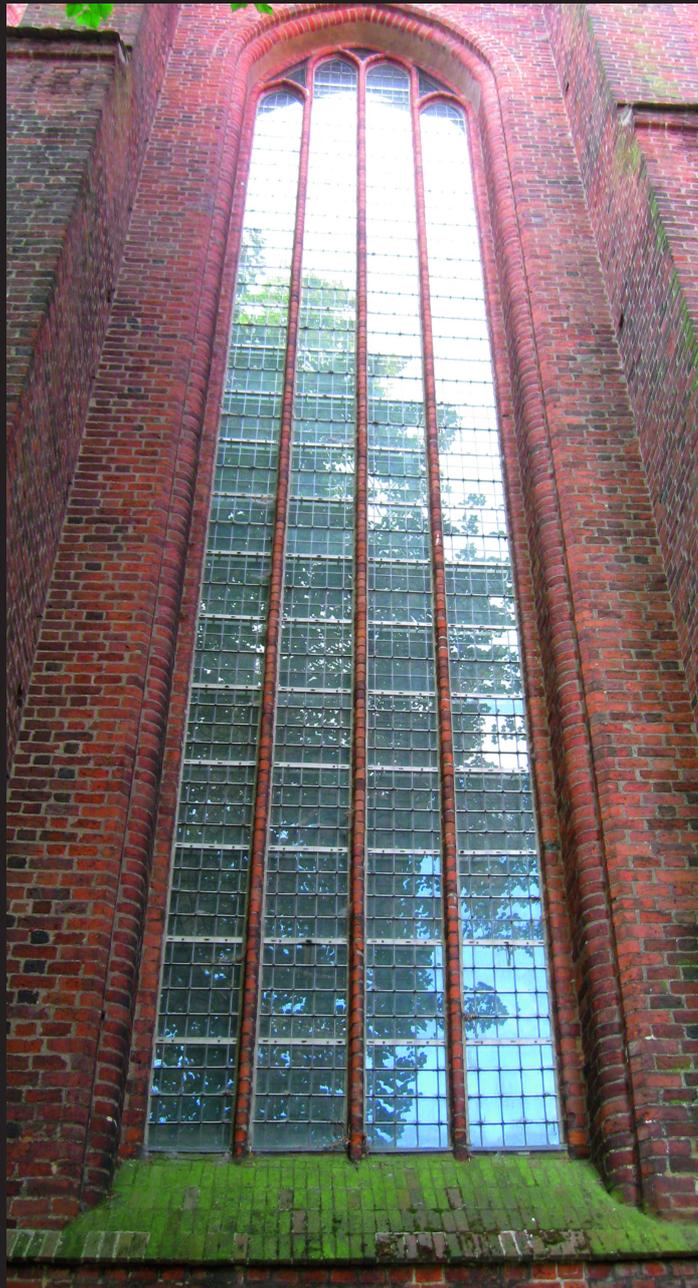
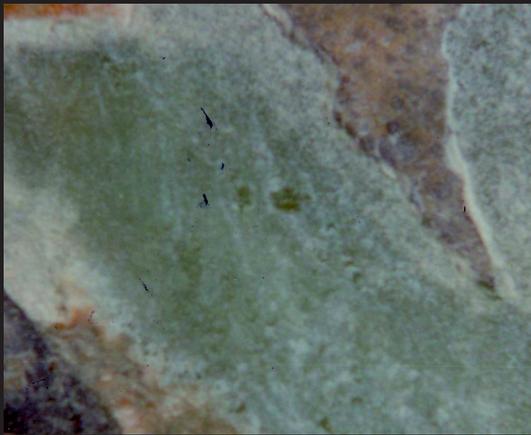


6

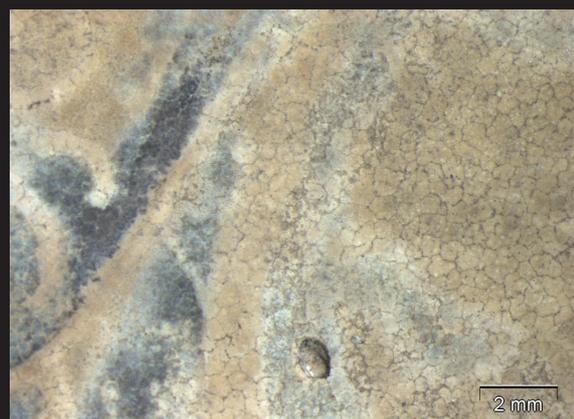
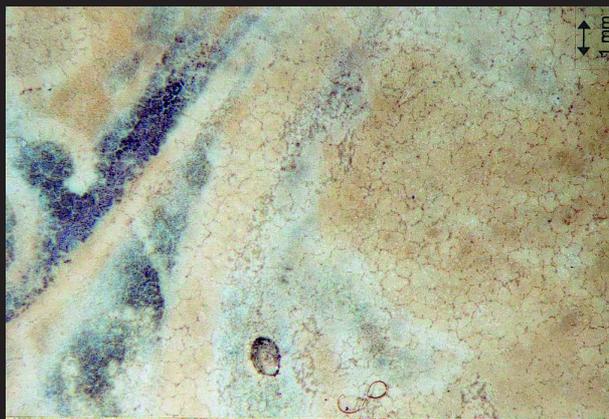
Kontrolle der Wirksamkeit von Schutzverglasungen





Stendal Dom: sV 4b, Segment 1 – nach partieller Reinigung, Stelle 1, Detail (131/17 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

Die vorhandene Kontur ist unverändert. Auf der Glasoberfläche in der Mitte und links unten sind Korrosionsprodukte aufgebrochen bzw. haben sich gelockert und aufgewölbt.



Marienstern Panschwitz-Kuckau, Feld nII1c, Detail Glas 31, 2000, (links) ; Zustand 2010 (rechts)

Es sind keinerlei Veränderungen des Oberflächenzustandes dieser Probenstelle durch den Vergleich beider Aufnahmen erkennbar.

Das Projekt

Als wichtigste Konservierungsmaßnahme für mittelalterliche Glasmalereien gilt seit vielen Jahrzehnten die Schutzverglasung. Von den anfänglich unterschiedlichen Konstruktionen hat sich das von innen belüftete System bald durchgesetzt /1/. Umfangreiche Klimamessungen an Schutzverglasungen in insgesamt 11 Kirchen, bei deren Auswertung und Beurteilung vor allem bautechnische Details, räumliche Lagen und Heizvorrichtungen in Betracht gezogen wurden, ergaben große Unterschiede in der klimatischen Situation der Glasmalereien /2/. Obwohl aus den Ergebnissen Schlüsse hinsichtlich positiver und negativer Einflüsse vieler Faktoren ableitbar sind, bleiben manche Fragen weiter offen. Dazu gehört in erster Linie eine bildlich (mikroskopisch/elektronenmikroskopisch) belegte Aussage, inwieweit die Schutzverglasung über längere Zeiträume den Zustand der Glasmalerei tatsächlich zu konservieren vermag.

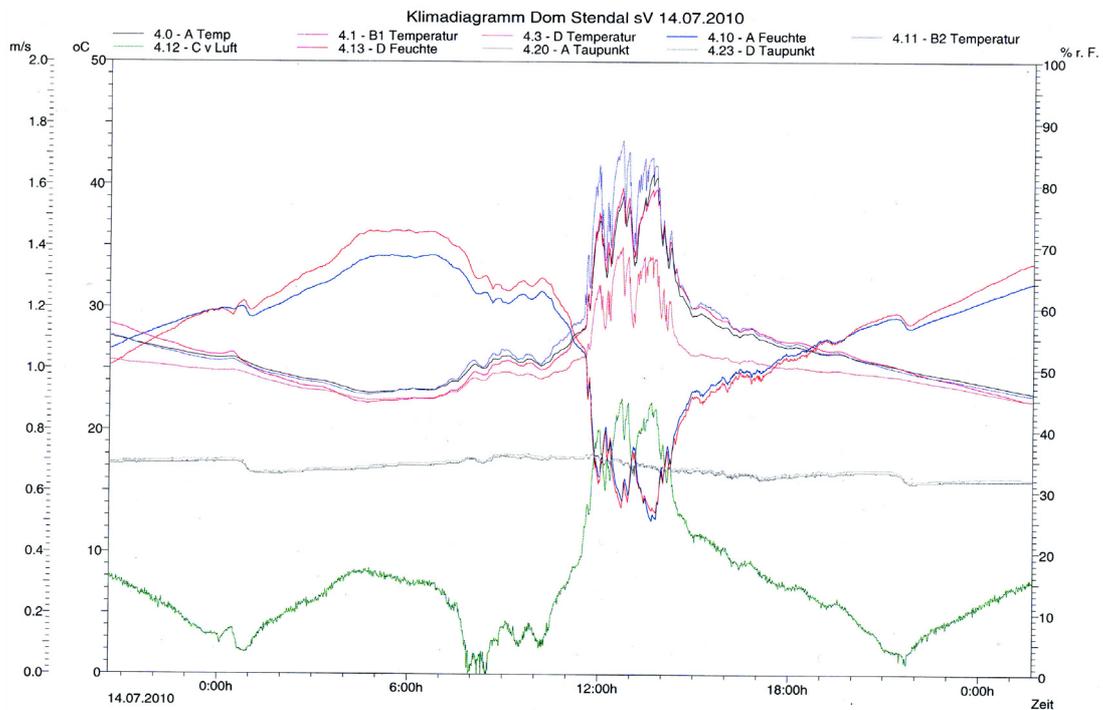
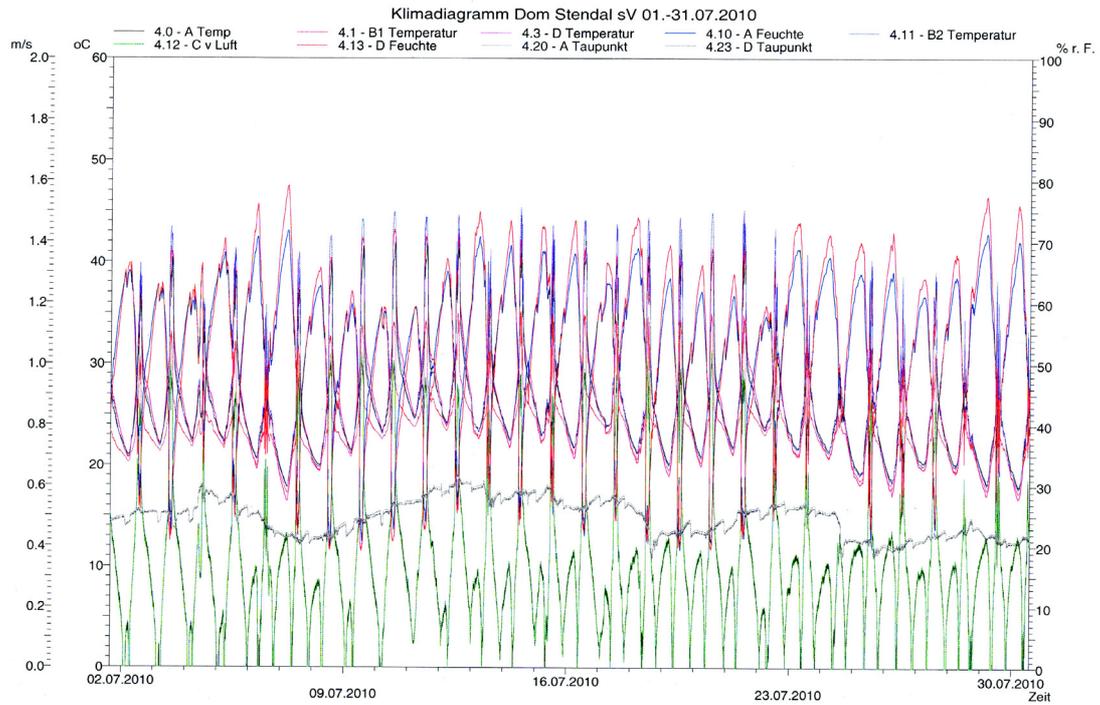
Sicher ist, dass die bauphysikalischen Bedingungen, die Lage des Fensters (Himmelsrichtung) und seine Dimension großen Einfluss auf das Klima im Spalt zwischen Schutzverglasung und Original haben. Sowohl diese Erkenntnisse als auch der Mangel an systematischen Untersuchungen nach der Neuinstallation von Schutzverglasungen waren Anlass für ein Evaluierungsprojekt, bei dem die vor etwa 15 Jahren installierten Schutzverglasungen an Fenstern des Halberstädter Doms, des Havelberger Doms, des Stendaler Doms und der Nikolaikirche Quedlinburg hinsichtlich ihrer konservierenden Wirksamkeit überprüft wurden. Mit dem Hussitenfenster der Klosterkirche Marienstern in Panschwitz-Kuckau wurde ferner ein Objekt mit einer bereits vor 25 Jahren installierten Schutzverglasung hinzugenommen.

An jeweils einem Fenster der fünf Objekte wurden Klimamessungen sowie Staub- und Materialuntersuchungen durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung durchgeführt. Ziel der Arbeiten war, den allgemeinen Erkenntnisstand über die Wirksamkeit von Schutzverglasungen zu verbessern, die spezifische Situation für die Glasmalereien in den fünf Objekten zu beurteilen, im Bedarfsfall Maßnahmen zur Verbesserung zu empfehlen und gegebenenfalls weitere Untersuchungen vorzuschlagen. Bisher gibt es keine Erkenntnisse zum Einfluss von Stäuben auf die Korrosionsprozesse. Das Projekt sollte neben der unmittelbaren Kontrolle der fünf Objekte auch Antworten zu diesen grundlegenden Fragen geben.

Klimamessungen

Die Erfassung der Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftströmungsgeschwindigkeit) an exemplarisch ausgewählten Feldern der Originalverglasung, der Außenschutzverglasung und im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung erfolgte an jeweils einem Fenster der Objekte. Die Auswahl der Fenster in den Messobjekten richtet sich nach den vorhandenen Vorzustandsdokumentationen aus der Mitarbeit an Projekten zur Sanierung und Überprüfung der Glasmalereifenster seit 1990. Sie sollen einen Vergleich zwischen klimatischen Bedingungen und aktuellen Veränderungen an den originalen Glasmalereien ermöglichen. Die Fenster, an denen die Messtechnik installiert wurde, unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Lage (Nord-, Süd- und Ostfenster) als auch in ihrer Größe (Stendaler Dom ca. 14 m hoch, Havelberger Dom ca. 4 m hoch). Die Nikolaikirche in Quedlinburg wurde in das Klimamonitoringprogramm mit aufgenommen, weil speziell an einem Fenster starke optische Veränderung an der VSG-Außenschutzverglasung festgestellt wurden. Es handelt sich dabei um ein Südfenster, und diese Kirche ist im Winter beheizt. In allen 5 Objekten wurden die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung und an der Innenseite der Außenschutzverglasung in der gleichen Höhe gemessen. Weiterhin wurde die Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung kontinuierlich registriert. Zusätzlich erfolgten Temperaturmessungen auf der Außenseite der Originalverglasung in zwei unterschiedlichen Höhen, an einem Feld aus der Reihe 1 und einem Feld im oberen Bereich. Die Registrierung der Messwerte erfolgte kontinuierlich im Minutentakt über einen Zeitraum von 12 Monaten zwischen 2009 und 2010 über alle Klimaperioden hinweg. Parallel zur Registrierung der Messwerte an den unterschiedlichen Messpositionen erfolgte die Taupunktberechnung.

Aus theoretischen Erwägungen auf der Basis von Reaktionen, die bei der Korrosion von Gläsern und Malschichten von Bedeutung sind, wird der Luftfeuchte, den Taupunktunterschreitungen, der Temperatur und den Luftströmungsgeschwindigkeiten besondere Aufmerksamkeit gewidmet. Die jahreszeitlichen, täglichen und monatlichen Klimadaten, insbesondere die Temperatur- und Feuchteverläufe, ihre jeweiligen Maxima, Minima und Änderungsgeschwindigkeiten, lassen Rückschlüsse auf die Gefährdung der historischen Materialien zu. Doch nicht nur die Absolutwerte sind von In-

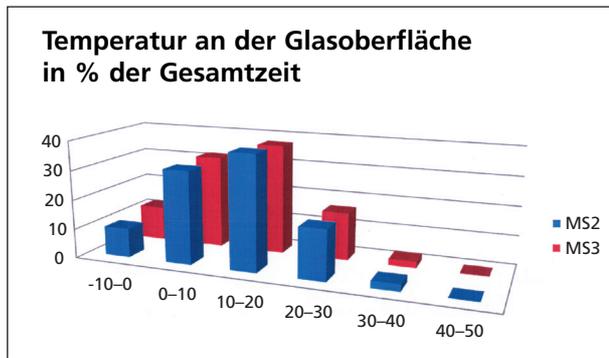


Klimadiagramme Stendaler Dom, oben Juli 2010; unten Tagesverlauf am 14.07.2010

teresse sondern vor allem auch die zeitlichen Schwankungen. Dabei sind insbesondere die erheblichen und sehr kurzfristigen Änderungen der Luftfeuchte über den Tagesverlauf hinsichtlich ihrer Schädigungswirkung noch nicht untersucht worden. Inwieweit solche Schwankungen die Gelschicht der Glasoberfläche beeinträchtigen, ist unbekannt. Simulationsuntersuchungen an Modellgläsern auf der Grundlage der gemessenen Klimadaten können jetzt praxisnah durchgeführt werden, um Hinweise auf das Verhalten der Originale in situ zu erhalten.

Materialuntersuchungen

Nach jahrhundertelanger Exposition im Fenster weisen alle mittelalterlichen Gläser beidseitig an den Oberflächen Gelschichten (10...100 µm) auf, die durch einen Austausch der Alkali- und Erdalkalitionen gegen Bestandteile des Wassers (Hydroniumionen) entstanden sind. Vor allem an der Fensteraußenseite haben sich darüber hinaus unlösliche Korrosionsprodukte (Gips, Syngenit) abgelagert. Infolge von Inhomogenitäten im Glas sind die Umwandlungen oft nicht gleichmäßig über die Oberfläche verteilt,

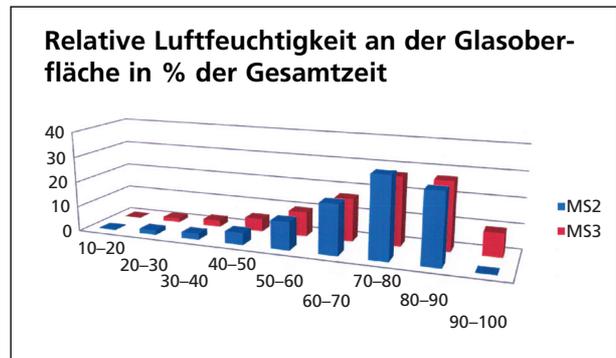


Stendaler Dom – Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

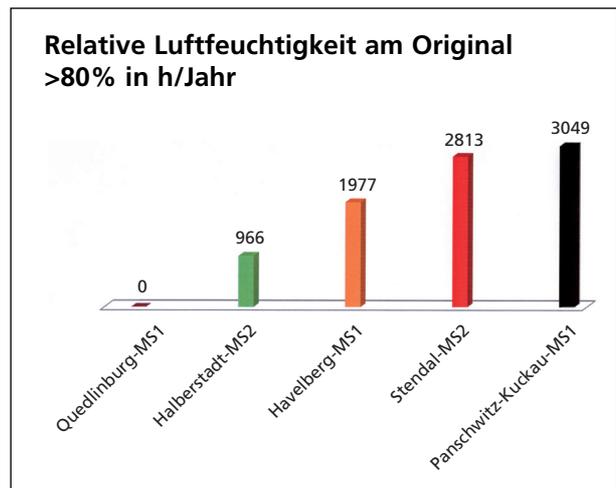
so dass zunächst die typischen Lochfraßerscheinungen beobachtet werden. Die Malschichten sind an der Fensteraußenseite überwiegend vollständig abgewittert, an der Innenseite zeigen sich oft sehr unterschiedliche Teilverluste. Gelockerte, noch anhaftende Konturen werden bei Restaurierungen mit Haftmitteln gefestigt. Aufgrund der Zusammensetzung der Gläser lässt sich eine Reihenfolge in der durchschnittlichen Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen aufstellen. Am korrosionsempfindlichsten sind die mittelalterlichen Gläser in Stendal und Panschwitz-Kuckau, gefolgt von Havelberg und Halberstadt. Die Gläser in Quedlinburg (20.Jh.) weisen eine gegenüber Umwelteinflüssen stabile Glaszusammensetzung auf. Betrachtet man die klimatischen Bedingungen, so wurden an den Glasmalereienfenstern in Marienstern und Stendal am längsten relative Luftfeuchtigkeitswerte >80% registriert, gefolgt von Havelberg, Halberstadt. Hohe Änderungsgeschwindigkeiten (Temperatur- und Feuchtegradient pro Stunde) sowohl in positiver als auch negativer Richtung findet man in den Sommermonaten an den Fenstern in Marienstern Panschwitz-Kuckau, Stendal und Halberstadt. In den Wintermonaten sind diese Änderungsgeschwindigkeiten an den Südfenstern in Stendal und Quedlinburg am stärksten.

Bei einem Vergleich von Glasproben unmittelbar vor Einbau der Schutzverglasung und nach 15 Jahren Exposition hinter der Schutzverglasung lässt sich vor allem anhand folgender Charakteristika auf einen möglichen Fortschritt der Korrosion schließen: Intensität des Rissnetzwerks in der Gelschicht, Anzahl und Größe der Lochfraßkrater, Anteil an Schwarzlotverlusten, Lockerung gefestigter Konturen, Veränderungen der Gelschicht.

Mikroskopisch sichtbare Oberflächenveränderungen wurden an einigen Stellen der Glas-



Stendaler Dom – Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum



Relative Luftfeuchtigkeit > 80 % r. F. am Original im Messzeitraum 2009/2010

proben aus dem Stendaler Dom beobachtet. Ungünstige klimatische Verhältnisse wirken auf gegenüber Umwelteinflüssen sehr empfindliche Gläser und lassen innerhalb von 15 Jahren geringe Veränderungen erkennen. In Havelberg sind die Gläser zwar etwas korrosionsstabiler und die Bedingungen etwas besser als in Stendal und Marienstern. Bei fast 2000 h mit einer Luftfeuchtigkeit >80% an den Glasmalereien im Havelberger Dom innerhalb eines Jahres ist jedoch ein Korrosionsfortschritt ebenfalls wahrscheinlich. Veränderungen am Probenquerschnitt in den rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen könnten darauf hindeuten, dass auch diese Glaszusammensetzung unter den vorhandenen klimatischen Bedingungen einer fortschreitenden Verwitterung ausgesetzt ist. Eine Zunahme der Gelschicht im µm-Bereich war zumindest an einer Probe zu verzeichnen. An den untersuchten Gläsern in Marienstern wurden keine mikroskopischen Veränderungen festgestellt. Aus früheren Untersuchungen ist bekannt, dass diese Proben eine bis zu 100 µm breite Gelschicht aufweisen. Möglicherweise

schützt diese auch unter den extremen Bedingungen in der Klosterkirche vor einer weiteren Verwitterung. Die Bedingungen in Halberstadt mit nur knapp 1000 h bei einer relativen Luftfeuchtigkeit >80 % sind für mittelalterliche Gläser mit relativ guter Glaszusammensetzung wahrscheinlich weniger folgenschwer als das im Stendaler Dom der Fall ist. Die Gläser des 20. Jahrhunderts in der Nikolaikirche in Quedlinburg dürften den klimatischen Bedingungen mühelos widerstehen, allerdings können sich Schäden an den Malschichten einstellen, vor allem wenn zu ihrer Synthese Borax zur Herabsetzung der Einbrenntemperatur benutzt worden ist.

Zusammenfassung

Sowohl die klimatischen Messungen als auch die materialanalytischen Untersuchungen wurden bereits unmittelbar nach Beginn der Arbeiten und dann kontinuierlich über die gesamte Projektlaufzeit ausgewertet, so dass bei entsprechender Notwendigkeit Sofortmaßnahmen zur Verbesserung der Schutzsituation möglich gewesen wären. Erwartungsgemäß gaben die Ergebnisse dazu keinen Anlass. Andererseits muss langfristig in den vier mit mittelalterlichen Glasmalereien ausgestatteten Kirchen wohl mit einem messbaren Korrosionsfortschritt gerechnet werden. Sowohl die Durchschnitts- als auch die Maximalwerte der relativen Feuchte im Spalt – also auch an der Außenseite der Originale – liegen vor allem in der Klosterkirche Marienstern und im Stendaler Dom in Bereichen, in denen die optimale Wirkung der Schutzverglasung nicht gegeben ist. Kritisch sind insbesondere bei diesen beiden Objekten auch die hohen und mitunter sehr kurzfristigen Schwankungen von Feuchte und Temperatur. Neben den bauphysikalischen Ursachen spielt hierbei die Ausrichtung der Fenster eine Rolle (Ost bzw. Süd). Bei den Nordfenstern (Dom Havelberg, Dom Halberstadt) sind die Schwankungen deutlich geringer, der Durchschnitt der Luftfeuchte liegt jedoch über die längste Zeit des Jahres ebenfalls bei so hohen Werten (Dom Havelberg), dass man von einer Dauerbelastung ausgehen muss. Nur das Fenster der Nikolaikirche in Quedlinburg (20. Jh.) – eine der beiden Kirchen, die im Winter beheizt wird – weist über das gesamte Jahr Durchschnittswerte auf, die auch für mittelalterliche Gläser unbedenklich wären. Erfreulicherweise waren korrosive Veränderungen an den Originalen in sehr geringem Ausmaß und überhaupt nur deshalb nachweisbar, weil detaillierte Vorzustandsaufnahmen zum Vergleich herangezogen werden konnten. Die

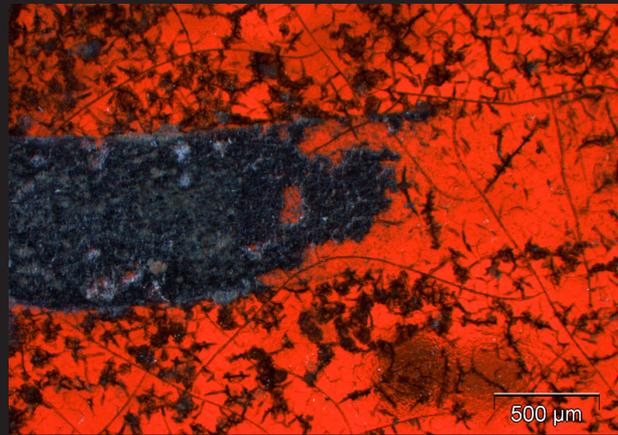
unter dem Lichtmikroskop sichtbaren geringfügigen Korrosionsfortschritte betreffen lediglich das Fenster des Stendaler Doms. Am Havelberger Dom ließ sich anhand von elektronenmikroskopischen Aufnahmen ein Korrosionsfortschritt vermuten. An allen anderen Objekten sind die Materialzustände unverändert. Diese Tatsache ist auch der bewusst vorsichtigen Behandlung zur Sicherung der Glasfelder bei den Arbeiten von 1994–1999 zu verdanken, bei denen auf den vollständigen Erhalt der schützenden Gelschicht und auf eine äußerst schonende Reinigung Wert gelegt worden war.

An der allgemein positiven Wirkung der Außenschutzverglasung als Teil der Konservierungsmaßnahme gibt es keinen Zweifel. Schutzverglasungen aus VSG haben sich in der Praxis vor allem auch bei Vandalismusangriffen bewährt. Die Bearbeitung von Verbundsicherheitsglas zu Rauten- oder Rechteckscheiben für Außenschutzverglasungen erfordert jedoch sehr große Erfahrungen und eine präzise Vorgehensweise beim Zuschnitt des VSG. Die in seltenen Ausnahmefällen auftretenden Schäden an Außenschutzverglasungen aus VSG, die durch eine Delamination der PVB-Folie gekennzeichnet sind und zu einer optischen Beeinträchtigung des Erscheinungsbildes der Außenschutzverglasung führen, sind auf das Eindringen von Medien zurückzuführen, die ihrerseits mit der PVB-Folie reagieren können. In Untersuchungen im Labor an VSG-Proben ließen sich solche Schäden simulieren, die sich jedoch nicht nur auf eine einzelne Ursache zurückführen lassen, vielmehr ist es vermutlich immer ein Zusammenwirken mehrerer Unzulänglichkeiten (Folienqualität, Verarbeitung, Zuschnitt, Kitt, Klimabedingungen) Die Aufklärung dieser Reaktionen und insbesondere auch die der Langzeitstabilität von Außenschutzverglasungen aus VSG bedarf weiterer materialtechnischer Untersuchungen.

1/1 Historische Glasmalerei Schutzverglasung, Bestandsicherung, Weiterbildung, Edition Leipzig, 1999, ISBN 3-361-00500-0

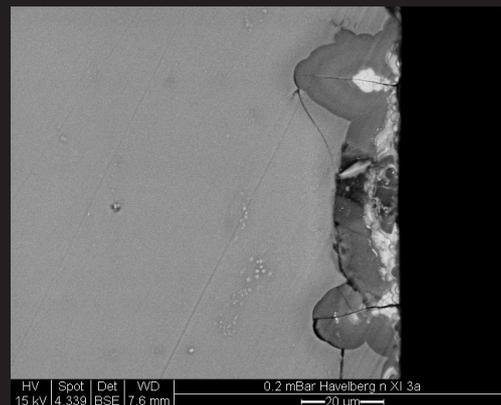
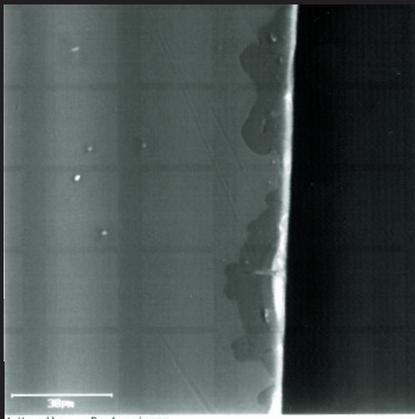
1/2 Stefan Oidtmann, „Die Schutzverglasung eine wirkvolle Schutzmaßnahme gegen die Korrosion an wertvollen Glasmalereien“ Verlag M. Brimberg, Aachen, 1994, ISBN90-386-03444-4

*Titelabbildung:
Stendaler Dom, Fenster sV*



*Havelberg Dom, nXI 4c,
 Probe 2: geschädigte Schwarzlotkontur mit Rissen und Verbräunungserscheinungen, Innenseite (130/0 K),
 1994 (links); Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)*

An der Kontur sind Schwarzlotverluste zu vermuten. Das Rissnetz ist in der Nachzustandsaufnahme deutlich ausgeprägt und es kann von einer Zunahme der Manganverbräunung ausgegangen werden.



*Havelberg Dom, nXI 3a,
 Probe 1: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigten Glasoberfläche
 (Innenseite), ESMA 1994 (links); ESEM 2010 (rechts)*

Die elektronenmikroskopischen Aufnahmen wurden zwar 1995 und 2010 an der gleichen präparierten Probestelle durchgeführt, dennoch sind identische Stellen in keinem Fall wiedererkannt worden. Möglicherweise sind die Verwitterungsprozesse im µm-Bereich weiter vorangeschritten, was in einem Anwachsen der Gelschichtbreite und dem Auftreten zusätzlicher Mikrorisse deutlich wird.

HINWEISE ZUR SANIERUNG HISTORISCHER GLASMALEREIEN

Faltblatt 6

Kontrolle der Wirksamkeit von Schutzverglasungen

Teil des Förderprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück (Az 27312-45
„Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen
Glasmalereien mit starken Schäden durch anthropogene Einflüsse“

Herausgegeben von der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung, Fachgruppe 4.2
„Umweltrelevante Material- und Produkteigenschaften“

In gleicher Reihe erschienen:

Faltblatt 1

Die isothermische Schutzverglasung – ein wirksames Mittel zur Verhinderung von Umweltschäden

Faltblatt 2

Halterungssysteme für Schutzverglasungen

Faltblatt 3

Das differenzierte Leistungsverzeichnis – Voraussetzung für denkmalpflegerische Maßnahmen

Faltblatt 4

Die Glasmalereien des 19. Jahrhunderts – Charakteristika der verwendeten Materialien

Faltblatt 5

Lagerungsbedingungen

Faltblatt 7

Staubmessungen im Spalt zwischen Original und Schutzverglasung

Anschrift:

BAM, Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung
AG 4.21 „Umwelteinflüsse und Schädigungsmechanismen“
Richard-Willstätter-Str. 11, 12489 Berlin
Tel. 030 6392 5930
Fax: 030 63925973

e-mail: manfred.torge@bam.de

Text: Manfred Torge

Wolfgang Müller

Gestaltung Dietrich Otte, Bad Belzig

Druck: druckhaus köthen GmbH, 2011