

Nicole Riedl

Die Konservierung der römischen Außenmalerei an der Konstantinbasilika

Seit dem Jahr 2008 werden Umfang und Progression der Schäden an den römischen Außenmalereien der Konstantinbasilika dokumentiert und ausgewertet.¹ Ziel ist eine fundierte Ermittlung der Schadensursachen durch eine Synthese von restaurierungswissenschaftlicher Kartierung und Befundicherung mit naturwissenschaftlichen und historischen Untersuchungen. Die Ergebnisse dieser Voruntersuchungen bilden die Grundlage zur Erarbeitung eines langfristigen Erhaltungskonzeptes.

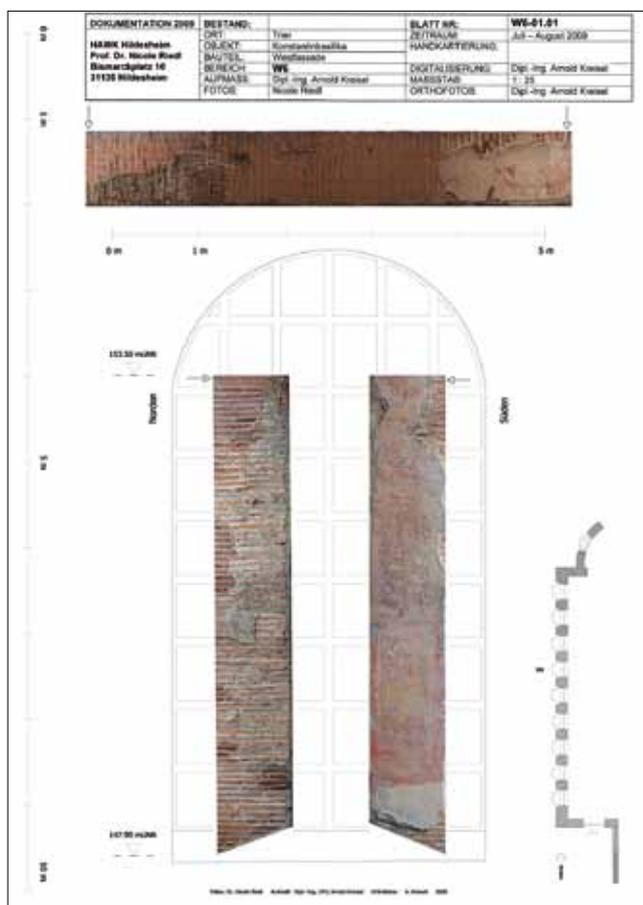


Abb. 7-1: Fensterachse W6, Kartierungsgrundlage zur Untersuchung der römischen Außenputze

Untersuchungsmethoden

Um eine effiziente Durchführung der Untersuchung mit wissenschaftlichem Anspruch zu gewährleisten, wurde auf die Erstellung eines nachhaltigen Systems sich ergänzender

Untersuchungsmethoden geachtet. Den Anfang bildete die photogrammetrische Vermessung der Fensterachsen entlang der Westfassade und Apsis.² Darauf folgte zunächst eine rein phänomenologische Autopsie der malereitragenden Putze unter zur Hilfenahme von Stirnlupen, eines flexiblen digitalen Mikroskop (VHX, Keyence) und der Betrachtung unter UV-Licht.³ Die dabei erkannten Phänomene wurden in der Folge in einem bebilderten Glossar erfasst. Diese Maßnahme diente der begrifflichen Vereinheitlichung für die folgende,

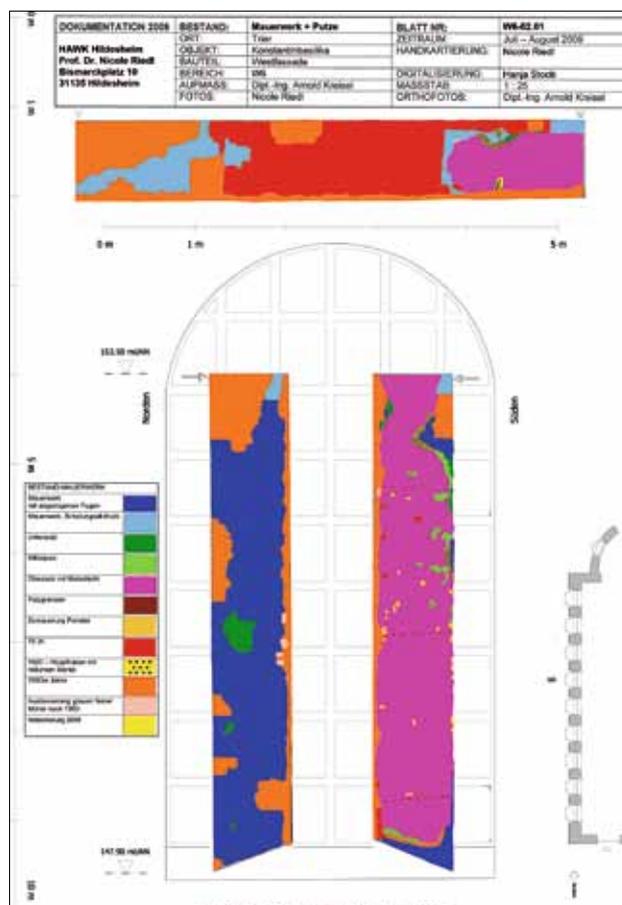


Abb. 7-2: Fensterachse W6, Beispiel für die detaillierte Aufnahme des Bestands an historischen Putzen und Malereien sowie nachträglichen Überarbeitungsphasen

von verschiedenen Bearbeitern durchgeführte Kartierung.⁴ Diese Kartierungen erstreckten sich nicht ausschließlich auf die Putze der Fensterlaibungen und ihre erhaltenen Maleriereste, sondern auch auf die biogenen Ablagerungen auf den Sohlbänken der Fenster. Zuletzt wurde die Kartierung jeder

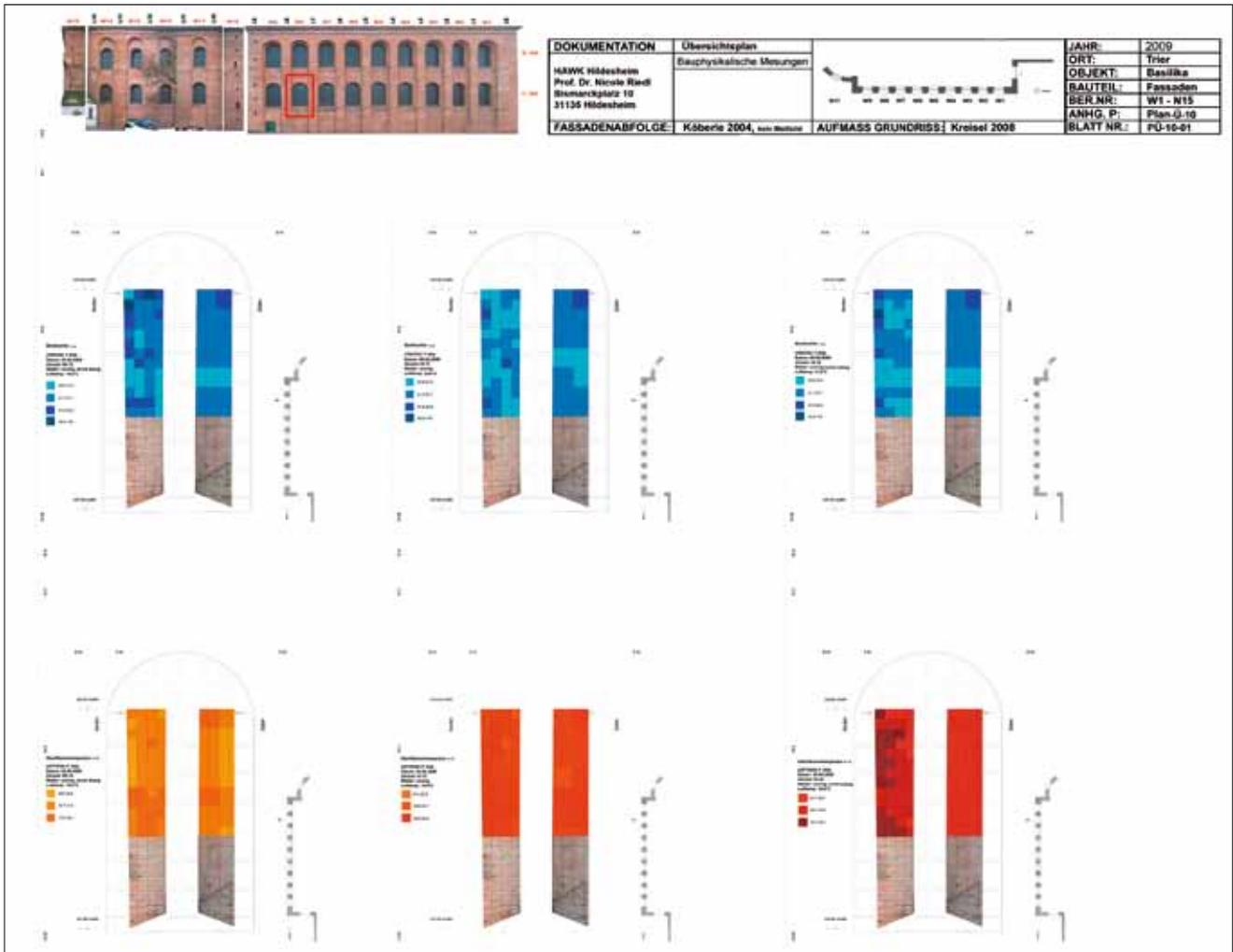


Abb. 7-3: Übersichtskartierung zu bauphysikalischen Messungen

Fensterachse digitalisiert, ausgewertet und zusammenfassend in Übersichtsplänen dargestellt (Abb. 7-1–7-2).⁵

Parallel zu diesen restaurierungswissenschaftlichen Maßnahmen war die Erfassung der klimatischen Rahmenbedingungen besonders wichtig. Dabei konnten mit berührungsfreien bauphysikalischen Handmessungen beispielhaft an der Fensterachse W9 Aussagen zu Schwankungen in der Oberflächentemperatur und Materialfeuchte innerhalb eines Tages getroffen werden (Abb. 7-3).⁶ Für die Langzeiterfassung des Klimas an der Konstantinbasilika wurden darüber hinaus stationäre Klimamessgeräte in der Fensterachse W3 installiert.⁷ Ergänzende Untersuchungen wie ein Oberflächenmonitoring durch 3D-Scan und naturwissenschaftliche Untersuchungen von Materialproben sind mit entsprechend qualifizierten Kooperationspartnern realisiert worden.⁸

Zustand der römischen Außenputze nach ca. 150 Jahren freier Bewitterung

Allgemeiner Überblick über die Schadensphänomene

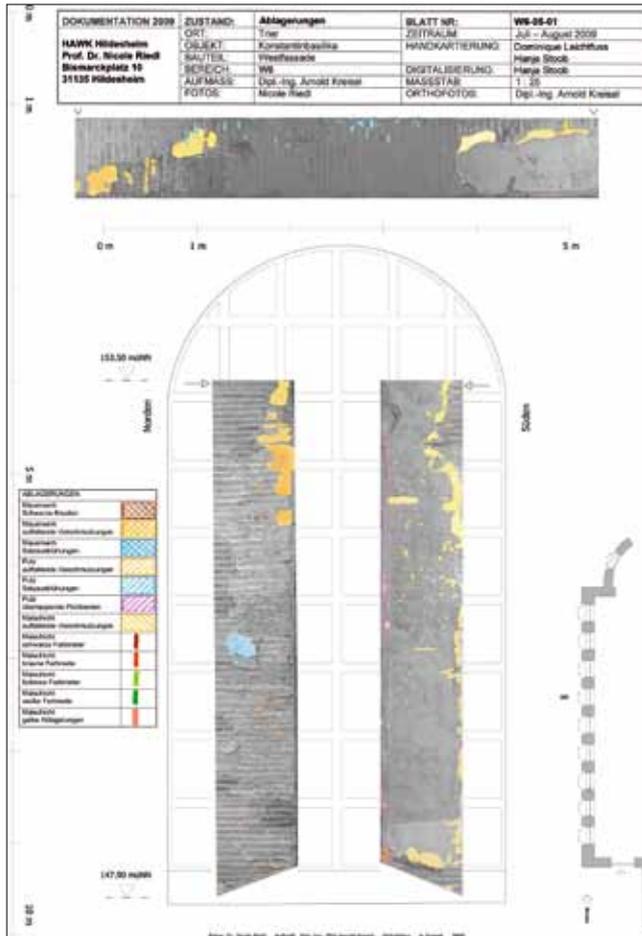
Der mit Ziegeln errichtete römische Bau ist heute seiner schützenden Außenputzhaut fasst vollständig beraubt. An-

tike Putzreste mit Malerei finden sich lediglich in den Fensterlaibungen der Westfassade (W2-W9) und in der ersten Fensterachse der im Nordwesten anschließenden Apside (N11) auf der Ebene der unteren Geschossreihe. Auf der Nordwestseite der Konstantinbasilika haben sich zwar großflächig römische Putzreste erhalten, jedoch ohne Malerei.⁹

Das Mauerwerk der Basilika ist durch mechanische Einwirkungen an zahlreichen Stellen beschädigt und herausgebrochen. Die entstandenen Fehlstellen zeigen entfestigte Oberflächen und zurückgewitterte Ziegel und Setzmörtel.

Auffällig ist die starke Verschmutzung des Mauerwerks. Sowohl grau-schwarze, feinpulvrige lose Auflagen, als auch dünne, unregelmäßige, poröse Krusten sind erkennbar. Darüber hinaus durchziehen ausgeprägte Risse das Mauerwerk. Auf mehreren Ziegeloberflächen sind locker aufliegende, weiße, kristalline Strukturen oder flaumig fein-nadelige, dünne, geschlossene Schichten von Salzausblühungen erkennbar. Einzelne Ziegel sind von Haarrissen durchzogen, Bröckelzerfall und Aufblättern der Substanz sind erkennbar (Abb. 7-4).

Bei der Betrachtung des Zustandes des Mauerwerks fällt auf, dass der Stabilitätsverlust in Fensterachse W9 am stärksten, in der Fensterachse W3 am geringsten ausgeprägt ist. Nur die Nordlaibungen zeigen offenes Mauerwerk, wobei in den Achsen W7, W6, W5 und W3 keine, in den Achsen W9



und W8 nur im oberen Bereich Putze erhalten sind. In Achse W4 zeigen sich solche im oberen und unteren Bereich.¹⁰ Insgesamt sind auf den Südläbungen mehr Putze erhalten.

Die noch erhaltenen *römischen Putze* sind durch mechanische Beschädigungen verletzt und zahlreiche Fehlstellen sind vorhanden (Abb. 7-5). Helle Bruchkanten an den Originalputzen weisen auf zeitnahe Verluste und damit auf eine anhaltende Schadensprogression hin. Feine, schwarzgraue, lose aufliegende Ablagerungen in den Vertiefungen der unregelmäßigen zurückgewitterten Putzoberflächen belegen auch für die Putze eine starke Oberflächenverschmutzung. Der Originalputz ist an zahlreichen Stellen geschädigt, weich und entfestigt. Die Putzstruktur sandet ab, aus dem Putzverband lösen sich kleine, flache Schuppen von ca. 10 mm. Feine Haarrisse durchziehen alle drei Putzlagen und führen zu Abbröckeln, Aufblättern, Schalenbildung und Deformierungen mit fortschreitendem Substanzverlust (Abb. 7-6, 7-7). Lockere, kristalline Strukturen, die in geschützten Vertiefungen von Putzfehlstellen liegen, oder dünne, geschlossene weiße Schichten auf der Putzoberfläche deuten auf die hohe Salzbelastung der Außenputze hin.

Bezüglich der *Stabilitätsverluste der Putze* fällt zunächst auf, dass sie auf der nördlichen Hälfte der Westfassade und in den Nordläbungen stärker gefährdet sind als in der Südhälfte und in den Südläbungen. Beim erhaltenen Putzbestand ist eine höhere Instabilität in den Nordläbungen gegenüber den Südläbungen auffällig.

Die römischen *Malschichten* mit flächig angelegten violetten Hintergründen und roten Rahmen sind durch Bindemittelverlust matt und porös, sie liegen als feines Pulver ungebunden auf der Oberfläche. Davon heben sich die pastosen Malschichten mit der floralen und figürlichen Darstellung flächig ab und liegen blattartig lose auf. Darüber hinaus lösen sich Teile der Malschicht schuppenartig ab und wölben sich nach oben (Abb. 7-8, 7-9). Auffällig sind zudem Bereiche, in denen die stabile, glatte Malschicht von vielen kleinteiligen Fehlstellen durchzogen wird. Die Zuschlagskörner des Oberputzes liegen offen, die Malschicht wirkt wie fein durchlöchert. Reste eines Festigungsmittels liegen auf der Oberfläche der Malerei als dünner, glänzend-weißer Überzug oder als vergilbte, dicke und aufgebrochene Schicht.

Die Kartierung des *Zustandes der Malschicht* zeigt deutlich, dass eine zusammenhängende Malschicht auf den Nordläbungen nicht mehr vorhanden, sondern bereits komplett abgewittert ist. Betrachtet man nun die Südläbungen zusammenfassend, so fällt auf, dass in der Südhälfte der Fassade weniger Malschichtbestand erhalten ist, als in der Nordhälfte: Vor allem von Fensterachse W6 bis W9 ist der Bestand erstaunlich hoch, während sich von W5 bis W3 kaum noch Malschichten nachweisen lassen. Die erhaltenen Reste weisen darüber hinaus einen unterschiedlichen Grad der Malschichtstärken auf, wobei die erhaltenen dickeren Malschichtpakete auf der Nordhälfte der Westfassade hohen Stabilitätsverlust durch abblätternde Malschichten zeigen.

Abb. 7-4: Fensterachse W6, Kartierung des Zustandes, Ablagerungen auf der Oberfläche

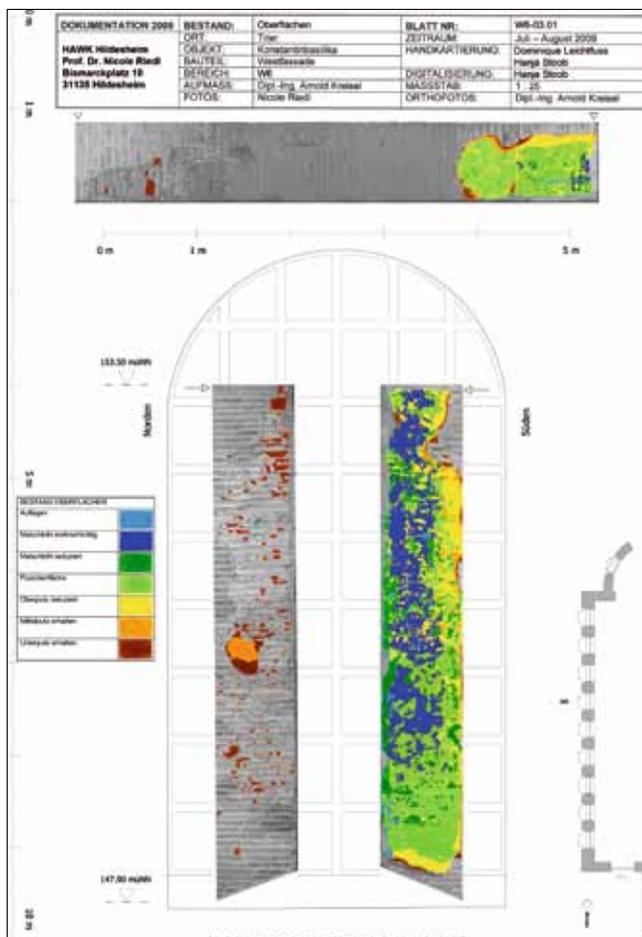


Abb. 7-5: Fensterachse W6, Kartierung des Zustandes, Erhaltene Oberflächen

Weiterführende Untersuchungen zur Analyse der Schadensprozesse

Nach diesem anfänglichen Überblick über das Objekt sollen nun die unterschiedlichen Untersuchungen vorgestellt werden, die eine Vertiefung der Kenntnisse zur Ermittlung der Schadensprozesse ermöglichen.

Methodische Grundlage bildet die Überlegung, dass sich die Schadensursachen unter zwei Hauptpunkten fassen lassen: Einmal die besonderen Eigenschaften der verwendeten historischen Werkstoffe (materialimmanente Ursachen) und zum anderen die Auswirkungen der bei späteren Konservierungsmaßnahmen benutzten Materialien (konservierungsbedingte Ursachen). In Gang gesetzt werden die Schadensprozesse durch unterschiedliche klimatische Komponenten, wie Temperatur, Thermik, Feuchtigkeit, Sonneneinstrahlung. Diese wirken entlang der Fassade unterschiedlich intensiv auf die Außenmalereien ein. Ziel der Untersuchungen war in der Folge, möglichst viele Informationen zusammenzutragen, um die diesem Modell impliziten komplexen Wechselwirkungen hinsichtlich der Hauptursachen herauszuarbeiten.

Analyse bauschädlicher Salze

Aussagen hinsichtlich der materialimmanenten Schadensauslöser lassen sich anhand von Salzproben gewinnen.¹¹ Somit erfolgte zunächst die Erstellung von Salzprofilen unter dem Gesichtspunkt der Verteilung und der Art der Salzbelastung an der Konstantinbasilika. Dabei sollte die Frage beantwortet werden, ob die verwendeten Mörtel aus dem 19. Jahrhundert und aus den 1950er Jahren hohe Schadenspotentiale besitzen. Zum anderen stellte sich die Frage, ob eine Abweichung in der Salzbelastung der Nord- und Südläufigen eine Aussage zur Schadensprogression ermöglicht.

Im Jahr 2008 erfolgte in einem ersten Schritt die Untersuchung der repräsentativ entnommenen Salzproben hinsichtlich ihrer kristallinen Zusammensetzung.¹² Sowohl Gips als auch Magnesiumsulfate konnten als bauschädliche Salze definiert werden. Auffällig ist, dass die Magnesiumsulfate in unterschiedlichen Hydrationsstufen vorkommen, sowohl als Epsomit ($\text{MgSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$) als auch als Hexahydrat ($\text{MgSO}_4 \times 6\text{H}_2\text{O}$). Geringe Mengen an Chlorit sind vor allem als Bestandteil der schwarzen Schmutzablagerungen erkannt worden.

Zusätzlich konnten im Jahr 2009 Höhen- und Tiefenprofile der Salzbelastung in den Mörteln gewonnen und die Gegenüberstellung der Salzbelastung von Nord- und Südläufig durchgeführt werden.¹³ Die entnommenen Proben lassen sich unter zwei Typen fassen: Einmal handelte es sich um auskristallisierte Oberflächenablagerungen, zum anderen um Tiefenproben aus Mörtelmaterial in unterschiedlichen Wandtiefen. Das Probentiefenintervall gestaltete sich wie folgt: 0–2 mm, 2–5 mm und 5–10 mm (Abb. 7-10).

Anhand der Analysen sind folgende Hinweise zu den oben vorgestellten Fragen ableitbar: Es zeigte sich ein hoher Anteil an Magnesiumsulfaten. Da dieser Salztyp in Abhängigkeit von der Luftfeuchtigkeit starken Volumenschwankungen unterworfen ist, weist er ein hohes destruktives Potenzial auf.¹⁴ Daher war weiter zu klären, ob Magnesium-

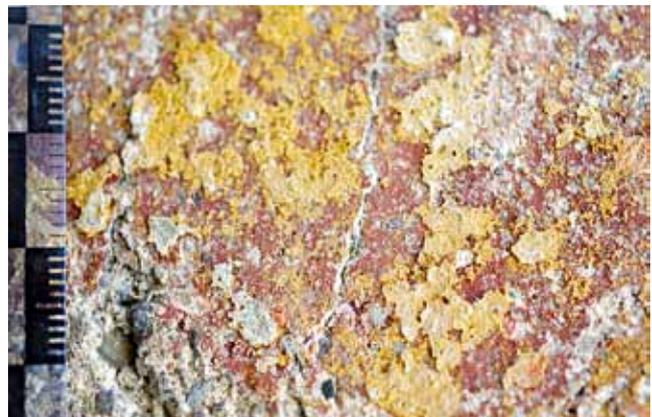


Abb. 7-6: Aufgebrochene Putzkanten auf geschädigtem Ziegelmauerwerk



Abb. 7-7: Strukturell entfestigte Putzpartie mit Schalenbildung

Abb. 7-8: Entfestigte Malschichtschollen auf pudernden Malgründen



sulfat den Hauptschadensfaktor darstellt. Dazu wurde der wasserlösliche Salzgehalt der Proben mittels Ionenchromatographie analysiert¹⁵ und die Ergebnisse rechnerisch ausgewertet. Die Interpretation erfolgte mit dem Programm ECOS (Environmental control of Salts – Runsalt v. 1.8):

Insgesamt ist der Salzgehalt hoch, die häufigste Salzvarietät ist Gips. Dieser konzentriert sich im oberflächennahen

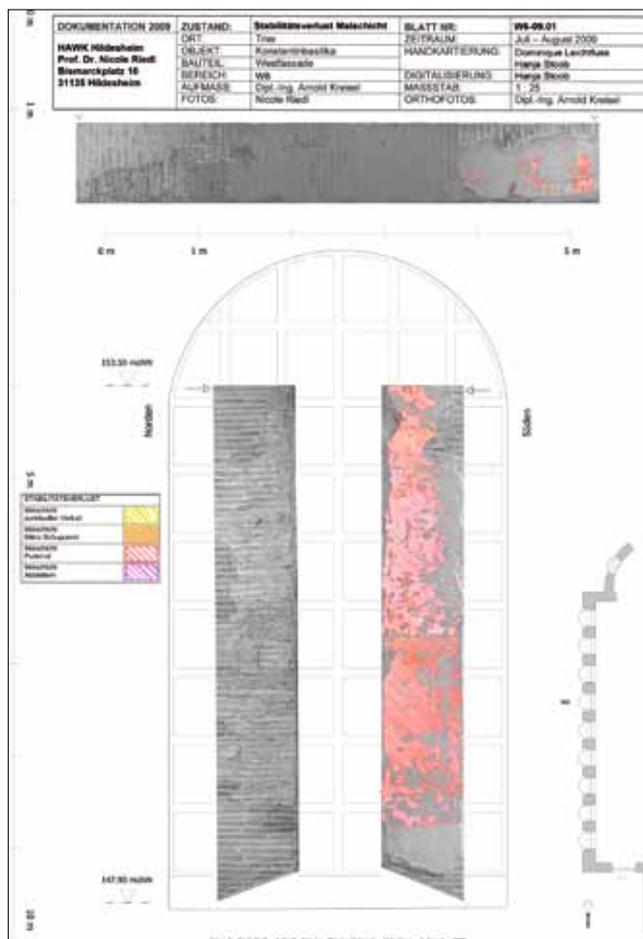


Abb. 7-9: Fensterachse W6, Kartierung des Zustandes, Schäden in der Malschicht

Bereich von 0–2 mm Tiefe und erreicht dort Konzentrationen von 11 % bis zu 52 %. Diese oberflächliche Ablagerung von Gips lässt darauf schließen, dass sich der Gips durch Luftverschmutzung in Gegenwart von Feuchtigkeit ausbilden konnte. Weitere Salzbelastungen bestehen aus Magnesium in Kombination mit Nitraten und Sulfaten, deren Gehalt jedoch deutlich geringer ist und insgesamt bei maximal 7,5 % liegt. Chloride treten nur in sehr geringen Mengen auf, gemeinsam mit den Ergebnissen aus dem Jahr 2008 liegt die Vermutung nahe, dass die Chloride durch die Ablagerung von Luftverschmutzungen herangetragen werden. Der relativ hohe Anteil von Magnesiumsulfat konnte sich vermutlich in Gegenwart von Feuchtigkeit aus Dolomitkalk des originalen Mörtels, Gips und zementhaltigen Ergänzungsputzen der 1950er Jahre bilden.

Von allen analysierten Proben ist der Gesamtgehalt an Salzen in der Mörtelprobe aus dem 19. Jahrhundert am geringsten und zeigt 0,15 %. Diese Ausbesserungsphase ist demnach nicht als relevante Schadensquelle anzusehen. Dagegen verweist der hohe Anteil an zementgebundenen Ergänzungsmassen aus den 1950er Jahren entlang der Westfassade auf die verstärkte Bildung von bauschädlichen Salzen insgesamt hin.¹⁶

Die Gesamtmenge an löslichen Salzen ist in Fensterachse W4 auf der Nordseite (1,75 %–2,5 %) höher als auf der Südseite (0,75 %–1,5 %). Der Gipsgehalt in Fensterachse W9

unterscheidet sich ebenfalls zwischen der Nord- und Südseite. Während auf der Südseite 16 % Gipsgehalt nachgewiesen werden kann, ist es auf der Nordseite eine enorme Menge von 47 %. Im nördlichen Teil der Westfassade überwiegt der Anteil an Magnesiumsulfat, während im südlichen Teil der Westfassade Natriumnitrat und Natrium-Magnesiumsulfat vorherrschen.

Insgesamt ist der Anteil an löslichen Salzen in den stärker geschädigten Nordlaibungen höher als in den weniger geschädigten Südlaibungen. Der Kontrast zwischen der Menge an löslichen Salzen ist in Fensterachse W4 sehr stark, in Fensterachse W9 weniger stark ausgeprägt. Der Anteil an Magnesiumsulfat ist aber in W9 höher als in W4. In W4 sind außer Gips die Salztypen Natriumsulfat und Natrium-Magnesiumsulfat vorherrschend.

Untersuchung der Konservierungsmaterialien aus den 1950er Jahren

Anhand der Übersichtskartierung zum Schutzlack aus den 1950er Jahren (Abb. 7-11) wird erkennbar, dass der festigende Überzug nur noch auf den Südlaibungen entlang der Westfassade liegt. Die Nordlaibungen weisen dagegen keinen kompletten Erhaltungszustand aus Putzaufbau mit Malerei auf. Während der Überzug auf den Südlaibungen im südlichen Abschnitt der Westfassade von W3 bis W5 optisch nicht erkennbar ist, tritt er ab der Fensterachse W6 dagegen deutlich wahrnehmbar auf. Die Schichtdicke und das Ausmaß der Überzugauflage nehmen kontinuierlich zum nördlichen Bereich der Westfassade zu. Der Überzug variiert in seinem Erscheinungsbild. Er ist sowohl weißlich, dünn und spröde und glänzt im Gegenlicht als auch dick, in sich gebrochen, vergilbt und craqueliert.

Betrachtungen der Oberflächen unter UV-Licht¹⁷ lassen eine gelbgrünliche Fluoreszenz erkennen, die anhand der erkennbaren Streichkanten eindeutig mit dem Festigungsfilm in Verbindung gebracht werden kann. Zudem zeigt die Fluoreszenz, dass der Überzug nicht mehr vollflächig erhalten ist, sondern fleckhaft auf der Oberfläche angeordnet ist. Auf der Apsidenfassade in Achse N11 ist der Überzug als dicke, vergilbte und schuppige Schicht erkennbar. Geht man davon aus, dass der Überzug entlang der Westfassade und der Apsis relativ einheitlich aufgetragen wurde,¹⁸ dann bedeutet der heutige Erhaltungszustand, dass die Verwitterungsstärke entlang der Westfassade in Bezug auf den Festigungsfilm im Süden deutlich erhöht ist im Gegensatz zum nördlichen Bereich.

Analyse der Festigungsfilme auf der Oberfläche

Die Hauptkomponente des dünnen, weißlich glänzenden Überzugs besteht aus Silikaten, die sich stellenweise dick an der Oberfläche angereichert haben. Es handelt sich um amorphe Gläser, die von dünnen Schichten aus Gips durchsetzt sind. Es kann von einer Wasserglasfestigung ausgegangen werden, die jedoch zum gegenwärtigen Stand der Untersuchungen nicht anhand von Schrift- oder Bildquellen belegbar ist. Vermutlich wurde die Wasserglasfestigung im

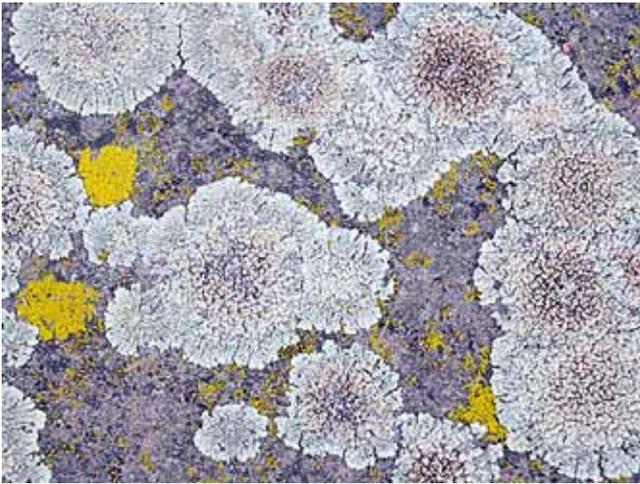


Abb. 7-12: Sohlbank Fensterachse W4, Flechtenbesiedlung an der Konstantinbasilika



Abb. 7-13, 7-14: Vergleich des Oberflächenmonitorings von 2009 und 2010

Abb. 7-15: Die bauliche Situation um die Konstantinbasilika, Luftaufnahme und schematische Darstellung des klimatischen Einflusses



sie die freie Außenbewitterung darstellt, unterliegen auch die UP-Lacke der Alterung. Die direkte Sonnenbestrahlung, Kälte und Wärmeeinwirkung sowie direkte Beregnung und extreme Wechsel in der umgebenden Luftfeuchtigkeit führen zum Zersetzen der Lacke.²³

Die heterogene Abwitterungsrate der Lacke entlang der Westfassade steht in einem auffälligen Zusammenhang mit der Besiedlung von Flechten auf den 1 m tiefen Sohlbänken im 1. Obergeschoss der Basilika. Beide Phänomene treten in unterschiedlicher Intensität auf.

Kartierung der Flechtenbesiedlung

Anhand der Ausprägung und dem Ausmaß der Flechtenbesiedlung auf den in den 1950er Jahren angebrachten Steinplatten können verschiedene Phänomene abgeleitet werden: Zunächst ist auffällig, dass die Flechtenbesiedlung entlang der äußeren Kante der Platten verläuft und allmählich in einem runden Verlauf sich zum Fenster hin ausbreitet. Die gesamte Besiedlung ist jedoch jeweils stärker in der nördlichen Hälfte der Sohlbank angesiedelt, während sich in der südlichen Hälfte wenige bis keine Besiedlung ausgebreitet haben. Vergleicht man nun das Wachstum der Flechten auf den einzelnen Fensterlaibungen entlang der Westfassade, bemerkt man, dass die Besiedlung im südlichen Fassadenabschnitt von W3 bis W5 stark vertreten ist, sich ab Fensterachse W6 bis W7 allmählich verringert und in W8 und W9 nicht mehr vorhanden ist (Abb. 7-11, 7-12).

Damit wird deutlich, dass die Flechten vor allem dort gewachsen sind, wo der Lack am stärksten verwittert ist. Wie können diese Zusammenhänge erklärt werden?

Flechten besitzen keine Möglichkeit, ihren Wasserhaushalt zu regeln, da sie keine echten Wurzeln zur aktiven Wasseraufnahme und auch keinen Verdunstungsschutz besitzen. Nur über die Oberfläche des Flechtenlagers können sie wie ein Schwamm Wasser in relativ kurzer Zeit aufsaugen, entweder in flüssiger Form oder als Wasserdampf. Bei Trockenheit verlieren sie schnell das für die Aufrechterhaltung des Stoffwechsels nötige Wasser und wechseln in einen photosynthetisch inaktiven „leblosen“ Zustand, in dem der Wassergehalt bei weniger als zehn Prozent des Trockengewichts liegen kann.

Dieser heterogene Flechtenbewuchs deutet also darauf hin, dass ein unterschiedliches Wasserangebot entlang der Westfassade vorhanden ist. Die stärkere Ausprägung der Flechtenbesiedlung im südlichen Fassadenteil spricht dafür, dass hier ein höheres oder langanhaltendes Feuchteangebot auftritt. Dagegen scheint sich im nördlichen Fassadenbereich über längere Zeiträume und wiederkehrend ein trockeneres Klima in den Fensterlaibungen einzustellen. Die höhere Feuchtigkeitsbelastung auf der Südhälfte der Fassade hat demnach auch die Verwitterung der Lacke erhöht.

Oberflächenmonitoring mit Hilfe von 3-D-Streifenprojektion

Entlang der Westfassade der Konstantinbasilika sind durch die Zwischenergebnisse zur Voruntersuchung deutliche Ver-

witterungsprogressionen an den Außenmalereien erkennbar geworden. Um diese auch in einem berührungsfreien, messbaren Verfahren darstellen zu können und über einen mehrjährigen Zeitraum Prognosen zur Stärke der Progression treffen zu können, ist seit 2009 die 3D-Streifenprojektion als hochgenaue Objekterfassung an der Fensterachse W4 und W5 angewendet worden.²⁴ Die Vorteile sind das Erreichen einer hohen Messpunktdichte in kurzer Zeit und die Gewinnung einer präzisen, flächenhaften Aussage über die Objektgeometrie.²⁵ Der Scanner konnte auf der Sohlbank der Fenster niche installiert und die entsprechende Software unabhängig vom Scanner auf dem Gerüst platziert werden, wodurch erschütterungsfreies Arbeiten möglich wurde. Die 3D-Streifenprojektion ist ein aktives Triangulationsverfahren.²⁶ Dabei wird über einen Projektor ein Streifenmuster auf ein Objekt projiziert. Dieses Streifenmuster deformiert sich in Abhängigkeit von der Form des Objekts. Zwei Kameras zeichnen das deformierte Muster auf, welches als Grundlage für die Bestimmung der Topographie des Objektes dient. Die Systemgenauigkeit hängt vom Auflösungsvermögen des Projektors, der Kameras sowie den Einflussfaktoren der Umgebung, vor allem den Lichtverhältnissen, ab.²⁷ Am Messobjekt müssen Passpunkte eingemessen werden, die sich nicht verändern dürfen.²⁸ Dies ist vor allem für ein Langzeitmonitoring extrem wichtig, denn nur so können zeitlich unterschiedlich aufgenommene Messungen später miteinander verglichen werden.

Bereits der Vergleich von Messungen aus den Jahren 2009 und 2010 zeigt Rückverwitterungsraten auf. Aus dem Malereiverbund lösen sich innerhalb von nur einem Jahr der Außenbewitterung Partikel heraus und werden abgetragen. Diese Erscheinungen haben sich bis zum Jahr 2012 potenziert und konzentrieren sich in ihrem stärksten Ausmaß an den exponierten Außenseiten der Fensterlaibungen. Die aktive Schadensprogression wird auf diese Weise messbar und anhand der Graphik visuell nachvollziehbar (Abb. 7-13, 7-14).

Interpretation der Untersuchungsergebnisse in Abhängigkeit zur freien Bewitterung

Die vorgestellten Untersuchungsergebnisse ermöglichen nun eine zusammenfassende Interpretation der Hauptschadensursachen und ihrer Auswirkungen auf die Malereien. Schadensauslöser ist das einwirkende Klima, was sich wiederum aus verschiedenen Größen zusammensetzt, die unterschiedlich intensiv wirken: Die direkte Einwirkung von intensiven Klimaschwankungen ermüden und zersetzen das historische Material. Die wichtigsten Einflussgrößen sind Schwankungen in der Luftfeuchtigkeit und Lufttemperatur, Niederschlag, Schwankungen der Materialfeuchtigkeit und Materialtemperatur, Einwirkungen von Wind und Sonneneinstrahlung (Abb. 7-15).²⁹ Das Oberflächenprofil der Westfassade spiegelt somit die Schadensprogression wieder, wobei ein deutlicher Unterschied im Verwitterungsverhalten sowohl von Nord- und Südhälfte der Fassade als auch von Nord- und Südläubung der einzelnen Fensterachsen erkennbar ist. Im Folgenden sollen diesen Beobachtungen Erklärungsmodelle angefügt werden.

Das stark bauschädliche Salz Magnesiumsulfat wechselt abhängig von der **Umgebungstemperatur und Luftfeuchtigkeit** aktiv in unterschiedliche Hydratstufen.³⁰ Jeder Wechsel ist mit einer Volumenänderung verbunden, so dass das historische Verputzmaterial einem hohen Stress ausgesetzt wird. Es zermürbt und geht schließlich komplett verloren. Entlang der Westfassade zeigt sich das hohe Schadenspotential von Magnesiumsalzen vor allem in den Nordlaibungen, hier ist es bereits zu einem Totalverlust an Malschicht und Oberputzschichten gekommen. Darüber hinaus wirken sich die stärkeren Klimaschwankungen in der Nordhälfte der Fassade extremer auf die römischen Außenmalereien aus, weil hier die Kristallwechsel häufiger auftreten. Die gemessenen **starken Wechsel in der Luftfeuchte und Lufttemperatur** haben darüber hinaus direkten Einfluss auf die weiteren vorhandenen Salzmischungen: Natriumsulfat, Natrium-Magnesiumsulfat, Kaliumnitrat und Magnesiumnitrat. Diese Salzmischung beginnt bei 75–88 % relative Luftfeuchtigkeit und 20 °C auszukristallisieren. Im Spektrum der stark wechselnden Umgebungstemperatur an der Basilika muss man davon ausgehen, dass eine Luftfeuchtigkeit zwischen 60–88 % zu unterschiedlichen Hydratationsstufen der vorliegenden Mischsalze führt. Das historische Material wird zu thermischen und hygri-schen Spannungen gezwungen und enorme Schäden prägen sich aus. Sie zeigen sich als entstehende Risse, Abhebungen, Kohäsions- und Adhäsionsverluste im Mikrogefüge und an Materialgrenzen.

Die Aufzeichnungen verschiedener Klimadaten haben die höhere Verwitterungsrate auf der Nordhälfte der Fassade bestätigt, denn der Klimawechsel in den Nordlaibungen ist höher als in den Südläubungen. Die **direkte Sonneneinstrahlung** auf den Nordlaibungen tritt häufiger auf als in den Südläubungen. Grund dafür ist die Ausrichtung der Fensterlaibungen. Die Südläubungen aller Fenster entlang der Westfassade sind nach Nordosten ausgerichtet und liegen deshalb im Verlauf des Tages größtenteils im Schatten. Nur in den Sommermonaten werden die Südläubungen in den Abendstunden von der tief stehenden und wenig intensiven Sonne bestrahlt. Dagegen beginnt die Aufwärmung der Oberflächen in den Nordlaibungen mit der Initialbesonnung³¹ am frühen Nachmittag. Die partielle Aufwärmung der nördlichen Oberflächen, im Mittel handelt es sich um 5 Oberflächentemperatursprünge pro Tag, führen dort zu einer höheren Verlustrate an Putz- und Malschichten.

Das Sonnenlicht schädigt hier in zweifacher Weise, durch die Wärmeentwicklung als auch durch die hohe Energie des elektromagnetischen Spektrums:

Das Sonnenlicht umfasst neben dem sichtbaren Licht (380–780 nm) auch ultraviolette Strahlung (140–400 nm). Der Wellenlängenbereich der UV-Strahlung unterteilt sich in nahes UV (langwellig–400–320 nm), mittleres (280–320 nm), fernes (kurzwelliges–200–280 nm) und Vakuum-UV (140–200 nm). Die Grenzen dieser Einteilungen sind fließend. Der Energieinhalt der Strahlung nimmt, gemäß dem Planckschen Gesetz, mit abnehmender Wellenlänge zu. Das nahe, langwellige UV-A Licht ist relativ harmlos für Kulturgüter, während mittleres und fernes kurzwelliges UV-Licht extrem gefährlich ist. Diese ultravioletten Strahlungen können chemische Reaktionen hervorrufen, die bei bestimmten Stoffen zu Veränderungen ihrer Eigenschaften



Abb. 7-16: Festigung der Malschicht über Japanpapier



Abb. 7-17: Beispiel der Oberflächenreinigung

Abb. 7-18: Anwendungstechnik von Gommapane



führen.³² Das bedeutet, dass sowohl die originale Materie wie Mauerwerk, Setzmörtel, Putzschichten, Pigmente und originale Bindemittel wie auch nachträglich eingebrachte Restaurierungsmaterialien auf die UV-Strahlung reagieren.³³ Die Intensität der kurzwelligigen Strahlung unterscheidet sich auf den Nord- und Südlaubungen der Konstantinbasilika. Die UV-A Strahlung ist an wolkenlosen Tagen acht Mal höher als auf der Südlaubung, die UV-B Strahlung sogar ca. zehn Mal so hoch.³⁴ An bewölkten Tagen gleichen sich die gemessenen Werte beider Laubungen an.

Darüber hinaus wird durch auftreffendes Licht aus dem langwelligen IR-Bereich eine **hohe Wärmeentwicklung** auf der historischen Oberfläche erzeugt, die vor allem beim Vorhandensein von organischen Bindemitteln und von Konservierungsmitteln zu Schäden durch thermische Dilatation führen kann. Hier sind vor allem die Sonneneindauer und ihre direkte Einwirkung auf das historische Material ausschlaggebend. In der Unterschiedlichkeit der Erhaltungszustände sind die Auswirkungen dieser Effekte direkt an den Trierer Außenmalereien ablesbar: Entlang der Westfassade wirken sich die Temperatursprünge durch Sonneneinstrahlung besonders in der Nordhälfte aus, da hier die Länge der solaren Strahlung über das Jahr stärker ausgeprägt ist als auf der Südhälfte. Die Westseite der Konstantinbasilika liegt aufgrund ihrer Ausrichtung morgens im Schatten, im Verlauf des Mittags sind die nördlichen Bereiche an unbewölkten Tagen zuerst der Sonne ausgesetzt.³⁵ In Abhängigkeit des Jahresverlaufs beginnt die direkte Sonneneinstrahlung im August bereits um 14.00 Uhr, dagegen im Januar erst zwischen 15.00 und 16.00 Uhr und wandert dann auf der Westfassade langsam bis zur südlichen Fensterachse. Schwankt der Bewölkungsgrad im Laufe des Nachmittags, sind die Temperaturschwankungen entsprechend schwächer. Aufgrund ihrer Häufigkeit können sie jedoch ebenfalls zu Spannungen im Putz- und Malereigefüge führen.

Durch die freie Bewitterung waren und sind die historischen Oberflächen einer weiteren Schadensquelle ausgesetzt: der **Luftverschmutzung**. Die angetragenen Stäube setzen sich vorwiegend aus Reifenabrieb, biogenen Ablagerungen, schwefelhaltigen Abgasen und Salzen wie Chloriden zusammen.³⁶ Auffällig ist eine vermehrte Ablagerung in der Nordhälfte der Westfassade, besonders ausgeprägt in den Nordlaibungen. Dadurch ist es verstärkt zu Sekundärreaktionen gekommen: Unter Feuchtigkeitseinwirkung kann Schwefel aus der Luft auf den kalkreichen Oberflächen in **Gips** umgewandelt werden. Diese Gipsentstehung ist an den Außenmalereien in hohem Maße nachweisbar. Sie hat sich besonders in den oberflächennahen Bereichen der römischen Malerei angesiedelt und verdichtet diese. Obwohl der Gips an der Oberfläche quantitativ überwiegt, im Gegensatz zu den leichtlöslicheren Salzmischungen, ist seine schädigende Wirkung gleichwohl geringer. Gips hat eine Gleichgewichtsfeuchte von 98 % Luftfeuchtigkeit und ist damit relativ konstant.

Zu den erwähnten Schwankungen der Luftfeuchte, Lufttemperatur und Sonneneinstrahlung müssen die **Auswirkungen der Luftbewegungen** mitberücksichtigt werden, denn unterschiedlich intensiv auf die historischen Oberflächen einwirkende Luft kann die Schadensphänomene erhöhen. Bewegte Luft befördert Verunreinigungen auf die historischen Oberflächen, so dass diese sich in unterschiedlichen Ausprägungen ablagern können. Durch die Ablagerungen von Staub, Abrieb und Schmutz kann sich auftreffende Feuchtigkeit länger an den Oberflächen halten und zu Löslichkeitsreaktionen führen oder zur Bildung von biogenen Ablagerungen. Darüber hinaus befördert Wind bei gleichzeitigem Vorhandensein von Feuchtigkeit, wie Regen oder auch Luftfeuchtigkeit, die Benetzung der Oberflächen. Dadurch wiederum können Löslichkeitsreaktionen verstärkt werden,

indem beispielsweise Bindemittelanteile herausgelöst oder Salze aktiviert werden. Bei sehr niedrigen Temperaturen können die benetzten Oberflächen zu Frostsprengungen führen. Die vergleichenden Messungen von böigem Wind bei gleichzeitigem Vorhandensein von Schlagregen haben ergeben, dass die Nordlaibungen intensiver von Niederschlag betroffen sind als die Südlaibungen³⁷.

Die gesamte Windbewegung ist an der Nordseite der Westfassade stärker ausgeprägt als an der Südseite, die durch die sehr nahe stehenden Nachbargebäude geschützt wird. Insgesamt ist die Intensität des Windes aber im Jahresverlauf als vergleichsweise niedrig einzustufen.

Andererseits hat der Wind einen **abrasiven Einfluss**, indem gelockerte Malschichten oder Putzschichten durch die Intensität des auftreffenden Windes und seine Richtung oder Verwirbelung abgetragen werden. Diese Phänomene konnten mit Hilfe des 3D-Oberflächenmonitorings bereits nach einem Jahr sichtbar gemacht werden. Zudem erhöht die Windventilation die Abtrocknung von benetzten Oberflächen je nach Intension der Windstärke unterschiedlich. An der Konstantinbasilika trocknet der ungeschützte nördliche Fassadenbereich schneller als der durch umstehende Gebäude geschützte südliche Bereich. Die stärkere Feuchtebelastung auf der Südhälfte der Konstantinbasilika hat die Verwitterungsrate der verdichtenden Oberflächenfilme aus Wasserglas und Polyesterlack erhöht.

Die Unterschiedlichkeit im Feuchtehaushalt entlang der Westfassade lässt sich auch durch die beschriebene Beobachtung untermauern, dass nur in den südlichen Fensterlaibungen Flechten auf der Sohlbank wachsen und in den nördlichen Fensterlaibungen nicht. Das deutet darauf hin, dass die insgesamt vorhandene **Feuchtebelastung** auf der Südhälfte der Westfassade höher ist als auf der Nordhälfte. Zwar wird die Westfassade im Norden stärker durch Niederschlag benetzt, durch die erhöhte Luftbewegung und stärkere Sonneneinstrahlung trocknen die Oberflächen aber schneller wieder ab. Je länger das historische Material mit Feuchtigkeit belastet ist, desto eher können sich die schädigenden Verwitterungsprozesse auswirken.

Insgesamt wirken die aufgezählten klimatischen Einflussgrößen in ihrer Kombination unterschiedlich stark auf die Malereien, stehen untereinander in Wechselbeziehungen und verstärken sich mit jedem neuen Jahreszyklus. Sollen die wertvollen Außenmalereien wirkungsvoll und langandauernd vor diesen schädigenden Einflüssen geschützt werden, kann dies nur mit einem mehrstufigen Konservierungskonzept erfolgen.

Erhaltungskonzept

Die Maßnahmenempfehlung zum Umgang mit den stark gefährdeten Außenmalereien an der Konstantinbasilika gliedert sich auf der Grundlage der Untersuchungsergebnisse in zwei Hauptschritte: Zunächst ist es erforderlich, den heutigen Bestand zu sichern und im zweiten Schritt sollten Maßnahmen zur langfristigen Erhaltung und zur Präsentation erfolgen.

Die Kriterien zur Bestandssicherung ordnen sich der unabdingbaren Forderung unter, dass die Malereien in ihrem unveränderten Bestand und unter Bewahrung ihrer Integrität

erhalten werden. Die erste Stufe der klassischen Konservierungsmaßnahmen verfolgt demnach in erster Linie das Ziel, den Verfallsprozess einzudämmen. Dabei greifen die Maßnahmen in die originale Substanz ein, um die Auswirkungen der Schadensursachen zu beheben. Der Erhaltungszustand des Objektes und seine Aussagekraft wird so wenig wie möglich verändert und erfolgt immer im Einklang mit der kulturhistorischen Bedeutung des Objektes. Substanzschonende Maßnahmen durch Stabilisierung der historischen Materialien sind oberstes Prinzip. Für die praktische Umsetzung der konservatorischen Maßnahmen bedeutet dies im Wesentlichen eine Festigung der Putz- und Malschichten, die Entfernung von schädigenden Materialien aus vergangenen Renovierungsphasen, die Reduzierung von entstandenen Sekundärprodukten und die Ergänzung von geschädigten Putzflanken und Fehlstellen mit einem angepassten Ergänzungsmörtelsystem.

Die bestandserhaltenden konservatorischen Arbeiten sind an einem ausgewählten Bereich sowohl an der Süd- und Nordlaibung der Westfassade mit Malerei tragenden und fassungslosen Putzen als auch an der Nordfassade exemplarisch durchgeführt worden.³⁸ Sie gliederten sich konkret in folgende **Arbeitsschritte**:

Vorfestigung der Malschicht

Sowohl die punktuell abstehenden Malschichtschollen als auch die pudernenden Malschichten sollten in einem Festigungssystem stabilisiert werden. Die Vorfestigung hatte die Aufgabe, die empfindlichen Oberflächen während der gesamten konservatorischen Teilschritte zu stabilisieren und gleichzeitig eine Wiederholbarkeit der Festigungsmaßnahme zu gewährleisten. Auf diese Weise war garantiert, dass die Vorfestigung einer noch zu planenden langfristigen Erhaltung der Oberflächen nicht im Wege stand.

Das Anforderungsprofil für das anzuwendende Festigungsmittel fokussierte im Wesentlichen ein gutes Eindringverhalten, eine angemessene Anquellbarkeit der starren Malschichtschollen, ein ausreichendes Klebevermögen, die Verträglichkeit mit den bereits vorhandenen älteren Restaurierungsprodukten und eine praktikable und gute Verarbeitbarkeit. Nach entsprechenden Testreihen kristallisierte sich die Anwendbarkeit von Celluloseethern in Ethylalkohol in unterschiedlichen Konzentrationen heraus. Die flächig entfestigten kompakten Malschichten wurden zunächst über feine Kanülen entlang der Malschichtträger eingelassen und vorsichtig zurückgelegt, die pudernenden Malschichten sind über Japanpapier mit dem oben genannten Festigungsmittel eingelassen worden (Abb. 7-16).

Putzvorfestigung

Zunächst sollten die völlig entfestigten und empfindlichen Putzpartien stabilisiert werden, damit weitere Maßnahmen-schritte überhaupt möglich wurden. Eine strukturelle Vorfestigung der blätterteigartigen römischen Putze war mit einer Vorfestigung auf der Basis von Celluloseethern mit und ohne Zuschlag und einer Kombination aus Kieselsäureestern möglich.³⁹



Abb. 7-19: Mechanische Entfernung von zementgebundenen Ergänzungsputzen



Abb. 7-20, 7-21: Randaufbösungen und Ergänzungsputze am Beispiel von Fensterachse W9

Nach dem Durchtrocknen und Ausreagieren der Festigungsmittel zeigten die Putzstrukturen eine Stabilität, die Reinigungsmaßnahmen und Salzreduzierungsmaßnahmen zuließen.

Oberflächenreinigung

Die starken Oberflächenverunreinigungen aus einem Gemisch aus Stäuben, Rußablagerungen, allgemeinen Luftverschmutzungen sowie allenthalben auskristallisierten Salzen sollten möglichst trocken entfernt werden. Aufgrund der

teilweise sehr unebenen und rauen rückverwitterten Putzstrukturen sollte eine Reinigungstechnik gewählt werden, die sowohl schonend und effektiv als auch praktikabel zum Erreichen der Verschmutzungen in den Vertiefungen der Putzstrukturen war. Dies setzte eine sehr variable Form des Reinigungsmittels voraus.

Für diesen Zweck eignete sich hervorragend ein selbst herzustellender Reinigungsteig „gomma pane“ (italienisch: Gummibrot).⁴⁰ Der Reinigungsteig wurde aus Mehl, Wasser, Kupfersulfat und Soda frisch hergestellt und war durch seine gummiartige Konsistenz flexibel einsetzbar. Kleine Portionen konnten in beliebiger Form (Keilform, Rolle etc.) von dem grünlichen Teig abgetrennt werden, und entsprechend der Unebenheit der Malerei verbanden sich die locker aufliegenden Verschmutzungen mit dem Teig. Der Teig verfärbt sich allmählich dunkel und muss dann entsorgt werden. Auf der Oberfläche der Malerei verbleiben keine Teigrückstände (Abb. 7-17, 7-18).

Entfernung von zementhaltigen Ergänzungsputzen

Eine wichtige Maßnahme zur langfristigen Reduzierung von potentiellen Sekundärreaktionen war die vollständige Entfernung der zementhaltigen Ergänzungsputze aus den 1950er Jahren. Die Flanken der römischen Mörtele sind vor allem zu den Fensterrahmen, die nach dem Krieg eingesetzt wurden, mit den Zementmörteln ergänzt. Die Entfernung erfolgte rein mechanisch durch Herausnahme. Feinschleifgeräte mit variablen Aufsätzen ermöglichten ein sehr detailliertes Arbeiten. Vor allem die Kontaktbereiche zwischen dem Originalmörtel und dem Ergänzungsmörtel mussten zunächst mit Hilfe des Schleifgerätes getrennt werden. Sobald dies erfolgt war, konnte mit einem Fugenschneider der harte Zementmörtel eingeschnitten und anschließend per Hand herausgestemmt werden. Zum Schutz der empfindlichen Malerei musste diese während der Herausnahme der Zementmörtel mit Japanpapier kaschiert werden (Abb. 7-19).

Salzreduzierung

Die ausblühenden Magnesiumsalze und weitere Salzgemische mussten aus den oberflächennahen Putzpartien reduziert werden. Dies erfolgte zunächst durch die trockene Abnahme von auskristallisierenden Salzen auf der Oberfläche und der anschließenden Anwendung von Salzverminderungskompressen.

Die weißlichen Salzkristalle wurden mit dem weichen Pinsel und mit einem Handblasebalg entfernt. Aus den tieferen Putzschalen konnten die Salzkristalle mit Hilfe von Pinzetten und Holzstäbchen vorsichtig trocken herausgeholt werden.

Bei der Zusammenstellung von anschließend anzuwendenden Salzkompressen war vor allem darauf zu achten, dass die Kompressen kleinere Porenräume besaß als der historische Verputz. Nur auf diese Weise konnte der Kapillareffekt erheblich erhöht werden, so dass mit minimalem Wassereinsatz größtmögliche Mengen an Salz aus dem Gefüge herausgelöst und in die Kompressen transportiert werden konnten.⁴¹

Die Auswahl von geeigneten Kompressenmaterialien musste sich an die Begebenheiten anpassen, beispielsweise erlaubten die aufgerauten Putzoberflächen nicht die Auflage von Japanpapier als Trennschicht.

Ideale Kompressenmaterialien mit kleinem Porenraum bieten mineralische Systeme aus Sanden in Zumischung von Tonmineralen. Da hier aber die Komponente der Tonmineralien sehr geringe Partikelgrößen aufweist, bestand die Gefahr, dass diese Bestandteile nach der Abnahme der Komresse nicht gut entfernbar sind.

Darüber hinaus war ein sehr guter Kontakt zwischen Komresse und Objekt Oberfläche nötig, damit der Kapillartransport ungehindert aus der Malerei in die Komresse wandern konnte.

Aus diesem Grund ist ein zweilagiges Sandwichsystem aus unterschiedlichen Kompressenmaterialien getestet worden. Als erste Lage wurde eine Komresse aus Cellulosefasern und als zweite Lage eine aus mineralischer Zusammensetzung nacheinander feucht auf die Oberfläche der Malerei und dem Putzaufbau aufgebracht. Nur langfaserige Cellulosefasern mit einer Faserlänge von ca. 700 bis 1000 μ und gutem Wasserrückhaltevermögen garantieren, eine definierte Wassermenge in das Mörtelgefüge einzubringen. Gleichzeitig ermöglichen lange Fasern eine rückstandsfreie Abnahme auch auf rauen Untergründen. Die mineralische Komresse setzte sich aus reinem feinen Quarzsand und einem geringen Zusatz von Sepiolith Meerschaumpulver zusammen.

Die Feuchtigkeit bestand aus reinem, destilliertem Wasser. Dieses benetzte das originale Objekt, die darin befindlichen Salze gingen in Lösung und durch den Kapillarstrom wurden sie in wässriger Lösung in die Komresse transportiert. Die Kompressen sind jeweils im feuchten Zustand gewechselt worden. Jeder Kompressenzyklus wurde durch die Entnahme von Probenmaterial überprüft. Die Malschicht war während der Salzreduzierung mit Japanpapier kaschiert, was ebenfalls auskristallisierende Salze aufnehmen kann.

Strukturelle Putzfestigung

Aufbauend auf die Vorfestigungsmaßnahmen konnten punktuelle Nachfestigungen und Hinterfüllungen von Hohlstellen nach der Salzreduzierung auf der Basis von Kieselsäuredispersion mit und ohne Zuschlag durchgeführt werden.

Randanböschung und Fehlstellenergänzung.

Bewusst lag der Fokus bei der Auswahl der Ergänzungsputze auf deren konservatorischer Funktion. Sie sollten die Flanken der originalen römischen Putzreste stabilisieren und Fehlstellen ausfüllen. Durch ihre strukturelle Zusammensetzung sollten sie zum einen eine gute Anbindung und Verarbeitung garantieren und zum anderen den kapillaren Transport steuern. Der Porenraum des Ergänzungsputzes sollte insgesamt kleine Porenradien aufweisen und auf diese Weise einen natürlichen Sog von zirkulierendem Wassertransport in die Ergänzung leiten. Falls Salze in dem originalen Putzgefüge nach der Salzreduzierung noch vorhanden sind, werden diese direkt in die Randbereiche und in die Ergänzungsputze geleitet und können dort auskristallisieren, ohne dass sie Schaden auf der Originaloberfläche ausüben

können. Aufgrund der zeitlichen Ausdehnung der Voruntersuchungen und gestaffelten Maßnahmendurchführung sollte die Farbigekeit der Ergänzungsputze an den aktuellen Bestand durch Verwendung von rötlichen Sanden angeglichen werden (Abb. 7-20, 7-21). Dieses Konzept der Randanböschung impliziert ein sich daran anschließendes Verfahren des Langzeitschutzes.

Zur Auswertung der bereits durchgeführten Probefelder an der Konstantinbasilika und zu weiteren Forschungsschwerpunkten hat sich ein Expertenteam gebildet, um den Herausforderungen der offenen Fragen bei freibewitterten Außenmalereien angemessen zu begegnen. Im Zentrum des Erfahrungsaustausches liegt die Entwicklung von nachhaltigen Schutzsystemen für die Malereien. Wichtige Anregungen lieferten hier die Beiträge zur Überdeckung von Kulturgut im Freien.⁴²

Zukünftig sollen Methoden und Techniken der reversiblen Überputzung hinterfragt und optimiert werden. Dabei spielen das ästhetische Erscheinungsbild, die Ablesbarkeit und das Verständnis der inhaltlichen Aussage von diesen Langzeitschutzmaßnahmen eine wichtige Rolle. Diese bewussten Eingriffe in das Objekt müssen die künstlerische, ästhetische und historische Dimension des Weltkulturerbes respektieren und angemessen darstellen. Gleichzeitig müssen diese Maßnahmen als kritische Interpretationen der Gegenwart zu verstehen sein, müssen als solche erkennbar und jederzeit ohne Schaden für das Objekt entfernbar sein.

Abbildungsnachweis

Nicole Riedl: 7-1 – 7-10, 7-13, 7-15, 7-17 – 7-20

Max Rahrig: 7-11, 7-12

Unter Verwendung einer Vorlage von Googlemaps/Tele Atlas 2010: 7-16 [<http://www.gearth.de/google-maps-neu.php?q=Trier%20Basilika>]

Literatur

Lena BANGE – Jürgen PEIPE – Heinz-Jürgen PRZYBILLA, 3D-Dokumentation des Essener Domschatzes (Publikationen der deutschen Gesellschaft für Photogrammetrie, Fernerkundung und Geoinformation e. V. 16), Münster 2007

Lena BANGE – Jürgen PEIPE – Heinz-Jürgen PRZYBILLA, Genauigkeitsmaße eines Streifenprojektionssystems zur 3D-Objekterfassung, in: Thomas Luhmann – Christina Müller (Hrsg.): Photogrammetrie, Laserscanning, Optische 3D-Messtechnik, Heidelberg 2007, S. 116–122

Elke BEHRENS, Die Kartierungssystematik des Referates Restaurierung im NLD – Erfahrungsbericht manueller und digitaler Einsatzmöglichkeiten, in: Niedersächsische Denkmalpflege, 16, 2001, S. 424–435

Manfred BOGNER, Zum Einfluss meteorologischer Parameter auf den Verwitterungsprozess an Fassadenoberflächen, in: Restauratorenblätter, 16, 1995 (Forschungsprojekt Euro-care 492 Muralpaint, Wien), S. 77–82

- Tjalda ESCHEBACH, Schadfaktoren auf Wandmalereien an Außenfassaden, in: Restauratorenblätter 16, 1995 (Forschungsprojekt Eurocare 492 Muralpaint, Wien), S. 83–90
- Dietrich FÖRSTER–Stefan BEYER, Ergebnisse der botanischen Untersuchungen an der Festung Rosenberg in Kronach: Wachstumsraten von Moosen und Flechten, in: Instandhaltung von ökologisch bedeutsamem Mauerwerk am Beispiel der Festung Rose in Kronach (DBU-Modellprojekt), Denkmalpflegeinformationen, A87, München 2002, S. 1–27
- Katharina HEILING, Gomma pane, Eine Studie zur Reinigung von Wandmalereien, Saarbrücken 2008
- Günter HEINEMANN – Kathrin HÄB, Mikroklimamessungen an der Konstantinbasilika in Trier. Unveröffentlichter Abschlussbericht, Umweltmeteorologie Universität Trier, Trier 2012 (einsehbar: Landesbetrieb Liegenschafts- und Baubetreuung, Niederlassung Trier)
- Ivo HAMMER, Zur Konservierung und Restaurierung der Fassadenmalereien in Forchtenstein und Pöggstall, in: Restauratorenblätter 16, 1995 (Forschungsprojekt Eurocare 492 Muralpaint, Wien), S. 139–159
- Ivo HAMMER, Symptome und Ursachen, in: Zeitschrift für Kunsttechnologie und Konservierung, 10, H. 1, 1996, S. 63–86
- LEITFADEN Zustandserhebung und Monitoring an Wandmalerei und Architekturoberfläche, Wien 2012
- Heinz LEITNER, Fassadenrestaurierung am Beispiel zweier gemalter Fassaden des späten 16. Jahrhunderts, in: Restauratorenblätter 16, 1995 (Forschungsprojekt Eurocare 492 Muralpaint, Wien), S. 161–170
- Franz MAIRINGER, Untersuchungen von Kunstwerken mit sichtbaren und unsichtbaren Strahlen, Wien 1977
- Mohamed NASRAOUI – Witold NOWIK – Barbara LUBELLI, Salt assessment in masonry, a comparative study, in: PROCEEDINGS 2008, S. 169–176
- F.-Peter PLASCHKE, Glasfaser – Polyester Kunststoffe. Die Verarbeitung von faserverstärkten Polyesterharzen in Theorie und Praxis, Uetersen 1979
- PROCEEDINGS International Conference „Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures“, Kopenhagen 2008
- Nicole RIEDL, Voruntersuchung zur Projektierung: Bestandsaufnahme römischer Außenputzflächen, unveröffentlichte Konservierungsberichte, Trier 2012 (einsehbar: Landesbetrieb Liegenschafts- und Baubetreuung, Niederlassung Trier)
- Willibald SAUERLÄNDER, Die Gegenstandssicherung allgemein, in: Hans Belting et al. (Hrsg.), Kunstgeschichte – eine Einführung, Berlin 1996, S. 47–57
- Kurt SCHÖNBURG, Historische Beschichtungstechniken, Berlin 2011
- Kurt SPONSEL – Wilhelm O. WALLENFANG – Ingo WALDAU, Lexikon der Anstrichtechnik, Bd. 1: Grundlagen, München 1987
- Michael STEIGER – Kirsten LINNOW – Herbert JULING – Gerd GÜLKER – Akram EL JARAD – Stefan BRÜGGEROFF – Dirk KIRCHNER, Hydration of $MgSO_4 \cdot xH_2O$ and Generation of Stress in Porous Materials, in: Crystal growth & Design 8, H. 1, 2008, S. 336–343
- Hans-Jürgen SCHWARZ – Michael STEIGER (Hrsg.), Salzschäden an Kulturgütern, Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Ergebnisse des DBU-Workshop im Februar 2008, Hannover 2009

¹ RIEDL 2012.

² Als Kartierungsgrundlage dienen Orthofotos über tachimetrischen Aufnahmen der Außenputzflächen und die sich daran anschließende Einzelbildverzerrung, Arnold Kreisel 2008

³ Zur Bedeutung der phänomenologischen Untersuchung im restauratorischen Kontext s. SAUERLÄNDER 1996; LEITFADEN 2012.

⁴ Unter Verwendung der Kartierungssystematik des Niedersächsischen Landesamtes für Denkmalpflege (vgl. BEHRENS 2001, VDI 3798, Blatt 3) wurden die Besonderheiten im Bestand und verschiedenste Schäden kartiert in Form von Handkartierungen im Maßstab 1 : 10. Verwendet wurden dafür archivbeständige Polyesterfolien der Firma „Folex Imaging“ (FOLEX IMAGING – MATTE FOLIE: DESIGN) und lichtechte Farbstifte der Firma „Stabilo“ (STABILO ORIGINAL). Für die Weiterverarbeitung und Interpretation der kartierten Phänomene wurden die einzelnen Folien digitalisiert und in einem Übersichtsplan im Maßstab 1 : 25 für jede Fensterachse dargestellt.

⁵ Vgl. den Übersichtsplan der erhaltenen Außenmalereien an der Konstantinbasilika bei RIEDL–FUNKE in diesem Band (Abb. 4-1).

⁶ Materialfeuchte, TROTEC T650, Oberflächentemperatur OPTRON IT 350.

⁷ Die stationären Klimamessungen sind von Dezember 2008 bis Dezember 2011 durchgeführt worden, siehe HEINEMANN–HÄB in diesem Band.

⁸ Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Institut für Archäologie, Denkmalkunde und Kunstgeschichte, Restaurierungswissenschaften in der Baudenkmalpflege; Labor Drewello–Weißmann, Bamberg; Heritage conservation Diagnostics, Köln; Amtliche Materialprüfungsanstalt Bremen.

⁹ Detaillierte Beschreibung des originalen Bestandes siehe RIEDL–FUNKE in diesem Band.

¹⁰ Eine historische Aufnahme von 1920 zeigt in der Fensterachse W8 noch einen komplett erhaltenen Verputz. Die großflächigen Verluste können auch von Kriegsschäden herrühren und stellen nicht unbedingt einen direkten Zusammenhang zur Verwitterungsrate her.

¹¹ NASRAOUI et al. 2008, S. 169–176.

¹² Röntgendiffraktometrie, Labor Drewello – Weißmann 2008.

¹³ Heritage conservation Diagnostics 2009.

¹⁴ Vgl. STEIGER et al. 2008

¹⁵ Dionex ICS90 system, Universität Eindhoven.

¹⁶ Interessanterweise sind an der Nordfassade der Konstantinbasilika keine Magnesiumsalze festgestellt worden, was daran liegen könnte, dass hier in den 1950er Jahren

auch keine Ergänzungen mit zementgebundenen Mörteln durchgeführt worden sind.

- ¹⁷ Die Untersuchungen wurden mit den leistungsstarken UV-Lampen UVA Spot 400T durchgeführt.
- ¹⁸ Freundliche mündliche Mitteilung von Lambert Dahm 2009, der als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Rheinischen Landesmuseum Trier die Maßnahme in den 1950er Jahren begleitet hat.
- ¹⁹ Labor Drewello–Weißmann 2010.
- ²⁰ Silikatfarbentechnik oder Keimsche Mineralfarben werden als Festigungsmittel, als Feuerschutzanstrich, als Bestandteil von Betonzusatzmitteln und als Bindemittel für Säurekitt verwendet. Hervorzuheben ist die besondere Resistenz gegen atmosphärische Einflüsse, vor allem gegenüber saurer Luftimmission. Ein weiterer Vorteil ist ein relativ hohes Diffusionsvermögen und die mit den mineralischen Untergründen stofflich in Einklang stehende Materialgrundlage. Demgegenüber steht die chemische Reaktion mit dem mineralischen Untergrund, indem sich eine Silikatschicht auf der Oberfläche bildet. Wasserglas darf nicht zu dick aufgetragen werden, sonst bilden sich geschlossene glasige Silikatschichten mit geringer Diffusionsfähigkeit. SPONSEL ET AL. 1987, S. 301, SCHÖNBURG 2011, S. 192.
- ²¹ Labor Drewello–Weißmann 2010, s. Beitrag DREWELLO in diesem Band.
- ²² Hersteller waren beispielsweise die Firma Bayer Leverkusen oder Vosschemie Uetersen. Weitere Produktbezeichnungen und Handelsnamen sind: Aldenol, Laminac, Palatal, Vestopal, Diolen, Trevira, Dokulux.
- ²³ Versuche zur künstlichen Alterung haben gezeigt, dass Deckschicht-Membranen aus ungesättigten Polyestern zunächst durch Wärme, Hitzeeinwirkung und Feuchtigkeitsschwankungen zu Blasenbildung neigen. Die Blasen wachsen bei Feuchtigkeit an und ziehen sich bei Trocknung zusammen. Nach einer Zeit brechen sie auf, und schließlich überziehen die Risse die gesamte Fläche des Films. An den Randbereichen wölben sich die gerissenen Lacke auf und reißen lose Schichten wie Pigmentschichten mit ab, PLASCHKE 1979, S. 30–33.
- ²⁴ Otto-Friedrich-Universität Bamberg, Institut für Archäologie, Denkmalkunde und Kunstgeschichte, Restaurierungswissenschaften in der Baudenkmalpflege.
- ²⁵ Nachteilig für die Anwendung im Außenbereich ist die Abhängigkeit von relativ konstanten Licht- und Temperaturverhältnissen, weshalb die Technik normalerweise hauptsächlich in geschlossenen Räumen angewendet wird. Die Messungen an der Basilika in der Fensterachse W5 erfolgten über das Gerüst im Außenbereich mit entsprechender Verschattung durch Sonnensegel.
- ²⁶ Vgl. BANGE ET AL. 2007A, BANGE ET AL. 2007B
- ²⁷ Zur Erlangung der hohen Genauigkeit muss die Zuordnung zwischen Punkten auf den Bildebenen von Kamera und Projektor subpixelgenau erfolgen. Abhängig von Projektionsmustern und Auswertestrategie werden verschiedene Verfahren angewandt: Das Line-Shift, Time-Space oder Phase-Shift-Verfahren. Das am häufigsten zur Anwendung kommende Verfahren ist die Phase-Shift-Methode, Kombinationen von Gray-code und Phase-Shift-Verfahren sind auch etabliert. Allen Verfahren gemeinsam ist die Basis zur Berechnung der 3D-Objektkoordinaten im Submillimeterbereich.
- ²⁸ Grundsätzlich kann die Objektvermessung mit flächenhafter Erfassungscharakteristik eines Streifenprojektionsystems mit einem einzelnen Scan erfolgen. Meistens ist jedoch aufgrund der spezifischen Objektform eine Mehrfacherfassung erforderlich. Die Position des Sensors wird dabei verändert, so dass auch rückspringende Bereiche des Objektes erfasst werden können. In einem nachfolgenden Bearbeitungsschritt wird die registrierte Punktwolke (Rohdaten) dreiecksvermascht. Anschließend ist eine Nachbearbeitung für einen lückenlosen Scan notwendig. Das Messrauschen wird reduziert, die Datenmenge verlustfrei reduziert und Lücken von unerfassten Bereichen werden gezielt rechnerisch geschlossen.
- ²⁹ Vgl. BOGNER 1995, S. 77–82; ESCHEBACH 1995, S. 83–90; HAMMER 1995, S. 139–159; HAMMER 1996, S. 63–86; LEITNER 1995, S. 161–170.
- ³⁰ Potenzielle Häufigkeit der Hydratstufenwechsel, s. den Beitrag von Heinemann–Häb in diesem Band.
- ³¹ HEINEMANN–HÄB 2012, S. 19.
- ³² Vgl. MAIRINGER 1977.
- ³³ Die Zerstörungswirkung der UV-Strahlung hängt damit zusammen, dass die originalen Bindungen zwischen den Atomen gelöst werden und zur Zersetzung der Materialien beitragen. Die Umsetzungen werden als photochemische Reaktionen bezeichnet, da sie durch „Licht“ ausgelöst werden.
- ³⁴ HEINEMANN–HÄB 2012, S. 26.
- ³⁵ HEINEMANN–HÄB 2012, S. 18.
- ³⁶ Labor Drewello–Weißmann 2008; vgl. Wirkung verkehrsbedingter Immissionen auf Baudenkmäler – Eine Pilotstudie zu den Innenstädten von Mainz und München (IfS-Bericht 37), MAINZ 2011.
- ³⁷ HEINEMANN–HÄB 2012, S. 31.
- ³⁸ Als Probeachse wurde die Fensterachse W9 im Jahr 2010 und die römischen Putzreste ohne Fassung auf der Nordfassade N14 und N15 im Jahr 2011 ausgewählt.
- ³⁹ Die Festigung von Putz- und Steinstrukturen in einer Kombination aus Celluloseethern und Kieselsäureestern ist von Hans Michael Hangleiter, Otzberg, entwickelt worden und hat sich in der Praxis vielfach bewährt. Vgl. auch Markus Pohl, Malschichtfestigung mit mineralischen Bindemitteln – Zur Wirkungsweise von Kombinationen mit Cellulosederivaten, unveröffentlichte Master-Thesis, HAWK Hildesheim 2009.
- ⁴⁰ Vgl. HEILING 2008.
- ⁴¹ Vgl. SCHWARZ–STEIGER 2008; PROCEEDINGS 2008.
- ⁴² S. Beiträge GOLL–WARGER und HANGLEITER in diesem Band.