Vorhalle beibehalten werden.

Danksagung

Der Arbeiten der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart wurde durch Mittel der Deutschen Bundesstiftung Umwelt im Projekt: Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg – UNESCO – Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau gefördert. Die Arbeiten des Instituts für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt und des Landesamt für Geologie, Rohstoffe und Bergbau im Regierungspräsidium Freiburg erfolgten in Amtshilfe. Wir danken dem Institut für Angewandte Geowissenschaften der Technischen Universität Darmstadt und Herrn Dr. Guido Fischer vom Landesgesundheitsamt Baden-Württemberg im Regierungspräsidium Stuttgart für die Zurverfügungstellung von Feinstaubmessgeräten. Corinna Luz gebührt Dank für die zahlreichen Salzanalysen.

Literatur

- AGÖF (Arbeitsgemeinschaft Ökologischer Forschungsinstitute) Website; 20.1.2017; <http://www.agoef.de/schadstoffe/chemische-schadstoffe/voc-svoc-mvoc.html>.
- Burkart, Julia / Moshhammer, Hanns / Neuberger, Manfred / Steiner, Gerhard / Reischl, Georg / Hitzenberger, Regina: Characterizing the performance of two optical particle counters (Grimm OPC1.108 and OPC1.109) under urban conditions. In: *Journal of Aerosol Science* 41, 2010, S. 953–962.
- Busch, Michaela: Kap. 4 Vorsorge gegen Bodenerosion – Kap. 4.1 Sachstand Winderosion. In: *AID: Gute fachliche Praxis – Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz*, Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft. ISBN/EAN 978-3-8308-1166-4, 2015.
- ECOS/RUNSALT 2005. RUNSALT (Copyright (©) 2002–2005 by Davide Bionda) ist die grafische Schnittstelle zu ECOS, einem thermodynamischen Modell zur Vorhersage des Verhaltens von Salzmischungen unter sich ändernden Klimabedingungen und der zugehörigen Software SALT. Das ECOS-Modell wird beschrieben bei Price, C. A. (Ed.), 2000: "An expert chemical model for determining the environmental conditions needed to prevent salt damage in porous materials". European Commission Research Report No 11, (Protection and Conservation of European Cultural Heritage). Archetype Publications, London.
- Legrum, Wolfgang: *Riechstoffe, zwischen Gestank und Duft*. Wiesbaden 2011.
- LUBW (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg) Website, 27.01.2017, Die Website enthält Daten zur Luftbelastung (Feinstaub, NO₂, u. a.) an verschiedenen Messstellen. Zwei Stationen im Großraum um St. Georg sind Konstanz: http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/history_data/hstatDDEBW052PM10JMW.htm und Schwarzwald-Süd: http://mnz.lubw.baden-wuerttemberg.de/messwerte/langzeit/history_data/hstatDDEBW031PM10JMW.htm.
- Mašková, Ludmila / Smolik, Jiří / Travníková, Tereza / Havlica, Jaromir / Ondráčková, Lucie / Ondráček, Jakub: Contribution of Visitors to the Indoor PM in the National Library in Prague, Czech Republic. In: *Aerosol and Air Quality Research* 16, 2016, S. 1713–1721.
- Mleczkowska, Agata / Strojecki, Marcin / Bratasz, Łukasz / Kozłowski, Roman: Particle penetration and deposition inside historical churches. In: *Building and Environment* 95, 2016, S. 291–298.
- Neycheva, Elka: Analysen zur klimatischen Beanspruchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg (Reichenau) zur Entwicklung von Bewertungsstrategien, Masterarbeit, Institut für Werkstoffe im Bauwesen, Universität Stuttgart 2016.

- Nova Fitness Co., Ltd. (2015) Laser PM2.5 Sensor specification, Product model: SDS011, Version: V1.3
- Pagels, Joakim / Wierzbicka, Aneta / Nilsson, Erik / Isaxon, Christina / Dahl, Andreas / Gudmundsson, Anders / Swietlicki, Erik / Bohgard, Mats: Chemical composition and mass emission factors of candle smoke particles. In: *Aerosol Science* 40, 2009, S. 193–208.
- Sekundäre Aerosole Website, 01.02.2017;
http://wiki.bildungsserver.de/klimawandel/index.php/Sekund%C3%A4re_Aerosole.
- Suspension-Wikipedia Website; 25.1.2017; https://de.wikipedia.org/wiki/Suspension_%28Geologie%29
- UBA (Umweltbundesamt) Website; 20.1.2017;
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/luftschadstoffe/feinstaub>.
- Weber, Stephan: Exposure of Churchgoers to Airborne Particles. In: *Environmental Science & Technology* 40, 2006, S. 5251–5256.
- Zapf, Jean Michel: Analyse von Feinstaub-Depositionsproben aus der Kirche St. Georg (Reichenau) mittels Rasterelektronenmikroskopie. Bachelorarbeit, Institut für Angewandte Geowissenschaften, TU Darmstadt 2017, in Erstellung.
- Zöltzer, Dieter: Untersuchungen zur Staubbelastung in der St. Georg-Kirche Insel Reichenau; unveröffentlichter Untersuchungsbericht Nr. 901 7881 000 der Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart vom 15.01.2010.

Möglichkeiten und Herausforderungen der Einzelpartikelanalyse in denkmalgeschützten Innenräumen

Stephan Weinbruch, Dirk Scheuvens

Einleitung

Die Methoden der Elektronenmikroskopie (Rasterelektronenmikroskopie REM und Transmissionselektronenmikroskopie TEM) mit den zugehörigen spektroskopischen Verfahren (energie-dispersive Röntgenmikroanalyse EDX, Elektronenenergieverlust-spektroskopie EELS, Elektronenrückstreubeugung EBSD) sind weitverbreitete Verfahren zur Charakterisierung von

Festkörpern. Im vorliegenden Beitrag soll eine kurze Übersicht der Anwendungsmöglichkeiten dieser Methodenkombination zur Einzelpartikelanalyse in denkmalgeschützten Innenräumen gegeben werden. Dabei handelt es sich nicht um eine umfassende Review-Arbeit, sondern um eine erweiterte Kurzfassung des Vortrags auf der Abschlusstagung des DBU Forschungsprojekts St. Georg (Reichenau).

Tabelle 1: Übersicht der mit Elektronenmikroskopie bestimmbaren Parameter individueller Partikel.

Partikelparameter	untersuchbarer Größenbereich ideal (real)*	Automation	Routinemethode	Relevanz für Arbeiten im Bereich des Denkmalschutzes
Größe und Größenverteilung	REM: ≥ 10 nm TEM: ≥ 1 nm	ja	ja	Zeitskala der Verschmutzung Bestimmung der Quellen
Oberflächenmorphologie	REM: ≥ 10 nm (300 nm) TEM: ≥ 1 nm (30 nm)	ja	ja	Bestimmung der Quellen
Form	REM: ≥ 10 nm (100 nm) TEM: ≥ 1 nm (10 nm)	ja	ja	Bestimmung der Quellen
chemische Zusammensetzung (alle Elemente ab Bor)	REM EDX: ≥ 5 nm (50 nm) TEM EDX: ≥ 1 nm (10 nm)	ja	ja	Bestimmung der Quellen Schädigungsmechanismus
Phasenzusammensetzung	REM EBSD: ≥ 10 nm (50 nm) TEM SEAD: ≥ 1 nm (5 nm)	REM: ja TEM: nein	REM: nein TEM: ja	Bestimmung der Quellen Schädigungsmechanismus
fraktale Eigenschaften	TEM: Agglomerate ≥ 100 nm	nein	nein	keine
Nanostruktur	TEM: sub-nm	nein	ja	Bestimmung der Quellen
Oxidationsstufe	TEM: EELS: 2 nm (10 nm)	nein	nein	keine
Mischungszustand	REM: ≥ 10 nm TEM: ≥ 1 nm	nein	ja	Bestimmung der Quellen (Schädigungsmechanismus)
hygroskopische Eigenschaften	ESEM: ≥ 10 nm (100 nm) ETEM: ≥ 1 nm (10 nm)	ESEM: in Entwicklung ETEM: nein	nein	Schädigungsmechanismus
Eiskeimfähigkeit	ESEM: ≥ 10 nm ETEM: ≥ 1 nm	nein	nein	keine

* ideal = ideale synthetische Partikel; real = reale atmosphärische Partikel (nur angegeben, wenn ein beträchtlicher Unterschied besteht)

Abkürzungen: REM = Rasterelektronenmikroskopie, TEM = Transmissionselektronenmikroskopie, EDX = energie-dispersive Röntgenmikroanalyse, EBSD = Elektronenrückstreubeugung, SAED = Elektronenfeinbereichsbeugung, EELS = Elektronenenergieverlustspektroskopie, ESEM = environmental scanning electron microscopy, ETEM = environmental transmission electron microscopy

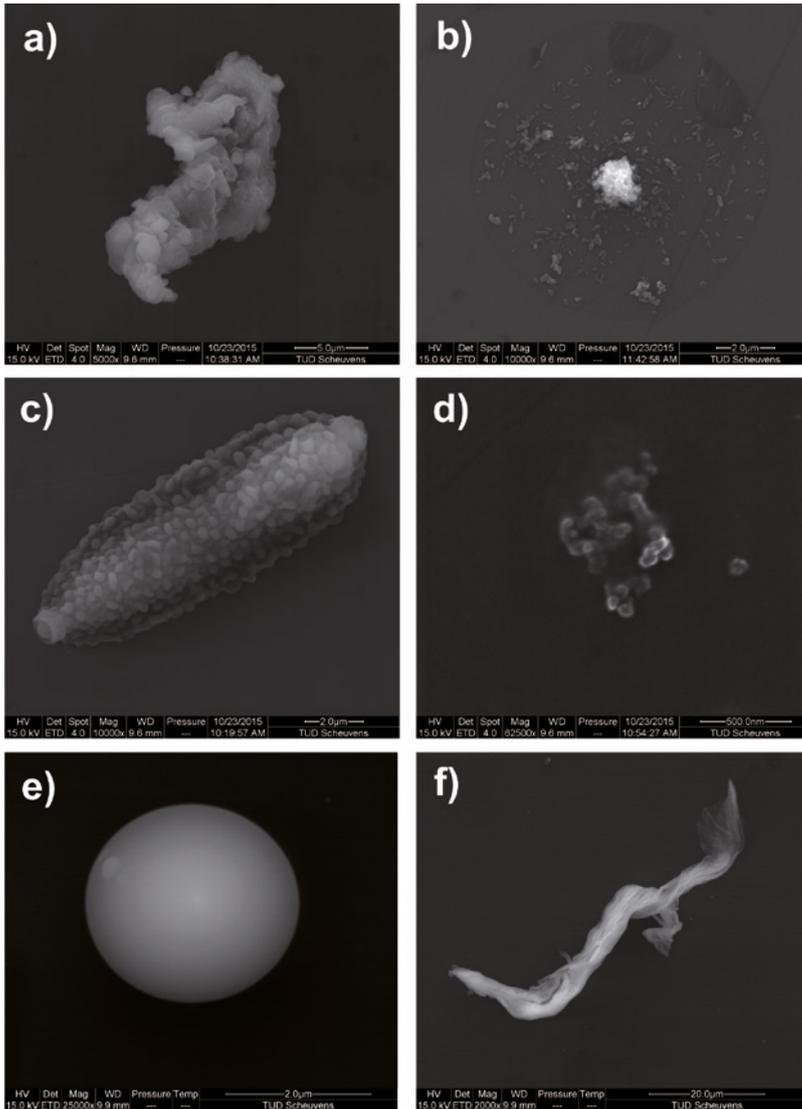


Abb. 1:
Sekundärelektronen-
bilder typischer deponierter Partikel aus der Kirche St. Georg (Reichenau). a) intern gemischtes Partikel aus Aluminosilikaten und einer Calciumsulfat-Phase (Gips, Anhydrit), b) abgetrockneter Tropfen mit Neukristallisation aus Calciumsulfat (Gips, Anhydrit), c) biologisches Partikel (Spore oder Polle), d) Ruß, e) kugelförmiges Kohlenstoffpartikel („tarball“), vermutlich Weihrauch, f) Kohlenstofffaser.

Charakterisierung individueller Partikel

Mit elektronenmikroskopischen Techniken lassen sich eine Vielzahl von Parametern an individuellen Partikeln bestimmen (Tab. 1), wobei mittels TEM Partikel ab einer Größe von etwa 1 nm und mit REM ab etwa 10 nm untersucht werden können. Diese Angaben beziehen sich auf ideale synthetische Partikel, bei realen atmosphärischen Partikeln kann die laterale Auflösung bei einigen Parametern auch deutlich schlechter sein (Tab. 1). Größe, Form, Morphologie und chemische Zusammensetzung individueller Partikel können automatisiert und routinemäßig bestimmt werden. Somit ist zumindest REM auch im Rahmen von Monitoring-Projekten einsetzbar (die Anzahl untersuchter

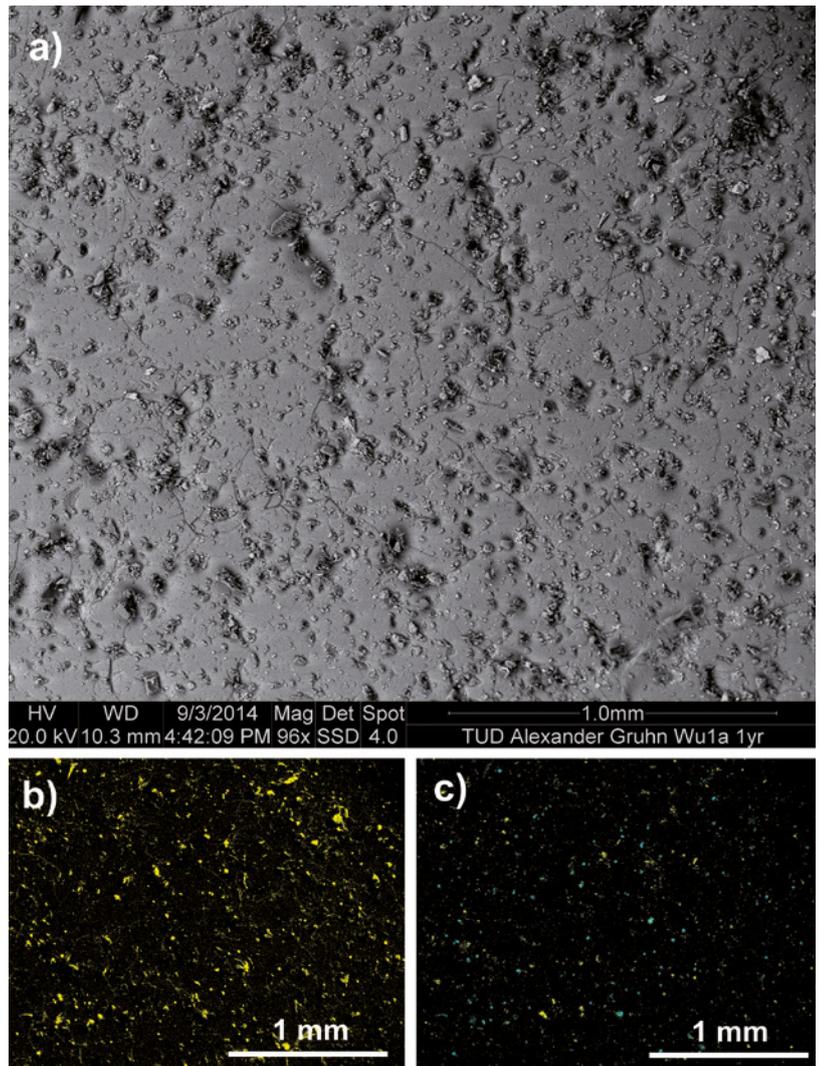
Partikel kann hierbei mehrere Hunderttausend betragen). Die Bestimmung der Phasenzusammensetzung und der Nanostruktur ist mit TEM routinemäßig möglich, jedoch aus zeitlichen Gründen meist auf eine geringe Anzahl von Partikeln (einige Hundert) beschränkt. Alle anderen in Tabelle 1 aufgeführten Parameter individueller Partikel wurden bisher nur gelegentlich untersucht.

Anwendung in denkmalgeschützten Innenräumen

Partikuläre Verunreinigungen in der Innenraumluft von Museen und historischen Gebäuden können negative Auswirkungen auf Kunstwerke haben (z. B. Nazaroff/Cass 1991; Grau-Bové/Strlič 2013). Die Deposition von Partikeln führt insbesondere zur Verschmutzung (soiling), zu Farbveränderungen und Entfärbung (z. B. durch Oxidation) sowie zu korrosiven Prozessen. Zusätzlich können Partikel auch als Substrat für die Aktivität von Mikroorganismen fungieren. In diesem Zusammenhang wurde elektronenmikroskopische Einzelpartikelanalyse bisher nur in wenigen Projekten eingesetzt (z. B. de Bock et al. 1996; Brimblecombe et al. 1999; Camuffo et al. 1999; Worobiec et al. 2008; Grau-Bové/Strlič 2013; Anaf et al. 2015). Der Schwerpunkt dieser Arbeiten lag naturgemäß bei der Bestimmung der verschiedenen in der Innenraumluft vorhandenen Partikelgruppen und ihrer möglichen Quellen. Es zeigte sich, dass sowohl Innenraumquellen als auch die Außenluft zur Partikelbelastung beitragen. Eine besondere Bedeutung hat außerdem die Resuspension von Staub durch Besucher. Die wichtigsten Partikelgruppen sind (in alphabetischer Reihenfolge) Aluminosilikate (Flugaschen und Bodenstäube), Ammoniumsulfat/hydrogensulfat (sekundäres Aerosol), Calciumcarbonate, Eisenoxide, Calciumsulfate, organische Partikel, Ruß und Seesalz, wobei die relativen Häufigkeiten der verschiedenen Partikelgruppen stark von Ort und Jahreszeit der Untersuchungen abhängig sind. Die Vielzahl beobachteter Partikelgruppen ist ein deutlicher Hinweis darauf, dass eine Reihe von Quellen zur partikulären Schadstoffbelastung in Innenräumen beitragen. Repräsentative Beispiele für einzelne Partikelgruppen, die für die Schädigung und Verschmutzung von Oberflächen in Innenräumen

verantwortlich sein können, sind in Abbildung 1 dargestellt. Alle rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen Partikel aus der Kirche St. Georg (Reichenau), die mittels Passivsammlung auf Borsubstraten durch Sedimentation abgeschieden wurden.

Die Zeitskala der beobachtbaren Oberflächen-degradation ist nur mit großen Unsicherheiten bekannt. Für Rußpartikel z. B. wurde in frühen Arbeiten eine erkennbare Verschmutzung ab einer Flächenbelegung von etwa 0,2% angenommen, neuere Arbeiten ergaben einen wesentlich höheren Wert von etwa 2,4% (Druzik/Cass 2000). Dementsprechend stieg der vorhergesagte Zeitraum für eine durch Rußpartikel hervorgerufene erkennbare Verschmutzung in südkalifornischen Museen von etwa 0.3-18 Jahren auf 4-216 Jahren (Druzik/Cass 2000). Im Gegensatz dazu werden in einem neueren Übersichtsartikel (Grau-Bové/Strlič 2013) kürzere Zeiten zwischen einem Monat und einem Jahr für die erste mit dem bloßen Auge erkennbare Verschmutzung angegeben. Durch die Auslagerung von Modelloberflächen über einen längeren Zeitraum kann die zeitliche Abhängigkeit der Belegungsichte experimentell untersucht werden. Die Vorteile der elektronenmikroskopischen Untersuchung der Modelloberflächen vor und nach Exposition liegen bei der im Vergleich zur Lichtmikroskopie besseren lateralen Auflösung (Detektion kleiner Partikel) sowie der Möglichkeit, zusätzlich zur Größe der Partikel auch andere für die Quellzuordnung wichtige Parameter (z. B. Oberflächenmorphologie, chemische Zusammensetzung) bestimmen zu können. In Abbildung 2 ist ein Beispiel für die elektronenmikroskopische Untersuchung von Verschmutzung von Modelloberflächen durch Außenluft an einer stark befahrenen Straße (Rennweg, Residenz Würzburg) gezeigt. Es wurden horizontal exponierte Marmorplatten (Carrara-Marmor) nach einem Jahr der Auslagerung (trockene Deposition) untersucht. Im Rückstreuelektronenbild ist neben zahlreichen Partikelablagerungen auch das initiale Wachstum von Pilzen zu beobachten. Das Elementverteilungsbild für Kohlenstoff zeigt eine große Anzahl Kohlenstoff-reicher Partikel (überwiegend biologische Partikel und Reifenabriebpartikel). Im Elementverteilungsbild für Cl und S ist ebenfalls eine große Anzahl von Partikeln auf der Marmoroberfläche zu erkennen. Die Cl-haltigen Partikel können hierbei auf den Eintrag von Streusalz zurückgeführt werden. In diesem Beispiel betrug nach



einem Jahr Exposition die Flächenbelegung auf der Marmoroberfläche etwa 25%. Für Innenräume ist natürlich eine deutliche niedrigere Depositionsrate zu erwarten.

Ausblick

Neben den oben vorgestellten Routineanwendungen gibt es vielversprechende Möglichkeiten zur Weiterentwicklung der elektronenmikroskopischen Einzelpartikelanalyse, die auch für Anwendungen in Museen und denkmalgeschützten Innenräumen von Interesse sind. Zum Beispiel ist es möglich, durch TEM die Quellen einzelner Rußpartikel zu unterscheiden (Weinbruch et al. 2016). Im Zusammenhang mit denkmalgeschützten Innenräumen ist die Unterscheidung von Ruß aus dem Kraftfahrzeugverkehr (Dieselruß) und aus der Holzverbren-

Abb. 2: Horizontal exponierte Marmorplatte nach einem Jahr Auslagerung an einer stark befahrenen Straße. (a) Rückstreuelektronenbild, (b) Elementverteilungsbild für Kohlenstoff, (c) Elementverteilungsbild für Chlor (hellblau) und Schwefel (gelb).

nung eine wichtige Fragestellung. Beide Quellen können aufgrund des Gehaltes an Kalium, der Primärpartikelgröße der Rußagglomerate und der Nanostruktur der Primärpartikel unterschieden werden.

Schädigungsmechanismen von deponierten Partikeln können in-situ bei variabler Luftfeuchte und Temperatur durch ESEM (environmental

scanning electron microscopy) untersucht werden (z. B. Ebert et al. 2002). Mit dieser Methode kann zum Beispiel das hygroskopische Verhalten (Bildung von Wasserfilmen, Entstehung von Säuretröpfchen) von Mischpartikeln (Mischung verschiedener gut löslicher Salze), für die es keine Literaturangaben gibt, untersucht werden.

Zitierte Literatur

- Anaf, W. / Bencs, L. / van Grieken, R. / Janssens, K. / de Wael K.: Indoor particulate matter in four Belgian heritage sites: Case studies on the deposition of dark-colored and hygroscopic particles, *The Science of the Total Environment* 506-507, 2015, 361-368.
- Brimblecombe, P. / Blades, N. / Camuffo, D. / Sturaro, G. / Valentino, A. / Gysels, K. / van Grieken, R. / Busse, H.-J. / Kim, O. / Ulrych, U. / Wieser, M.: The indoor environment of a modern museum building, *The Sainsbury Centre for Visual Arts, Norwich, UK, Indoor Air* 9, 1999, 146-164.
- Camuffo, D. / Brimblecombe, P. / van Grieken, R. / Busse, H.-J. / Sturaro, G. / Valentino, A. / Bernardi, A. / Blades, N. / Shooter, D. / de Bock, L. / Gysels, K. / Wieser, M. / Kim, O.: Indoor air quality at the Correr Museum, Venice, Italy, *The Science of the Total Environment* 236, 1999, 135-152.
- de Bock, L.A. / van Grieken, R. E. / Camuffo, D. / Grime, G. W.: Microanalysis of museum aerosols to elucidate the soiling of paintings: case of the Correr Museum, Venice, Italy, *Environmental Science & Technology* 30, 1996, 3341-3350.
- Druzik, J. R. / Cass, G. R.: A new look at soiling of contemporary paintings by soot in art museums, In: *IAQ2000 - The Indoor Air Quality Meeting for Museums*, 2000, 22-24.
- Ebert, M. / Inerle-Hof, M. / Weinbruch, S.: Environmental scanning electron microscopy as a new technique to determine the hygroscopic behaviour of individual aerosol particles, *Atmospheric Environment* 36, 2002, 5909-5916.
- Grau-Bové, J. / Strlič, M.: Fine particulate matter in indoor cultural heritage: a literature review, *Heritage Science* 1:8, 2013, doi: 10.1186/2050-7445-1-8.
- Nazaroff, W. W. / Cass, G.R.: Protecting museum collections from soiling due to the deposition of airborne particles, *Atmospheric Environment* 25A, 1991, 841-852.
- Weinbruch, S. / Benker, N. / Kandler, K. / Ebert, M. / Ellingsen, D. G. / Berlinger, B. / Thomassen, Y.: Morphology, chemical composition and nanostructure of single carbon-rich particles studied by transmission electron microscopy: source apportionment in workroom air of aluminium smelters, *Analytical and Bioanalytical Chemistry* 408, 2016, 1151-1158.
- Worobiec, A. / Samek, L. / Karaszkiwicz, P. / Kontozova-Deutsch, V. / Stefaniak, E.A. / van Meel, K. / Krata, A. / Bencs, L. / van Grieken, R.: A seasonal study of atmospheric conditions influenced by the intensive tourist flow in the Royal Museum of Wawel Castle in Cracow, Poland, *Microchemical Journal* 90, 2008, 99-106.

KLIMA

Restauratorische Begleitung von Klimamessungen

Dörthe Jakobs

Für Klimamessungen an denkmalgeschützten Objekten ist eine restauratorische Begleitung heutzutage Standard, da es dabei in der Regel immer um sehr empfindliche Oberflächen geht. Das gilt für Wandmalereien, Gemälde und Skulpturen wie auch für alle Arten von Architekturoberflächen mit und ohne historische Putze und Ausstattungen. „Ohne“ soll heißen, dass bspw. auch als Sichtflächen konzipierte Betonoberflächen hochempfindlich sind.

Ab 1982 erfolgten Klimamessungen in St. Georg. Damals wurden im Kirchenschiff, in der Krypta und in der Michaelskapelle die zu der Zeit verbreiteten Thermohygrographen verwendet, die einmal pro Woche aufgezogen werden mussten. Seit dem Jahr 2001 lieferte eine Messstation mit 16 Sonden im Innen- und Außenbereich bereits digitale Daten zur relativen Feuchte und Temperatur sowie an zwei Oberflächensonden auch zu den Temperaturen an den Maleroberflächen.¹ Nach den Untersuchungen und der Restaurierung der Wandmalereien in den Jahren 1982 bis 1990 fanden Wartungen in den Jahren 1992, 1994, 1998 und 2001 zur Kontrolle des Erhaltungszustands der Wandmalereien statt. Beunruhigend war ein ab 1998 festzustellendes Ausbreiten eines Schimmelbefalls auf der Nordwand, der 2003 eine Wiedereinrüstung der Wandmalereien und einer Abnahme des Schimmels erforderlich machte. Einem erneuten Schimmelbefall entgegnete man mit einem Be- und Entlüftungskonzept sowie der Einrichtung der Vorhalle als Klimaschleuse. Darüber hinaus fanden erste Versuche einer Besucherlenkung im Sommer

2009 statt, seit 2013 hat sich das System etabliert.²

Ab 2011 konnte ein ganzheitliches Monitoring eingerichtet werden, um mehr Informationen über spezifische Wechselwirkungen zwischen Klimaveränderungen und Besucheraufkommen erfassen zu können (Abb. 1).

Mit diesem System werden die Nahfeld- und Oberflächenklimata an den Wandmalereien im Minutenrhythmus in allen Raumbereichen der Kirche aufgezeichnet und mit den Statusinformationen zur Stellung von Fenstern und Türen wie auch zum Betrieb der in der Kirche installierten Sitzbankheizung abgeglichen, um die feuchtebedingte Beanspruchung des einzigartigen Wandmalereizyklus bewerten zu können.³ Über Luftstrommessungen werden außerdem die Türöffnungsintervalle dokumentiert.

Mit der Einrichtung dieses kabelbasierten Messsystems galt, es ca. 160 Sonden an den Architektur- und Wandmaleroberflächen zu befestigen. Hierzu bedarf es reversibler Befestigungssysteme, die den empfindlichen Oberflächen keine Beschädigungen zufügen. Eine Standardlösung für jeden Fall gibt es bisher nicht, dagegen wird man in Abhängigkeit des Materials und der Mal- oder Fassungstechnik sowie der Frage der Messdauer immer individuelle Entscheidungen treffen müssen.

Bewährt hat sich in St. Georg die Anbringung der Sonden mittels Cyclododekan, einem flüchtigen Bindemittel, das zur Stoffgruppe der alicyclischen Kohlenwasserstoffe gehört und rückstandslos sublimiert.⁴ Es empfiehlt sich grund-

1 Zu einer ersten Auswertung und Bewertung der Klimamessungen von 1992–2007 vgl. Bericht von Ulrike Henes-Klaiber vom 09.03.2010, Archiv LAD.

2 Zu Details vgl. Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252–257 und Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben eine neues UNESCO-Welterbe“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf

der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2014, S. 155–161.

3 Zu Details vgl. die nachfolgenden Ausführungen von Harald Garrecht und Elka Neycheva.

4 Hangleiter, Hans Michael / Jägers, Elisabeth / Jägers, Erhard: Flüchtige Bindemittel, Teil I: Anwendungen, Teil II: Materialien und Materialeigenschaften. In: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2, 1995, S. 385–392.

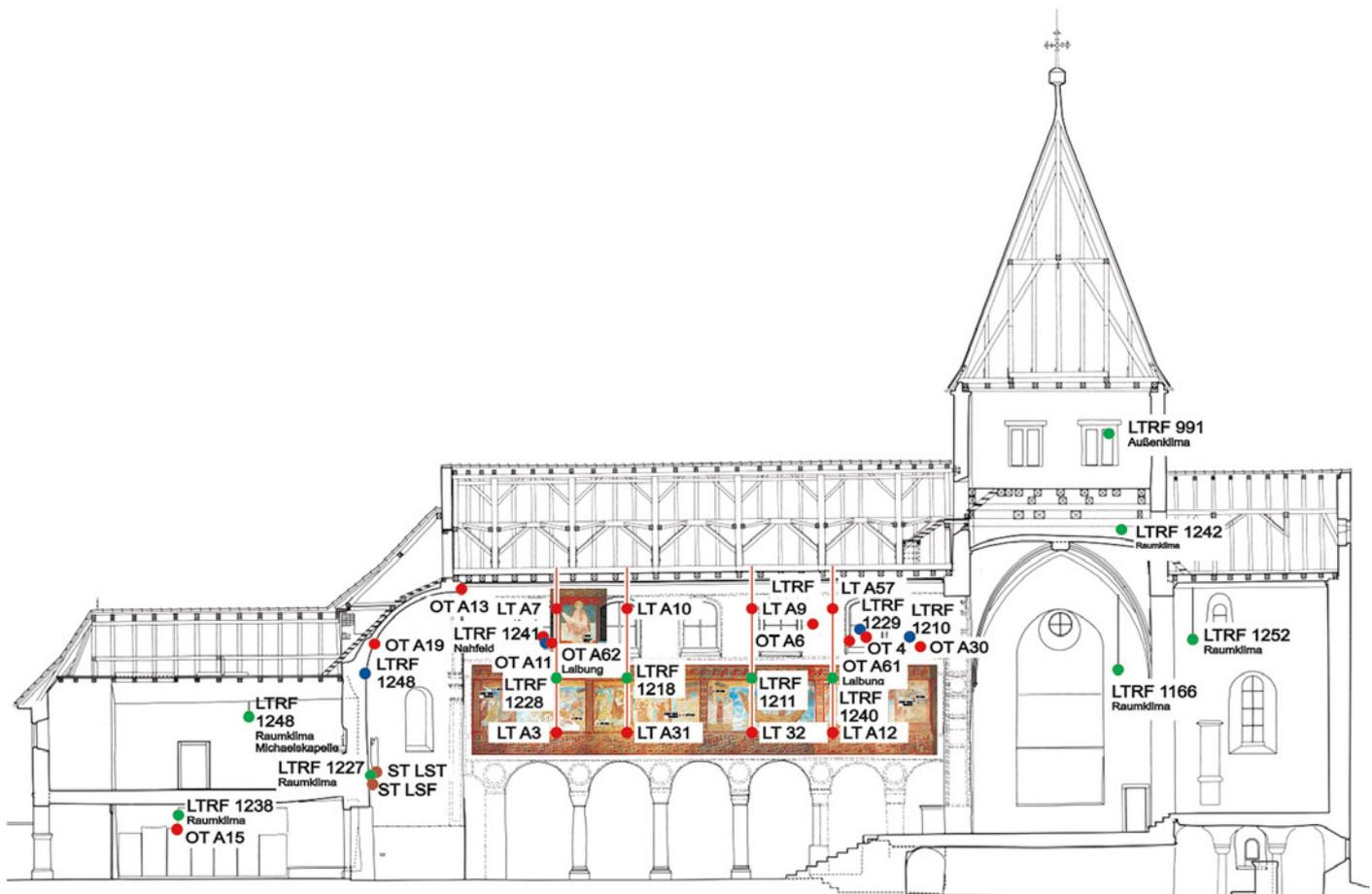


Abb. 1:
Eintragung der Messpunkte in einen Querschnitt von St. Georg (Landesamt für Denkmalpflege, Fachgebiet Baudokumentation 1997) mit Einpassung der Bildszenen (Bildplan LAD, Eintragungen TTI GmbH-MOCult, Stuttgart).

sätzlich die Anbringung der Sonden zu zweit durchzuführen, da ein schnelles Arbeiten erforderlich ist.⁵ Die Schmelze wird heiß mit einem Pinsel aufgetragen. Um Läufer von Cyclododekan zu vermeiden, wurde eine Schablone aus einer stabilen Kunststoffolie entwickelt, in der sich im unteren abgeknickten Bereich überlaufendes Cyclododekan sammeln kann. Die Schablone hat außerdem den Vorteil, dass sich saubere Vierecke für die Anbringung der Sonden ergeben (Abb. 2, 3). Auch für Probleme der Verflüchtigung hat sich eine – zumindest temporäre – Lösung gefunden. Nach dem dreifachen Auftrag einer Cyclododekan-Schmelze im Bereich von ca. 6 × 6 cm wird der Bereich mit einem ca. 5 × 5 cm breiten Aluklebeband⁶ abgedeckt, sodass das Material sich nur noch langsam an

den Seiten verflüchtigen kann (Abb. 4, zur Größe vgl. Abb. 8). Auf die Folie werden dann die Sonden gelegt. Diese werden mit einem minimal größeren Aluklebeband eingebunden und aufgeklebt. Die Größe ergibt sich dadurch, dass mit dem Auflegen der Sonden (je nachdem ob eine oder zwei) mehr Klebefolie benötigt wird, als auf der glatten Cyclododekan-Fläche (Abb. 5). Beim Anbringen der Folien muss sichergestellt sein, dass die zweilagigen Aluklebebänder nur im Bereich der dreifach aufgetragenen Schmelze haften und diesen Bereich nicht überlappen.

Auf diese Weise können die Sonden über drei Jahre haften bleiben, in der Regel sogar länger. Bei sehr porösen Systemen empfiehlt sich eine Vorfestigung mittels verdünntem Cyclododekan und nachfolgend dem mehrfachen Auftrag der Schmelze. Abschließend erfolgte in St. Georg die Abdeckung der optisch stark ins Auge fallenden Folie mittels eines Japanpapiers, das mit Klucel auf die Folie geklebt wurde (Abb. 6). Dies diente lediglich der optischen Zurücknahme der Messpunkte. Da in St. Georg versucht wurde, die

5 Das Anbringen der Sonden erfolgte mit Robert Lung, Reichenau, der als Projektbeteiligter auch die naturwissenschaftlichen Untersuchungen begleitete. Ihm sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

6 Gerlinger Aluminium-Klebeband Gerband, DIN 4202 nicht brennend.



[links] Abb. 2:
Verfahren zur Aufbringung der Cyclododekan-Schmelze über eine Schablone aus Kunststofffolie (LAD, Jakobs).

[rechts] Abb. 3:
Ca. 6 × 6 cm großes Viereck mit dreifach aufgetragener Cyclododekan-Schmelze über Schablone (LAD, Jakobs).



[links] Abb. 4:
Abdeckung der Schmelze aus Cyclododekan mit einem speziellen Aluklebeband, um die Sublimierung der Schmelze zu verzögern (LAD, Jakobs).

[rechts] Abb. 5:
Einlegen der Oberflächensonde mit einem zweiten Klebeband (LAD, Jakobs).



[links] Abb. 6:
Abdeckung der Alufolie mit einem Japanpapier, um die optische Beeinträchtigung der Messpunkte durch die Reflexion des Aluminiums zu reduzieren (LAD, Jakobs).

[rechts] Abb. 7:
Beispiel für einen Messpunkt mit zwei Sonden (Oberfläche und Nahfeldklima). Aus einer größeren Entfernung werden die Messpunkte durch die Abdeckung mit Japanpapier kaum mehr wahrgenommen (LAD, Jakobs).

Messpunkte überwiegend in hellen, sehr stabilen Malschichtbereichen oder Hintergründen anzubringen, fallen diese optisch nach Abdeckung mit dem Japanpapier nicht mehr auf (Abb. 7). Für längere Messzeiten müssen entweder alternative Materialien in Abhängigkeit der Materialität der Oberflächen ausgewählt oder – wie am Projekt St. Georg auf der Insel Reichenau – die Sonden wiederholt mit Cyclododekan befestigt werden. Über eine Hebebühne werden die Sonden hier im Rahmen eines bestehenden Monitorings regelmäßig kontrolliert.

Bei der Abnahme der Sonden – auch um diese längerfristig wieder im gleichen Verfahren wie oben beschrieben zu befestigen – dürfen diese weder aus der Alufolie gerissen noch darf die Folie berührt werden. Hier besteht die Gefahr, dass in den Bereichen, wo das Cyclododekan bereits sublimiert ist, die Folie an der Oberfläche anhaftet. Es ist daher wichtig, die an den Rändern durch die Verflüchtigung des Cyclododekan bereits „schwebende“ Folie mit einem Skalpell zur Mitte hin einzufalten. Zur Mitte der Folie hin ist in der Regel auch nach 2 bis 3 Jahren noch die Cyclododekan-Schmelze erhalten. Wenn dieser



Abb. 8:
Vorbereiteter Messpunkt
in der Krypta mit Maß-
stab (LAD, Jakobs).

Literaturauswahl:

- Hangleiter, Hans Michael / Jägers, Elisabeth / Jägers, Erhard: Flüchtige Bindemittel, Teil I: Anwendungen, Teil II: Materialien und Materialeigenschaften. in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung 2, 1995, S. 385–392.
- Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben eine neues UNESCO-Welterbe“. Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel

Bereich auch sublimiert ist, fällt die Folie von der Wand ab. Entscheidend ist, dass Sonden und Folie berührungsfrei entfernt werden, was durch leichte Warmluftzufuhr an den Seiten der Folie erfolgen kann. Damit wird die Verflüchtigung des Cyclododekan beschleunigt und die Befestigung fällt von alleine herab. Alternativ kann die Folie nach dem Einfalten zur Mitte hin und unter Beachtung, dass die Oberfläche der Wand nicht von der Folie berührt wird, kontrolliert von der Cyclododekan-Schmelze nach unten gerichtet abgezogen werden.

von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2014, S. 155–161.

Reichwald, Helmut F.: Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2003, S. 252–257.

20 Jahre Klimamessungen in St. Georg Auswertung, Ergebnisse und Bewertung – Werkzeuge, Methoden und Bewertungstool

Elka Neycheva

Einleitung

Die wertvollen Wandmalereien in der Kirche St. Georg, die in die zweite Hälfte des 10. Jahrhunderts datiert werden, sind trotz bereits ergriffener Restaurierungsmaßnahmen und durchgeführter Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas noch immer als gefährdet anzusehen. Wenngleich Maßnahmen zur Raumluftverbesserung durchgeführt wurden, die eine geregelte Belüftung über die in der Kirche in den Seitenschiffen und im Chor vorhandenen Kippfenster und eine thermische Abluftführung zum Dachraum umfassen, zeigt die Auswertung der langjährig erfassten Klimadaten, dass über eine lange Zeitspanne hinweg eine sehr hohe relative Feuchte der Raumluft in der Kirche vorherrschte. Darüber hinaus wird das Klima in der Kirche in besonderer Weise von der touristischen Nutzung beeinflusst. Um die Wandmalereien auch für nachfolgende Generationen erhalten zu können, ist eine Stabilisierung der Raumluftverhältnisse auf einem für die Wandmalereien geeigneten Niveau anzustreben.

Der vorliegende Beitrag stellt eine Zusammenfassung der wesentlichen Ergebnisse einer Masterarbeit an der Universität Stuttgart dar, die sich mit den „Analysen zur klimatischen Beanspruchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg (Reichenau) zur Entwicklung von Bewertungsstrategien“ (Bearbeiterin Elka Neycheva, Betreuerin: Simone Reeb MSc) befasste. Im Wesentlichen sollten die Auswirkungen witterungs- und nutzungsbedingter Beanspruchungen der ottonischen Wandmalereien und die damit einhergehenden Schädigungsmechanismen untersucht werden. Ziel der Masterarbeit war es, die seit mehr als 30 Jahren gemessenen Klimadaten zusammenfassend auszuwerten,

um die Gefährdungspotenziale und möglichen Schädigungsprozesse analysieren und bewerten zu können. Eine Herausforderung der Auswertung war dabei, die über die letzten drei Dekaden mit unterschiedlichen Messsystemen und in unterschiedlicher Informationsdichte erfassten Daten zusammenzutragen und im Kontext der seit Messbeginn vorliegenden Informationen zu analysieren. Diesem Problem hatte sich bereits Ulrike Henes-Klaiber in einer ersten zusammenfassenden Auswertung der Klimamessungen von 1992 bis 2007 gestellt (Henes-Klaiber, 2010)

Mit dem im Jahr 2011 neu installierten Messsystem konnte über die Raumklimabewertung hinaus erstmals auch mithilfe der im unmittelbaren Umfeld der Wandmalereien gemessenen Daten eine Gefährdungsanalyse für die einzelnen Bildszenen vorgenommen werden. Auf der Grundlage dieser Erkenntnisse sollte abschließend ein einfaches Bewertungstool entwickelt, umgesetzt und erprobt werden, mit dem nicht nur die Art und Intensität der Gefährdung der Wandmalereien identifiziert werden kann, sondern sich auch erforderliche Maßnahmen ableiten lassen, mit denen der Erhalt der Wandmalerei nachhaltig und zuverlässig sichergestellt werden kann.

Klima-Monitoring und Maßnahmen

Seit Beginn der 1980er Jahre werden in St. Georg Klimadaten aufgezeichnet, die zunächst mit mehreren Thermohygrographen erfasst wurden (Jakobs 2014). Im Jahr 2001 wurde eine elektronische Klimamessstation auf dem Dachboden der Kirche installiert, die über insgesamt 16 Sen-

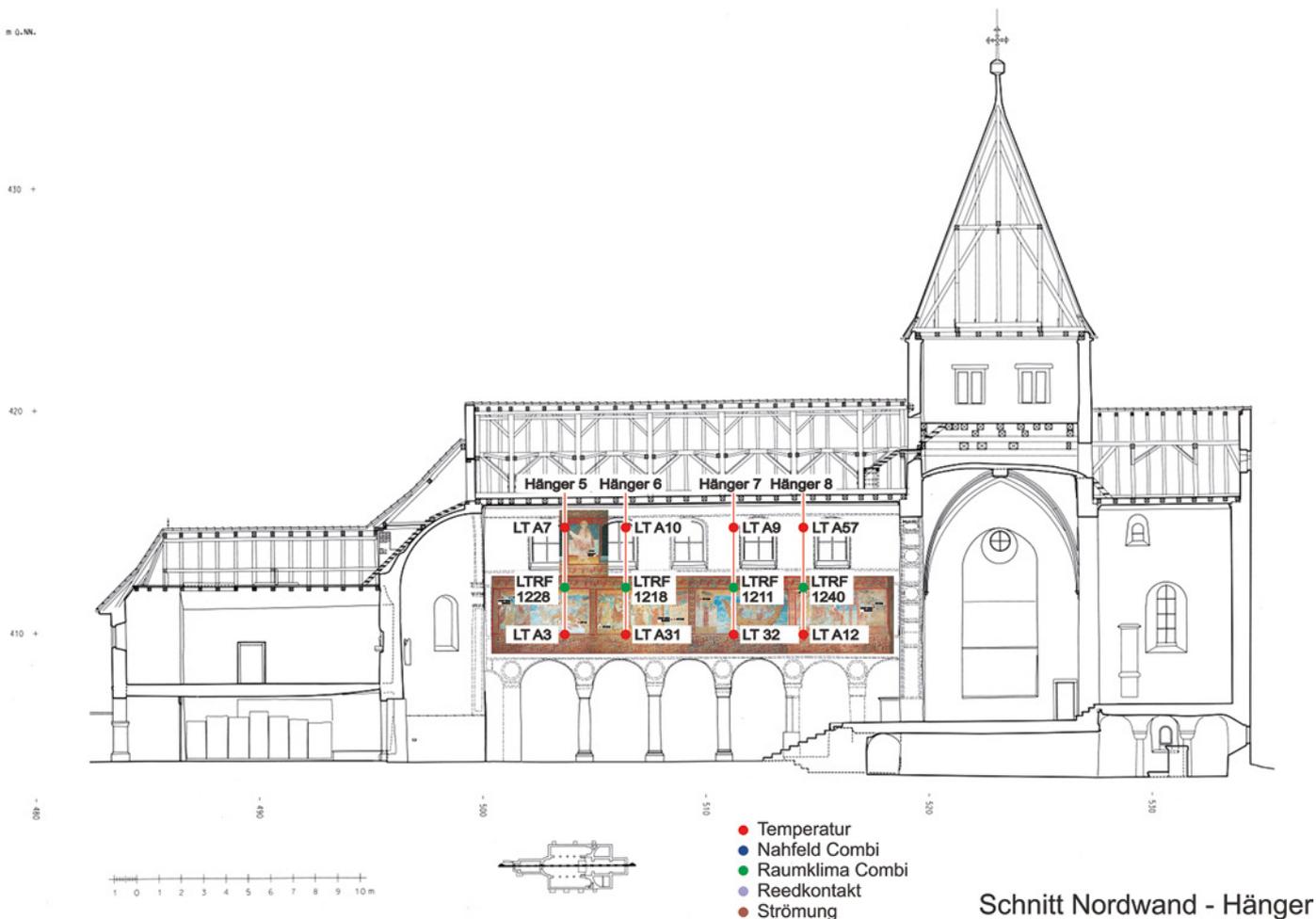
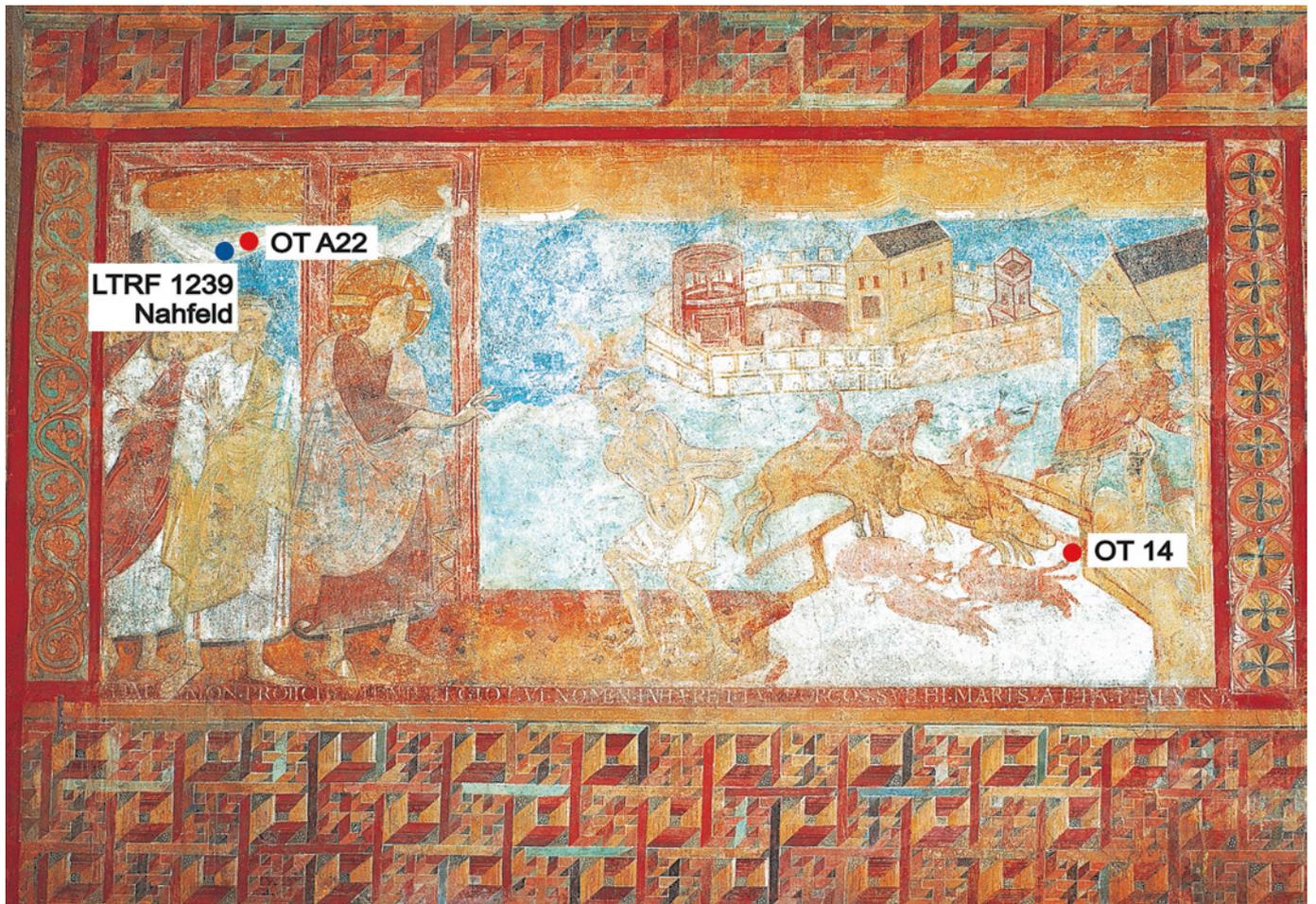


Abb. 1: Positionen der höhen-gestaffelten Raumklimasensoren und des Außenklimasensors (Turm) der TTI GmbH-MOCult am Beispiel der Nordwand, (Querschnitt LAD, Fachgebiet Baudokumentation 1997, Eintragung der Sensormesspunkte durch TTI GmbH-MOCult, Stuttgart).

soren verfügte, um Auskunft über das in verschiedenen Raumbereichen vorherrschende Raumklima zu geben. Neben den Raumluftverhältnissen in der Kirche wurden auch die Raumtemperatur und die relative Feuchte im Freien gemessen. Auf Basis dieser Messdaten konnte eine Auswertung zu den raumluftechnischen Problemen in der Kirche vorgenommen werden. Die Ergebnisse und deren Bewertung zeigten, dass lüftungstechnische Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas erforderlich sind, um eine weitere vom Raumklima abhängige Beanspruchung der Wandmalereien zu unterbinden. So wurde im Dezember 2005 eine kontrollierte Belüftung der Kirche umgesetzt, die über die elektrisch ansteuerbaren Kippfenster bei Bedarf durch das Öffnen oder Schließen der Fenster eine Querbelüftung des Kirchenraumes ermöglichen. Ziel der Querbelüftung ist es, durch den sich dann einstellenden Luftaustausch das Raumklima zu verbessern. In die zugehörige Regelentscheidung der bedarfsangepassten Raumbelüftung gehen neben den Klimaverhältnissen in der Kirche auch die im Freien vorherr-

schenden Witterungsverhältnisse ein. So wurden am Turm Sensoren angebracht, mit denen die Windgeschwindigkeit und Windrichtung gemessen werden kann, um über einen Vergleich des Raum- und Außenklimas hinaus die Entscheidung für oder gegen das Öffnen der Kippfensterflügel auch von den außen vorherrschenden Windverhältnissen abhängig machen zu können. Insgesamt lassen sich zehn Kippfenster in der Kirche mit elektrischen Kettenantrieben öffnen und schließen. Davon finden sich je vier Kippfenster im südlichen und nördlichen Seitenschiff. Des Weiteren ist je ein Fenster auf der Süd- und Nordseite im Chorraum mit einem elektrischen Antrieb der Kippflügel ausgestattet. Über die elektrische Aktivierung der Fenster hinaus konnte eine weitere Verbesserung der Raumklimaverhältnisse dadurch erreicht werden, dass die Tür der Vorhalle und die innere Tür am Übergang zum Mittelschiff mit einem automatischen Schließmechanismus versehen wurde (Garrecht/Jakobs/Reeb 2015).

Mit Unterstützung der Erzdiözese Freiburg, dem Erzbischöflichen Bauamt Konstanz, der Pfarr-



gemeinde und der politischen Gemeinde von Oberzell konnte im Mai 2011 ein neues Klimamesssystem in der Kirche St. Georg installiert werden. Dieses neue Messsystem verfügt über ein umfangreiches Messnetz, mit dem die Raumluftverhältnisse wie auch die Nahfeldbeanspruchungen der historischen Oberflächen in allen Raumbereichen der Kirche sowie in der Krypta und die Außentemperaturen und relative Luftfeuchten auf der Nord- und Südseite des Kirchturms erfasst und aufgezeichnet werden können (Abb. 1, 2). Dabei wurde die Sensoranordnung derart gewählt, dass nicht nur die Raumluftverhältnisse, sondern auch das Nahfeldklima wie auch die unmittelbare Oberflächentemperatur an den Wandmalereien gemessen werden. Neben dem engmaschigen Sensornetz im Umfeld der ottonischen Wandmalereien wurden ferner Reedkontakte, z. B. an der Eingangstür zum Kirchenschiff, positioniert, um Informationen zur Häufigkeit zu erhalten, mit der im Tages- und Jahresverlauf die Zugangsportale zur Vorhalle und zur Kirche durch Tou-

risten und Kirchenbesucher geöffnet werden (Jakobs 2014).

Im Jahr 2015 erfolgte die Installation zusätzlicher Sensoren, da im Rahmen des von der DBU geförderten Forschungsprojektes „Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg – UNESCO-Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau“ (02.2015–03.2017) neben einer eingehenden Bewertung der klimabedingten Beanspruchungen der ottonischen Wandmalereien auch zielführende Maßnahmen zur Raumluftverbesserung und damit zum Erhalt der Wandmalereien entwickelt, umgesetzt, erprobt und optimiert werden sollten. Neben einer Überarbeitung der Regelstrategie des Öffnens und Schließens der Kippfensterflügel sollten auch Möglichkeiten einer thermischen Raumkonditionierung untersucht werden, mit denen die Raumluftfeuchte im Nahfeld der Wandmalereien auf einem die Malerei nicht gefährdenden Niveau gehalten werden soll.

Abb. 2:
Positionen der Fühler
(Oberflächentemperatur
OT und Combi-Fühler im
Nahfeld LTRF) am Bei-
spiel der ersten Bildszen
der Nordwand, (Keller
jun., Reichenau, Eintra-
gungen der Sensormess-
punkte TTI GmbH-MO-
Cult, Stuttgart).

Bewertung der messtechnisch erfassten Klimadaten

Ergebnisse der klimatischen Analyse

Die Auswertung der im Zeitraum von September 2001 bis Dezember 2015 erfassten Messdaten verdeutlicht (Abb. 3), dass die relative Feuchte der Raumluft in der Kirche im Laufe der letzten 15 Jahre stetig angestiegen ist. Die Raumtemperatur hat hingegen im gleichen Zeitraum abgenommen. Somit hat sich seit dem Einbau der elektrisch ansteuerbaren Kippfenster anstelle einer Abnahme eine Zunahme der relativen Feuchte im Kirchenraum eingestellt. Dem Verlauf der Temperatur und der relativen Feuchte in Abbildung 3 lässt sich zudem entnehmen, dass extreme Witterungsverhältnisse, wie sie beispielsweise bei großen Hitzeperioden, so in 2003 und in 2015, aber auch während sehr kalter Wintertage, so im Februar 2012, vorgeherrscht haben, unmittelbar das Raumklima in der Kirche St. Georg beeinflussen.

Bei der Analyse und Bewertung der Messdaten wurde ein besonderes Augenmerk auf die Verhältnisse im unmittelbaren Nahfeld der Wandmalereien gelegt, schließlich gilt es raumluftverbessernde Maßnahmen zu identifizieren, mit denen das hier vorherrschende Mikroklima in einen tolerierbaren Bereich der relativen Feuchte und Temperatur geführt bzw. gehalten werden kann, um einer Gefährdung oder gar Schädigung der ottonischen Wandmalereien vorzubeugen. Folglich wurde das Nahfeldklima im unmittelbaren Umfeld der Wandmalerei eingehend auf potenzielle Gefährdungen oder gar das Auslösen von Schadensmechanismen hin untersucht. Eine weitere Aufgabe der Maßnahmenfindung besteht darin, die sich stark ändernden Verhältnisse der relativen Feuchte zu vermeiden. Schließlich kann sich abhängig des Sorptionsverhaltens an der oberflächennahen Materialschicht eine hygrische Formänderung einstellen, die infolge der mit den wechselnden Klimaverhältnissen und den damit einhergehenden Verformungsbestrebungen zu einer allmählichen Materialermüdung und damit zu einer Schädigung führen (Garrecht 2005).

Wie aus Abbildung 4 ersichtlich ist, unterscheiden sich die relativen Feuchten der Raumluft im Nahfeld der Wandmalereien je nach Lage in der Wandfläche und Seite (Nord- oder Südseite) der Kirche (Abb. 4). So kann an der Grenzschicht zur Maleroberfläche die relative Luftfeuchte im

Jahresmittel bis zu 5 Prozentpunkte von den gegenüberliegenden Malereien abweichen. Ursächlich hierfür kann die Wirkung der Heizung, der Einfluss der Besucher aber auch der Eintritt von solarer Strahlung über die auf der Südseite gelegenen Fenster im Obergaden sein.

Ein wesentlicher Grund für die unterschiedlichen relativen Feuchten an den gegenüberliegenden Wandmalereien ist der bereits angeführte Solarenergieeintrag über die Südfenster, wie er an sonnigen Tagen insbesondere während der Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonate zu verzeichnen ist. Treten an sonnenreichen Tagen die Sonnenstrahlen über die Südfenster im Obergaden in die Kirche ein, erfahren auf der gegenüberliegenden Nordwand die dann besonnten Malereibereiche eine deutliche Erwärmung. Zwangsläufig führt dies zu einer starken Veränderung des Nahfeldklimas, da mit der Erwärmung an der Wandoberfläche eine Abnahme der relativen Feuchte im Nahfeld der Wand einhergeht. Umgekehrt steigt die relative Feuchte an den südlichen Maleroberflächen an, da die Wandoberfläche hier nicht direkt von der Sonneneinstrahlung beschienen wird und die raumseitige Oberfläche der Südwand kalt bleibt. Allerdings ist zu berücksichtigen, dass die Südwand außenseitig von der Sonne beschienen wird und sich somit die äußere Wandoberfläche erwärmt. Die Wärmeaufnahme führt zu einer instationären Wärmebewegung von der äußeren Wandoberfläche ins Mauerwerksinnere zur Raumseite hin. An sonnenreichen Tagen kann somit während der Herbst-, Winter- und Frühjahrsmonate zum späteren Nachmittag oder Abend hin eine leichte Temperaturerhöhung an der raumseitigen Wandoberfläche beobachtet werden.

An der Nordwand führt die Besonnung der Wandmalereien während der Wintermonate zu einer erheblichen Anhebung der Oberflächentemperatur, wie diese mit dem 2011 installierten Messsystem immer wieder festgestellt werden konnte. So zeigte die Auswertung für den Betrachtungszeitraum von Mai 2011 bis Dezember 2015 Spitzenwerte, die infolge der Besonnung im Zeitraum von 11 Uhr bis 16 Uhr im Mittel zu einer Erwärmung um etwa 8–12 Kelvin an den Malereien „Heilung des Besessenen von Gerasa“, „Heilung des Wassersüchtigen“, „Beruhigung des Sturms auf dem See Genezareth“ und „Heilung des Blindgeborenen“ führte. Die deutliche Erwärmung hat zur Folge, dass sich an der Maleroberfläche in verstärktem Maße Sorptionspro-

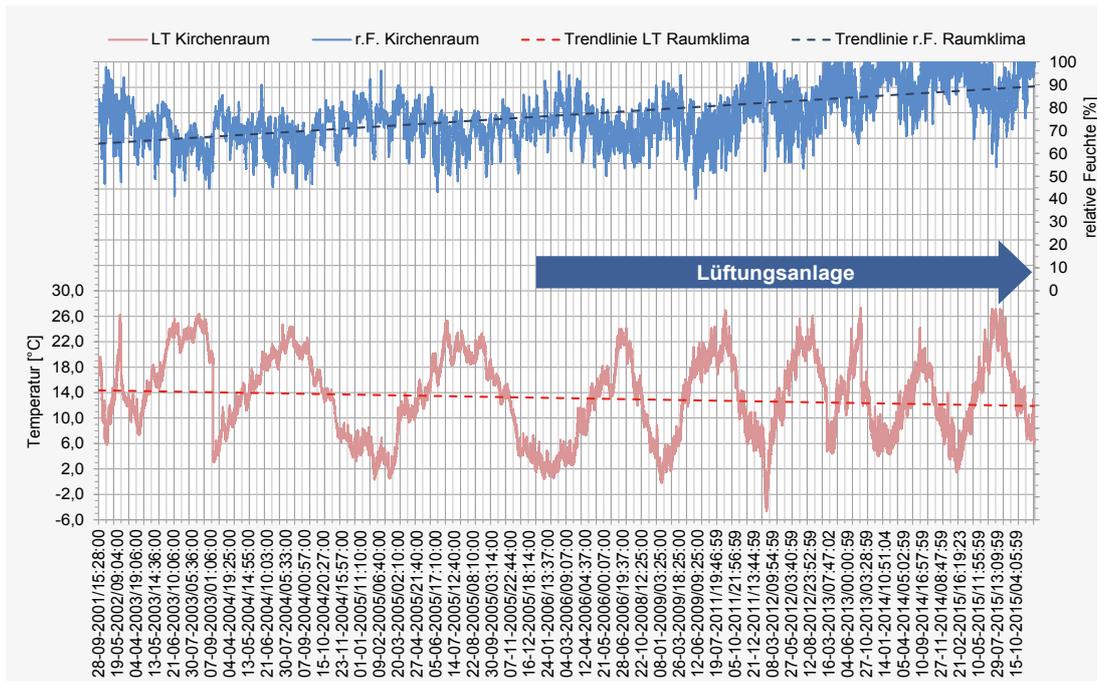


Abb. 3: Exemplarisches Beispiel des tages- und jahreszeitlichen Verlaufs des Raumklimas in der Kirche im Zeitraum von September 2001 bis Dezember 2015 (Neycheva, Stuttgart).

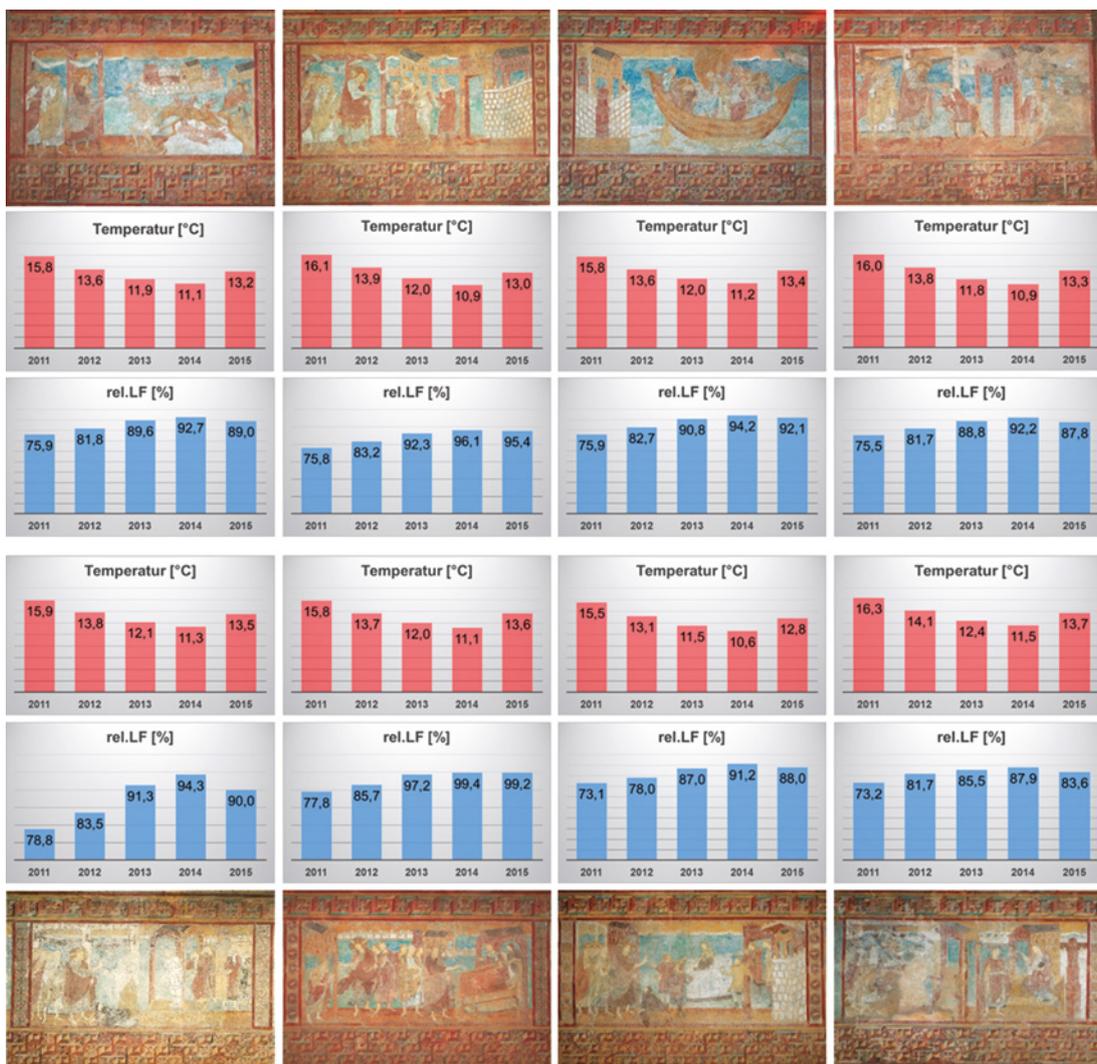


Abb. 4: Vereinfachte Darstellung der vorliegenden Klimate (Temperatur und Feuchtigkeit) im Nahfeld der Wandmalereien im Jahrgang (Neycheva, Stuttgart / Wandmalereien: Keller jun., Reichenau).

zesse einstellen, die eine rasche Trocknung der oberflächennahen Malschichten bewirken. Mit der Feuchtezustandsänderung in der Randzone kommt es dabei zu starken Formänderungsbestrebungen, aufgrund dessen es zu einer mehr oder weniger hohen Beanspruchung des Verbunds von Malerei und Malgrund abhängig der Zwangsbeanspruchung kommt. Im ungünstigen Fall geht dies mit Spannungszuständen einher, bei denen die Zugfestigkeit der Malschicht überschritten wird und es zur Rissbildung oder zur Ablösung der Malschicht vom Malgrund kommt. In den Untersuchungen der Masterarbeit musste auch der Frage nachgegangen werden, welche der Wandflächenbereiche besonders von Tauwasserproblemen betroffen sind. Hierzu konnte die Auswertung keine klare Systematik liefern. Einzig die westlich gelegenen Bereiche nahe des Kircheneingangs wie auch die östlich gelegenen Bereiche nahe des Chores machen deutlich, dass hier abhängig der Lage und Jahreszeit mit einer möglichen Tauwassergefahr der ottonischen Wandmalereien zu rechnen ist. Doch konnte erwartungsgemäß festgestellt werden, dass insbesondere im Anschluss an kältere Witterungsperioden mit dem Eintreten von feuchtwarmen Luftmassen während einer nachfolgend milderen Witterungsperiode eine erhöhte Tauwassergefahr gegeben sein kann, wie dies aus Abbildung 5 entnommen werden kann (Abb. 5). Mit Blick auf die Schimmelpilzproblematik wurde im Rahmen der Masterarbeit versucht, einen

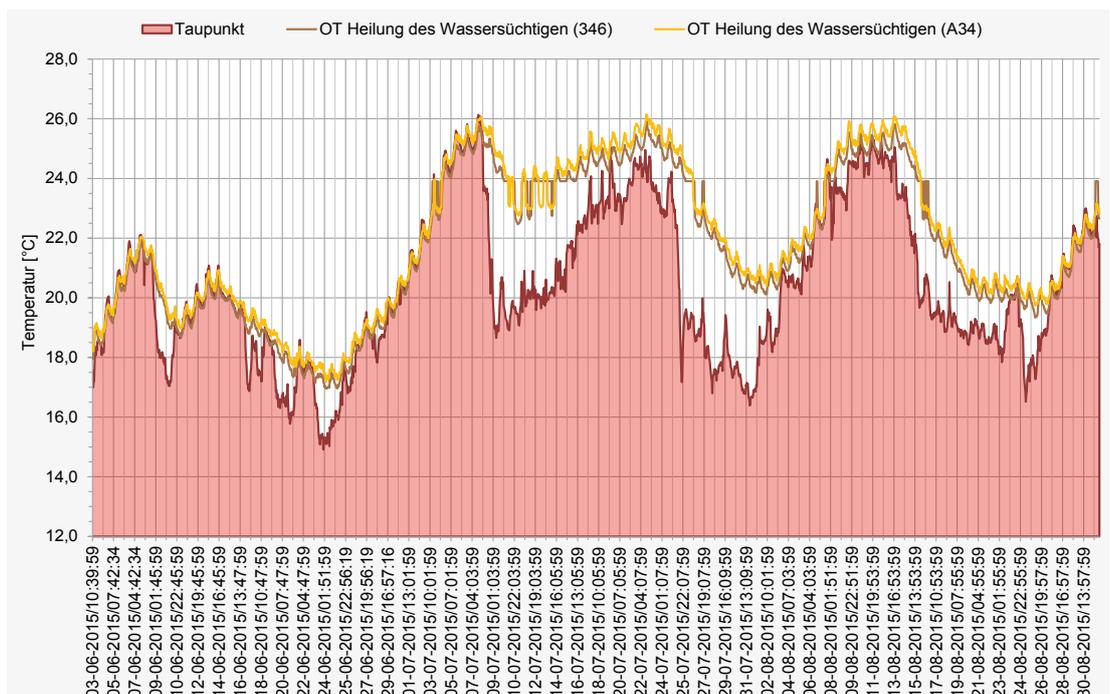
Zusammenhang zwischen den mikrobiologischen Untersuchungen in der Kirche St. Georg und den gemessenen Raumklimaverhältnissen im Umfeld der beprobten Oberflächen herzustellen. So wurden in den Jahren 2009 bis 2015 folgende Schimmelpilzarten im Mittelschiff in Höhe der Wandmalereien nachgewiesen (vgl. Beitrag Scheerer):

- Aspergillus fumigatus
- Aspergillus versicolor
- Cladosporium sphaerospermum
- Penicillium expansum
- u. a.

In nachfolgender Abbildung 6 sind die klimatischen Randbedingungen aufgezeigt, bei denen Sporen der in der Kirche St. Georg identifizierten Schimmelpilze auskeimen können oder sich gar ein Myzelwachstum einstellen kann (WTA 2007). Die im Nahfeld der Wandmalereien gemessenen Nahfeldklimate bieten folglich eine gute Basis für ein Schimmelpilzwachstum (Abb. 6).

Ein besonderes Problem stellt der Einfluss der Besucher auf das Nahfeldklima der Wandmalereien dar. Seit die Bodenseinsel Reichenau in die Liste der UNESCO-Weltkulturerbestätten im Jahr 2000 aufgenommen wurde, besuchen zunehmend mehr Touristen die Kirche St. Georg. Das mit der hohen Besucherzahl einhergehende stete Öffnen der Mittelschiffeingangstür bedingte, dass trotz der im Sommer 2003 eingebauten

Abb. 5:
Exemplarisches Beispiel der Gefahr für Tauwasserbildung/Tauwasseranfall am Bild „Heilung des Wassersüchtigen“ im Sommer 2015 (Neycheva, Stuttgart).



Klimaschleuse insbesondere während ungünstiger Witterungsverhältnisse, wie diese gerade während niederschlagsreichen Schlechtwetterperioden vorherrschen, durch die Besucher erhebliche Mengen an Feuchte in die Kirche eingetragen werden. Dies führt zwangsläufig zu einer erhöhten Feuchtebeanspruchung der ottonischen Wandmalereien. Um dies zu unterbinden, wird seit 2013 die Kirche in den Monaten Mai bis September für den Individualtourismus geschlossen. Seither finden täglich zwei öffentliche 45-minütige Führungen um 12:30 Uhr und um 16:00 Uhr sowie zu weiteren vereinbarten Zeiten Gruppenführungen in St. Georg statt. Des

Weiteren wird die Kirche auch durch kirchliche Veranstaltungen (Hochzeiten u. a.) genutzt. Ziel der Masterarbeit war es folglich auch, den Einfluss bzw. die Auswirkungen der Besucherlenkung auf die Nahfeldsituation der Wandmalereien zu analysieren. Daher wurden zunächst die im Messzeitraum von Mai 2011 bis September 2015 gemessenen Klimadaten auf all jene Zeitspannen hin untersucht, in denen die Fenster geschlossen waren, um den Einfluss der Besucher möglichst ohne direkten Einfluss der Außenwitterung herausarbeiten zu können. So zeigt Abbildung 7, dass die relative Feuchte im Nahfeld der Wandmalereien ohne Besucher-

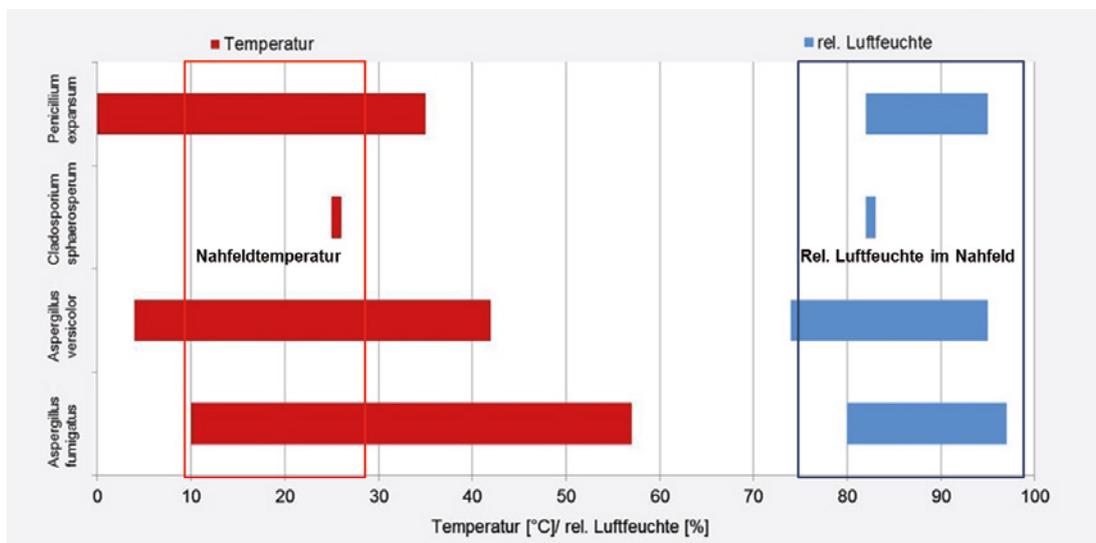


Abb. 6: Wachstumsvoraussetzungen der Schimmelpilze hinsichtlich Temperatur und relativer Feuchte (Neycheva, Stuttgart).

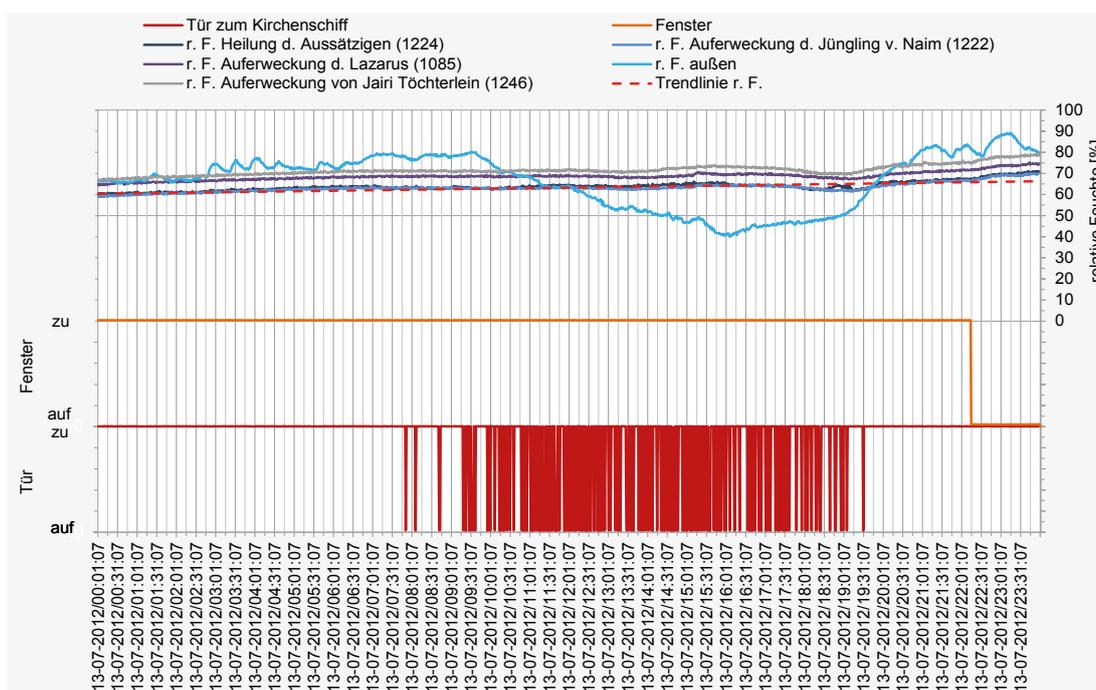


Abb. 7: Verlauf der Klimaverhältnisse im Nahfeld der Wandmalereien auf der Südwand so-wie der Öffnungszustände für Tür bzw. Fenster (ohne Besucherlenkung) (Neycheva, Stuttgart).

lenkung bei geschlossenen Fenstern langsam ansteigt, obwohl die relative Luftfeuchte außen sinkt (Abb. 7). Die detaillierte Auswertung der Masterarbeit konnte zeigen, dass mit dem Individualtourismus hohe Feuchtemengen in die Kirche eingetragen werden. Vergleicht man in Abbildung 8 den Verlauf der relativen Feuchte bei Durchführung der Besucherlenkung (Abb. 8), zeigt sich, dass die relative Feuchte im Nahfeld der Wandmalereien analog zur relativen Außenluftfeuchte verläuft.

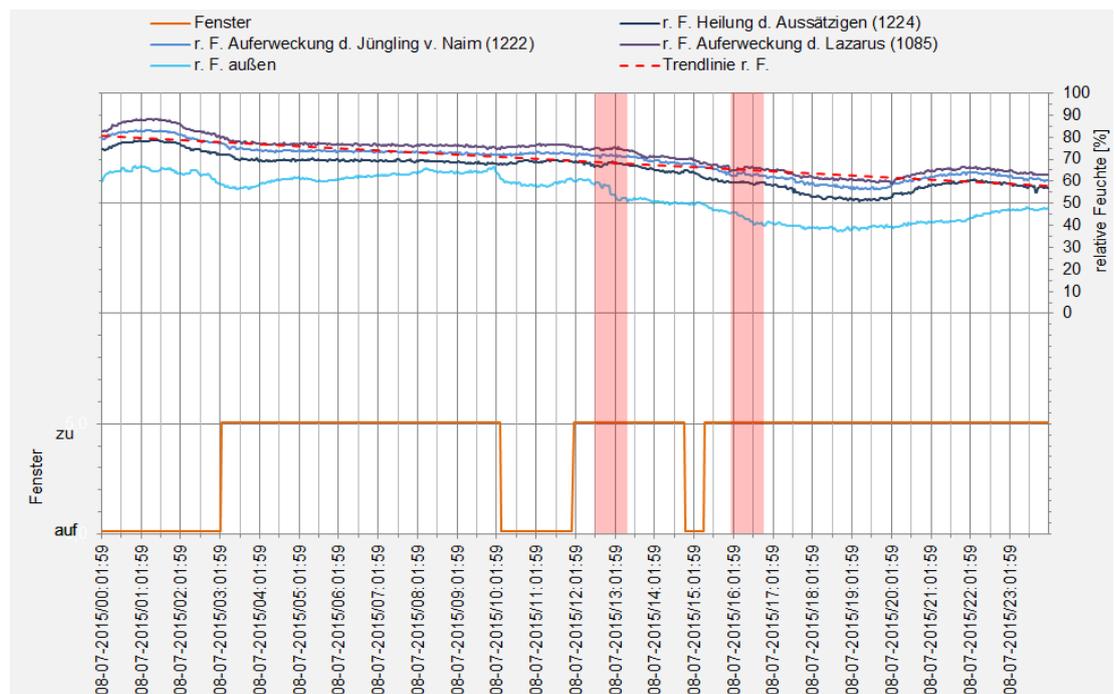
Zusammenfassung der Ergebnisse zur Analyse der Klimadaten

Im Rahmen des vorliegenden Beitrags konnte nur ein kleiner Auszug der in der Masterarbeit vorgenommenen Auswertungen und der hierbei erzielten Erkenntnisse wiedergegeben werden. Grundsätzlich lässt die Auswertung der Klimadaten der Kirche St. Georg folgende Schlüsse zu:

- Das Raumklima steht in direktem Zusammenhang mit dem Außenklima. Die relative Luftfeuchte im Kirchenraum und im Nahfeld der Raumfassungen ist stark an die Außenluftfeuchte gekoppelt.
- Neben dem Außenklima wird das Nahfeldklima von den instationären Wärme- und Feuchteverhältnissen des malereitragenden Mauerwerks beeinflusst.

- Kurzfristige tägliche Schwankungen der Nahfeldklimaverhältnisse, die zu größeren Veränderungen der relativen Feuchte und Temperatur führen, treten vornehmlich während der kälteren Witterungsperioden an der Nordwand auf. Dies steht in direktem Zusammenhang mit dem flachen Sonnenstand in der Mittagszeit, sodass ein direkter Solareintrag über die Fenster des Obergaden erfolgen kann und die in den Raum eintretende Solarstrahlung Teile der Wandmalereien auf den Nordwandflächen besonnt und hier zu einer großen Veränderung des Nahfeldklimas führt.
- Die hohe relative Luftfeuchte im Kirchenraum und im Nahfeld der Malereien (über 80 % bzw. über 90 % r. F.) in Kombination mit günstigen Temperaturbedingungen in den warmen Sommermonaten stellt eine Gefährdung für die Wandmalereien durch Schimmelpilzwachstum dar.
- Die Gefahr eines Tauwasserausfalls auf den Wandmalereien ist erwartungsgemäß während der Übergangsmomente am stärksten und tritt insbesondere im Anschluss an kalte Witterungsperioden auf
- Während der kirchlichen Nutzung kann abhängig der Witterungsbedingungen ein mehr oder weniger deutlicher Anstieg der relativen Luftfeuchte im Nahfeld der Wandmalereien durch die internen Feuchtequellen (Kirchenbesucher) beobachtet werden.

Abb. 8:
Verlauf der Klimaverhältnisse im Nahfeld der Wandmalereien auf der Südwand sowie die Öffnungszustände des Fensters (mit Besucherlenkung)(Neycheva, Stuttgart).



– Eine Bewertung der Auswirkungen der kontrollierten Besucherführungen in der Kirche St. Georg auf das Raumklima ist nur bedingt möglich, da nahezu im gesamten Betrachtungszeitraum, in dem eine Besucherlenkung vorgenommen wurde, die elektrisch ansteuerbaren Kippfenster in den Seitenschiffen offen geblieben sind und damit die Besucherlenkung nicht vom Einfluss der Querbelüftung der Kirche abgegrenzt werden kann. Es lässt sich aber grundsätzlich eine deutliche Stabilisierung der Raumklimaverhältnisse seit Einführung der Besucherlenkung in der Kirche St. Georg feststellen. Mit einer Umsetzung der im DBU-Vorhaben erarbeiteten Maßnahmen zur Raumluftverbesserung in der Kirche mittels einer Wärmezufuhr (vgl. Beitrag Garrecht), lässt erwarten, dass für eine merkliche Verbesserung des Raumklimas die Besucherlenkung Voraussetzung ist.

Bewertungstool

Schadensprozesse können an der Wandmalereien durch ungünstige klimatische Verhältnisse ausgelöst und vorangetrieben werden (Reichwald 2005). In der Masterarbeit wurde daher ein objektspezifisches Bewertungstool entwickelt, mit dem ein schneller Überblick bzw. eine möglichst einfache Bewertung der acht ottonischen Wandmalereien anhand der gemessenen Daten vorgenommen werden kann. Dabei sollte die Analyse und Bewertung der Daten auf Basis der potenziellen Gefährdung der Wandmalereien vorgenommen werden. Die relevanten Beanspruchungen der Wandmalereien sind dabei die Besiedelung und das Wachsen von Mikroorganismen, die steten Salzphasenzustandsänderungen, die möglichen Tauwasserausfälle und die thermisch bedingten und/oder sorptionsbedingten Formänderungsbestrebungen. All diese Beanspruchungen, die maßgeblich von den raumklimatischen Verhältnissen in der Kirche bestimmt werden, führen zur Schädigung an der Maleroberfläche.

Entsprechend wurden in der Masterarbeit die in den zurückliegenden Jahren gemessenen Extremwerte und Schwankungen untersucht und eine Auswertetool entwickelt, mit dem über einen frei wählbaren Messzeitraum hinweg die vorhandenen Messdaten schadensbezogen analysiert werden können (Abb. 9). Zum besseren Verständnis werden die Ergebnisse im Bewer-

tungstool in Form von Histogrammen dargestellt. Die Grafiken wie auch statistisch aufbereiteten Daten können vom Softwarenutzer exportiert und analysiert werden.

Mit dem Button „Info“ in der unteren linken Ecke des Bewertungstools wird die Tabelle 1 aufgerufen und der Benutzer bekommt einen schnellen Überblick über die Bereiche des Nahfeldklimas, in dem die Wandmalereien gewissen Gefahren unterworfen sind. Eine Anpassung und Erweiterung des Bewertungsprogramms auf weitere Problemstellungen kann mit einfachen Mitteln vorgenommen werden.

Ausblick und Empfehlungen

Durch die Obergadenfenster auf der Mittelschiffsüdwand werden, wie zuvor ausgeführt, die Wandmaleroberflächen auf der Nordseite durch die Besonnung der über die Südfenster des Obergadens einfallenden Sonnenstrahlen in den Wintermonaten immer wieder stark erwärmt. Demzufolge sinkt dort für den Zeitraum der Besonnung auch die relative Feuchte infolge von Trocknungsprozessen im Nahfeld der wertvollen Malfassungen ab. Die Erwärmung und Feuchteabgabe in der Malschicht führt zu thermischen und hygrischen Formänderungsbestrebungen, die hohe Spannungszustände an der Malerei zur Folge haben, die beim Überschreiten der Zugfestigkeit der Malerei eine Rissbildung oder gar Ablösung der Malschicht vom Malgrund bewirken kann. Folglich sollte überprüft werden, ob der solare Strahlungseintrag über die Fenster im Obergaden der Südwand mittels Sonnenschutzfolien unterbunden oder zumindest vermindert werden kann.

Abb. 9: Graphische Benutzeroberfläche des objektspezifischen Bewertungstools (Neycheva, Stuttgart).

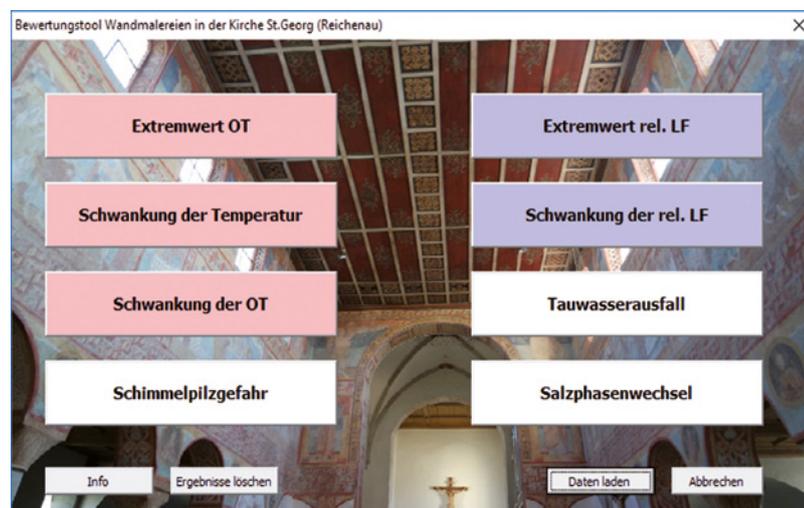


Tabelle 1: Exemplarische Festlegung der für eine Gefährdung potenziellen Klimarandbedingungen des Berechnungstools.

Bewertungstool		
Ereignis	Klimabereich	Gefahr
Extrem hohe relative Feuchte	90 % r. F. im Nahfeld	Quellvorgänge im Deckmörtel
Extrem niedrige Oberflächen-temperatur (Winterfall)	< 4 °C	Frost-/Eisbildung
Schwankung der RF im Nahfeld	± 2,5 % r. F. bzw. ± 5 % r. F.	Hygrische Dehnungen
Schwankung der LT im Nahfeld	± 1 K bzw. ± 1,5 K	Thermische Spannungen
Schwankung der OT	± 1 K bzw. ± 1,5 K	Thermische Spannungen
Salzphasenwechsel	Natriumsulfat (Na ₂ SO ₄)	Materialermüdung (mechanische Auflockerung)
Tauwasserausfall	Taupunkttemperatur > OT	Lösung der Malschichten
Biogener Befall	r. F. über 80 %; OT zw. 25–30 °C	Materialzerfall

Mit Blick auf die Erfordernisse einer kontrollierten und bedarfsangepassten Belüftung der Kirche sollte über die elektrisch ansteuerbaren Kippfenster im südlichen und nördlichen Seitenschiff wie auf der Süd- und Nordwand des Chores ergänzend eine gleichermaßen kontrollierte und bedarfsangepasste Wärmezufuhr vorgesehen werden, um die hohen Feuchtelasten im Nahfeld der Wandmalereien zu reduzieren.

Damit könnte ein nachhaltiger Beitrag zum Erhalt der ottonischen Wandmalereien in St. Georg geleistet werden.

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht für die Ermöglichung und bei Frau Simone Reeb für die Betreuung der Masterarbeit.

Literatur

- Henes-Klaiber, Ulrike, Auswertung und Bewertung der Klimamessungen von 1992–2007, Bericht von 09.03.2010, MS Archiv LAD.
- Jakobs, Dörthe: Sankt Georg in Reichenau-Oberzell. Der Bau und seine Ausstattung (Forschungen und Berichte der Bau- und Kunstdenkmalspflege in Baden-Württemberg 9), Stuttgart 1999, 3 Bde.
- Jakobs, Dörthe: „Hurra, wir haben ein neues UNESCO-Welterbe!“ Nachhaltiger Kulturtourismus am Beispiel von St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg 3, 2014, S. 155–161.
- Garrecht, Harald / Jakobs, Dörthe / Reeb, Simone: DBU-Forschungsprojekt – Raumklimastabilität zum Erhalt der Wandmalereien in der Kirche St. Georg auf der Klosterinsel Reichenau. In: Bausubstanz. Zeitschrift für nachhaltiges Bauen, Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege 6 (2015) Nr.3, 2015, S. 46–52.
- Garrecht, Harald: Hygrothermische Wechselwirkung von Naturstein und Mörtelfuge. Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 156, 2005, Heft 1, Stuttgart 2005, S. 221–229.
- Reichwald, Helmut F.: Klimabedingte Schäden an Raum und Ausstattung. Fallbeispiele aus Baden-Württemberg. In: Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XLII), S. 49–60.
- WTA (2007). WTA-Merkblatt 6-3-05/D. Rechnerische Prognose des Schimmelpilzwachstumsrisikos, WTA, 2007.

Thermisch-hygrisches Verhalten der Wandmalereien unter realen Klimalasten

Harald Garrecht, Simone Reeb, Christian Renner, Dana Ullmann

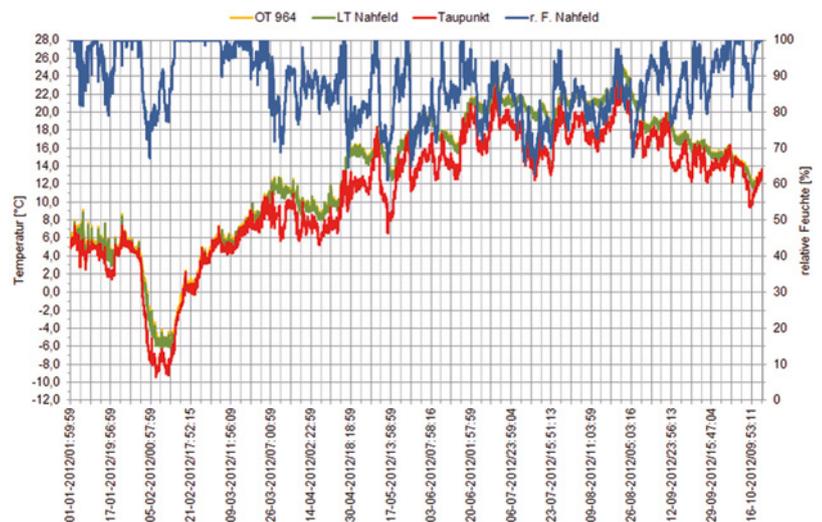
Einleitung

In der Kirche St. Georg durchgeführte Klimamessungen belegen, dass insbesondere während der kalten Witterungsperioden sehr hohe relative Luftfeuchten im Nahfeld der in Kalktechnik mit Bindemitteln versetzten Malereien vorherrschen. Dagegen ist während der wärmeren Jahreszeiten ein etwas geringeres Niveau der im Nahfeld der Wandmalereien sich ausbildenden relativen Luftfeuchten zu verzeichnen. Über den gesamten Jahresverlauf hinweg betrachtet herrscht an den malereitragenden Wandoberflächen eine vergleichsweise hohe Nahfeldfeuchte vor. Zu berücksichtigen ist dabei, dass die Kirche St. Georg unbeheizt ist und die vorhandene Bankheizung lediglich in den kälteren Witterungsperioden kurz vor und während der Gottesdienste zur Erzielung eines behaglicheren Aufenthalts betrieben wird.

Bislang durchgeführte Untersuchungen verdeutlichen, dass das Raumklima in der Kirche stark von den äußeren Witterungsverhältnissen beeinflusst wird. So werden die Klimaverhältnisse in der Kirche im Seeklima bestimmt. Abbildung 1 zeigt die im Obergaden der Nordwand des Kirchenschiffs an den Wandmalereien gemessenen Nahfeldverhältnisse für den Messzeitraum von Januar bis Oktober 2012. Deutlich ist zu erkennen, dass die relative Luftfeuchte im Nahfeld der Malerei bis auf wenige kurze Zeiträume im Jahresverlauf oberhalb von 70 % r. F. liegt. Die statistische Auswertung der Messdaten macht zudem deutlich, dass sich während der kühleren bis kalten Jahreszeiten im Nahfeld der Wandmalereien relative Luftfeuchten einstellen, die zwischen 90 % und 100 % r. F. liegen. Demgegenüber sinkt das Niveau der Nahfeldfeuchte während der wärmeren Jahreszeiten auf 75 % bis 85 % r. F. ab.

Die Messdaten im Diagramm offenbaren aber auch, dass die relative Luftfeuchte im Nahfeld der Wandmalerei erheblichen Schwankungen unterworfen ist. Die Differenz zwischen minimalem und maximalem Wert der relativen Luftfeuchte beträgt während der Frühlings- und Sommermonate 40 % r. F. Hingegen verringert sich die Spannweite zwischen größtem und kleinstem Wert in den Herbst- und Wintermonaten deutlich. Damit stellen sich die größten Klimaveränderungen während der Frühjahrs- und Sommermonate ein. Zurückführen lässt sich dies auf die in diesen Jahreszeiten stark veränderlichen Witterungsverhältnisse. Zudem ist in diesen Jahreszeiten die Insel stark vom Tourismus frequentiert, der auch in der Kirche St. Georg zu einem deutlichen Anstieg der Besucherzahlen führt. Mit dem größeren Besucherankommen einher geht das häufigere Öffnen der Türen zur Vorhalle und zur Kirche. Entsprechend kann im Frühjahr und Sommer in größerem Umfang Außenluft in die Kirche einströmen.

Abb. 1: Nahfeldklima an der Wandmalerei im Obergaden der Nordwand der Kirche St. Georg für den Zeitraum von Januar bis Oktober 2012 (IWB Universität Stuttgart).



Grundsätzlich lässt sich feststellen, dass im Nahfeld der Wandmalereien eine vergleichsweise hohe relative Luftfeuchte vorherrscht. Auch ist die Spannweite zwischen den minimalen und maximalen Messwerten nicht nur im Tagesverlauf, sondern auch innerhalb einer Witterungsperiode oder gar über eine saisonale Betrachtung hinweg groß. Darum erscheint es unerlässlich, neben den Fragen zur Tauwasserproblematik und zur Gefährdung der ottonischen Wandmalereien durch Schimmelpilzwachstum auch zu prüfen, welchen Einfluss die hohen und starken Schwankungen der relativen Luftfeuchte im Nahfeld der Wandoberfläche auf die Wandmalerei und auf den Malgrund ausübt. Schließlich geht mit einer Veränderung der Nahfeldfeuchte eine sorptionsbedingte Zu- oder Abnahme der Materialfeuchte einher. Eine Änderung der Materialfeuchte löst zwangsläufig ein Formänderungsbestreben der betroffenen Materialschichten aus.

Werden diese Verformungsbestrebungen behindert, kommt es abhängig der Änderung der Materialfeuchte unweigerlich zu einer mehr oder weniger starken Beanspruchung der oberflächennahen Materialschicht. Zugbeanspruchungen werden im Falle von Feuchteabnahmen ausgelöst, die beim Überschreiten der Materialzugfestigkeit eine Schädigung oder gar eine Ablösung der Malschicht zur Folge haben können. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es folglich, die komplexen Wechselwirkungen zwischen dem stets veränderlichen und insgesamt auf hohem Niveau befindlichen Nahfeldklima und der Wandmalerei zu analysieren. Mit den hierbei gewonnenen Erkenntnissen soll ermöglicht werden, das vom Nahfeldklima ausgehende Gefährdungspotenzial der ottonischen Wandmalereien abzuschätzen. Letztendlich bedarf es der zuverlässigen Einschätzung der Gefährdung von Wandmalereien, sollen wirksame präventive Maßnahmen zum Erhalt der einzigartigen Wandmalereien herausgearbeitet werden.

Sorptionsverhalten von Secco-Malerei

Poröse Materialien, so auch Wandmalereien in Secco-Technik, streben einen Gleichgewichtszustand mit den im Umfeld vorherrschenden Raumluftzuständen an. Ändern sich die Temperaturverhältnisse im Nahfeld der Oberfläche,

kommt es zu einer Erwärmung oder Abkühlung der oberflächennahen Materialschichten. Die Temperaturänderung dauert dabei solange an, bis sich durch die Wärmeaufnahme bzw. die Wärmeabgabe wieder ein erneutes Temperaturgleichgewicht im Bauteilinnern einstellt.

Auch bei einer Änderung der relativen Feuchte kommt es im Nahfeld der malereitragenden Wandoberfläche zu einer Störung des Materialfeuchtegleichgewichts. Eine Erhöhung der relativen Feuchte führt zu einer Feuchteaufnahme in den oberflächennahen Materialschichten. Demgegenüber führt eine Abnahme der relativen Feuchte zu einer Feuchteabgabe, also Trocknung. Die Feuchtezustandsänderung in der Randzone ist die Folge eines Ausgleichsbestrebens, indem abhängig der im Nahfeld vorherrschenden Wasserdampfpartialdruckverhältnisse ein Wassermolekültransport stattfindet, der im Falle einer Zunahme der relativen Feuchte zu einer Aufnahme von Wassermolekülen in die Randzone der Malschicht bewirkt. Die Abnahme der relativen Luftfeuchte führt demgegenüber zur Abgabe und Freisetzung von Wassermolekülen aus der Randschicht an die Umgebung (Garrecht 1992).

Poröse mineralische Materialien, wie sie in der Wandoberfläche von St. Georg gegeben sind, streben einen Gleichgewichtszustand mit den Feuchteverhältnissen der Umgebungsluft an. Je nach Höhe der relativen Luftfeuchte werden dabei mehr oder weniger Wassermoleküle aus der Umgebungsatmosphäre in das poröse Materialgefüge eindiffundieren und hier an den inneren Porenwandoberflächen sorptiv gebunden. Die Anlagerung der Moleküle erfolgt in Form einer mono- bzw. multimolekularen Belegung der Porenwandoberfläche durch Van der Waals'sche Bindungen (De Boer 1968). Bei Luftfeuchten oberhalb 70 % r. F. kann insbesondere bei einem feinporösen Materialgefüge eine deutliche Zunahme des Feuchtegehalts beobachtet werden. Hier führt die sich in feinen Porenräumen einstellende Erniedrigung des Sättigungsdampfdruckes zur sogenannten Kapillarkondensation und damit zu einer deutlich stärkeren Feuchteaufnahme (Garrecht 1992). Nimmt das poröse Material Wassermoleküle auf, bezeichnet man den Vorgang als Adsorption. Die Abgabe von Wassermolekülen an die Umgebungsatmosphäre wird hingegen als Desorption bezeichnet. Bei ansonsten unveränderten Bedingungen nimmt mit sinkender Temperatur die sorptiv angelagerte Wassermolekülmenge zu und ent-

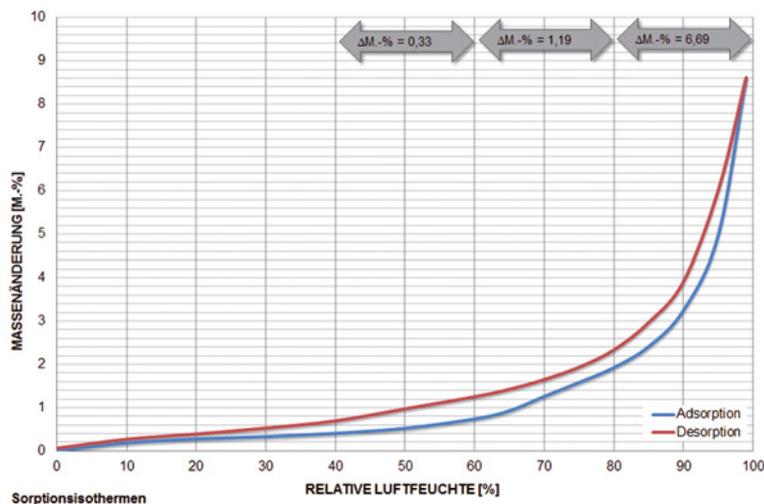
sprechend mit steigender Temperatur ab. Der Temperatureinfluss wurde von Krischer und Kast (1978) eingehend analysiert.

Der Zusammenhang zwischen Luft- und Materialfeuchte wird durch die Sorptionsisotherme charakterisiert. Dabei kann zwischen den Isothermen der Ad- und der Desorption ein Hystereseeffekt verzeichnet werden. Zudem führen die Temperaturerhöhung zu einer Abnahme und die Temperatursenkung zu einer Zunahme der Sorptionsfeuchte.

In Abbildung 2 ist beispielhaft der Verlauf der Sorptionsisothermen für die Ad- und Desorption einer Malschicht der Kirche in St. Georg dargestellt. So zeigt der Verlauf der Sorptionsisothermen, dass sich bei höherer Umgebungsfeuchte mehr Feuchte im untersuchten Probenmaterial anlagert als bei niedrigen Feuchten. Entsprechend kommt der Kapillarkondensation eine besondere Bedeutung zu.

Grundsätzlich lässt sich die in Abbildung 2 aufgezeigte Sorptionsisotherme in vier relevante Materialfeuchtebereiche bei Umgebungsfeuchten zwischen 20 % r. F. und 100 % r. F. einteilen:

- 20 % r. F.-40 % r. F. Bereich einer sehr geringen Materialfeuchte, infolge einer Anlagerung von Wassermolekülen auf der inneren Porenwandoberfläche durch eine monomolekulare Belegung (0,13 M.-%)
- 40 % r. F.-60 % r. F. Bereich einer geringen Materialfeuchte, infolge einer Anlagerung von Wassermolekülen auf der inneren Porenwandoberfläche durch eine ein bis zwei Molekülschichten dicke Belegung (0,33 M.-%)
- 60 % r. F.-80 % r. F. Bereich einer mittleren Materialfeuchte, infolge einer Anlagerung von Wassermolekülen in zwei bis drei Molekülschichten dicker Belegung (1,19 M.-%)
- 80 % r. F.-99 % r. F. Bereich einer hohen Materialfeuchte, infolge einer Kapillarkondensation in sehr feinen Porenräumen (6,69 M.-%).



Eine Betrachtung der in Abbildung 1 aufgezeigten Nahfeldklimaverhältnisse verdeutlicht, dass die sich in der Kirche St. Georg im Nahfeld der Wandmalereien einstellenden Klimaverhältnisse während der kälteren Witterungsperioden deutlich höhere Materialfeuchtegehalte zur Folge haben als in den wärmeren Jahreszeiten. So nimmt die Materialfeuchte in den Wintermonaten vielfach einen Materialfeuchtegehalt von über 6 M.-% ein. Während der Sommermonate fällt der Materialfeuchtegehalt dann auf 1 M.-% infolge deutlich günstigerer Nahfeldverhältnisse ab.

Die Bestimmung der Ad- und Desorptionsisotherme erfolgt i. A. nach DIN EN ISO 12571. Hier werden die zu analysierenden Materialproben in kleinen Feuchteammern eingelagert, in denen sich Schalen befinden, die mit einer übersättigten Salzlösung gefüllt sind, um eine konstante relative Feuchte während der Einlagerung von Materialproben sicherzustellen. Die Proben werden solange in den jeweiligen Klimaten eingelagert, bis sich ein Gleichgewichtszustand der Materialfeuchte mit dem umgebenden Klima einstellt. Das Gleichgewicht wird dabei erst nach langen Zeiträumen von mehr als zwei Monaten erreicht.

Alternativ kann mithilfe der dynamischen Wasserdampfsorption (DVS-Dynamic Vapor Sorption) bestimmt werden. Hier wird die zu untersuchende Probe in einem feuchteconditionierten Gefäß eingelagert, das an einer Ultra-Mikrowaage angehängt wird. Das Probenmaterial wird kontinuierlich von einem mit Wasser beladenem Trägergas (Stickstoff) umspült. Dies gewährleistet, dass ein steter Transport von Wasserdampf

Abb. 2: Experimentell mit der DVS bestimmte Ad- und Desorptionsisothermen der Wandmalerei in St. Georg (IWB Universität Stuttgart).



Abb. 3:
Blick auf die Versuchseinrichtung (WIB TU Darmstadt).

Abb. 4:
Blick auf das die Probe fassende Glasschälchen, das von einem Glasgefäß umgeben ist, in dem das feuchte-konditionierte Gasgemisch geführt wird (IWB Universität Stuttgart).

zur Probe hin gegeben ist. Die hohe Empfindlichkeit der Waage ermöglicht, die Sorptionsfeuchtebestimmung an kleinsten Probenmengen vornehmen zu können, sodass zusätzlich der zeitintensive Wasserdampftransport ins Innere des Probekörpers und damit die erforderliche Messdauer begünstigt wird.

Wird zur Bestimmung der Sorptionsisotherme von porösen Materialien nach DIN EN ISO 12571 die Messdauer von mehreren Monaten erforderlich, können mit der DVS die Sorptionsisothermen an kleinen Proben innerhalb weniger Stunden bis Tage vollautomatisch ermittelt werden. Dies wird durch eine rechnergestützte Feuchte-konditionierung des Gefäßes ermöglicht, in dem die zu untersuchende Probe eingelagert ist. Durch die langzeitstabile Waage kann die Feuchtgewichtbestimmung kontinuierlich vorgenommen werden und es lässt sich so das Feuchtgleichgewicht automatisch feststellen.

Die für das Sorptionsverhalten der Wandmalerei zum Einsatz kommende DVS ist in Abbildung 3 und 4 aufgezeigt. Hier zeigt die linke Darstellung das Analysegerät, das in einem thermisch konditionierbaren Prüfschrank eingestellt ist. Der an der Waage hängende und hinsichtlich der relativen Feuchte zu konditionierende Probebehälter ist in der rechten Bildhälfte aufgezeigt.

Mit der an der MPA Universität Stuttgart verfügbaren DVS der Firma Porotec können folgende Bestimmungen vorgenommen werden:

- Bestimmung des Materialfeuchtegleichgewichts
- Bestimmung des geschlossenen Verlaufs der Adsorptions- und der Desorptionsisothermen
- Kinetik der Adsorptions- und Desorptionsprozesse.

Die Malschichtprobe der Wandmalerei von St. Georg (Jakobs 2001, Abb. 5) mit einer Masse von knapp 20 Milligramm wurde in das gläserne Probenaufnahmeschälchen eingelegt, das an der Ultra-Mikrowaage zur kontinuierlichen Gewichtserfassung hängt. Die Ad- und Desorptionsisothermen wurden bei Raumtemperatur von 20 °C bestimmt. Doch können bei entsprechender Anpassung der Sorptionsmeseinrichtung die Messungen auch im Temperaturbereich von 5 °C bis 50 °C durchgeführt werden. Die Bestimmung der in Abbildung 2 aufgezeigten Sorptionsisotherme wurde in Anlehnung an die übliche experimentelle Ermittlung nach DIN EN ISO 12571 in 15 Feuchtestufen im Bereich von 0 bis 99 % r. F. vorgenommen. Dabei wird der Wechsel von einer Feuchtestufe zur nächsten erst dann vorgenommen, wenn die der Feuchtigkeit unterworfenen Probe sich im Gleichgewicht befindet. Dieser wird angenommen, wenn die Probe eine Massekonstanz von unter 0,005 M.-%/min. aufweist.

Die für die Secco-Malerei bestimmten Ad- und Desorptionsisothermen (vgl. Abb. 2) verdeutlichen, dass die im Jahresverlauf im Nahfeld der Wandmalereizyklus festgestellten Schwankungen der relativen Luftfeuchten zur Folge haben, dass sich der Materialfeuchtegehalt in den oberen Malereischichten innerhalb kurzer Zeiträume deutlich verändern können.

So kann am Beispiel der Klimaverhältnisse um den 17. Mai 2012 (vgl. Abb. 1) veranschaulicht werden, dass die relative Luftfeuchte im Nahfeld der malereitragenden Wandoberfläche innerhalb eines Tages von nahezu Wasserdampfsättigung, also 100 % r. F., auf eine vergleichsweise geringe Luftfeuchte von etwa 60 % r. F. abfallen kann.



Abb. 5: Museal aufbewahrtes Wandmalereifragment aus einem Chorfenster von St. Georg (so genanntes Hecht-Fragment), hier am Randbereich entnommene Probe (LAD, Jakobs).

Entsprechend der gemessenen Sorptionsisothermen zeigt sich somit, dass in den oberflächennahen Bereichen der Malschicht die Materialfeuchte von über 6 M.-% durch Trocknungsprozesse auf einen Wert von unter 1 M.-% kurzfristig abfallen kann. Ein erneutes Ansteigen der Nahfeldfeuchte auf Werte nahe der Sättigungfeuchte würde eine erneute Zunahme der Feuchte um das Sechsfache bedingen.

Um festzustellen, mit welcher Geschwindigkeit sich durch eine Änderung der im Nahfeld vorherrschenden Luftfeuchte die Materialfeuchte im Innern der Probe auf die neuen Verhältnisse einstellt, soll nachfolgend auch die Dynamik der Sorptionsfeuchteanpassungen diskutiert werden.

In Abbildung 6 ist für die untersuchte Malerprobe die sich im Zuge der stufenförmigen Feuchtänderung jeweils im Gleichgewicht einstellende Materialfeuchte dargestellt. Der blaue Kurvenverlauf verdeutlicht, dass sich mit der Anhebung der relativen Feuchte die Materialfeuchte zunimmt. Deutlich kann der mit jeder Anhebung der relativen Feuchte einhergehende Materialfeuchtezuwachs abgelesen werden. Zunächst wächst die Materialfeuchte entsprechend der zuvor beschriebenen Sorptionsvorgänge rasch an. Doch nimmt der Feuchtezuwachs nach Erreichen von etwa $\frac{3}{4}$ der maximalen Feuchtezunahme einer jeden Feuchtestufe langsamer zu. So lässt sich dem Verlauf der Messkurve entnehmen, dass für das Erreichen der Gleichgewichtsfeuchte bei höherer relativer Feuchte deutlich längere Zeiträume erforderlich

sind, als bei einer Anhebung der relativen Feuchte auf ein niedriges Luftfeuchteniveau. Ursächlich hierfür ist die hohe Materialfeuchte, die benötigt wird, um bei einer hohen relativen Luftfeuchte von über 70 % r. F. infolge der Kapillarkondensation die sehr feinen Porenräume zur Herstellung der Gleichgewichtsfeuchte zu erfüllen. Die zur Füllung der feinen Porenräume erforderlichen große Zahl Wassermoleküle müssen in der Gasphase von außen auf dem Weg der Diffusion bis zu den feinen von der Kapillarkondensation betroffenen Poren einwandern. Es handelt sich also um langwierige Transportprozesse, die am schnellsten in der oberflächennahen Zone und erst nach langen Zeiträumen in tiefergelegenen Bereichen die Erzielung eines Sorptionsfeuchtegleichgewichtes sicherstellen. Daher erklärt sich auch, dass an sehr großen Materialproben die Gleichgewichtsfeuchte erst nach sehr langen Zeiträumen erreicht wird. Hingegen die oberflächennahen Materialsichten, so auch die Wandmalereien rasch den Veränderungen der Nahfeldfeuchte folgen. Folglich erfordert der Sorptionsvorgang im Bereich hoher relativer Luftfeuchten deutlich längere Zeiträume als im Bereich einer niedrigen relativen Luftfeuchte, bei der dies Porenwandoberflächen nur mit einer ein-, zwei- oder dreilagigen Schicht von Wassermolekülen belegt werden.

Die Messergebnisse mit der DVS zeigen darüber hinaus, dass sich zwischen der Adsorption und der Desorption nur eine vergleichsweise geringe Hysterese gegeben ist.

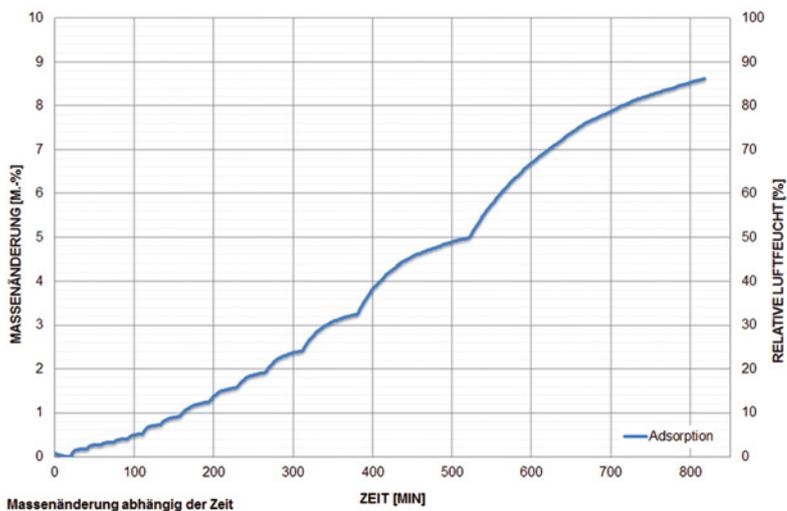


Abb. 6: Dynamische Materialfeuchteänderung bei den stufenmäßigen Erhöhungen (15 Feuchtestufen) der Umgebungsfeuchte bei der Bestimmung der Adsorptionsisotherme (IWB Universität Stuttgart).

In den beiden Diagrammen (Abb. 7, 8) ist die zeitliche Zunahme der Materialfeuchte für ausgewählte Anhebungen der relativen Luftfeuchte in den diversen Feuchtestufen aufgezeigt. Ziel ist es, anhand der beiden grafischen Darstellungen die rasche Veränderung der Materialfeuchtezustände in der Wandmalerei zu verdeutlichen. So zeigt die obere Abbildung die Materialfeuchteanpassung im Bereich geringer relativer Feuchten zwischen 20 % r. F. bis 60 % r. F. Diese Feuchtezustände wurden in dem in Abbildung 1 aufgezeigten Zeitraum in der Kirche St. Georg im Nahfeld der Malerei nicht erreicht. Vielmehr lag die relative Luftfeuchte im Nahfeld der Malerei stets über 60 % r. F. Daher sind die in Abbildung 8 aufgezeigten Materialfeuchteänderungen von baupraktischer Bedeutung. Zusammenfassend lassen sich folgende Aussagen treffen:

- Bei einer Steigerung der relativen Luftfeuchte von 20 % auf 30 % werden bis zum Erreichen der maximalen Feuchtespeicherung $t_{\Delta m1,0}$ (Gewichtskonstanz) lediglich 14 Minuten benötigt. Nach Änderung der Feuchtestufe werden bereits innerhalb der ersten zwei Minuten

Tabelle 1: Zeiten, die erforderlich sind, bis bei einer vorgegebenen Feuchteänderung im Nahfeld der Malerei der Materialfeuchtezustand wieder im Gleichgewicht ist bzw. 75 % des Materialfeuchtezuwachses erreicht wurde.

Feuchteänderung von	$t_{\Delta m0,75}$ in Minuten	$t_{\Delta m1,0}$ in Minuten
65 % r. F. auf 70 % r. F.	18	37
85 % r. F. auf 90 % r. F.	34	72
90 % r. F. auf 95 % r. F.	70	140
95 % r. F. auf 99 % r. F.	160	300

75 % der maximal möglichen Materialfeuchte durch die monomolekulare Anlagerung von Wassermolekülen sorptiv an der Porenwandoberfläche angelagert.

- Eine Anhebung der relativen Luftfeuchte von 50 % r. F. auf 60 % r. F. führt dazu, dass der Feuchtegleichgewichtszustand in der Malschicht bereits nach 22 Minuten abgeschlossen ist. Für die Anlagerung der ersten 75 % der maximal bis zum Erreichen des Gleichgewichtszustands erforderlichen Materialfeuchte ($t_{\Delta m0,75}$) ist mit der DVS lediglich eine Dauer von 7 Minuten erforderlich.
- Die entsprechend der Raumluftverhältnisse in der Kirche St. Georg relevanten Bereiche der relativen Feuchten verdeutlichen, dass infolge der bei über 60 % r. F. sich in zunehmendem Maße beteiligenden Effekte der Kapillarkondensation deutlich längere Zeiträume erfordern, bis eine Materialgleichgewichtsfeuchte erreicht wird. So führt eine Erhöhung der relativen Luftfeuchte um 5 % r. F. zu den in Tabelle 1 aufgezeigten Zeiten, bis 75 % der für die Erreichung des Gleichgewichtszustands erforderliche Feuchtezunahme ($t_{\Delta m0,75}$) bzw. die tatsächliche Gleichgewichtsfeuchte ($t_{\Delta m1,0}$) erreicht wird:

Am längsten dauert die erneute Einstellung eines Feuchtegleichgewichts in der Malschicht bei einer Änderung der relativen Luftfeuchte in Bereichen nahe der Wasserdampfsättigung. Hier müssen große Mengen an Wassermolekülen aus der umgebenden Raumluft in das Innere der Malschicht eintreten, um die feinsten Porenräume infolge der sich hier einstellenden Kapillarkondensationseffekte zu füllen. In der Randzone wird der Materialfeuchtegleichgewichtszustand nach etwa 300 Minuten erreicht. Bei einer Änderung der Witterungsverhältnisse von Schönwetterperioden im Frühjahr, Sommer und Herbst hin zu einer darauffolgenden regenreichen Witterungsperiode, stellt sich infolge des Seeklimas im Nahfeld der Malerei rasch ein nahezu wasserdampfgesättigter Zustand ein. Die Änderung der Nahfeldverhältnisse löst einen Wasserdampftransport aus, der so lange anhält, bis das erneute Feuchtegleichgewicht eingenommen ist. Jede Änderung der Nahfeldfeuchte führt folglich zu steten zeitveränderlichen Vorgängen des Einwanderns oder der Abgabe von Wassermolekülen in oder aus dem Innern des Wandbauteils. Dabei wird das Materialfeuchtegleichgewicht in den oberflächennahen Wandbereichen gleichsweise rasch erreicht. In den tiefergele-

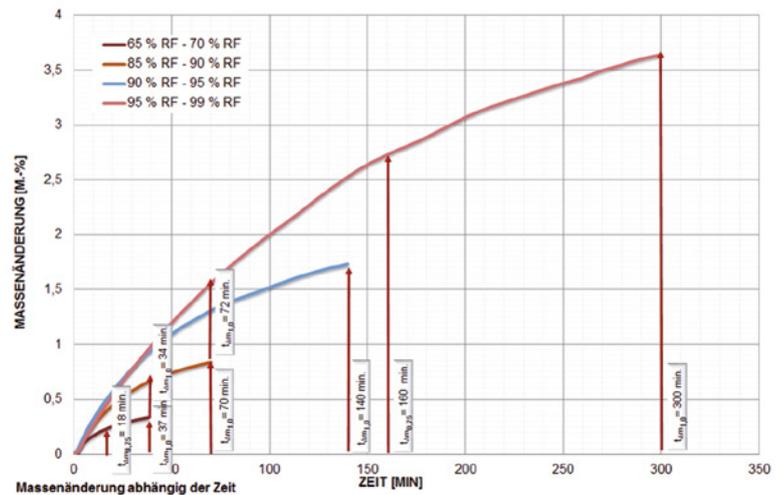
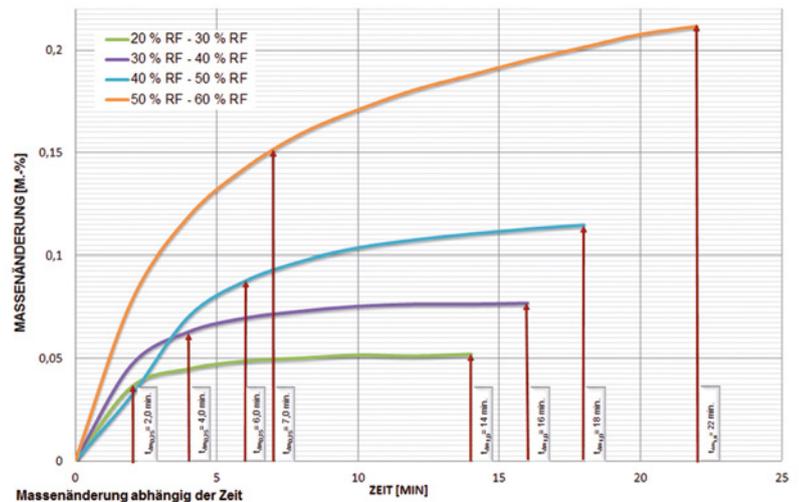
genen werden deutlich längere Zeiträume benötigt, sodass hier trotz sich stetig ändernder Nahfeldverhältnisse ein quasi statischer eingeschwungener Materialfeuchtezustand vorherrscht.

Mit Blick auf die hohe Nahfeldfeuchte an der Wandmalerei der Kirche in St. Georg liegt der Materialfeuchtezustand in den tiefergelegenen Wandbereichen daher eher im oberen Bereich der Sorptionsisothermen. Die oberflächennahen Wandabschnitte, also die Wandmalereien, reagieren entsprechend rasch auf sich ändernde klimatische Bedingungen im Nahfeld. Grundsätzlich kann festgestellt werden, dass:

- kurzzeitige Schwankungen der relativen Luftfeuchte im Nahfeld der Malereien im Bereich um 60 % r. F. in Zeiten einer wärmeren Schönwetterperiode sich direkt auf den Feuchtegehalt in den wandoberflächennahen Malschichten auswirken. Schließt sich einer Regenperiode eine sonnenreiche Schönwetterperiode im Frühjahr, Sommer oder Herbst an, findet eine rasche Austrocknung mit deutlichen Feuchteänderungen mit Masseänderungen von über 6 M.-% statt.
- Hat sich während der schönen Wetterperioden im Frühjahr, Sommer und Herbst eine Nahfeldfeuchte an der Wandmalerei zwischen 60 % r. F. und 80 % r. F. eingeschwungen, führen leichte Schwankungen der relativen Feuchte nur zu geringen Änderungen des Materialfeuchtegehaltes bis zum Erzielen eines neuen Materialgleichgewichtes, die sich in kurzen Zeiträumen von unter einer Stunde einstellen und die zu vergleichsweise geringen Massenänderungen von unter 0,5 M.-% führen.
- Schwankungen im Bereich oberhalb 80 % r. F. erfordern hingegen deutlich längere Zeiträume, bis ein erneutes Materialfeuchtegleichgewicht hergestellt ist. So erfordert die Einstellung des Feuchtegleichgewichtes nahe der Wasserdampfättigung bei Schwankungen um 5 % r. F. etwa 6 Stunden.

Analyse des hygrisch bedingten Formänderungsverhaltens der Malerei

Änderungen des Materialfeuchtezustandes sind grundsätzlich gekoppelt mit einem Formänderungsbestreben der die Feuchte infolge Adsorp-

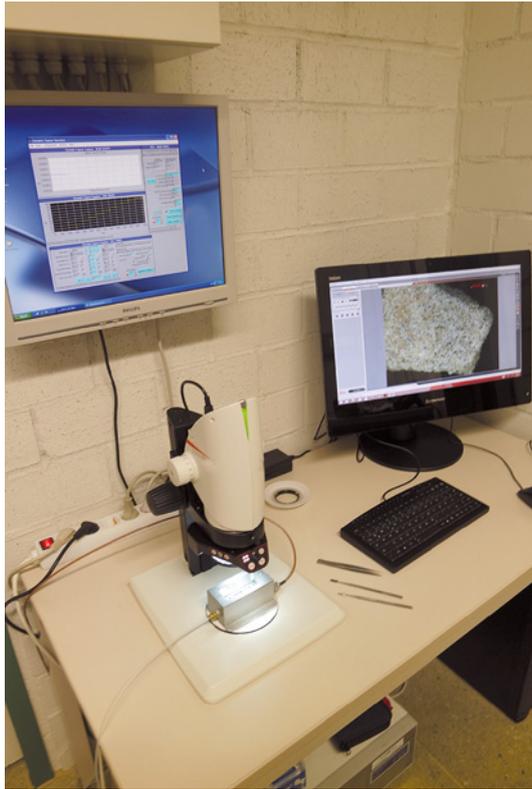


tion aufnehmenden oder infolge Desorption abgebenden Materialien. Dabei sind die oberen Materialschichten unmittelbar von den Veränderungen der relativen Luftfeuchte im Nahfeld betroffen. Die darunterliegenden Materialschichten, der Malgrund, der die Malerei tragende Putz und das darunter gelegene Mauerwerk erfahren erst zu einem späteren Zeitpunkt die Feuchteänderung. Schließlich müssen die Wassermoleküle von der Raumseite auf dem Weg der Diffusion zunächst durch die Malschicht, von dort über den Malgrund und Wandputz bis in das tiefergelegene Mauerwerk einwandern können. Entsprechend führt eine Veränderung der Raumluftfeuchte zu einem langandauernden Prozess, bis sich auch in den tiefer gelegenen Materialschichten wieder ein erneutes Materialfeuchtegleichgewicht einstellen kann. Infolge der zeitlich verzögerten Feuchtezustandsanpassung der tiefergelegenen Materialschichten ist zu berücksichtigen, dass der tiefenabhängigen Feuchte-

Abb. 7: Zeitlicher Verlauf der Feuchtezunahme infolge einer Anhebung der relativen Feuchte im Umfeld einer Malschichtprobe (Untersuchung mittels DVS) Feuchtestufen im Bereich von 20 % r. F. bis 60 % r. F. (IWB Universität Stuttgart).

Abb. 8: Zeitlicher Verlauf der Feuchtezunahme infolge einer Anhebung der relativen Feuchte im Umfeld einer Malschichtprobe (Untersuchung mittels DVS) Feuchtestufen im Bereich von 65 % r. F. bis 99 % r. F. (IWB Universität Stuttgart).

Abb. 9, 10:
Messeinrichtung,
bestehend aus einem
Mikroskop und einer auf
unterschiedlichste
Feuchtezustände hin
konditionierbaren Feuch-
tekammer (IWB Universi-
tät Stuttgart).



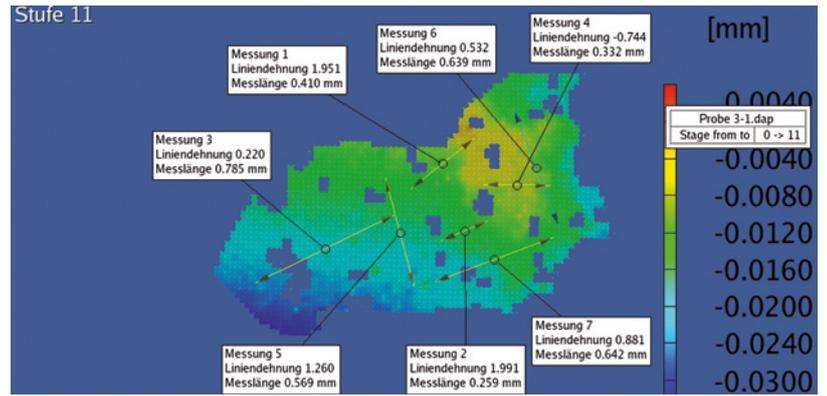
zustandsänderung ein entsprechendes Formänderungsbestreben folgt. Wird diese Formänderung durch benachbarte und noch nicht von der Feuchteänderung betroffene Materialschichten behindert, kommt es zu mechanischen Beanspruchungen, die abhängig des Ausmaßes der Feuchteänderung ein mehr oder weniger stark ausgeprägtes Formänderungsbestreben bedingt. Im Weiteren sollen die aus diesen Formänderungsbestrebungen resultierenden Beanspruchungen und die hiermit einhergehenden Gefährdungen der Malereien aufgezeigt und bewertet werden.

Hierzu wurde von den Verfassern eine Untersuchungsmethode entwickelt und erprobt (Garrecht/Reeb 2011), mit der die hygrische Formänderung in Abhängigkeit der im Nahfeld einwirkenden relativen Luftfeuchte bestimmt werden kann (vgl. Abb. 9, 10).

Für die Analyse mittels DVS reichen geometrische Abmessungen der zu untersuchenden Materialproben aus, die sich auf eine Größe von wenigen Millimetern beschränken. Für jede mit der Mikroskopie zu untersuchende Materialprobe wird zunächst die Ad- und Desorptionsisotherme mit der DVS bestimmt. Anschließend kann die Materialprobe zur Analyse des sorptionsbedingten Formänderungsverhaltens in die in Abbildung 10 gezeigte Feuchtekammer einge-

baut werden. Die Feuchtekammer wird anschließend mit einem Mikroskopieglas gasdicht abgedeckt. Nun kann in der Feuchtekammer mithilfe der rechnergestützten Konditionierungseinheit eine vorgegebene Raumluftfeuchte eingestellt werden, die stufenweise gleich der vorausgegangenen Sorptionsversuche mit der DVS angehoben oder abgesenkt werden kann. Mit der Feuchteänderung in der Prüfkammer strebt die eingelagerte Malereiprobe eine Feuchtezustandsänderung an, der ein Formänderungsbestreben in Form des Schwindens oder Quellens folgt. Die sich dabei einstellende Formänderung kann mit dem Mikroskop in hoher Auflösung erfasst werden. Um festzustellen, wann der Feuchtegleichgewichtszustand erreicht ist, werden die gleichen Versuchsdauern einer jeden Feuchtestufe genutzt, wie diese mit der DVS bei der Ad- und Desorption automatisch gewählt wurde (vgl. Abschnitt 2). So wird sichergestellt, dass die für das Erreichen des Feuchtegleichgewichts erforderliche Einwirkdauer der jeweiligen Feuchtestufe eingehalten ist. Erst danach erfolgt der Wechsel in die nächste Feuchtestufe.

Im Gegensatz zur Sorptionsmessung erfolgt folglich der Wechsel von einer Feuchtestufe zur nächsten nicht auf Basis der erreichten Massenkonstanz, sondern wird abhängig der mit der



DVS ermittelten Zeiten bis zur Erreichung des Sorptionsfeuchtegleichgewichtes gesteuert. Während der gesamten Messung werden in regelmäßigen Zeitabschnitten Bildaufnahmen von der zu untersuchenden Probenoberfläche mit dem Digitalmikroskop gemacht und abgespeichert. Die so erhaltenen Bildaufnahmen bilden die Grundlage für die Analyse des Formänderungsbestrebens der Wandmalerei. Hierzu werden in ausgewählten Bereichen des digital aufgenommenen Bildes von der Probenoberfläche „Messspuren“ angelegt (vgl. Abb. 12) und deren jeweilige Verlängerung bzw. Verkürzung in Abhängigkeit der relativen Umgebungsfeuchte beobachtet und ausgewertet.

Zu berücksichtigen ist, dass sich die in der Feuchtekammer eingelagerte Malereiprobe zwangsfrei, also ohne Behinderung, entsprechend ihres von der Feuchtezustandsänderung abhängigen Formänderungsbestrebens längs der angelegten Messspuren verkürzen oder verlängern kann.

Aus der zuvor aufgezeigten Versuchseinrichtung wurde ein etwas einfacherer und damit kostengünstigerer Laboraufbau abgeleitet. Wesentlicher Bestandteil des Messaufbaus ist neben der rechnergestützt konditionierbaren Feuchtekammer ein digitales Mikroskop mit hoher Auflösung. Der weiterentwickelte Versuchsaufbau ist in Abbildung 13 aufgezeigt.

Um die hygrischen Formänderungen einer Materialprobe zu bestimmen, werden zu vorgegebenen Zeitabständen Aufnahmen von der Probenoberseite mit dem Digitalmikroskop bei 50-facher Vergrößerung Aufnahmen gemacht. Diese Bilder werden mit einer Bildkorrelationssoftware bearbeitet. Die Bildkorrelation ermöglicht, für jede einzelne Feuchteänderung die zugehörigen Dehnraten größtmäßig zu bestimmen. Hierzu werden die zeitveränderlichen Verformungsvorgänge kontinuierlich in Form von

Bildaufnahmen festgehalten, um dann in einer anschließenden oder parallel vorzunehmenden Bildkorrelationsanalyse die sich an der Malschichtprobe einstellenden Verschiebungen und Dehnungen zu erfassen. Die Software der digitalen Bildkorrelation nutzt Muster und Punktmarken, um einzelne Bildfelder zu definieren, die sich pixelgenau wiederfinden lassen. Durch die fortwährende Verfolgung der Muster und Punktmarken lassen sich die abhängig einer Feuchteänderung einstellenden hygrischen Formänderungen bestimmen. Das Ergebnis der digitalen Bildkorrelation der untersuchten Malerei zeigt Abbildung 14.

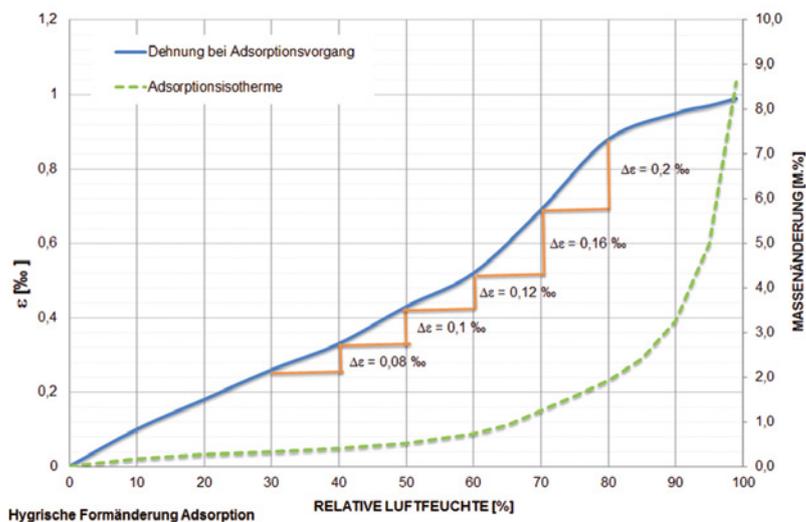
Mechanische Beanspruchungen infolge hygrischer Formänderungen

Eine Feuchteänderung der malereitragenden Wandoberflächen führt zu Formänderungen in der Malschicht und den darunter gelegenen Materialschichten. Mit der Feuchteaufnahme ist eine Volumenzunahme (Quellen) verbunden. Hingegen führt die Feuchteabgabe zu einer Volumenabnahme (Schwinden). Die hygrischen Formänderungen gehen auf physikalische Grenzflächenphänomene zurück, da abhängig des Poren- und Materialgefüges je nach Feuchtebelastung mehr oder weniger viele Wassermoleküle in die Materialstruktur eingelagert werden können.

Um die mit der Feuchteauf- bzw. -abnahme verbundene Formänderung rechnerisch nachvollziehen zu können, muss der Zusammenhang zwischen Materialfeuchtegehalt und zugehöriger hygrischer Dehnung experimentell bestimmt werden (Möller 1993; Garrecht 2005). Abbildung 15 gibt den aus Abbildung 14 abgeleiteten

[links] Abb. 11: Mikroskopieaufnahme der Malschichtprobe (IWB Universität Stuttgart).

[rechts] Abb. 12: Messfeld und Messspuren der Bildkorrelationsanalyse der Malschichtprobe (IWB Universität Stuttgart).



Hygrische Formänderung Adsorption

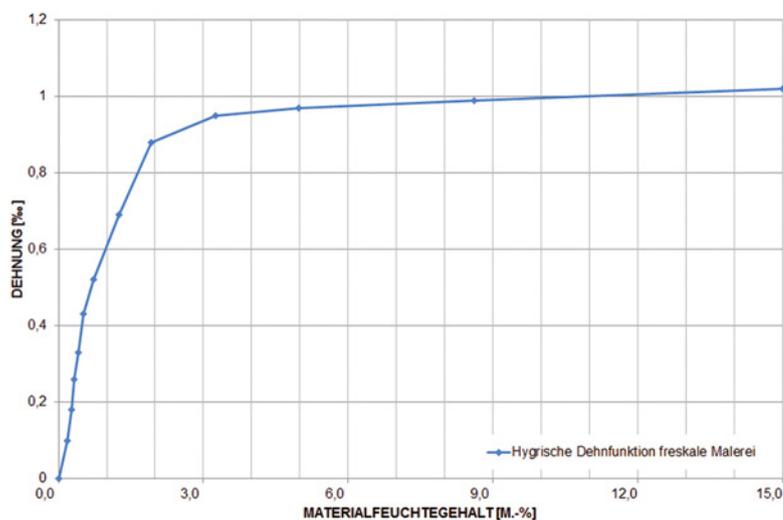


Abb. 14: Hygrische Formänderung abhängig der Sorptionsfeuchtegehalte im Bereich der hygroskopischen Feuchtezustände der Malerei zwischen 0 % r. F. und 100 % r. F. ($T = 20^\circ\text{C}$) (IWB Universität Stuttgart).

Abb. 15: Hygrische Dehnfunktion der Malereiprobe (IWB Universität Stuttgart).

Zusammenhang zwischen der sorptionsbedingten Materialfeuchte und der zugehörigen Formänderung im zwängungsfreien Zustand der Malerei wieder. So zeigt sich, dass sich nahe der Wasserdampfsättigung der Luft im Nahfeld der Malerei ein sorptionsbedingter Materialfeuchtegehalt von nahezu 8 M.-% Feuchte einstellt. Die zugehörige Dehnung liegt im Vergleich zur trockenen Probe bei etwa $1,0\text{‰}$. Die zwängungsfrei gelagerte Malerei, die zunächst getrocknet und anschließend in wasserdampfgesättigter Luft ausgelagert wurde, erfährt dabei eine Längenänderung von 1 mm/m. Die mit der Aufnahme und Abgabe von Feuchte an der malereitragenden Wandoberfläche einhergehende Formänderung kann zu extremen Beanspruchungen führen, da beim Überschreiten der Materialzugfestigkeit mit einer Schädigung des Gefüges durch Mikrorissbildung zu

rechnen ist. Durch den steten Wechsel der relativen Feuchte im Nahfeld der Malerei würde eine zwängungsfrei gelagerte Malschicht entsprechend der in Abbildung 15 aufgezeigten Formänderungsbestrebungen zu steten Beanspruchungswechseln führen, die abhängig der Widerstandsfähigkeit der die Malerei tragenden Putzmaterialien eine mehr oder weniger rasche Ermüdung und eine damit verbundene Schädigung zur Folge haben könnten.

In der Kirche St. Georg stellen sich im Nahfeld bestenfalls Feuchteänderungen zwischen 60 % r. F. und 100 % r. F. ein. Dies bedingt, dass sich im Anschluss an eine regenreiche Schlechtwetterperiode an darauffolgend schönen und sonnenreichen Frühlings- oder Sommertagen eine Trocknung um knapp 8 M.-% Materialfeuchte in der Malschicht einstellt. Das zugehörige Dehnungsbestreben liegt bei etwa $0,5\text{‰}$. Entsprechend würde sich durch die Trocknung die Malschicht um 0,5 mm/m zusammenziehen wollen, sofern die Malerei in ihrem Verformungsbestreben nicht behindert wäre. Tatsächlich ist die Malerei in ihrem Formänderungsverhalten aber behindert. Schließlich wurde diese auf einen Kalkputz aufgebracht.

Ändert sich die Nahfeldfeuchte, kann die Malschicht vergleichsweise rasch den Sorptionsgleichgewichtsfeuchtezustand annehmen. Die tiefergelegenen Putzbereiche benötigen hingegen deutlich längere Zeiträume, bis diese sich im Feuchtegleichgewicht mit der Umgebung befinden. Daher kann grundsätzlich davon ausgegangen werden, dass sich der die Malerei tragende Putz erst deutlich später als die Malschicht den neuen Feuchtegleichgewichtszustand annimmt. Bei einer Trocknung möchte sich folglich die Malerei entsprechend ihres Formänderungsbestrebens zusammenziehen. Doch behindert der darunter gelegene Putzgrund das Formänderungsbestreben der Malerei. Entsprechend führt die Behinderung des Formänderungsbestrebens zu einer Zugbeanspruchung der Malschicht, deren Größenordnung mit Kenntnis des E-Moduls der Malschicht berechnet werden kann.

Da es sich bei der Secco-Malerei um eine Kalkmalereitechnologie handelt, bei der die Farben mit Kalk angerührt auf den abgetrockneten Putz aufgebracht werden, kann ein E-Modul für die Malerei, die vom Verformungsverhalten des erhärteten und karbonatisierten Putzes geprägt ist, in der Größenordnung zwischen 700 und 1.300 N/mm^2 angesetzt werden.

Für einen mittleren E-Modul von 1.000 N/mm^2 errechnet sich so eine resultierende Beanspruchung in Höhe von:

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 0,0005 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 = 0,5 \text{ N/mm}^2$$

Doch stehen Informationen zur Zugfestigkeit von karbonatisierten Kalkputzen so gut wie nicht zur Verfügung. Karbonatisierten Kalkputzen wird meist eine Haftzugfestigkeit von $0,03$ bis $0,15 \text{ N/mm}^2$ zugesprochen, sodass das im Laborversuch bei zwängungsfreier Lagerung ermittelte Formänderungsverhalten zu Zugbeanspruchungen führt, die bereits über der aufnehmbaren Zugfestigkeit historischer Kalkputzes liegen (Böttger 1997).



In-situ-Untersuchungen zur hygri-schen Beanspruchung der Malerei

Eines der Ziele des DBU-Forschungsvorhabens war es, die in Abschnitt 4 aufgezeigte Labor-methode derart weiterzuentwickeln und zu er-proben, das die infolge einer Nahfeldfeuchte-änderung sich einstellenden sorptionsbedingten Formänderungen in situ analysiert und bewertet werden können. D. h. es sollte ein in-situ-Mess-verfahren zum Einsatz kommen, das mittels einer digitalen Mikroskopie ermöglicht, über einen langen Messzeitraum hinweg die sich an der Malerei einstellenden Formänderungen zu erfassen. Hierzu wurde ein Versuchsaufbau ge-wählt, der sich mit vergleichsweise geringen Kosten realisieren lässt und eine hinreichende Aussagefähigkeit der Untersuchungsergebnisse erlaubt. Das in St. Georg zum Einsatz gebrachte Mikroskop erlaubt eine 50-fache Vergrößerung. Die während der Untersuchungsdauer in stünd-lichem Abstand aufgenommenen Bildaufnah-men lassen sich mit einer hinreichenden Quali-tät mit der Bildkorrelationssoftware auswerten. Offen blieb zunächst die Frage, ob die in situ zu installierende Messanordnung eine ausreichen-de Stabilität und Robustheit aufweist. Doch er-füllte die gewählte Versuchseinrichtung diese Anforderungen.

Mit der Bildkorrelation ist es dabei gelungen, die sehr kleinen Formänderungen zu erfassen, die mit dem hygri-schen Formänderungsbestreben der auf dem Wandputz aufgetragenen ottoni-schen Wandmalerei zu erfassen.

Doch musste zunächst die Installation des Messsystems an der ottonischen Wandmalerei vorgenommen werden. Hierzu wurde die Mess-



anordnung mit einer Hebebühne vor der Wand des Obergadens so installiert, dass die Malerei an keiner Stelle berührt wurde. Nach mehreren Vorversuchen wurde gemeinsam mit der Denk-malpflege und mit den beteiligten Restaurato-ren eine Lösung gefunden, die Messmimik ohne eine Fixierung auf der Wand in ausreichender Stabilität für eine über einen langen Zeitraum von mehr als einem Jahr andauernde Messung zu installieren. Einen Eindruck vom Messsystem gibt Abbildung 16. Hier ist das USB-Mikroskop an einer Halterung montiert, die an den steiner-nen Kondensatbehältern der Obergadenfenster befestigt wurde. Abbildung 17 verdeutlicht die Größenordnung des Versuchsaufbaus, um an der malereitragenden Wandoberfläche des Ober-gadens das Digitalmikroskop anzuordnen. Damit das Mikroskop mit einem Rechner vernetzt werden konnte, der die in konstanten Zeitabständen

Abb. 16:
Befestigungskonzept zur Halterung der USB-Mikroskopmesseinrichtung (IWB Universität Stuttgart).

Abb. 17:
Blick auf die Messeinrichtung zur kontinuierlichen Bilderfassung der Wandmalerei mittels Digital-mikroskopie im Ober-gaden (IWB Universität Stuttgart).

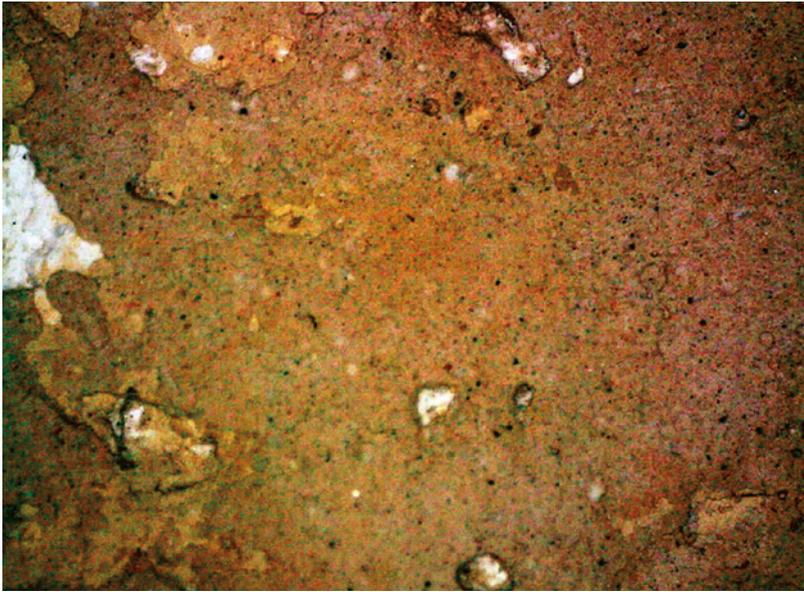


Abb. 18:
Bildaufnahme mit dem
Digitalmikroskop
(50-fache Vergrößerung)
der im Obergaden erfass-
ten malereitragenden
Wandoberfläche (IWB
Universität Stuttgart).

vorzunehmende Bildaufnahme auslöst und die einzelnen Bilder zur weiteren Bearbeitung abgespeichert, wurde eine Kabelanbindung in den Dachraum realisiert. Das USB-Verbindungskabel konnte durch ein Loch in der Decke geführt und dort an den Messrechner angeschlossen werden. Unmittelbar nach der Installation wurde die automatische Bildaufnahme in Betrieb genommen. Seither werden in stündlichem Abstand digitale Nahfeldaufnahmen vorgenommen und abgespeichert.

Die Analyse der zahlreichen Bildaufnahmen erfordert eine Auswertung mittels der in Abschnitt 3 erläuterten Bildkorrelationssoftware. Voraussetzung ist, dass alle zu bearbeitenden Bildaufnahmen über einen genügenden Kontrast und eine ausreichende Helligkeit verfügen. Um einen ersten Überblick über das vorhandene Bildmaterial zu erhalten, wurden alle Einzelbilder in einer Videosequenz zusammengeführt und die Bildfolge als Movie betrachtet. Hierbei zeigte sich, dass nicht alle Bildaufnahmen eine ausreichende Qualität besitzen. Zahlreiche Bildaufnahmen mussten verworfen und aussortiert werden. Auch zeigte sich, dass mit dem Betrieb des Kirchengeläuts die Messeinrichtung in Schwingung gerät und sich demzufolge der Abstand zwischen Mikroskop und Malerei ändert. Gleiches konnte auch festgestellt werden, wenn sich Personen auf der Decke im Dachraum bewegen.

Nachdem alle nicht verwertbaren Bildaufnahmen aussortiert waren, konnten die verbliebenen Bildaufnahmen mit der Software für die digitale Bildkorrelation bearbeitet werden. Die

flächig mittels bildoptischer Vermessung aufgezeichneten Formänderungen wurden für einen zuvor festgelegten Messbereich im mittleren Bildausschnitt rechnerisch bestimmt und mit den im Nahfeld der Wandmalerei erfassten Klimaverhältnissen verglichen. Als ein Beispiel der digitalen Bildaufnahme ist in Abbildung 18 das mit dem Digitalmikroskop erfasste Bild mit 50-facher Vergrößerung aufgezeichnet.

Abbildung 19 zeigt die im Nahfeld der bildoptisch untersuchten Messstelle erfassten Temperaturen und relativen Luftfeuchten über einen Zeitraum von einem Monat. Bewusst wird in den nachfolgenden Ausführungen der Frühlingsmonat April 2016 betrachtet, da in diesem Monat starke klimatische Veränderungen im Nahfeld der malereitragenden Wandoberfläche beobachtet werden konnten. Entsprechend ist zu erwarten, dass sich in diesem Zeitraum auch optisch wahrnehmbare Veränderungen an der Wandoberfläche einstellen.

So weist die relative Luftfeuchte im Nahfeld der betrachteten Wandoberfläche zum Monatsbeginn zunächst Werte um die Wasserdampf-sättigung auf. Erst in der zweiten Aprilwoche sinkt die Nahfeldfeuchte auf Werte um 80 % r. F. ab und schwankt zur Monatsmitte zwischen 80 % r. F. und 100 % r. F. Im letzten Viertel des Monats führen trockenere Außenluftmassen zu einer Abnahme der im Nahfeld der Wand im Obergaden gemessenen relativen Luftfeuchte. In diesem Zeitraum sinkt die Nahfeldtemperatur von zunächst 15 °C auf 8 °C ab. Gleichzeitig sinkt auch die relative Luftfeuchte auf Werte um 70 % r. F.

Mit der Bildkorrelationssoftware wurden die für den Monat April 2016 verfügbaren Bildaufnahmen ausgewertet und das über den Messzeitraum beobachtete Formänderungsverhalten berechnet, wie es für eine mit der Software festgelegte Messspur in Abbildung 20 wiedergegeben ist. Dabei zeigt der Verlauf der auf die Ausgangsmessung bezogene Dehnungsänderung, dass im gesamten Beobachtungszeitraum (vom Tag 1, dem 1. April 2016 bis zum Tag 30, dem 30. April 2016) nur sehr kleine Formänderungsprozesse stattgefunden haben. Lediglich in der letzten Aprilwoche ist eine stärkere Veränderung infolge der trockeneren Nahfeldbedingungen zu verzeichnen.

Die in situ gemessenen Formänderungen sind infolge des unmittelbaren Verbunds der Malerei mit dem darunter befindlichen Kalkputz und der hierdurch bedingten Zwängung in ihrer Größen-

ordnung um einen Faktor von etwa 10 kleiner als die Formänderungen, wie sie mit der Labormess-einrichtung in der Feuchtekammer beobachtet werden konnten. So kann für die zwängungsfrei in der Feuchtekammer eingelagerte Probe im Bereich der relativen Luftfeuchten zwischen 70 % r.F. und 100 % r.F. eine hygri-sche Dehnungsänderung von $0,3\text{‰}$ aus Abbildung 14 abgelesen werden. Dem steht bei der in-situ-Messung eine Dehnungsänderung von $0,04\text{‰}$ für den Trocknungsvorgang vom 24. auf den 26. April gegenüber.

Doch stimmen tendenziell die in situ gemessenen Formänderungen mit den Labormessungen überein. Einzig die Größenordnung der Formänderungsbestrebungen ist um einen Faktor von etwa 10 geringer. Entscheidend ist aber die Beobachtung, dass das in den Labormessungen verzeichnete Expansionsbestreben der Malerei bei einer Erhöhung der relativen Feuchte in situ gleichermaßen festgestellt werden konnte, wie die Kontraktion der Malerei im Falle einer Abnahme der relativen Luftfeuchte infolge einer sich einstellenden Trocknung in der Randzone.

Bewertung der hygri-schen Beanspruchung der Wandmalerei im Ober-gaden infolge einer lokalen Klimaveränderungen

Die Ergebnisse der in-situ-Messungen konnten zeigen, dass mit einer Erhöhung der relativen Luftfeuchte im Nahfeld der Malerei eine Expansion, also eine Dehnungszunahme, und mit einer Absenkung der relativen Luftfeuchte eine Kontraktion, als eine Dehnungsabnahme, einhergeht. Im Vergleich zu den Labormessungen, die an einer sehr kleinen Malereiprobe mit einer Größe von wenigen Millimetern vorgenommen werden konnte, sind die in situ zu verzeichnenden Formänderungsraten aber fast um einen Faktor 10 kleiner. Dies ist auf die Besonderheit der zwängungsfreien Formänderungsprozesse im Laborversuch zurückzuführen. So kann die sehr kleine Malereiprobe in der Feuchtekammer ungehindert den physikalisch bedingten Kräfteinwirkungen folgen, wie sie durch die Anlagerung von Wassermolekülen in der inneren Struktur der Malerei zu verzeichnen sind. Es ist bekannt, dass die Einlagerung von Wassermolekülen Druckkräfte auf die kalkgebundenen Fest-

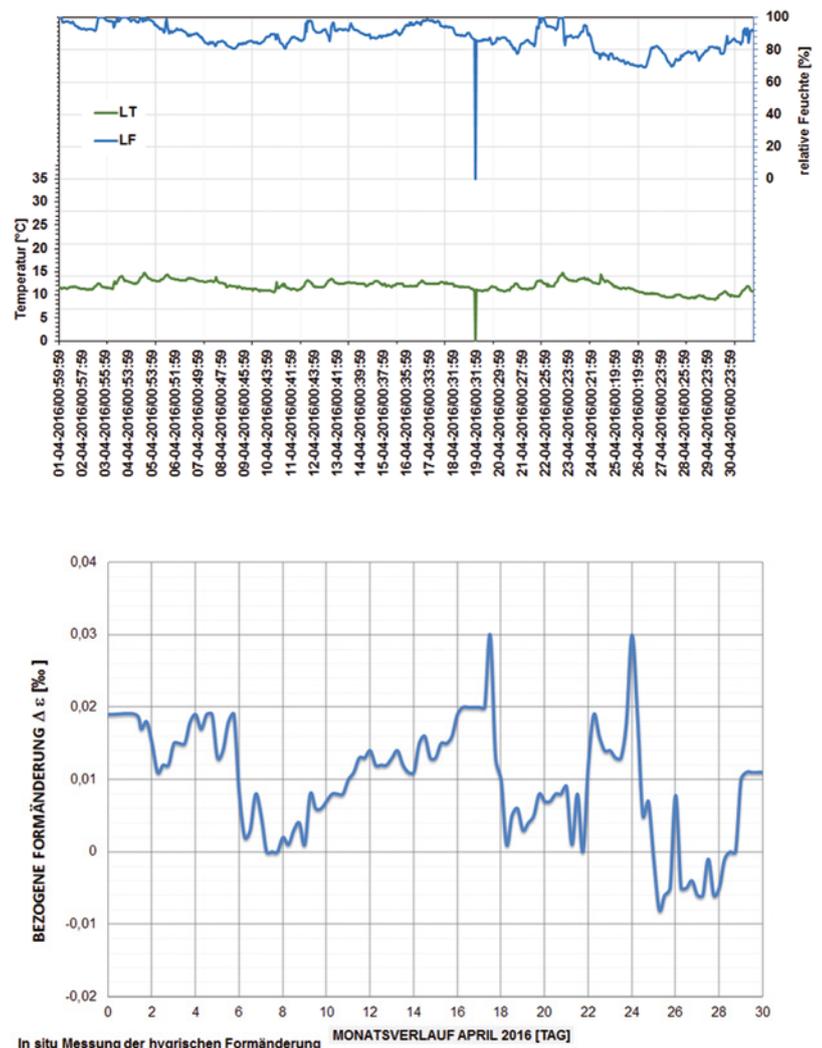


Abb. 19: Nahfeldklima im Bereich der bildoptischen Untersuchung der malerei-tragenden Wand im Ober-gaden im Monat April 2016 (IWB Uni-versität Stuttgart).

Abb. 20: In situ gemessene hygri-sche Formänderungen (auf die Erstmessung bezogene Darstellung) als Folge des im Nahfeld einwirkenden Klimas nach Abbildung 14 (IWB Universität Stuttgart).

stoffstrukturen ausübt, die auf die in der Nanoebene wirksamen Oberflächenkräfte (Van der Waals'sche Kraftwechselwirkungen) zurückgeführt werden können. Bei der zwängungsfreien Lagerung kann das Materialgefüge den mit der Wasseraufnahme einhergehenden Kraftwirkungen nur geringe Reaktionskräfte entgegensetzen. Daher nimmt das Materialvolumen durch die Anlagerung und Einlagerung von Sorptionsfeuchte zu, wie dies die im Zuge der Adsorptionsprozesse in Abbildung 14 beobachteten Dehnungszunahmen verdeutlichen. Nimmt hingegen im Nahfeld der Malerei die relative Luftfeuchte ab, finden Trocknungseffekte statt, die infolge der Oberflächenkraftwirkungen in der kalkgebundenen Malerei ein Zusammenziehen der Feststoffstrukturen auf der Nanoebene zur Folge haben. Dabei kommt es zu einer Volumenabnahme, die als Schwinden bezeichnet wird.

Im Vergleich zu den zwängungsfreien Laborversuchen ist die Malerei in situ umgeben von benachbarten Malereibereichen. Zudem befindet sich die kalkgebundene Malerei mit dem darunter gelegenen Kalkputz im festen Verbund. Einzig zur Raumseite könnte sich die Malerei bei einer Feuchteaufnahme hin verformen. Doch kann diese aus der Bildebene heraustretende Formänderung mit der im Vorhaben gewählten Digitalmikroskop und der in St. Georg realisierten Instrumentierung nicht erfasst werden. Hierzu müsste das genutzte Digitalmikroskop durch eine leistungsfähige 3D-Mikroskopieeinrichtung ersetzt werden.

Dennoch machen die in situ durchgeführten Untersuchungen deutlich, dass eine dem im Nahfeld vorherrschenden Klima folgende Formänderung einhergeht. Zwar ist diese in ihrer Größenordnung um einen Faktor von etwa 1/10 kleiner, doch lässt sich das Formänderungsbestreben auch in der gezwängten Anordnung der Malerei ableiten.

Für den Erhalt der ottonischen Wandmalerei wäre es kritisch, wenn die Änderungen der Nahfeldklimate Formänderungen bewirken würden, die eine Rissbildung in der Malschicht zur Folge hätte. Eine Rissbildung stellt sich immer dann ein, wenn in der oberflächennahen Malschicht Zugkräfte wirksam werden, die größer als die Zugfestigkeit der kalkgebundenen Malschicht sind. Welche Zugbeanspruchungen Malschichten schadensfrei aufnehmen können, ist, wenn überhaupt, nur in Ansätzen erforscht. Auch ist das Verformungsverhalten maßgeblich vom Elastizitätsverhalten der Malschicht bestimmt. Doch ist das mechanische Verhalten von Malschichten nur selten Gegenstand der Forschungen.

Die Auswertung der in-situ-Aufnahmen kann aber zeigen, dass die Malerei ein vom Nahfeldklima abhängiges Formänderungsbestreben aufweist, das innerhalb nur zweier Tage eine Dehnungsänderung von $0,04\%$ bewirkt. Zwar kann davon ausgegangen werden, dass sich der im Verbund unter der Malschicht gelegene Wandputz nach 2 Tagen (24. bis 26. April 2016 gemäß Abbildung 20) noch nicht wie die oberflächennahe Malerei im Sorptionsfeuchtegleichgewicht befindet, doch herrscht infolge des Kontraktionsbestrebens der Malerei, das von dem erhärteten und karbonatisierten Kalkputz geprägt ist, eine vergleichsweise geringe Spannung in der Malschicht vor, die aber durchaus im Be-

reich der Haftzugfestigkeit von Kalkputzen liegt (Böttger 1997):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E = 0,00004 \cdot 1000 \text{ N/mm}^2 = 0,04 \text{ N/mm}^2$$

Damit belegt die Auswertung der in situ an der Wandmalerei aufgenommenen Bilder zu den Verformungszuständen, dass die im Nahfeld der Malereien im Jahresverlauf typischerweise vorherrschenden relativen Luftfeuchten Formänderungen zur Folge haben, die trotz einer Zwängung der Malschicht Zugbeanspruchungen bewirken, die von dem Kalkputz gerade noch aufgenommen werden können. Vereinzelt finden sich auch Quellen, die der Malerei eine Zugfestigkeit in der Größenordnung von 0,1 bis 0,2 N/mm² zuordnen. Zwar führen die während der Untersuchungen im Nahfeld der Malerei beobachteten relativen Luftfeuchten zu Zugbeanspruchungen, die unter diesen Werten bleiben, doch kommt es infolge der steten Feuchteänderungen zu einer immer wiederkehrenden Wechselbeanspruchung. Mit 0,04 N/mm² liegt dabei die Zugbeanspruchung in einem Grenzbereich, der eine allmähliche Ermüdung der oberflächennahen Materialschichten bewirken kann. Eine Schädigung der Malerei wäre die Folge, weshalb künftig Feuchteschwankungen im Nahfeld zwischen 60 % r. F. und 100 % r. F. vermieden werden sollte.

Ausblick und Zusammenfassung

Im DBU-Vorhaben wurde die klimabedingte Beanspruchung der ottonischen Wandmalerei untersucht. Es konnte gezeigt werden, dass die Malerei ein ausgeprägtes Sorptionsvermögen aufweist. So nimmt bei einer hohen relativen Luftfeuchte im Nahfeld der Malerei nahe der Sättigung (bei etwa 99 % r. F.) die Malerei einen Feuchtegleichgewichtszustand ein, der bei über 8 M.-% liegt.

Infolge des ausgeprägten Sorptionsvermögens der Malerei in St. Georg konnte im Labor mit Untersuchungen in der Feuchte-kammer festgestellt werden, dass die Malereiprobe ein hohes Maß an hygrischem Formänderungsbestreben besitzt. Die zwängungsfrei in der Feuchte-kammer eingelagerte Malereiprobe zeigte in den Ad- und Desorptionsversuchen ein Formänderungsverhalten, das bei Annahme üblicher mechanischer Kenngrößen für die Malerei tragende Kalkputze im Grenzbereich der Systemzugfestigkeit liegt, wenn anstelle der freien Formände-

rung der zwängungsfreien Probenlagerung eine volle Behinderung gegeben wäre. Somit kann aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden, dass die Malerei entsprechend der in St. Georg vorherrschenden Nahfeldklimate in hohem Maße durch hygri- sch bedingte Formänderungsprozesse gefährdet ist.

Neben den Laborversuchen wurde auch in situ das klimabedingte Formänderungsverhalten der Wandmalerei untersucht. Auch wenn die Messmethode zur kontinuierlichen Erfassung der Maleroberfläche noch erhebliches Verbesserungspotenzial aufweist, so lässt sich aber mit den durchgeführten Untersuchungen belegen, dass der Verbund der Malerei mit dem Putz trotz der starken Klimaveränderungen im Jahresverlauf zu deutlich geringeren Formänderungsbestrebungen führt, als diese aus den Laborversuchen an den zwängungsfreien Materialproben abgeleitet werden. Auch wenn in situ Verformungsvorgänge an der Malerei infolge von Nahfeldklimaänderungen nachgewiesen werden konnten, so zeigten die rechnerischen Abschätzungen der sich hierbei in der erhärteten Kalkputzschicht einstellenden Zugspannung, dass die Zugfestigkeit des die Malerei aufnehmenden Kalkputzes nur etwa 50 % der Zugtragfähigkeit ausnutzt. Somit wäre eine kleine Reserve gegeben. Doch ist hierbei zu berücksichtigen, dass infolge der steten Nahfeldklimaänderungen eine Ermüdung der oberflächennahen Materialschichten einhergeht, die zu einem allmählichen Versagen der Malschicht durch Rissbildungen führen kann. Folglich sind Maßnahmen zu empfehlen, die sicherstellen, dass die im Nahfeld der Wandmalereien vorherrschenden tages- und jahreszeitlichen Feuchteschwankungen von heute 60 % r. F. und 100 % r. F. künftig deutlich reduziert werden.

So ist zum Erhalt der ottonischen Wandmalereien künftig in der Kirche St. Georg eine relative Feuchte im Nahfeld der Malerei anzustreben, das sich im Größenordnungsbereich zwischen 70 % r. F. und 90 % r. F. bewegt. Hierzu bedarf es einer kontrollierten und bedarfsgerechten Raumbelüftung und Temperierung, um insbesondere während der kritischen Witterungsperioden die relative Luftfeuchte im Nahfeld der Malereien auf Werten zwischen 70 % r. F. und 90 % r. F. zu halten.

In weiterführenden Untersuchungen sollen die im DBU-Vorhaben gewonnenen Erkenntnisse

genutzt werden, um Grundlagen bildende Forschungen zu den wenig erforschten Fragen der thermischen und hygri- schen Beanspruchungen von Wandmalerei durchzuführen. Schließlich wurde mit der Bearbeitung des DBU-Vorhabens offensichtlich, dass es nur vereinzelt Hinweise zum mechanischen Verhalten von oberflächennahen Materialverbänden infolge thermischer und hygri- scher Formänderungsbestrebungen gibt. So sollen in weiteren Forschungen numerische Analysen zu den komplexen mechanischen Beanspruchungen in der Randzone der malerei- tragenden Wandoberflächen vorgenommen werden. Erforderlich ist aber auch die Entwicklung und Erprobung von Methoden, mit denen die oberflächennahen Materialschichten in ihrem mechanischen Verhalten hinsichtlich Festigkeit, E-Modul und in ihrem thermischen Ausdehnungsverhalten beschrieben werden können. Zu klären ist auch, inwieweit Festigungsmaßnahmen früherer Restaurierungen an den originalen Malschichten zu weitreichenden Veränderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften führen, die im DBU-Vorhaben nicht Gegenstand der Untersuchung waren. Schließlich wurden mit der restauratorischen Bearbeitung der originalen Oberfläche vielfach neue Materialien dem Original zugeführt, sodass das physikalische, chemische und mechanische Verhalten der Malerei in entscheidender Weise beeinflusst werden dürfte.

Folglich bleiben auch mit dem Abschluss des DBU-Vorhabens viele Fragen offen. Doch ist es mit den vorliegenden Untersuchungen gelungen, Anforderungen an den zum Erhalt der Wandmalerei erforderlichen Klimakorridor zu benennen, um künftig eine weitere Beanspruchung oder gar Schädigung der ottonischen Wandmalereien infolge hygri- sch bedingter Formänderungsbestrebungen zu unterbinden. Zudem konnte eine neuartige Untersuchungsmethode aus der Laboranwendung in die Bauwerksuntersuchung übertragen, erprobt und weiterentwickelt werden. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse ermutigen, die angewandten Methoden und Verfahren in Verbindung mit Klimamessungen und begleitenden numerischen Untersuchungen so fortzuentwickeln, dass künftig eine ganzheitliche Bewertung der komplexen hygri- schen Beanspruchungen an Wandoberflächen mit Malerei vorgenommen werden kann.

Die Verfasser danken der Deutsche Bundesstiftung Umwelt, die mit der Förderung des Forschungsprojektes die Möglichkeit geboten hat, neuartige Untersuchungsmethoden im Labor und im Bauwerkseinsatz zu erproben. Die hierbei

gewonnenen Erkenntnisse bieten vielfältige Möglichkeiten, künftig weitere Grundlagenforschungen zu den komplexen Fragestellungen der klimabedingten Beanspruchung von maleitragenden Wandoberflächen vorzunehmen.

Literatur

- De Boer, S.: The dynamical character of adsorption. Oxford 1968.
- Böttger, K. G.: Mörtel für die Erhaltung historischer Kalkputze: Haftmörtel, Hinterfüllmörtel und Kalkputze, Dissertation Bauhaus Universität Weimar, Berlin 1997.
- Garrecht, H.: Porenstrukturmodelle für den feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbefrachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk, Dissertation Universität Karlsruhe (Schriftenreihe des Instituts für Massivbau und Baustofftechnologie 15), Karlsruhe 1992.
- Garrecht, H.: Hygrothermische Wechselwirkung von Naturstein und Mörtelfuge. In: Zeitschrift der Deutschen Gesellschaft für Geowissenschaften 156, Heft 1, (2005), S. 221-229.
- Garrecht, H. / Reeb, S.: Neuartige Untersuchungsmethoden zur Erfassung der klimabedingten Beanspruchung wertvoller Fassungsflächen am Beispiel der Schwind-Fresken auf der Wartburg. In: Wartburg-Jahrbuch 2010 (2011), S. 63-76.
- Jakobs, D.: Kap. IV. 36 Reichenauer Wandmalereifragment. In: Otto der Große. Magdeburg und Europa, hg. Von M. Puhle. Eine Ausstellung im Kulturhistorischen Museum Magdeburg vom 27. August - 2. Dezember 2001, 2 Bde., Mainz 2001, Katalogband S. 243-244.
- Krischer, O. / Kast, W.: Die wissenschaftlichen Grundlagen der Trocknungstechnik. Berlin/Heidelberg/New York 1978.
- Möller, U.: Thermo-hygrische Eigenspannungen und Formänderungen von natürlichen und künstlichen Mauersteinen, Dissertation Universität Stuttgart, 1993.

Klimamonitoring und kontrollierte Maßnahmen zur Raumluftverbesserung

Harald Garrecht

Problemstellung und Zielsetzung

Seit den 1990er Jahren werden in St. Georg Klimadaten erfasst, um die vom Raumklima abhängige Beanspruchung der ottonischen Wandmalereien zu bewerten. 2001 wurde eine elektronische Klimamessstation mit 16 Sensoren installiert. Nachdem 2003 ein vermehrtes Auftreten von Schimmelpilzen auftrat, erfolgte dessen Abnahme im Zuge einer Oberflächenreinigung und die Einrichtung von Lüftungstechnischen Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas. So wurden die Zugangsportale mit einer Zwangsschließung ausgestattet und auf diese Weise die Vorhalle zur Klimaschleuse ausgebaut. Als wesentliche Verbesserung wurden die Seitenschiff-Fenster mit einem sensorgestützten Be- und Entlüftungssystem ausgestattet, das die Kippfenster kontrolliert öffnen und schließen kann. Eine thermische Abluft ermöglichen zusätzlich vier Lüftungsschächte in der Deckenkonstruktion.

Bestandteil des Konzepts ist eine 2009 erprobte und 2013 fest eingeführte Besucherlenkung, die den Besuch der Kirche in den Sommermonaten nur noch über eine Gruppenführung gewährt. Im Test zeigte sich, dass sich die Besucherlenkung positiv auf das Raumklima auswirkte und die besucherbedingten Beanspruchungen der Wandmalereien reduzierte. Ergänzend wurde 2011 ein neues rechnergestütztes Klimamesssystem installiert, das bis heute betrieben und fortwährend weiter entwickelt wird. Das Messsystem mit seinen mehr als 160 Sensoren erlaubt nicht nur eine Erfassung und Bewertung der Raumklima-Verhältnisse in der Kirche und Krypta sondern auch der an den malereitragenden Wandoberflächen vorherrschenden Nahfeldklimata. Damit ist eine wichtige Voraussetzung gegeben, um Fragen zur Tauwasserbelastung, zur potenziellen Gefahr des Schimmelpilzwachstums, zur Häufig-

keit des Phasenwechsels von Salzen sowie zum feuchtebedingten Formänderungsbestreben der oberflächennahen Materialschichten untersuchen, bearbeiten und beantworten zu können. Im Rahmen des DBU-Projektes sollten die zur Beanspruchung der Wandmalereien noch nicht verstandenen und geklärten Zusammenhänge zum materialtechnologischen Verhalten und der Schädigungsmechanismen als Folge örtlich gegebener Einwirkungen aus Nutzung, Schadstoffen und Nahfeldklima untersucht werden. Schließlich muss zur Erhaltung der ottonischen Wandmalereien die Kenntnis der eigentlichen Ursachen der in situ zu verzeichnenden Schäden verfügbar sein, wenn Maßnahmen zur Raumluftverbesserung im Sinne einer präventiven Klimastabilisierung erarbeitet, umgesetzt und erprobt werden sollen. Ziel war es, möglichst einfache und leicht kontrollierbare Anlagenkonzepte zu entwickeln und dabei die ehemals bereits in St. Georg verfügbaren anlagentechnischen Systeme zu nutzen, um Eingriffe und größere Investitionen zu vermeiden.

Überlegungen zur präventiven Klimastabilisierung

Die Zusammenführung aller Ergebnisse und Erkenntnisse, die im Rahmen bisheriger Untersuchungen (von den Untersuchungen der 1980er Jahre bis einschließlich der Arbeiten des DBU-Projekts) gewonnen wurden, haben dazu beigetragen, ein besseres Verständnis über die sich infolge ungünstiger Nahfeldklimaverhältnisse einstellenden Mechanismen zur Gefährdung und Schädigung der malereitragenden Wandoberflächen zu schaffen. Der heutige Sachstand zu den durch hohe Feuchte- und Schadstofflasten verursachten Schadensprozessen ist in den

Beiträgen von Reeb, Zöldtföldi/Bowitz, Schönmann/Paz, Neycheva, Frick/Reichert/Scheuven und Weinzierl dargelegt. In Tabelle 1 sind die relevanten Schadensmechanismen für die Raumbereiche der Krypta und der Kirche aufgezeigt. Ziel dieses Beitrages ist es, anhand der im Labor und in situ gewonnenen Erkenntnisse die klimatischen Anforderungen an das Raum- und Nahfeldklima zu definieren, bei dessen Einhaltung eine weitere Beanspruchung mit einhergehender Schädigung vermieden werden kann. Um diese Klimaverhältnisse zu schaffen, bedarf es geeigneter Konzepte zur Verbesserung der Raumluftverhältnisse.

Eine Präzisierung von Klimaanforderungen setzt voraus, das komplexe Wärme- und Feuchteverhalten an den malereitragenden Wandoberflächen beschreiben und bewerten zu können. Eine Vorgabe von scharfen Zielwerten für das anzustrebende Nahfeldklima ist aufgrund der Vielschichtigkeit der Beanspruchungsmechanismen kaum möglich. Vielmehr gilt es, vergleichs-

weise stabile Nahfeldklimaverhältnisse zu schaffen, die sich innerhalb eines leicht unscharfen Korridors bewegen. Dieser Zielkorridor muss aber sicherstellen, dass eine Gefährdung oder gar Schädigung der Wandmalereien ausgeschlossen wird. Schließlich müssen für jeden einzelnen in St. Georg zu verzeichnenden potenziellen Schadensmechanismus die mehr oder weniger scharfen bis unscharfen Zielwerte herausgearbeitet und beschrieben werden, um einen Abgleich mit der Ist-Situation vornehmen zu können. Rein mathematisch ist die Lösungsfindung für unscharfe Größen nur schwer möglich. Einfacher erweisen sich Fuzzy-Methoden, die das Arbeiten mit unscharfen Werten ermöglichen. Allerdings bedarf es komplexer Fuzzy-Arithmetikansätze, um im Kontext regelungstechnischer Aufgaben die Algorithmen zur Betriebsführung von raumluftechnischen Anlagen einer Lösungsfindung zuzuführen. Bislang gibt es nur wenige Beispiele, in denen die Leistungsfähigkeit der Fuzzy-Methoden zur Lösung raum-

Tabelle 1: Übersicht über die in der Kirche und Krypta zu berücksichtigenden Schadensmechanismen und der zur Vermeidung notwendigen Anforderungen an das Raum- bzw. Nahfeldklima.

Ort	Mechanismus	Feststellungen	anzustrebende Raumfeuchte (qualitativ)	zu fordernde Raumluftfeuchte (quantitativ)
Kirche	Schimmelpilzwachstum	Cladosporium	unterhalb der Grenze für Auskeimung und Wachstum	< 84 % r. F.
	sorptionsbedingte Formänderungen	sorptionsfähiger Oberflächenverbund durch kaseinhaltige Lasur auf kalkgebundener Wandmalerei	gleichbleibend; mit fallender Außentemperatur leicht steigend zur Minimierung Energiekosten und begrenzter Wärmeleistung Heizung	20 °C / 70 % r. F. 15 °C / 75 % r. F. 10 °C / 80 % r. F. 5 °C / 85 % r. F.
Krypta	Schimmelpilzwachstum	Engyodontium album und Actinomyceten	unterhalb der Grenze für Auskeimung und Wachstum	Werte nicht bekannt Bislang bewährte Annahmen: → 20 °C / < 73 % r. F. Belüftung aktiv → 10 °C / < 75 % r. F. teilweise Belüftung → 5 °C / < 85 % r. F. Fenster geschlossen
	bauschädliche Salze	KNO ₃ NaNO ₃ MgSO ₄ 6H ₂ O	Orientierung an Deliqueszenzfeuchte KNO ₃ < 90 % r. F. NaNO ₃ < 75 % r. F. MgSO ₄ 6H ₂ O < 60 % r. F.	Anlehnung an Anforderung Schimmelwachstum, da ansonsten zu starke Trocknung, die hohe Energiekosten und deutliche Unterschreitung der Deliqueszenzfeuchte mit starken Ausblühungen bewirken würde
	aufsteigende Feuchte	Westwand hohe Feuchtelast	keine zu starke Absenkung wegen Trocknung und Salzanreicherung	70 % r. F. bis 80 % r. F. um leichte Trocknung zu ermöglichen
	sorptionsbedingte Formänderungen	geringes Formänderungsbestreben der kalkgebundenen Malerei	gleichbleibend mit Außenklima gleitend	15 °C / 85 % r. F. 10 °C / 80 % r. F. 5 °C / 80 % r. F.

lufttechnischer Problemstellungen zum Einsatz kamen (vgl. Arnold 2013; Bernard 2000). Auch wenn im DBU-Vorhaben die Fuzzy-Methode nicht zur Lösung der regelungstechnischen Lösungsansätze zum Einsatz kam, sieht der Verfasser aber für die weiteren Überlegungen ein erhebliches Potenzial, die komplexen raumklimatischen Problemstellungen mit derartigen Lösungsansätzen noch besser beschreiben zu können.

Eine wichtige Aufgabe der Zielwertfestlegung ist es, so wenig wie möglich korrigierend in die vorherrschenden Raumklimaverhältnisse einzugreifen. So soll sichergestellt werden, dass die Maßnahmen den Schadensprozess unterbinden, der erforderliche Einsatz an Anlagentechnik und Energie aber minimiert wird.

Neben einer Optimierung des Regelbetriebs der Kippfenster zur Verbesserung der Raumluftverhältnisse durch eine Querbelüftung, wie dieser in den Abschnitten über Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas in der Krypta und in der Kirche ausführlicher behandelt wird, bedarf es während der kalten Witterungsperioden einer Erwärmung der Raumluft, um die relative Feuchte im Nahfeld der Wandmalereien unter den oberen Grenzwert des Zielkorridors zu führen. Ziel der präventiven Klimastabilisierung ist es dabei nicht, die Nahfeldverhältnisse abweichend vom oberen Grenzwert zur Sicherheit deutlich zu unterschreiten. Vielmehr ist es aus Sicht des Verfassers von Bedeutung, sich möglichst nah am oberen Grenzwert als Zielwert zu orientieren. Damit wird einerseits sichergestellt, dass während der kalten Witterungsperioden mit einer geringen Temperaturerhöhung der Raumluft um wenige Kelvin eine merkliche und für das Präventionsziel ausreichende Absenkung der Nahfeldfeuchte erreicht werden kann. Auf diese Weise kann auch ein minimaler Energieaufwand und damit ein wirtschaftlicher Betrieb der präventiven Klimastabilisierung sichergestellt werden. Nur mit einer Betriebsführung mit Augenmaß und einer Kostenbegrenzung ist eine langfristige Akzeptanz der Nutzer und Betreiber zu erwarten, die für einen nachhaltigen Erfolg unerlässlich ist. Weniger ist mehr, so könnte der Anspruch zusammengefasst werden.

Dabei gilt es, viele weitere Aspekte bei der Festlegung des anzustrebenden Klimakorridors zu beachten. Neben der Findung der Schnittmenge aller Anforderungen an die Zielfeuchte zur Vermeidung der diversen relevanten Schadensmechanismen müssen auch die Witterungsver-

hältnisse in geeigneter Weise Berücksichtigung finden. So muss über die aktuellen Messwerte von Temperatur und relativer Feuchte der Außenluft in der Regelentscheidung auch die zurückliegende Veränderung der Temperatur- und Feuchteverhältnisse durch die in den letzten Tagen vorherrschenden Witterungsverhältnisse berücksichtigt werden. Schließlich verfügt die Randzone infolge ihres Verharrungsvermögens über ein klimabeeinflusstes Gedächtnis, das sich in Form des gerade in der Wandoberfläche vorherrschenden Feuchte- und Temperaturzustands ausdrückt. Aber auch zeitnahe zukünftige Veränderungen als Folge der für die nächsten Tage prognostizierten Witterungsverhältnisse sollten Eingang in die Regelentscheidung finden.

Ferner ist zu beachten, dass zur Vermeidung der relevanten Schadensmechanismen in den kalten Winterperioden nicht die gleichen Anforderungen an das Zielklima zu stellen sind, wie während wärmerer Witterungsverhältnisse.

Auch wenn der Aspekt der Wetterprognose noch nicht in die neu konzipierte Regelstrategie eingearbeitet wurde, so kann für die Krypta mit der im DBU-Projekt entwickelten, umgesetzten, erprobten und nunmehr seit einem Jahr in den Normalbetrieb überführten Maßnahmen, die im Kapitel über Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas in der Krypta eingehender erläutert werden, belegt werden, dass sich mit einer moderaten Grenzwertfestlegung eine hinreichende Stabilisierung der Raumklimaverhältnisse erreichen lässt und einer weiteren Schädigung der Wandmalereien zuverlässig vorgebeugt werden kann.

Auch wenn in dem aktuell im Betrieb befindlichen Regelkonzept der obere Grenzwert des Klimakorridors für einzelne potenzielle Schadensmechanismen den Übergangsbereich zwischen Aktivitäts- und Ruhezustand streift, so erscheint dieses Vorgehen in Anbetracht der von der Denkmalpflege auch künftig durchzuführenden jährlichen Kontrolle und Wartung gerechtfertigt. Sollten sich unerwarteter Weise doch Veränderungen seit der letzten Kontrolle innerhalb eines Jahres einstellen, werden diese rechtzeitig erkannt, ohne dass substanzgefährdende Schädigungen eintreten konnten. Dann kann sogleich eine korrigierende Anpassung des oberen Grenzwertes des Zielkorridors vorgenommen werden, damit eine weitere Schadensentwicklung ausgeschlossen wird.

Die präventive Klimatisierung stellt folglich kein Rundum-sorglos-Paket dar. Vielmehr beugt sie

einer Gefährdung der Wandmalereien durch das Anstreben der Einhaltung eines vorgegebenen Klimakorridors vor. Aber nur mit weiteren Kontrollen und ggf. erforderlichen Anpassungen kann das Gesamtsystem so optimiert werden, dass eine nachhaltige und langfristige Prävention sichergestellt werden kann. Dies verlangt allen Beteiligten ein hohes Maß an konstruktivem und verantwortlichem Handeln ab.

Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas in der Krypta

Raumklimabedingte Beanspruchungen

Die materialkundlichen Untersuchungsergebnisse zeigen (vgl. Beitrag Zöldföldi), dass in den unteren Wandbereichen der Krypta, insbesondere an der Westwand der Kryptahalle, eine hohe Feuchtelast gegeben ist. Bei niedriger Raumluftfeuchte liegen am Sockelmauerwerk günstige Trocknungsbedingungen vor und der Feuchtehorizont verlagert sich in die unteren Mauerwerksabschnitte und darüber von der Oberfläche in tiefergelegene Bauteilschichten zurück. Nimmt hingegen die relative Feuchte zu, verschlechtern sich die Trocknungsbedingungen und der Feuchtehorizont bewegt sich wieder zur Wandoberfläche. Verantwortlich ist neben den Trocknungsrandbedingungen das kapillare Feuchteverhalten des aufgehenden Mauerwerks. Bei hohem Feuchteangebot im Baugrund und bei ungünstigen Trocknungsbedingungen an der raumseitigen Wandoberfläche kommt es zu einem Ansteigen des sichtbaren Feuchtehorizonts. Dies zeichnet sich durch eine dunkler werdende Wandoberfläche ab. Abhängig der Feuchteigenschaften der Mauerwerksmaterialien wie auch der Putze und Malschichten kann abhängig des Feuchteangebots der Feuchtehorizont bis in höhere Wandbereiche ansteigen. Mit einer hohen Materialfeuchte können verschiedenste Schadensmechanismen ausgelöst werden. Hohe Feuchtelasten führen zu chemischen und/oder physikalischen Materialveränderungen und zum Freisetzen löslicher Bestandteile. Mit der aufsteigenden Feuchte können aber auch schädigende Salze aus dem Baugrund und dem Grundwasser aufgenommen und bis zur raumseitigen Verdunstungszone geführt werden, die sich hier anreichern.

So lassen sich in der Sockelzone des Kryptamauerwerks die Probleme des feuchtebelasteten

Mauerwerks sehr gut ablesen. Hier sind sowohl bauzeitliche Deckputze als auch Mörtelergänzungen in Kalkputztechnik vorhanden.

Neben der Salzbelastung sind vor allem aber auch Schimmelpilze zu nennen, die infolge der hohen Mauerwerksfeuchte wie auch der hohen Raumluftfeuchte günstige Wachstumsbedingungen vorfinden. Nicht zuletzt kann ebenfalls das mit der Feuchteänderung einhergehende hygrische Formänderungsbestreben angeführt werden, das im Falle einer Trocknung zum Schwinden und im Falle einer Befeuchtung (Anstieg des Feuchtehorizonts wegen ungünstiger Trocknungsverhältnisse oder Tauwasserbildung auf der Wandoberfläche) zum Quellen der oberflächennahen Zone führt.

Um diese Mechanismen mit deren jeweiligen Gefährdungspotenzialen zu vermeiden, müssen Raumklimaverhältnisse in der Krypta geschaffen werden, die ausreichende Trocknungsmöglichkeiten bieten, sodass der Feuchtehorizont in tiefer gelegenen Wandbereichen verbleibt (also nicht an die Oberfläche kommt), im Sockelbereich zumindest innerhalb der Ergänzungsmörtel/bauzeitlichen Mörtel gehalten werden kann.

Entsprechend der Ausführungen bei Garrecht 1992 wurden mit einfachen Annahmen Simulationen zum hygrothermischen Verhalten des aufgehenden Mauerwerksbauteils in der Krypta durchgeführt. Ziel war es, die Verhältnisse der relativen Feuchte im Nahfeld der Wandoberflächen zu identifizieren, mit denen der Feuchtehorizont im Mauerwerksinneren bzw. im Mauersockel zumindest innerhalb der Putzschicht gehalten werden kann. Rechnerisch konnte dieser Zustand mit einer Raumluftfeuchte von unter 80 % r. F. erreicht werden.

Bzgl. der zu findenden Salze zeigt die Zusammenstellung in Tabelle 1, dass bei der üblicherweise hohen Raumluftfeuchte in der Krypta einzig die Klimanitratsalze bei 80 % r. F. auskristallisieren. Alle anderen im Mauerwerk zu erwartenden Salzkristalle finden sich bei diesen hohen Raumluftfeuchten in gelöster Form.

Zum Raumklima in der Krypta

Mit dem 2011 neu installierten Klimamesssystem wurde ein sehr umfassendes Messnetz in der Krypta eingerichtet, das erlaubt, die sich im Jahres- und Tagesverlauf einstellenden Klimaverhältnisse in allen interessierenden Raumberei-

chen und Wandoberflächen zu analysieren. Abbildung 1 zeigt den absoluten Feuchtegehalt der Luft im Außenbereich und in der Krypta. Der Verlauf der gemessenen Daten verdeutlicht, dass die absoluten Feuchtegehalte im Raum und im Freien von Mai bis November 2011 annähernd gleich sind. Doch von diesem Zeitpunkt an liegen die Werte in der Krypta höher als im Freien, obgleich gerade während der wärmeren Witterungsperioden günstigere Verhältnisse vorliegen. Grund hierfür ist, dass die Fenster in diesem Zeitraum geschlossen blieben, obgleich mit dem Öffnen der Fenster die Raumluftsituation hätte verbessert werden können.

Die relative Feuchte der Luft in der Krypta und im Freien ist in Abbildung 2 gezeigt. Hier zeigt sich bis November 2011 zwar eine günstigere Situation als in den nachfolgenden Monaten, doch werden weitere Verbesserungen durch eine optimierte Belüftungsstrategie erwartet, in dem eine von der Bewertung der Nahfeldverhältnisse abhängige Belüftungsstrategie im Rahmen des DBU-Projekts realisiert wurde. Die beiden Abbildungen wurden nicht gewählt, um über die Sinnhaftigkeit der früheren Regelstrategie zum kontrollierten Öffnen und Schließen der Fenster zu diskutieren. Schließlich wurde der Regelalgorithmus vom Anlagenhersteller sofort nach den vorgenannten Feststellungen behoben. Das Beispiel wurde gewählt, um zu verdeutlichen, dass das Lüftungssystem erhebliches Potenzial bie-

tet, das Raum- und Nahfeldklima in der Krypta zu verbessern. Doch bedarf es einer Regelstrategie, die über den Vergleich der absoluten Feuchtegehalte im Innern und Äußeren hinausgeht und die Verhältnisse an den Oberflächen als wesentliches Kriterium der Regelentscheidung für eine Belüftung vorsieht. So werden im Nachgang einer kalten Witterungsperiode die Fenster länger geschlossen bleiben (Klimagedächtnis), doch können nach einer warmen Witterungsperiode beispielsweise die Fenster deutlich länger geöffnet werden und entlasten so den Raum.

Aber selbst mit einer optimierten Regelstrategie des Fensterbetriebs wird es nicht möglich sein, über alle Zeiträume eines Jahres hinweg die Feuchteverhältnisse in einem zur Schadensvermeidung sicheren Korridor zu halten. Unterstützend muss die Raumluft leicht erwärmt werden, um die relative Feuchte auf den oberen Grenzwert des Klimakorridors abzusenken.

Maßnahmenentwicklung und deren Umsetzung

Um das Klima in der Krypta zu verbessern, musste eine auf die problemspezifischen Besonderheiten des Seeklimas und der besonderen Raumsituation in der Krypta abzustimmende Regelungsstrategie für das Öffnen und Schließen der

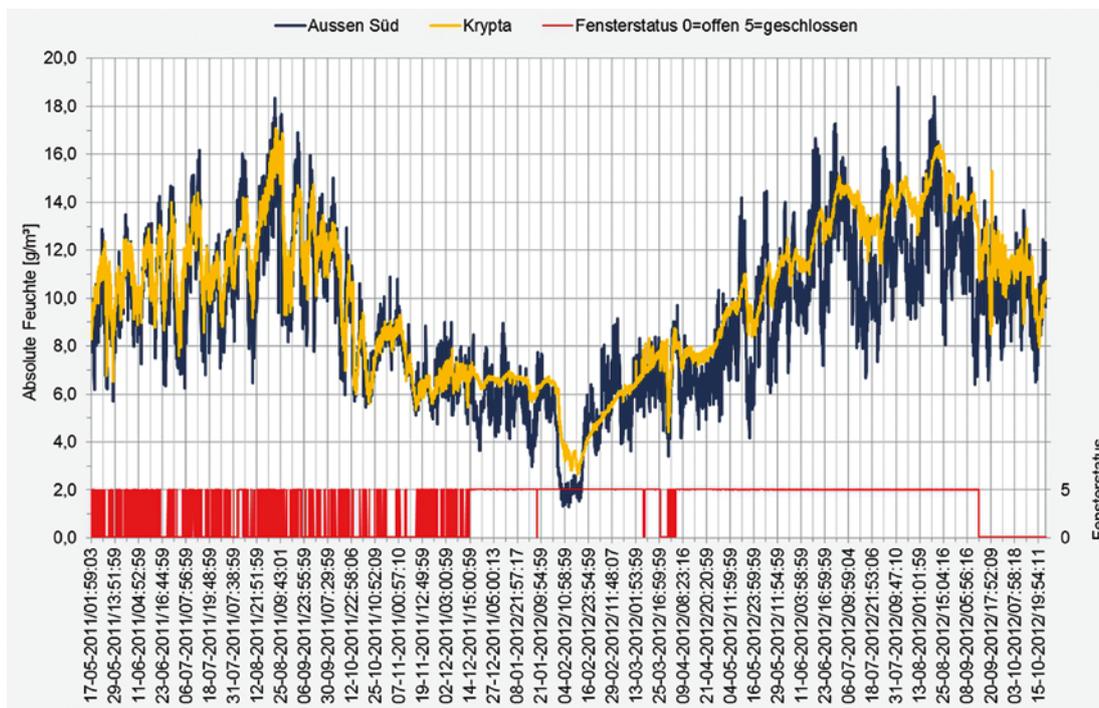
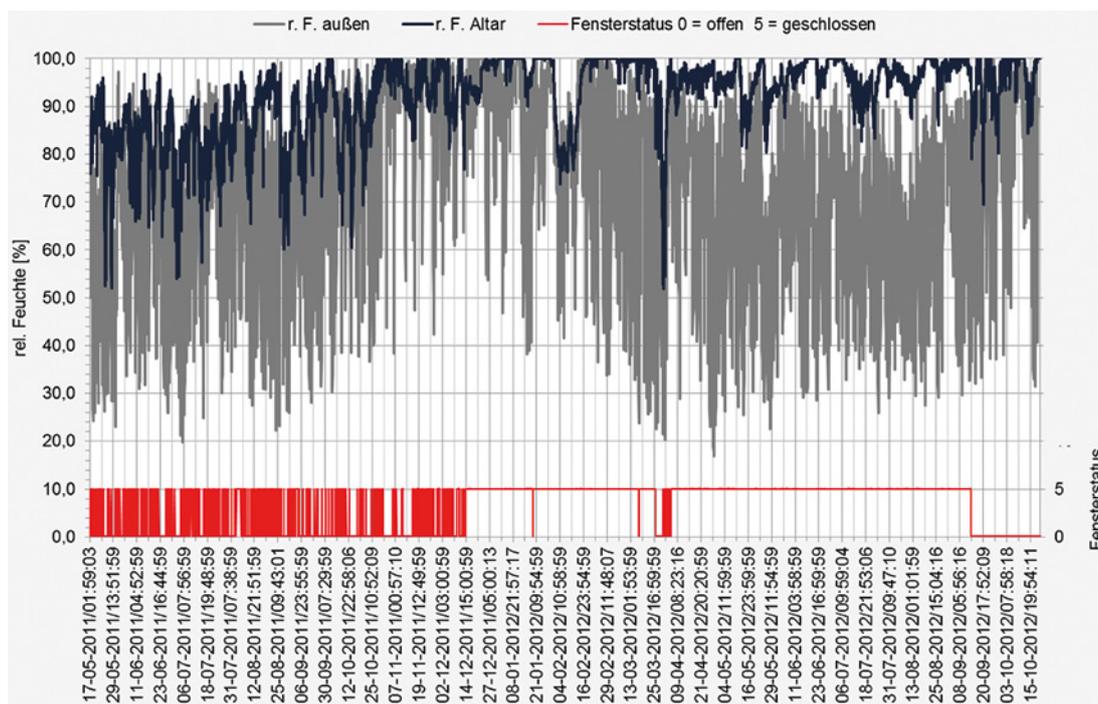


Abb. 1: Gegenüberstellung der absoluten Feuchtegehalte der Luft im Inneren der Krypta und im Freien sowie Darstellung der zugehörigen Fensterstellung (MPA, Garrecht).

Abb. 2:
Gegenüberstellung der
relativen Feuchte der
Luft im Inneren der Kryp-
ta und im Freien sowie
Darstellung der zuge-
hörigen Fensterstellung
(MPA, Garrecht).



beiden gegenüberliegenden elektrisch ansteuerbaren Kippfenster entwickelt werden. Die Raumbelüftung über die Fenster alleine reicht jedoch nicht aus, um das Raumklima in der Krypta so zu verbessern, dass die in den Kapiteln Raumklima- bedingte Beanspruchungen und zum Raumklima in der Krypta aufgezeigten Schadensmechanismen künftig vermieden werden. Notwendig ist eine moderate Wärmezufuhr, um die Raumtemperatur soweit anzuheben, dass die relative Feuchte auf den Zielwert abgesenkt wird.

Festlegung des Klimakorridors

Um die in Tabelle 1 aufgezeigten und für die Krypta relevanten Schadensprozesse zu vermeiden, ist ein von den jahreszeitlichen Witterungsverhältnissen und damit von der Außentemperatur abhängiger Verlauf des oberen Grenzwertes des anzustrebenden Zielkorridors für die Krypta abzuleiten. In Abbildung 3 ist dieser funktionale Zusammenhang dargestellt, wie er in der im DBU-Projekt entwickelten Regelstrategie zugrunde liegt. Da die Schimmelpilzaktivitäten während kalter Witterungsperioden geringer als während wärmerer sind und zudem der absolute Feuchtegehalt der Luft im Winter deutlich geringer als in den warmen Jahreszeiten ist, wird bei Temperaturen unter 10 °C eine höhere relative Feuchte zugelassen, als bei höheren Temperaturen. Diese Unterscheidung erlaubt, an kalten Wintertagen eine geringere Absenkung der rela-

tiven Feuchte einzufordern, sodass für die hierfür erforderliche Wärmezufuhr ein geringerer Energieeinsatz erforderlich wird.

Demgegenüber fordert die Übergangszeit eine größere Absenkung der Raumluftfeuchte. Dabei ist von Vorteil, dass durch die günstigeren Witterungsverhältnisse das Absenkungsziel nicht nur mit einer Erwärmung der Raumluft sondern auch mit einer Querbelüftung erreicht werden kann.

Reduzierung der Raumluftfeuchte durch eine kontrollierte Querbelüftung

Während der wärmeren Frühjahrs- und Herbstperioden wie auch während der Sommermonate sollte die Einhaltung der oberen Grenzfeuchte im Allgemeinen über die optimierte Querbelüftung der Krypta erreicht werden. Schließlich verdeutlicht Abbildung 2, dass die relative Feuchte der Außenluft von April bis Oktober im Mittel bei 60 % r. F. annimmt und je nach Witterungsverhältnissen zwischen 20 % r. F. und 90 % r. F. schwankt.

Auch für den Fall, dass der absolute Feuchtegehalt im Innern und Äußeren nahezu gleich ist, sollte die Regelstrategie der Krypta ein Öffnen der Fenster zulassen. So kann auch in diesen Zeiträumen mit der Querbelüftung eine Verbesserung herbeigeführt werden, schließlich wird in gut belüfteten Räumen die Schimmelpilzbildung erschwert. Doch muss in den jede Minute wiederkehrenden Mess- und Regelzyk-

len überprüft werden, ob die Querbelüftung an den Wandoberflächen zu Kondensat führt, was zu vermeiden wäre. Zudem muss während der kälteren Witterungsperioden berücksichtigt werden, dass sich die wandoberflächennahen Bereiche nicht zu stark abkühlen können, die eine erhöhte Tauwasserbildung in der Vorschau auf prognostizierte Witterungsbedingungen bewirken würde, sodass ein Geschlossenhalten der Kippfenster zu bevorzugen wäre.

Reduzierung der Raumluftfeuchte durch eine kontrollierte Wärmezufuhr

Ergänzend zur Absenkung der relativen Feuchte durch eine Querbelüftung kann insbesondere während der kälteren Witterungsperioden eine alternative Absenkung durch eine Erwärmung der Raumluft erforderlich werden. Hierzu wurden im DBU-Projekt vor den Wandflächen der Kryptahalle vier elektrische Heizregister in Form von Rippenheizrohren aufgestellt, die über eine Wärmeleistung von je 1 KW verfügen. Abbildung 4 zeigt zwei Heizregister im Bereich der Ostwand.

Es wurden Rippenheizkörper gewählt, da diese die Wärme konvektiv über die längs des Rohres befindlichen Rippenbleche abgeben. Somit wird die Wärme linienförmig freigegeben und führt zu einem Aufstieg der an den Rippen erwärmten Luft. Dank der vergleichsweise geringen Wärmeabgabeleistung führt die aufsteigende Warmluft zu einer moderaten und gleichmäßigen Beschleierung der Wandoberflächen. Unerwünschte lokale Wärmefelder lassen sich vermeiden.

Zwei weitere Heizregister gleicher Bauart wurden im Längsstollen der Krypta aufgestellt. Wechseln die Witterungsverhältnisse von einer trockenen kalten zu einer warmen und meist feuchteren Wetter-situation, lassen sich in den folgenden Tagen und Wochen im Verbindungsgang zwischen Kirche und Krypta je nach Möglichkeiten des Luftaustausches mehr oder weniger intensive Tauwasserausfälle verzeichnen. Zur Unterbindung von Zegerscheinungen in der Kirche wurden die beiden Zugangsgitter mit manuell zu öffnenden und schließenden Glasflügeln ausgestattet. Diese können zukünftig auch genutzt werden, um das Einströmen von feuchtwarmen Luftmassen in den noch kalten Verbindungsstollen zu unterbinden. Ergänzend soll mit den beiden Rippenheizrohren die Oberflächentemperatur der Putze im Stollen leicht angehoben werden, sodass sich in Verbindung mit einer geeigneten Belüftungsstrategie in der Krypta

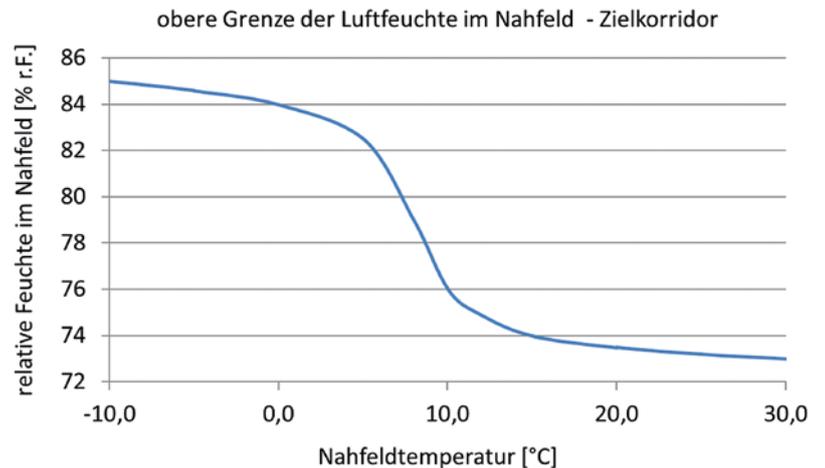


Abb. 3: Nichtlinearer Verlauf der von der Temperatur abhängigen Zielfeuchte (MPA, Garrecht).

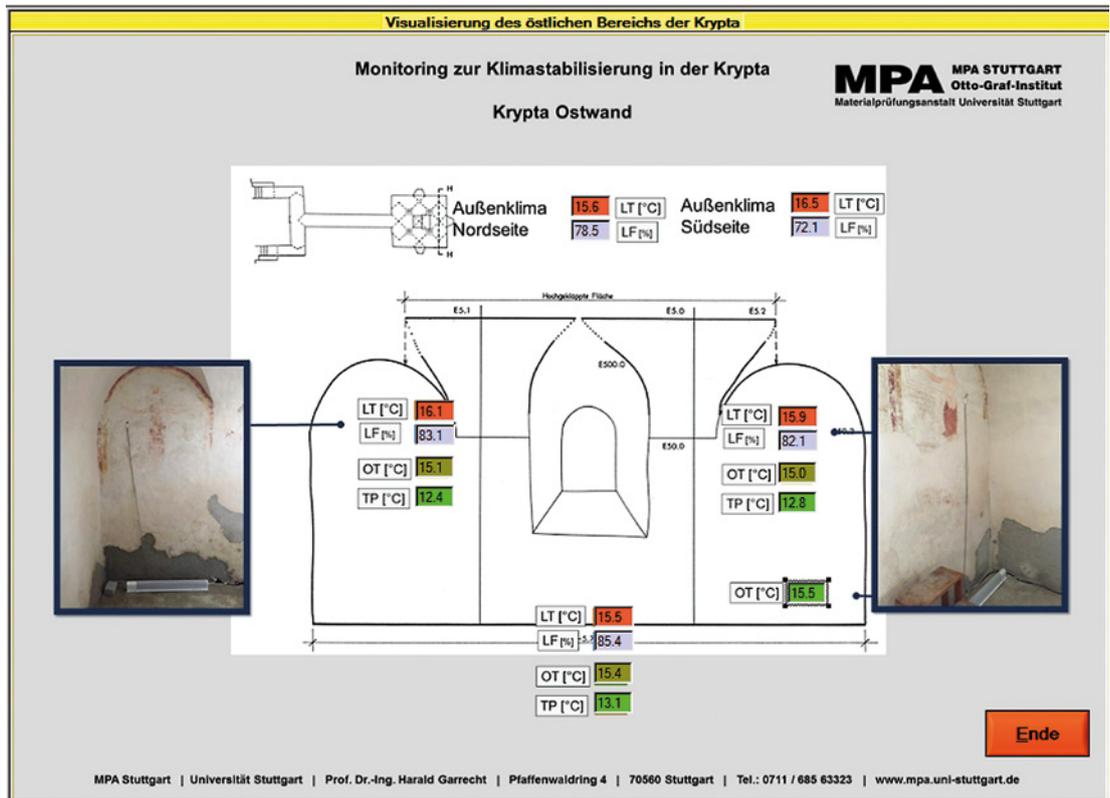
und einem visuellen Hinweis (z. B. rote oder grüne Ampel) für die geeignete Stellung der Glasflügel an den Gittertüren des Kryptazugangs eine deutliche Verringerung der Tauwasserlast erreichen lässt und auch die Gefahr von Schimmelpilzwachstum weitestgehend ausgeschlossen wird.

Regelstrategiefindung zum bedarfsgerechten Betrieb der Kippfenster und Heizregister

Um die Kippfenster und die Heizregister in der Krypta anzusteuern, wurde eine Regelstrategie entwickelt, die abhängig der vorherrschenden Witterungsverhältnisse darüber entscheidet, ob wegen einer Überschreitung des oberen Grenzwerts der Nahfeldfeuchten eine Absenkung der Raumluftfeuchte bevorzugt über eine Querbelüftung oder durch eine Wärmezufuhr vorzunehmen ist. Hierbei sollen auch bevorstehende Wetteränderungen in die Bewertung einfließen. Während der kalten Witterungsperioden wird dem Betrieb der Heizregister der Vorzug gegeben, da mit einer Querbelüftung, sofern diese überhaupt eine Verbesserung erzielen könnte, die Mauerwerksoberflächen so stark auskühlen würden, dass beim nächsten Wetterumschwung die in die Krypta eintretenden feuchtwarmen Außenluftmassen erhebliche Tauwasserausfälle bewirken würden. Andererseits soll mit den Heizregistern nur so viel Wärme dem Raum zugeführt werden, dass die relative Feuchte auf den Zielwert abgesenkt werden kann. Zur Begrenzung des Energieeinsatzes soll die Wärmezufuhr auf das wirklich notwendige Maß beschränkt werden.

Während der wärmeren Witterungsperioden wird der Querbelüftung der Vorzug gegeben. Komplexer wird die Findung der Regelentscheidung in den Übergangszeiträumen. Hier muss

Abb. 4:
Blick auf die MSR-
Nutzeroberfläche zur
Visualisierung der Nah-
feldbedingungen an der
Krypta-Ostwand mit
Fotos zur Aufstellung der
Rippenheizrohre (5. Ok-
tober 2015 15:22 Uhr)
(MPA, Garrecht).



neben den Absenkungszielen auch die Frage der Tauwasserbildung berücksichtigt werden. Grundsätzlich muss ein gleichzeitiges Betreiben von Querbelüftung und Raumlüfterwärmung regelungstechnisch ausgeschlossen werden. Doch kann ein kurzes Öffnen der Fenster während der Heizphasen bei vorheriger Abschaltung der Heizregister durchaus zielführend sein, um gleich dem bekannten kurzen Lüften von Wohnräumen die hohe Feuchtelast der Raumluft, die sich z. B. aus der Trocknung des Mauerwerks ergibt, kontrolliert nach außen abzuführen. Softwaretechnisch wird die Regelstrategiefindung derart umgesetzt, dass jede Minute zyklisch diese Messsignale zu den Raumluft- und Nahfeldverhältnissen abgerufen, ausgewertet, gespeichert und bewertet werden. Die Sensorinformationen werden dabei in gruppierter Weise bearbeitet, um sicherzustellen, dass alle Sensoren, die in unmittelbarer Nachbarschaft eines Heizregisters liegen, in der für die Regelentscheidung notwendigen Bewertung Berücksichtigung finden. Alle Rippenheizrohre werden individuell angesteuert, um eine auf das lokale Umfeld bedarfsangepasste Steuerung der Wärme freisetzenen Rippenheizrohre zu realisieren. Sowohl die Findung der Regelentscheidung für das Heizen wie auch für das Querlüften lässt

sich durch eine Gewichtung der im jeweiligen Regelkreis zu berücksichtigenden Sensoren auf die jeweils örtlich gegebenen Verhältnisse anpassen. Ziel der verwendeten Gewichtungsfaktoren ist, der Bedeutung des Sensorpunktes im Hinblick auf die Notwendigkeit der Einhaltung des Klimakorridors Rechnung zu tragen. So wird den Nahfeldfeuchten und der Tauwassergefahr an der Wandoberfläche eine größere Beachtung geschenkt, als den im Raum verteilten Sensoren zur Erfassung des Raumklimas, da die an den Wandoberflächen zu verzeichnenden Nahfeldfeuchten eine größere Bedeutung für die potenzielle Gefährdung der Wandmalereien haben. Entscheidet sich die Regelungssoftware zugunsten des Betriebs der Heizregister, wird für jeden Heizkörper die unmittelbare Nahfeldsituation bewertet. Abhängig der Feststellung, ob eine Verbesserung zur Erreichung des Zielwertes erforderlich ist, werden dann all jene Heizregister identifiziert, deren Betrieb erforderlich ist, um einer Verbesserung im jeweiligen Umfeld zu erzielen. Alle zu betreibenden Heizregister erhalten dann den für den Betrieb relevanten Impuls. Werden die Feuchteverhältnisse an der interessierenden Oberfläche in Richtung des Zielwertes geführt, besteht Gefahr, dass die Heizgeräte mit jedem Messzyklus im Wechsel ein- und ausge-

schalten werden. Um dies zu vermeiden, wurde eine Schalthysterese vorgesehen. Die Einschaltung erfolgt so erst nach dem Überschreiten eines Vorhaltemaßes über der Zielfeuchte. Umgekehrt wird das Heizregister erst ausgeschaltet, wenn die Zielfeuchte um ein zuvor festgelegtes Vorhaltemaß unterschritten wurde. Softwaretechnisch lässt sich ein solcher Regelkreis auf vergleichsweise einfache Weise umsetzen.

In ähnlicher Weise werden auch die beiden im Stollen der Krypta befindlichen Heizregister betrieben. Hier wird der Betrieb der Heizregister aber auch an den vorherrschenden Raumluftverhältnissen von Kirche und Krypta angepasst, um den sich zwischen beiden Raumbereichen einstellenden Luftaustausch abhängig der Glasflügelstellung an den Kryptazugängen zu berücksichtigen.

Umsetzung der Maßnahme, Inbetriebnahme und Optimierung des Regelbetriebs

Mit der anlagentechnischen Umsetzung wurden zunächst die elektrischen Heizregister aufgestellt und die für die Ansteuerung der Heizung und Kippfenster erforderlichen Regelbaugruppen installiert. Anschließend wurden die für den Betrieb der Fenster und der Rippenheizrohre entwickelten Softwaremodule in das bereits seit 2011 laufende Softwarepaket zur Erfassung und Visualisierung der Klimamessungen integriert. Nach dem erfolgreichen Aufspielen und Überprüfen der Software konnte im Spätsommer 2015 ein erster Testbetrieb vorgenommen werden. Anschließend wurde eine umfassende Plausibilitätsprüfung aller Regelentscheidungen abhängig der Sensorgruppierungen unter realen Umgebungsverhältnissen vorgenommen. Zudem wurde der automatische Betrieb aller ansteuerbaren Kippfenster und Heizregister überprüft. Seit August 2015 konnte der Regelbetrieb zur präventiven Klimastabilisierung in der Krypta aufgenommen werden. Abbildung 5 zeigt die Visualisierung der Klimamessdaten wie auch der Regelentscheidungen des Messrechners beispielsweise für den 5. Oktober 2015 um 15:22 Uhr.

Um eine optimale Betriebsweise der ansteuerbaren Anlagenkomponenten vornehmen zu können, wurde auch eine Parametrisierung vorgesehen, die es erlaubt, die Entscheidungsfindung der diversen Regelkreise und Regelaufgaben zu optimieren.

Die seitherigen Untersuchungen der Projektpartner belegen, dass die angestrebte Verbesserung des Raumklimas in der Krypta nicht nur anhand der Messdaten sondern auch durch eine Vermeidung einer weiteren Schädigung erfolgreich realisiert werden konnte. Dennoch müssen die in den kommenden Jahren zu gewinnenden Erkenntnisse während der Kontrollen und Wartungen genutzt werden, um die aktuell gewählten oberen Grenzwerte des anzustrebenden Klimakorridors abzusichern und weitere Verbesserungen der Regelstrategie zukünftig vorzunehmen.

Maßnahmen zur Verbesserung des Raumklimas in der Kirche

Raumluftverhältnisse in der Kirche und daraus ableitbare Beanspruchungen

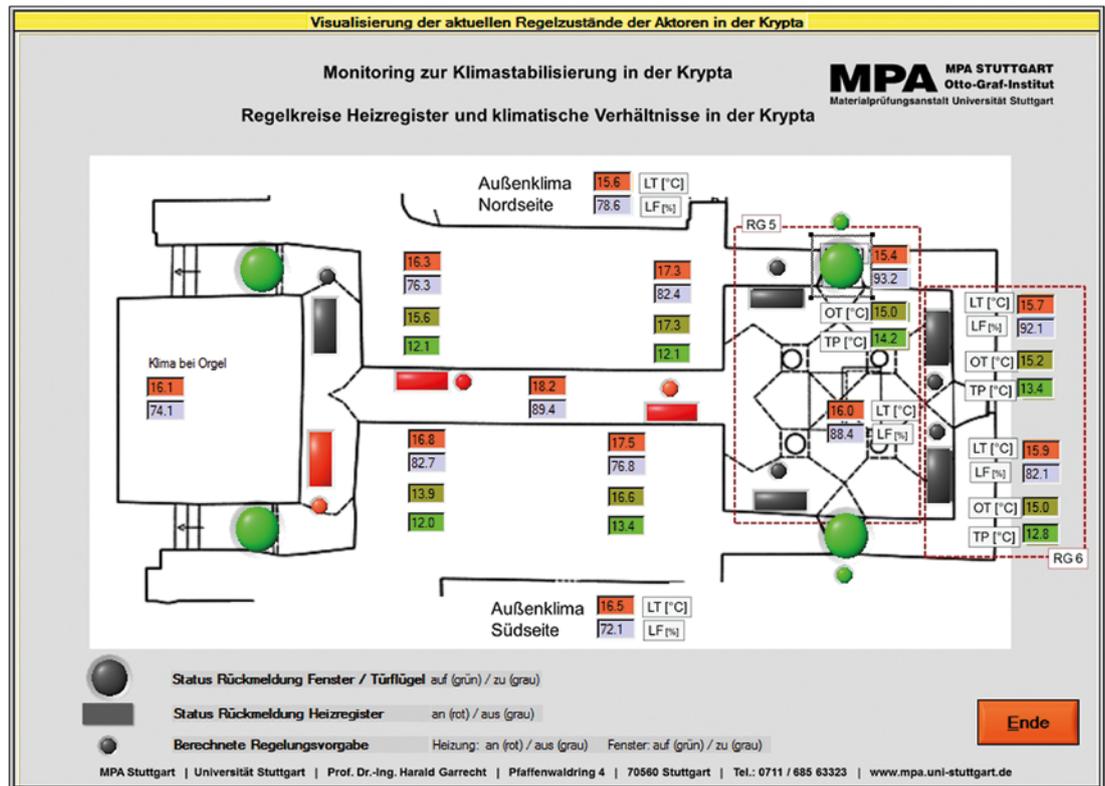
Auch in der Kirche ist die Gefährdung der ottonischen Wandmalereien zu vermeiden und bei der Ausarbeitung des Maßnahmenkonzeptes sind die seit 2001 aufgezeichneten Klimaverhältnisse heranzuziehen. Diese Aufgabe hat Elka Neycheva im Rahmen ihrer Masterarbeit mit großer Sorgfalt übernommen (Neycheva 2012). Sie hat die große Datenmenge entsprechend der im Kapitel Überlegungen zur präventiven Klimastabilisierung aufgezeigten Problemstellungen analysiert und zudem ein Analysetool entwickelt, mit dem es möglich ist, für jeden Sensorstandort die im gesamten Messzeitraum beobachteten und vom Nahfeldklima abhängigen Beanspruchungen für die relevanten Schadensmechanismen abzuleiten, sodass nunmehr eine zuverlässige Bewertung der klimabedingten Gefährdungspotenziale der Wandmalereien gegeben werden kann. Eine Übersicht zur Auswertung und Bewertung der klimabedingten Beanspruchungen der Wandmalereien finden sich im Beitrag von Neycheva.

Maßnahmen zur Raumluftoptimierung

Anlagentechnische Komponenten zur Raumluftoptimierung

Gleich der für die Krypta aufgezeigten Überlegungen waren auch für die in der Kirche gemäß Tabelle 1 aufgezeigten Mechanismen einer potenziellen Gefährdung der Wandmalereien

Abb. 5:
Blick auf die MSR-Nutzer-
zeroberfläche zur Visuali-
sierung der Klima- und
Nahfeldverhältnisse und
der Schaltzustände von
Rippenheizrohren und
Kippfenster in der Krypta
(5. Oktober 2015
15:22 Uhr) (MPA,
Garrecht).



geeignete Maßnahmen herauszuarbeiten, mit denen eine hinreichende Verbesserung der Raumluftverhältnisse geschaffen werden können, die eine künftig fortschreitende Schädigung nachhaltig unterbinden. Auch in der Kirche kann die Querbelüftung der Kirche und eine an der jeweiligen Beanspruchung orientierte Erwärmung der Raumluft realisiert werden, die die Zielsetzung einer präventiven Klimastabilisierung erfüllen können.

Zur automatischen Querbelüftung der Kirche erfolgte bereits Ende 2005 in den Seitenschiffen die Ausstattung der Kippfenster mit einem elektrischen Öffnungs- und Schließmechanismus. Im südlichen und im nördlichen Seitenschiff wurden jeweils vier Kippfenster und je ein weiteres Kippfenster auf der Süd- und auf der Nordseite des Chores mit einem Fenstermotor ausgestattet. Die Fenster im Obergaden lassen sich zur Vermeidung größerer Klimaschwankungen und der Gefährdung durch Wassereintrag im Umfeld der Wandmalereien nicht öffnen.

Die Kirche ist mit einer elektrischen Sitzbankheizung ausgestattet, die bislang einzig zur leichten Wärmekonditionierung während der Gottesdienste in kalten Witterungsperioden betrieben werden. Die mit elektrischen Sitzbankheizungen ausgestatteten Bänke lassen sich in mehreren

Gruppen abhängig der Zahl an Gottesdienstbesuchern betreiben. Sowohl die auf der Nordseite als auch die auf der Südseite befindlichen Bänke lassen sich in drei Gruppen in Gang setzen, um abhängig des Wärmebedarfs zur Absenkung der Raumluftfeuchte die Heizkreise bedarfsgerecht zu aktivieren.

Zudem wurden 2005 vier Lüftungsschächte in der Decke installiert, die eine thermische Abluft aus dem Innenraum ermöglichen sollten. Die seit dem Klimamonitoring ab 2011 durchgeführten Strömungsmessungen zeigten aber, dass die thermische Abluft nicht die ursprünglich angedachten Strömungsvorgänge bewirkte.

Von einer Integration der Lüftungsschächte in das zukünftige Maßnahmenkonzept wurde vorerst abgesehen, da zunächst versucht werden sollte, die verbessernde Wirkung der Querbelüftung zu nutzen. Sollte diese nicht ausreichen, wird die unterstützende Wirkung der Lüftungsschächte erprobt. Eine weitere Option bestünde in einer ergänzenden Ausstattung der Lüftungsschächte mit regelbaren Ventilatoren. Doch müsste dann im Vorfeld die Abluftsituation im Dachraum untersucht und geklärt werden. Bevor aber hier bau- und anlagentechnische Kosten durch die Lüftungsschächte generiert werden, sollten erst die raumluftverbessernden Potenziale der Querbelüftung über die Kippfenster und

die Raumluftherwärmung über die in Gruppen schaltbaren Sitzbankheizungen ausgeschöpft werden. Reichen deren Verbesserungspotenziale nicht aus, soll in einem zweiten Schritt dann über weitere Maßnahmen mittels optimierter Luftschächte nachgedacht werden.

Regelstrategie für den gekoppelten Lüftungsbetrieb und Heizung

Um die in Tabelle 1 aufgezeigten oberen Grenzwerte der Raumluftfeuchte für die in der Kirche relevanten Mechanismen der Beanspruchung und Schädigung der Wandmalereien herauszuarbeiten, soll in der Kirche gleich der Regelstrategie in der Krypta während der wärmeren Witterungsperioden bevorzugt die kontrollierte Querbelüftung zum Abbau von hohen Raumluftfeuchten bedarfsabhängig veranlasst werden. Hingegen wird während der kälteren Witterungsperioden die Querbelüftung nur bedingt zur Verbesserung der Raumluftverhältnisse beitragen können. Schließlich ist während kalter Witterungsperioden eine zu starke Auskühlung der Wandoberflächen zu vermeiden, um bei einem Wetterumschwung erhöhte Tauwasserbildung beim Einfließen von feuchtwarmen Außenluftmassen in die Kirche zu unterbinden. Günstiger ist es, während kälterer Witterungsperioden die Raumluftfeuchte durch eine Erwärmung der Raumlufte mit der elektrischen Sitzbankheizung abzusenken. So konnte bereits am Beispiel der Krypta gezeigt werden, dass mit einer Koppelung des Betriebs der elektrisch aktivierbaren Kippfenster und der elektrischen Heizregister die im Zuge der Erwärmung von der Raumlufte aufgenommene Feuchte durch eine kurzzeitige Querbelüftung effizient abgeführt werden kann.

Auch wenn der wertvolle Wandmalereizyklus in der Kirche erwarten lässt, dass die Regelstrategie hier deutlich komplexer und anspruchsvoller sein müsste als in der Krypta, so trifft dies nicht zu. Erschwert wird die Regelstrategiefindung weniger durch die zu berücksichtigenden Mechanismen, die zur Schadensbildung führen können, als vielmehr durch die von der Raumgröße und -geometrie ausgehenden Einflüsse auf die Raumlufteströmungsverhältnisse. So findet im Falle einer Querbelüftung der Luftaustausch vor allem in der Höhenlage der Kippfenster statt und die die Wandmalereien gefährdende Raumlufte in Höhe des Obergadens wird nicht direkt sondern zeitversetzt erfasst. Sollte im Rahmen der weiteren Untersuchungen erkannt werden,

dass ein intensiverer Luftaustausch zwischen der unteren und oberen Luftschicht erforderlich wäre, dann könnte eine Abhilfe durch die Ausstattung einzelner Lüftungsschächte mit ansteuerbaren Ventilatoren und dem Erzwingen eines Luftaustausches der Luftschichten geschaffen werden.

Aber auch die Aktivierung der elektrischen Sitzbankheizung führt nicht wie in der Krypta gezeigt, zwingend zu einer moderaten Warmluftbeschleierung der malereitragenden Wandoberflächen. Auch hier wird die an den elektrisch beheizten Sitzbankreihen erwärmte Luft nach oben aufsteigen und damit eine Absenkung der Raumluftefeuchte bewirken. Doch ob diese leicht erwärmten Luftmassen zudem bis in den Obergaden auch eine leichte Erwärmung der Wandmalereien bewirken, um z. B. nachfolgende Tauwasserlasten im Anschluss an eine Kälteperiode zu unterbinden, lässt sich ohne eine klärende Simulation der Raumlufteströmungsverhältnisse nur schwer bewerten. Entsprechende Erkenntnisse werden durch die messtechnische Erfassung und Analyse der Nahfeldsituation der Wandmalereien im Obergaden gewonnen werden, sodass im Falle einer unzureichenden Vermischung der unteren und oberen Luftschichten in der Kirche mit einer Optimierung der Lüftungsschächte eine entsprechende Verbesserung herbeigeführt werden könnte.

Die einzelnen Mechanismen der Beanspruchungen betreffend sind die Anforderungen in der Kirche im Vergleich zur Krypta entspannter zu sehen. Schließlich konnte die Mikrobiologie nur an der Nordwand Schimmelpilze der Gattung *Cladosporium* feststellen, der nur bei Raumluftefeuchten über 84 % r. F. aktiv ist. Welche Anforderungen an den akzeptablen Raumklimakorridor mit Blick auf das hygrisch bedingte Formänderungsbestreben gestellt werden, kann erst mit dem Abschluss der entsprechenden Arbeiten (vgl. Beitrag Reeb) abschließend beantwortet werden.

Doch wird davon ausgegangen, dass der in Abbildung 3 für die Krypta aufgezeigte Verlauf der von der Temperatur abhängigen Zielfeuchte auch für die Kirche angesetzt werden kann und dabei sogar mit Blick auf die fehlende Salzproblematik und den nur bei hohen Feuchtelasten aktiven Schimmelpilz die obere Grenze der Raumluftefeuchte im Vergleich zur Krypta sogar um einige Prozent r. F. angehoben werden kann. Dies hilft auch, den Energieeinsatz in den kälteren Witterungsperioden zu minimieren.

Umsetzung der Maßnahme, Inbetriebnahme und Optimierung des Regelbetriebs

Mit der Abfassung des vorliegenden Berichtes waren die Maßnahmen in der Kirche noch nicht abschließend umgesetzt. So ist die Schaffung der elektrotechnischen Schnittstellen, das 2011 installierte Messsystem mit der 2005 installierten Fenstersteuerung und mit der Steuerung der elektrischen Sitzbankheizung zu verknüpfen. Diese Arbeiten werden Mitte Januar 2017 vorgenommen. Anschließend können die für die Regelstrategieentscheidung des Betriebs der elektrischen Kippfenster und der Sitzbankheizung erforderlichen Softwaremodule programmiert, aufgespielt und überprüft werden. Die endgültige Inbetriebnahme des Maßnahmenkonzeptes für die Raumluftverbesserung in der Kirche ist für Mitte Februar geplant. Im dann noch verbleibenden Projektzeitraum bis Ende März kann noch die Funktionsfähigkeit des bedarfsangepassten Regelkonzeptes zur präventiven Klimastabilisierung überprüft werden, um notwendige Angleichungen vorzunehmen. Doch wird die Optimierung der Regelstrategie noch die Beobachtung des Systemverhaltens in den nächsten beiden Jahre erfordern, um eine Anpassung und Optimierung der Regelentscheidungen und die Übernahme der dabei gewonnenen Erkenntnisse in die Regelalgorithmen vornehmen zu können.

Zusammenfassung und Ausblick

Mit Abschluss des DBU-Forschungsvorhabens kann eine zum Erhalt der ottonischen Wandmalereien erforderliche Raumluftverbesserung mit vergleichsweise einfachen Maßnahmen realisiert werden, indem mittels einer bedarfsangepassten Querbeltüftung oder einer kontrollierten Erwärmung der Raumluft eine klimabedingte Beanspruchung im Nahfeld der Malerei nachhaltig unterbunden wird. Hierzu müssen abhängig der potenziell die Wandmalereien gefährdenden Mechanismen die oberen Grenzwerte des noch tolerierbaren Klimakorridors herausgearbeitet werden, der dann der Regelentscheidung für die bedarfsangepasste Belüftung oder Beheizung von Kirche und Krypta zugrunde gelegt wird.

Auch wenn mit der Abfassung des vorliegenden Berichtes noch nicht alle Maßnahmen in der Kirche umgesetzt werden konnten, so werden bis zum Projektende die Funktionstauglichkeit und die verbessernde Wirkung der umgesetzten Maßnahmen belegt werden können. Doch wird das hier aufgezeigte Konzept und die in St. Georg zur Raumluftverbesserung entwickelte Regelstrategie in den kommenden Jahren weiter optimiert werden, um künftig zielsicher und nachhaltig die den Schadensfortschritt begünstigenden Feuchteverhältnisse zu vermeiden.

Die im DBU-Projekt herausgearbeiteten Maßnahmenkonzepte lassen sich grundsätzlich auch auf vergleichbare Problemstellungen in anderen feuchtebelasteten Räumen übertragen.

Literatur

Arnold, Christian: Entwicklung fuzzybasierter Leitkomponenten für das Klimamanagement in der präventiven Konservierung. Heidelberg 2013.
Bernard, Thomas: Ein Beitrag zur gewichteten multikriteriellen Optimierung von Heizungs- und Lüftungsregelkreisen auf Grundlage des Fuzzy Decision Making. Dissertation Universität Karlsruhe, Fakultät für Maschinenbau, Karlsruhe 2000.
Garrecht, Harald: Porenstrukturmodelle für den Feuchtehaushalt von Baustoffen mit und ohne Salzbe-

frachtung und rechnerische Anwendung auf Mauerwerk (Massivbau Baustofftechnologie Karlsruhe 15). Dissertation Universität Karlsruhe, Karlsruhe 1992.
Neycheva, Elka: Analysen zur klimatischen Beanspruchung der Wandmalereien in der Kirche St. Georg (Reichenau) zur Entwicklung von Bewertungsstrategien. Masterarbeit (nicht publiziert), Universität Stuttgart, Studiengang Bauingenieurwesen, Stuttgart 2016.

AUSBLICK

Fazit und Ausblick

Dörthe Jakobs, Harald Garrecht

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten und von Januar 2015 bis April 2017 laufenden Forschungsvorhaben sollten jene Maßnahmen und Methoden zum Einsatz kommen und in ihrer Verwendung optimiert werden, die es erlauben, durch eine bedarfsgerechte kontrollierte Konditionierung der Raumluftzustände von Temperatur und relativer Feuchte an der historischen Wandmalerei stabile Raumklima-verhältnisse auf einem gefährdungsfreien Niveau sicherzustellen. Hierzu bedurfte es vertiefender Informationen über die Charakteristik vorhandener Materialien und deren Veränderungen unter klimatisch wechselnden Zuständen. Außerdem war das Ziel, mittels verfeinerter Messmethoden den Einfluss und die Auswirkungen einer unterschiedlichen Nutzungsintensität auf den Erhaltungszustand von Wandmalereien und Oberflächen zu prüfen. Ein weiteres Interesse bestand darin, die tatsächlichen Wechselwirkungen klimatischer Veränderungen im Malereibestand mit bildgebenden Verfahren sichtbar zu machen.

Angestrebt und auch umgesetzt werden konnte die Fortschreibung der Dokumentation, die mit neuen Plangrundlagen, neuen technischen Verfahren und der Weiterentwicklung des Datenmanagements gewappnet ist für eine zukünftige Digitalisierung der mittlerweile historischen Dokumentation. Basis für ein „Wissensmanagement“ wird auch in Zukunft die Bereitstellung digitalisierter Daten für eine neue Generation von Nutzern sein.

Entscheidende Erkenntnisse über die bestehenden Gefährdungspotentiale im Kontext von klimatischen Schwankungen konnten in der Krypta durch die umfassenden Untersuchungen zu den Salzbelastungen gewonnen werden. Die nun besser bekannten Rahmenbedingungen und die verfeinerten Untersuchungsmethoden ließen auch Rückschlüsse auf Pigmentveränderungen

zu, die möglicherweise ursächlich mit der Feuchtesituation im Raum zusammenhängen.

Die Untersuchungen zur mikrobiellen Belastung in St. Georg zeigten die allgemeine Gefährdung von Wandmalereien durch Mikrobiologie auf, aber auch, welche Veränderungen sich über den Zeitraum seit einem umfangreichen Monitoring im Jahr 2009 eingestellt haben. Eindeutig nachzuweisen war der Rückgang der mikrobiellen Aktivität in der Krypta nach Initiierung der Klimasteuerung ab September 2015. Die Zusammenhänge von Außen- und Innenklimaten, die Bedeutung der Besucherlenkung für die Klima-verhältnisse und die Gefährdung durch UV-Einstrahlung und Klimasprünge im Nahfeldbereich vermochte die Auswertung der Klimadaten von über 35 Jahren zu erschließen. Anhand der Messdaten wird deutlich, dass eine nichtvernachlässigbare Beanspruchung durch stete Temperatur- und Feuchteveränderung im Nahbereich vorhanden ist, die Formveränderungen im Mikrobereich mit sich bringen kann.

Einen enormen Wissenszuwachs erbrachten die Auswertungen zu den Staubpartikeln und deren Quellen. So deutet einiges darauf hin, dass neben der Belastung durch Besucherverkehr und dem Aufwirbeln von Staub auch Insekten wie beispielsweise Staubläuse an Zersetzungsprozessen von organischem Material beteiligt sind. Die Pigmente im Staub machen aber auch deutlich, dass neben möglichen Kleinsttieren weitere Zerfallsprozesse offensichtlich sind. Ein jährliches Abstauben der Malereien, wie es in der Scrovegni-Kapelle in Padua gehandhabt wird, ist für die Wandmalereien von St. Georg daher nicht zielführend. Mit jeder Oberflächenreinigung und Staubabnahme reduzieren sich auch schwach gebundene Partien der Übermalungen des 19. Jahrhunderts und der späteren Restaurierungsphasen. Dies so lange wie möglich hinauszuzögern, sollte unser Bestreben sein.

Die Messungen zum hygrischen Formänderungsbestreben der Materialität sind auch zukünftig noch weiter zu entwickeln, um zuverlässige Aussagen treffen zu können. Dennoch konnte aufgezeigt werden, dass die ungeschädigten Bereiche der Wandmalerei infolge des festen Verbunds mit dem Malgrund und der hier vorherrschenden Zwängung selbst bei starken Klimaänderungen trotz des einhergehenden Formänderungsbestrebens nicht bis zur Rissbildung beansprucht werden. Aber überall dort, wo sich in der Vergangenheit Risse oder Ablösungen in der Malschicht bilden konnten, ist die Malerei hochgradig gefährdet, da sich mit den im Nahfeld verändernden Feuchteverhältnissen Schwind- oder Quellverformungen einstellen, die zu hohen Eigenspannungen führen. Beim Schwinden der Malerei bilden sich Zugspannungen aus, die ein weiteres Ablösen der Malerei vom Malgrund verursachen kann. Wird gar die Zugfestigkeit der Malschicht überschritten, kommt es zu einem weiteren Risswachstum oder es bilden sich neue Risse und Ablösungen aus. An die Restaurierung geschädigter Bereiche der Wandmalerei werden folglich hohe Anforderungen bzgl. der zum Einsatz kommenden Materialien und Methoden gestellt, die im Kontext klimabeanspruchter und zu restaurierender Wandmalerei nur ansatzweise erforscht sind. Zu klären ist auch, inwieweit Festigungsmaßnahmen früherer Restaurierungen an den originalen Malschichten zu weitreichenden Veränderungen der physikalischen und mechanischen Eigenschaften führen, die im DBU-Vorhaben nicht Gegenstand der Untersuchung waren. Schließlich wurden mit den restauratorischen Bearbeitungen seit dem 19. Jahrhundert vielfach neue Materialien dem Original zugeführt, sodass das physikalische, chemische und mechanische Verhalten der Malerei in entscheidender Weise beeinflusst werden dürfte. In dem Erkennen und Zuordnen der Materialien, die sich auch überlagern, und in ihrer Bewertung hinsichtlich ihres Langzeitverhaltens liegt sicher auch eine der zukünftigen Herausforderungen. Sicher ist, dass auch mit dem Abschluss des DBU-Vorhabens viele Fragen offen bleiben. Mit den vorliegenden Untersuchungen ist es jedoch gelungen, Anforderungen an den zum Erhalt der Wandmalerei erforderlichen Klimakorridor zu

benennen, um künftig eine weitere Beanspruchung oder gar Schädigung der ottonischen Wandmalereien infolge hygrisch bedingter Formänderungsbestrebungen zu unterbinden bzw. zu reduzieren. Zudem konnte eine neuartige Untersuchungsmethode aus der Laboranwendung in die Bauwerksuntersuchung übertragen, erprobt und weiterentwickelt werden. Die hierbei gewonnenen Ergebnisse ermutigen, die angewandten Methoden und Verfahren in Verbindung mit Klimamessungen und begleitenden numerischen Untersuchungen so fortzuentwickeln, dass künftig eine ganzheitliche Bewertung der komplexen hygrischen Beanspruchungen an Wandoberflächen mit Malerei vorgenommen werden kann.

Im Dezember 2016 eröffnete Frankreichs Staatschef Francois Hollande die für 66 Millionen Euro gebaute und ausgemalte Kopie „Lascaux 4“, der berühmtesten steinzeitlichen Höhle der Welt. Hier können die Besucher nun die Höhlenmalereien der sogenannten „Sixtinischen Kapelle der Vorgeschichte“ in Originalgröße besichtigen, anders als die Kopie aus den 1980er Jahren, die nur einen Teil der ursprünglichen Höhle zeigte. Die originale Höhle wurde bereits 1963 geschlossen, weil die klimatische Situation, Besucherandrang und immer wieder auftretender Schimmel den bedeutenden Höhlenmalereien erheblichen Schaden zufügte.¹ Lange bevor die erste Höhle in Lascaux wegen Besucherandrang geschlossen werden musste, nämlich 1886, baute man in Rittersbach im

1 Vgl. Warscheid, Thomas: Microbiology and Archaeology. Microbial Impacts at Historical Sites during Excavation and Conservation. In: Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XLII), hg. von Exner, Matthias / Jakobs, Dörthe, München, Berlin 2005, S. 35–48 sowie Warscheid, Thomas / Orial, Geneviève / Bousta, Faisl / Francois, Alexandre / Pallot-Frossard, Isabelle: The prehistoric wall-paintings of Lascaux: managing conservation measures in respect to microbiological monitoring and research. In: Wandmalereien in Krypten, Grotten, Katakomben. Zur Konservierung gefasster Oberflächen in umweltgeschädigten Räumen (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees LVI), hg. von Danzl, Thomas / Exner, Matthias / Rüber-Schütte, Elisabeth, Petersberg 2013, S. 17–32.



Abb. 1:
Rittersbach im Odenwald, Georgskirche, 1886
erbaute und ausgemalte
Kopie von St. Georg auf
der Reichenau (LAD,
Pilz).

Odenwaldkreis eine Kopie von St. Georg in Reichenau-Oberzell. Ein erstaunter Besucher stellte 1969 bei einem Besuch auf der Insel Reichenau fest, dass „in Rittersbach Kreis Mosbach/Baden [...] eine Kirche des gleichen Baustils steht.“ Das erstaunlichste für ihn aber war, dass „die Kirchen die gleichen Wandmalereien besitzen“, er gar überzeugt war, „dass die Bilder beider Kirchen vom gleichen Meister stammen“. Welche Enttäuschung, als ihm das Erzbischöfliche Bauamt auf seine Anfrage antworten musste, dass es sich bei der Kirche in Rittersbach lediglich um eine Kopie von 1886 nach dem Vorbild von St. Georg auf der Insel Reichenau handele (Abb. 1).²

Dass sich im gleichen Heft des Nachrichtenblattes der Denkmalpflege in Baden-Württemberg, in dem im Jahr 2003 die Kopie von St. Georg in Rittersbach vorgestellt wurde, der Beitrag von

Helmut F. Reichwald über „Denkmalverschleiß durch Massentourismus? Welterbestätte Reichenau“ befindet, war damals reiner Zufall. Wenn wir heute mit einem Augenzwinkern auf diese Koinzidenz zurückblicken, dann doch eher mit dem Wissen, dass keine Kopie der Welt das Original ersetzen kann. Was zur Besucherumlenkung für eine klimatisch extrem belastete Höhle seinen Zweck erfüllen mag, wird für einen Raum wie St. Georg, der primär in liturgischer Nutzung ist, nicht angestrebt. Dennoch darf in diesem Kontext deutlich gemacht werden, dass nur ein sorgfältiger Umgang mit dem uns anvertrauten Welterbe seinen langfristigen Erhalt zu sichern vermag. Dazu gehört unter Umständen auch eine Besucherlenkung und ganz sicher die weitere Erforschung eines einzigartigen und hochkomplexen Kulturdenkmals mit den bedeutendsten frühmittelalterlichen Wandmalereien nördlich der Alpen. Wenn wir die nötige Sorgfalt aufbringen und nur einen Bruchteil des Geldes einer Kopie in die zukünftige Forschung stecken, haben wir große Chancen, die Wandmalereien von St. Georg auch für kommende Generationen zu erhalten.

2 Jakobs, Dörthe / Piper, Ulrike / Dürr, Günther / Schmid, Georg: Zwei Meisterwerke in Baden? Die Georgskirchen in Reichenau-Oberzell und in Rittersbach. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2003, 3, S. 258–272.

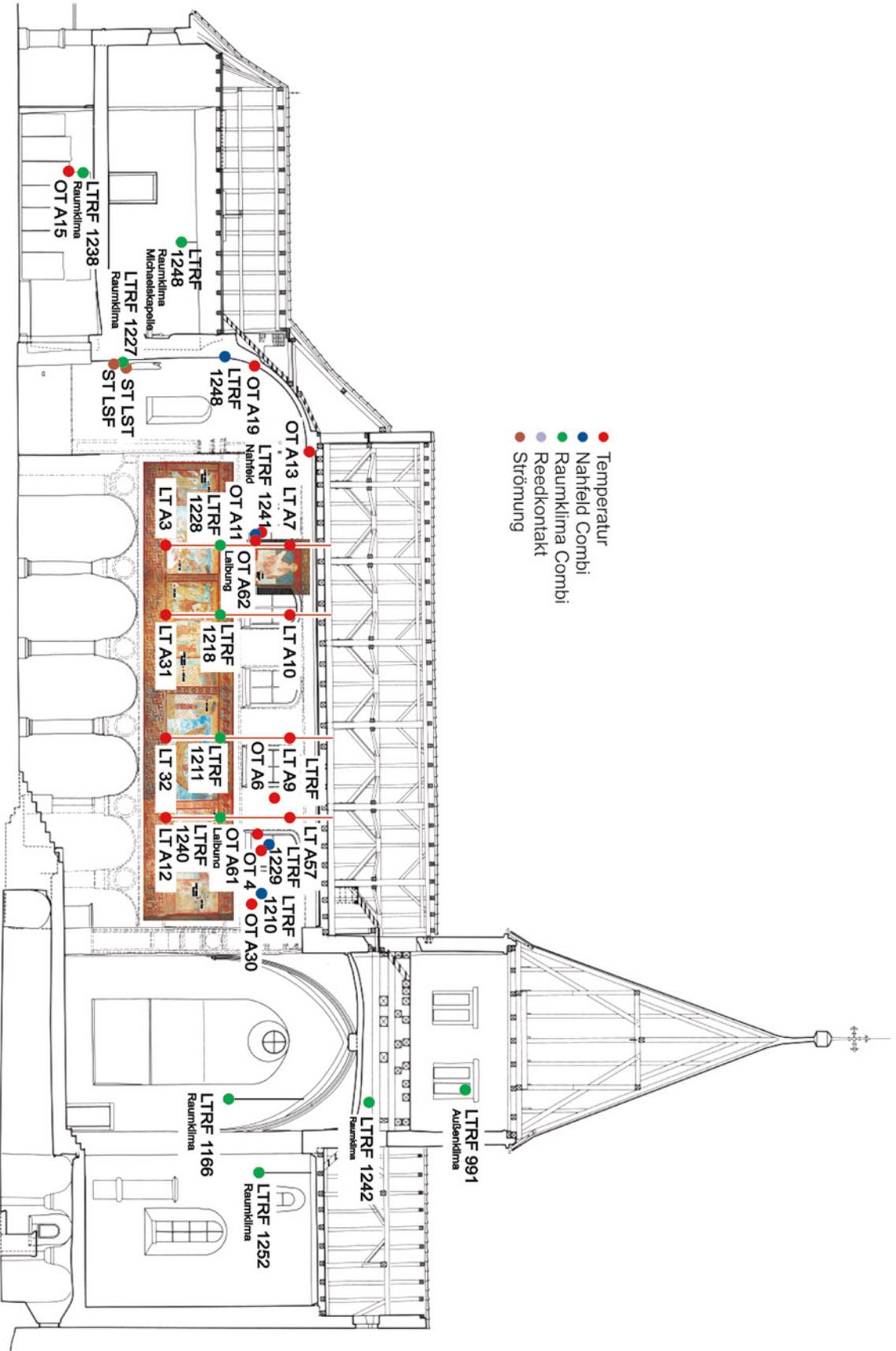
Literatur:

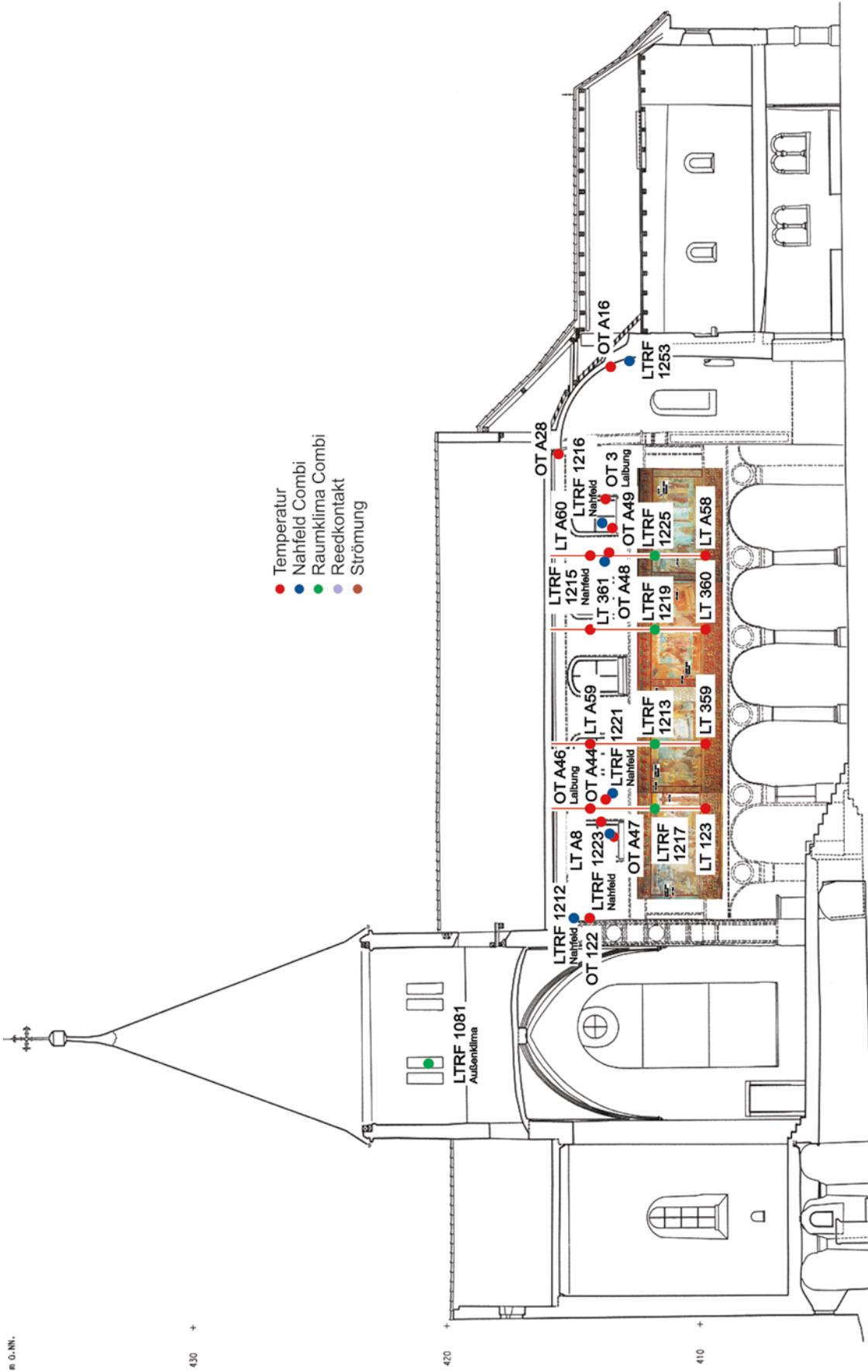
- Jakobs, Dörthe / Piper, Ulrike / Dürr, Günther / Schmid, Georg: Zwei Meisterwerke in Baden? Die Georgskirchen in Reichenau-Oberzell und in Rittersbach. In: Denkmalpflege in Baden-Württemberg, 2003, 3, S. 258–272.
- Warscheid, Thomas: Microbiology and Archaeology. Microbial Impacts at Historical Sites during Excavation and Conservation. In: Klimastabilisierung und bauphysikalische Konzepte. Wege zur Nachhaltigkeit bei der Pflege des Weltkulturerbes (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees XLII), hg. von Exner, Matthias / Jakobs, Dörthe, München, Berlin 2005, S. 35–48.
- Warscheid, Thomas / Orial, Geneviève / Bousta, Faisal / Francois, Alexandre / Pallot-Frossard, Isabelle: The prehistoric wall-paintings of Lascaux: managing conservation measures in respect to microbiological monitoring and research. In: Wandmalereien in Krypten, Grotten, Katakomben. Zur Konservierung gefasster Oberflächen in umweltgeschädigten Räumen (ICOMOS – Hefte des Deutschen Nationalkomitees LVI), hg. von Danzl, Thomas / Exner, Matthias / Rüberschütte, Elisabeth, Petersberg 2013, S. 17–32.

ANHANG

Bildpläne mit Kartierungen

- Taf. 1 Grundriss, Schnittebene auf Fensterhöhe im Kirchenschiff mit Chor
(Planerstellung: Landesamt für Denkmalpflege, Fachgebiet Baudokumentation, 1997)
Eintragung der Messfühler (ausgenommen der in den Querschnitten Taf. 3 und 4 dargestellten Fühler vor den Wandmalereien) durch TTI GmbH-MOCult, Stuttgart.
- Taf. 2 Grundriss, Schnittebene in Bodenhöhe mit Krypta und Kellerräumen
(Planerstellung: Landesamt für Denkmalpflege, Fachgebiet Baudokumentation, 1997)
Eintragung der Messfühler (ausgenommen der in den Querschnitten Taf. 3 und 4 dargestellten Fühler vor den Wandmalereien) durch TTI GmbH-MOCult, Stuttgart.
- Taf. 3 Längsschnitt entlang der Mittelachse, Blickrichtung nach Norden
(Planerstellung: Landesamt für Denkmalpflege, Fachgebiet Baudokumentation, 1997)
mit Einfügung der Bildszenen, Eintragung der Messfühler vor und auf den Wandmalereien durch TTI GmbH-MOCult, Stuttgart.
- Taf. 4 Längsschnitt entlang der Mittelachse, Blickrichtung nach Süden
(Planerstellung: Landesamt für Denkmalpflege, Fachgebiet Baudokumentation, 1997)
mit Einfügung der Bildszenen, Eintragung der Messfühler vor und auf den Wandmalereien durch TTI GmbH-MOCult, Stuttgart.
- Taf. 5 Mittelschiff, Nordwand, neu erstellter Bildplan M 1:20, Auflicht (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 6 Mittelschiff, Südwand, neu erstellter Bildplan M 1:20, Auflicht (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 7 Mittelschiff, Nordwand, neu erstellter Bildplan M 1:20, Streiflicht (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 8 Mittelschiff, Südwand, neu erstellter Bildplan M 1:20, Streiflicht (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 9 Mittelschiff, Nordwand mit Bereichseinteilung auf neu erstelltem Bildplan M 1:20 (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 10 Mittelschiff, Südwand mit Bereichseinteilung auf neu erstelltem Bildplan M 1:20 (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 11 Mittelschiff, Südwand, Kartierung der 1980er Jahre übertragen auf den neuen Bildplan, Testphase mit Überschneidung verschiedener Themen: Bestand, Zustand und Maßnahmen (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 12 Mittelschiff, Südwand, Kartierung der Hohlstellen Zustand 1983, übertragen auf den neuen Bildplan im Streiflicht, Testphase (fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 13 Mittelschiff, Nordwand, Kartierung der Probeentnahmen 1982–1989 sowie der Laborberichte durch Hermann Kühn (Ulrike Piper-Wölbart, Stuttgart, Digitale Kartierung Stefanie Reling, Stuttgart, Bildplan fokus Leipzig GmbH).
- Taf. 14 Mittelschiff, Südwand, Kartierung der Probeentnahmen 1982–1989 sowie der Laborberichte durch Hermann Kühn (Ulrike Piper-Wölbart, Stuttgart, Digitale Kartierung Stefanie Reling, Stuttgart, Bildplan fokus Leipzig GmbH).
- Taf. 15 Mittelschiff, Nordwand, Kartierung der Stauproben in den Fensterschrägen (2015 / 2016) und auf den Wandflächen (2016) sowie der zerstörungsfreien Messungen: Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA) und Raman-Spektroskopie (RS), (Judith Zöldföldi, MPA, Boaz Paz, Bad Kreuznach, Digitale Kartierung Stefanie Reling, Stuttgart, Bildplan fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 16 Mittelschiff, Südwand, Kartierung der Stauproben sowie der zerstörungsfreien Messungen: Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA) und Raman-Spektroskopie (RS), (Judith Zöldföldi, MPA, Boaz Paz, Bad Kreuznach, Digitale Kartierung Stefanie Reling, Stuttgart, Bildplan fokus GmbH Leipzig).
- Taf. 17 Mittelschiff, Krypta, Ostwand, Kartierung der Probeentnahmen und der zerstörungsfreien Messungen (Nahinfrarot-Spektroskopie NIR), Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA), Raman-Spektroskopie (RS) und Zeitbereichsreflektometrie (TDR)





Georg-MN, 04x20
Mosaik 120



Abstand Giehkreuz: 1.00m



415.000

410.000

405.000

fokus <small>Center for Digital Art</small>	Raichman - Overzoll St. Georg
	Digitaler Bildraum Außenministerium, Oktober 2014 <small>www.aussen.wirtschaftsministerium.de</small>

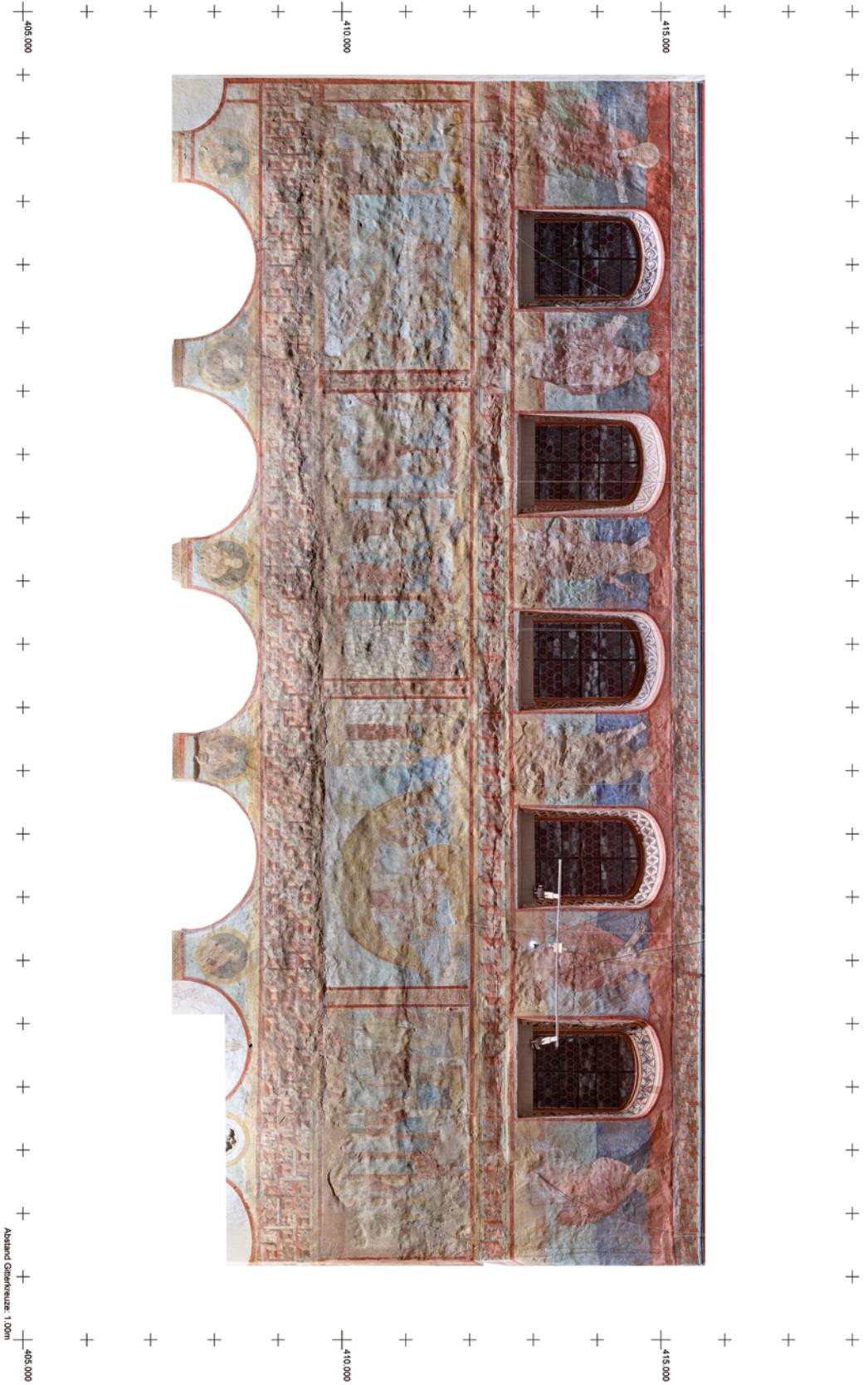


Reichenau - Oberzell
 St. George
 Digitaler Bildplan
 fofokus
 fofokus.de
 Foto: Wolf-Dieter Schulz, 1978; M. G. 1978
 Aufnahmezeitraum: Oktober 2014
 Urheberrechtlich geschützt. © 2015 fofokus.de

George-WS_04020
 Maßstab 1:20

Abstand Gitterkreuze: 1.00m

KIRC-VAN-SIL_04020
Malesiah 1'20



Abstand Gitterkreuze: 1.00m

fokus Center for Digital Heritage	Ratchanai - Overall St. Georg
	Digitaler Bildraum Kulturwissenschaften Universität Wien



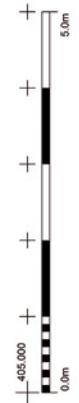
415.000

410.000

415.000

410.000

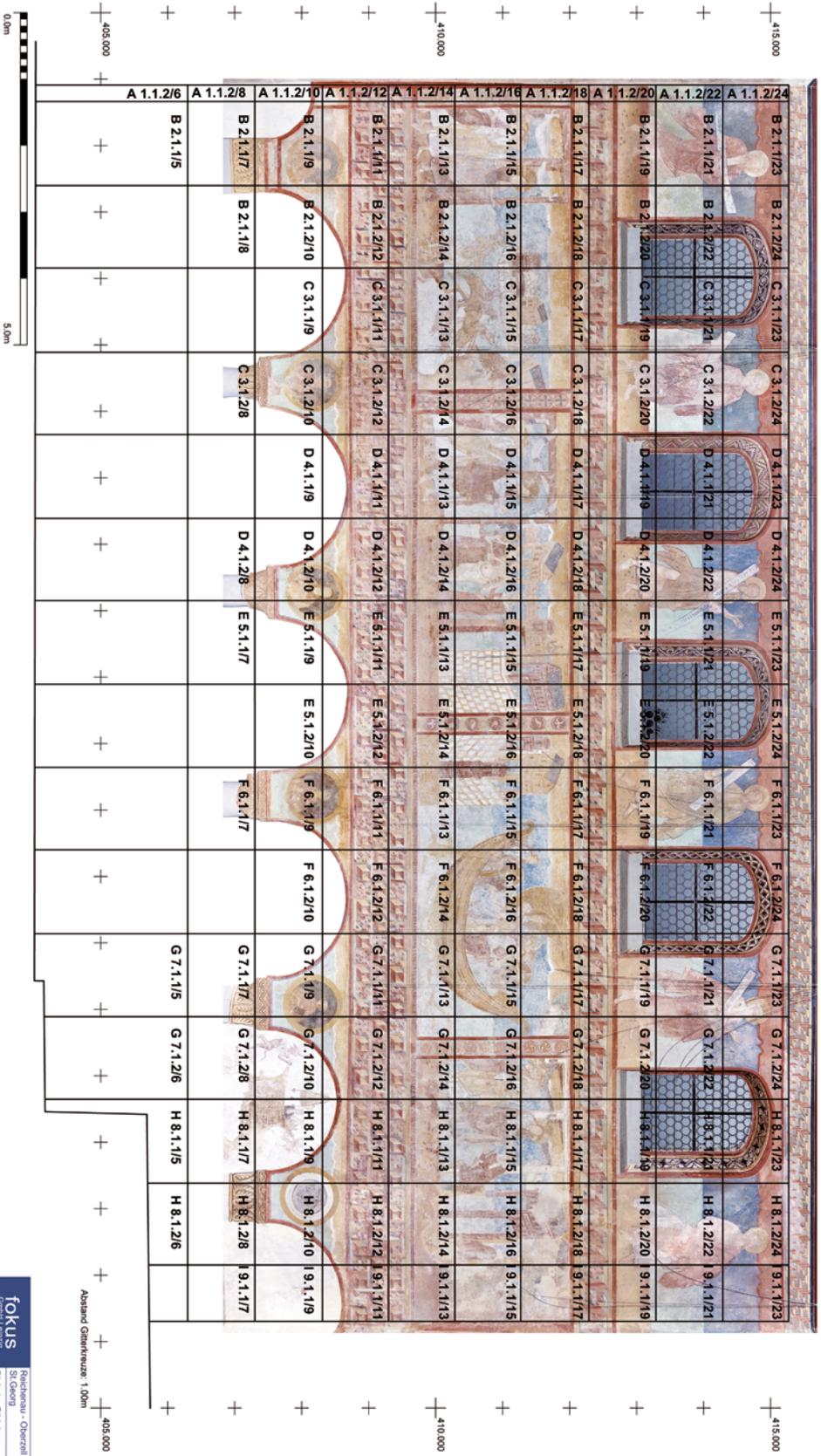
Abstand Gitterkreuz: 1.00m



fokus
 Digitaler Bildplan
 Kirchbau - Oberzell
 St. Georg
 Digitaler Bildplan
 Aufnahmezeitraum: Oktober 2014
 Aufnahme: 1.1.2014
 Aufnahmezeitraum: 1.1.2014 - 31.12.2014

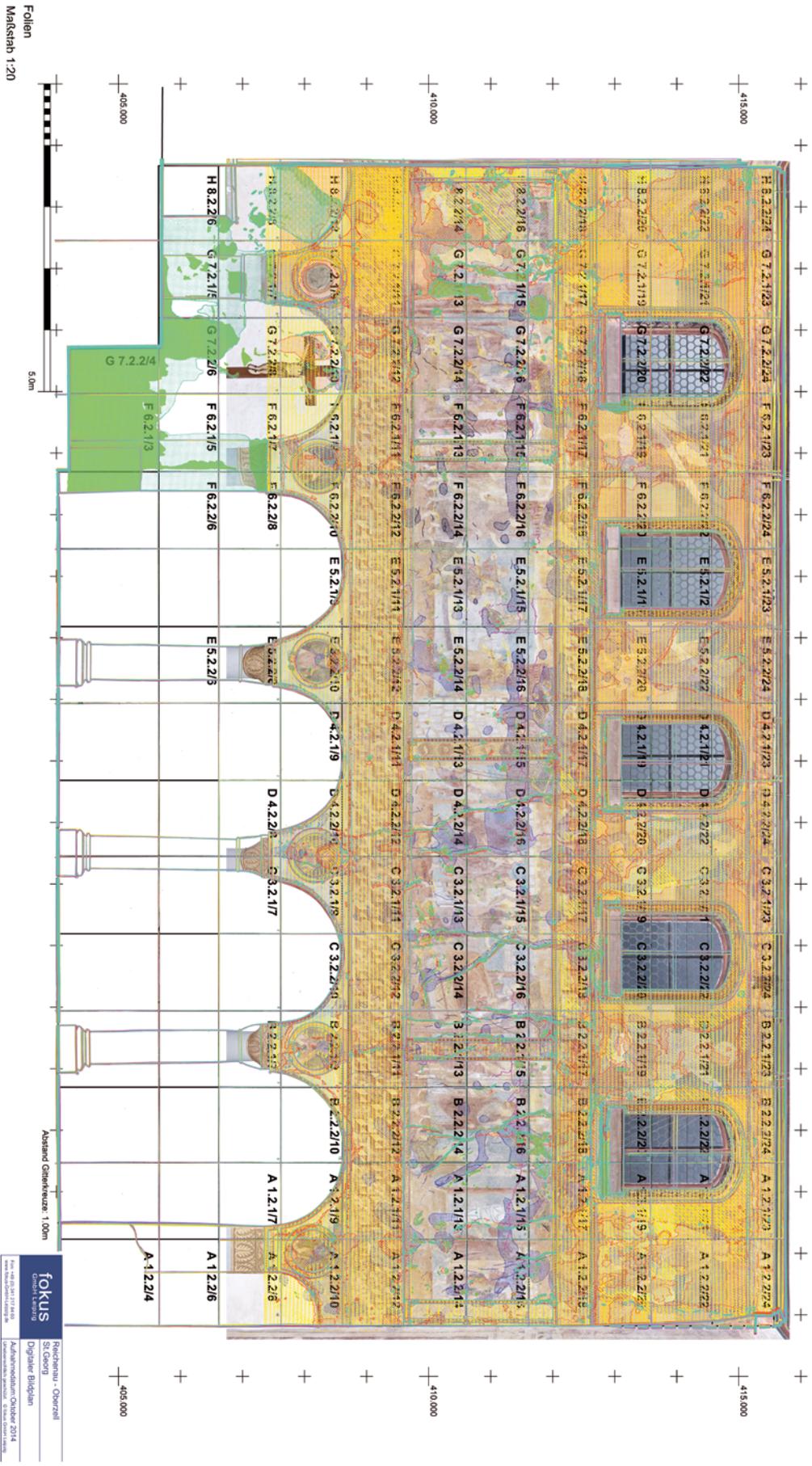
KIRC-VIS_Sel_04020
 Maßstab 1:20

KIRC-WN_Baureischnitt_04/20
 Maßstab 1:20



fokus
 Center for Digital Media
 Fachhochschule Ostwestfalen-Lippe
 Postfach 101553
 32697 Bielefeld

Rechenzentrum - Oberzell
 St. Georg
 Digitaler Bildraum
 Administration/October 2014
 www.fokus.uni-bielefeld.de

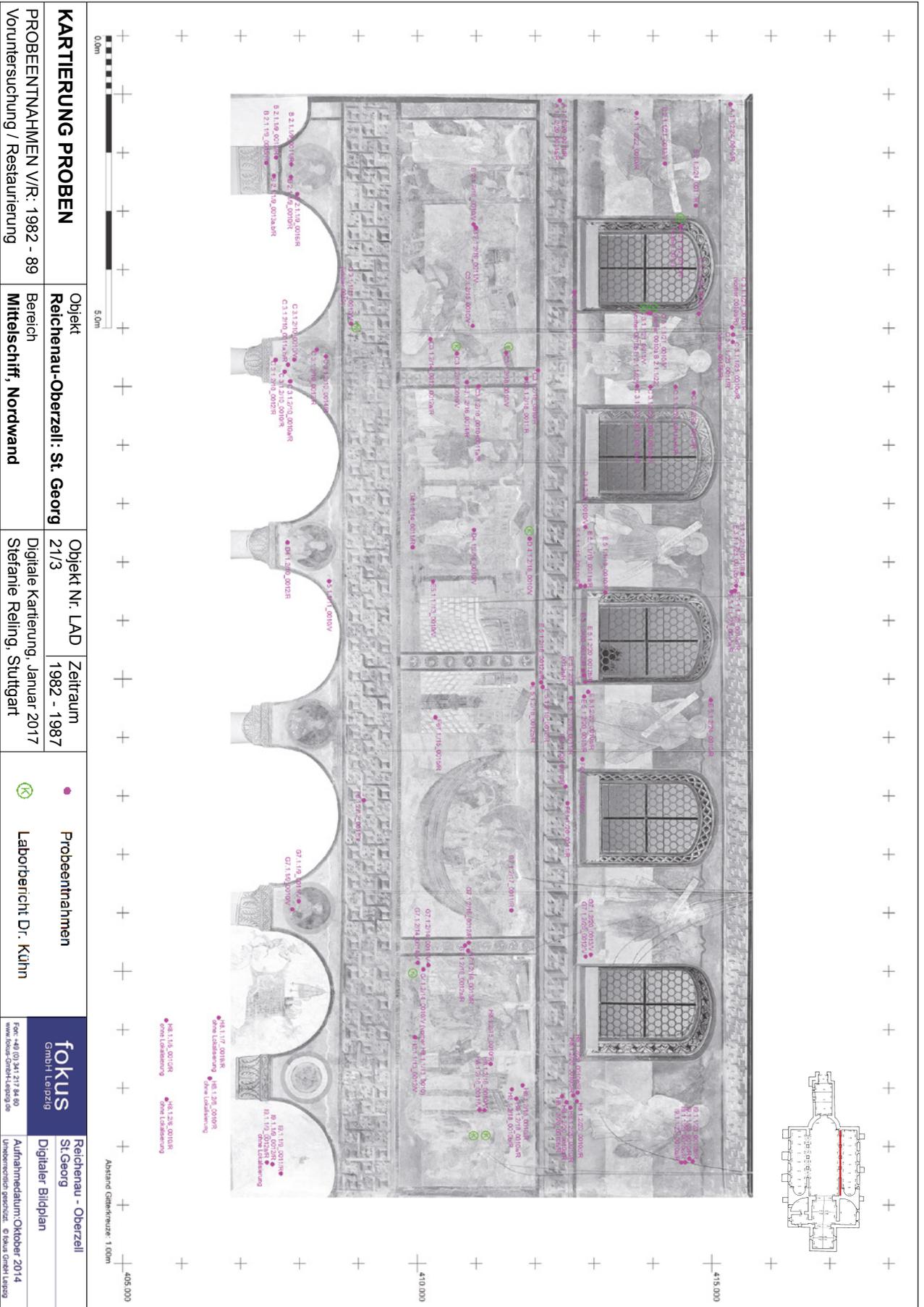


Follen
Maßstab 1:20

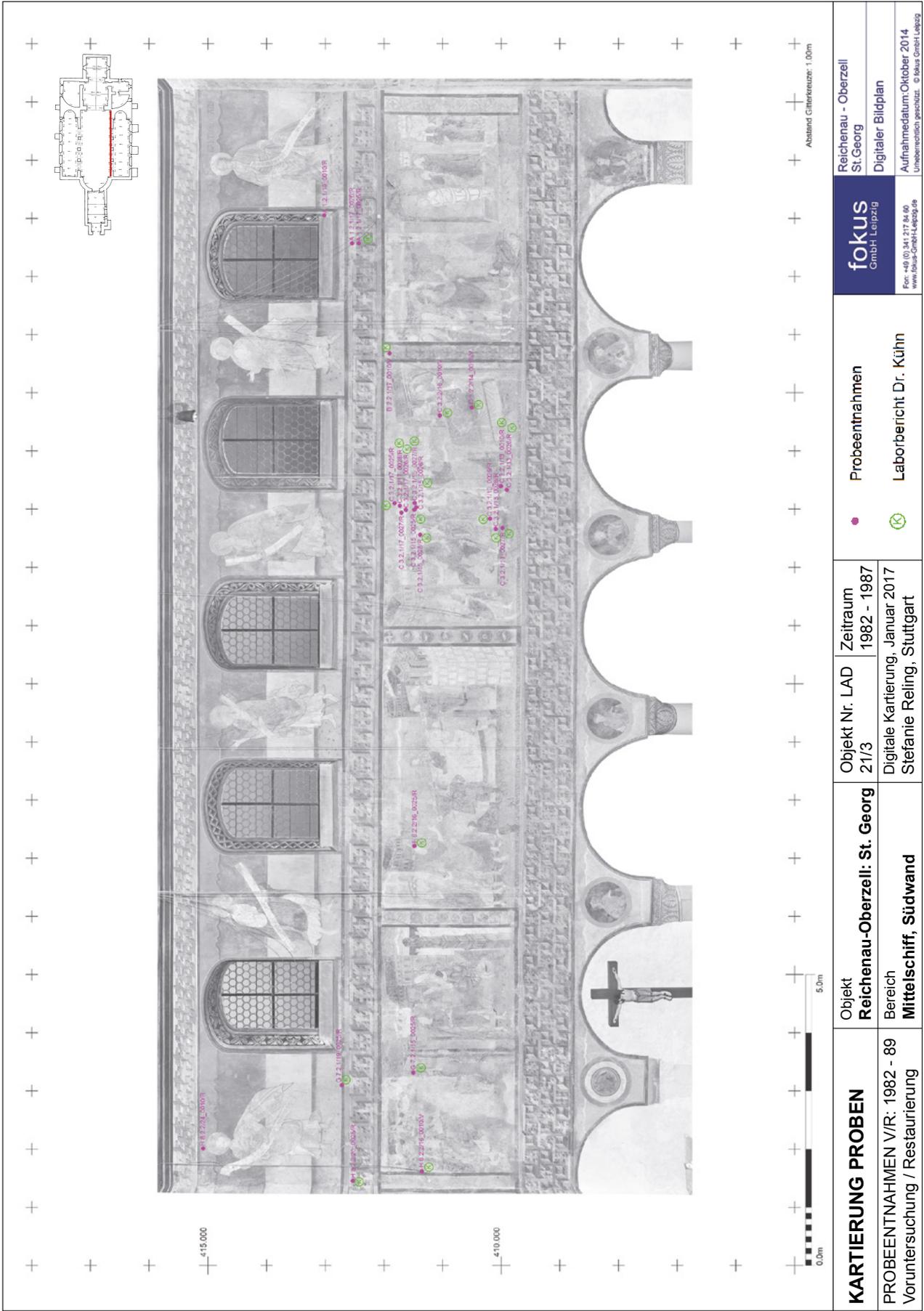
Rechenau - Oberzell
St. Georg
Digitaler Bildbogen
AdrianWinkelmann/Oktober 2014
Urbanentwicklung/01/10/14

fokus
Architektur

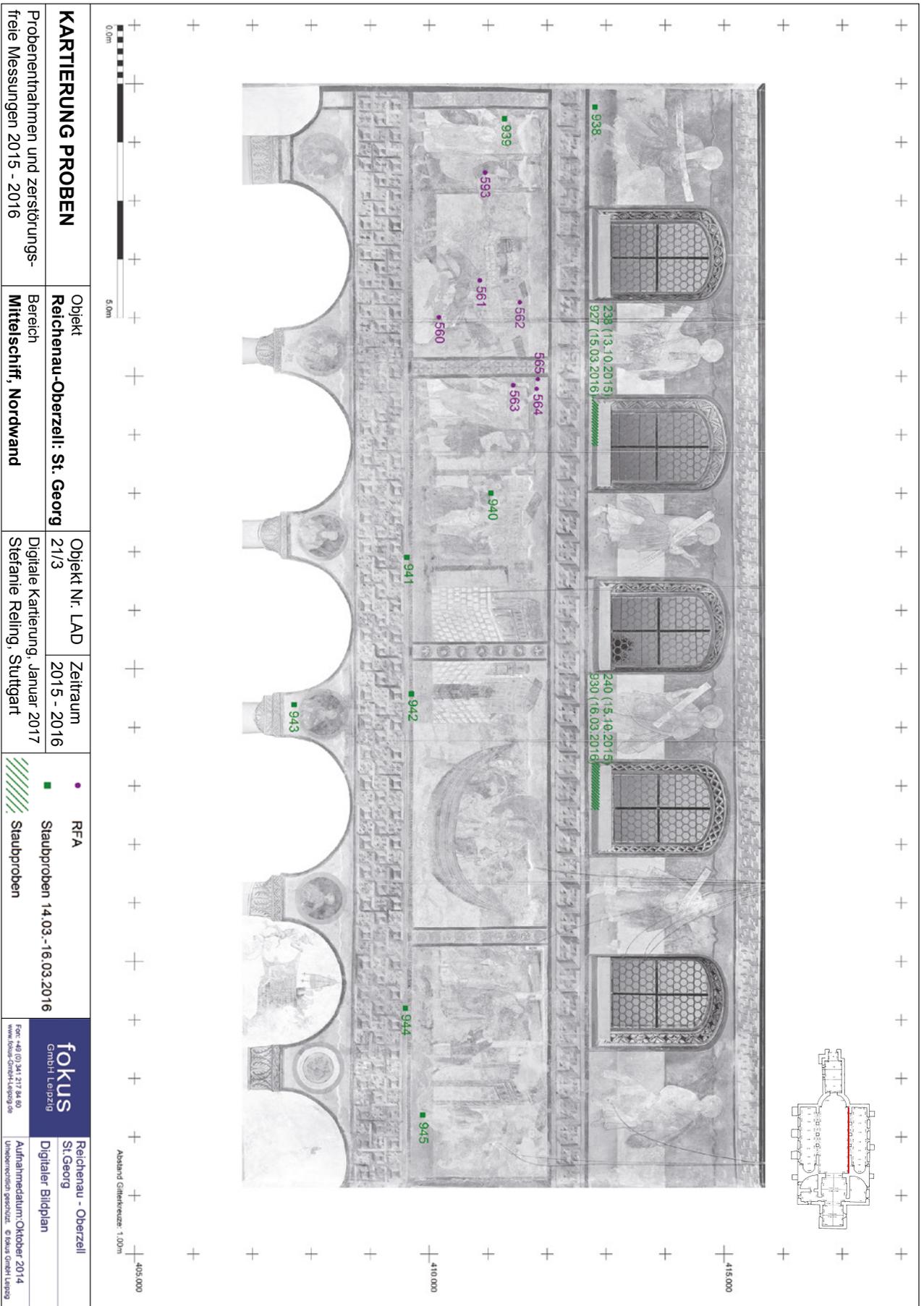
Plan und Maßstab 2014
Urbanentwicklung/01/10/14

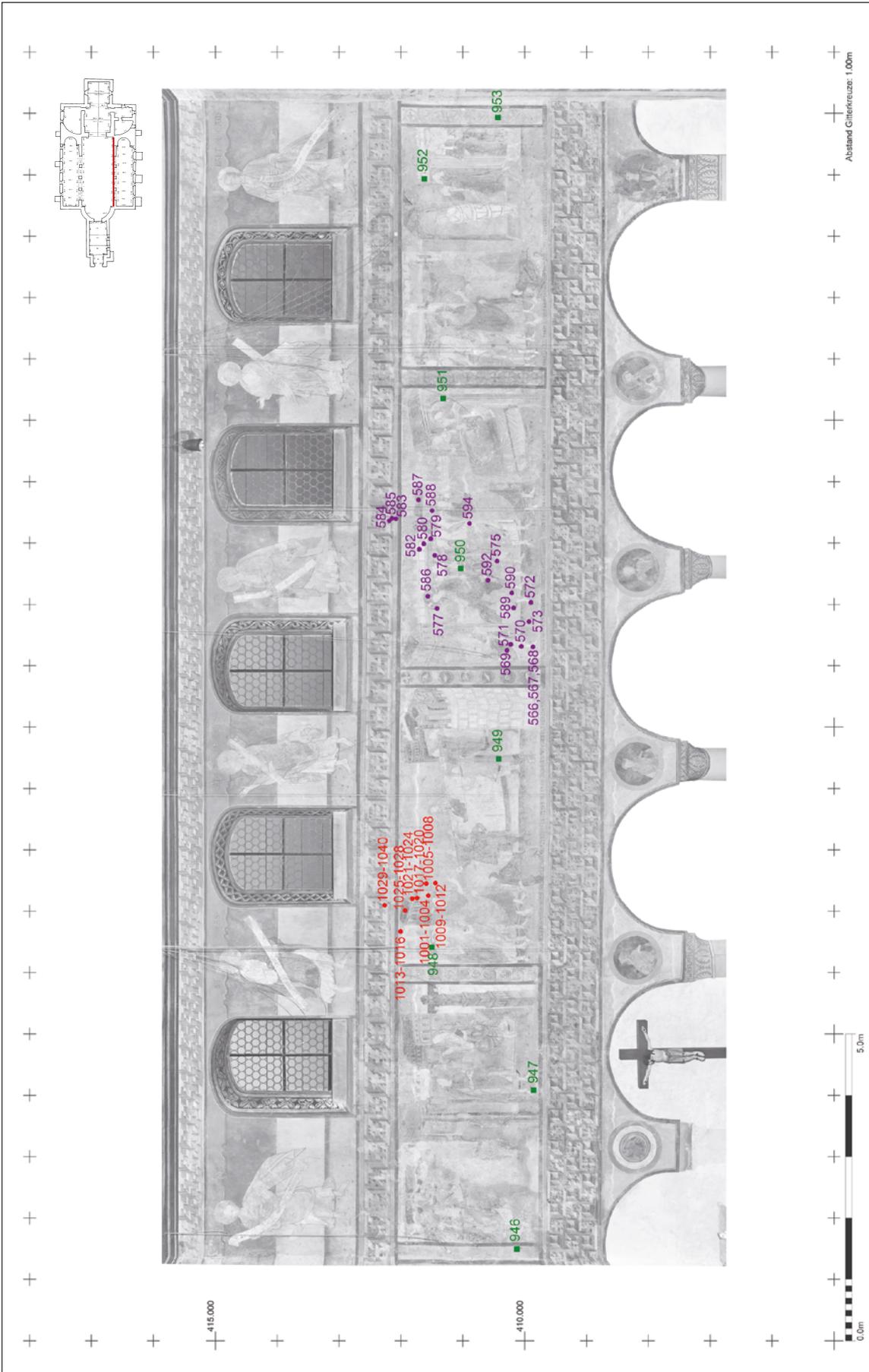


KARTIERUNG PROBEN	Objekt	Objekt Nr. LAD	Zeitraum	<ul style="list-style-type: none"> ● Probeentnahmen ⊗ Laborbericht Dr. Kühn 	fokus GmbH Leipzig Foto: +49 (0)341 217 84 60 www.fokus-greif-lippig.de	Reichenau - Oberzell St. Georg Digitaler Bildplan Aufnahmedatum: Oktober 2014 Urheberrechtlich geschützt. © Fokus Greif Leipzig
	PROBEENTNAHMEN V/R: 1982 - 89 Voruntersuchung / Restaurierung	Reichenau-Oberzell: St. Georg Bereich Mittelschiff, Nordwand	21/3			

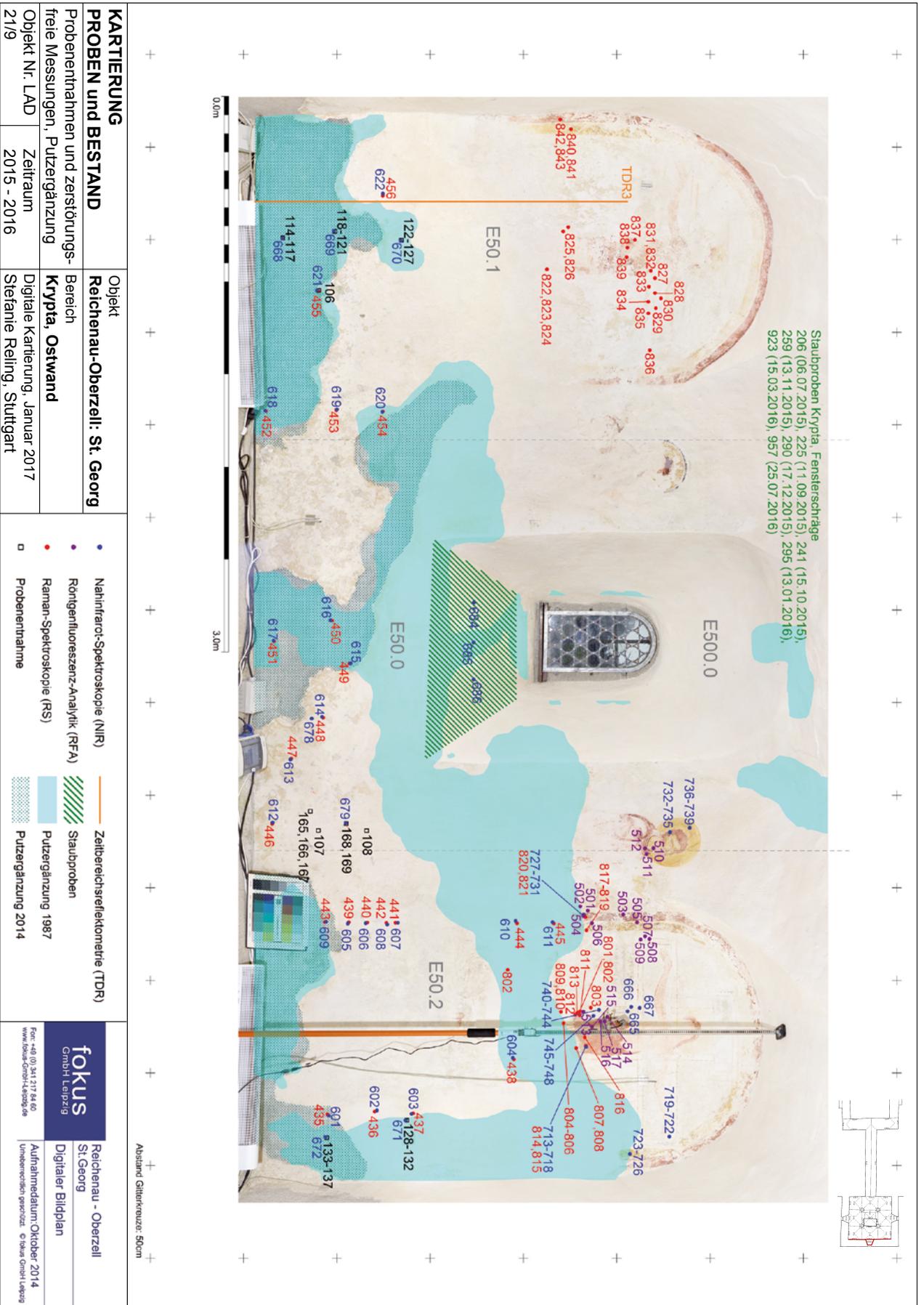


KARTIERUNG PROBEN	Objekt Reichenau-Oberzell: St. Georg		Objekt Nr. LAD 21/3	Zeitraum 1982 - 1987	Probeentnahmen	fokus GmbH Leipzig Fon: +49 (0) 341 217 84 00 www.fokus-grbh-leipzig.de	Reichenau - Oberzell St. Georg Digitaler Bildplan
	PROBEENTNAHMEN V/R: 1982 - 89 Voruntersuchung / Restaurierung	Bereich Mittelschiff, Südwand					





KARTIERUNG PROBEN	Objekt	Reichenau-Oberzell: St. Georg	Objekt Nr. LAD	21/3	Zeitraum	2015 - 2016	fokus GmbH Leipzig Fon: +49 (0) 341 217 84 00 www.fokus-grh-leipzig.de	Reichenau - Oberzell
	Probenentnahmen und zerstörungsfreie Messungen 2015 - 2016	Bereich	Mittelschiff, Südwand	Digitale Kartierung, Januar 2017 Stefanie Reiling, Stuttgart	Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA)	Raman-Spektroskopie (RS)		Staubproben 14.03.-16.03.2016
								Digitaler Bildplan Aufnahme datum: Oktober 2014 Urheberrechtlich geschützt. © Fokus GmbH Leipzig



KARTIERUNG		Objekt	Reichenau-Oberzell: St. Georg	
PROBEN und BESTAND		Bereich	Krypta, Ostwand	
Probenentnahmen und zerstörungsfreie Messungen, Putzergängung				
Objekt Nr. LAD	Zeitraum	Digitale Kartierung:	Januar 2017	
21/9	2015 - 2016	Stefanie Reiling:	Stuttgart	

• Nahinfrarot-Spektroskopie (NIR)	— Zeitbereichsreflektometrie (TDR)
• Röntgenfluoreszenz-Analytik (RFA)	▨ Staubproben
• Raman-Spektroskopie (RS)	▨ Putzergängung 1987
□ Probenentnahme	▨ Putzergängung 2014

fokus GmbH Leipzig		Reichenau - Oberzell St. Georg
Tele: +49 (0) 341 217 24 60 www.fokus-leipzig.de		Digitaler Bildplan
		Aufnahmetermin: Oktober 2014
		Urheberrecht geschützt. © Ikuu GmbH Leipzig

Autoren/Adressen

Dr. Paul Bellendorf

Referat Umwelt und Kulturgüter
Deutsche Bundesstiftung Umwelt
An der Bornau 2, 49090 Osnabrück
p.bellendorf@dbu.de

Péter Hegedüs

Software-Entwicklung und Programmierung
Rózsa Str. 59, H-7754 Bóly
hpetair@gmail.com

Francesca Capanna

Vicedirettore della Scuola di Alta Formazione

Antonio Guglielmi

Restauratore dipinti murali
Istituto Superiore per la Conservazione
ed il Restauro
Via di S. Michele 23, I-00153 Roma
francesca.capanna@beniculturali.it
antonio.guglielmi@beniculturali.it

Dr. Dörthe Jakobs

Dipl.-Restauratorin
Landesamt für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen am Neckar
doerthe.jakobs@rps.bwl.de

Dr. Jürgen Frick

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Leiter der Stabsstelle Forschung
und Entwicklung
Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart
juergen.frick@mpa.uni-stuttgart.de

Elka Neycheva

Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
elka.neycheva@gmail.com

Dr. Peter Fornaro

PD Dr. Lothar Schmitt

Heidrun Feldmann

Universität Basel
Digital Humanities Lab
Bernoullistrasse 32, CH-4056 Basel
peter.fornaro@unibas.ch

Dr. Boaz Paz

Paz Laboratorien für Archäometrie
Planiger Straße 34 Haus 18/19,
55543 Bad Kreuznach
info@paz-lab.de

Prof. Dr.-Ing. Harald Garrecht

Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Universität Stuttgart/MoCult
Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
harald.garreht@iwb.uni-stuttgart.de

Prof. Dr. Karin Petersen

Dr. Cornelia Gehrman-Janßen

Dr. Petra Möhlenhoff

HAWK-HHG
Hochschule für angewandte Wissenschaft
und Kunst
Fachhochschule Hildesheim/Holzminden/
Göttingen
Bismarckplatz 10/11, 31135 Hildesheim
karin.petersen@hawk-hhg.de

Simone Reeb
Christian Renner
Dana Ullmann
Universität Stuttgart
Institut für Werkstoffe im Bauwesen
Pfaffenwaldring 4, 70569 Stuttgart
simone.reeb@iwb.uni-stuttgart.de

Dr. Manuela Reichert
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart
manuela.reichert@mpa.uni-stuttgart.de

Gisbert Sacher
Gunnar Siedler
Sebastian Vetter
fokus GmbH Leipzig
Lauchstädter Straße 20, 04229 Leipzig
sacher@fokus-GmbH-Leipzig.de

Dr. Stefanie Scheerer
BioPhil
Mikrobiologie & Restaurierung
Bockelstr. 32, 70619 Stuttgart
info@biophil-art.com

Dr. Dirk Scheuvs
TU Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt
dscheuvs@geo.tu-darmstadt.de

Prof. Dr. Anna Schönemann
Hochschule für Technik und Wirtschaft (HTW)
Berlin
Fachbereich 5, Konservierung/Restaurierung
Wilhelminenhofstr. 75 A, 12459 Berlin
anna.schoenemann@HTW-Berlin.de

Susann Seyfert
Landesamt für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Dienstszitz Tübingen
Alexanderstraße 48, 72072 Tübingen
susann.seyfert@rps.bwl.de

Prof. Dr. Stephan Weinbruch
TU Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt
weinbruch@geo.tu-darmstadt.de

Dr. Werner Weinzierl
Regierungspräsidium Freiburg
Abteilung Landesbodenkunde
Kaiser-Joseph-Straße 167, 79098 Freiburg
werner.weinzierl@rpf.bwl.de

Prof. Dr. Claus Wolf
Landesamt für Denkmalpflege
im Regierungspräsidium Stuttgart
Berliner Straße 12, 73728 Esslingen am Neckar
claus.wolf@rps.bwl.de

Jean Michel Zapf
TU Darmstadt
Institut für Angewandte Geowissenschaften
Schnittspahnstr. 9, 64287 Darmstadt

Dr. Judit Zöldföldi
Materialprüfungsanstalt Universität Stuttgart
Abteilung für Dauerhaftigkeit und Schutz
von Bauten und Anlagen
Referat Denkmalschutz
Pfaffenwaldring 2b, 70569 Stuttgart
judit.zoeldfoeldi@mpa.uni-stuttgart.de

Ebenfalls erschienen in der Reihe Arbeitshefte des Landesamts für Denkmalpflege im Regierungspräsidium Stuttgart

22 **Historische Stadtkerne. Gesamtanlagen in Baden-Württemberg**

Bearbeitet von Volkmar Eidloth und Susann Seyfert. Mit Beiträgen von Claudia Baer-Schneider, Ulrich Boeyng, Ute Fahrbach-Dreher, Iris Fromm-Kaupp, Martin Hahn, Bertram Jenisch, Clemens Kieser, Sabine Kraume-Probst, Rainer Laun, Markus Numberger, Mechthild Ohnmacht, Erik Roth, Michael Ruhland, Wolfgang Seidenspinner, Susann Seyfert, Wolfgang Thiem, Andreas Vorbach, Martin Wenz, Petra Wichmann und Johannes Wilhelm

2017 (2. Auflage); ISBN: 978-3-7995-1222-0



23 Wolfgang Thiem

Historische Ortskerne. Gesamtanlagen in Baden-Württemberg

2017 (2. Auflage); ISBN: 978-3-7995-1223-7



24 Volkmar Eidloth

Europäische Kurstädte und Modebäder des 19. Jahrhunderts. Internationale Fachtagung in Baden-Baden, 25.– 27. November 2010. Internationale Fachtagung des Deutschen Nationalkomitees von ICOMOS, des Landesamtes für Denkmalpflege Baden-Württemberg im Regierungspräsidium Stuttgart und der Stadt Baden-Baden 25.– 27. November 2010

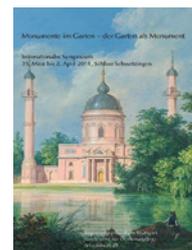
2012; ISBN: 978-3-8062-2729-1



25 **Monumente im Garten – der Garten als Monument.**

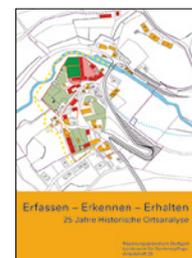
Internationales Symposium in Schwetzingen, 31. März – 2. April 2011

2012; ISBN: 978-3-8062-2730-7



26 **Erfassen – Erkennen – Erhalten. 25 Jahre Historische Ortsanalyse Fachkolloquium am 27.09.2011 in Esslingen am Neckar**

2012; ISBN: 978-3-8062-2779-6



27 Dagmar Zimdars, Otto Wölbert

**Der Turmhelm des Münsters Unserer Lieben Frau in Freiburg.
Ein bautechnikgeschichtliches Denkmal**

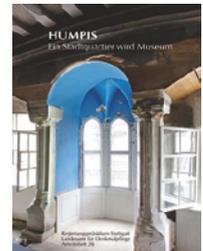
Mit Beiträgen von Rainer Barthel, Rolf-Dieter Blumer, Yvonne Faller, Christian Kayser, Stefan King, Ivan Kovacevic, Thomas M. Laubscher, Lisa Masen, Joram Tutsch, Otto Wölbert und Dagmar Zimdars
2014; ISBN: 978-3-8062-3034-5



28 Dörthe Jakobs, Volker Caesar

HUMPIS – Ein Stadtquartier wird Museum

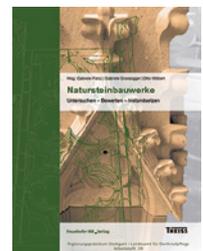
Mit Beiträgen von David Bibby, Anja Brodbeck-Holzinger, Volker Caesar, Korkut Demirag, Herbert Eninger, Martina Fischer, Myriam Guedey, Gabriele Hoffmann, Dörthe Jakobs, Hermann Klos, Oliver Mack, Cornelia Marinowitz, Andreas Schmauder, Beate Schmid, Christoph Steffen, Markus Steffen, Christoph Stratenwerth, Stefan Uhl und Hermann Vogler
2015; ISBN 978-3-8062-2968-4



29 Gabriele Patitz, Gabriele Grassegger, Otto Wölbert

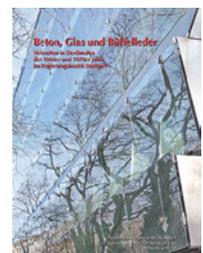
Natursteinbauwerke. Untersuchen – Bewerten – Instandsetzen

Mit Beiträgen von Rainer Barthel, Ronald Betzold, Stefan Brüggerhoff, Andreas Brusckke, Ralph Egermann, Harald Garrecht, Lothar Goretzki, Gabriele Grassegger, Hans Michael Hangleiter, Gottfried Hauff, Christoph Herm, Erwin Hornauer, Albert Kieferle, Helmut Kollmann, Peter Kozub, Reiner Krug, Till Läßle, Klaus Liehnert, Jörg Möser, Claudia Neuwald-Burg, Gabriele Patitz, Karin Petersen, Esther von Plehwe-Leisen, Peter Reiner, Tilman Riegler, Ralf Ruhnu, Hermann Schäfer, Georg Schmid, Eduard Schnell, Hans-Jürgen Schwarz, Erwin Schwing, Heiner Siedel, Michael Steiger, Sylvia Stürmer, Gustav Treulieb, Helmut Venzmer, Eberhard Wendler, Wolfgang Werner, Otto Wölbert und Hans-Werner Zier
2014; ISBN: 978-3-8062-3036-9



30 **Beton, Glas und Büffelleder. Verwalten in Denkmälern der 1960er und 1970er Jahre im Regierungsbezirk Stuttgart**

Mit Beiträgen von Edeltrud Geiger-Schmidt, Simone Meyder, Klaus Jan Philipp, Ellen Pietrus, Ulrike Roggenbuck-Azad, Christian Vöhringer und Silke Vollmann
2015; ISBN: 978-3-8062-3035-2



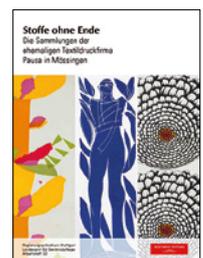
31 **Erhaltung von Kulturdenkmälern der Industrie und Technik in Baden-Württemberg**

Mit Beiträgen von Jörg Bofinger, Guntram Gassmann, Andreas Haasis-Berner, Michael Hascher, Gitta Reinhardt-Fehrenbach, Jonathan Scheschkewitz, Tim Schönwetter, Ulrike Schubart und Martin Strotz
2015; ISBN: 978-3-8062-3165-6



32 **Stoffe ohne Ende. Die Sammlungen der ehemaligen Textildruckfirma Pausa in Mössingen**

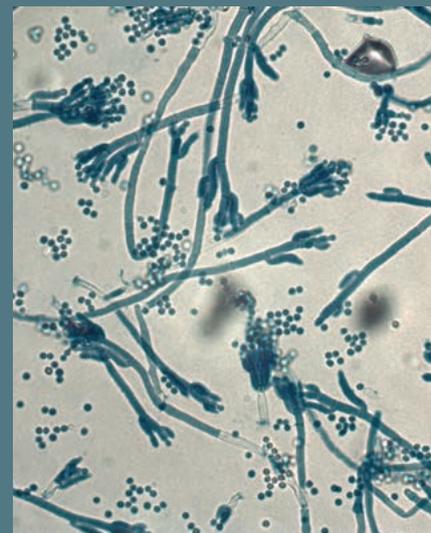
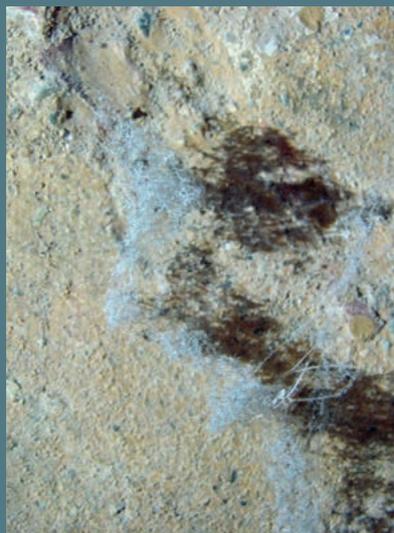
Mit Beiträgen von Hermann Berner, Gabriele Braun, Sabine Breer, Dieter Büchner, Catharina Geiselhart, Klaus Lehmann, Maren Mau-Pieper, Andreas Menrad, Susanne Mutschler, Andrea Pataki-Hundt, Engelbert Schramm und Anu Ventelä
2015; ISBN: 978-3-8062-3267-7



Das von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderte Projekt „Raumklimastabilisierung zum Erhalt der durch anthropogene Umwelteinflüsse im Bestand gefährdeten Wandmalereien in der Kirche St. Georg – UNESCO-Weltkulturerbe Klosterinsel Reichenau. Anforderungen, Konzeptentwicklung, Umsetzung und Erprobung einer prädiktiven Raumluftkonditionierung“ fand im März 2017 mit einer Tagung auf der Reichenau seinen Abschluss.

Ein interdisziplinäres Team aus Denkmalpflege, Konservierungs-, Natur- und Ingenieurwissenschaften untersuchte die Gefährdungspotenziale für die Wandmalereien infolge von Klimaschwankungen. Messungen zu den Belastungen durch Salze, mikrobiellen Befall und Staubpartikel erbrachten weitreichende Erkenntnisse zu den Schadensmechanismen. Ein Raumluft-Monitoring gab u. a. Aufschluss über die Zusammenhänge von Staubbelastung und Besucherintensität.

Hauptbestandteil des Projektes war ein Klima-Monitoring und eine darauf basierende, kontrollierte Konditionierung der Raumklimaverhältnisse in Krypta und Mittelschiff als Beitrag zum langfristigen Erhalt der Wandmalereien. Der vorliegende Tagungsband fasst die Ergebnisse aus dem zwei Jahre dauernden DBU-Projekt zu den Wandmalereien zusammen.



ISBN 978-3-7995-1228-2



WWW.THORBECKE.DE
HERGESTELLT IN DEUTSCHLAND

ISBN 978-3-8167-9889-7



Fraunhofer IRB Verlag
www.baufachinformation.de