

Abschlussbericht

des Forschungsvorhabens

„Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen Glasmalereien mit starken Schäden durch anthropogene Einflüsse“

Juli 2011



BAM

Bundesanstalt für Materialforschung
und –prüfung, Fachgruppe 4.2
„Umweltrelevante Material und
Produkteigenschaften“

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

„Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und
Konservierungsmaßnahmen an historischen Glasmalereien mit starken
Schäden durch anthropogene Einflüsse“

Projektlaufzeit: 25.05.2009 – 31.07.2011

BAM-Vorhaben: 4298

Projektleiter: Dr.-Ing. Manfred Torge

Arbeitsgruppe 4.21

„Umwelteinflüsse und Schädigungsmechanismen“

Arbeitsgruppenleiter: Dr.-Ing. Michael Bücker

Mitarbeiterin: Dipl.-Ing. (FH) Ines Feldmann

Gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Az 27312-45

Inhaltsverzeichnis	Seite
1. Konzept und Ziele des Evaluierungsprojekts	3
2. Klimamessungen	
2.1 Messkonzept und –zeitraum	5
2.2 Messgeräte und –fühler	6
2.3 Messergebnisse	9
- Havelberger Dom	11
- Halberstädter Dom	21
- Stendaler Dom	31
- Klosterkirche Marienstern	41
- Nikolaikirche Quedlinburg	51
2.4 Vergleich und Bewertung der Messergebnisse	60
2.5 Vergleich der Messergebnisse mit Werten aus der Literatur	69
3. Veränderungen an korrodierten Glasoberflächen zwischen 1994 und 2010	
3.1 Vergleich lichtmikroskopischer und elektronenmikroskopischer Aufnahmen an identischen Stellen	
- Stendaler Dom, Fenster sV	72
- Havelberger Dom, Fenster nXI, nVII	79
- Klosterkirche Marienstern, Fenster nII	86
3.2 Bewertung der Befunde unter Berücksichtigung materialtechnischer klimatischer Messwerte	90
4. Untersuchungen zu Schadensphänomenen an Außenschutzverglasungen aus Verbundsicherheitsglas (VSG)	
4.1 VSG als Außenschutzverglasung	92
4.2 Schäden an Außenschutzverglasungen	92
4.3 Untersuchungen an VSG-Proben	95
4.4 Ergebnisse	
- Bewitterung	97
- Glasanalysen	100
- UV-VIS-Untersuchungen	101
- IR-ATR-Untersuchungen	106
4.5 Zusammenfassende Bewertung	109

5. Untersuchungen der Staubbelastung im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung	
5.1 Meßprinzipien und Probenahme	110
5.2 Analysenmethoden	113
5.3 Detailergebnisse	
- Stendaler Dom (Kaskadenimpaktor, Kohlenstoffträger)	114
- Havelberger Dom (Kaskadenimpaktor, Kohlenstoffträger, Si-Wafer)	132
- Halberstädter Dom (Kohlenstoffträger, Si-Wafer)	144
- Nikolaikirche Quedlinburg (Kohlenstoffträger, Si-Wafer)	149
- Klosterkirche Marienstern (Kohlenstoffträger)	153
5.4 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	156
6. Simulationsversuche zur Wirkung von Stäuben auf Modellgläser mittelalterlicher Zusammensetzung	
6.1 Bewitterung im Klimaschrank	159
6.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen an mit Staub belasteten- und unbelasteten Glasoberflächen	161
6.3. Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse	168
7. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen	170
8. Anhang: Klimandiagramme	
- Havelberger Dom, Januar 2010	173
Havelberger Dom, Juli 2010	174
- Dom Halberstadt, Januar 2010	175
Dom Halberstadt, Januar 2010	176
- Stendaler Dom, Januar 2010	177
Stendaler Dom, Juli 2010	178
- Marienstern Panschwitz-Kuckau, Januar 2010	179
Marienstern Panschwitz-Kuckau, Januar 2010	180
- Nikolaikirche Quedlinburg, Januar 2010	181
Nikolaikirche Quedlinburg, Januar 2010	182
9. Literatur	183
10. Projektteam	185

1. Konzept und Ziele des Evaluierungsprojektes

Die Sicherung umweltgeschädigter historischer Glasmalereien wird seit Jahrzehnten verantwortungsbewusst und wissenschaftlich fundiert unter dem Gesichtspunkt einer nachhaltigen Konservierung vorgenommen. Dazu gehört selbstverständlich eine Kontrolle der dauerhaften Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen.

Als nahezu alternativlos ist die Außenschutzverglasung allgemein anerkannt. Systematische Untersuchungen ihrer Effektivität sind an vielen Orten in Europa durchgeführt worden und haben schon in den achtziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts befriedigende Auskunft über die grundlegenden technischen und konstruktiven Erfordernisse gegeben (Innenbelüftung, Spaltöffnungsbreiten, Dichtheit etc.). Die anfangs gern behauptete „quasi museale“ Schutzwirkung hat sich dabei bis heute nicht realisieren lassen. Umfangreiche klimatische Messungen, die in der Nähe der Glasmalereien, vor allem im Raum zwischen Außenschutzverglasung und Originalfenster durchgeführt wurden /1/, ergaben ferner sehr starke Einflüsse bauphysikalischer Bedingungen, wärmetechnischer Maßnahmen, der Ausrichtung des Fensters und des Außenklimas.

Eine verallgemeinernde Vorhersage der Konservierungswirkung ist deshalb für ein konkretes Objekt praktisch nicht möglich und eine Evaluierung jedes Objekts sinnvoll. Das betrifft selbstverständlich auch die Schutzverglasungen, die in den Jahren von 1994 bis 1999 im Rahmen eines Förderprojekts der DBU in mehreren Kirchen in den Neuen Bundesländern installiert worden sind, zumal dabei ein neues Konstruktionssystem entwickelt wurde und unter Verwendung von Verbundsicherheitsglas (VSG) zum Einsatz kam. Deshalb wird im vorliegenden Projekt eine entsprechende Kontrolle vorgenommen. Vor allem aber soll eine verfeinerte generelle Aussage zur Wirkung von Schutzverglasungen resultieren. Ziele der Evaluierung, für die fünf Kirchen ausgewählt worden sind, sind die Einschätzung der Nachhaltigkeit dieser Konservierungsmaßnahme, ein Vergleich mit den bereits in ähnlicher Weise evaluierten Objekten /1/ sowie die Ableitung von Maßnahmeempfehlungen zur möglichen Verbesserung der Situation und zur Konzipierung eventuell notwendiger weiterer Forschungsaufgaben.

Dabei wird erstmals der Wirkung von Stäuben auf die Glasoberflächen besondere Aufmerksamkeit zuteil, die man bisher – unter anderem aus messtechnischen Gründen – der Wirkung von Schadgasen deutlich nachgeordnet hat. Ferner besteht wohl erstmalig in der Geschichte der materialwissenschaftlichen Untersuchungen an historischen Glasmalereien die Möglichkeit, einen Vergleich des genauen Erhaltungszustands nach längerer Expositionszeit hinter der Schutzverglasung an Hand von mikroskopischen und elektronenmikroskopischen Bildern vorzunehmen, da anlässlich der Installierung vor etwa fünfzehn Jahren entsprechende Arbeiten im Laboratorium der BAM durchgeführt worden sind, die so detailliert und exakt dokumentiert vorliegen, dass kleinste Veränderungen an den Schwarzlotkonturen und selbst an den nur wenige Mikrometer breiten Rissstrukturen in den Gelschichten der Glasproben wahrgenommen werden können. Dazu werden dieselben Proben wieder aus den Glasmalereiefeldern ausgebleit und an exakt gleicher Stelle erneut jeweils mikroskopisch oder elektronenmikroskopisch abgebildet.

Schließlich können auch bei den Klimamessungen durch den Einsatz moderner Messtechnik, über die Erfassung von Durchschnittswerten und Extrema hinaus, differenziertere Messdatenverläufe erhalten werden, die insbesondere Aussagen zum Einfluss kurzfristiger Temperatur- und Feuchteänderungen ermöglichen. Da bei allen Glasoberflächen, die schon jahrhundertlang der Bewitterung ausgesetzt waren, die Beschaffenheit der Gel- und Korrosionsproduktschichten eher den Fortgang der Materialveränderung bestimmen als die Zusammensetzung des Glases, kommt einem steilen Anstieg oder Abfall der Klimadaten im Tagesverlauf vermutlich größere Bedeutung zu als allgemein angenommen wird. Die Ermittlung des Einflusses von Feuchteaufnahme und -abgabe auf die Stabilität der Gelschichten ist nur an Modellgläsern im Klimaschrank möglich, denn historische Gläser stehen für solche zerstörenden Experimente naturgemäß nicht zur Verfügung. Die gemessenen Klimadaten ermöglichen Simulationsuntersuchungen unter realen Verhältnissen. Der Vergleich am Original kann nur durch Langzeituntersuchungen erfolgen, die mit dem Evaluierungsprojekt beginnen und in größeren Abständen fortgesetzt werden sollen.

Insgesamt sieht das Konzept der Arbeiten damit einerseits die Beurteilung der Situation in den fünf ausgewählten Objekten vor. Eingeschlossen ist dabei die Ableitung von möglichen Sofortmaßnahmen, sofern sich ein dringender Handlungsbedarf ergibt. Andererseits reihen sich die vorgesehenen Untersuchungen in die internationale Forschungsstrategie zur Qualifizierung der Konservierungstechniken für Glasmalereien ein und werden mit ihren Ergebnissen der Denkmalpflege allgemein von Nutzen sein.

2. Klimamessungen

2.1 Messkonzept und -zeitraum

Die Erfassung der Klimadaten (Temperatur, relative Luftfeuchte und Luftströmungsgeschwindigkeit) an exemplarisch ausgewählten Scheiben der Originalverglasung, der Außenschutzverglasung und im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung erfolgte an 5 Messobjekten (Stendaler Dom, Havelberger Dom, Dom Halberstadt, Klosterkirche Marienstern in Panschwitz-Kuckau, Nikolaikirche Quedlinburg). Die Auswahl der Fenster in den Messobjekten erfolgte auf der Grundlage vorhandener Vorzustandsdokumentationen aus der Mitarbeit an Projekten zur Restaurierung 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 die Kirche ist im Unterschied zu den übrigen Messobjekten 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 spezifischen Messstellen sind in den Kapiteln der jeweiligen Objekte (s. Anordnung der Messtechnik) beschrieben. Die Registrierung der Messwerte erfolgte kontinuierlich über einen Zeitraum von 12 Monaten zwischen 2009 bis 2010 über alle Klimaperioden hinweg. Parallel zur Registrierung der Messwerte an den unterschiedlichen Messpositionen erfolgte automatisch sowohl die Taupunktberechnung für die Positionen der Temperatur-/Feuchtefühler als auch die Berechnung der absoluten Luftfeuchte als Mischung in g Wasser pro kg trockener Luft. Mit dem verwendeten ALMEMO[®]-Messsystem ist eine automatische Messwertregistrierung und Datenübertragung per Mobilfunk möglich. Das Messintervall betrug 1 Minute. Das Auslesen des Datenspeichers und die Sicherung der Messwerte erfolgte monatlich (ca. 600 000 Messwerte). Es war zu beachten, dass bei der geringen Übertragungsrate des analogen Modems für die GSM-Mobilfunkübertragung vom Anbieter (D1) maximal 2 Stunden für den Datentransfer zur Verfügung stehen. Aufgrund des kurzen Messintervalls musste daher die MMC-Card des Datenloggers nach jeder Datenübertragung gelöscht werden, und anschließend wurde mit der erneuten Datenregistrierung begonnen. Die Überwachung der Funktionalität der Messtechnik erfolgte durch wöchentliches Einwählen in die jeweiligen Messstationen. Im Terminalfenster der Software WINCONTROL werden die aktuellen Werte der Messfühler angezeigt. Ein Ausfallen der Messtechnik kann so zeitnah

festgestellt werden. Während der gesamten Messdauer traten jedoch keinerlei Probleme mit der Messtechnik auf.

Die Messungen begannen in allen Objekten im Herbst 2009. Zwischen September und November 2009 wurde die Messtechnik installiert und in Betrieb genommen. Für die Arbeiten an den historischen Glasmalereifenstern, insbesondere für den für die Installation und Deinstallation der Messfühler notwendigen Aus- und Einbau von Glasmalereifeldern, wurden die dafür zuständigen Restaurierungswerkstätten (Fa. Wilde, Fa. Losert, Fa. Buhlig) beauftragt. Der Messzeitraum war gekennzeichnet von einem sehr strengen Winter 2009/10 und einer langen Hitzeperiode im Sommer 2010. In der Messperiode bis zum Herbst 2010 wurden somit durch die extremen Witterungsereignisse (minimalen Werte im Winter und maximalen Werte im Sommer) die klimatischen Bedingungen an den ausgewählten Messstellen über einen sehr weiten Temperatur- und Feuchtebereich registriert. Die Deinstallation der Messtechnik erfolgte jeweils nach einem Jahr Messdauer.

2.2 Messgeräte und Messfühler

Für die Registrierung und Speicherung der Klimadaten wurde ein ALMEMO[®]-Messsystem verwendet. Die eingesetzten Messfühler besitzen einen speziell entwickelten intelligenten ALMEMO[®]-Stecker mit programmierbarem Datenträger (EEPROM), in dem die Parameter der angeschlossenen Fühler und Geräte gespeichert werden. Dadurch werden alle angesteckten Einheiten automatisch erkannt und die Funktionen entsprechend angepasst. Alle Fühler sind vom Hersteller programmiert und kalibriert. Beim Anstecken werden alle Parameter (wie z.B. Messbereich, Messwertkorrekturen, Skalierungen, Fühlerbezeichnung) automatisch an das Messgerät übertragen, so dass Fehlmessungen durch falsche Programmierung und Fühlerverwechslungen ausgeschlossen sind. Ein großes Spektrum von Messfühlern und Sensoren kann über das patentierte Steckersystem an jeden Messeingang eines Messgerätes angeschlossen werden. Die Umschaltung der Messstellen erfolgt galvanisch getrennt mit verschleißfreien Halbleiterrelais, so dass eine kontinuierliche Messstellenabfrage mit bis zu 100 Messungen/Sekunde möglich ist. Alle Geräte besitzen ein identisches Softwareprotokoll, sie sind über Schnittstellen adressierbar und vernetzungsfähig und ein einziges Terminal genügt, um die Messdaten abzufragen. Die Datenspeicherung erfolgt auf serienmäßigen Datenloggern mit 520kB oder auf externen Smart-Media-Cards (MMC) mit 128 MB. Die Messdateien werden auf der MMC-Card als ASCII-Textdateien im Tabellenmode im Standard-FAT16-Format gespeichert. Die Datenübertragung von der MMC Speicherstecker erfolgt mittels eines angeschlossenen GSM-Mobilfunkmodems. Damit ist auch eine kontinuierliche Fern-Kontrolle der Messwernerfassung möglich, so dass sich die Notwendigkeit von vor-Ort-Besuchen auf ein Minimum reduziert. Alternativ kann die Datenübertragung mit einem

Standard-Card-Lesegerät erfolgen. Mit Hilfe der Software Wincontrol werden die Messwerte automatisch ausgelesen und in Tabellenform oder als Grafik dargestellt. Ein integriertes Konvertierungsprogramm ermöglicht die Umwandlung der Messdateien in Excel-Dateien für weitere Auswertungen.

Das verwendete Messsystem besteht aus dem ALMEMO[®]-2590-4S Messgerät, NTC-Doppelsensoren zur Temperaturmessung, Thermoanemometer und Temperatur/Feuchtefühler. Bei der Auswahl des Temperaturfühlers spielt der erforderliche Messbereich die entscheidende Rolle. Während bei der Temperaturmessung mit Pt100-Fühlern deren Widerstandserhöhung mit zunehmender Temperatur ausgenutzt wird, haben NTC-Sensoren (Termistoren) einen wesentlich höheren Widerstand und einen negativen Temperaturkoeffizienten, d.h. der Widerstand nimmt mit steigender Temperatur ab. Das NTC-Element ist im Temperaturbereich von -20 bis 125 °C einsetzbar. Die Genauigkeitsangaben bei den normierten NTC-Sensoren beziehen sich auf Lieferantangaben. Für ein NTC-Element (10 K Ω bei 25°C betragen die maximalen Abweichungen +/-0,4°C im Bereich zwischen -20 bis 0°C und +/- 0,1°C im Bereich zwischen 0 bis 70°C. NTC-Fühler sind schnell, genau und mit ihrem Messbereich für den vorliegenden Anwendungsfall ideal geeignet. Der NTC-Sensor lässt sich direkt auf dem Glas fixieren, so dass die Oberflächentemperatur unmittelbar gemessen werden kann.

Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit ist ein kapazitiver Sensor geeignet. Er besteht aus einem Glassubstrat, auf dem eine feuchtempfindliche Polymerschicht zwischen zwei Metallschichten aufgebracht ist. Durch Wasseraufnahme entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit ändert sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist direkt proportional zur relativen Feuchte und unabhängig vom Umgebungsdruck. Mit diesem Sensor ist eine Messung über längere Zeiträume auch bei Minustemperaturen möglich. Allerdings hat er nur eine begrenzte Langzeitstabilität und ist empfindlich gegenüber Betauung und bestimmte aggressive Medien. Zum Einsatz kam ein ALMEMO[®]-Messmodul für Feuchte und Temperatur FHAD 462. Bei diesem Messsystem werden 4 Klimagrößen angezeigt: Temperatur, relative Feuchte, Taupunkttemperatur und Mischungsverhältnis. Der Einsatzbereich liegt zwischen -20 und 60°C im Feuchtebereich zwischen 5 bis 98 % r. F. Die Genauigkeit der Feuchtemessung beträgt 1,8% r. F. im Bereich zwischen 20...80% r. F. (bei Nenntemperatur). Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt +/- 1K im Bereich von -20...60°C. Dieses Messmodul ist mit einer Schutzkappe gegen mechanische Beschädigung und gegen Schmutz und Staub geschützt. Aufgrund dieser konstruktiven Maßnahme befindet sich die Temperatur/Feuchtemessstelle nicht direkt auf der Glasoberfläche, sondern ca. 5 mm davon entfernt.

Die Luftgeschwindigkeit wurde mit Hilfe eines Thermoanemometers gemessen. Termistoren und Heizdrahtsonden sind hochsensible Messwertaufnehmer. Das Messelement wird kontinuierlich aufgeheizt. Mit einer Regelschaltung wird die Temperatur des Elements konstant

gehalten, welche durch die Luftströmung abgekühlt wird. Die Abkühlung ist umso stärker je größer die Luftgeschwindigkeit beziehungsweise der Massestrom ist und je niedriger die Lufttemperatur ist. Die sich einstellende Gleichgewichtstemperatur ist ein Maß für den Massestrom. Der Regelstrom ist proportional zur Luftströmung. Um den Einfluss der Lufttemperatur zu kompensieren, wird ein Temperaturmesselement benötigt, wozu in der Regel ein zweiter, im Luftstrom befindlicher Sensor verwendet wird. Sehr geringe, richtungsunabhängige Luftströmungen sind mit diesem System messbar. Verwendet wurde ein Thermoanemometer FVA935TH4K1. Der Messbereich liegt zwischen 0...2 m/s im Temperaturbereich zwischen -20 bis 70 °C mit einer Auflösung von 0,001 m/s. Die Genauigkeit beträgt +/- (0,04 m/s + v 1% MW). Die Luftgeschwindigkeitssensoren enthalten keine beweglichen Teile und sind daher verschleißfrei. Sie sind weitgehend unempfindlich gegen Schmutz und Staub, sodass bei Normalbedingungen keine Wartung erforderlich ist.

2.3 Messergebnisse

Die Auswertung der klimatischen Situation an den Messstellen in den unterschiedlichen Kirchen und Domen erfolgt zunächst einzeln für jedes Objekt nach einem einheitlichen Schema. Aus den Messwerten wurden die Extremwerte (Maximum, Minimum) und Durchschnittswerte für Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit an den unterschiedlichen Messpositionen bestimmt. Damit ist ein Vergleich mit Messungen an anderen Objekten möglich /1, 2, 3, 4, 5/. Aus diesen Werten lassen sich die jahreszeitlich unterschiedlichen Schwankungen in Temperatur- und Feuchteverlauf berechnen. Die Klassifizierung von Temperatur und Feuchtwerten in bestimmten Schwankungsbreiten im Monats- und Jahreszyklus ermöglichen Aussagen zur klimatischen Belastungssituation. Aus den Extremwerten können weiterhin Messzeiträume mit besonders starker klimatischer Beanspruchung herausgefiltert werden, die eine Berechnung von maximalen Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungsgeschwindigkeiten ermöglichen, um so Rückschlüsse auf die Beanspruchung der wertvollen Glasmalereifenster zu ziehen. Die sich aus den gemessenen Temperaturwerten und der relativen Feuchtigkeit ergebenden Taupunkttemperaturen sollten Rückschlüsse auf Kondensationserscheinungen an der Original- bzw. Außenschutzverglasung liefern. Aufgrund der Geometrie der eingesetzten Messfühler (5 mm Abstand von der Glasoberfläche) wurden Taupunktunterschreitungen messtechnisch nicht erfasst. Bei vor Ort Terminen wurde jedoch sowohl in Havelberg als auch in Quedlinburg Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung beobachtet. Die gemessenen Temperatur- und Feuchtwerte für diesen Zeitpunkt gelten somit als eindeutige Kennwerte für Tauwasserbildung. Mit Hilfe dieser Kennwerte wurde die durchschnittliche Anzahl von Tagen mit Tauwasserbildung aus den vorhandenen Messdaten mit Hilfe der Temperaturdifferenz aus Taupunkt und Oberflächentemperatur und dem Vergleich der relativen Luftfeuchtigkeit berechnet. Diese Ergebnisse liefern jedoch nur eine grobe Abschätzung für die Häufigkeit von Kondensationsereignissen, zeigen jedoch dass sie in allen Objekten auftreten können.

An allen Fenstern wurde im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung eine Luftbewegung gemessen und die Luftgeschwindigkeit registriert. Die eingesetzten Messfühler erlauben jedoch keine Rückschlüsse auf die Strömungsrichtung der Luft. Die Höhe der Luftgeschwindigkeit ist abhängig von zahlreichen konstruktiven Parametern wie Spaltbreite, Lufteintritts- und Austrittsöffnungen sowie konstruktiven Einbauten im Spalt. Die Auswertung der Messdaten erfolgte sowohl durch Extrem- und Mittelwertbildung als auch anhand besonderer Ereignisse in den Monatsdiagrammen und stets in Zusammenhang mit den konstruktiven Besonderheiten der speziellen Außenschutzverglasung. Sowohl Kondensationsvorgänge wie auch der Abtransport der Feuchte von der Glasoberfläche werden durch Luftströmungen im Spalt verursacht bzw. begünstigt. Sie sind auch verantwortlich für den Transport von Partikeln und Staub (s. Kapitel 5).

Alle Klimadaten wurden unmittelbar an der Original- bzw. Außenschutzverglasung im Kircheninnenraum gemessen. Auf die Registrierung des Außenklimas wurde verzichtet. Diese Daten sind im Bedarfsfall durch meteorologische Messdaten zu ergänzen und allgemein zugänglich. Ebenso wurde auf die Messung von Klimadaten im Kircheninnenraum abseits der Glasfenster verzichtet. Die ermittelten Daten und Kennwerte sollen zu einem direkten Vergleich mit Dokumentationen zum Erhaltungszustand von Glasmalereifeldern und einzelnen Glassegmenten herangezogen werden.

Havelberger Dom – Anordnung der Messtechnik

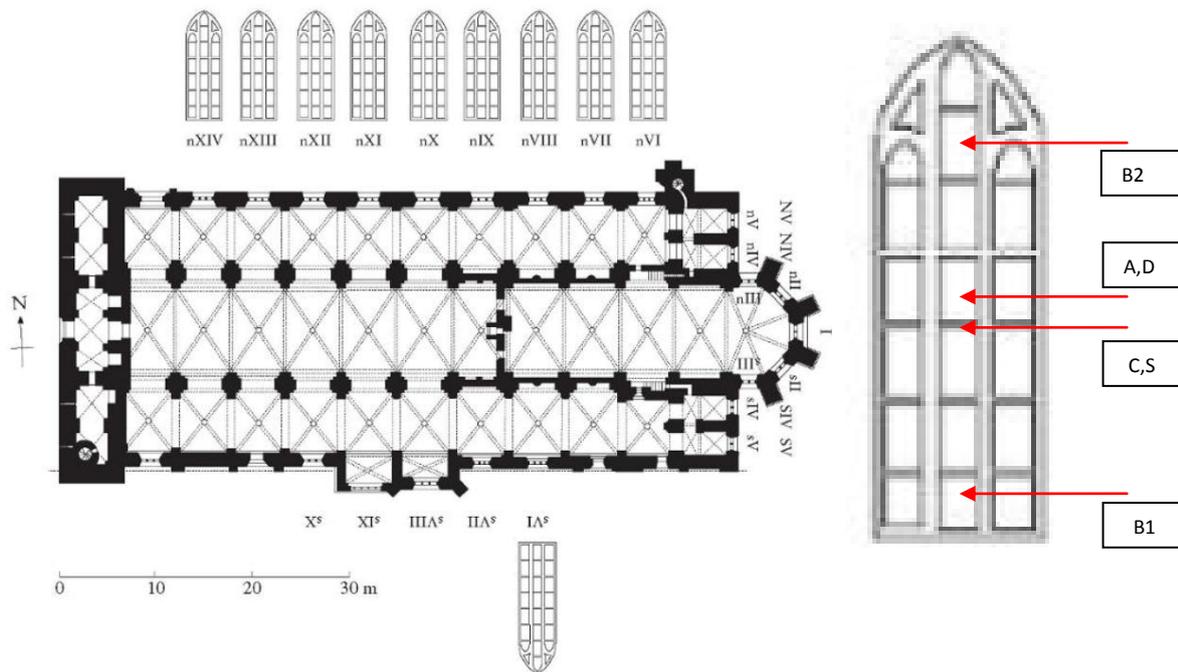


Abb. 1: Havelberg Dom St. Marien, Messstellen am Fenster nXI;
Foto: CVMA Deutschland/Potsdam/6/

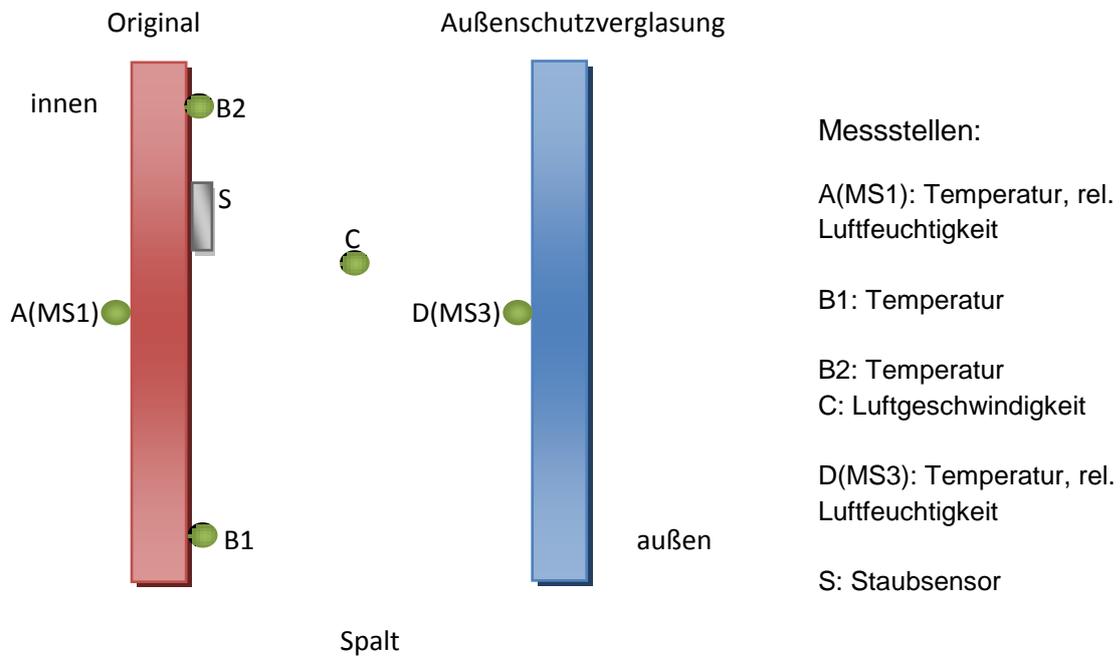


Abb. 2: Anordnung der Messstellen

Anmerkung:

Die Glasmalereien sind in den Jahren 1410-1415 entstanden, wurden zunächst 1840-1842 stark ergänzt, dann 1890-1895 noch einmal restauriert und dabei teilweise neu geordnet. „So wie die Glasmalereien heute angeordnet sind, ist es das Ergebnis der großen Restaurierungskampagne, die das Königliche Institut für Glasmalerei 1895 abgeschlossen hat. Seit dieser Instandsetzungskampagne präsentieren sich die Fenster im Nordquerhaus wieder als Erzählkontinuum, das von West nach Ost in Richtung Hauptaltar die Passion Christi zum Thema hat. Die mittelalterlichen Anteile der szenischen Fenster sind mitunter stark verbräunt und geben ihre Binnenzeichnung nur mehr unter optimalen Lichtverhältnissen dar.“/6/.

Das Fenster besteht aus drei Bahnen zu fünf Zeilen, die Mittelbahn hat innerhalb des Maßwerks zwei weitere Felder übereinander.

Die Breite des Fensters (mit Feldern in 3 Bahnen zu je ca. 38 cm) beträgt ca. 1,50 m, die Höhe ca. 4,20 m. Die Außenschutzverglasung wurde 1998 eingebaut.

Havelberger Dom - Messergebnisse

Die Klimamessungen im Havelberger Dom am Fenster nXI erfolgten im Zeitraum vom 04.11.2009 - 25.10.2010. Das Nordfenster hat eine Höhe von ca. 4,20 m, die Breite der einzelnen Felder beträgt etwa 38 cm. Es zählt damit zu den kleineren Fenstern. Die lichte Öffnung zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt minimal 5 cm. Am unteren Fensterspalt befindet sich ein Schwitzwasserkasten mit einer Spaltöffnung von 1-2 cm über die gesamte Breite des Glasmalereifeldes. Die Spitze des Maßwerkfeldes weist ebenfalls eine ca. 1-2 cm breite Öffnung auf. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas in Rautenform. Vereinzelt wurden Veränderungen im optischen Erscheinungsbild der Außenschutzverglasung festgestellt.

Die Klimamesswerte wurden monatlich ausgelesen und können in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet werden. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 1: Extremwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum

Monat	11/09	12/09	01/10	02	03	04	05	06	07	08	09	10/10
Temperatur MS1 Original [°C]												
Min	7,3	0,2	-3,2	-1,6	1,6	8,1	10,5	12,7	20,0	18,4	13,3	8,9
Max	11,4	8,9	1,6	3,9	10,1	14,3	15,3	21,1	25,4	23,3	19,2	15,5
relative Luftfeuchtigkeit MS1 [%]												
Min	69,3	65,8	72,3	75,7	66	62,4	69,9	58,1	51,6	57,4	64,5	70
Max	83,5	84,3	81,1	83,8	88,3	83,6	84,8	86	76,2	79,2	81,4	81,3
Temperatur Schutzverglasung MS3 [°C]												
Min	4,5	-8,1	-9,4	-5,6	-1,7	4,6	6,0	11,3	16,3	15,5	9,9	5,3
Max	13,1	8,2	3,79	8,2	16,2	21,6	20,9	26,3	32,4	28	22,0	17,7
relative Luftfeuchtigkeit MS3[%]												
Min	65,7	72,4	70	58	53,9	43	52,2	44,5	41,2	43,7	58,9	67,6
Max	93	96,8	95,8	94,1	94,8	93,6	92,9	94,4	89,4	89,2	93,7	95,1

Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

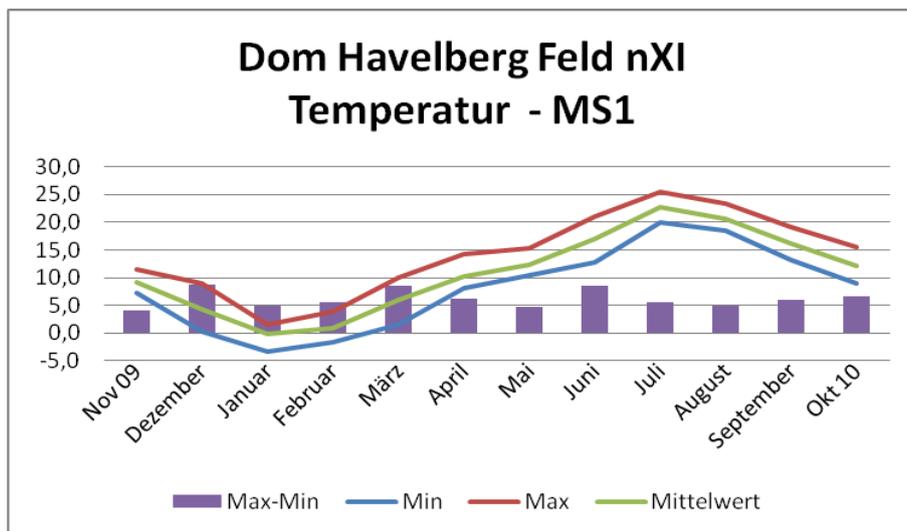


Abb. 3: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nXI 4c betrug im Juli 25,4°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -3,2°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug in den Monaten Dezember, März und Juli zwischen 8,7 und 8,4K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass in den Monaten April und Mai häufiger tiefere Temperaturen (nahe des Min-Wertes) auftraten.

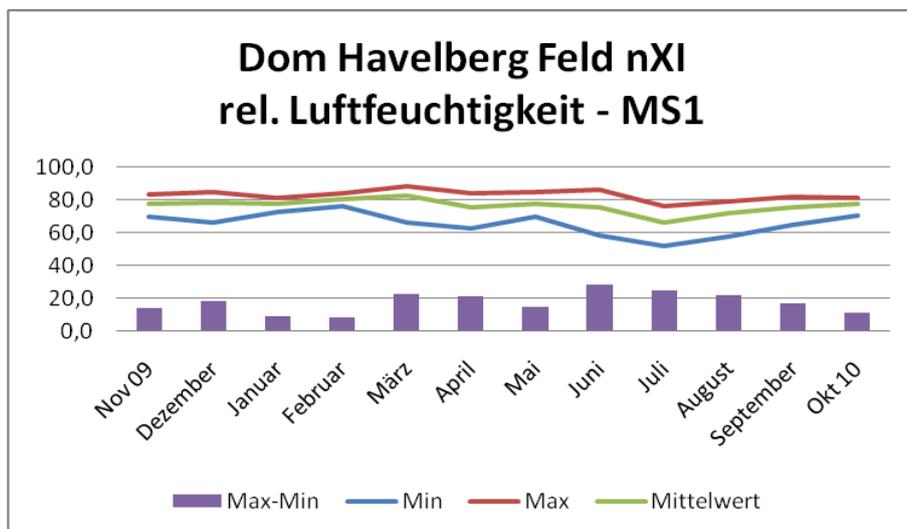


Abb. 4: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit lagen bis auf Juli und August in allen Monaten über 80% r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nXI 4c betrug im März 88,3 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 51,6 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im Juni mit $\Delta r. F. = 27,9 \%$ festgesellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass Feuchtwerte nahe 80 % r. F. häufiger auftreten als darunterliegende relative Luftfeuchtigkeitswerte.

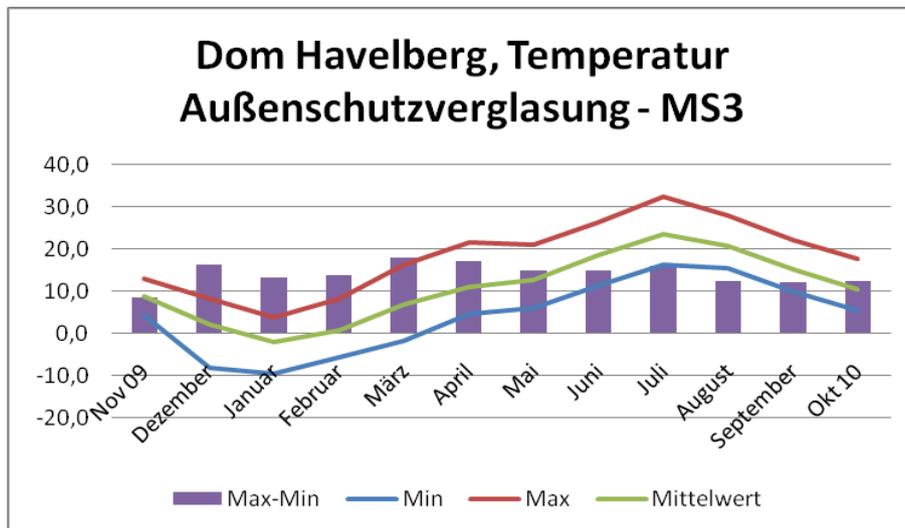


Abb. 5: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nXI 4c betrug im Juli 32,4 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -9,4 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 18 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe und tiefe Temperaturen etwa gleich häufig auftreten (Tag/Nachtwechsel).

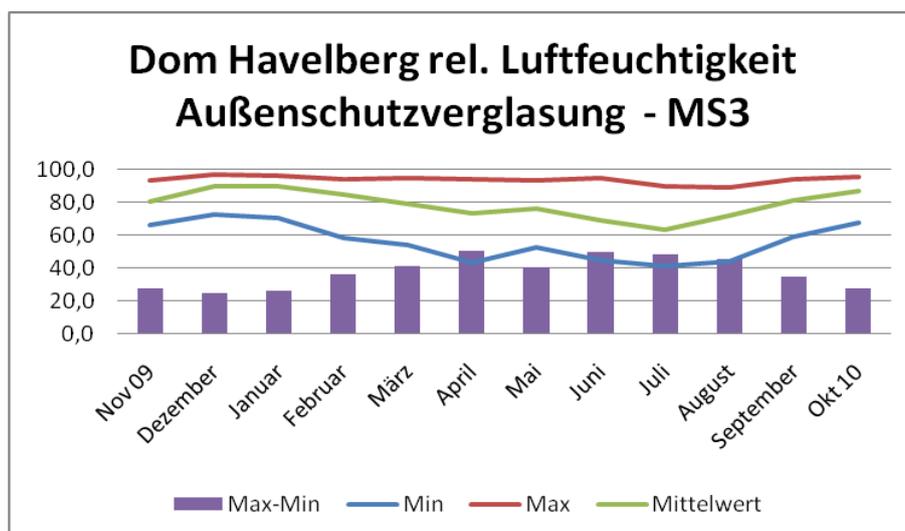


Abb. 6: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in allen Monaten nahe bzw. deutlich über 90 % r.F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nXI 4c betrug im Dezember 96,8 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 41,2 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde in April mit Δ r. F. = 50,6 % festgesellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger im Herbst und in den Wintermonaten auftreten.

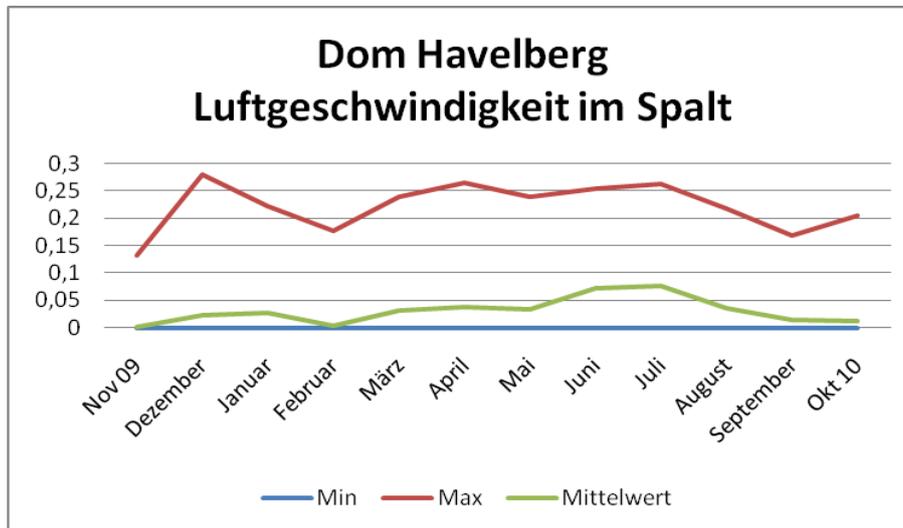


Abb. 7: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld nXI 4c betrug im Dezember 0,28 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen.

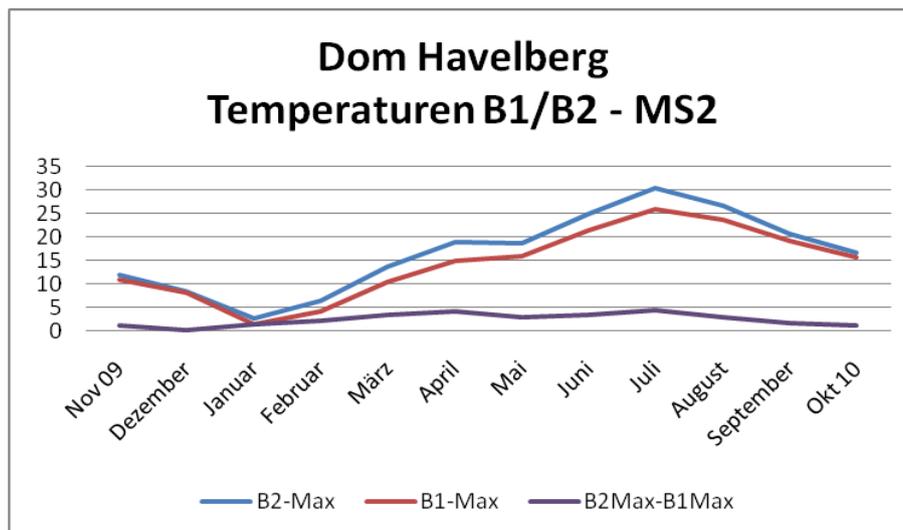


Abb. 8: Temperaturextrema und –differenzen an der Innenseite der Außenschutzverglasung in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) im Messzeitraum

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Innenseite der Außenschutzverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf MS1 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich stärker als die Felder der ersten Reihe. Die Temperaturdifferenzen zwischen unten (B1) und oben (B2) ist in den Monaten März bis August höher als in den übrigen Monaten. Eine spezifische klimatische Situation im Spalt kann die Ursache für geringe Luftgeschwindigkeiten und das völlige Abbrechen der Luftströmung verantwortlich sein.

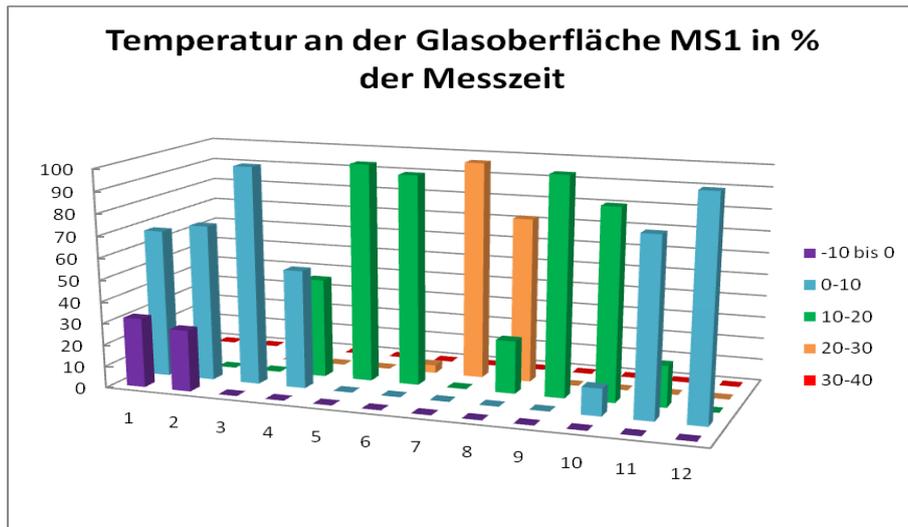


Abb. 9: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Maximalwerte der Temperatur im Bereich zwischen 20 und 30 °C an der Originalverglasung wurden im Juli zu mehr als 99% der Messzeit und im August zu über 70% der Messzeit registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten Mai, Juni und September, Oktober liegen zwischen 10 und 20 °C. Im Januar und Februar lagen die Temperaturen zu knapp 30 % der Messzeit zwischen 0 und -10 °C.

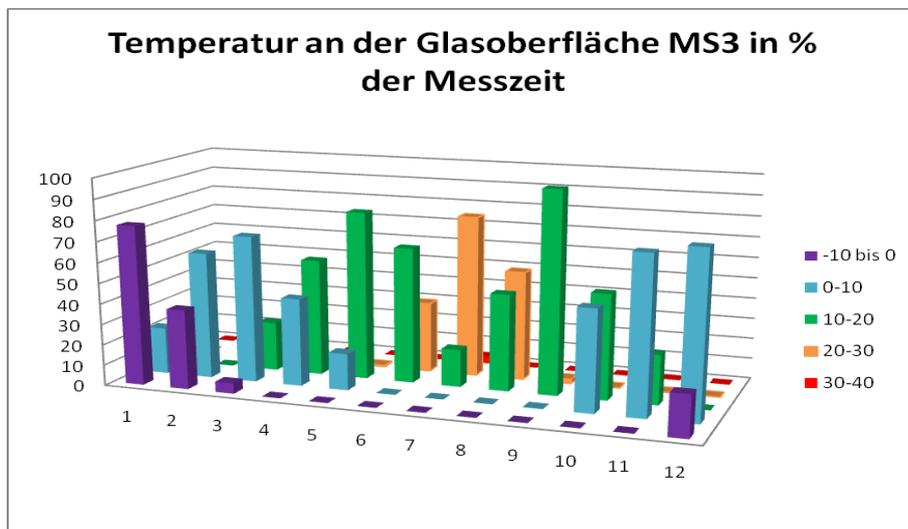


Abb. 10: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die jahreszeitlichen Verläufe der Temperaturen an den Original- und Außenschutzverglasungen stimmen völlig überein. Die Dauer der extremen Temperaturereignisse ist an der Außenschutzverglasung jedoch etwas länger. Etwa zu 77 % der Messzeit im Januar wurden Temperaturbereiche zwischen 0 und -10 °C erreicht. Die Außentemperatur bestimmt somit die Temperaturverteilung am Original.

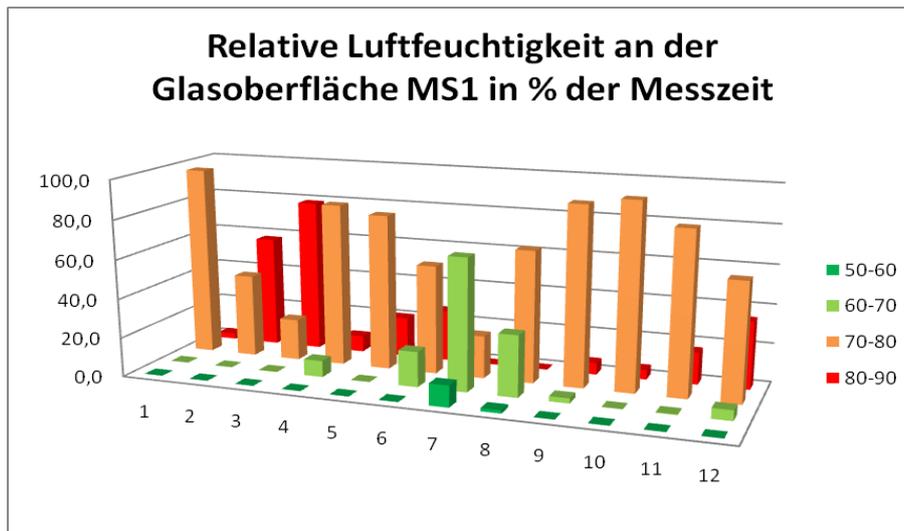


Abb. 11: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit ist als hoch anzusehen, wenn der Wert 80 % r. F. überschritten wird. Oberhalb von 90 % r. F. kann es in Abhängigkeit von der Temperatur des Glases bereits zur Tauwasserbildung auf der Oberfläche kommen. Hohe Luftfeuchtigkeit und Wasser begünstigen die Glaskorrosion. Luftfeuchtigkeitswerte unterhalb 80% können als unkritisch angesehen werden.

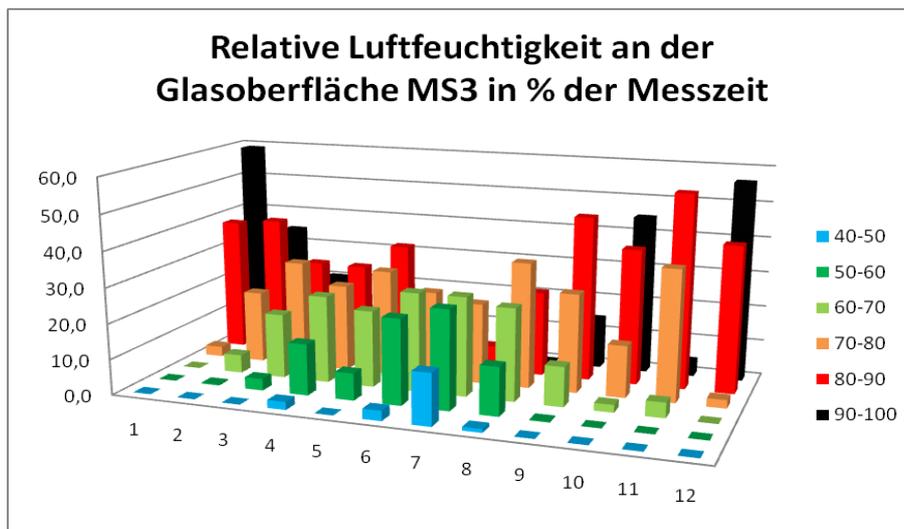


Abb. 12: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung ist höher als die an der Originalscheibe. Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 90 und 100 % r. F. tritt am Häufigsten in den Monaten Januar, Oktober und Dezember auf. Es ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung zu rechnen. In den Monaten Mai bis August überwiegen relative Luftfeuchtigkeiten im unkritischen Bereich.

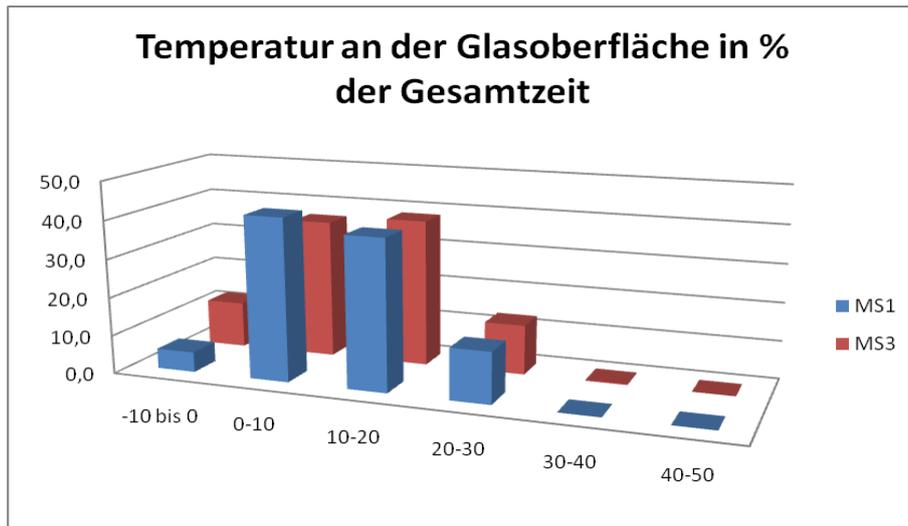


Abb. 13: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS1) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die Temperaturen an der Originalverglasung erreichen in den Wintermonaten Werte von 0 bis -10 °C. Im übrigen Jahresdurchschnitt liegen sie zwischen 0-20 °C. Die höchsten Temperaturen lagen im Bereich zwischen 20 und 30 °C und wurden nur etwa zu 1/8 der Messzeit registriert. Der Temperaturverlauf an der Außenschutzverglasung ist nahezu identisch. Die Scheiben sind in den Wintermonaten etwas kühler als die Originalverglasung und erreichen zu etwa 12 % der Messzeit Temperaturen im Bereich von 0 bis -10 °C und können sich im Sommer zu 0,3 % der Messzeit auf Werte zwischen 30-40 °C aufheizen.

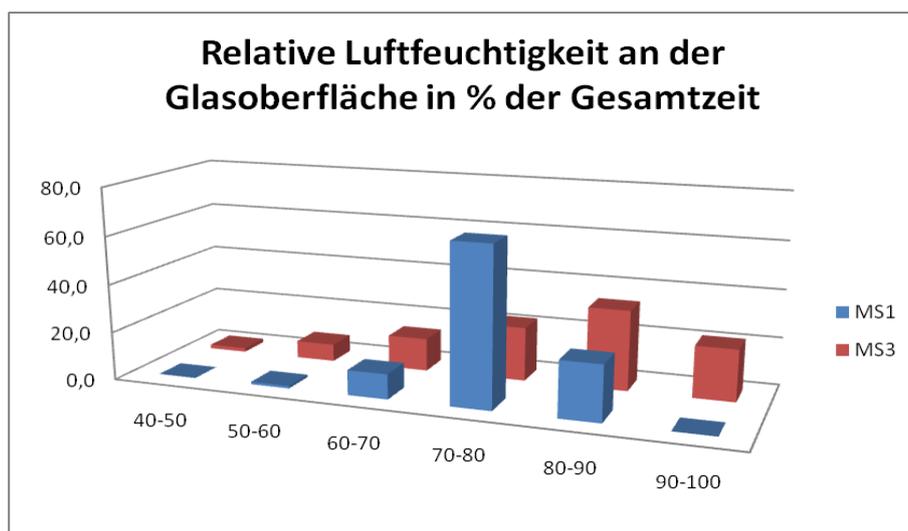


Abb. 14: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS1) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung liegt zu etwa 2/3 der Messzeit in einem Bereich zwischen 70-80 % r.F. Sie erreicht zu keinem Zeitpunkt Werte zwischen 90 und 100 % r. F. Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. An der Außenschutzverglasung ist die relative Luftfeuchte zu über 50% der Messzeit höher als 80% r. F. und etwa 1/5 der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 90 und 100% r. F. Beim Ausbau der Messtechnik im Havelberger Dom am 25.10.2010 war die Innenseite der Außenschutzverglasung völlig mit Tauwasser benetzt. Zu diesem Zeitpunkt wurde vom Temperatur/Feuchtfühler folgende Werte registriert $T = 5,4 \text{ }^\circ\text{C}$ und eine relative Luftfeuchte von 92,5 % r. F. (s. Klimadiagramm, Bild) Daraus ergibt sich eine Taupunkttemperatur von $T_p = 4,2 \text{ }^\circ\text{C}$. Obwohl die registrierte Temperatur etwa 1,2 K oberhalb der Taupunkttemperatur liegt, wurde Tauwasser auf der Glasoberfläche festgestellt. Die Ursache dafür liegt, wie schon erwähnt, in der Anordnung des Messfühlers, der aufgrund seiner Geometrie etwa 5 mm von der Glasoberfläche entfernt ist. Legt man die Temperaturdifferenz von 1,2 K und den Wert der relativen Feuchte von $>92,5 \text{ } \%$ zu Grunde, so lassen sich aus den Messwerten 82 Tage berechnen, an denen die gleiche klimatische Situation vorlag und ebenfalls mit Tauwasserbildung zu rechnen ist. Verändert man die Grenzen auf $\Delta T = 1,3$ und $r. F. = 93 \text{ } \%$, so ergeben sich 118 Tage an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Betauung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung vorlag. Charakteristische Monatsverläufe für jeweils einen Sommer und einen Wintermonat befinden sich im Anhang.

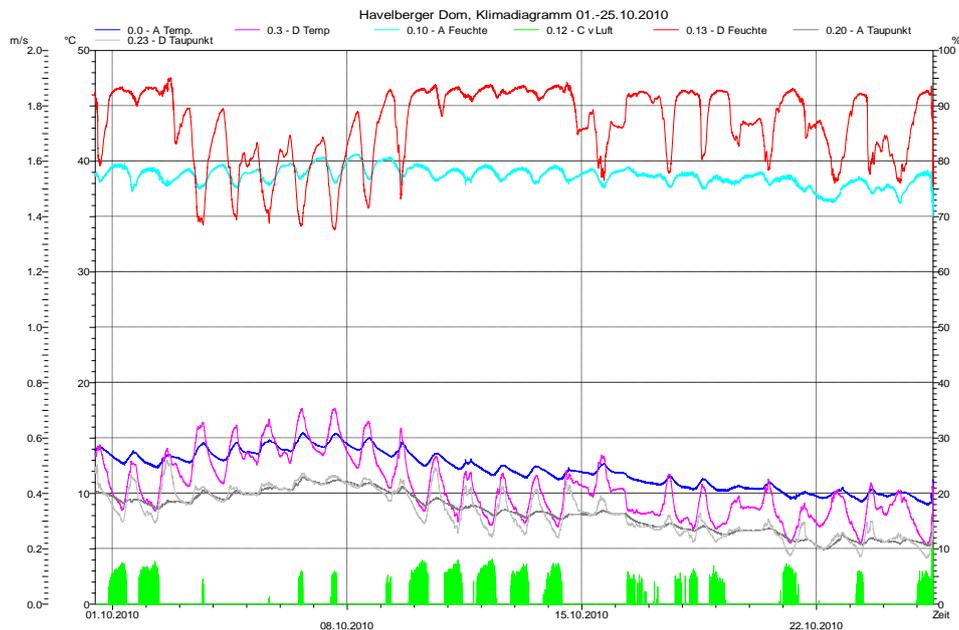


Abb. 15: Klimadiagramm Havelberger Dom, 01.-25.10.2010

Die hohen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung führen zur Tauwasserbildung. An der Originalverglasung werden im gleichen Messzeitraum 80% r. F. nur an zwei Tagen überschritten. Dort tritt keine Tauwasserbildung auf.

Halberstadt Dom – Anordnung der Messtechnik

Teilgrundriss des Doms St. Stephanus und Sixtus zu Halberstadt

Chorumgang

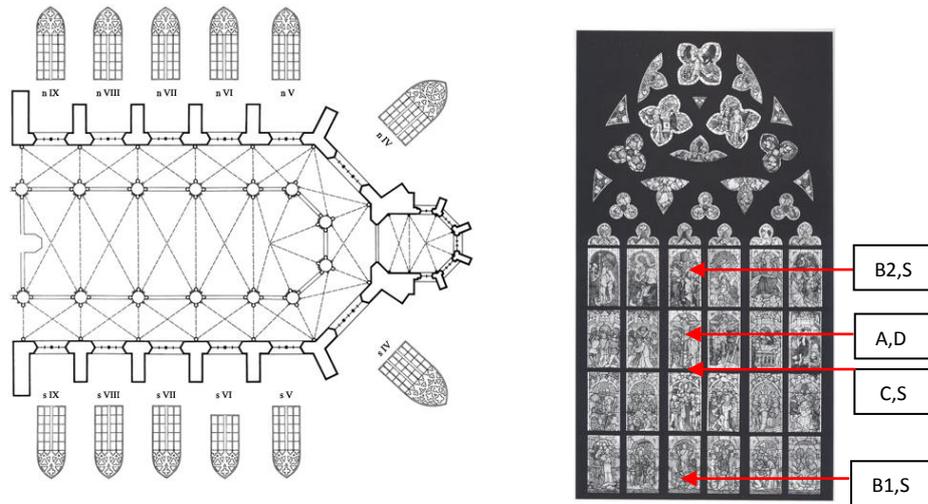


Abb. 16: Dom Halberstadt, Messstellen am Fenster nIV;
Foto: CVMA Deutschland/Potsdam/7/

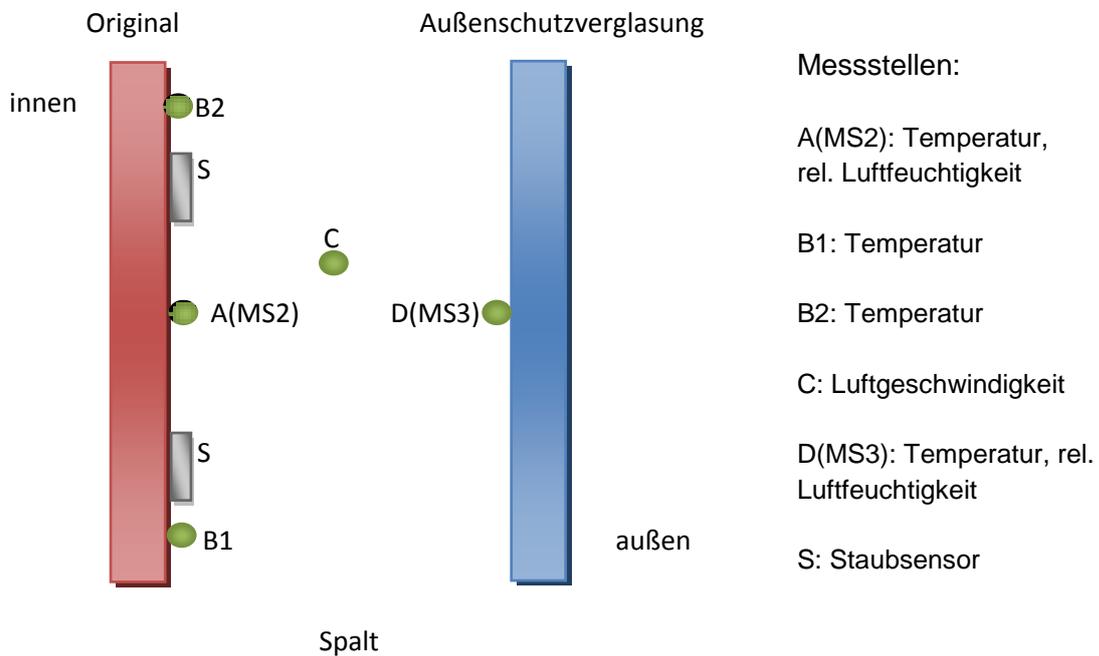


Abb. 17: Anordnung der Messstellen

Anmerkung:

Die Glasmalereien entstanden um 1401, nur Zeile 1 und ein einzelnes Feld in Zeile 2 sind nicht original. Im Rahmen einer Restaurierung wurden 1973 eine außenbelüftete Außenschutzverglasung installiert und deren Schlitze 1980 geschlossen, so dass keine Belüftung mehr erfolgte. Das Fenster wurde 1992 ausgebaut und bis 1997 in einer Kammer des Doms in Kisten gelagert. Am Ende der Lagerung wurden starke Korrosion und Pilzbefall festgestellt.

1997/98 erfolgte die Installation der gegenwärtigen Schutzverglasung, ferner wurden die lockeren Korrosionsbeläge mit einem weichen Pinsel entfernt und das Schwarzlot partiell mit Paraloid B72 fixiert.

Das Fenster besteht aus sechs Bahnen, fünf Zeilen und dem Maßwerk. Die Größe der einzelnen Felder beträgt 0,90 x 0,53 m, das gesamte Fenster hat die Maße 7,46 x 3,81 m /8/.

Dom Halberstadt - Messergebnisse

Die Klimamessungen im Dom zu Halberstadt am Fenster n IV erfolgten im Zeitraum vom 14.09.2009 - 15.09.2010. Das Nordfenster hat eine Höhe von ca. 4 m, die Breite eines Feldes beträgt etwa 52 cm. Das gesamte Fenster hat 6 Bahnen. Die lichte Öffnung zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt minimal 6 cm. Die Öffnung am unteren Fensterspalt beträgt etwa 2,5 cm. Die Spitze des Maßwerkfeldes weist ebenfalls eine ca. 2 cm breite Öffnung auf, die sich zu den Rändern hin verringert. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas in Rechteckverglasung. Veränderungen im optischen Erscheinungsbild der Außenschutzverglasung wurden nicht festgestellt.

Die Klimamesswerte wurden monatlich ausgelesen. Charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit sind berechnet worden. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 2: Extremwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum

Monat	10/ 09	11	12	01/10	02	03	04	05	06	07	08	09/10
Temperatur Original MS2 [°C]												
Min	6,3	7,0	-5,4	-7,0	-5,0	-1,9	5,2	7,4	12,0	17,2	16,3	12,7
Max	20,8	13,9	10,0	4,0	9,1	15,1	20,5	23,4	33,5	34,9	28,0	24,2
relative Luftfeuchtigkeit MS2 [%]												
Min	49,3	60,9	56,1	64,0	53,0	54,2	42,9	41,0	28,9	30,9	41,9	49,8
Max	80,1	85,0	85,3	90,5	88,4	89,7	84,3	83,5	86,0	78,0	81,1	83,1
Temperatur Schutzverglasung MS3 [°C]												
Min	4,7	6,1	-8,2	-9,0	-6,5	-3,6	3,8	5,5	11,6	15,2	14,8	10,8
Max	21,7	15,3	10,2	4,8	10,6	16,7	24,1	23,8	33,2	35,5	29,8	23,6
relative Luftfeuchtigkeit MS3[%]												
Min	52,2	57,6	56,5	64,2	51,4	51,4	36,3	39,0	29,4	30,9	38,3	50,9
Max	89,5	91,5	92,1	95,1	94,5	93,3	91,3	90,2	92,5	86,2	88,4	90,9

Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

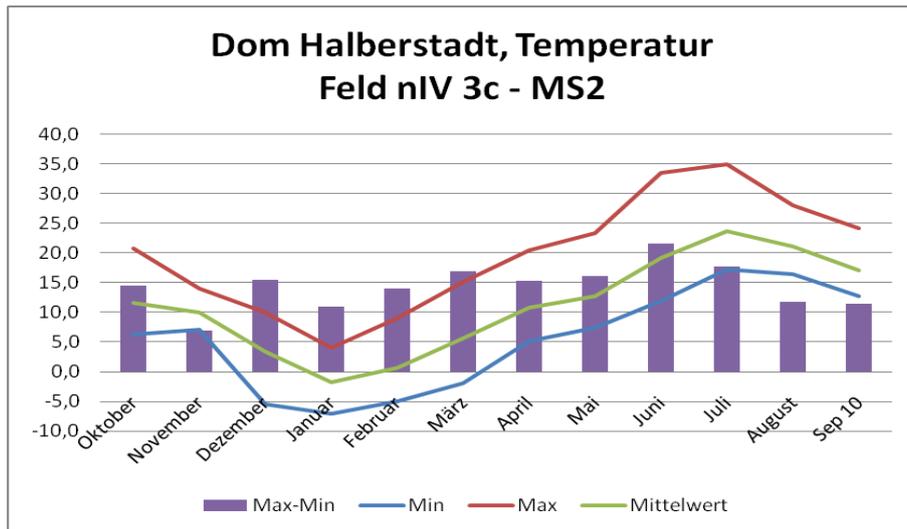


Abb. 18: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nIV 3c betrug im Juli 34,9 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei –7,0°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Juni 21,5 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe und niedrige Temperaturen über die gesamte Messzeit mit nahezu gleichem Abstand von den Mittelwerten registriert wurden.

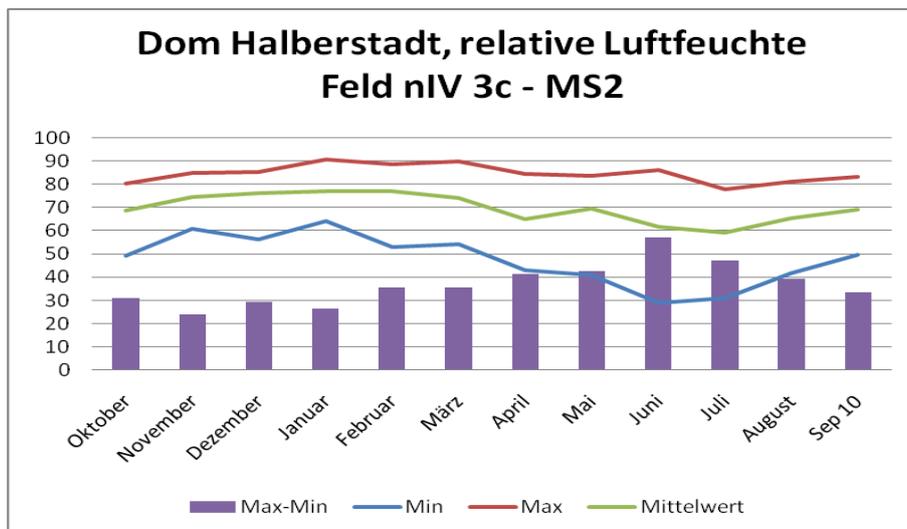


Abb. 19: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten Januar bis März nahe 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nIV 3c betrug im Januar 90,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 30,9 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls Juni mit Δ r. F. = 47,1 % berechnet. Die Mittelwertskurve zeigt, dass Feuchtwerte zwischen Dezember und März nahe 80 % r. F. häufiger auftreten als darunterliegende relative Luftfeuchtigkeitswerte.

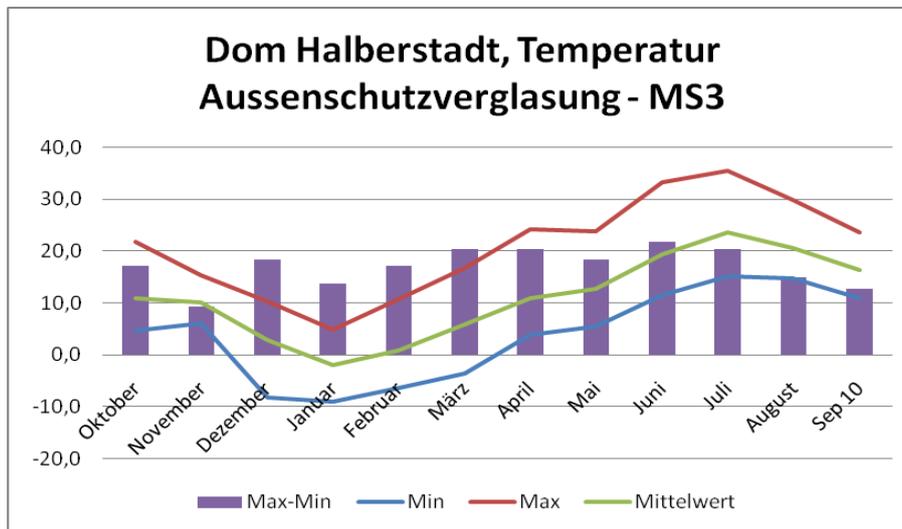


Abb. 20: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nIV 3c betrug im Juli 35,5 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -9,0 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 21,7 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe und tiefe Temperaturen etwa gleich häufig auftreten.

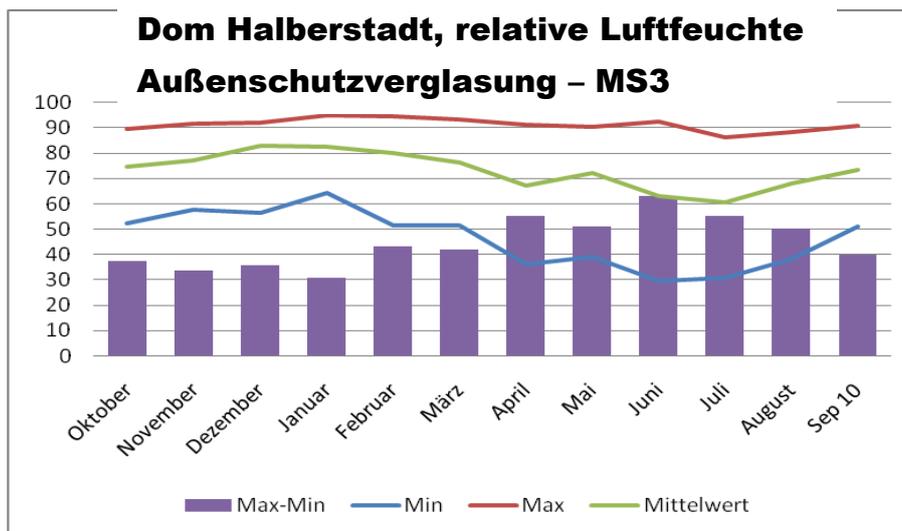


Abb. 21: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in den Monaten September bis Juni nahe bzw. deutlich über 90 % r .F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nIV 3c betrug im Dezember 95,1 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 29,4 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Juni mit Δ r. F. = 63,1 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitwerte im Herbst und Winter auftreten.

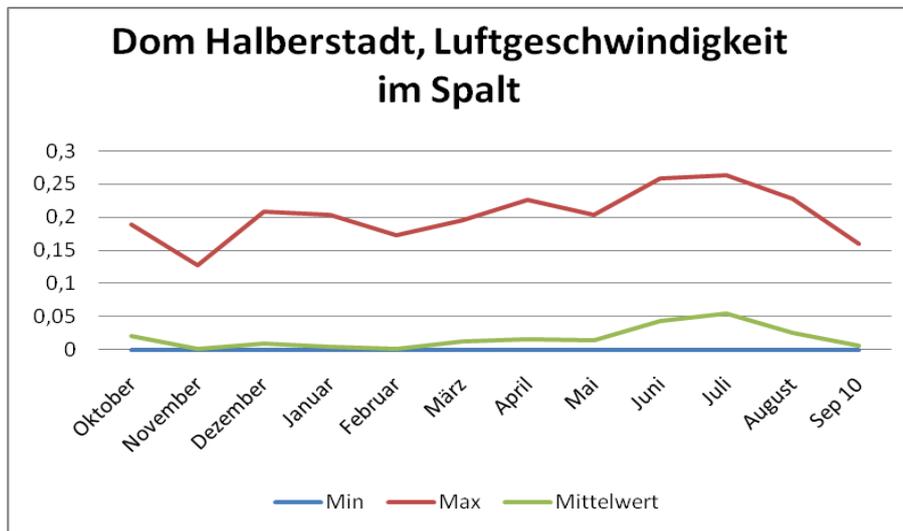


Abb. 22: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld nIV 3c betrug im Juli 0,26 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass auch hier die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass sehr geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen und ein Anstieg zwischen Mai und Juli sichtbar wird.

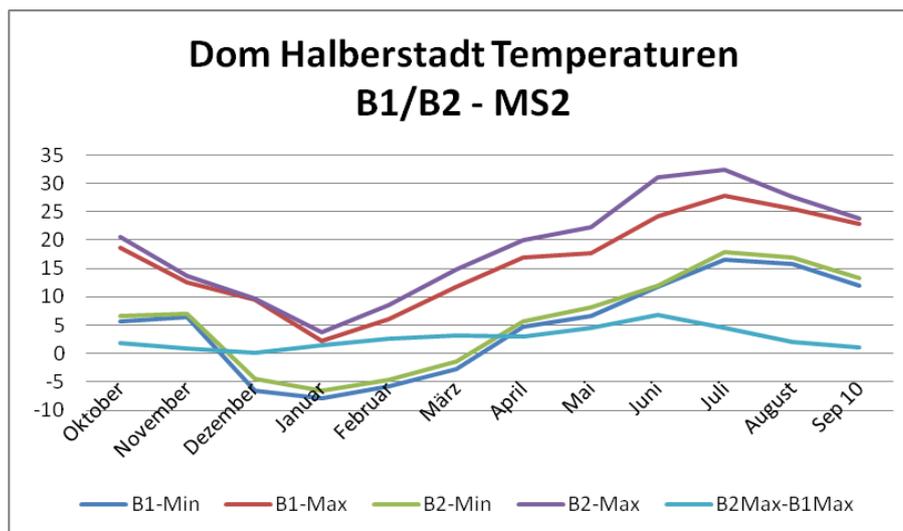


Abb. 23: Temperaturextrema und –differenzen an der Innenseite der Außenschutzverglasung in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) im Messzeitraum

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Innenseite der Außenschutzverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf MS2 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich vor allem in Sommermonaten deutlich stärker als die Felder der ersten Reihe. Die Temperaturdifferenzen zwischen unten (B1) und oben (B2) steigen in den Monaten Mai und Juni deutlich an. In diesen Monaten ist auch ein signifikanter Anstieg der Luftströmungsgeschwindigkeit sichtbar.

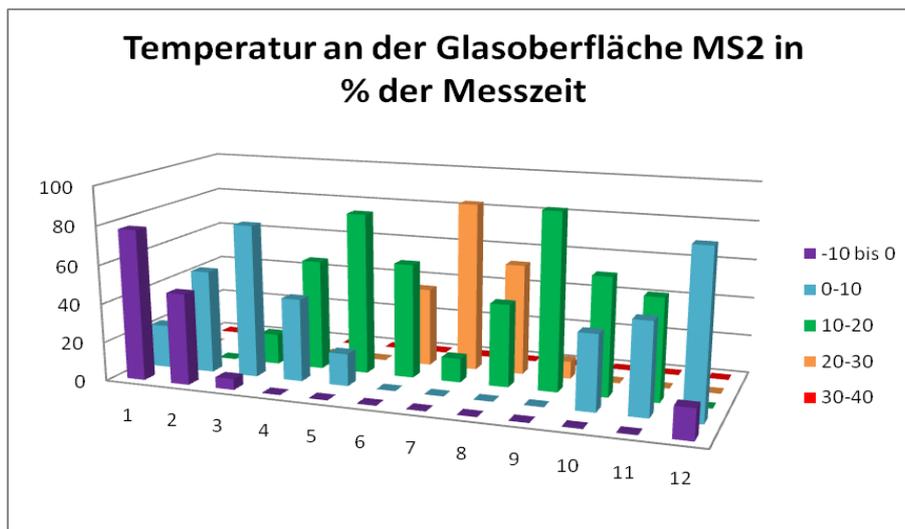


Abb. 24: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Maximalwerte der Temperatur im Bereich zwischen 30 und 40 °C an der Originalverglasung wurden zu weniger als 0,4 % der Messzeit im Juni und Juli registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten April bis November liegen zwischen 10 und 30 °C. Im Januar lag die Temperatur zu 78 % der Messzeit zwischen 0 und -10 °C.

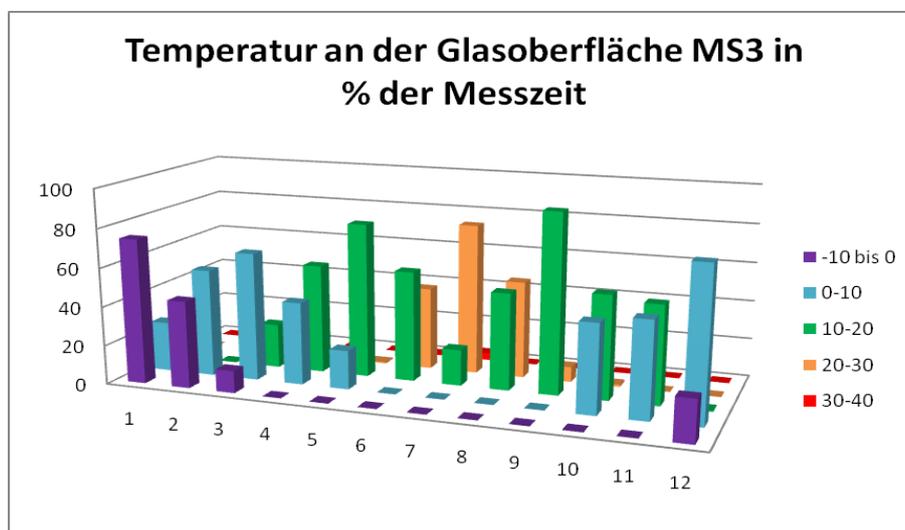


Abb. 25: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Tendenzen im jahreszeitlichen Temperaturverlauf an der Original- und Außenschutzverglasung stimmen völlig überein. Die Dauer der extremen Temperaturereignisse ist an der Außenschutzverglasung jedoch etwas länger. Etwa zu 4% der Messzeit im Juli wurden Temperaturbereiche zwischen 30 und 40 °C erreicht.

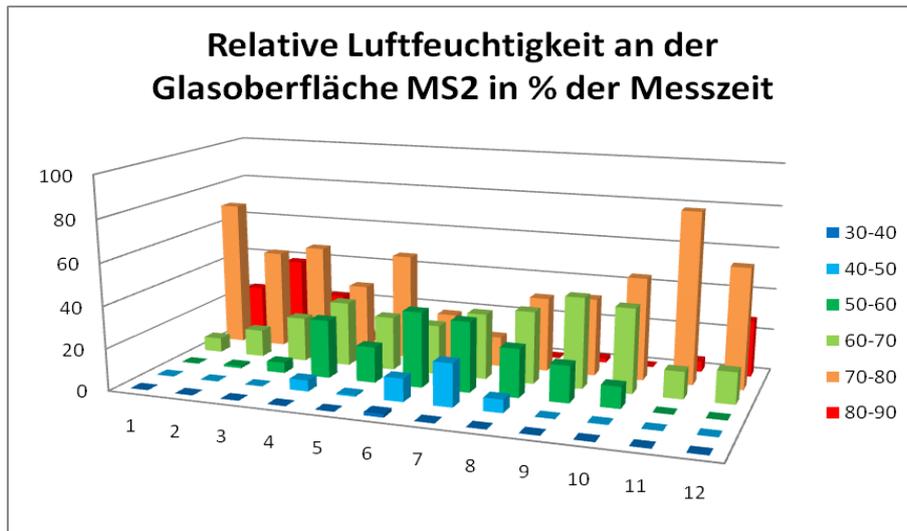


Abb. 26: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90 % ist zu mehr als 1/5 der Messzeit in den Monaten Dezember bis März ermittelt worden. Im Februar wurde dieser Feuchtebereich zu 2/5 der Messzeit registriert. Werte von deutlich über 90 % r. F. wurden jedoch zu keinem Zeitpunkt an der Originalverglasung erreicht. Die Bereiche der relativen Luftfeuchtigkeit in den Monaten April bis November können als unkritisch angesehen werden.

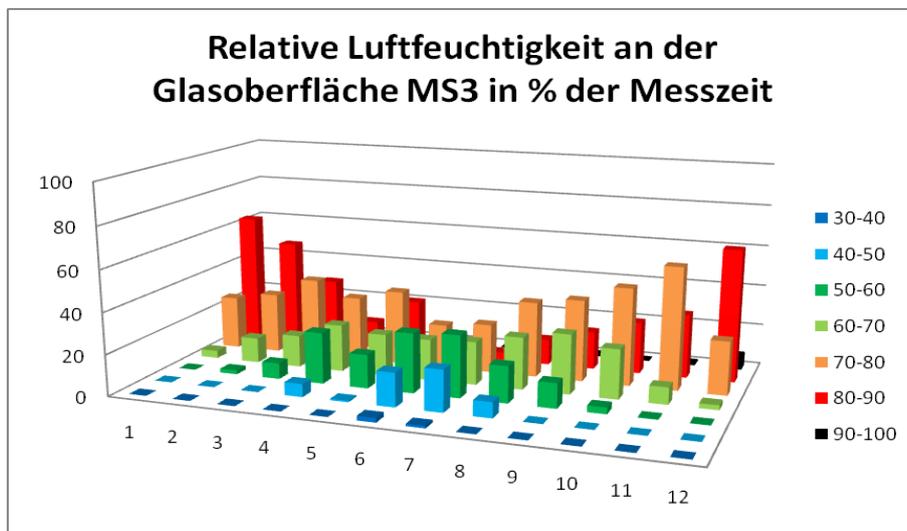


Abb. 27: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung ist höher als die an der Originalscheibe. Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 90 und 100 % r. F. tritt in den Monaten Dezember bis April auf. In diesen Monaten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung zu rechnen. In den Monaten April bis Oktober überwiegen relative Luftfeuchtigkeiten im unkritischen Bereich.

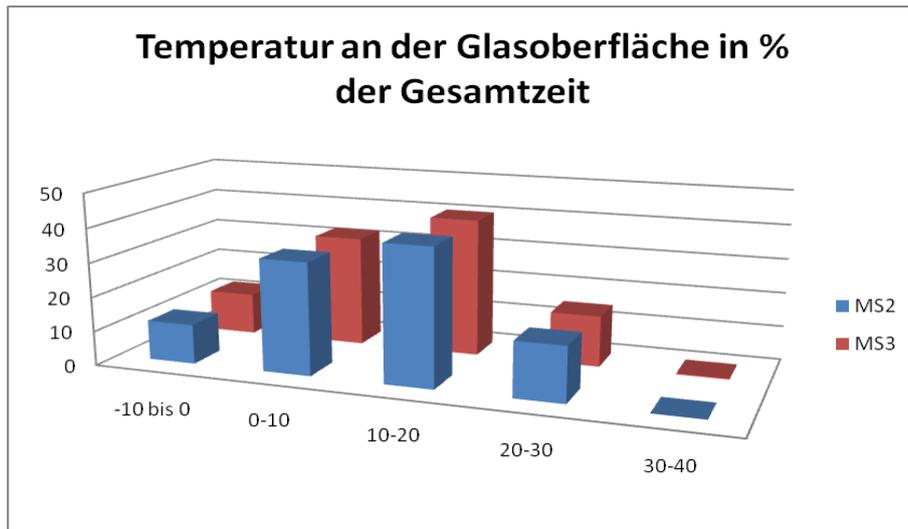


Abb. 28: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die Temperaturen an der Originalverglasung erreichen in den Wintermonaten Werte von 0 bis -10 °C. Im übrigen Jahresdurchschnitt liegen sie zwischen 0-30 °C, wobei die Bereiche zwischen 10 und 20 °C überwiegen. Lediglich zu 0,1 % der Messzeit wurden an diesem Nordfenster Werte im Bereich von 30-40 °C erreicht. Der Temperaturverlauf an der Außenschutzverglasung ist nahezu identisch. Die Scheiben erreichen in den Wintermonaten Temperaturen im Bereich von 0 bis -10 °C und können sich im Sommer zu 0,4 % der Messzeit auf Werte zwischen 30-40 °C aufheizen.

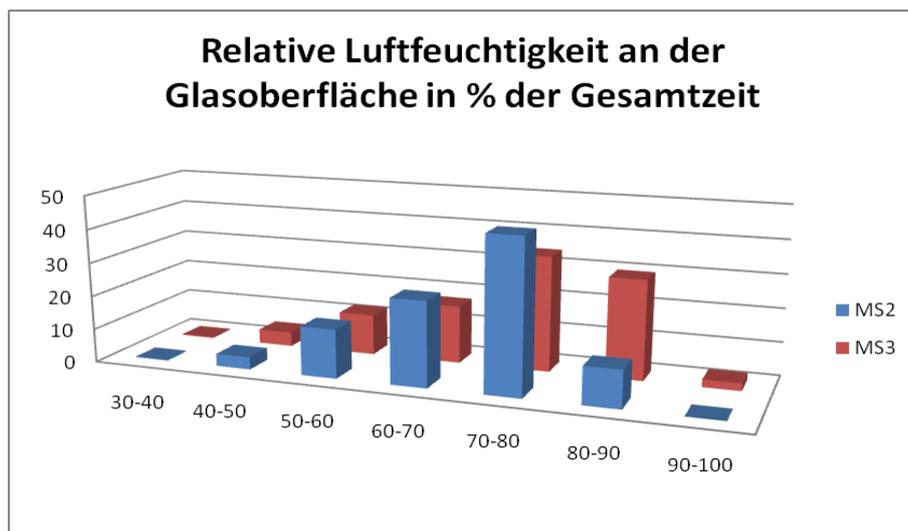


Abb. 29: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung liegt zu mehr als der Hälfte (56%) der Messzeit in einem Bereich zwischen 70 und 80 % r.F. Sie erreicht zu keinem Zeitpunkt Werte zwischen 90 und 100%. Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. An der Außenschutzverglasung ist die relative Luftfeuchte zu über 1/3 der Messzeit höher als 80 % r. F. und zu etwa 2 % der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 90 und 100% r. F. Tauwasserbildung wurde am Halberstädter Dom nicht beobachtet. Auch hier waren die Temperatur/Feuchtefühler aufgrund ihrer Bauart ca. 5 mm von der Glasoberfläche entfernt. Legt man wiederum die bei der Tauwasserbildung im Havelberger Dom gemessenen Temperatur und Feuchtwerte zu Grunde, so lassen sich bei einer Temperaturdifferenz von 1,2 K zwischen Temperatur und Taupunkttemperatur und einem Wert der relativen Feuchte von >92.5 % aus den Messwerten 6 Tagen berechnen, an denen die gleiche klimatische Situation vorlag und ebenfalls mit Tauwasserbildung zu rechnen ist. Verändert man die Grenzen auf $\Delta T=1,3$ und r. F. = 93 %, so ergeben sich 21 Tage an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Betauung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung vorlag. Charakteristische Monatsverläufe der Klimadiagramme für jeweils einen Sommer- und einen Wintermonat befinden sich im Anhang.

Stendaler Dom – Anordnung der Messtechnik

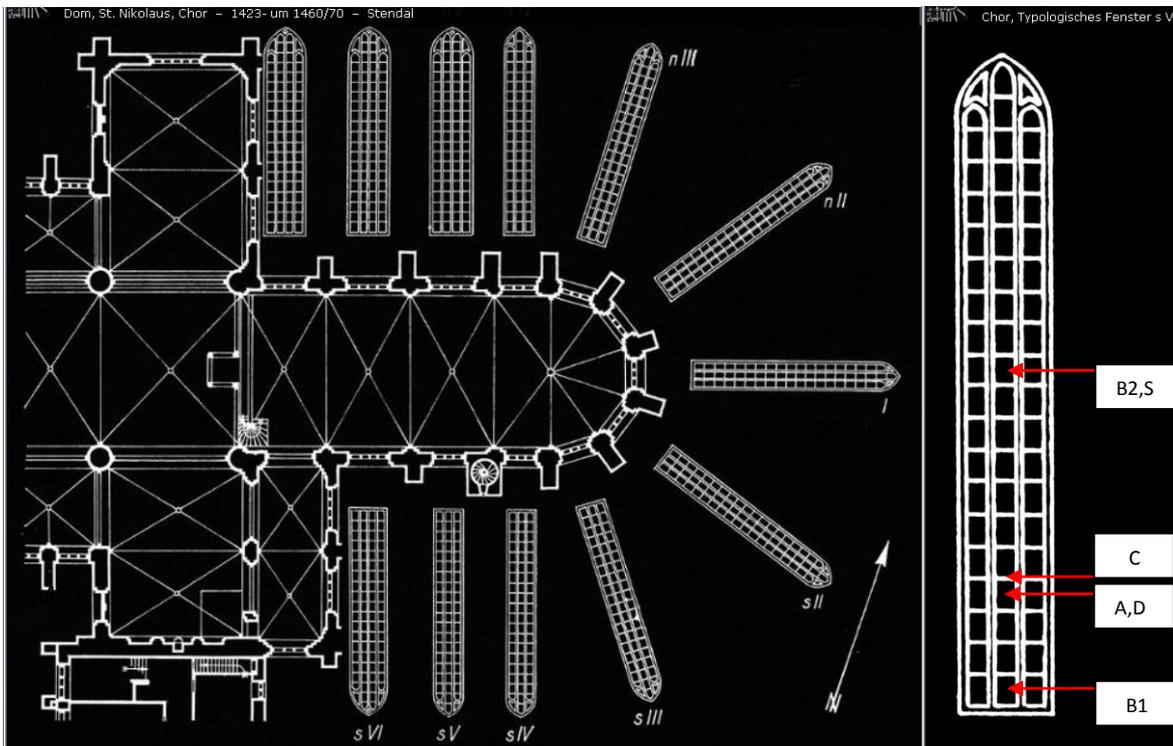


Abb. 30: Stendal Dom St. Nikolaus, Chor, Meßstellen am Fenster sV;
Foto: CVMA Deutschland/Potsdam/9/

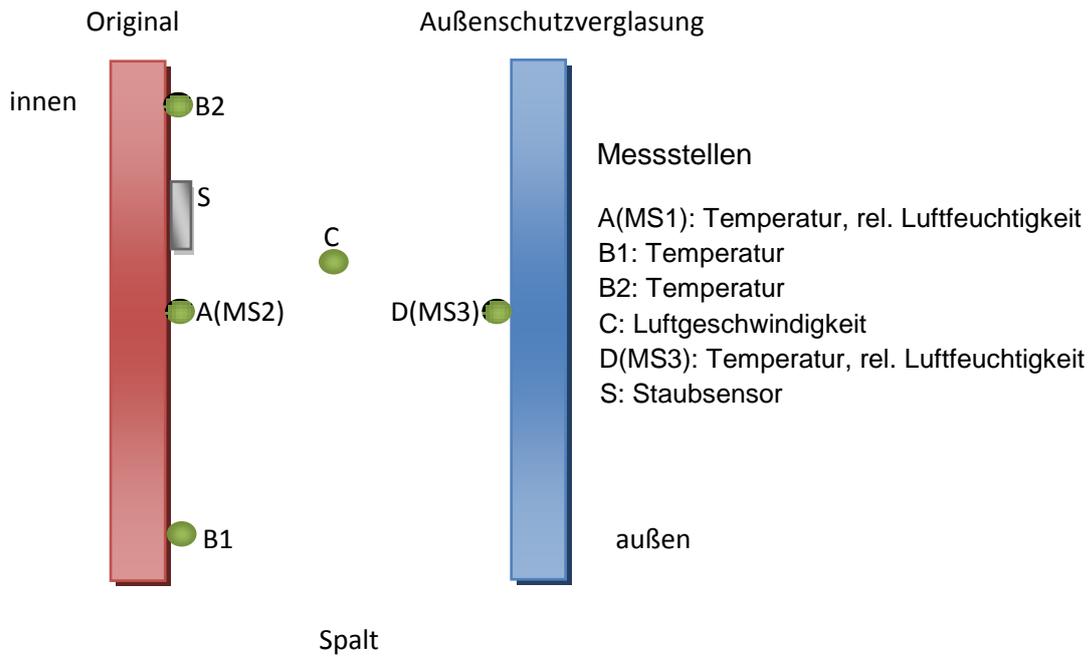


Abb. 31: Anordnung der Messteellen

Anmerkungen zum Objekt:

Die Glasmalereien entstanden etwa 1445-1450. „Das Fenster umfasst 3 Bahnen und 20 Zeilen. Auf den einzelnen Bahnen befinden sich Darstellungen aus dem Neuen und Alten Testament, die jeweils 2 Zeilen hoch sind. Neun Bildstreifen mit jeweils drei typologischen Szenen füllen heute das Fenster.

In 29 Feldern ist der Bestand original, in 12c sind nur einige Scherben alt. Fast alle Ergänzungen stammen vom Berliner Institut für Glasmalerei, das 1896-1898 mit der Neuordnung auch eine Veränderung der ursprünglichen Fensterkomposition von vier auf drei Bahnen vor nahm. Im Jahr 1959 wurde das Fenster nach Auslagerung im Krieg und begrenzter Instandsetzung wieder eingesetzt /9/

Die neue, gegenwärtige Schutzverglasung wurde 1994 installiert. Das Fenster besteht aus drei Bahnen, zwanzig Zeilen und dem Maßwerk. Die Größe der einzelnen Felder beträgt 0,71 x 0,55 m, das gesamte Fenster hat die Maße 14,25 x 2,60? (1,90) m /10/.

Stendaler Dom - Messergebnisse

Die Auswertung der Klimamessungen im Stendaler Dom am Fenster sV erfolgte für den Zeitraum vom 04.11.2009 - 01.11.2010. Das Südfenster hat eine Höhe von ca. 14 m, die Breite des gesamten Fensters beträgt ca. 1,90 m bei einer Feldbreite von etwa 55 cm. Die lichte Öffnung zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt minimal 6 cm. Die Öffnung am unteren Fensterspalt beträgt etwa 3 cm. Die Größe der Öffnung an der Spitze des Maßwerkfeldes konnte aufgrund der Höhe des Fensters nicht bestimmt werden. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas in Rechteckverglasung. Veränderungen im optischen Erscheinungsbild der Außenschutzverglasung wurden in geringem Maße festgestellt und während der Installation der Messtechnik dokumentiert.

Die Klimamesswerte wurden monatlich ausgelesen. Charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit sind berechnet worden. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 3: Extremwerte der Temperatur und Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum

Monat	11/09	12	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10/11
Temperatur Original MS2 [°C]												
Min	6,3	-6,7	-7,7	-3,1	-0,8	5,2	7,8	12,5	17,9	16,4	11,1	6,3
Max	32,0	28,0	26,4	30,7	36,2	37,5	33,2	39,0	42,2	42,0	42,1	39,8
relative Luftfeuchtigkeit MS2 [%]												
Min	19,5	21,7	16,2	13,2	11,9	13,2	18,2	21,1	19,5	20,1	16,0	15,7
Max	88,5	91,0	88,9	88,2	89,8	87,3	86,3	85,5	71,8	83,9	87,7	85,6
Temperatur Schutzverglasung MS3 [°C]												
Min	5,2	-9,2	-9,6	-4,4	-2,1	3,7	6,2	12,0	16,5	15,5	10,2	5,4
Max	25,3	21,7	18,6	22,4	31,1	33,3	31,7	40,2	43,3	40,3	38,8	35,2
relative Luftfeuchtigkeit MS3 [%]												
Min	28,1	32,0	24,9	20,9	19,0	16,3	22,3	19,2	19,3	21,2	19,1	20,1
Max	92,1	94,5	97,9	92,8	93,5	92,9	90,6	92,2	79,2	90,1	93,3	92,6

Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

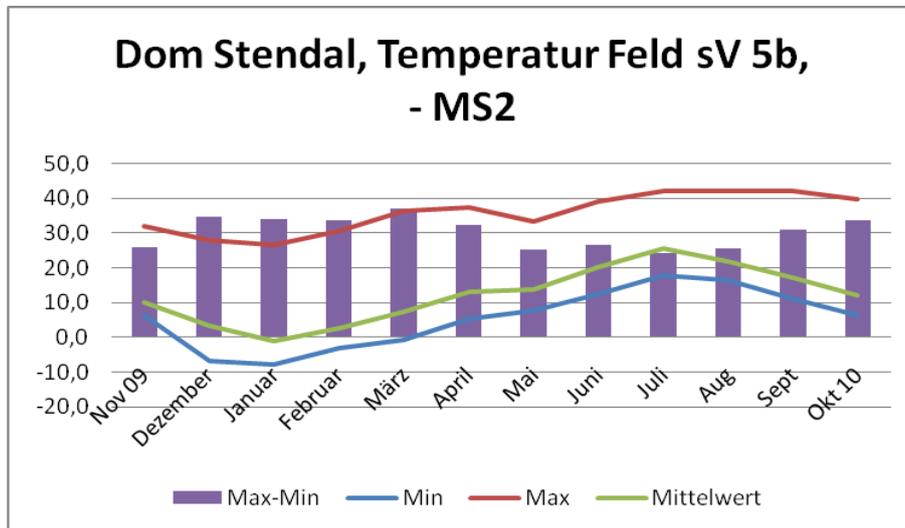


Abb. 32: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die maximalen Temperaturen an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sV 5b betragen in den Monaten Juli, August, September jeweils mehr als 40 °C. Im Juli wurden 42,2 °C als Maximum erreicht. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -7,7 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich innerhalb eines Monats betrug in März 37 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass an diesem Fenster immer mit kurzzeitigen Temperaturspitzen zu rechnen ist.

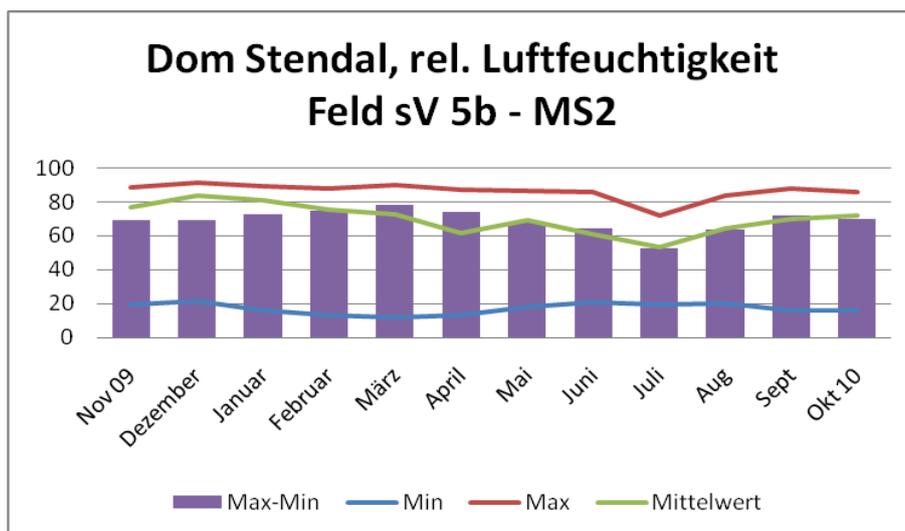


Abb. 33: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen mit Ausnahme der Monate Juli und August stets nahe 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sV 5b betrug im Dezember 91,0 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im März bei 11,9 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen in einem Monat wurden ebenfalls im März mit Δ r. F. = 77,9 % berechnet. Die Mittelwertskurve zeigt, dass an der Originalverglasung höhere Feuchtwerte häufiger auftreten als die Feuchtigkeitsminima.

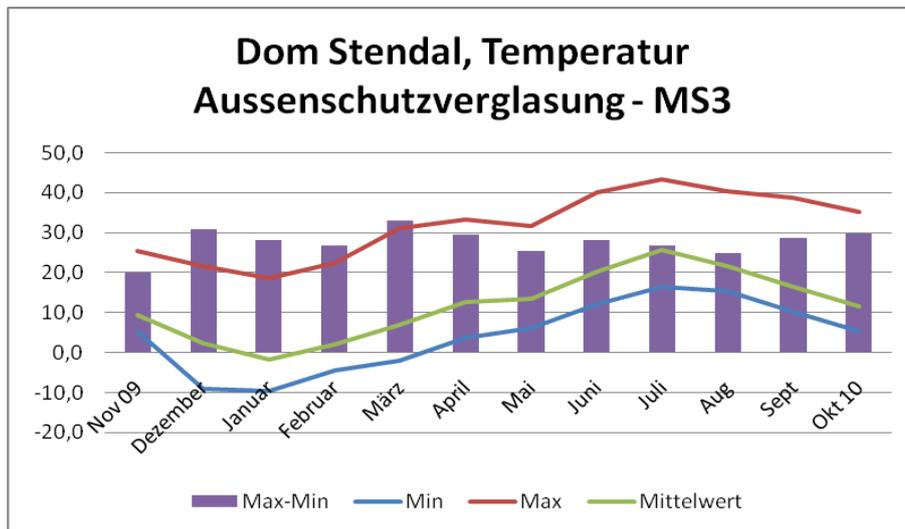


Abb. 34: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sV 5b betrug im Juli 43,3 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -9,6 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 33,1 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es aufgrund der Ausrichtung des Fensters nach Süden zu kurzzeitigen Temperaturspitzen kommt.

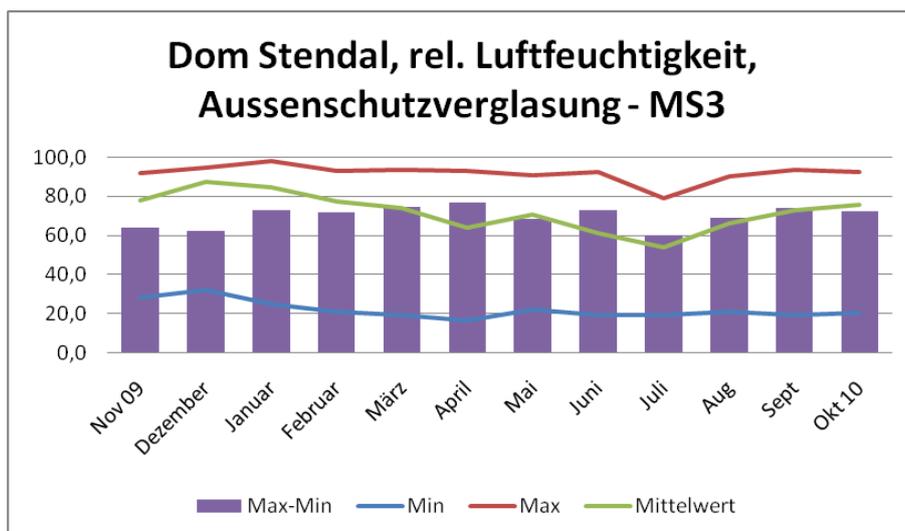


Abb. 35: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sV 5b betrug im Januar 97,9 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im April bei 16,3 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im April mit Δ r. F. = 76,6 % festgesellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten als minimale Werte.

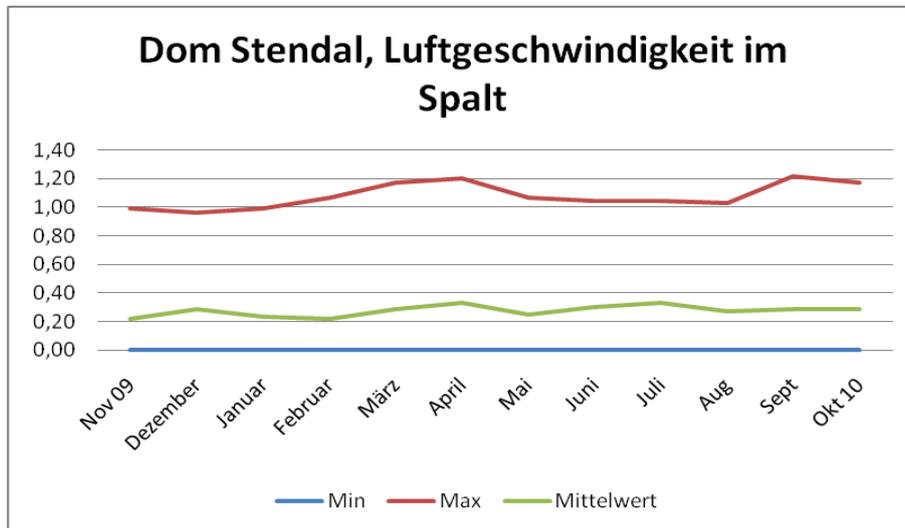


Abb. 36: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld sV 5b betrug im Dezember 1,21 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass auch hier die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es sich bei den Maximalwerten um kurzzeitige Spitzen handelt.

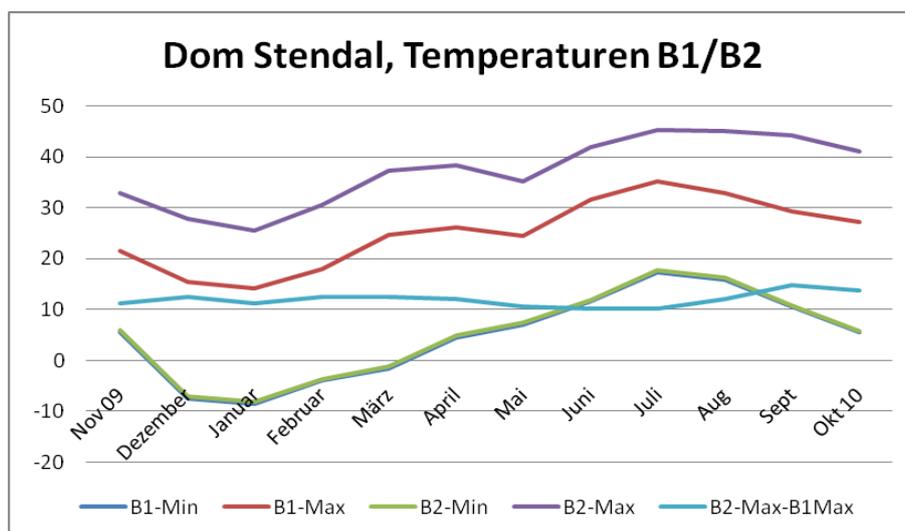


Abb. 37: Temperaturextrema und –differenzen an der Innenseite der Außenschutzverglasung in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) im Messzeitraum.

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Innenseite der Außenschutzverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf MS2 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich zu allen Jahreszeiten deutlich stärker als die Felder der ersten Reihe. Temperaturunterschiede in der Maximaltemperatur zwischen unten (B1) und oben (B2) sind im gesamten Jahresverlauf messbar. Die Minimaltemperatur dieser Messstellen ist jedoch nahezu identisch.

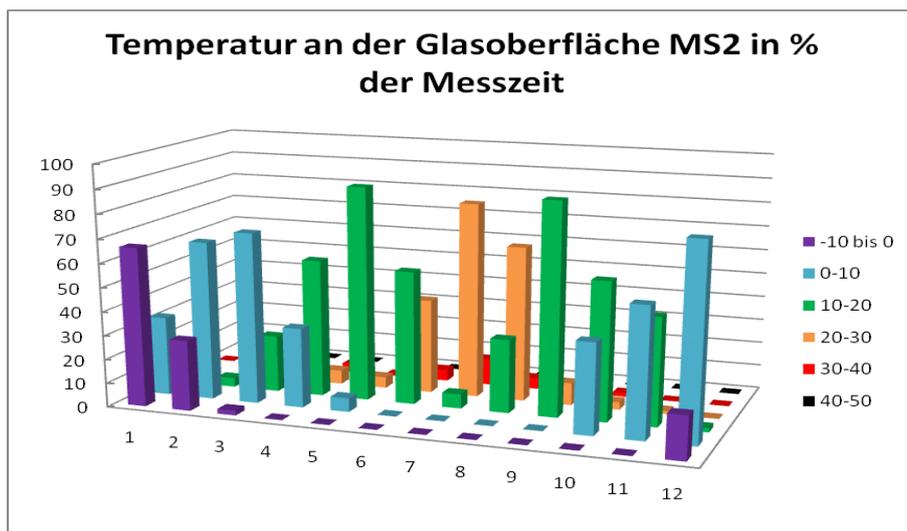


Abb. 38: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Maximalwerte der Temperatur im Bereich zwischen 40 und 50 °C an der Originalverglasung wurden zu 1,4 % der Messzeit im Juli registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten April bis Oktober liegen zwischen 10 und 30 °C. Im Januar lag die Temperatur zu 2/3 der Messzeit zwischen 0 und -10 °C.

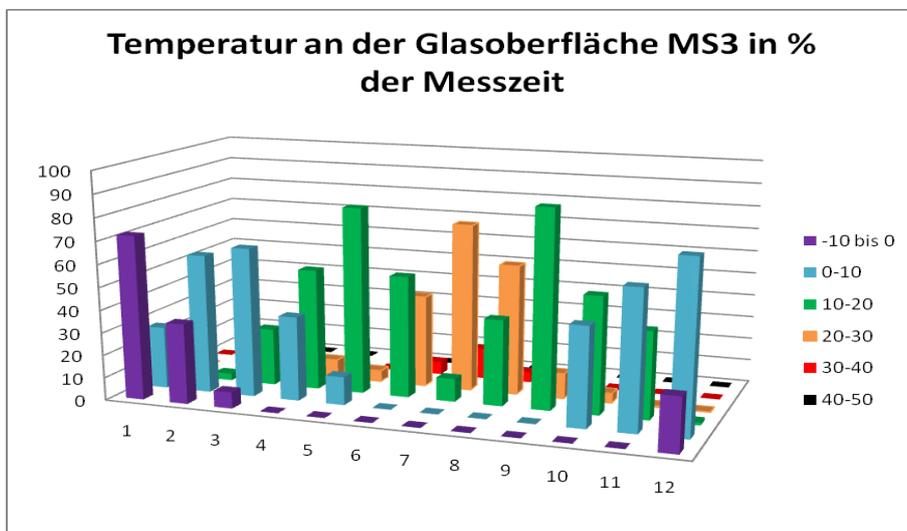


Abb. 39: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Temperaturbereiche an den Original – und Außenschutzverglasung stimmen völlig überein. Die Dauer der extremen Temperaturereignisse ist an der Außenschutzverglasung jedoch etwas länger. Es wird deutlich, dass die Temperaturverteilung der Originalverglasung ausschließlich durch die Außentemperatur bestimmt wird.

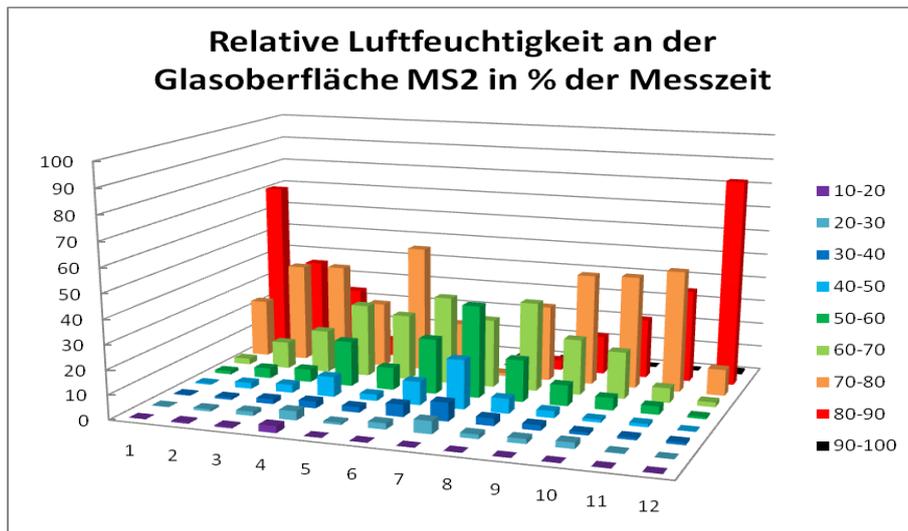


Abb. 40: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90 % ist zu mehr als 4/5 der Messzeit im Dezember und 2/3 der Messzeit im Januar ermittelt worden. Im Februar und November wurde dieser Feuchtebereich zu mehr als 1/3 der Messzeit registriert. Werte von deutlich über 90 % r. F. wurde im Dezember für ca. 1% der Messzeit erreicht. Die Bereiche der relativen Luftfeuchtigkeit in den Monaten April bis Oktober können als unkritisch angesehen werden.

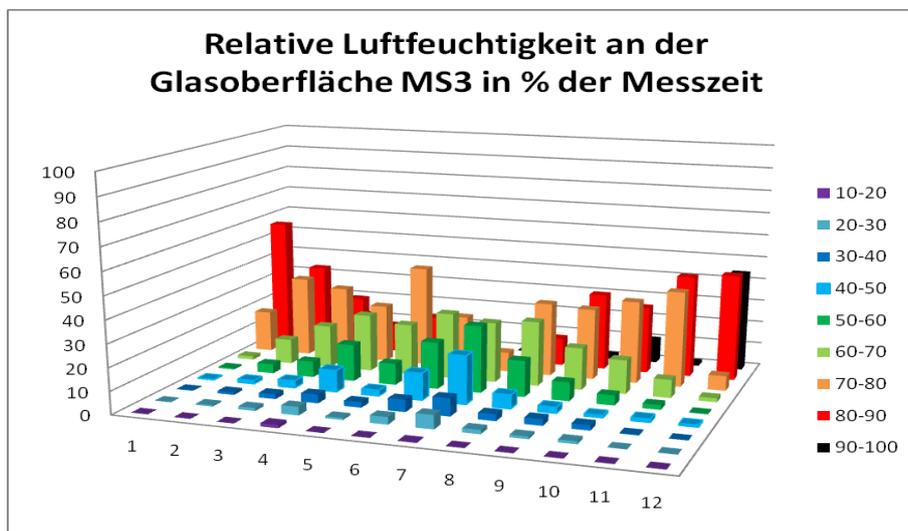


Abb. 41: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung ist höher als die an der Originalscheibe. Eine relative Luftfeuchtigkeit zwischen 90 und 100 % r. F. tritt in allen Monaten mit Ausnahme von Juli und August auf. Diese Feuchtwerte werden zu mehr als 2/5 der Messzeit im Dezember und etwa 1/5 der Zeit im Januar erreicht. In diesen Monaten ist

mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung zu rechnen.

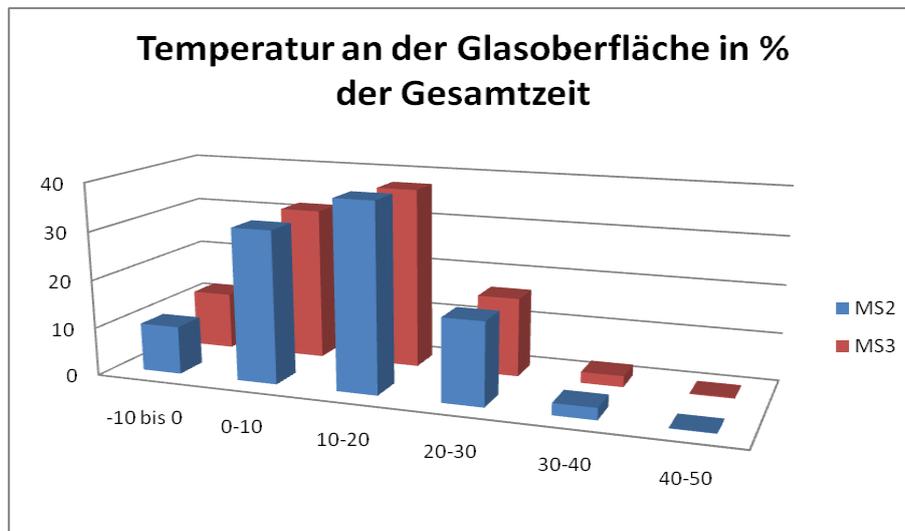


Abb. 42: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die Temperaturen an der Originalverglasung erreichen in den Wintermonaten Werte von 0 bis -10 °C. Im übrigen Jahresdurchschnitt liegen sie in zwischen 0-30 °C und zu 2,4 % der Messzeit oberhalb von 30-40 °C. An heißen Sommertagen wurden zu 0,1 % der Messzeit an diesem Südfenster Temperaturen von 40 °C überschritten. Der Temperaturverlauf an der Außenschutzverglasung ist nahezu identisch. Die Scheiben erreichen in den Wintermonaten Temperaturen im Bereich von 0 bis -10 °C und können sich im Sommer zu 0,2 % der Messzeit auf Werte zwischen 40 und 50 °C aufheizen.

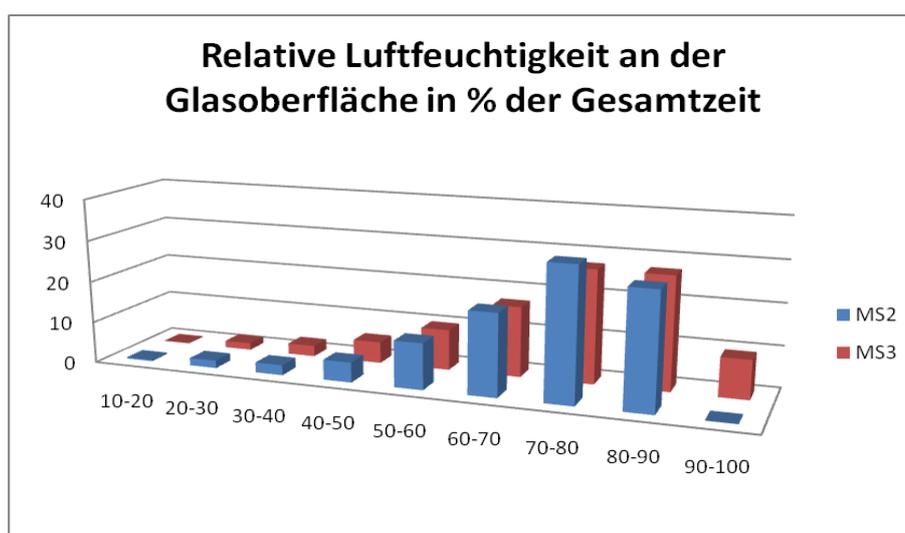


Abb. 43: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung liegt zu mehr als der 30% der Messzeit in einem Bereich zwischen 70 und 80 % r.F. Zu etwa 27 % der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 80 und 90%. Sie erreicht jedoch nur zu 0,1 % der Gesamtmesszeit einen Wert von über 90 % r. F. Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. An der Außenschutzverglasung ist die relative Luftfeuchte zu knapp 1/3 der Messzeit höher als 80 % r. F. und zu etwa 9 % der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 90 und 100% r. F. Tauwasserbildung wurde am Stendaler Dom nicht beobachtet. Auch hier waren die Temperatur/Feuchtefühler aufgrund ihrer Bauart ca. 5 mm von der Glasoberfläche entfernt. Legt man wiederum die bei der Tauwasserbildung im Havelberger Dom gemessenen Temperatur und Feuchtwerte zu Grunde, so lassen sich bei einer Temperaturdifferenz von 1,2 K zwischen Temperatur und Taupunkttemperatur und einem Wert der relativen Feuchte von >92.5 % aus den Messwerten 30 Tagen berechnen, an denen die gleiche klimatische Situation vorlag und ebenfalls mit Tauwasserbildung zu rechnen ist. Verändert man die Grenzen auf $\Delta T=1,3$ und r. F. = 93 %, so ergeben sich 70 Tage an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Betauung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung vorlag. Charakteristische Monatsverläufe der Klimadiagramme für jeweils einen Sommer- und einen Wintermonat befinden sich im Anhang.

Kloster Marienstern, Panschwitz-Kuckau – Anordnung der Messtechnik

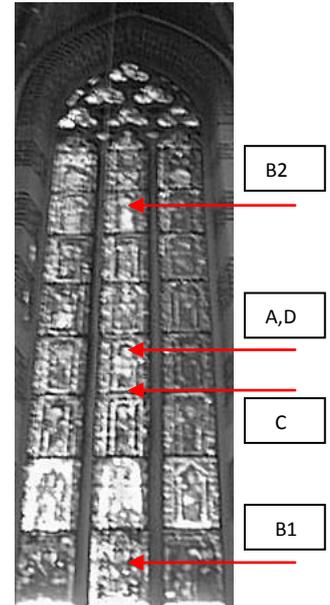
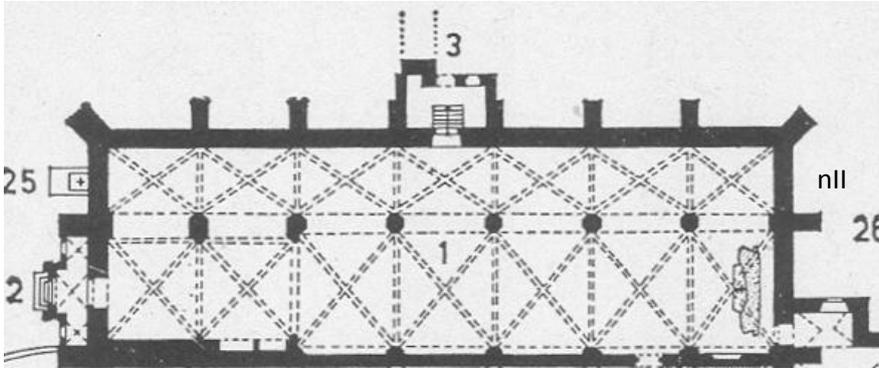


Abb. 44: Kloster Marienstern, Messstellen am Hussitenfenster nll/11/

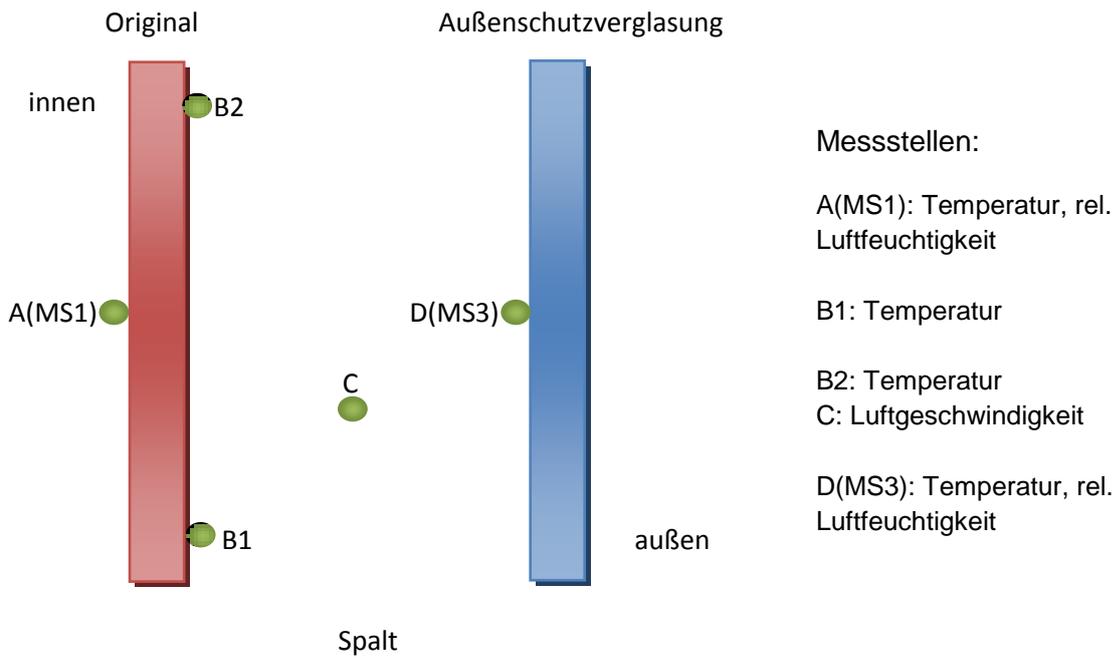


Abb. 45: Anordnung der Messstellen

Anmerkung:

Die Glasmalereien entstanden zwischen 1370 und 1390, sie wurden während mehrerer Restaurierungen teilweise ergänzt und neu geordnet (1888, 1911) /11/.

Seit vielen Jahrzehnten zeigten sie eine ungewöhnlich starke Verbräunung, die alle Farben und Zeichnungen selbst im hellen Durchlicht nicht mehr erkennen ließen. Nach werkstoffwissenschaftlichen Untersuchungen in den Jahren 1981-1983 wurden sie in einem neu entwickelten Verfahren mittels einer Hydrazin-/Ameisensäurebehandlung von der starken Manganverbräunung befreit (außer Testfeld 1c). Der Wiedereinbau erfolgte 1985, wobei auch eine innenbelüftete Außenschutzverglasung installiert wurde. 1991 erfolgte die Aufhellung des Testfeldes 1c mit Hydrazin bei unterschiedlichen Varianten der Nachbehandlung mit Ameisensäure sowie verschiedenen Lack-Beschichtungen zu Testzwecken. Eine eingehende Kontrolle der Konservierungsmaßnahmen wurde durch Laboruntersuchungen 2001/2002 vorgenommen. Nach 15 Jahren Exposition im Fenster war keine Neukorrosion der Glasmalereien feststellbar. Die nicht auszuschließende Wiederverbräunung durch in den Gelschichten verbliebenes Mangan betrug maximal 10 % /12/. Die Fenstermaße betragen ca. 8 x 2 m.

Kloster Marienstern – Panschwitz-Kuckau - Messergebnisse

Die Klimamessungen im Kloster Marienstern am Fenster nll erfolgten im Zeitraum vom 09.09.2009 - 09.09.2010. Das Hussitenfenster nll hat eine Höhe von ca. 8 m, die Breite des gesamten Fensters beträgt ca. 2 m bei einer Feldbreite von etwa 60 cm. Die lichte Öffnung zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt minimal 8,5 cm. Die Öffnung am unteren Fensterspalt beträgt etwa 4 cm. Die Öffnungen an der Spitze des Maßwerkfeldes sind sichtbar und wurden auf 1-2 cm geschätzt, konnten jedoch aufgrund der Höhe des Fensters nicht exakt bestimmt werden. Die Außenschutzverglasung besteht nicht aus Verbundsicherheitsglas, sondern aus einer einfachen Rechteckverglasung. Veränderungen im optischen Erscheinungsbild der Außenschutzverglasung wurden nicht festgestellt. Die Kirche wird im Winter beheizt.

Die Klimamesswerte wurden monatlich ausgelesen. Charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit sind berechnet worden. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 4: Extremwerte der Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum

Monat	09/09	10	11	12	01	02	03	04	05	06	07	08/11
Temperatur Original MS1 [°C]												
Min	15,0	7,9	8,4	2,6	1,4	3,3	4,7	9,4	12,5	13,0	19,1	18,0
Max	36,5	31,4	15,6	13,1	9,5	23,4	30,0	33,6	34,6	38,3	37,3	36,5
relative Luftfeuchtigkeit MS1 [%]												
Min	24,9	28,2	65,0	71,6	65,2	31,9	26,2	22,8	24,2	22,9	29,4	33,9
Max	82,4	88,2	89,6	89,5	89,0	87,0	85,8	85,8	84,5	88,4	76,3	82,4
Temperatur Schutzverglasung MS3 [°C]												
Min	11,2	3,4	4,7	-6,1	-7,2	-3,9	-1,0	5,0	9,4	10,1	16,3	15,2
Max	41,1	35,0	16,3	11,7	8,0	27,3	35,8	39,8	39,6	46,3	49,0	46,1
relative Luftfeuchtigkeit MS3[%]												
Min	20,9	24,3	66,8	90,4	88,8	26,6	20,9	18,4	20,9	17,9	19,0	21,2
Max	94,1	95,7	97,3	98,8	97,6	97,6	96,2	96,1	96,2	95,8	88,8	92,0

Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

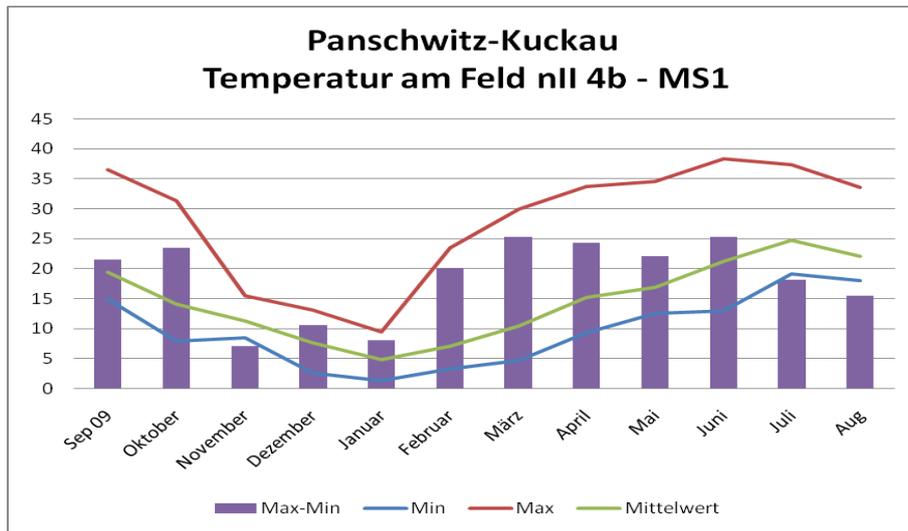


Abb. 46: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nII 4b betrug im Juni 38,3 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei 1,4 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich innerhalb eines Monats betrug im März 25,3 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass an diesem Fenster bis auf die Monate November bis Januar immer mit kurzzeitigen Temperaturspitzen zu rechnen ist.

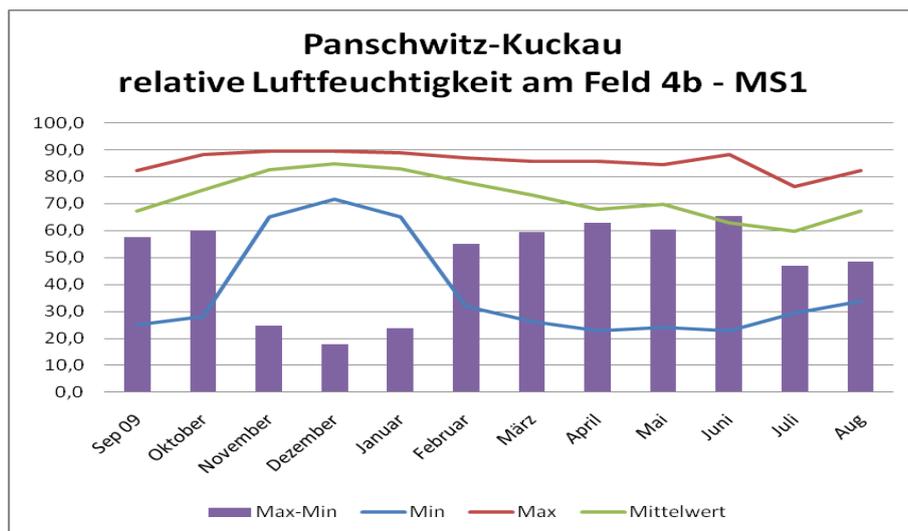


Abb. 47: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten November bis Februar nahe 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nII 4b betrug im November 89,6 % r. F., auch in den Sommermonaten wurden Feuchtigkeitsspitzen bis 88,4 % r. F. (Juni) an dieser Messstelle registriert. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit betrug im April 22,8 % r. F. an derselben Messstelle. In den Monaten November bis Januar fiel der Wert nicht unter 60 % r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen in einem Monat wurden im Juni mit Δ r. F. = 65,5 % berechnet. Die Mittelwertskurve zeigt, dass an der Originalverglasung höhere Feuchtwerte häufiger auftreten als die Feuchtigkeitsminima.

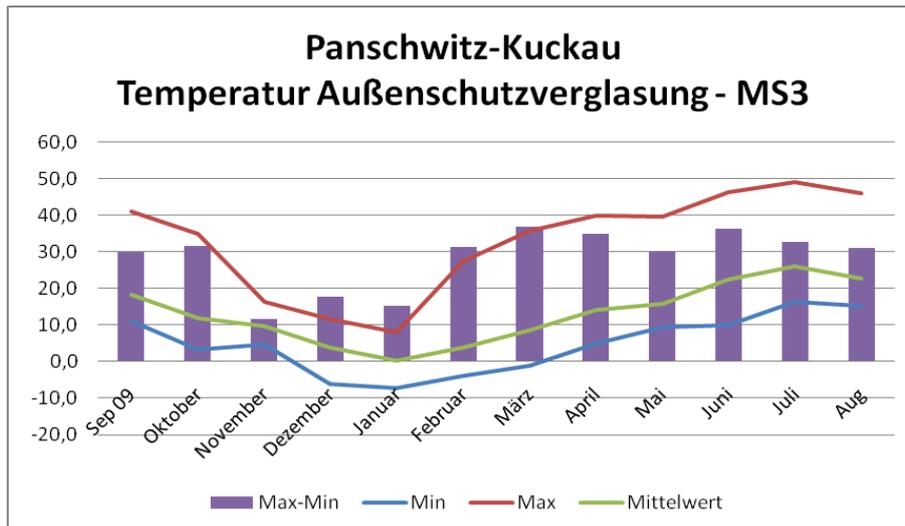


Abb. 48: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nII 4b betrug im Juli 49,0 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -7,2 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 36,8 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es aufgrund der Ausrichtung des Fensters nach Osten in den Monaten Februar bis Oktober zu kurzzeitigen Temperaturspitzen kommt.

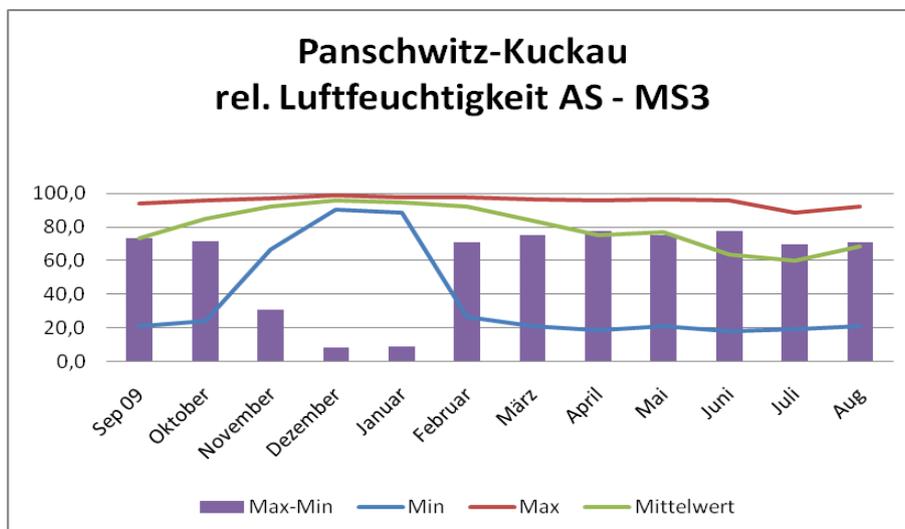


Abb. 49: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nII 4b betrug in allen Monaten mit Ausnahme von Juli nahe bzw. über 95 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 17,9 % r. F. an derselben Messstelle. In den Monaten Dezember und Januar lag der Minimalwert immer noch nahe 95% r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Juni mit Δ r. F. = 76,6 % festgesellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten als minimale Werte.

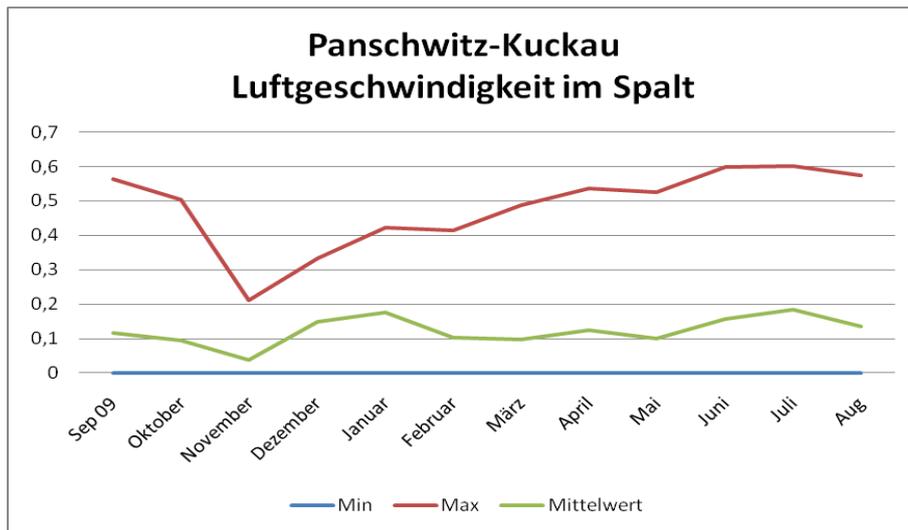


Abb. 50: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld nII 4b betrug im Dezember 0,6 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass auch hier die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es sich bei den Maximalwerten um kurzzeitige Spitzen handelt.

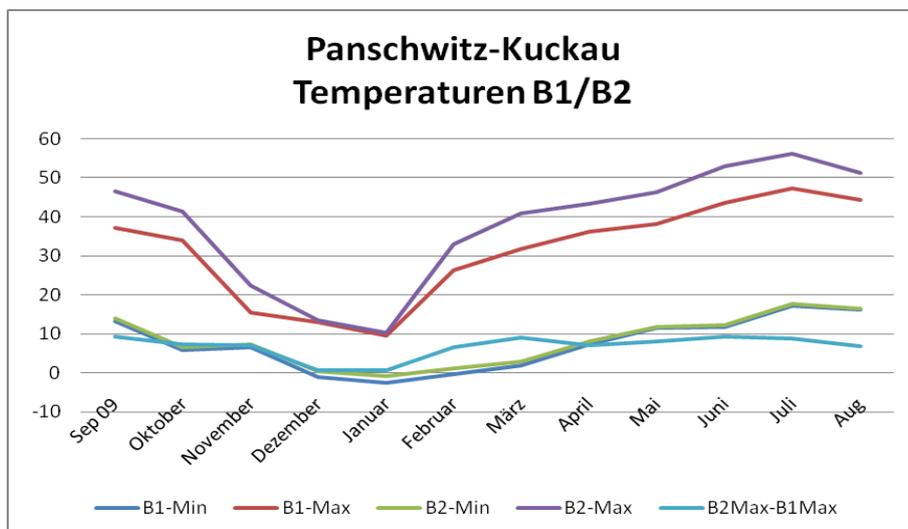


Abb. 51: Temperaturextrema und –differenzen an der Innenseite der Außenschutzverglasung in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) im Messzeitraum.

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Innenseite der Originalverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf MS1 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich in allen Monaten mit Ausnahme von Dezember und Januar deutlich stärker als die Felder der ersten Reihe. Möglicherweise führen höhere Temperaturen auch zu größeren Luftgeschwindigkeiten im Spalt. Die Minimaltemperaturen dieser Messstellen sind nahezu identisch.

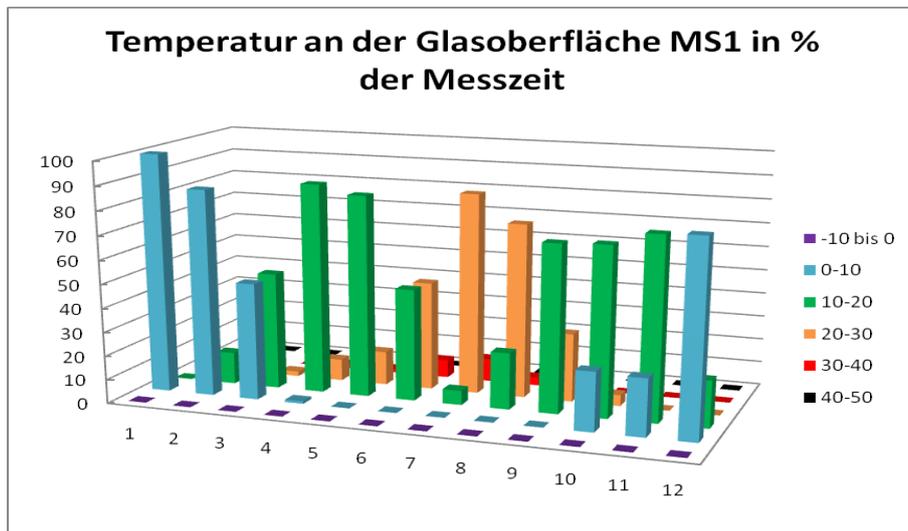


Abb. 52: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Maximalwerte der Temperatur liegen im Bereich zwischen 30 und 40 °C an der Originalverglasung und wurden zu etwa 10 % der Messzeit im Juli registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten April bis November liegen zwischen 10 und 20 °C. Nur im Juli und August wurden zu etwa 80% der Messzeit Temperaturen zwischen 20 und 30 °C an der Originalverglasung gemessen. Im den Monaten Dezember bis Februar lag die Temperatur zu mehr als 4/5 der Messzeit zwischen 0 und 10 °C.

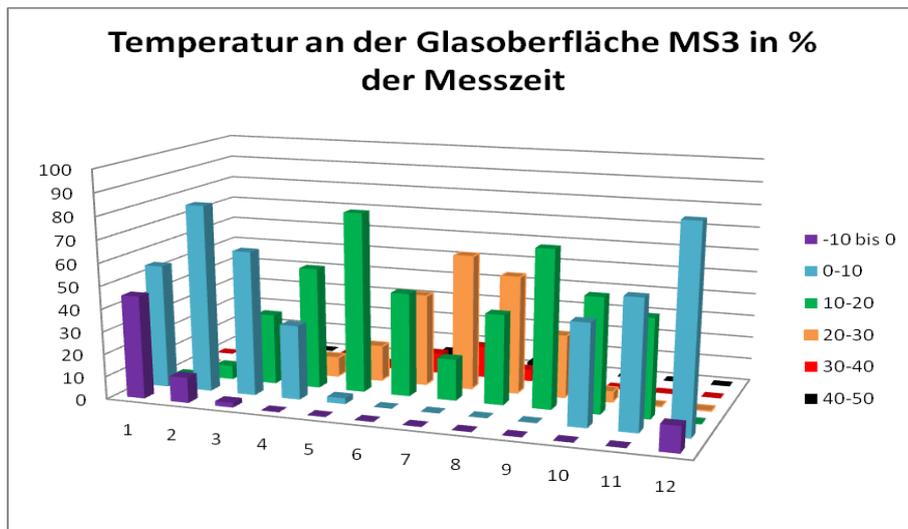


Abb. 53: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Temperaturverläufe an der Außenschutzverglasung zeigen tiefere Temperaturbereiche im Winter und höhere in den Sommermonaten als an der Originalverglasung. Im Juli wird der Temperaturbereich zwischen 40 und 50 °C zu etwa 8% der Messzeit registriert. Knapp die Hälfte der Messzeit im Januar lagen die Temperaturen zwischen -10 und 0 °C an der Innenseite der Außenschutzverglasung. Ein Einfluss der Kirchenheizung auf die Temperatur der Originalverglasung ist insofern erkennbar, als dass an der Originalverglasung im Winter keine negativen Temperaturen gemessen wurden.

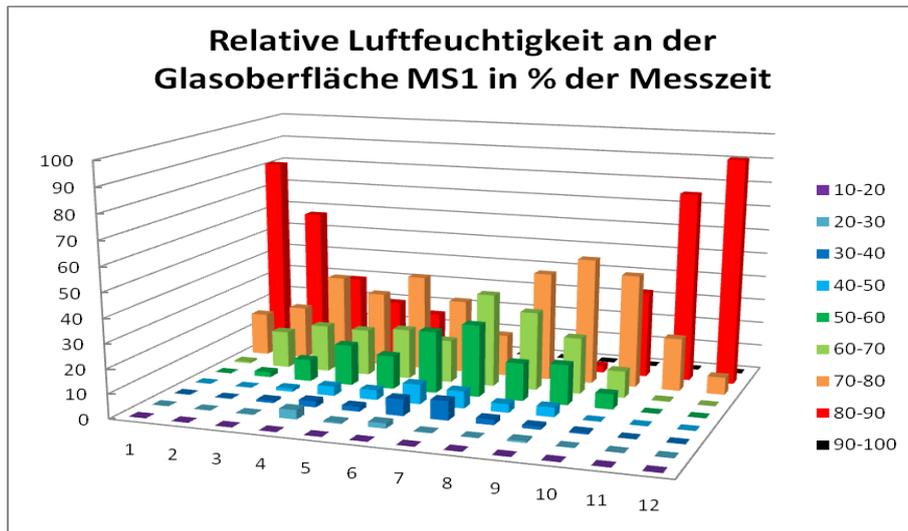


Abb. 54: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Eine maximale relative Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90 % ist zu mehr als 4/5 der Messzeit von November bis Januar und zu knapp 2/3 der Messzeit im Februar registriert worden. Der Bereich 90 bis 100% r. F. wurde nicht an der Originalverglasung gemessen. In den Monaten April bis Oktober überwiegen die relativen Luftfeuchtwerte in den Bereichen zwischen 60 bis 70 und 70 bis 80 % r. F.

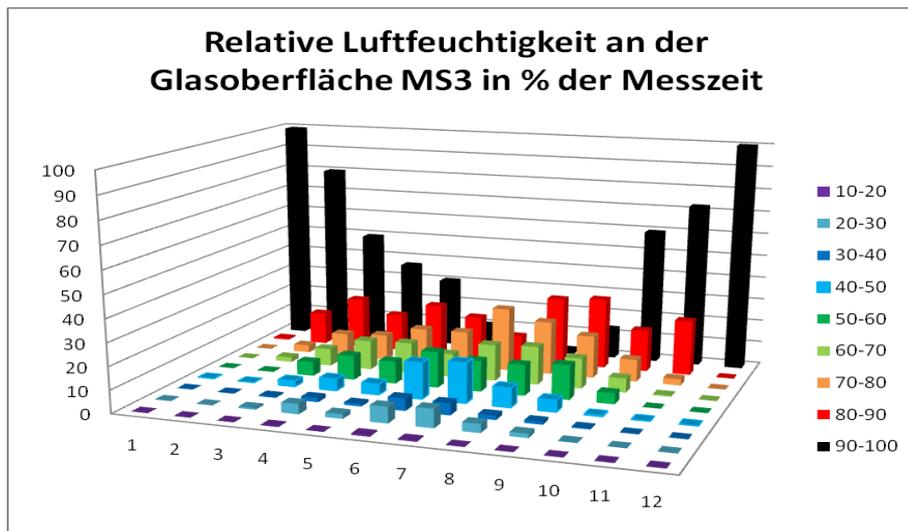


Abb. 55: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung ist höher als die an der Originalscheibe und erreicht Werte zwischen 90 und 100 % r. F. in allen Monaten mit Ausnahme von Juli. Diese Feuchtigkeitswerte werden zu mehr als 100% der Messzeit im Dezember und Januar, zu mehr als 2/3 im Februar und November und etwa der Hälfte der Messzeit im März und Oktober erreicht. In diesen Monaten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung zu rechnen.

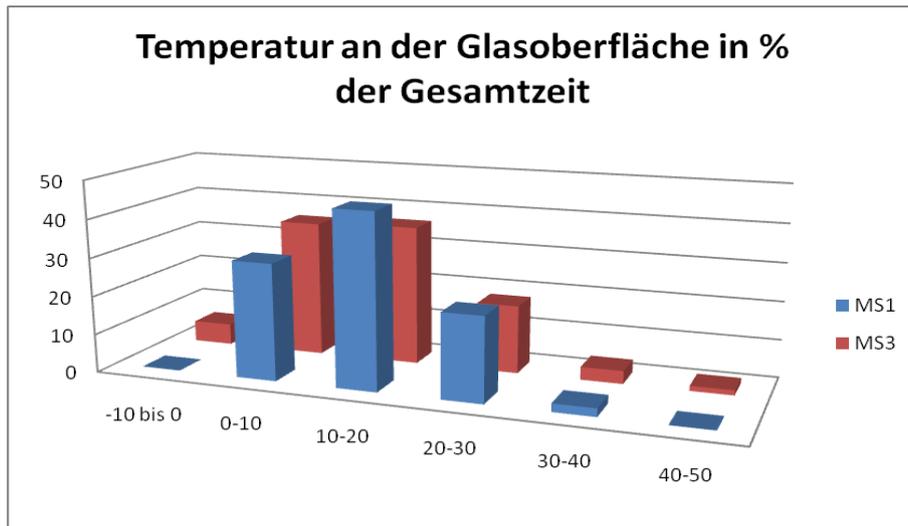


Abb. 56: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die Temperaturen an der Originalverglasung liegen überwiegend in einem moderaten Bereich zwischen 0 und 30 °C. Die Scheiben der Außenschutzverglasung erreichen in den Wintermonaten Temperaturen im Bereich von 0 bis -10 °C und können sich im Sommer auf Werte zwischen 40 und 50 °C aufheizen.

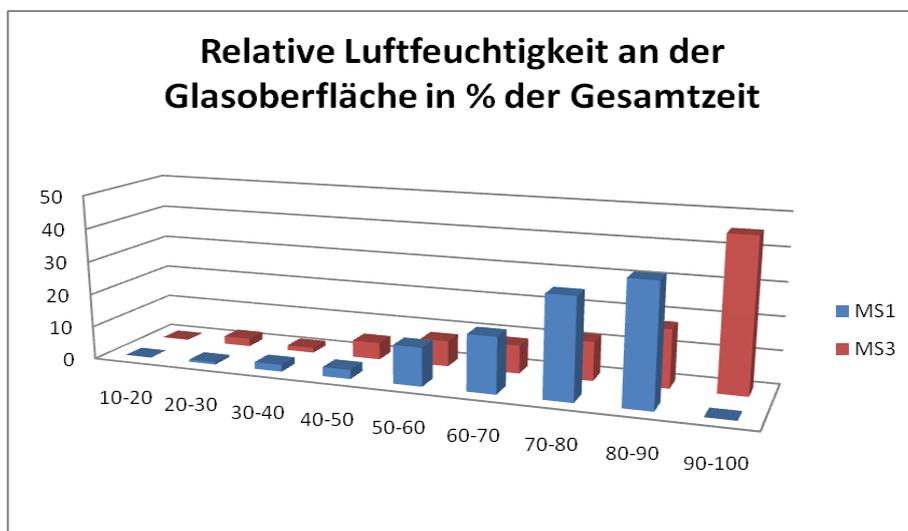


Abb. 57: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS2) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung liegt zu mehr als 1/3 der Messzeit in einem Bereich zwischen 80 und 90 % r.F., zu etwa 30 % der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 70 und 80%. Sie erreicht jedoch zu keinem Zeitpunkt Werte zwischen 90 und 100%. Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. An der Außenschutzverglasung ist die relative Luftfeuchte zu knapp der Hälfte der Messzeit höher als 90 % r. F. Eine

Taupunktunterschreitung wurde an der Außenschutzverglasung nicht registriert. Auch hier waren die Temperatur-/Feuchtefühler aufgrund ihrer Bauart ca. 5 mm von der Glasoberfläche entfernt. Legt man wiederum die bei der Tauwasserbildung im Havelberger Dom gemessenen Temperatur und Feuchtwerte zu Grunde, so lassen sich bei einer Temperaturdifferenz von 1,2 K zwischen Temperatur und Taupunkttemperatur und einem Wert der relativen Feuchte von >92.5 %, aus den Messwerten 221 Tagen berechnen, an denen die gleiche klimatische Situation vorlag und ebenfalls mit Tauwasserbildung zu rechnen ist. Verändert man die Grenzen auf $\Delta T=1,3$ und r. F. = 93 %, so ergeben sich 227 Tage an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Betauung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung vorlag. Charakteristische Monatsverläufe für jeweils einen Sommer- und einen Wintermonat befinden sich im Anhang.

Nikolaikirche Quedlinburg – Anordnung der Messtechnik

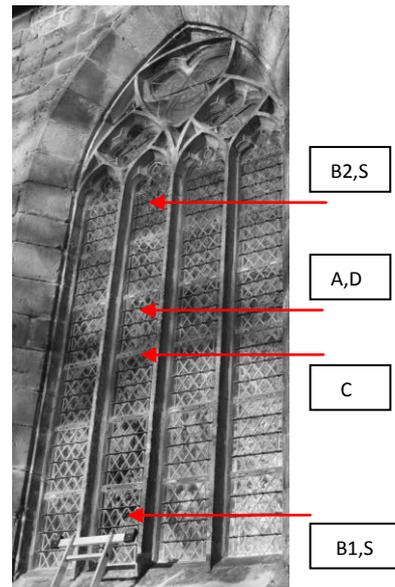
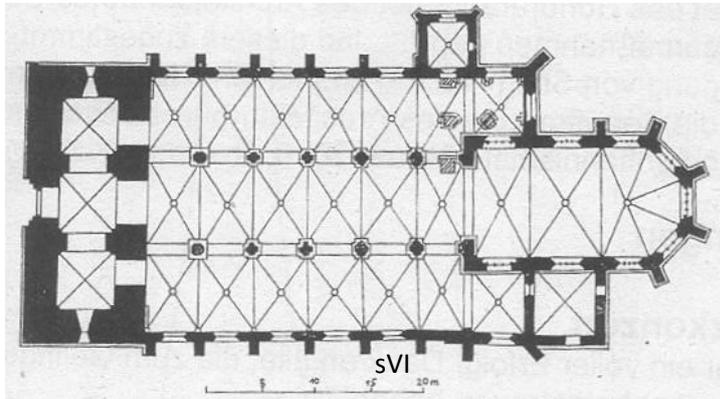


Abb. 58: Nikolaikirche Quedlinburg, Messstellen am Fenster sVI /13/ (Außenansicht)

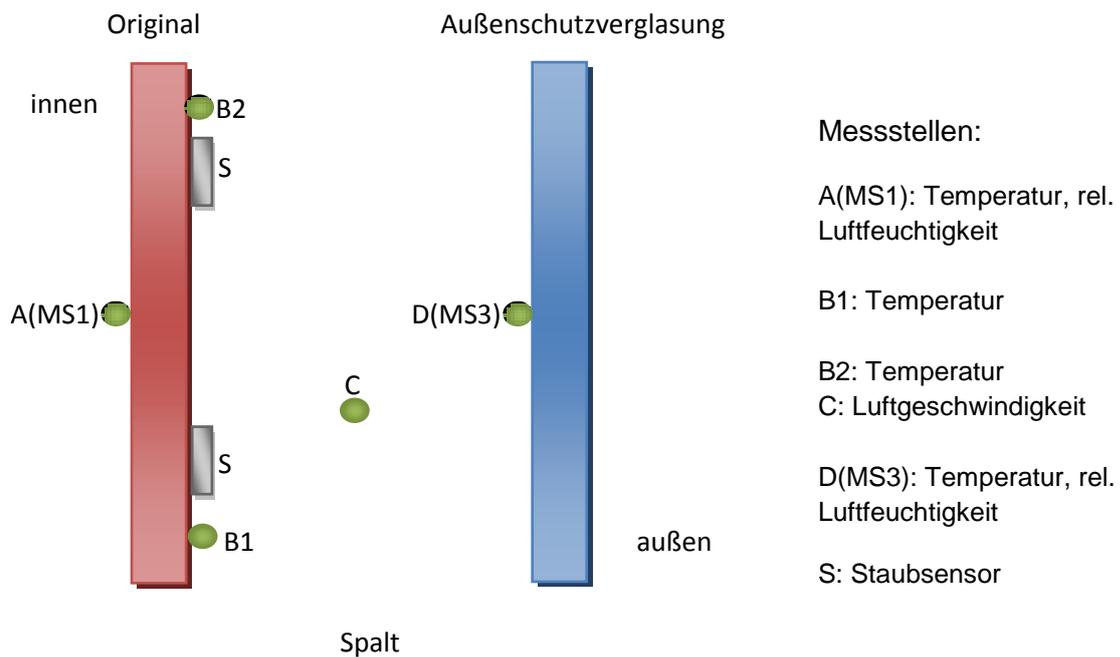


Abb. 59: Anordnung der Messstellen

Anmerkung:

Die Glasmalereien stammen aus dem 20. Jahrhundert. Der Einbau der Schutzverglasung erfolgte 1999. Die Breite des Fensters beträgt ca. 2,00 m (4x 42 cm +..), die Höhe ca. 3,80 m.

Nikolaikirche Quedlinburg - Messergebnisse

Die Klimamessungen in der Nikolaikirche Quedlinburg am Fenster sVI erfolgten im Zeitraum vom 19.11.2009 – 18.11.2010. Das Fenster sVI hat eine Höhe von ca. 3,80 m, die Breite des gesamten Fensters beträgt ca. 2,00 m bei einer Feldbreite von etwa 42 cm. Die lichte Öffnung zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt minimal 8 cm. Die Öffnung am unteren Fensterspalt beträgt etwa 1 cm. Die Öffnungen an der Spitze des Maßwerkfeldes sind durch Bleilappen verschlossen, die an das Mauerwerk anschließen. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas in einer Rautenverglasung. An der Außenschutzverglasung speziell dieses Fensters wurden starke Veränderungen im optischen Erscheinungsbild festgestellt. Die Kirche wird im Winter beheizt.

Die Klimamesswerte wurden monatlich ausgelesen. Charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit sind berechnet worden. Die Werte sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 5: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum

Monat	12/09	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11/11
Temperatur Original MS1 [°C]												
Min	6,2	6,5	3,5	7,3	11,3	12,5	14,4	19,9	18,5	14,1	10,5	10,7
Max	26,2	20,6	26,9	31,5	26,9	19,8	33,0	38,1	35,5	34,1	31,5	29,3
relative Luftfeuchtigkeit MS1 [%]												
Min	28,4	28,8	20,5	20,8	31,8	54,0	31,7	27,5	29,1	25,9	28,9	30,6
Max	79,4	67,3	67,2	70,4	69,1	74,1	75,5	69,6	74,3	76,4	78,3	80,2
Temperatur Schutzverglasung MS3 [°C]												
Min	-4,6	-4,4	-4,1	-1,2	6,8	8,6	12,0	16,4	15,4	10,7	6,5	7,2
Max	32,8	25,6	36,1	43,4	30,3	25,1	43,6	48,4	49,0	46,5	41,9	38,3
relative Luftfeuchtigkeit MS3[%]												
Min	21,5	41,6	13,0	12,2	24,1	42,7	19,1	17,1	15,6	14,3	17,6	21,0
Max	99,0	94,1	91,5	90,8	88,8	90,9	92,7	87,3	88,5	93,0	94,3	95,0

Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

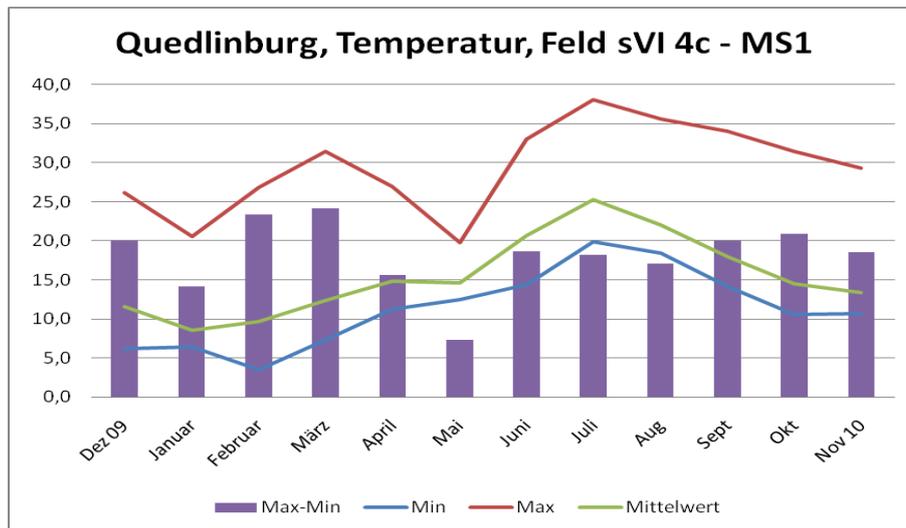


Abb. 60: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sVI 4c betrug im Juli 38,1 °C. Die minimale Temperatur lag im Februar an derselben Messstelle bei 3,5 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich innerhalb eines Monats betrug im März 24,2 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass an diesem Fenster bis auf den Monat Mai immer mit kurzzeitigen Temperaturspitzen zu rechnen ist.

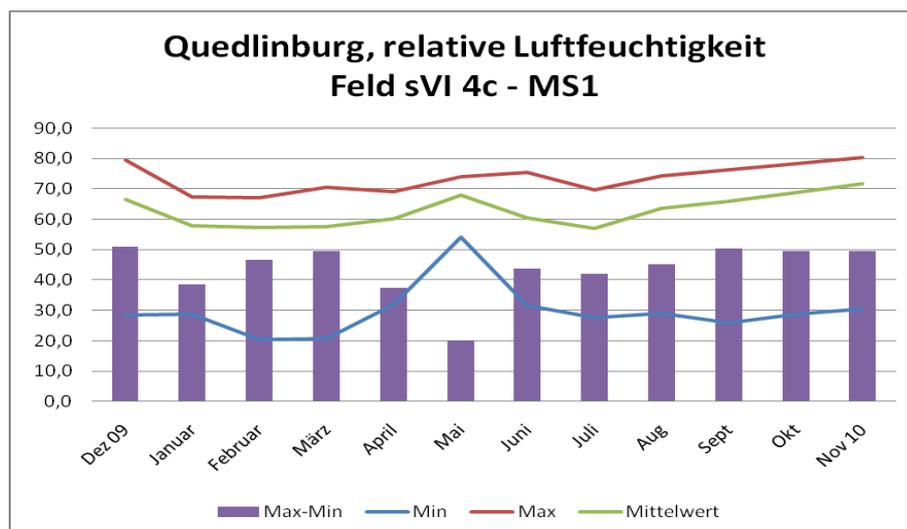


Abb. 61: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember und November nahe 80 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sVI 4c betrug im November 80,2 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit betrug im Februar 20,5 % r. F. an derselben Messstelle. Im Mai fiel der Wert nicht unter 50 % r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden in den Monaten September bis Dezember und im März mit etwa 50 % r. F. ermittelt. Die maximale Schwankung der relativen Luftfeuchtigkeit betrug im Dezember 51,0 % r. F. Die Mittelwertskurve zeigt, dass an der Originalverglasung höhere Feuchtwerte häufiger auftreten als die Feuchtigkeitsminima.

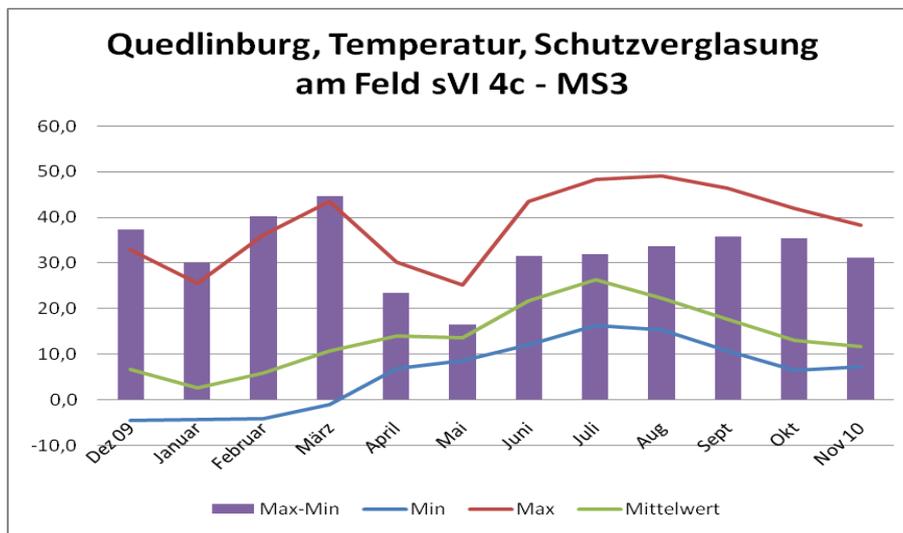


Abb. 62: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sVI 4c betrug im August 49,0 °C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei -4,6 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 46,6 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es aufgrund der Ausrichtung des Fensters nach Süden in allen Monaten bei Sonneneinstrahlung zu kurzzeitigen Temperaturspitzen kommt.

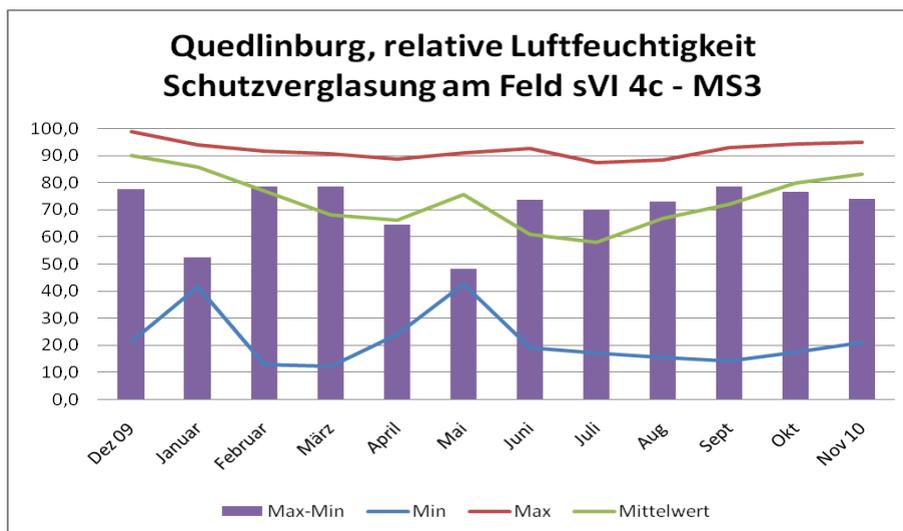


Abb. 63: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sVI 4c betrug im Dezember 99 % r. F. Sie lag in allen übrigen Monaten mit Ausnahme von Juli und August nahe bzw. über 90 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im März bei 12,2 r. F. an derselben Messstelle. An der Innenseite der Außenschutzverglasung traten relativ hohe Feuchtigkeitsschwankungen in den Monaten Juni bis Dezember und Februar bis März auf. Die maximale Feuchteschwankung wurde im September mit Δ r. F. = 78,7 % festgesellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten als minimale Werte.

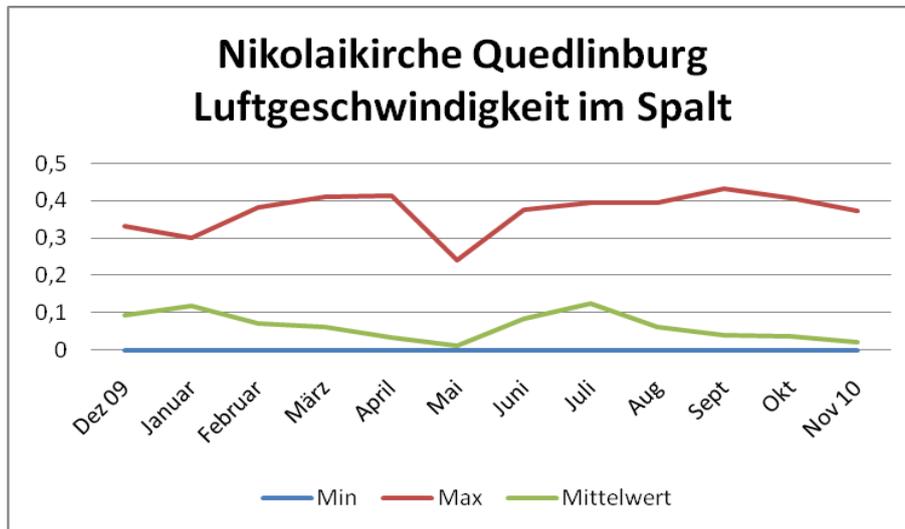


Abb. 64: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s]im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld sVI 4c betrug im Dezember 0,43 m/s, obwohl im Maßwerk dieses Fensters keine Spaltöffnung vorhanden war. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass auch hier die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass es sich bei den Maximalwerten um kurzzeitige Spitzen handelt.

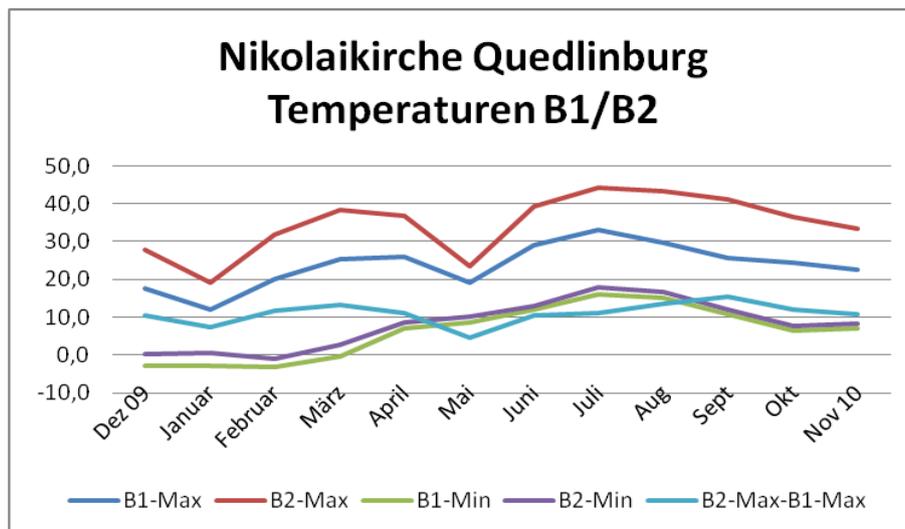


Abb. 65: Temperaturextrema und –differenzen an der Innenseite der Außenschutzverglasung in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) im Messzeitraum.

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Außenseite der Originalverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf MS1 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich in allen Monaten deutlich stärker als die Felder der ersten Reihe. Die Maximaltemperaturen und die Maximalwerte der Luftgeschwindigkeit im Spalt weisen Ähnlichkeiten in ihrem Verlauf auf. Höhere Temperaturen führen auch zu größeren Luftgeschwindigkeiten im Spalt. Die Minimaltemperaturen dieser Messstellen unterscheiden sich nur geringfügig.

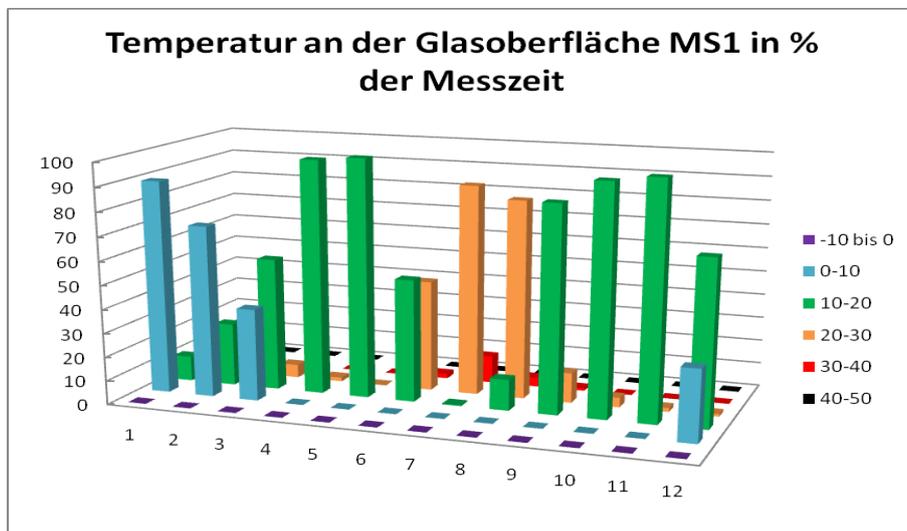


Abb. 66: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Maximalwerte der Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung liegen im Bereich zwischen 30 bis 40 °C und wurden zu etwa 10 % der Messzeit im Juli registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten März bis Juni und September bis Dezember liegen zwischen 10 und 20 °C. Nur im Juli und August wurden zu mehr als 80% der Messzeit Temperaturen zwischen 20 und 30 °C an der Originalverglasung gemessen. In den Monaten Januar und Februar lagen die Temperatur zu 89 % bzw. 72 % der Messzeit zwischen 0 und 10 °C.

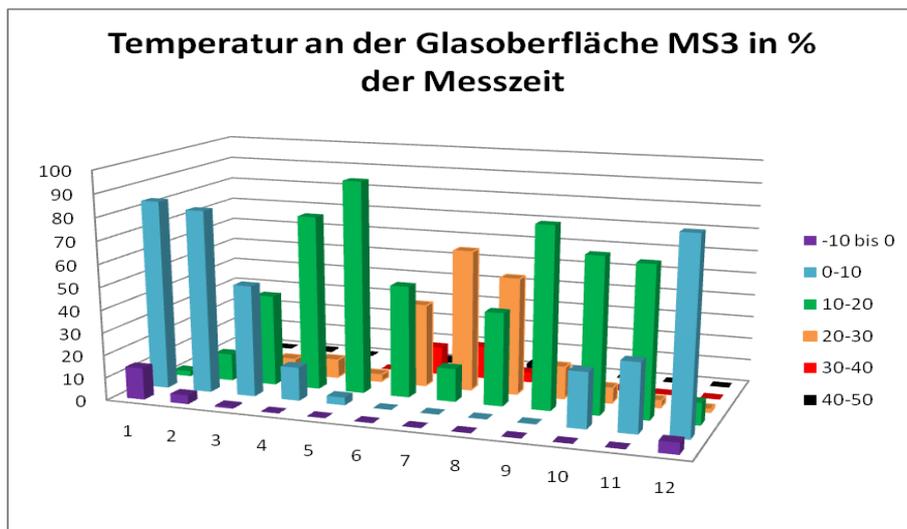


Abb. 67: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Temperaturverläufe an der Außenschutzverglasung zeigen tiefere Temperaturbereiche im Winter und höhere in den Sommermonaten als an der Originalverglasung. Im Juli wird der Temperaturbereich zwischen 40 und 50 °C zu etwa 8% der Messzeit registriert. An der Innenseite der Außenschutzverglasung lagen die Temperaturen zwischen -10 und 0 °C zu 14 % der Messzeit im Januar. Ein Einfluss der Kirchenheizung auf die Temperatur der Originalverglasung ist insofern erkennbar, als dass diese im Winter keine negativen Temperaturwerte erreicht.

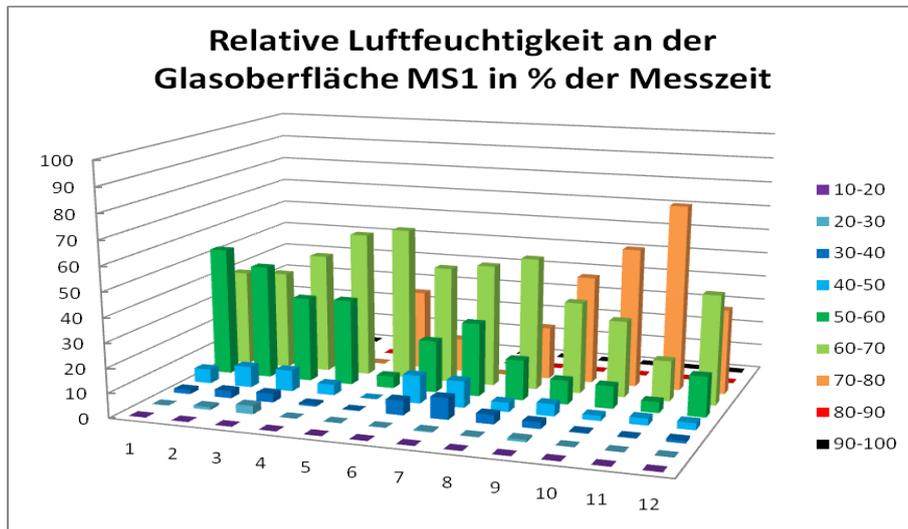


Abb. 68: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die maximale relative Luftfeuchtigkeit zwischen 70 und 80 % wurde in den Monaten August bis Dezember und Juni/Juli gemessen. In den Monaten März bis August überwiegen die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit in den Bereichen zwischen 60 bis 70 % r. F.

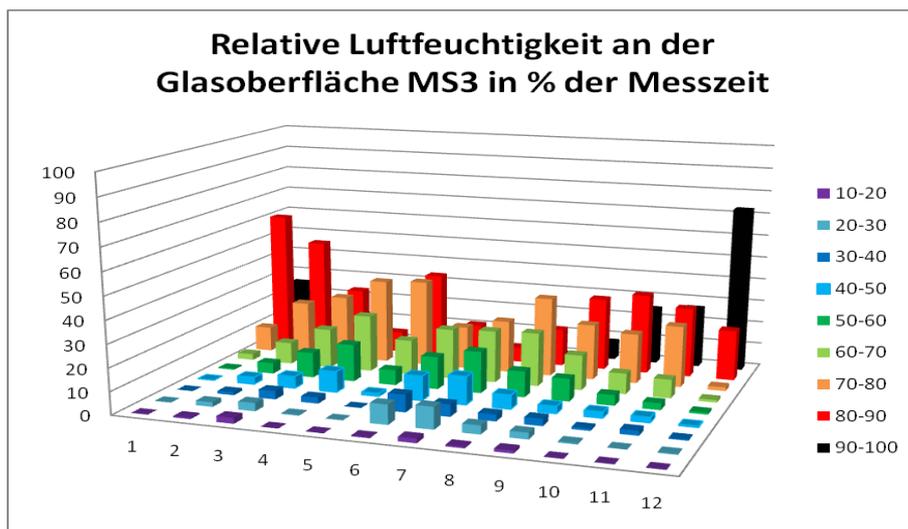


Abb. 69: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung ist höher als die an der Originalscheibe. Und erreicht Werte zwischen 90 und 100 % r. F. in allen Monaten mit Ausnahme von April und Juli/August. Diese Feuchtwerte werden zu fast $\frac{3}{4}$ der Messzeit im Dezember erreicht und zu etwa $\frac{1}{4}$ der Messzeit im Oktober/November und Januar registriert. In diesen Monaten ist mit hoher Wahrscheinlichkeit auch mit Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung zu rechnen.

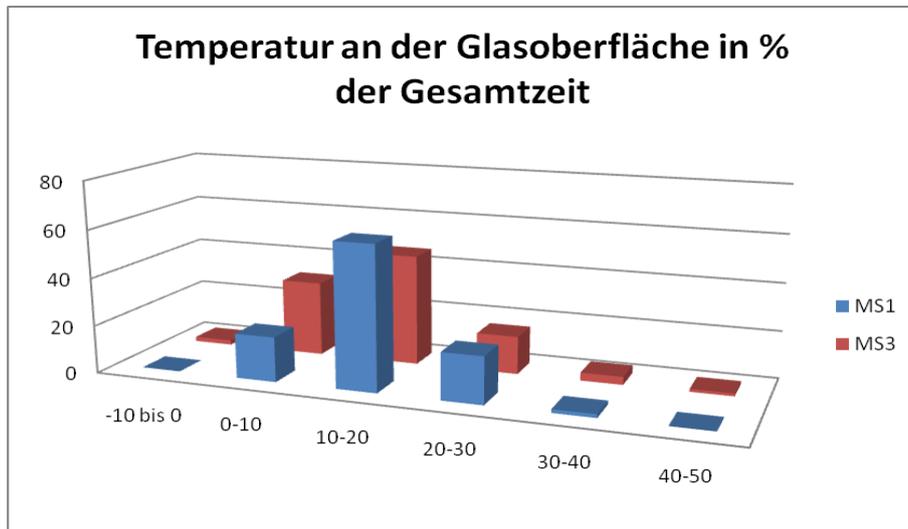


Abb. 70: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (MS1) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die Temperaturen an der Originalverglasung liegen überwiegend in einem Bereich zwischen 10 und 20 °C. Die Scheiben der Außenschutzverglasung erreichen in den Wintermonaten Temperaturen im Bereich von 0 bis -10 °C und können sich im Sommer zu 1,2 % der Messzeit auf Werte zwischen 40 und 50 °C aufheizen.

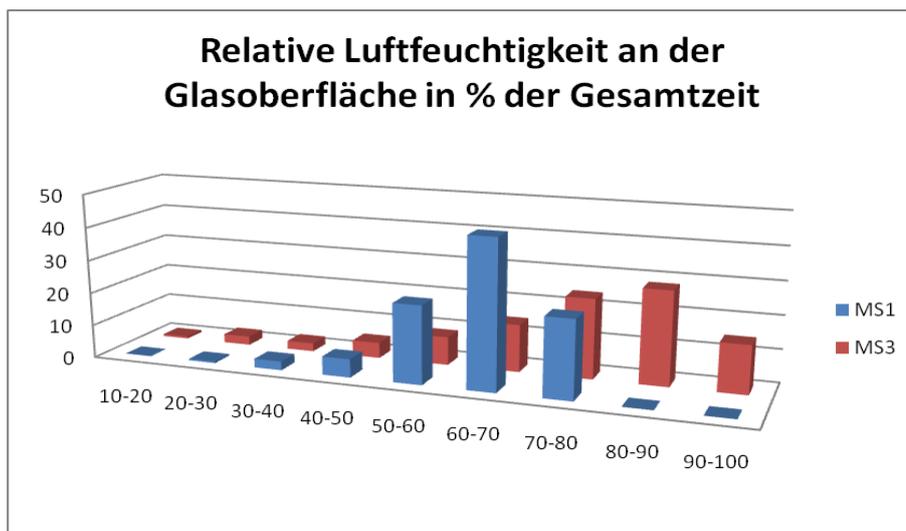


Abb. 71: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung (MS1) und der Außenschutzverglasung (MS3) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung liegt zu mehr als 2/5 der Messzeit in einem Bereich zwischen 60-70 % r. F., zu etwa 1/4 der Messzeit liegt sie im Bereich zwischen 70 und 80%. Sie erreicht jedoch zu keinem Zeitpunkt höhere Werte. Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. An der Außenschutzverglasung ist die relative Luftfeuchte zu 14,5 % der Messzeit höher als 90 % r. F., eine Taupunktunterschreitung wurde an der Außenschutzverglasung nicht registriert. Auch hier waren die Temperatur/Feuchtefühler

aufgrund ihrer Bauart ca. 5 mm von der Glasoberfläche entfernt. Beim Ausbau der Klimamesstechnik am 18.11.2011 wurde eine starke Tauwasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung visuell festgestellt. Zu diesem Zeitpunkt registrierte der Temperatur/Feuchtefühler eine Temperatur $T = 8,2 \text{ °C}$ und eine relative Luftfeuchte von 94,3 % r. F., die Taupunkttemperatur T_d ergibt sich zu $7,3 \text{ °C}$ und eine Temperaturdifferenz $\Delta T = T - T_d$ von 0,9 K. Legt man diese Werte zugrunde, so ergeben sich 15 Tage an denen Tauwasserbildung wahrscheinlich ist. Legt man die Werte zugrunde die bei der Tauwasserbildung im Havelberger Dom gemessenen wurden, so lassen sich bei einer Temperaturdifferenz von 1,2 K zwischen Temperatur und Taupunkttemperatur und einem Wert der relativen Feuchte von $>92,5 \text{ %}$, aus den Messwerten 58 Tagen berechnen, an denen die gleiche klimatische Situation vorlag und ebenfalls mit Tauwasserbildung zu rechnen ist. Verändert man die Grenzen auf $\Delta T = 1,3$ und r. F. = 93 %, so ergeben sich 80 Tage an denen mit hoher Wahrscheinlichkeit auch Betauung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung vorlag. Charakteristische Monatsverläufe der Klimadaten für jeweils einen Sommer- und einen Wintermonat befinden sich im Anhang.

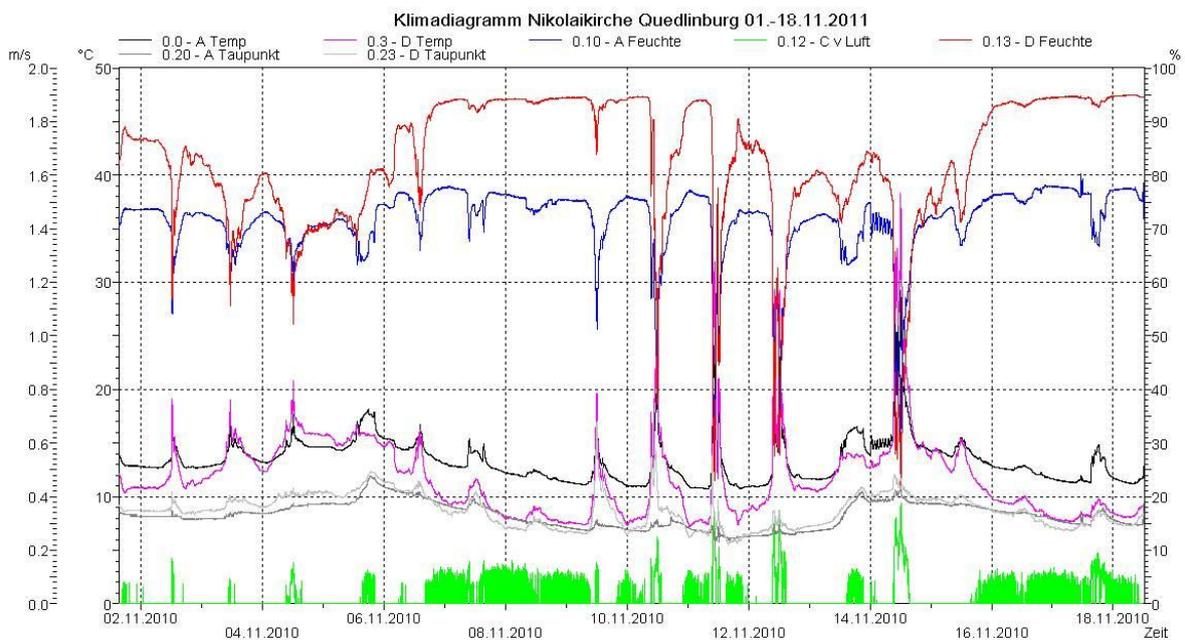


Abb. 72: Klimadiagramm Nikolaikirche Quedlinburg, sVI 01.-18.11.2011, starke Tauwasserbildung an der Innenseite der Außenschutzverglasung am 18.11.2011 (visuell beobachtet)

Die hohen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit führen bei den gemessenen Temperaturen zur Tauwasserbildung an der Innenseite der Außenschutzverglasung. An der Originalverglasung betrug die relative Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum weniger als 80% r. F.

2.4 Vergleich und Bewertung der Messergebnisse

Historische Glasmalereien sind gegenüber Umwelteinflüssen sehr empfindliche Kunstgegenstände. Vor allem in den letzten 150 Jahren haben sie infolge der Industrialisierung, insbesondere durch die Einwirkung von saurem Regen starke Schäden erlitten, die mit Materialumwandlungen und der Bildung von Korrosionsschichten einher gingen. Durch den Einbau von Außenschutzverglasungen werden diese schädlichen Bedingungen weitgehend ferngehalten. Ein optimaler Schutz dieser Kulturgüter wäre allerdings nur unter musealen Bedingungen bei konstanter Temperaturen und konstanter relativer Luftfeuchtigkeit möglich. Die Klimamessungen in den betrachteten Objekten zeigen, dass solche Bedingungen trotz Außenschutzverglasung und teilweiser Beheizung der Kirchen nicht erreicht werden. Häufig treten hohe Temperaturdifferenzen zwischen Sommer und Winter aber auch schon im Tag-/Nachtzyklus an den Glasmalereifenstern auf, die sich infolge der Außenschutzverglasung sogar noch verstärken können. Insbesondere für das Auftreten von Temperaturspitzen spielt die Ausrichtung eines Fensters nach Norden, Süden, Osten oder Westen eine entscheidende Rolle. Die relative Luftfeuchtigkeit wird wesentlich von den vorhandenen Temperaturen und auch von der Luftströmungsgeschwindigkeit im Spalt bestimmt. Große Feuchteschwankungen können sich ebenso negativ auf den Erhaltungszustand der Glasmalereien auswirken, wie hohe Temperaturschwankungen und große Änderungsgeschwindigkeiten. Eine Kondensation von Tauwasser auf der originalen Glasoberfläche sollte möglichst nicht auftreten, sondern in Ausnahmefällen nur an der Außenschutzverglasung erfolgen. Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit von >80% r. F. an der Originalverglasung kann jedoch auch schon zu irreversiblen Veränderungen von korrodierten Oberflächen führen /14/.

Mit Hilfe der Messwerte soll ein Vergleich der klimatischen Situation und daraus resultierenden Wirkungen an den Glasmalereien der unterschiedlichen Untersuchungsobjekte ermöglicht werden. Für diesen Vergleich wurden die Kennwerte aus den Klimamessungen der unterschiedlichen Objekte tabellarisch zusammengestellt. Sie wurden den objektspezifischen Auswertungen entnommen. Bei der Berechnung der Extremwerte für die Temperatur an einem Fenster wurden alle Messstellen (MS1, MS2, B1, B2) am Original berücksichtigt, so dass es sich dabei tatsächlich um maximale - bzw. minimale am jeweiligen Fenster gemessene Temperaturen handelt.

Tabelle 6: Klimakennwerte der untersuchten Objekte im Messzeitraum

	Dom Havelberg	Dom Halberstadt	Dom Stendal	Kloster Marienstern	Nikolaikirche Quedlinburg
Original					
Tmax [°C]	30,4	34,8	45,4	56,2	44,2
Tmin [°C]	-7,4	-8	-8,6	-2,5	-3
ΔT [K]	37,8	42,8	54,0	58,7	47,2
r. F. max [%]	88,3	90,5	91	89,9	80,2
r. F. min [%]	51,6	28,9	11,9	22,8	27,5
$\Delta r. F.$ [%]	36,7	61,6	79,1	66,8	52,7
r. F. > 80% in % der Gesamtmesszeit	23	11	28	36	0
Tauwasserbildung auf der Oberfläche an Tagen*	0	0	0	0	0
Außenschutzverglasung					
Tmax [°C]	32,4	35,5	43,3	48	49
Tmin [°C]	-9,4	-9	-9,6	-7,2	-4,5
ΔT [K]	41,8	44,5	52,9	55,2	53,6
r. F. max [%]	96,8	82,6	97,9	98,8	99
r. F. min [%]	41,2	29,4	19	17,9	14,3
$\Delta r. F.$ [%]	55,6	53,2	78,9	80,9	84,7
r. F. > 80% in % der Gesamtmesszeit	55	32	37	63	43
Tauwasserbildung auf der Oberfläche an Tagen*	81	6	30	221	58
v_{Luft} max im Spalt [m/s]	0,28	0,26	1,2	0,6	0,43

*berechnet aus $T - T_d \leq 1,2$; r. f. >92,5%

Der Vergleich der Klimakennwerte zeigt, dass sich die Temperatur/Feuchtebedingungen in den unterschiedlichen Objekten deutlich voneinander unterscheiden.

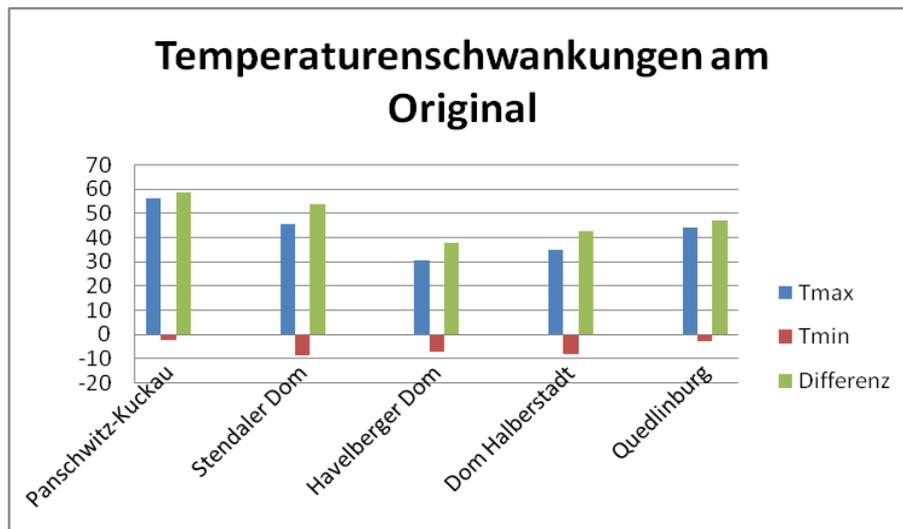


Abb. 73: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die höchsten Temperaturen mit 56,2 °C wurden an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nll 7b im Kloster Marienstern gemessen. An diesem Fenster traten ebenfalls die höchsten Temperaturschwankungen auf. Die minimale Temperatur wurde am Stendaler Dom am Fenster sV mit – 8,6 °C registriert. Die Temperaturschwankungen waren im Havelberger Dom an geringsten. Trotz Heizung in Marienstern und Quedlinburg wurden negative Temperaturen an die Außenseite der Originalverglasung (MS2) registriert.

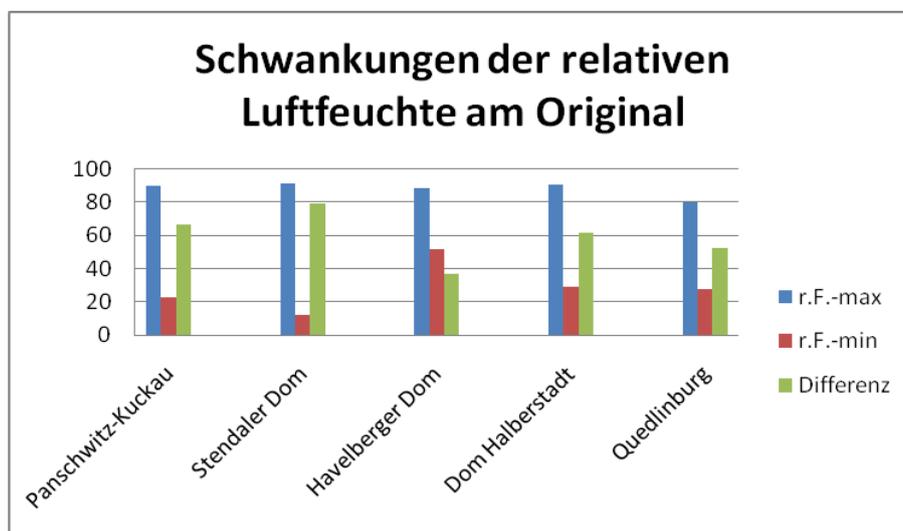


Abb. 74: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Originalverglasung im Messzeitraum

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen im Stendaler Dom am Fenster sV bei 91 % r. F. aber auch in den übrigen Objekten mit Ausnahme von Quedlinburg nur knapp darunter. Die stärksten Gesamtschwankungen in der relativen Luftfeuchtigkeit traten ebenfalls am Fenster sV im Stendaler Dom auf gefolgt von den Feuchtigkeitsdifferenzen an

der Originalverglasung der Fenster in Marienstern und Halberstadt. Der Werte der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung in Quedlinburg sind deutlich geringer.

Nicht nur die Gesamtschwankungsbreite von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit kann den Erhaltungszustand der Glasmalereien beeinflussen, sondern auch die Geschwindigkeit, mit der sich diese Werte ändern. Die Messwerte erlauben es Änderungen von relativer Luftfeuchte und Temperatur pro Minute zu berechnen. Vergleicht man diese Werte für den Monat Juli, so zeigt sich, dass insbesondere im Stendaler Dom und in Panschwitz-Kuckau Temperaturänderungen pro Minute an der Oberfläche der Originalen Glasmalerei von ca. 4K als Temperaturanstieg bzw. auch Temperaturabfall registriert wurden. In der Nikolaikirche Quedlinburg beträgt die Änderungsgeschwindigkeit immerhin noch $\pm 2 \text{ K /min}$. Hervorgerufen werden solche Änderungsgeschwindigkeiten meist in der Mittagszeit, wenn die Sonne auf den Südfenstern steht und Wolken kurzzeitig die direkte Sonneneinstrahlung frei geben oder behindern. Aus diesem Grund fallen auch an den Nordfenstern des Havelberger- und Halberstädter Domes diese Änderungsgeschwindigkeiten geringer aus. Da Glas ein schlechter Wärmeleiter ist, ist es jedoch fraglich ob das Material auf so rasche Temperaturänderungen, die die Messfühler bereits anzeigen auch reagieren kann. Falls das bei speziellen Farbgläsern doch der Fall sein sollte, so wäre es mit erheblichen Belastungen für die ohnehin durch Korrosion geschwächten Glasoberflächen verbunden. Die maximalen Änderungen der relativen Feuchtigkeit pro Minute betragen ca. $\pm 4 \%$ r. F. Welche Folgen sich daraus ergeben ist bisher nicht abschätzbar. Aus Temperaturänderungsgeschwindigkeiten von 4 K/min ergeben sich theoretisch 240 K/h . Mit dieser Änderungsgeschwindigkeit werden die Glasmalereien jedoch nur selten belastet. Berechnet man die tatsächlichen Änderungsgeschwindigkeiten pro Stunde, so kann man in jedem Fall davon ausgehen, dass die Glasmalereien diesen Änderungen auch folgen. Anhand eines Monats im Sommer und im Winter während der Messzeit sind die Änderungsgeschwindigkeiten der Temperatur und der relativen Luftfeuchtigkeit für die Messobjekte in den folgenden Bildern gegenübergestellt. Während es tagsüber durch Erwärmung und Sonneneinstrahlung zu Temperaturerhöhungen kommt, verringern sich die Temperaturen der Glasmalereifenster in der Regel nachts. Mit den Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit verhält es sich genau umgekehrt, es sei denn besondere Wetterereignisse wie Niederschlägen, können auch tagsüber zu einer Erhöhung der Feuchtigkeit und einem Abfall der Temperatur führen. In den Darstellungen sind jeweils die maximalen Änderungsgeschwindigkeiten für eine Erhöhung (positive Werte) bzw. für die Verringerung (negative Werte) von Temperatur und relativer Luftfeuchte angegeben. Die Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur liegt mit Ausnahme des Domes zu Halberstadt zwischen 10 bis 15 K/h bei Temperaturanstieg. Offensichtlich bekommt auch das Nordfenster im Halberstädter Dom Morgensonne, die dann auch für eine schnelle Verringerung der Luftfeuchtigkeit verantwortlich ist. Die Änderungsgeschwindigkeit von

Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit am Fenster nXI im Havelberger Dom sind aufgrund der Lage im Sommer am geringsten.

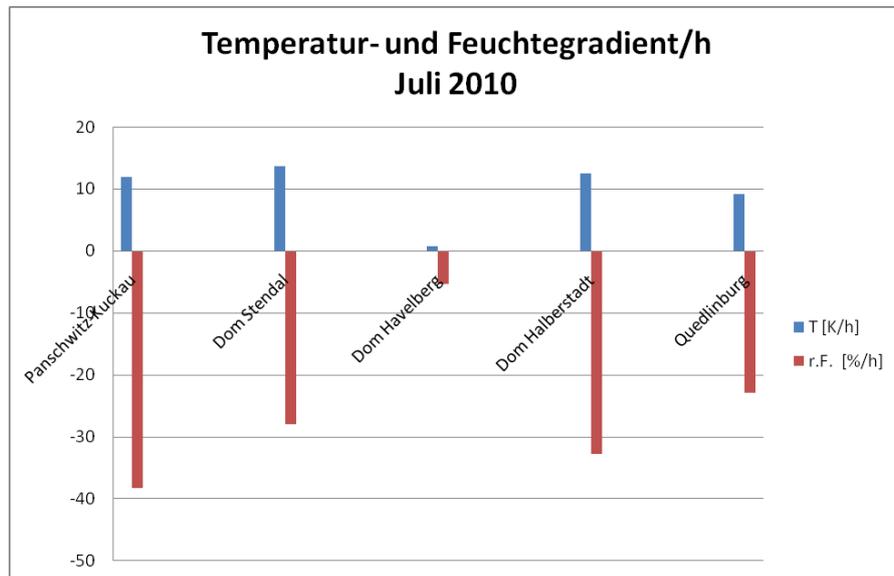


Abb. 75: Temperatur-/Feuchtgradient pro Stunde an der Originalverglasung im Messzeitraum Juli 2010

Die schnellen negativen Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit finden jeweils in den Vormittagstunden statt, sobald die Sonnenstrahlen ungehindert auf die Fenster treffen.

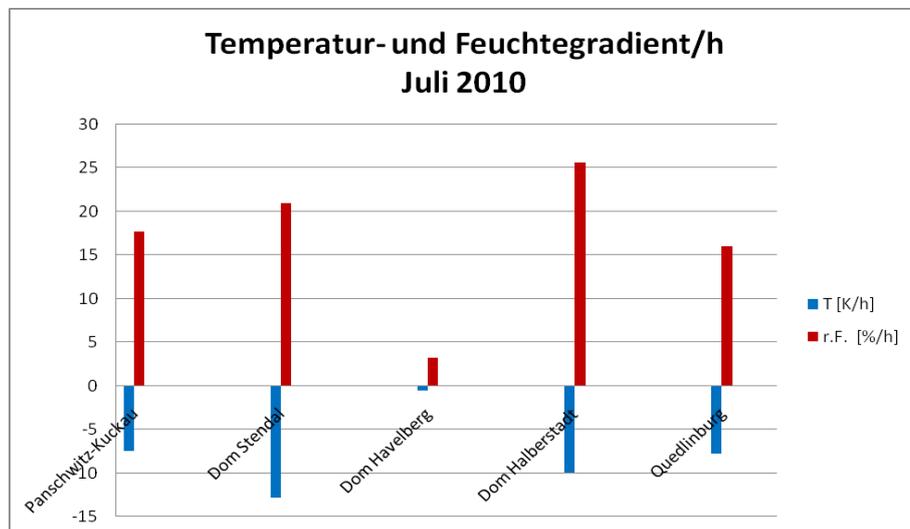


Abb. 76: Temperatur-/Feuchtgradient pro Stunde an der Originalverglasung im Messzeitraum Juli 2010

Schnelle negative Temperaturänderungsgeschwindigkeiten treten vor allem dann auf, wenn keine direkte Sonneneinstrahlung mehr vorhanden ist. Möglicherweise können sie durch Witterungseinflüsse wie plötzliche Regengüsse oder Gewitter verstärkt werden, wodurch sich die Luft stark abkühlen kann.

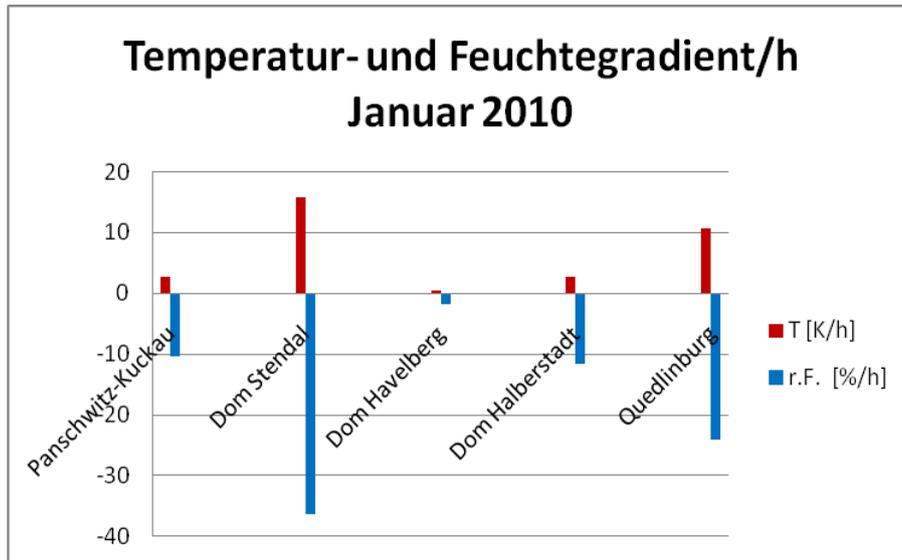


Abb. 77: Temperatur-/Feuchtgradient pro Stunde an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar 2010

Im Winter wurden die höchsten Temperaturgradienten am nach Süden ausgerichteten Fenster sV des Stendaler Domes gemessen, gefolgt vom Südfenster in Quedlinburg. Die Temperaturschwankungen durch direkte Sonneneinstrahlung an Südfenstern führen zu hohen Änderungsgeschwindigkeiten der relativen Luftfeuchtigkeit an den Originalen. Die Folgen, die sich daraus ergeben sind nicht abschätzbar, könnten jedoch mit Hilfe dieser Daten im Klimaschrank an Modellgläsern simuliert werden.

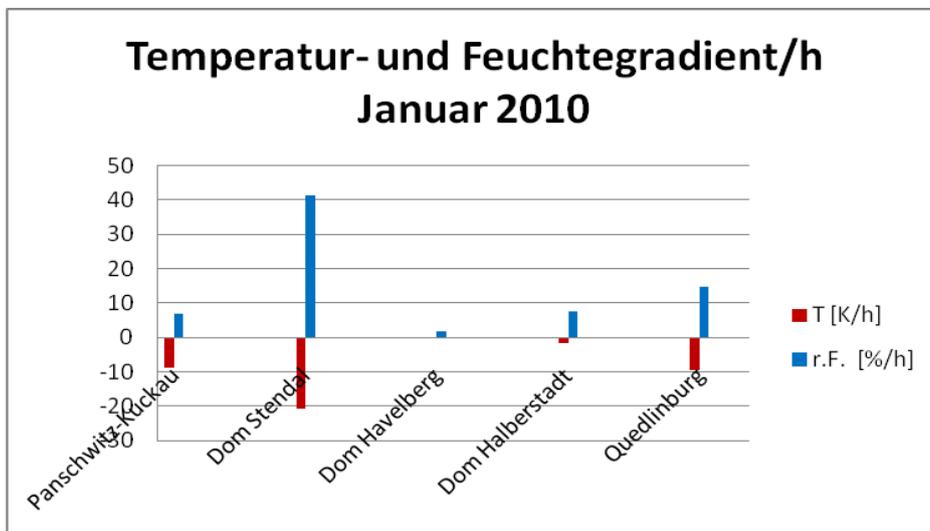


Abb. 78: Temperatur-/Feuchtgradient pro Stunde an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar 2010

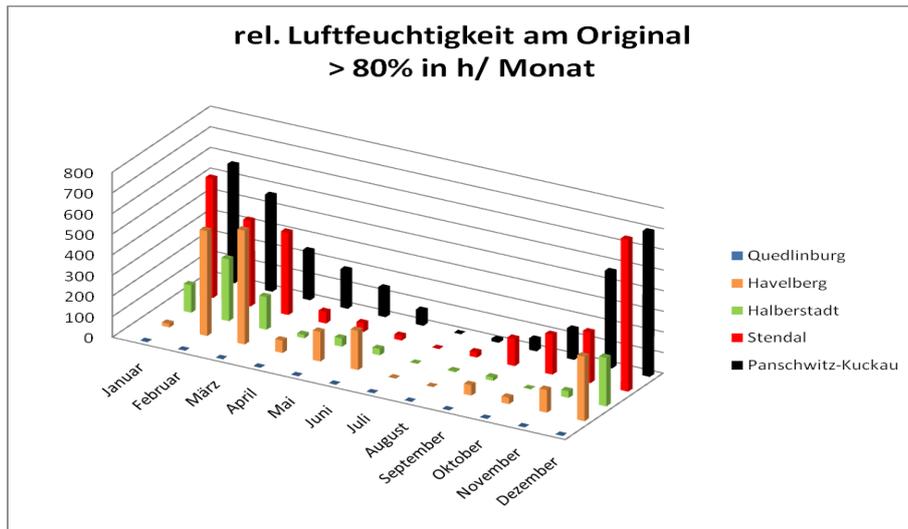


Abb. 79: Relative Luftfeuchtigkeitswerte >80 % r. F. an der Originalverglasung im Messzeitraum

Eine relative Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80% r. F. kann zur irreversiblen Einlagerung von Wasser in oberflächennahe Schichten korrodierter historische Gläser führen/ 14/ . Während die mittelalterlichen Gläser in Panschwitz-Kuckau fast in jedem Monat mit Ausnahme von Juli diesem Feuchtebereich ausgesetzt sind, bleiben die Glasmalereien in der Nikolaikirche Quedlinburg, möglicherweise infolge der Beheizung der Kirche davon verschont. Die Anzahl der Stunden im Messzeitraum mit einer relativen Luftfeuchtigkeit >80% zeigt, dass nachfolgende Diagramm für die Messstellen MS1 bzw. MS2. Daraus wird deutlich dass die Bedingungen in Panschwitz-Kuckau und Stendal höhere Belastungen für die Glasmalereien darstellen als in Havelberg und Halberstadt.

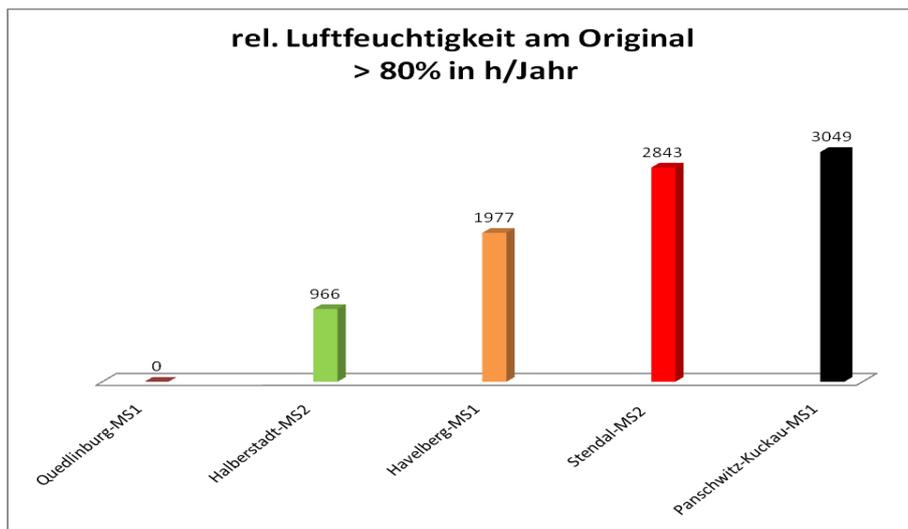


Abb. 80: Relative Luftfeuchtigkeit > 80 % r. F. am Original im Messzeitraum 2009/2010

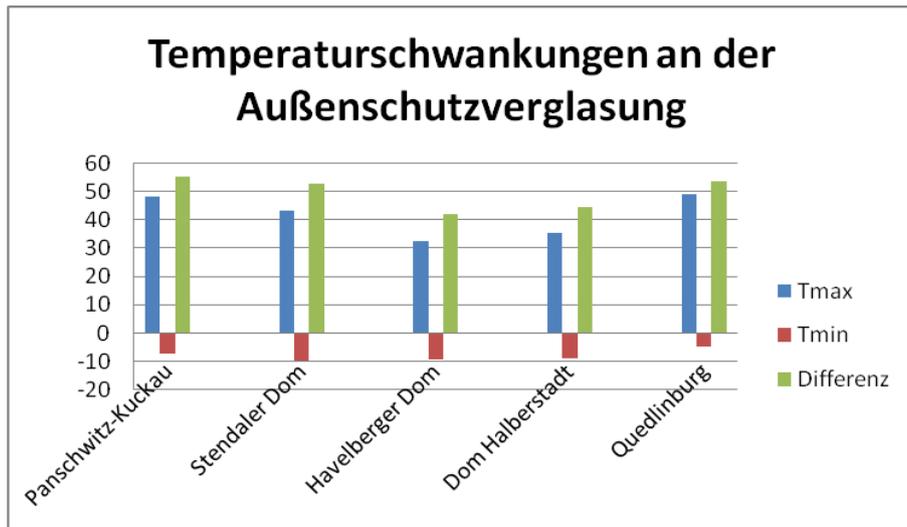


Abb. 81: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die Temperaturmaxima werden durch die Lage der Fenster bestimmt. Hohe Werte wurden im Ostfenster in Panschwitz-Kuckau und in den Südfenstern von Stendal und Quedlinburg gemessen. Die gleichen Tendenzen findet man auch bei den Temperaturen der Originalverglasung. Die minimalen Temperaturen sind richtungsunabhängig. Temperaturschwankungen sind in nach Norden ausgerichteten Fenstern geringer als in Süd- oder Ostfenstern.

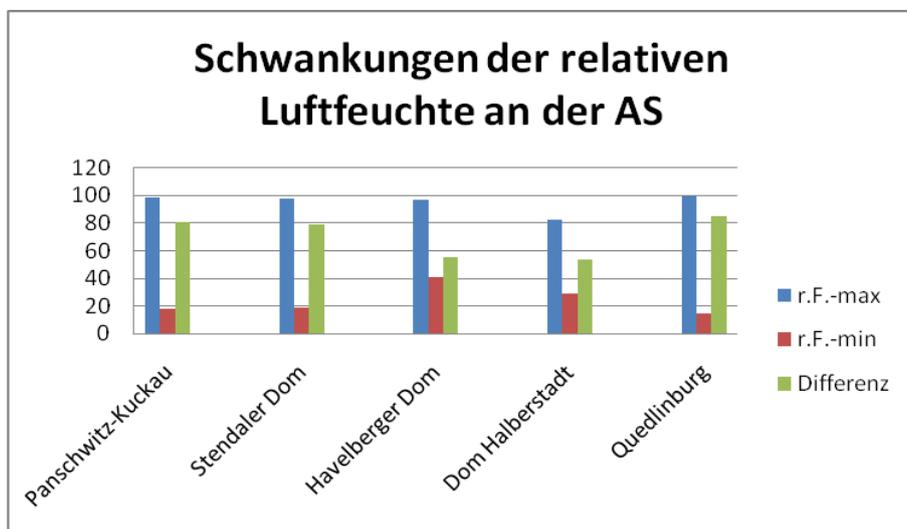


Abb. 82: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung im Messzeitraum

Die maximalen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung liegen in allen Objekten mit Ausnahme des Fensters im Dom zu Halberstadt deutlich über 90% r. F. Die Berechnungen zeigen, dass Tauwasserbildung an der Innenseite der Außenschutzverglasung mit Sicherheit auftritt. In der Nikolaikirche

Quedlinburg wurden die höchsten Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung registriert, gefolgt von denen am Fenster sV in Stendal und dem Fenster nII in Panschwitz-Kuckau.

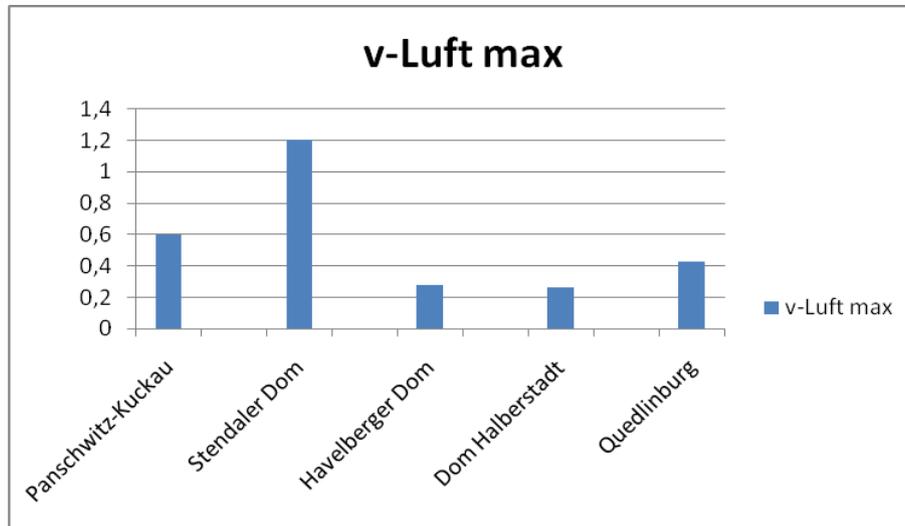


Abb. 83: maximale Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die maximale Luftgeschwindigkeit im Spalt wurde am Fenster sVI im Stendaler Dom gemessen gefolgt vom Fenster nII in Panschwitz-Kuckau. Es handelt sich dabei um die beiden Fenster mit der größten Höhe, an denen auch aufgrund ihrer Lage (Ost und Südfenster) die größten Temperaturdifferenzen (B1/B2) gemessen worden sind. Für die Luftströmungsgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung spielen sicher auch die übrigen konstruktiven Merkmale der Fenster in den unterschiedlichen Objekten eine Rolle, die jedoch nicht unmittelbar vergleichbar sind. Bemerkenswert bleibt, dass trotz verschlossener Luftaustrittsöffnung im Maßwerk des Fensters sVI in der Nikolaikirche Quedlinburg während des Messzeitraumes eine moderate Luftgeschwindigkeit gemessen werden konnte.

2.5 Vergleich der Messergebnisse mit Werten aus der Literatur

Bereits in den 1990-er Jahren wurden umfangreiche klimatechnische Messungen an Schutzverglasungssystemen unterschiedlicher Konstruktion sowohl im Labormaßstab in Klimakammern unter stationären Bedingungen als auch in verschiedenen Kirchen unter dynamischen Bedingungen von Stefan Oidtmann durchgeführt /1/. Zahlreiche Ergebnisse sind im Abschlussbericht eines vom BMBF geförderten Projektes zusammengestellt./2,15/.. Restaurierungsmaßnahmen sind in der Folge auch häufig durch klimatechnische Messungen begleitet worden, wie z.B. in der Marienkirche Frankfurt/Oder, /16/, in der Blasii Kirche Mühlhausen /5, 14/ oder dem Erfurter Dom /4/. Im einem von der EU zwischen 2002 und 2005 geförderten Projekt "VIDRIO" wurden Klimamessungen in Troyes, Paris und Köln durchgeführt und jeweils Fenster mit und ohne Außenschutzverglasung innerhalb eines Objektes miteinander verglichen /3/.

All diese Untersuchungen zeigen, dass die Ergebnisse stets objektspezifisch betrachtet werden müssen. Das Schädigungspotential an der Originalverglasung infolge der klimatischen Belastung wird so erkannt und Verbesserungskonzepte für den Erhalt der historischen Glasmalerei können entwickelt werden. Die Zusammenstellung einiger Klimakennwerte in der nachfolgenden Tabelle liefert sowohl eine Vergleichsmöglichkeit zwischen Nord- und Südfenstern innerhalb eines Objektes als auch zwischen Fenstern in unterschiedlichen Kirchen und ermöglicht eine Einordnung der eigenen Messungen.

Tabelle 7: Klimadaten aus der Literatur im Vergleich mit eigenen Messungen

Objekt/Nr.	r. F. [%]			Tmax [°C]			Tmin [°C]		
	Nord	Süd	Ost	Nord	Süd	Ost	Nord	Süd	Ost
Altenberg 1	78			31			0		
Erfurt 2	61	54		31	42		-9	-9	
Keyenberg 3	68			30			5		
Kloster Neuendorf 4	73	70		28	42		-9	-8	
Köln 5	68	68		43	42		-9	2	
Marburg 6	66			27			5		
Mönchengladbach 7	60			39			2		
Augsburg 8		67			40			3	
Breinig 9		61			42			5	
Lammersdorf 10		68			42			2	

Objekt/Nr.	r. F. [%]			Tmax [°C]			Tmin [°C]		
	Nord	Süd	Ost	Nord	Süd	Ost	Nord	Süd	Ost
Reyed 11		67			44			8	
Erfurter Dom 12				29			-6		
Erfurter Dom 13				26			-8		
Troyes St. Urban 14					48				
Paris St. Chapell 15					44				
Stendal 16		70			42			-8	
Havelberg 17	76			35			-3		
Halberstadt 18	69			35			-7		
Panschwitz-Kuckau 19			72			37			1
Quedlinburg 20		63			38			3	

1-11 Oidtmann/1, 2/; 12,13 Hahn /4/; 14, 15 VIDRIO /3/; 16-20 eigenen Messungen

Der Vergleich der Klimakennwerte zeigt, dass sich die Temperatur-/Feuchtebedingungen in den unterschiedlichen Objekten deutlich voneinander unterscheiden und sich dennoch Tendenzen ablesen lassen.

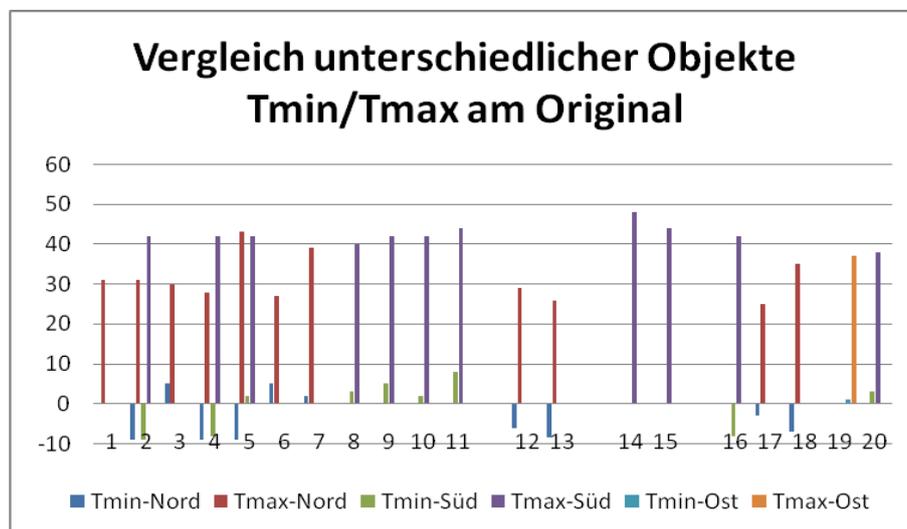


Abb. 84: Temperaturextrema an der Originalverglasung der Messobjekte (16-20) im Vergleich mit Literaturangaben (1-15)

Die Maximaltemperatur eines Nordfensters innerhalb desselben Objektes ist der Regel geringer als die eines Südfensters. Maximaltemperaturen von etwa 40 °C an der

Originalverglasung hinter der Außenschutzverglasung eines Südfensters sind nichts Ungewöhnliches und relativ häufig zu finden. Die Minimaltemperatur an Nord- und Südfenstern eines Objektes sind relativ ähnlich und unterscheiden sich bei unterschiedlichen Objekten aufgrund der geografischen Lage und dadurch bedingten Witterungsbedingungen deutlich voneinander.

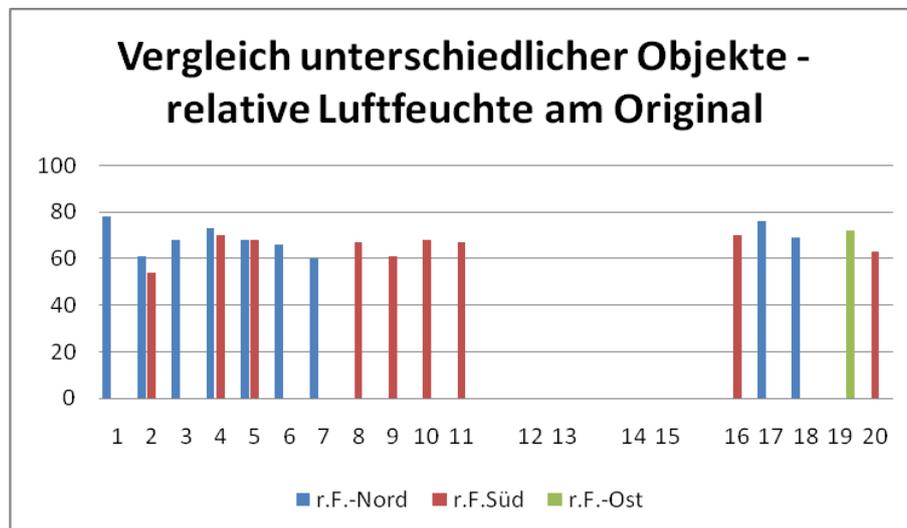


Abb. 85: Durchschnittliche relative Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung der Messobjekte (16-20) im Vergleich mit Literaturangaben (1-15)

Die Mittelwerte der relativen Luftfeuchtigkeit zeigen wiederum höhere Werte an Nordfenstern im Vergleich zu Südfenstern desselben Objektes. Alle Mittelwerte liegen im Bereich zwischen 60-80 % r. F., lediglich am Südfenster in Erfurt (2) waren die Durchschnittswerte geringer. Die in diesem Projekt gemessenen Klimawerte sind in den Extremwerten der Temperatur und den Durchschnittswerten für die relative Feuchtigkeit durchaus vergleichbar mit Messwerten nationaler und internationaler Studien.

Für eine detaillierte Auswertung ist jedoch die Berechnung der durchschnittlichen relativen Luftfeuchtigkeit nicht ausreichend. Für den Erhaltungszustand der Glasmalereien sind die Zeiträume mit relativ hoher Luftfeuchtigkeit und große Luftfeuchtigkeits- und Temperaturschwankungen von Bedeutung.

3. Veränderungen an korrodierten Glasoberflächen zwischen 1994 und 2010

3.1 Vergleich mikroskopischer und elektronenmikroskopischer Aufnahmen

- **Stendaler Dom Fenster sV**

Die Restaurierung der Glasmalereien im Stendaler Dom am Fenster sV in den Jahren 1994-1997 wurde innerhalb eines von der DBU-geförderten modellhaften Projektes (BAM-Vorhaben 8207) durch naturwissenschaftliche Analysen der Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung begleitet. Die Untersuchungen sollten zeigen, inwieweit eine Reinigung insbesondere durch die Abnahme von Korrosionsprodukten auf der Fensterinnenseite der Gläser zu Verlusten von erhaltenswerter Originalsubstanz führen würde und wurden an den Feldern 4b und 10b des „Typologischen Fensters“ sV durchgeführt, die zum damaligen Zeitpunkt die stärksten Korrosionsschäden auf der Fensterinnenseite aufwiesen. Die Korrosionszustände auf dem Feld 4b reichten von großflächigen, festen, grau-braunen Krusten über fein kristalline, weiße Ausblühungen bis hin zu dunklen, schollenförmigen Abplatzungen mit darunterliegenden feinkristallinen Verwitterungsprodukten. Auf dem Feld 10b überwogen die pulverförmig-aufgeworfenen Korrosionsprodukte auf den Federranken der blauen Gläser. Sämtliches nicht mit Schwarzlotbemalung "geschützte" Glas war verwittert, sowohl großflächig als auch zwischen der feingliedrigen Konturzeichnung. Die Reinigungsuntersuchungen wurden je Feld an 3 Glassegmenten mit für den Gesamtbestand typischer Schwarzlotbemalung (Flächenkonturen und feine Konturstriche) durchgeführt, um zu prüfen, ob und wie die Korrosionsprodukte abgenommen werden können, ohne dass Schwarzlotkonturen oder Teile davon verloren gehen. Die Abnahme der Innenseitenkorrosionsprodukte erfolgte durch einen erfahrenen Restaurator mit den in der Restaurierungspraxis üblichen Werkzeugen (Maler- und Borstenpinsel mit unterschiedlicher Dicke und Länge; Skalpell; Glasfaserpinsel; Dentalwerkzeug; Federkiel). Je nach Zustand und Festigkeit der Korrosionsprodukte wurden nacheinander unterschiedliche Werkzeuge eingesetzt. Nach jedem Reinigungsschritt, der zu einer deutlichen Veränderung des Oberflächenzustandes führte, erfolgte eine fotografische Dokumentation der entsprechenden Stelle. Die wesentlichen Ergebnisse können wie folgt zusammengefasst werden:

- Das Schwarzlot war überwiegend fest auf dem Glas. Es gab keine schollenförmigen Abhebungen (wie z.B. an den Erfurter-Domscheiben).
- An den Rändern einiger Konturen ging die Korrosion bis in die Schwarzlotbereiche, so dass Konturkanten ausgebrochen wirkten. Durch die partielle Abnahme der Innenseitenkorrosion war mit keinen gravierenden Schwarzlotverlusten zu rechnen.

- Ein Teil der Korrosionsprodukte konnte mit dem Malerpinsel oder weichem Borstenpinsel entfernt werden (z.B. schollenförmige Abplatzungen mit darunterliegenden fein kristallinen Verwitterungsprodukten oder auch die pulverförmig-aufgeworfenen Korrosionsprodukte).
- Die Abnahme der grau-braunen Korrosionskrusten war nur mit dem Skalpell bzw. Glasfaserpinsel möglich. Eine so weit reichende Reinigung wurde jedoch nicht empfohlen, da es durch den Einsatz dieser Werkzeuge auch leicht zu einer Schädigung der Gläser hätte kommen können.

Eine umfangreiche Dokumentation dieser Untersuchungen wurde erstellt und konnte als Grundlage für die Begutachtung der beiden Glasmalereifelder sV 4b und sV 10b im diesem Evaluierungsprojekt herangezogen werden. Etwa 15 Jahre nach den damals durchgeführten Reinigungsuntersuchungen wurden die dokumentierten Probestellen erneut unter dem Mikroskop begutachtet und fotografisch festgehalten. Während damals sowohl für die Mikro- als auch für die Makroaufnahmen Filmmaterial der Firma Kodak 100 (Tageslichtfilm) eingesetzt worden ist, erfolgte die Dokumentation 2009 nach dem Stand der Technik digital mit einer Olympus Colorview II-Kamera, wodurch ein direkter Vergleich von Vor- und Nachzustandsaufnahmen sofort möglich wird, ohne den Umweg über eine Filmentwicklung.

Die Detailaufnahmen in 4...10-facher Vergrößerung erfolgten wie 1994 unter einem Stereomikroskop Typ Wild M3C mit fotografischer Einrichtung (Olympus Colorview II). Zur Beleuchtung wurde eine Kaltlichtquelle (Schott KL 1500 E) mit Konversionsfilter benutzt, deren Lichtstrahl in einem Winkel von 40° bzw. 45° auf das Objekt gerichtet war.

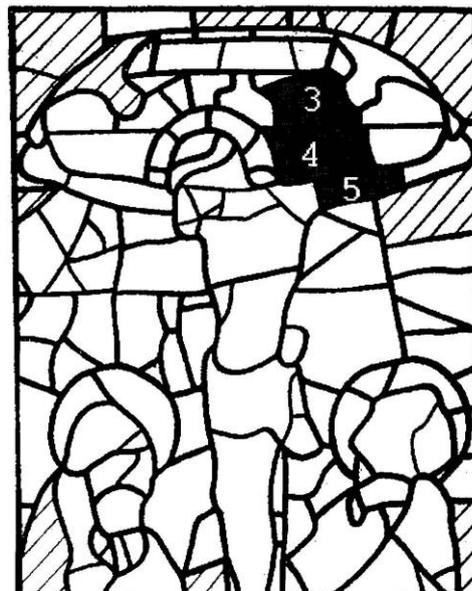
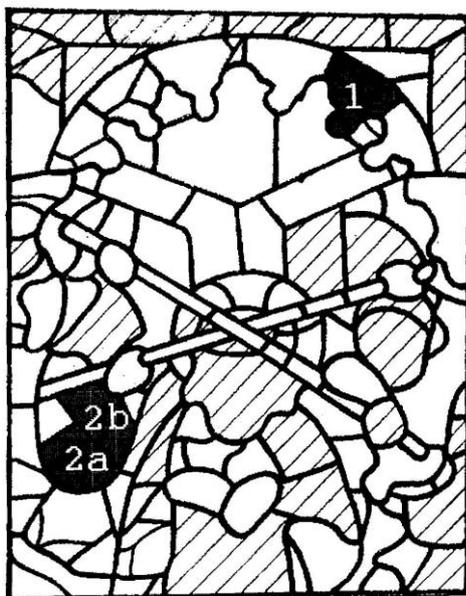


Abb. 86, 87: Feld sV 4b (links) und Feld sV 10b (rechts) mit gekennzeichneten Glassegmenten der Dokumentation 1994 und 2009

Die folgenden Bilder zeigen den Vergleich typischer Probestellen auf den gekennzeichneten Glassegmenten der Dokumentation von 1994 und 2009. Die Aufnahmen sind aufgrund der unterschiedlichen Kameratypen nicht immer deckungsgleich. Der Vorteil der digitalen Aufnahmetechnik wird in allen Fällen deutlich und liegt vor allem in der besseren Qualität und allgemein besseren Bildqualität. Die Bilder des Vorzustandes wurden eingescannt, und teilweise weiterbearbeitet, um einen unmittelbaren Vergleich zu ermöglichen.



Abb. 88, 89: Stendal Dom: sV 4b Segment 1 – partielle Reinigung Stelle 2 Detail (131/10 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Die Korrosionsprodukte entlang der Schwarzlotkontur wurden entfernt. Die Kanten der Kontur sind unverändert. Auf der Fläche sind einige Löcher sichtbar, die im Ausgangszustand nicht vorhanden waren.

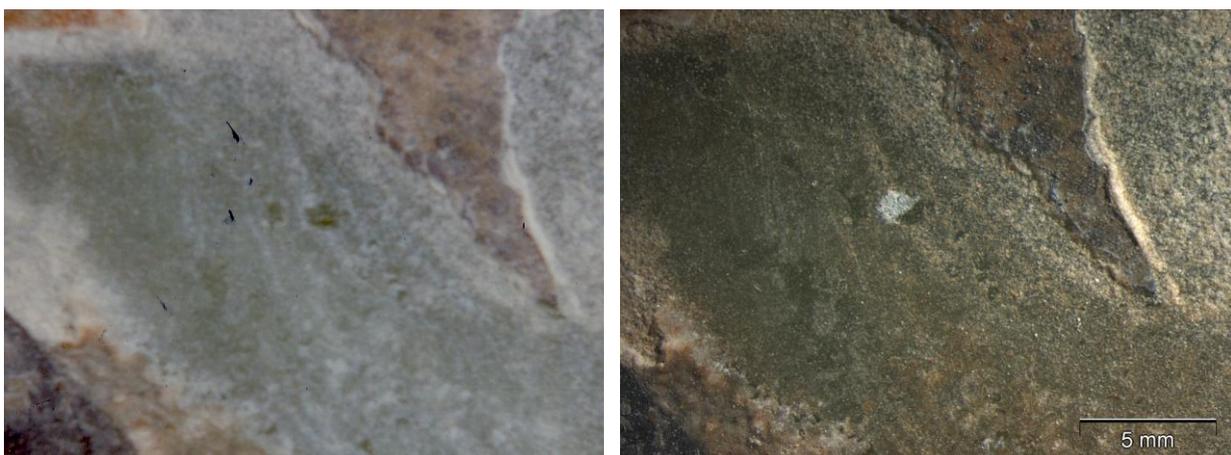


Abb. 90, 91: Stendal Dom: sV 4b Segment 1 – nach partieller Reinigung Stelle 1 Detail (131/17 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

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



Abb. 92, 93: Stendal Dom: sV 4b Segment 1 – nicht gereinigte Stelle Detail (131/10 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Hier gibt es bereits im Ausgangszustand einige Ausbrüche aus der Korrosionskruste entlang der Kontur. Diese Schäden haben sich verstärkt.

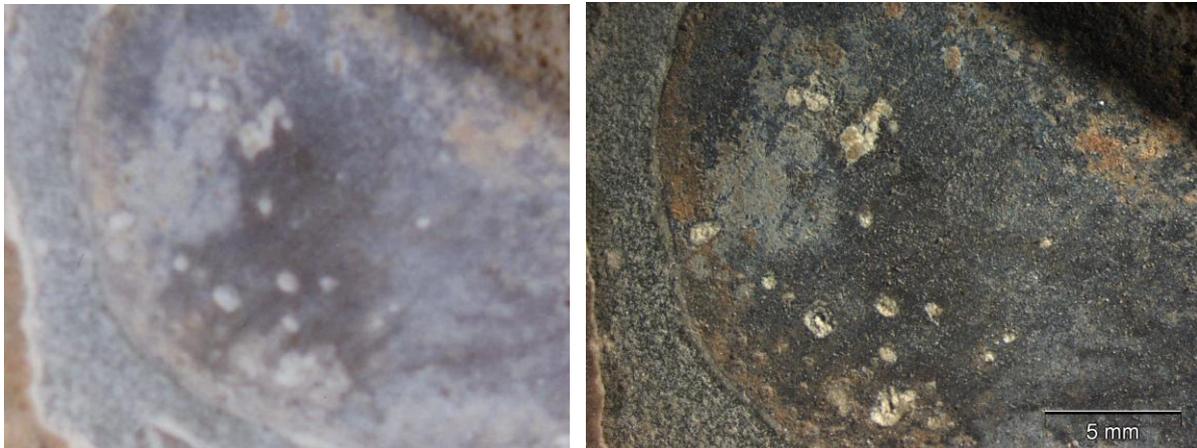


Abb. 94, 95: Stendal Dom: sV 4b Segment 1 – nach partieller Reinigung der Glasoberfläche Detail (131/10 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Einzelne Details auf der Kontur sind sowohl in der Aufnahme von 1995 als auch 2009 gut erkennbar. Veränderungen der Oberfläche durch verstärkte Korrosion konnten in diesem Fall weder auf der Glasoberfläche noch auf der Schwarzlotkontur beobachtet werden. Offensichtlich treten sie jedoch häufiger unter verbliebenen Korrosionskrusten auf.

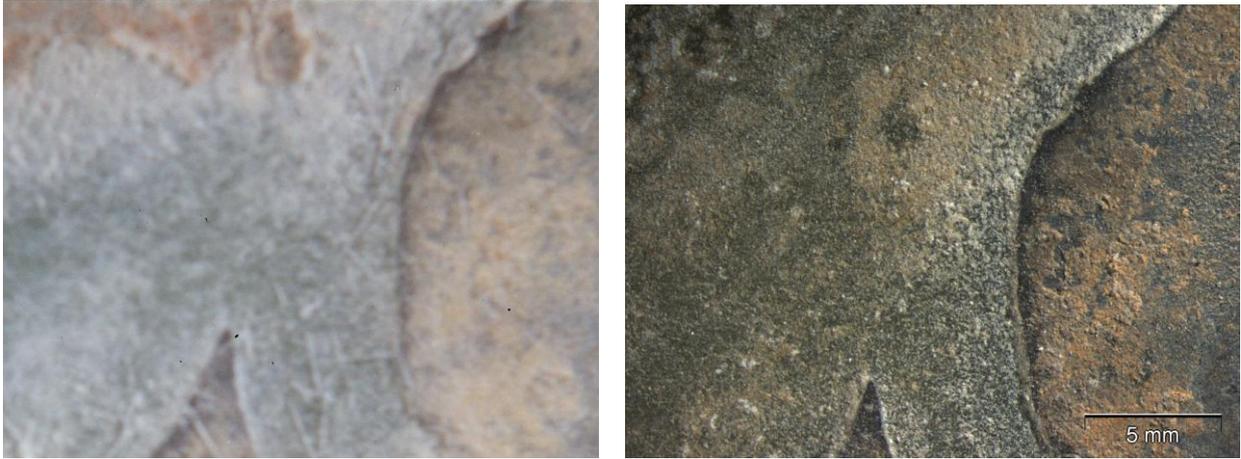


Abb. 96, 97: Stendal Dom: sV 4b Segment 1 – nach partieller Reinigung der Glasoberfläche Detail (131/10 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Die Glasoberfläche ist relativ stark gereinigt worden. Möglicherweise ist sie bereits wieder von einer dünnen Schicht neuer Korrosionsprodukte bedeckt.

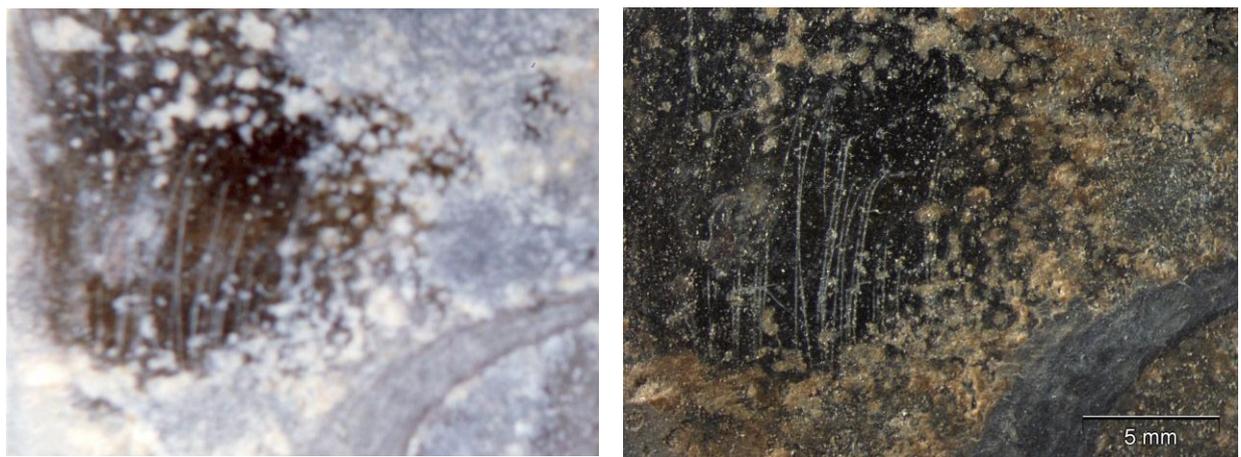


Abb. 98, 99: Stendal Dom: sV 4b Segment 2a – nach partieller Reinigung der Glasoberfläche Detail (131/30 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Auf der gereinigten Glasoberfläche befinden sich Kratzer, die sich unverändert in der Aufnahme von 2009 wiederfinden. Die Kontur rechts scheint ebenfalls unverändert zu sein. Dieses Glassegment zeigt keine Anzeichen einer Neukorrosion.



Abb. 100, 101: Stendal Dom: sV 10b Segment 3 – nach partieller Reinigung der Glasoberfläche Detail (132/0 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Sowohl die Schwarzlotkonturen als auch die Reste der Korrosionsprodukte dazwischen sind unverändert erhalten geblieben. Lediglich die Klebung ist offensichtlich partiell aufgebrochen.

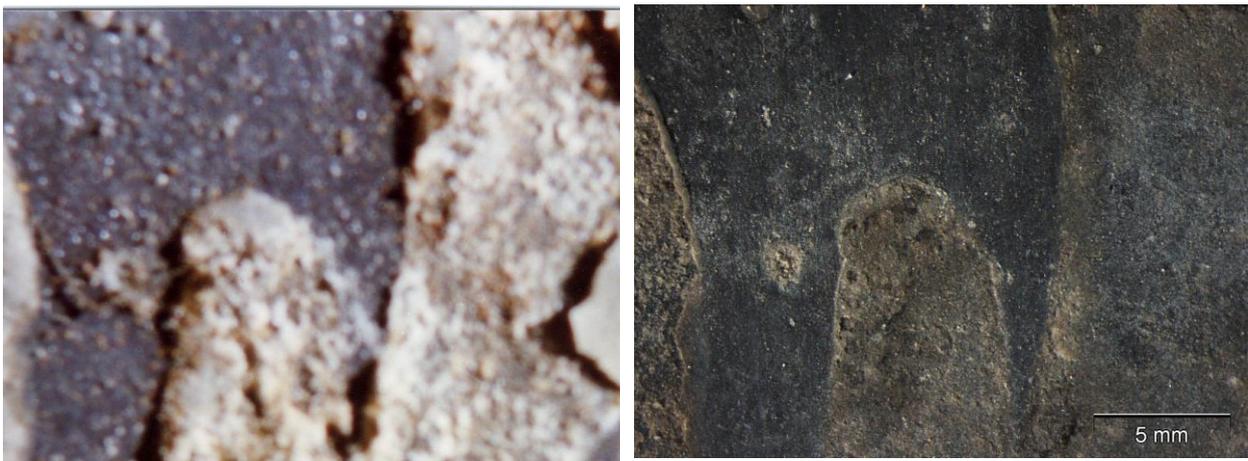


Abb. 102, 103: Stendal Dom: sV 10b Segment 3 – ohne Reinigung der Glasoberfläche Detail (132/0 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Die Schwarzlotkontur scheint auch nach der Entfernung der Korrosionsbeläge von der Oberfläche unverändert. Ein Loch in der Mitte der Kontur deutet sich auch schon in der Vorzustandsaufnahme an.



Abb. 104, 105: Stendal Dom: sV 10b Segment 4 –nach Reinigung der Glasoberfläche Detail (132/16 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Die Bereiche zwischen den Schwarzlotkonturen weisen noch Reste von Korrosionskrusten auf, die auch in der Nachzustandsaufnahme von 2009 völlig identisch vorhanden sind.



Abb. 106, 107: Stendal Dom: sV 10b Segment 4 –nach Reinigung der Glasoberfläche Detail (132/12 K), 1994 (links), Vergleichsaufnahme 2009 rechts

Eine Neukorrosion auf der gereinigten Glasoberfläche ist nicht offensichtlich, allerdings werden in der Durchlichtaufnahme (rechts) in den Mikrorissen Verbräunungserscheinungen sichtbar.

- **Havelberger Dom Fenster nXI, nVII**

Auch die Restaurierung der Glasmalereien im Havelberger Dom zwischen 1994-1997 wurde durch naturwissenschaftliche Untersuchungen der BAM begleitet. In Vorbereitung der Restaurierung erfolgten 1994 Untersuchungen an Glasproben aus den Feldern nXI 3a; nXI 4c und nVII 5b, die durch die zuständige Restaurierungswerkstatt (Fa. Wilde Bellingen) entnommen und der BAM übergeben worden sind. Die Glasproben wurden mikroskopisch begutachtet, fotografisch dokumentiert und die chemische Zusammensetzung der Gläser mit Hilfe der Mikrosonde bestimmt. Auf der Grundlage dieser Analysen wurde u.a. eine Manganverbräunung nachgewiesen. Versuche zur Wiederaufhellung der Gläser wurden mit Hydrazin durchgeführt, desweiteren erfolgten Tests zur Abnahme von Korrosionsschichten mit Hilfe von Ammoniumcarbonatkompressen. Die Untersuchungsergebnisse wurden dokumentiert und bilden die Grundlage für eine Zustandsdokumentation 2009. Zu diesem Zweck wurden die Glasproben mit Einverständnis des zuständigen Denkmalamtes aus den Feldern nXI 3a; nXI 4c und nVII 5b von Restauratoren entnommen und definierte Bereiche sowohl lichtmikroskopisch als auch mit dem Elektronenmikroskop dokumentiert. Im Folgenden sind mikroskopische Aufnahmen von 1994 und 2009 gegenübergestellt, die für den Erhaltungszustand typische Oberflächenbereiche zeigen. Darüber hinaus gibt es für einige Proben auch eine elektronenmikroskopische Dokumentation von Verwitterungszonen im μm -Bereich, die den Probenquerschnitt zeigen. Die Detailaufnahmen erfolgten wie 1994 unter einem Labormikroskop Typ Olympus BH2 mit fotografischer Einrichtung (2009 mit digitaler Kamera: Olympus ColorView II).



Abb. 108: Havelberg Dom: Proben 1 nXI 3a (links), Probe 2 nXI 4c (Mitte), Probe 3 nVII 5b (rechts)

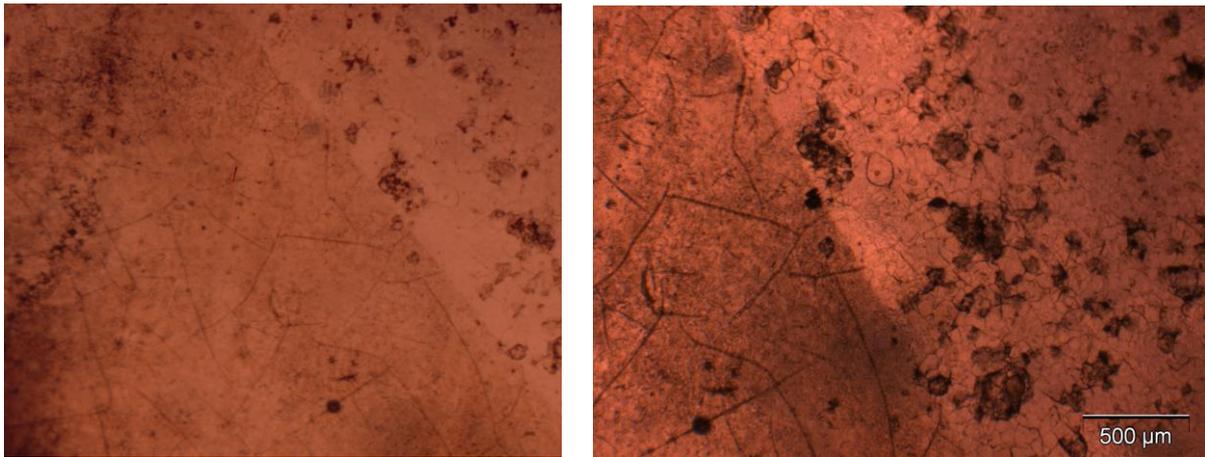


Abb. 109, 110: Havelberg Dom nXI 3a, Probe 1: Oberflächenbereich mit Rissen und Korrosionsprodukten, Innenseite (126/11 K), 1994 (links) Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

Die sichtbaren Oberflächenrisse sind in den Aufnahmen von 1994 und 2009 identisch. Eine Zunahme von Korrosionsprodukten auf der Oberfläche ließ sich nicht feststellen.

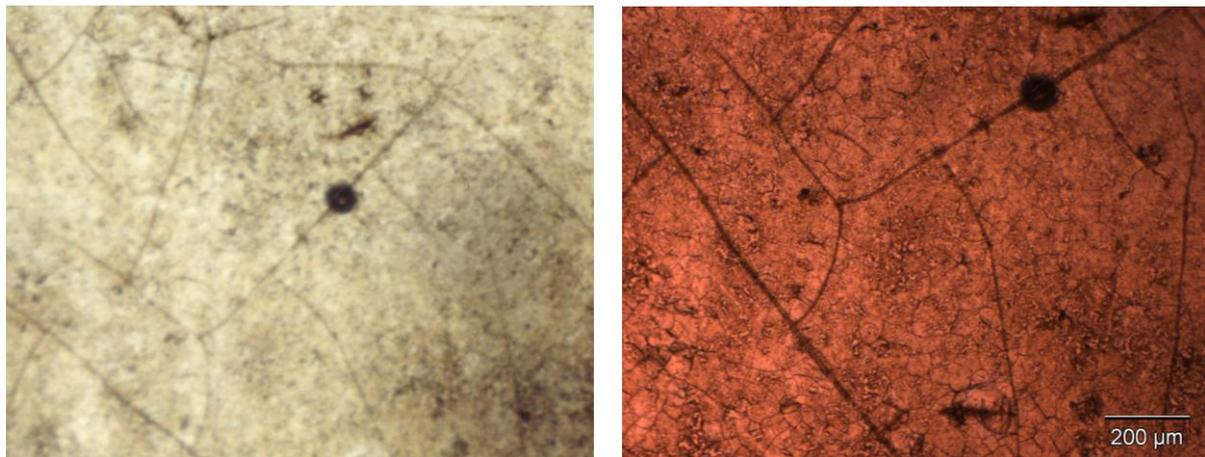


Abb. 111, 112: Havelberg Dom nXI 3a, Probe 1: Oberflächenbereich mit Rissen, Innenseite, Detail (126/11 K), 1994 (links) Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

In der Aufnahme von 2009 sind sehr feine Risse aufgrund der besseren Kameraauflösung deutlicher sichtbar. Die Form und der Verlauf der groben Risse scheinen unverändert zu sein.

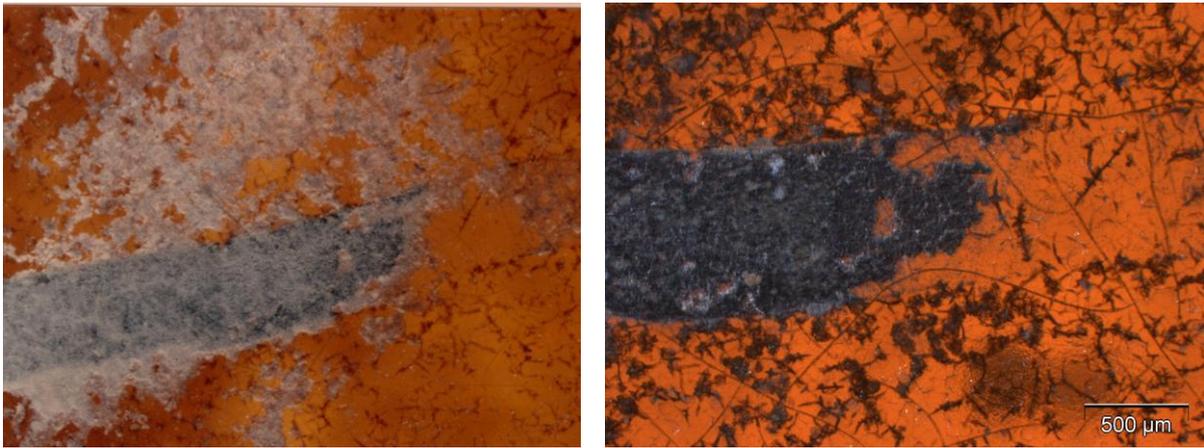


Abb. 113, 114: Havelberg Dom nXI 4c, Probe 2: geschädigte Schwarzlotkontur mit Rissen und Verbräunungserscheinungen, Innenseite (130/0 K), 1994 (links) Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

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

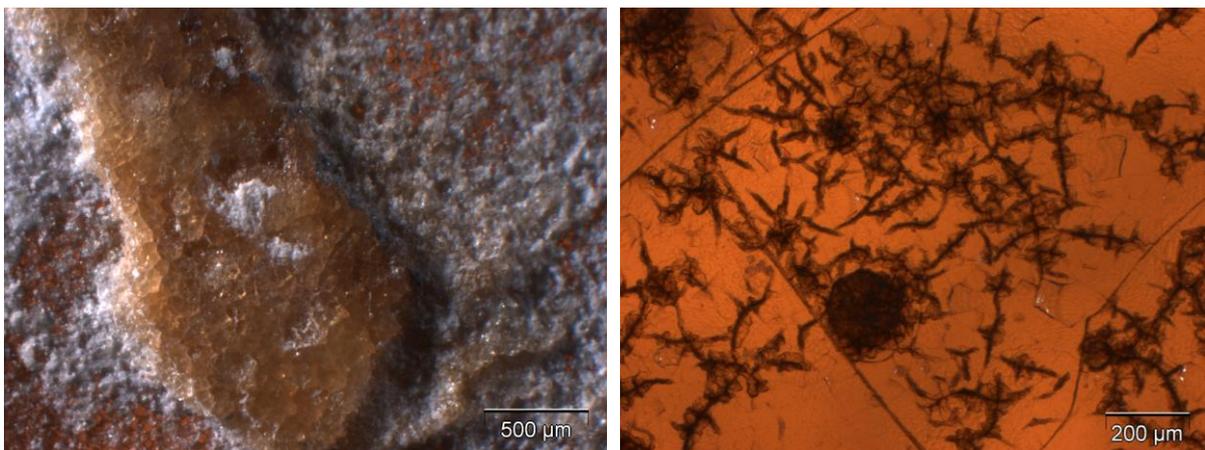


Abb. 115, 116: Havelberg Dom nXI 4c, Probe 2: Reste der verbräunten Korrosionsschicht auf Glasoberfläche Außenseite (links), Risse mit Verbräunungserscheinungen, Innenseite (rechts)

Anhand einiger Beispiele soll der aktuelle Zustand der Probe 2 dokumentiert werden. Eine Neukorrosion auf der gereinigten Glasoberfläche ist nicht erkennbar, allerdings erscheinen die vorhandenen Korrosionsprodukten verbräunt (links), ebenso werden in den Mikrorissen des Glases Verbräunungserscheinungen sichtbar.

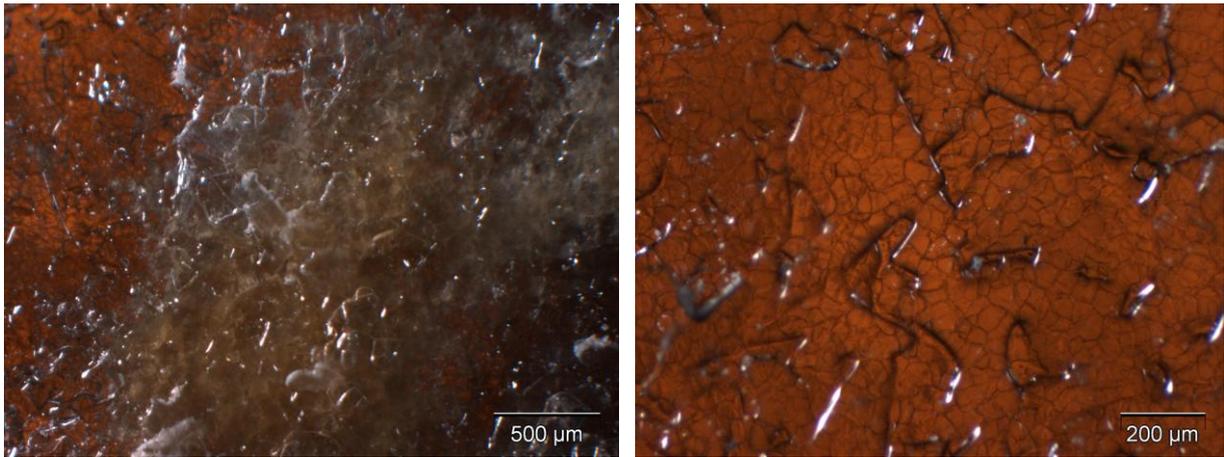


Abb. 117, 118: Havelberg Dom nXI 4c, Probe 2: geschädigte Glasoberfläche mit Rissnetz und Ormocerbeschichtung, (links), Detail (rechts) Außenseite

Die zum Schutz des Glases vor weiterer Verwitterung aufgebrachte Ormocer[®]-Schicht ist völlig intakt und zeigt keine Schäden. Die folgenden elektronenmikroskopischen Aufnahmen vom Probenquerschnitt zeigen, dass sich das Ormocer[®] durch Mikrorisse hindurch unmittelbar mit dem unverwitterten Glas verbunden hat und die Gelschichtbereiche in das Ormocer eingelagert wurden.

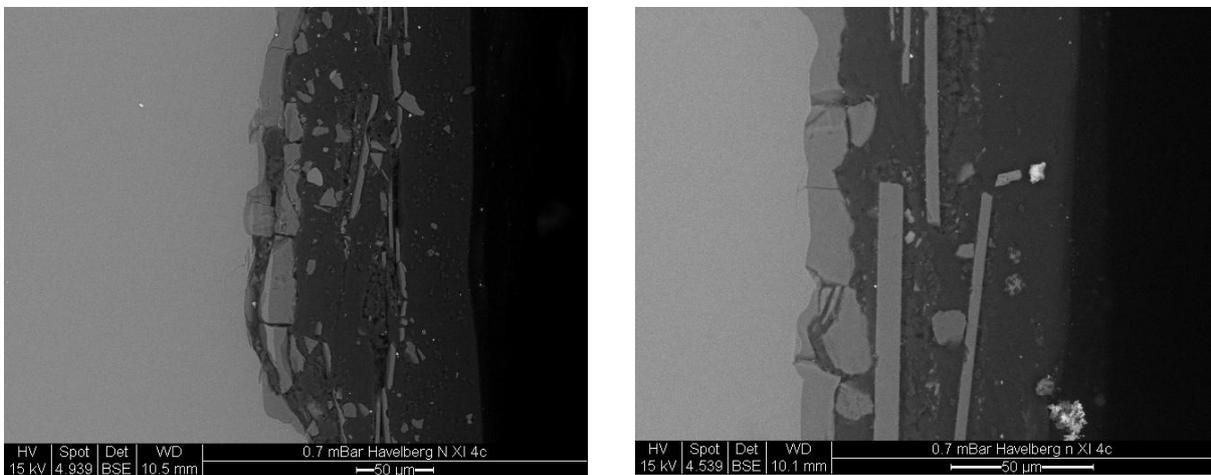


Abb. 119, 120: Havelberg Dom nXI 4c, Probe 2: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigte Glasoberfläche mit Ormocerbeschichtung, (links), Detail (rechts) Außenseite

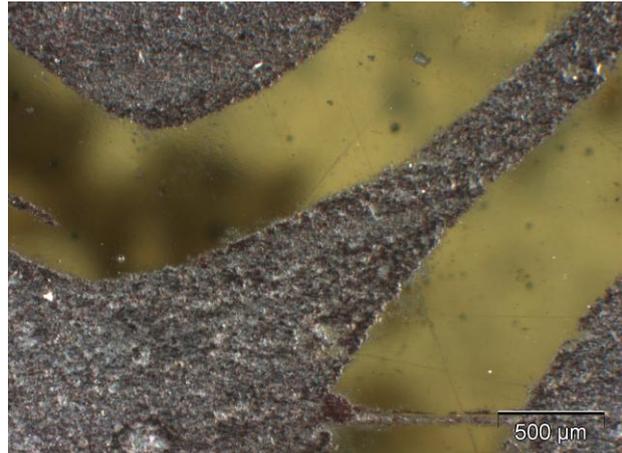
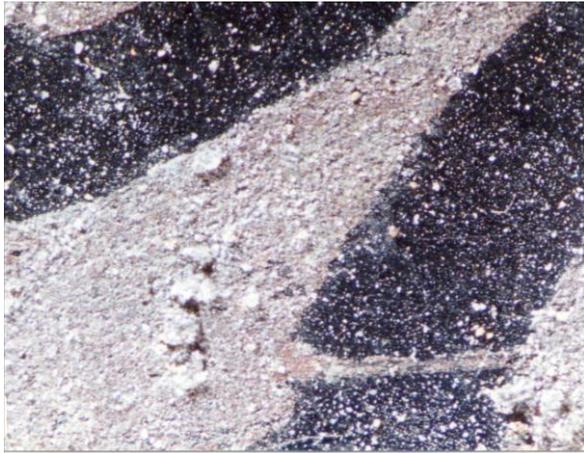


Abb. 121, 122: Havelberg Dom nVII 5b Probe 3: Schwarzlotkontur und gereinigte Glasoberfläche, Innenseite (112/11 K), 1994 (links) Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

Sowohl Glasoberfläche als auch Schwarzlotkontur sind intakt. Lockere Oberflächenablagerungen wurden mit weichem Pinsel entfernt. Die Aufnahme 2009 zeigt keinen Korrosionsfortschritt.

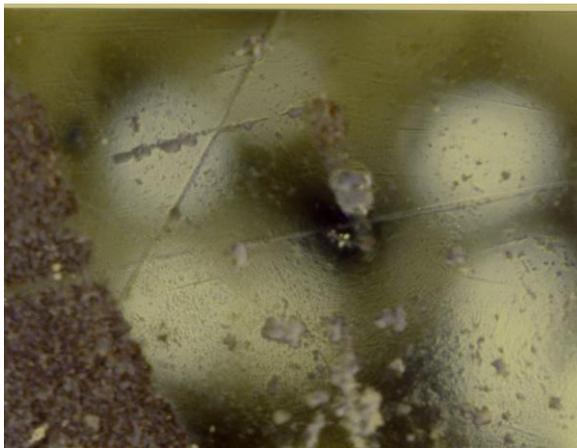


Abb. 123, 124: Havelberg Dom nVII 5b Probe 3: Schwarzlotkontur und gereinigte Glasoberfläche, Innenseite (134/13 K), 1994 (links) Vergleichsaufnahme 2009 (rechts)

Auch in diesem Probenbereich sind keinerlei Veränderungen gegenüber dem Zustand von 1994 sichtbar. Möglicherweise reichen aber auch die mikroskopischen Vergrößerungen noch nicht aus, um signifikante Veränderungen an den Proben durch Korrosionsprozesse nachzuweisen

In den folgenden Bildern werden rasterelektronenmikroskopische Aufnahmen am Probenquerschnitt von 1994 mit der Mikrosonde den Bildern gegenübergestellt, die an den gleichen Probestellen 2009 mit dem ESEM aufgenommen worden sind.

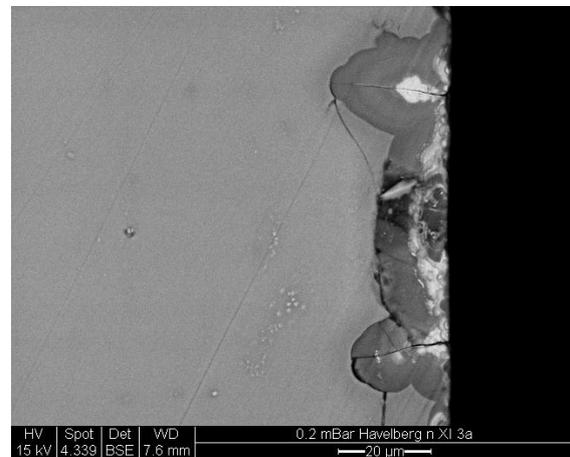
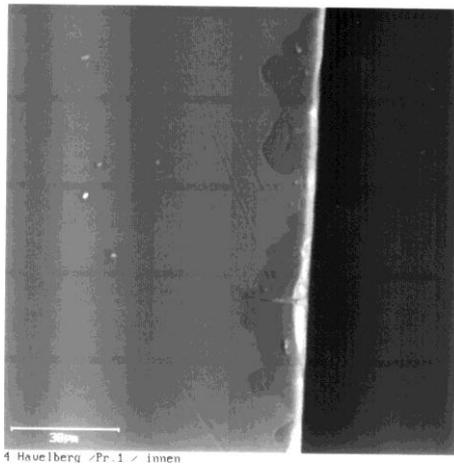


Abb. 125, 126: Havelberg Dom nXI 3a, Probe 1: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigte Glasoberfläche (Innenseite) ESMA 1994 (links), ESEM 2010 (rechts)

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

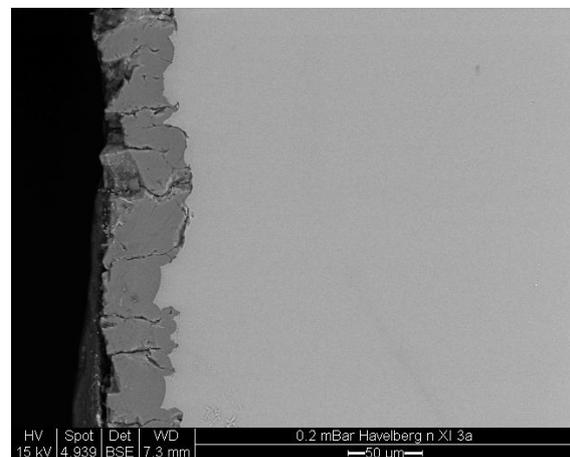


Abb. 127, 128: Havelberg Dom nXI 3a, Probe 1: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigte Glasoberfläche (Außenseite) ESMA 1994 (links), ESEM 2010 (rechts)

Auf der Probenaußenseite sind im Querschnitt ebenfalls zahlreiche Längs- und Querrisse sichtbar. Gelschichtverluste sind so leicht möglich. Es handelt sich nicht um identische Probestellen, dennoch werden Ähnlichkeiten in der Gelschichtmorphologie deutlich. Die Breite der Gelschicht liegt in beiden dokumentierten Probebereichen bei etwa 50 µm.



Abb. 129, 130: Havelberg Dom nXI 4c, Probe 2: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigte Glasoberfläche (Außenseite) ESMA 1994 (links), ESEM 2010 (rechts)

Die Außenseiten der Gläser weisen naturgemäß eine breitere Verwitterungszone auf als die Innenseiten. Der Vergleich der Aufnahmen von 1994 und 2010 zeigt an dieser Probe eine ähnliche Morphologie am Probenquerschnitt, eine mit zahlreichen Rissen durchzogene Gelschicht. In der Aufnahme von 2010 war die Probe zusätzlich mit Ormocer® beschichtet. Es ist deutlich erkennbar, wie sich das Beschichtungsmaterial auch in die Risse eingelagert hat und die lockere Verwitterungszone zusammenhält.

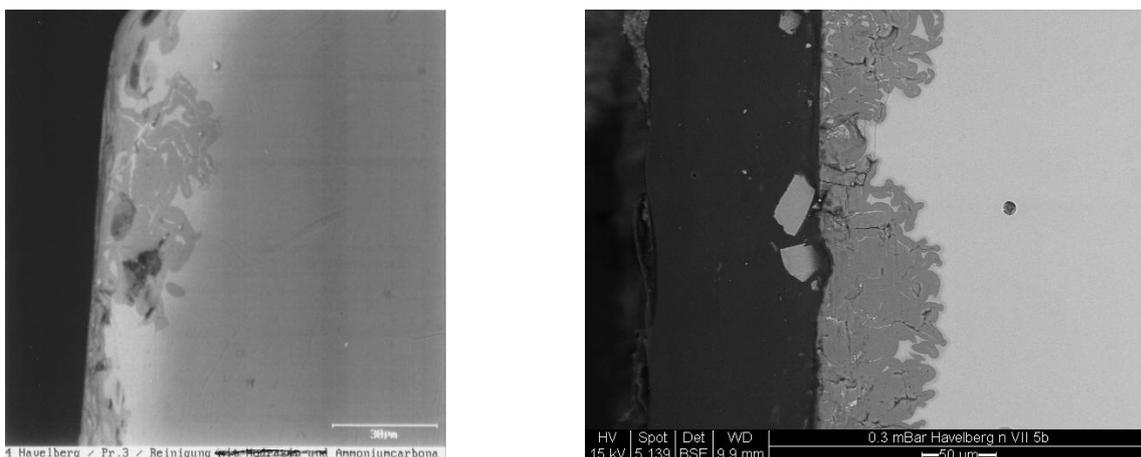


Abb. 131, 132: Havelberg Dom nVII 5b, Probe 3: elektronenmikroskopische Aufnahme des Querschnitts einer geschädigte Glasoberfläche (Außenseite) ESMA 1994 (links), ESEM 2010 (rechts)

Auf der Glasoberfläche befindet sich ein Ormocer® - Überzug. Die Geschichtsbreite beträgt in der Aufnahme 2010 deutlich mehr als 50 µm, 1994 lag ihre maximale Breite bei 30 µm. Ein Korrosionsfortschritt ist daher nicht auszuschließen.

- **Mariensterne Panschwitz-Kuckau Fenster nll**

Das Feld nll 1c aus dem mittelalterlichen Hussitenfenster der Klosterkirche Mariensterne in Panschwitz-Kuckau, war das erste Feld an dem Versuche zur Aufhellung der manganverbräunten Gläser durchgeführt wurden. An den im Durchlicht nahezu völlig lichtundurchlässigen Glasmalereien wurden bereits Anfang der 80-er Jahre an einem etwa 10 cm breiten Streifen im oberen Bereich der Scheibe erste Versuche mit Hydrazinhydratlösung erfolgreich zur Wiederaufhellung vorgenommen. Im Zeitraum zwischen 1981-1986 wurden alle verbräunten Glasmalereifelder des Hussitenfensters der Klosterkirche Mariensterne in Panschwitz-Kuckau nach erfolgreichen Vorversuchen an der Testscheibe mit einer 24 %-igen Hydrazinhydratlösung aufgehellt. Die Fenster erreichten wieder eine Transparenz, die dem durchschnittlichen mittelalterlichen Erscheinungsbild entsprechen könnte. 1990 wurde bei Kontrolluntersuchungen an den behandelten Scheiben aber insbesondere am aufgehellten Streifen der Testscheibe eine erneute Verringerung der Lichtdurchlässigkeit festgestellt. Die Langzeitstabilität des Verfahrens zur Wiederaufhellung "verbräunter" Gläser, scheint ohne eine nachfolgende Konservierung der behandelten Oberflächen nicht gegeben zu sein. Aus diesem Grund erfolgte im April 1991 eine Behandlung der gesamten Testscheibe 1c mit Hydrazin und anschließend eine teilweise Ormocer[®]-Beschichtung (auf Vorder- und Rückseite) im Fraunhofer-Institut für Silicatformung (ISC) Würzburg. In den Jahren 200-2001 wurden in einem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt geförderten Projekt (BAM-Vorhaben 4241) u.a. auch die Glasmalereien des Hussitenfensters erneut untersucht. Für die Beurteilung der Langzeitwirkung der Hydrazinbehandlung, insbesondere von Schäden an Malschichten und Glassubstanz, sowie der Frage einer möglichen Wiedereindunklung und der Schutzwirkung der zur Konservierung aufgetragenen Beschichtungen, wurden die Felder 1a, 1b, 1c und 3c im September 2000 ausgebaut und untersucht.

Es wurden folgende Untersuchungen durchgeführt:

- Lichtmikroskopische Untersuchungen der Glasoberflächen
- Analysen zur Morphologie und der chemischen Zusammensetzung der Gläser und ihrer Verwitterungsschichten sowie der Schwarzlote
- Messungen der Lichtdurchlässigkeit

Die Ergebnisse wurden dokumentiert und sind in einer Publikation veröffentlicht /12/ und dienen als Grundlage für einen erneuten Vergleich mikroskopischer Oberflächenaufnahmen am Testfeld nll1c.

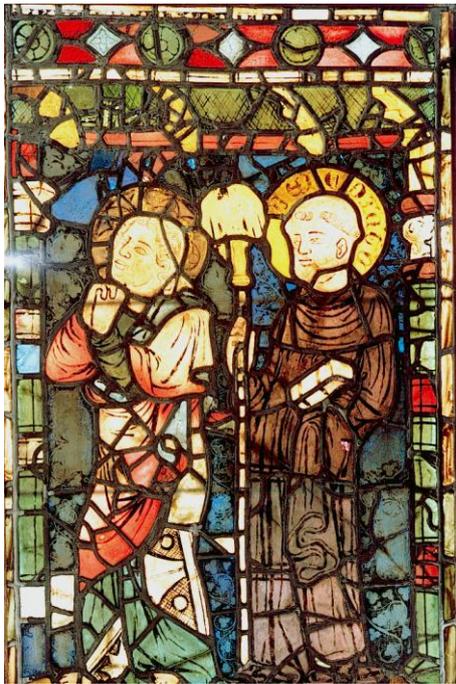


Abb. 133, 134: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nII1c links 1991 nach Hydrazinbehandlung und partieller Ormocer®-Beschichtung; rechts Zustandsaufnahme im eingebauten Zustand 2009

Der Vergleich der Zustandsaufnahmen 1991 und 2009 zeigt, dass vor allem bei den Inkarnatgläser eine leichte Eindunklung zu verzeichnen ist. Allerdings erscheinen auch einige grüne Gläser von 1991 in der in situ-Aufnahme von 2009 bläustichig, was vermutlich auf den Lichteinfall vor Ort zurückzuführen ist und darin vermutlich auch die Ursache für die Unterschiede in beiden Aufnahmen liegt. Einzelne Glassegmente des Feldes 1c wurde im Labor der BAM unter dem Mikroskop begutachtet und fotografisch dokumentiert, um sie mit Detailaufnahmen des Vorzustandes vergleichen zu können. Die Detailaufnahmen erfolgten wie 2000 unter einem Stereomikroskop Typ Wild M3C mit einer digitalen Fotokamera Olympus ColorView II.

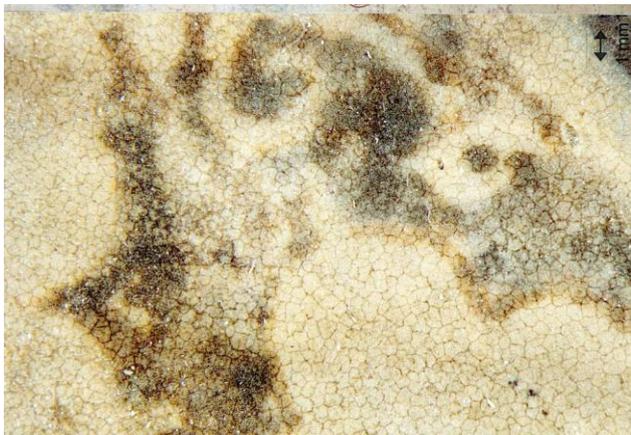


Abb. 135, 136: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nII1c links 2000 Detail Glas 72; rechts Zustand 2010

In beiden Aufnahmen ist das feine Rissnetzwerk in der Glasoberfläche völlig identisch. Mangananreicherungen, die zur Verbräunung der Gläser führen, sind ebenfalls in beiden Aufnahmen an identischen Stellen vorhanden.

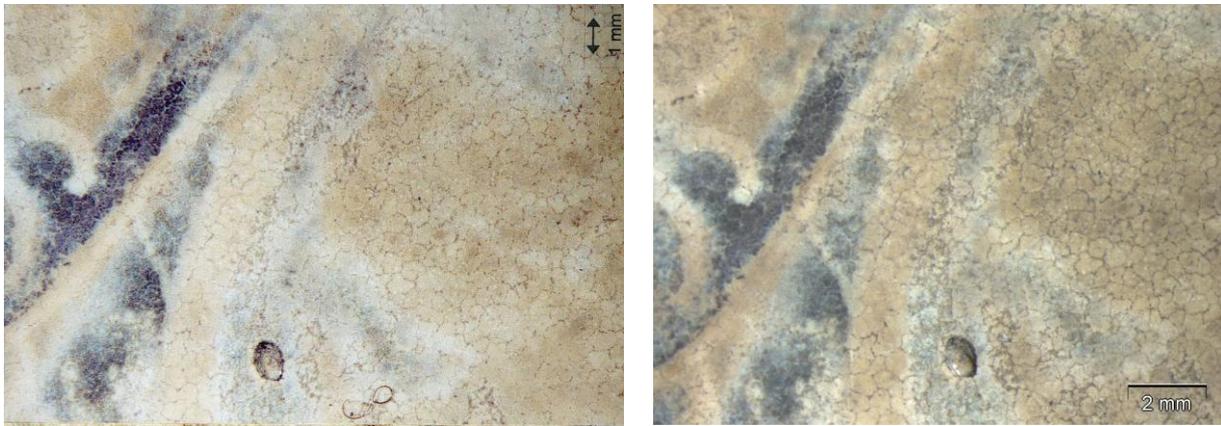


Abb. 137, 138: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nII1c links 2000 Detail Glas 31; rechts Zustand 2010

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

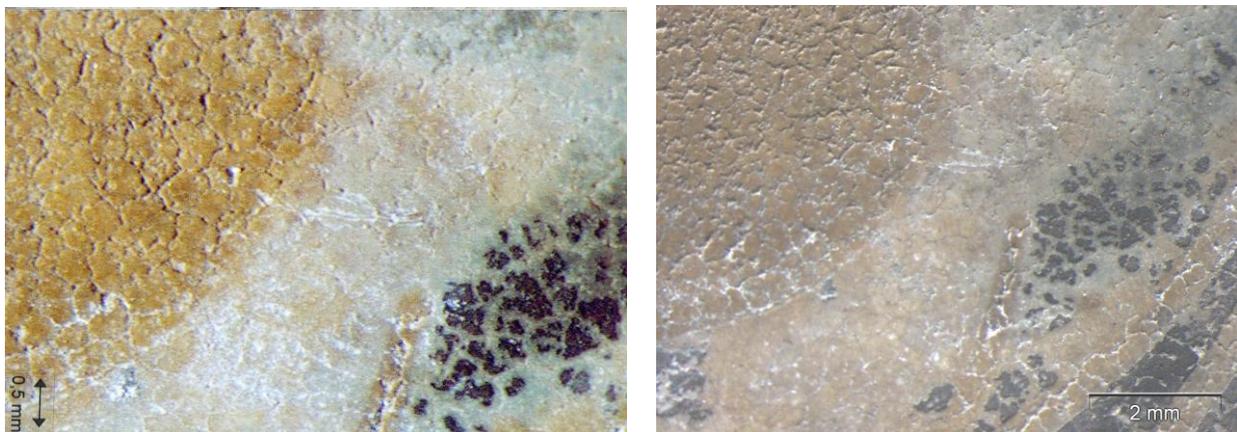


Abb. 139, 140: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nII1c links 2000 Detail Glas 145; rechts Zustand 2010

Auch diese Glasprobe zeigt keine korrosiven Veränderungen im Zeitraum von 2000 bis 2010. Weitere Vergleichsaufnahmen des Oberflächenzustandes aus den Jahren 2000 und 2010 auf der folgenden Seite zeigen, dass keine mikroskopisch sichtbaren Veränderungen auf der Oberfläche der begutachteten Gläser des Testfelds nII1c zu erkennen waren. Verbräunungserscheinungen haben sich jedoch offensichtlich verstärkt.

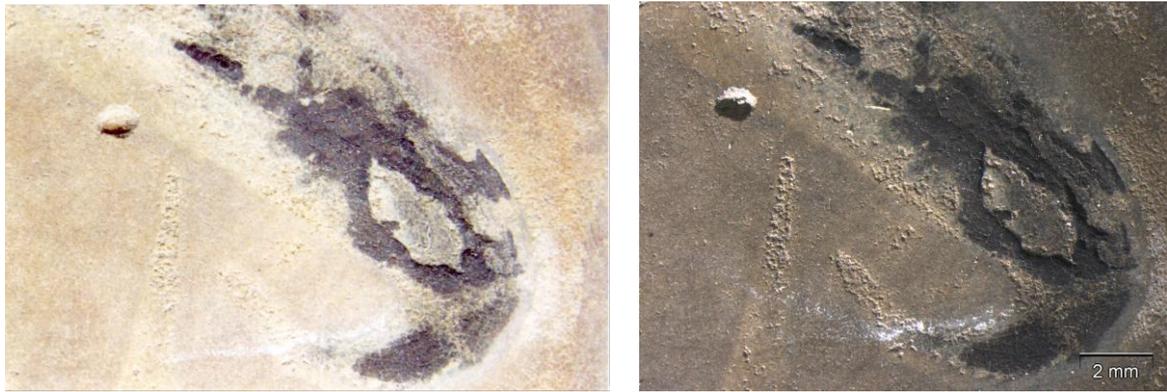


Abb. 141, 142: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nll1c links 2000, Detail Glas 99; rechts Zustand 2010

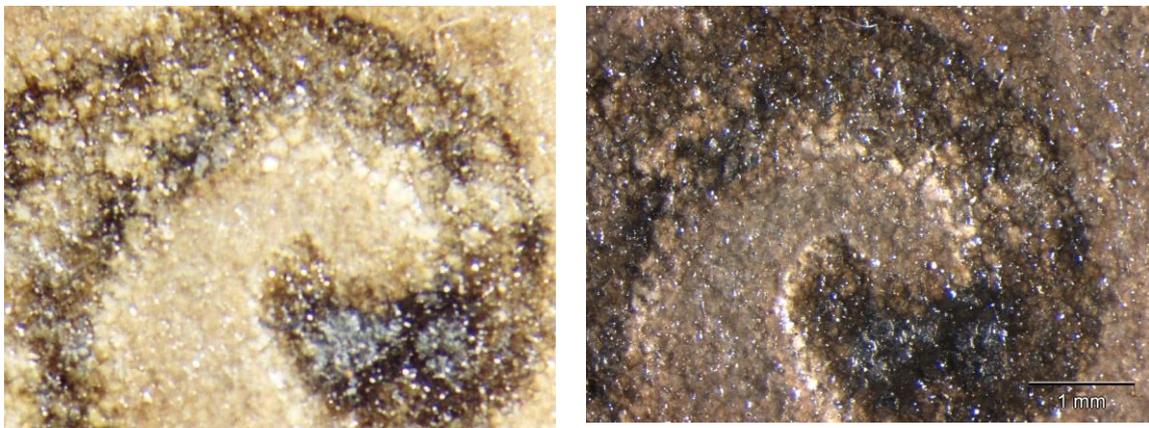


Abb. 143, 144: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nll1c links 2000, Detail Glas 135 mit Ormocer® beschichtet; rechts Zustand 2010

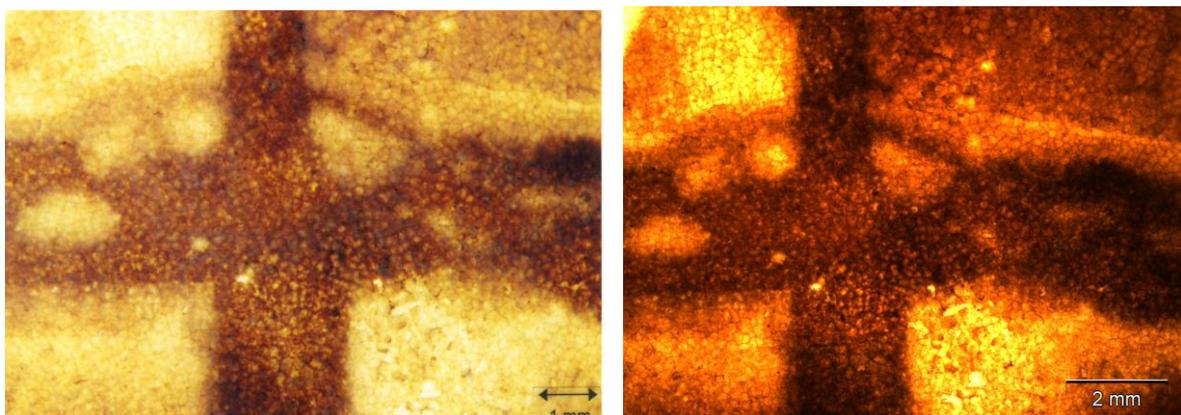


Abb. 145, 146: Marienstern Panschwitz-Kuckau Feld nll1c links 2000, Detail Glas 143; rechts Zustand 2010

3.2 Bewertung der Befunde unter Berücksichtigung materialtechnischer Analysen und klimatischer Messwerte

Die Untersuchungen an einzelnen Feldern und ausgewählten Glassegmenten fanden an den 3 Objekten Stendaler Dom Fenster s V, Dom zu Havelberg Fenster n XI, n VII und Marienstern Panschwitz-Kuckau Fenster nII statt, da von diesen Objekten umfangreiche Vorzustandsdokumentationen aus früheren DBU-Projekten existierten. Um die Ergebnisse auch auf die Glasmalereien des Halberstädter Domes und der Nikolaikirche Quedlinburg zu übertragen, scheint es sinnvoll auch typische Glaszusammensetzungen dieser Objekte miteinander zu vergleichen (Tabelle 8).

Tabelle 8: Chemische Zusammensetzung typischer Gläser in den 5 Objekten (Masse%)

Bestandteil	Glas 1 Stendal sV 4b	Glas 2 Marienstern nII 1c	Glas 3 Havelberg nXI 3a	Glas 4 Halberstadt nIV	Glas 5 Quedlinburg sVI 3a
Na ₂ O	-	-	-	1,5	12,9
MgO	2,4	3,9	3,5	5,2	1,0
Al ₂ O ₃	1,2	1,2	0,9	1,6	1,0
SiO ₂	49,7	43,8	48,7	49,5	71,6
P ₂ O ₅	0,7	1,2	2,1	4,8	-
SO ₃	1,0	0,4	0,1	-	-
K ₂ O	24,6	23,2	17,4	12,2	3,1
CaO	17,7	23,9	25,4	24,4	5,9
MnO	0,6	0,8	1,5	0,8	-
Fe ₂ O ₃	1,0	-	-	-	0,9

Die chemische Zusammensetzung der Gläser unterscheidet sich entsprechend der Datierung der Glasmalereien. In Quedlinburg findet man gegenüber Umwelteinflüssen stabile Gläser, die auf 1908 datiert wurden. Bei allen mittelalterlichen Gläsern schwanken die Zusammensetzungen naturgemäß, so dass man nur eingeschränkt verallgemeinern kann. Im Folgenden soll dennoch eine Bewertung auf der Basis einiger typischer Analysenergebnisse vorgenommen werden. Die Gläser in Stendal von 1430 sind aufgrund des relativ hohen K₂O-Gehaltes bei geringem SiO₂-Anteil sehr korrosionsanfällig und durch Umwelteinflüsse gefährdet. In Marienstern werden die Gläser auf 1370/80 datiert. Sie weisen ebenfalls einen sehr hohen K₂O-Gehalt bei sehr geringem SiO₂-gehalt auf, allerdings liegt das

CaO/ K₂O -Verhältnis bei 1, wodurch sie wieder etwas korrosionsstabiler werden. Die Gläser aus Havelberg (1411) haben ein CaO/ K₂O –Verhältnis >1, d.h. sie sind gegenüber Umweltbedingungen nicht so empfindlich wie die Gläser in Stendal und Marienstern. Das gleiche gilt für die Glasprobe aus dem Dom zu Halberstadt von 1420. Aufgrund der Zusammensetzung der Gläser lässt sich eine Reihenfolge in der Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen aufstellen. Am Korrosionsempfindlichsten sind die Gläser in Stendal und Panschwitz-Kuckau, gefolgt von Havelberg und Halberstadt. Die Gläser in Quedlinburg weisen eine gegenüber Umwelteinflüssen stabile Glaszusammensetzung auf. Betrachtet man die klimatischen Bedingungen, so wurden an den Glasmalereifenstern in Marienstern und Stendal am längsten relative Luftfeuchtwerte >80% registriert, gefolgt von Havelberg und 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, Stendal und Halberstadt. In den Wintermonaten sind diese Änderungsgeschwindigkeiten an den Südfenstern in Stendal und Quedlinburg am stärksten. Am Nordfenster in Havelberg verlaufen die Änderungen aufgrund der Lage mit nur geringer Geschwindigkeit.

Mikroskopisch sichtbare Oberflächenveränderungen wurden an einigen Stellen der Glasproben aus dem Stendaler Dom beobachtet. Ungünstige klimatische Verhältnisse wirken auf gegenüber Umwelteinflüssen sehr empfindliche Gläser und lassen innerhalb von 15 Jahren einen Korrosionsfortschritt erkennen. In Havelberg sind die Gläser 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. Mikroskopisch sichtbare Veränderungen an den Glasproben wurden zwar noch nicht beobachtet, jedoch könnten die Veränderungen am Probenquerschnitt in den rasterelektronischen Aufnahmen 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 infolge der Hydrazinbehandlung eine bis zu 100 µm breite Gelschicht aufweisen. Möglicherweise schützt diese auch unter den extremen Bedingungen in der Klosterkirche vor einer weiteren Verwitterung. Aktuelle Untersuchungen mit dem Elektronenmikroskop am Probenquerschnitt liegen hier leider nicht vor. 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 schadlos widerstehen, allerdings können sich Schäden an den Malschichten einstellen, vor allem wenn zu ihrer Synthese Borax zur Herabsetzung der Einbrenntemperatur benutzt worden ist.

4. Untersuchungen zu Schadensphänomenen an Außenschutzverglasungen aus Verbundsicherheitsglas (VSG)

4.1 VSG als Außenschutzverglasung /Lit DBU-Abschlussbericht/

Außenschutzverglasungen aus Verbundsicherheitsglas sollen die wertvollen historischen Glasmalereien vor schädlichen Umwelteinwirkungen bewahren aber auch vor Vandalismusschäden schützen. Dank dieses Schutzkonzeptes sind die Glasmalereien im Fenster I des Halberstädter Domes weitgehend unversehrt geblieben, nachdem am 30.3.1999 versucht wurde, gewaltsam durch das Fenster in die Kirche einzudringen. Die speziellen Eigenschaften von VSG-Scheiben haben der groben Gewaltanwendung widerstanden und das historische Original vor einer totalen Zerstörung geschützt.

Verbund-Sicherheitsglas (VSG) besteht aus mindestens zwei Glasscheiben, die mit einer elastischen, reißfesten Hochpolymerfolie, meist Poly-Vinyl-Butyral (PVB), so miteinander verbunden sind, dass bei Bruch der Scheiben die Bruchstücke an der Folie haften bleiben. Dies mindert das Risiko von Schnitt- oder Stichverletzungen bei Zerstörung der Scheiben und ermöglicht nach dem Bruch eine Resttragfähigkeit der VSG-Einheit. Als Ausgangsmaterialien werden Flachgläser sowie PVB-Folien der Dicke 0,38 mm verwendet, die auch mehrlagig laminiert werden können. Nach dem Schichten der einzelnen Lagen wird in einem Walzverfahren mit anschließendem Pressen bei einem Druck von etwa 14 bar und einer Temperatur von 140 °C in einem Autoklaven ein dauerhafter Verbund von Glas und Folie geschaffen. In Abhängigkeit von der Art der verwendeten Folien ist auch ein zusätzlicher Schutz vor UV-Strahlung für die hinter der Verglasung befindlichen Kunstgegenstände z.B. aus Holz oder Wandmalereien gegeben. Die spezielle Herstellungstechnologie von VSG führt einerseits zu einem hochfesten Glasverbund, andererseits erfordert es bei der Bearbeitung, insbesondere beim Zuschnitt solcher Gläser für Rechteck- oder Rautenverglasungen, große Erfahrung und eine spezielle Vorgehensweise. Die Scheiben dürfen nicht wie sonst üblich mit dem Diamant angeritzt und sofort komplett gebrochen werden, sondern die Folie im Zwischenraum muss zuvor leicht erhitzt und mit dem Messer geschnitten werden, jedoch ohne dass sie zu stark gedehnt wird. Hierin liegt die besondere Schwierigkeit in der Verarbeitung von Verbundsicherheitsglas.

4.2 Schäden an Außenschutzverglasungen

Verbundsicherheitsglas wurde seit den 1990-er Jahren in von der DBU geförderten modellhaften Restaurierungsprojekten als Außenschutzverglasung eingesetzt /17/. In den untersuchten Objekten wurde VSG mit Ausnahme des Klosters Marienstern als Außenschutzverglasung verwendet. Das Verbundsicherheitsglas wurde zugeschnitten und als Rauten- bzw. Rechteckscheiben verwendet. Die Außenschutzverglasung wurde in allen Fällen als Bleiverglasung ausgeführt und die VSG-Scheiben beidseitig verkittet. Diese Art

der Außenschutzverglasungen hat sich bis heute bewährt und, wie das Beispiel des Domes zu Halberstadt zeigt, Vandalismusschäden an den Glasmalereien wirksam verhindert. Dennoch gibt es einige Beispiele wo seit dem Einbau der VSG-Außenschutzverglasung optische Veränderungen aufgetreten sind.

Die Nikolaikirche Quedlinburg wurde aus diesem Grund in das Evaluierungsprojekt mit aufgenommen. Nicht einmal 10 Jahre nach der Installation der Außenschutzverglasung zeigen fast alle Rautenscheiben am Fenster sVI eine starke optische Beeinträchtigung. Die Schäden treten nur an diesem Fenster an der Südseite auf. Alle übrigen Fenster, die eine Außenschutzverglasung besitzen, zeigen keinerlei Veränderungen.



Abb. 147, 148: Nikolaikirche Quedlinburg, Außenschutzverglasung Fenster sVI mit optischen Beeinträchtigungen

Die Schäden sind dadurch gekennzeichnet, dass offenbar von den Schnittkanten her Medien zwischen beide Gläser des VSG-Verbundes eindringen und eine Trübung verursachen, die das optische Erscheinungsbild verändern. Inwiefern dadurch auch andere Eigenschaften der VSG-Scheiben, wie z.B. ihre Festigkeit oder UV-Absorption verändert wurden, ist nicht bekannt. Ebenfalls unbekannt ist die Herkunft und Zusammensetzung der VSG-Scheiben. Die ausführenden Restaurierungswerkstätten kaufen das Verbundsicherheitsglas üblicherweise im Großhandel ohne Informationen über Produktionsstandort und analytische Angaben.

Visuell ähnliche Schäden am VSG im Anfangsstadium wurden an der Außenschutzverglasung von zwei weiteren Objekten, dem Stendaler Dom, Fenster sV und dem Havelberger Dom am Fenster n XI beobachtet und dokumentiert.



Abb. 149, 150: Probenahme Außenschutzverglasung Fenster sVI Nikolaikirche Quedlinburg



Abb. 151, 152: Visuell sichtbare Beeinträchtigung der Außenschutzverglasung; links: Dom Havelberg, Fenster n XI, rechts: Stendaler Dom, Fenster sV

Für Untersuchungen dieses Schadensphänomens im Labor war eine Probenahme in der Nikolaikirche Quedlinburg möglich. Aus der Außenschutzverglasung wurde in Absprache mit der zuständigen Denkmalpflegebehörde eine Raute von einem Restaurator entnommen. Die

VSG –Scheibe ließ sich relativ schwer aus der Verbleiung lösen, da sie wie gefordert, vollständig verkittet und somit fest in die Bleirute eingefügt war. Beim Herausnehmen ist sie daher einseitig auf der Oberfläche gesprungen.

4.3 Untersuchungen an VSG-Proben

Zur Aufklärung der Schadensphänomene an der Außenschutzverglasung der Nikolaikirche Quedlinburg wurden Simulationsversuche in einem Klimaschrank UV 200 der Firma Weiss Umwelttechnik mit Berechnungsmöglichkeit und der Anwendung von Globalstrahlung durchgeführt. Als Probematerial kamen VSG-Scheiben, die aus unterschiedlichen Glaswerkstätten stammen zum Einsatz. Die Gläser sind in unterschiedlicher Art und Weise zugeschnitten und einige der Proben in eine Verbleiung eingefügt worden. Bei einigen Proben erfolgte eine Verkittung bei anderen nicht. Andere wiederum wurden ohne weitere Präparation der Bewitterung ausgesetzt. Die Originalprobe aus der Nikolaikirche Quedlinburg wurde ebenfalls nach vorhergehender Dokumentation des Ausgangszustandes in die Bewitterungsversuche mit einbezogen. Die Bewitterung der VSG-Scheiben erfolgte im Klimaschrank in Anlehnung an DIN EN 4892-3 2006, Tabelle 4, Zyklus 3 mit kontinuierlicher Bestrahlung und diskontinuierlicher Beregnung mit VE-Wasser.

Tabelle 9: Bewitterungsbedingungen im Klimaschrank UV 200

von	bis	Dauer h	T / °C	% r.F.	
00:00	01:00	01:00	25		VE Wasser
01:00	06:00	05:00	50	< 15%	
06:00	07:00	01:00	25		VE Wasser
07:00	12:00	05:00	50	< 15%	
12:00	13:00	01:00	25		VE Wasser
13:00	18:00	05:00	50	< 15%	
18:00	19:00	01:00	25		VE Wasser
19:00	00:00	05:00	50	< 15%	

Die Gesamtbewitterungsdauer betrug 2000 h. Die Proben wurden vor und nach der Bewitterung mit Hilfe von UV-VIS-Messungen charakterisiert. Während der Bewitterung fand wöchentlich eine visuelle Begutachtung der Proben statt. Veränderungen wurden fotografisch dokumentiert. Weiterhin erfolgten Analysen zur Bestimmung der Glaszusammensetzung und Messungen der Schichtdicke der verwendeten PVB-Folien, sowie Infrarot Untersuchungen (IR-ATR) an PVB- Folien, die zuvor aus dem VSG-Proben heraus präpariert worden sind.

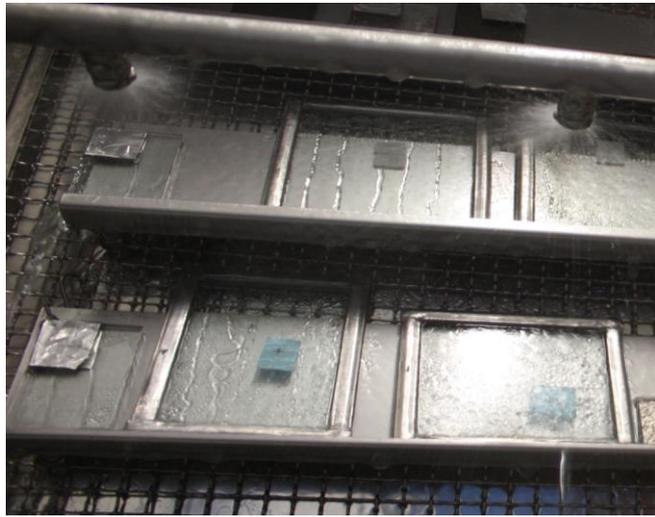


Abb. 153: VSG-Proben im Klimaschrank während der Beregnung

Tabelle 10: VSG-Proben für Bewitterung im Klimaschrank und anschließende Untersuchungen

Proben Nr.	Bemerkung	Vorbehandlung	visuelle Bewertung nach 2000h Bewitterung im Klimaschrank	Auswertung UV-VIS	Untersuchungen mit ATR-IR-Spektroskopie
1 B1	VSG 6mm Oderglas	in Bleirahmen nicht gekittet	Schädigung von einer Ecke ausgehend		
2 B2	VSG 6mm Oderglas	in Bleirahmen verkittet, SB11 Glaserkitt, EGO	keine sichtbaren Schäden		
3 B3	VSG 6mm Oderglas	2 Kanten geschnitten 2 Kanten original	keine sichtbaren Schäden	x	x
4 L1 (L5)	VSG 6mm	in Bleirahmen trocken verkittet, SB11 Glaserkitt, EGO	Schädigung an einer Kante von der Ecke ausgehend		
5 L2 (L6)	VSG 6mm	in Bleirahmen verkittet, flüssiger Kitt mit Halböll	keine sichtbaren Schäden		
6 L3 (L2)	VSG 6mm	4 Kanten geschnitten	keine sichtbaren Schäden	x	x
7 L4 (L1)	VSG 6mm	3 Kanten geschnitten 1 Kante original	keine sichtbaren Schäden	x	x
8 L5 (L4)	VSG 5,3 mm	3 Kanten geschnitten 1 Kante original	keine sichtbaren Schäden	x	
9 L6 (L3)	VSG 5,3 mm	4 Kanten geschnitten	keine sichtbaren Schäden	x	x
10 W1	VSG 6mm	4 Kanten nach Vorschrift geschnitten	keine sichtbaren Schäden		x

		In Bleirahmen mit Kitt			
11 W2	VSG 6mm	4 Kanten nicht nach Vorschrift geschnitten In Bleirahmen verkittet	Schädigung von einer Ecke ausgehend		
12 W4		3 Kanten geschnitten 1 Kante original	keine sichtbaren Schäden	x	
13 Q1	Originalraute mit Schäden	Kitt war bei Entnahme noch sehr dünnflüssig,	geschädigte Bereiche haben sich ausgeweitet,	x	x
14 R1	VSG 2,9 mm	4 Kanten original	keine sichtbaren Schäden	x	
15 R2	VSG 6,8 mm	3 Kanten geschnitten 1 Kante original	keine sichtbaren Schäden	x	x
16 R3	VSG 8,4 mm	3 Kanten geschnitten 1 Kante original	starke Schäden an allen Kanten auch unter abgedeckten Bereich	x	x
17 R4	VSG 6,1 mm	3 Kanten geschnitten 1 Kante original	keine sichtbaren Schäden	x	

4.4 Ergebnisse

- **Bewitterung**

Die Lage der Proben im Klimaschrank wurde wöchentlich so verändert, dass alle VSG-Scheiben den Bedingungen gleichmäßig über den Bewitterungszeitraum ausgesetzt waren. An einigen Proben wurden einzelne Bereiche durch Aluminiumfolie vor UV-Bestrahlung geschützt, um mögliche Schädigungen auf anderen Probebereichen durch die Globalstrahlung untersuchen und vergleichen zu können.

Bereits nach einer Woche Bewitterungsdauer wurden visuelle Veränderungen an der Originalprobe (13) im Bereich des Oberflächenrisses festgestellt. Eindringende Feuchtigkeit verursacht eine Trübung im VSG-Verbund. Im Verlauf der weiteren Bewitterung bleibt diese Trübung bestehen und es kommt zu Veränderungen der Folie in unmittelbarer Umgebung, die zu offensichtlichen Delaminationserscheinungen der PVB-Folie führen.



Abb. 154, 155: Visuell sichtbare Beeinträchtigung der Probe 13 nach Bewitterung im Klimaschrank, links: nach einer Woche, rechts: nach 8 Wochen Bewitterung mit sichtbaren Veränderungen der PVB-Folie

Starke Veränderungen an allen Kanten und auch unter dem mit Aluminiumfolie abgedeckten und somit vor UV-Starhlung geschützten Bereich sind im Verlauf der Bewitterung an der Probe 16 aufgetreten.

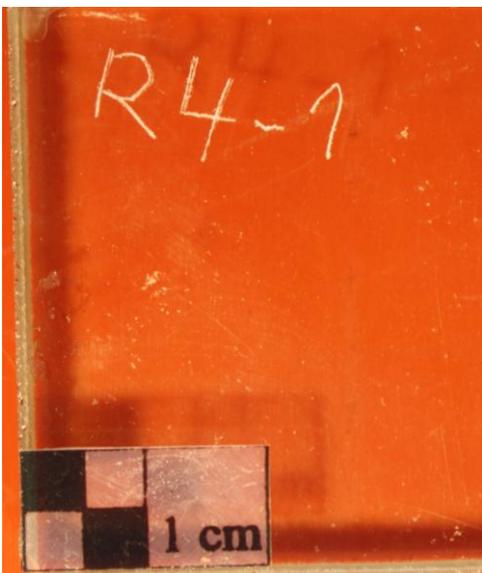


Abb. 156, 157: Visuell sichtbare Veränderung der Probe 16 nach Bewitterung im Klimaschrank, links: Ausgangszustand, rechts: nach 10 Wochen Bewitterung mit sichtbaren Veränderungen der PVB-Folie auch im mit Aluminiumfolie abgedeckten Bereich (unten)

Geringfügige Veränderungen im Anfangsstadium wurden an den Proben 1, 4 und 11 beobachtet. Diese 3 Proben sind durch erfahrene Restauratoren zugeschnitten und in einen Bleirahmen gefasst worden. Die Probe 4 wurde im Blei verkittet, die Probe 1 blieb unverkittet. Die Probe 11 war ebenfalls im Bleirahmen verkittet, allerdings erfolgte der Glaszuschnitt bewusst so, dass die PVB-Folie dabei überdehnt worden ist, mit dem Ziel Schäden aufgrund eines fehlerhaften Glaszuschnittes zu simulieren. Bei den übrigen nicht eingebleiten Proben mit Original- und zugeschnittenen Kanten wurden keine visuell sichtbaren Schäden nach der Bewitterung im Klimaschrank festgestellt.

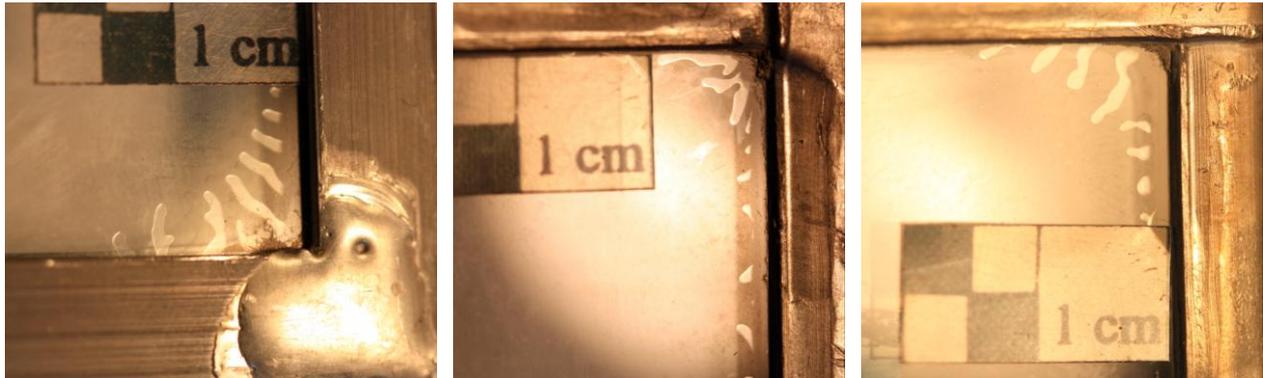


Abb. 158, 159, 160: Visuell sichtbare Veränderung der Proben 1, 4 und 11 nach 12 Wochen Bewitterung im Klimaschrank, links: Probe 1, Mitte: Probe 4; rechts: Probe 11

Die Ergebnisse der Bewitterungsversuche zeigen, dass die an den VSG-Außenschutzverglasungen aufgetretenen Schadensbilder auch im Klimaschrank simuliert werden können. Sie erlauben jedoch noch keine eindeutigen Rückschlüsse zu den Ursachen der Schäden.

- **Glaskanalysen**

Im Environmental Scanning Elektron Microscope (ESEM) wurden mit Hilfe des EDX-Systems die chemische Zusammensetzung ausgewählter VSG-Proben analysiert und die Dicke der PVB-Folien bestimmt. Bei allen analysierten Proben handelt es sich um Soda-Kalk-Gläser, die mit der typischen Floatglaszusammensetzung übereinstimmen (Tabelle 11). Schädigungen, die sich nach der Bewitterung im Klimaschrank ergeben haben, lassen sich somit nicht auf unterschiedliche Glaszusammensetzungen zurückführen. Allerdings gibt es große Unterschiede in der Folienstärke der analysierten Proben. Die verwendeten Folien haben eine Dicke zwischen 330 und 1100 μm . Die VSG-Proben mit Schäden nach der Bewitterung lassen sich in drei Bereiche unterschiedlicher Folienstärke einteilen. Die Folienstärke der Proben 1, 11 und 13 liegt zwischen 325 und 350 μm , bei Probe 4 zwischen 360 und 400 μm und die der Probe 16 bei 680 μm .

Tabelle 11: Glaszusammensetzung von VSG-Proben in Masse% im Vergleich zur Floatglaszusammensetzung

Proben Nr.	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Folienstärke [µm]
1	72,1	14,5	0,3	7,8	4,1	0,8	0,0	0,0	0,4	338
7	72,2	14,1	0,5	8,0	4,4	0,8	0,0	0,0	0,0	370
6	71,5	14,6	0,5	8,0	4,0	1,1	0,0	0,0	0,3	355
5	72,8	13,7	0,2	8,1	4,2	0,5	0,0	0,0	0,4	340
4	73,4	12,8	0,3	8,1	3,8	0,8	0,0	0,5	0,3	360-400
11	72,5	14,3	0,2	8,2	3,8	0,8	0,2	0,0	0,1	325
13	72,2	13,9	0,6	8,2	4,0	0,9	0,1	0,0	0,1	349
14	72,9	16,0	0,4	4,7	4,4	1,4	0,0	0,0	0,2	540-580
15	71,7	14,3	0,4	8,1	4,0	1,2	0,0	0,0	0,3	1100
16	71,4	14,3	0,1	7,9	4,4	0,8	0,7	0,0	0,3	680
17	72,4	14,3	0,2	7,6	4,0	0,9	0,4	0,0	0,2	330
Floatglas	72,5	13,4	0,5	8,9	3,2	1,1				

• UV-VIS-Untersuchungen

Die VSG-Scheiben wurden vor (Abb. 161) und nach der Bewitterung (Abb. 162) mit Hilfe von UV-VIS-Untersuchungen charakterisiert. Insbesondere sollen damit Änderungen in den PVB-Folien infolge der Globalstrahlung erfasst werden. Die Transmissionsspektren zeigen, dass der überwiegende Teil der Proben eine steile Absorptionskante im Wellenlängenbereich zwischen 370-380 nm aufweist. Alle Folien sind in der Lage, die UV-Strahlung zu absorbieren. Bei den Proben 14 und 16 verschiebt sich die Absorptionskante zu höheren Wellenlängen bis etwa 410 nm. Die Transmission im sichtbaren Bereich liegt mit Ausnahme der Proben 8 und 9 zwischen 80 und 90%. Aufgrund der Färbung der VSG-Proben 8 und 9 erreicht die Transparenz im sichtbaren Bereich nur Werte um 50%. Die Veränderungen nach 2000 h Bewitterung im Klimaschrank unter Einwirkung von Globalstrahlung ist anhand der UV-VIS-Spektren in Abb. 162 dargestellt. Einige Proben wurden an unterschiedlichen Bereichen gemessen, wie z.B. der mit Aluminiumfolie abgedeckte Bereich (unbehandelt) bzw. Bereiche mit Delaminations- und Trübungserscheinungen. Generell wird deutlich, dass sich die Absorptionskanten zu höheren Wellenlängen hin verschoben haben und nicht mehr so eng beieinander liegen, wie noch in den Ausgangsspektren. Der Transmissionsgrad im sichtbaren Wellenlängenbereich hat ebenfalls etwas abgenommen. Deutliche Transmissionsminderungen wurden bei Probe 16 und Probe 13 festgestellt, beide VSG-Scheiben zeigten auch die stärksten optischen Veränderungen nach der Bewitterung im Klimaschrank. In den folgenden Diagrammen sind die UV-VIS-Spektren der VSG-Proben (1, 4, 11, 13, 16), bei denen optische Veränderungen nach Bewitterung festgestellt wurden, gegenübergestellt.

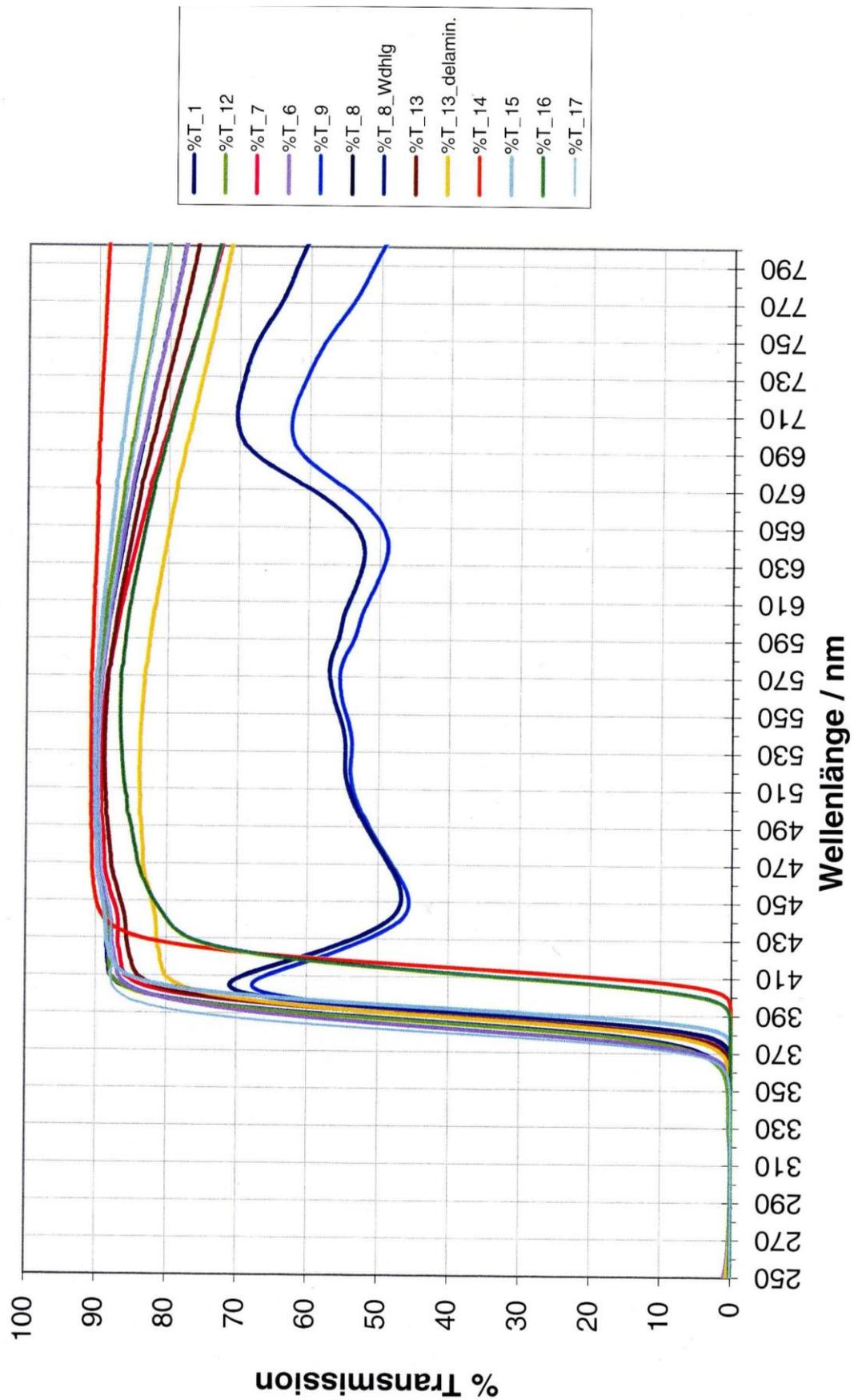


Abb. 161: UV-VIS-Spektrum der Proben vor Bewitterung im Klimaschrank

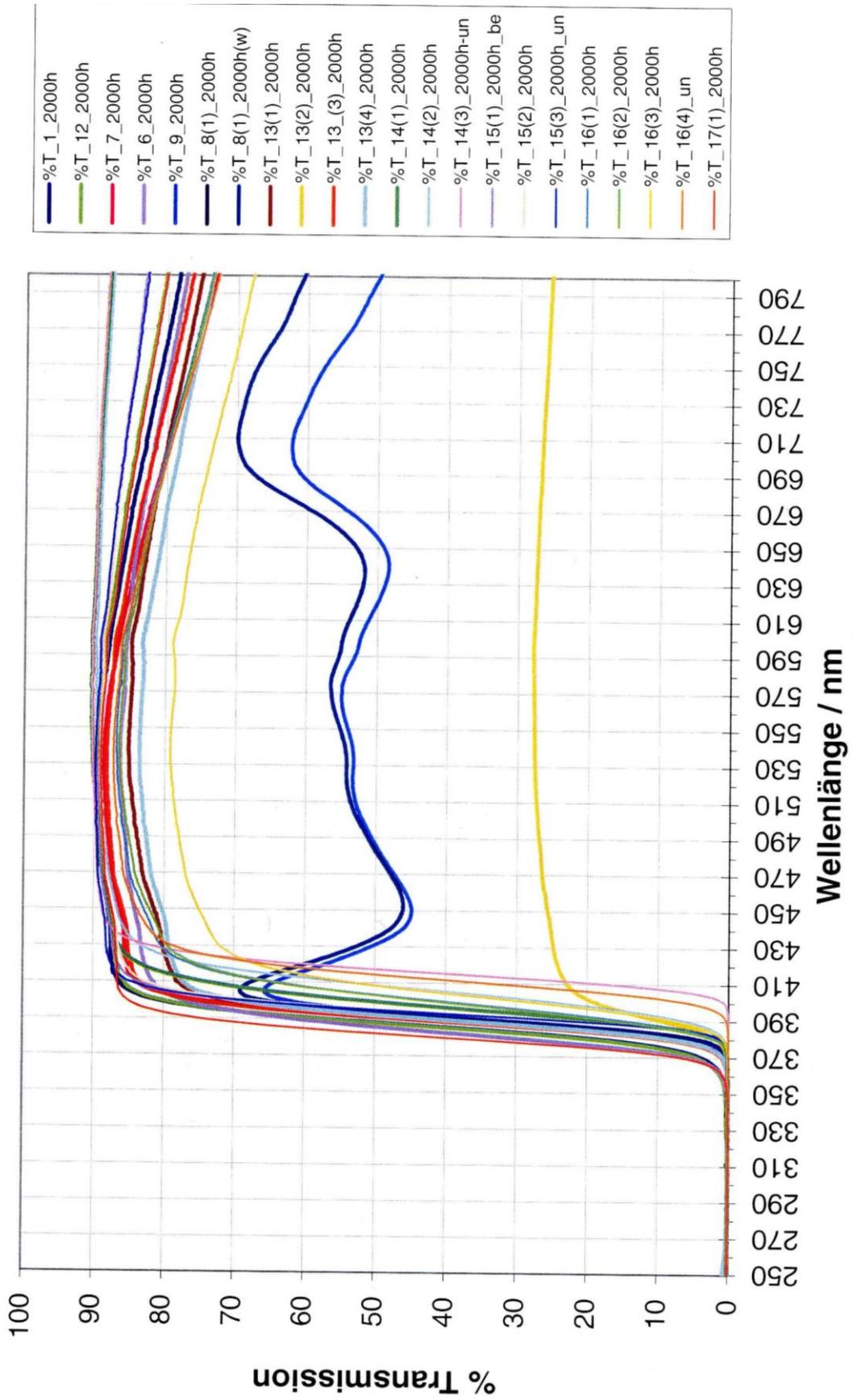


Abb. 162: UV-VIS-Spektrum der Proben nach Bewitterung im Klimaschrank

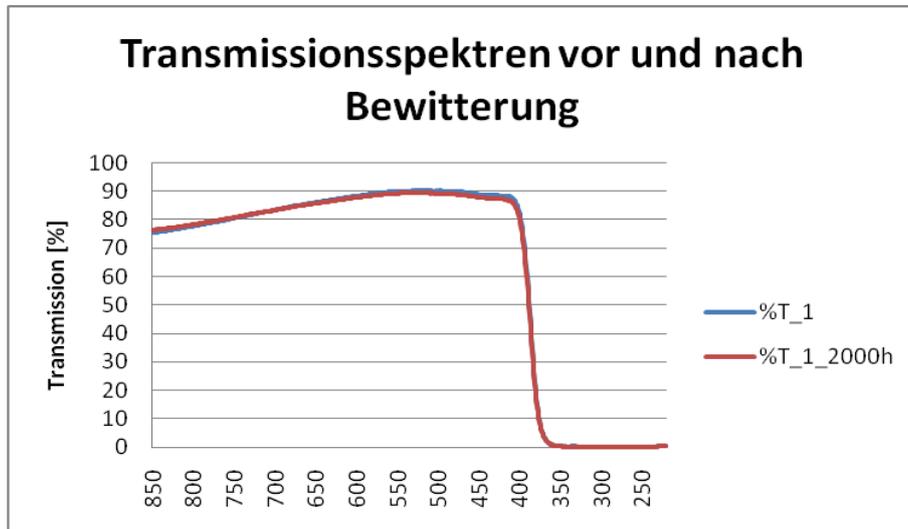


Abb. 163: UV-VIS-Spektrum der Probe 1 vor (blau) und nach (rot) Bewitterung im Klimaschrank

Die Kurven sind nahezu identisch. Die Absorptionskante hat sich nicht verschoben. Die PVB-Folie ist im untersuchten Bereich unverändert. Die UV-VIS-Messungen erfolgten in der Mitte der Probe.

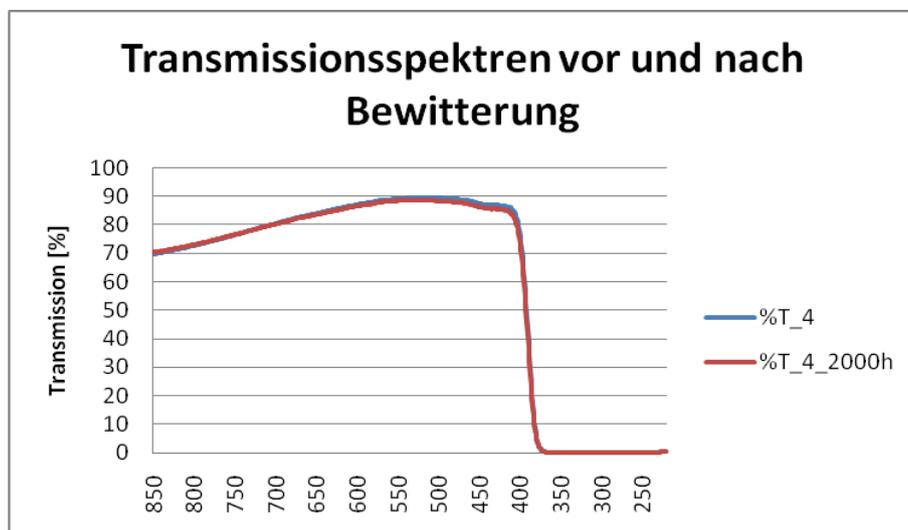


Abb. 164: UV-VIS-Spektrum der Probe 4 vor (blau) und nach (rot) Bewitterung im Klimaschrank

Die Kurven sind nahezu identisch. Die Absorptionskante hat sich nicht verschoben. Die PVB-Folie ist im untersuchten Bereich unverändert. Die UV-VIS-Messungen erfolgten in der Mitte der Probe.

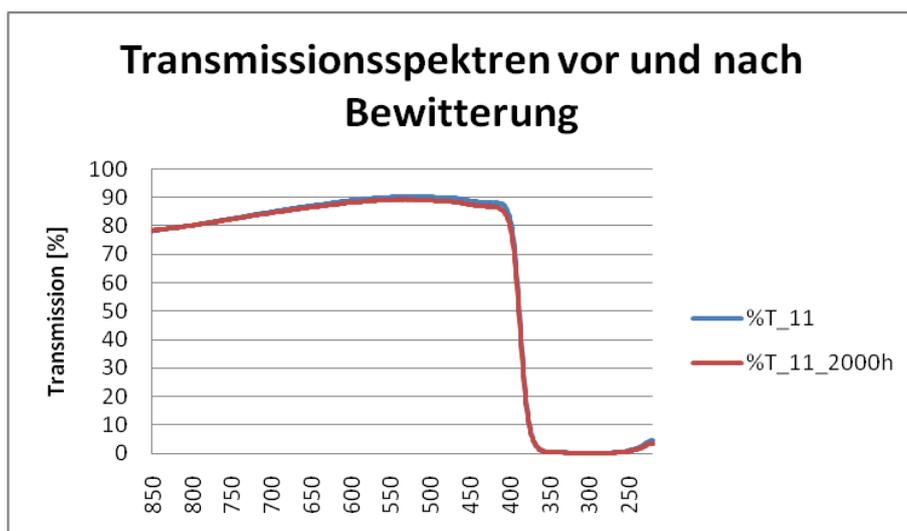


Abb. 165: UV-VIS-Spektrum der Probe 11 vor (blau) und nach (rot) Bewitterung im Klimaschrank

Bei dieser Probe konnte ebenfalls wie bei Probe 1 und 4 nicht unmittelbar in optisch veränderten Bereich gemessen werden, sondern eine repräsentative Stelle in der Mitte der Probe. Vor- und Nachzustand sind somit nahezu identisch.

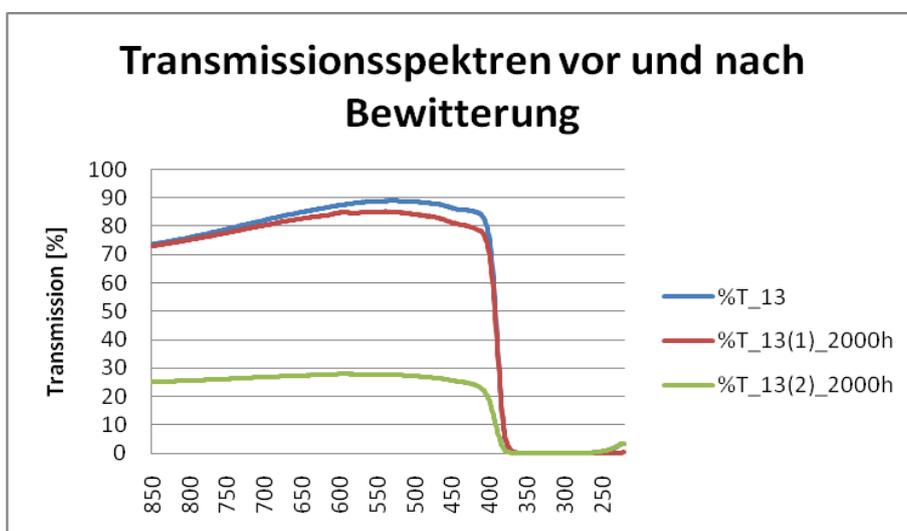


Abb. 166: UV-VIS-Spektrum der Probe 13 vor (blau) und nach (rot) Bewitterung im Klimaschrank, grün Bereich mit starker Eintrübung, vergl. Abb. 155, 156

In dem optisch stark veränderten Bereich der Probe 13 verringert sich der Transmissionsgrad im sichtbaren Wellenlängenbereich deutlich unter 30 %. Die übrigen optisch nicht veränderten Bereiche zeigen nur einen geringfügigen Transmissionsverlust. Die

Absorptionskante bleibt dort im Vergleich mit dem Ausgangsspektrum unverändert, während sie sich im optisch getrübten Bereich leicht zu höheren Wellenzahlen verschiebt.

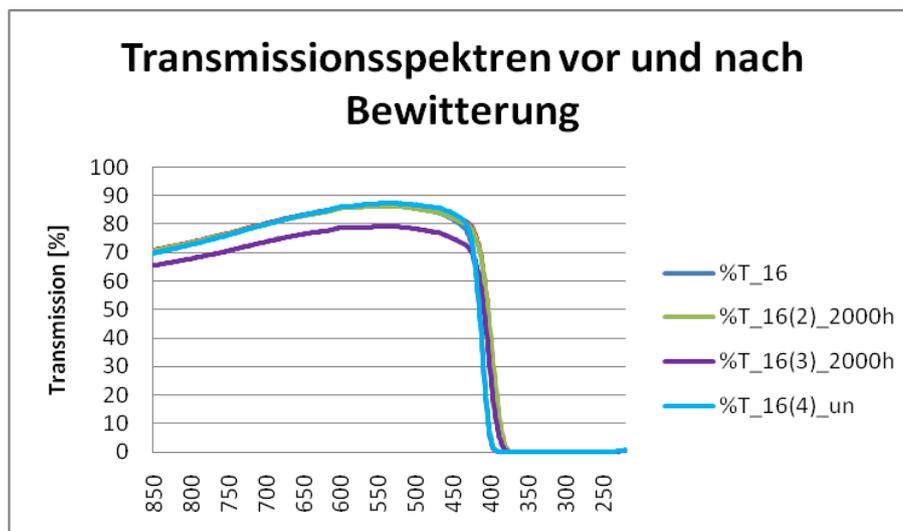


Abb. 167: UV-VIS-Spektrum der Probe 16 vor (blau) und nach (rot) Bewitterung im Klimaschrank, vgl. Abb. 157, 158

Die Probe 16 ist an mehreren Stellen untersucht worden. Der Ausgangszustand 16 und der Bereich mit Abdeckung durch Aluminiumfolie 16(4) sind identisch. Der Bereich mit visuell sichtbarer Eintrübung des VSG 16(3) zeigt ein deutlich verringertes Transmissionsverhalten und eine Verschiebung der Absorptionskante. Im visuell unveränderten Probestrich 16(2) sind keine Veränderungen im Transmissionsgrad, jedoch eine Verschiebung der UV-Absorptionskante zu kleineren Wellenlängen hin, ähnlich wie im Bereich 16(3) zu erkennen. Damit verringert sich bei dieser Probe durch die Bewitterung der Bereich der UV-Absorption und verschiebt sich in entgegengesetzter Richtung im Vergleich zu Probe 13.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass sich bei den durch die Bewitterung im Klimaschrank optisch veränderten Proben keine einheitlichen Tendenzen in der Auswertung der UV-VIS-Spektren ergeben. Während die Spektren der Proben 1, 4 und 11 nahezu identisch sind, verursachen Trübungen im VSG einen Transparenzverlust und Verschiebungen der UV-Absorptionskante, allerdings bei unterschiedlichen VSG-Proben, vermutlich aufgrund verschiedener PVB-Folien, in unterschiedliche Richtung.

- **IR-ATR-Untersuchungen**

Zur weiteren Charakterisierung der PVB-Folien und näheren Identifizierung der Schäden erfolgten daher an den Proben 1, 4, 5, 6, 7, 13, 15, 16 und 17 Infrarot (IR-ATR) Untersuchungen an PVB-Folien, die aus dem VSG-Verbund manuell heraus präpariert

worden sind. Bruchstücke der Folie wurden im Nicolet 6700 FT-IR Spektrometer (DTGS KBr Detektor), Smart ORBIT Einfach – Reflexion Diamant ATR untersucht. Zur Messung wurde der ATR-Diamant-Kristall mit definiertem Druck an das Material gepresst und das sich durch abgeschwächte Totalreflexion ergebende Spektrum aufgenommen.

Die Identifizierung von Materialien erfolgte durch Vergleich mit Bibliotheksspektren.

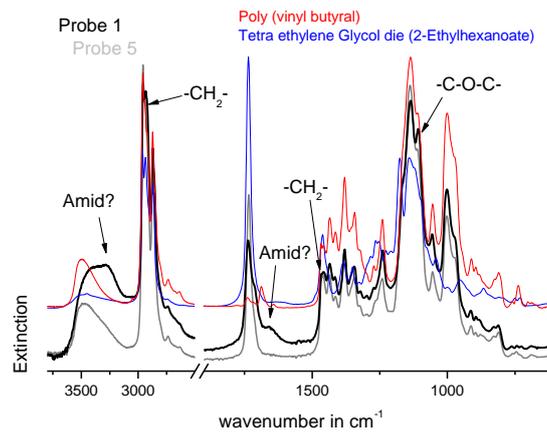


Abb. 168: FT-IR-Spektrum der Proben 1 und 5 im Vergleich zu Bibliotheksspektren

Alle untersuchten Materialien basieren auf PVB, leichte Abweichungen treten bei der relativen Signalintensität auf.

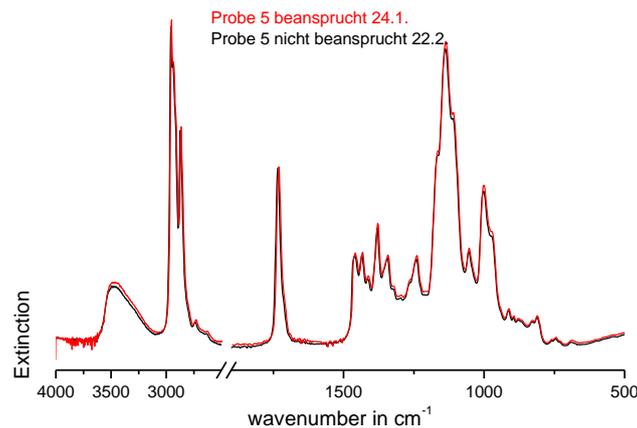


Abb. 169: FT-IR-Spektrum der Probe 5 im Vergleich vor und nach der Bewitterung im Klimaschrank

Die Spektren der Proben 4, 5, 6, 7, 15 und 17 zeigen keinerlei Veränderungen nach der Bewitterung. Signifikante Veränderungen wurden in den Spektren der Proben 1 und 16 festgestellt, die wahrscheinlich auf Wasser und eingelagerte Oxid Spezies zurückzuführen sind.

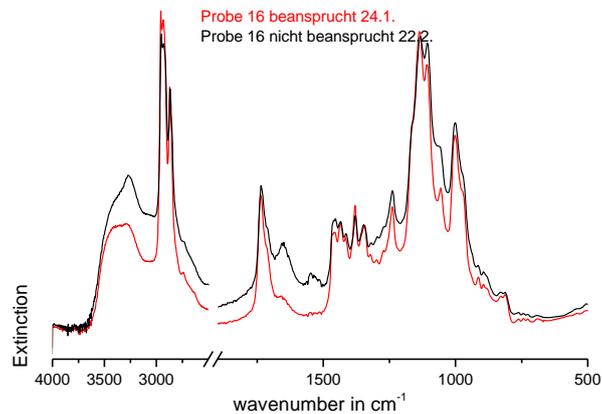


Abb. 170: FT-IR-Spektrum der Probe 16 im Vergleich vor und nach der Bewitterung im Klimaschrank

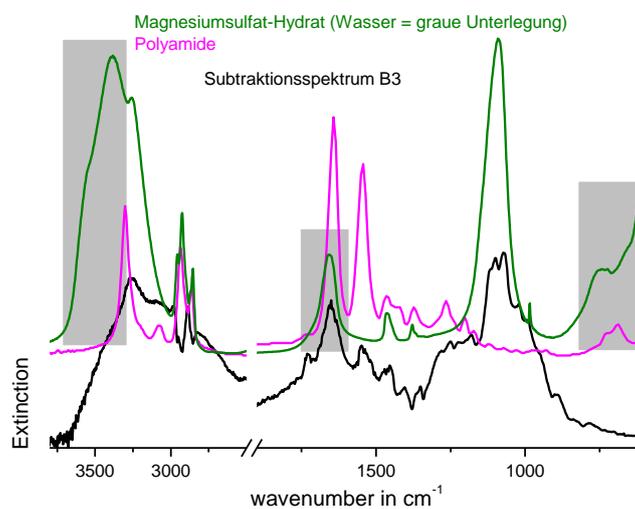


Abb. 171: FT-IR-Spektrum der Probe 1 im Vergleich vor und nach der Bewitterung im Klimaschrank, mit charakteristischen Banden für Wassereinlagerung

Deutliche Unterschiede zu den Spektren der veränderten Proben 1 und 16 zeigt das Spektrum der Probe 13 (Außenschutzverglasung Quedlinburg)

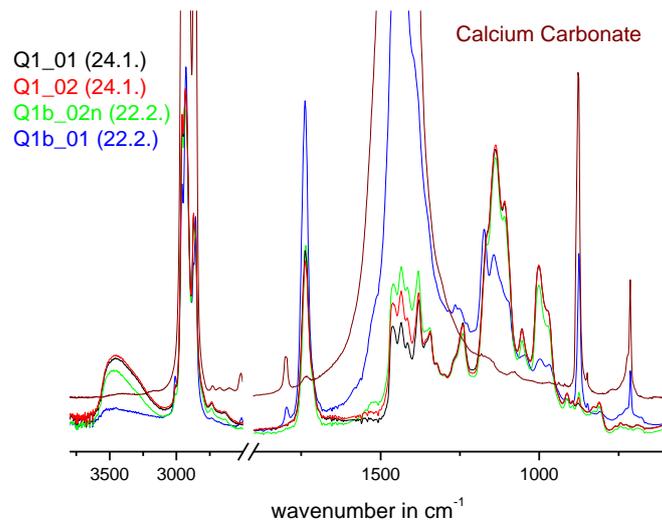


Abb. 172: FT-IR-Spektrum der Probe 13 im Vergleich vor und nach der Bewitterung im Klimaschrank mit charakteristischen Banden für Calciumkarbonat

Die Probe 13 zeigt zusätzliche Signale eines Additiv's. Nach Beanspruchung im Klimaschrank kann anhand der Signale Calciumkarbonat auf der PVB-Folie nachgewiesen werden, welches vermutlich auch die optische Trübung verursacht. Diese PVB-Folie unterscheidet sich in der Zusammensetzung vermutlich von den übrigen, da zusätzliche Banden auftreten (z.B ungesättigte Carbonsäuren).

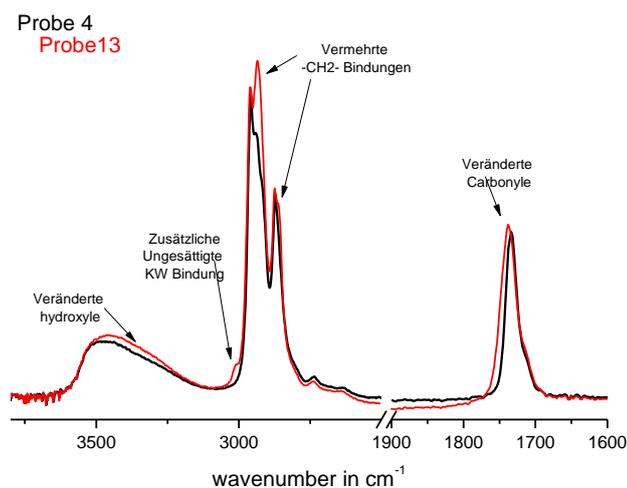


Abb. 173: FT-IR-Spektrum der Proben 4 und 13 im Vergleich

Für die Bildung von Calciumcarbonat durch das Eindringen von Wasser in den Zwischenraum von Glas und Folie lässt sich vermuten, dass durch Auslaugungsprozesse des Glases Calciumionen freigesetzt werden, die mit Carboxylaten der Folie in basischer Umgebung reagieren. Die genaue Aufklärung dieser Vorgänge erfordert jedoch weitere Untersuchungen.

4.5 Zusammenfassende Bewertung

Die Bearbeitung von Verbundsicherheitsglas zu Rauten- oder Rechteckscheiben für Außenschutzverglasungen erfordert sehr große Erfahrung und eine präzise Vorgehensweise beim Zuschnitt des VSG. Bewusst schlecht geschnittene VSG-Proben haben im Bewitterungsexperiment Schäden gezeigt, die auch an Außenschutzverglasungen einiger Kirchen sichtbar waren. Allerdings traten diese Schäden auch im Laborversuch an Proben auf, die nicht geschnitten worden sind, sondern noch über Originalkanten aus dem Herstellungsprozess verfügten. In beiden Fällen konnte jedoch die Einlagerung von Wasser eindeutig nachgewiesen werden. Eine Veränderung der Absorptionskante wurde dabei ebenfalls festgestellt. Die Probe aus der Außenschutzverglasung des Fensters s VI der Nikolaikirche Quedlinburg zeigte im Bewitterungsexperiment noch darüber hinaus gehende Schadensphänomene. Durch einen Riss auf der Oberfläche konnte Feuchtigkeit in den Zwischenraum Glas/Folie eindringen und so kam es aufgrund der offensichtlich von den übrigen PVB-Folien abweichenden chemischen Zusammensetzung der Folie zur Reaktionen, die Calciumcarbonat entstehen lassen. Calciumcarbonat führt wiederum zu einer sichtbaren Trübung der Oberfläche und verringert damit die Transparenz des Glases deutlich.

Es kann daher nur vermutet werden, dass die Schäden an der Außenschutzverglasung auf ein Zusammentreffen mehrerer Unzulänglichkeiten (Folienqualität, Verarbeitung, Zuschnitt, Verkittung) zurückzuführen sind.

Inwiefern auch die mechanischen Eigenschaften der VSG-Scheibe dadurch beeinträchtigt werden, bedarf weiterer umfangreicher Untersuchungen.

5. Untersuchung der Staubbelastung im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasungen

5.1 Messprinzip und Probenahme

Die Staubprobenahme im Stendaler und im Havelberger Dom erfolgte mit Hilfe eines Kaskadenimpaktors. Mit diesem Gerät lassen sich Partikel auffangen, entsprechend ihrer Größe auftrennen und auf Substrate deponieren. Der verwendete Dekati DLPI (Dekati Low Pressure Impactor) klassifiziert die Aerosolpartikel nach ihrer aerodynamischen Größe in 13 Größenklassen.

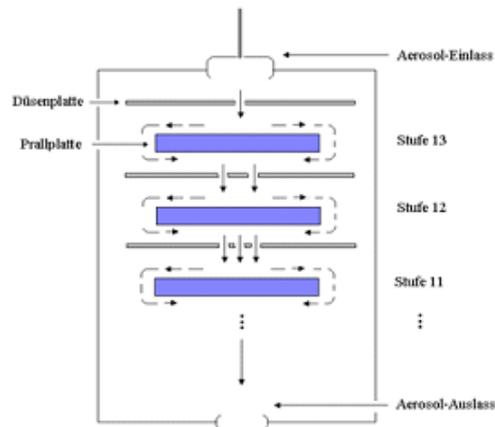


Abb. 174: Querschnitt durch einen Impaktor

Durch ein angelegtes Vakuum wird Umgebungsluft angesaugt. Es kommt zu einer laminaren Strömung, die vom Aerosol-Einlass über die 13 Stufen bis hin zum Aerosol-Auslass geht. Die Strömung führt zur ersten Düsenplatte (PM 10-Düsenplatte). Diese erste Düsenplatte dient zusammen mit der PM 10-Prallplatte als Vorabscheider für grobe Partikel, der Trenndurchmesser $d_{(ae)50}$ liegt bei $10\ \mu\text{m}$ /18/. Die aufgefundenen Partikel entsprechen somit der PM 10 Fraktion. Die erste Düse der obersten Stufe, besitzt deswegen die größte Bohrung. Große (träge) Partikel können der gekrümmten Luftströmung nicht folgen und werden auf die Prallplatte abgeschieden /19/. Leichtere Partikel werden mit der Strömung weitergetragen und durchqueren die zweite Düse, die eine deutlich feinere Bohrung besitzt. Auf das zweite Aufpralltellerchen gelangen somit deutlich kleinere und leichtere Partikel. So nimmt mit jeder Stufe die Größe des abgeschiedenen Deponats ab - mit kleiner werdender Stufenzahl werden auch die abgeschiedenen Partikel immer kleiner. Durch die laminare Strömung im Kaskadenimpaktor erhalten die Partikel eine aerodynamische Klassifizierung, womit sie einer konkreten Größe zugewiesen werden können, nach der man sie unterscheidet. Der Impaktor erlaubt somit eine Fraktionierung der Partikel, bedingt durch die verschiedenen Größen der Partikel im polydispersen Aerosol.

Je nachdem wie man mit der Probe weiter verfährt, eignen sich unterschiedliche Folien um das Deponat abzuschneiden. Die Folien werden auf die Prallplättchen mit Hilfe eines Klemmsystems eingespannt, so dass auch bei hohen Luftstromgeschwindigkeit im Impaktor während eines Laufs die Folien an der Halterung bleiben und sich das Deponat an den

entsprechenden Stellen abscheiden kann. In diesem speziellen Fall wurden runde Aluminium-Plättchen verwendet. Nach dem Applizieren der Probe werden die Alu-Folien von der Prallplatte heruntergenommen und sorgfältig zur Probenseite hin zusammen gefaltet. Der Impaktor ist modular aufgebaut, die einzelnen Stufen lassen sich zusammenstecken und mit Dichtungsringen abdichten. In Abb. 175 erkennt man die einzelnen Stufen.

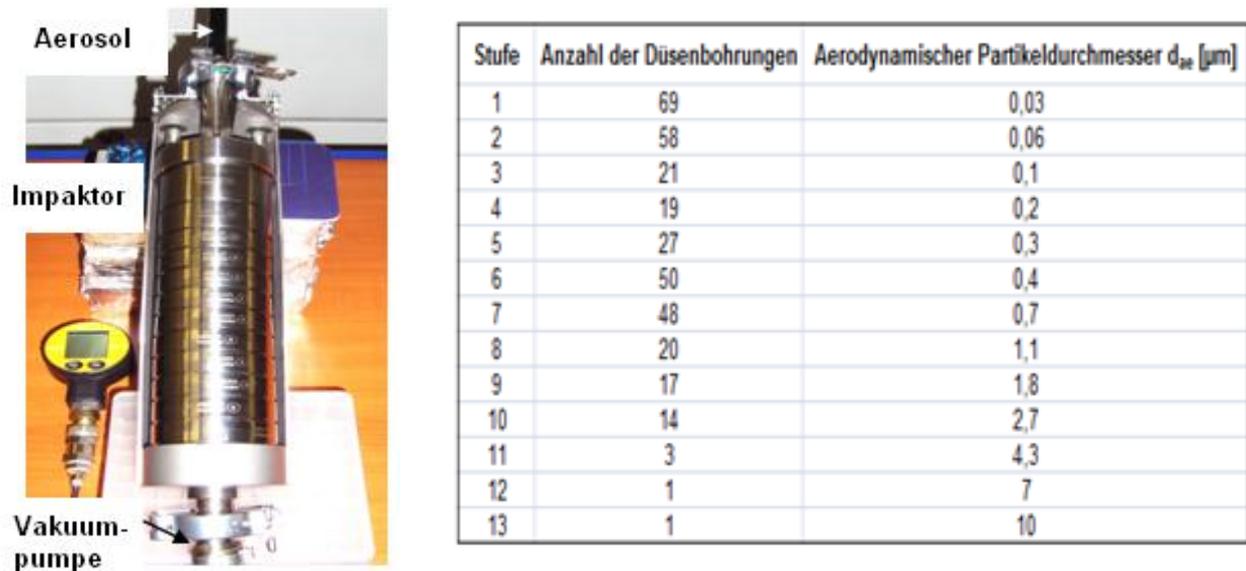


Abb. 175: Abbildung eines Impaktors und Aufteilung der Partikel zur jeweiligen Stufe

Die Partikel durchlaufen die einzelnen „Etage“ eines 13-stufigen Systems. Der Impaktor klassifiziert die Partikel nach ihrer aerodynamischen Masse $d_{ae}50$ und trennt sie in einem Grössenbereich von 10 μm auf der dreizehnten Stufe bis hin zu 0,03 μm auf der ersten Stufe. Bild... zeigt die einzelnen Module und die gewonnenen größen aufgelöste Aerosolproben.

Die einzelnen Stufen des Impaktors werden vorsichtig abgelöst, um die gesampelten Proben keiner mechanischen Belastung zu unterziehen.

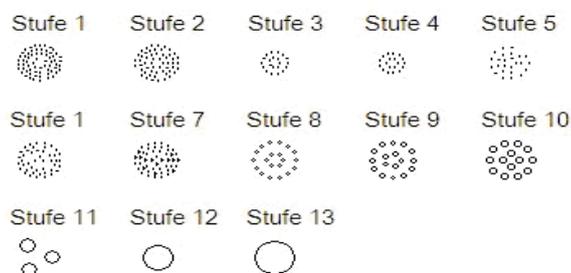


Abb. 176: Düsenmuster eines 13-stufigen Impaktors

Beim Vergleich der einzelnen Stufen der Aluminium-Folien, erkennt man rein visuell schon einen Unterschied, die die Düsenbohrungen der einzelnen Stufen hinterlassen haben. Abb.

176 zeigt die theoretischen Muster für jede einzelne Stufe. In Abb. 179 erkennt man die Staubablagerungen auf der Alu-Folie für Stufe 4 des Kaskadenimpaktors.

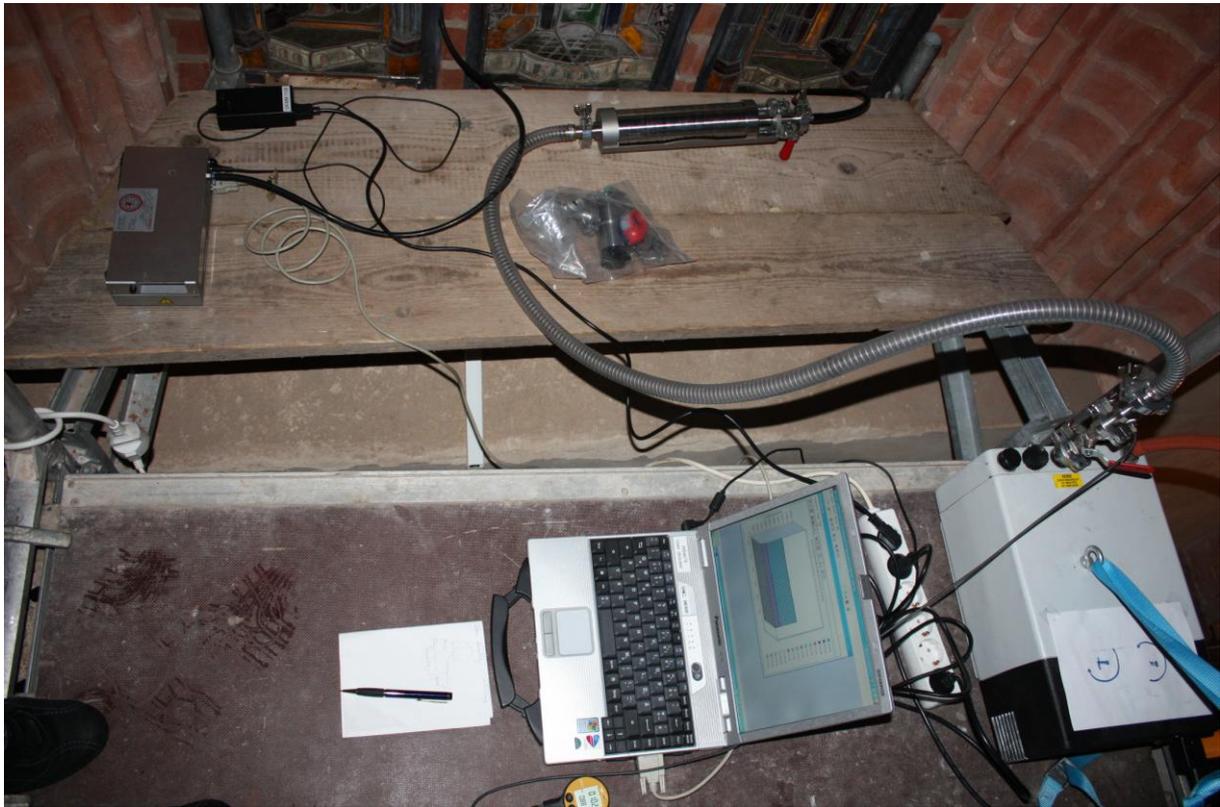


Abb. 177: Staubprobenahme mit dem Kaskadenimpaktor im Havelberger Dom am Fenster n IX im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung



Abb. 178, 179: Stufen des Kaskadenimpaktors nach Staubprobenahme; rechts Detail Staubablagerungen auf Stufe 4

5.2 Analysenmethoden

Neben licht- und elektronenmikroskopischen Abbildungen erfolgte die Analyse der Partikelablagerungen auf den einzelnen Stufen mit Hilfe des EDX-Systems im ESEM. Zum Vergleich mit der Probenahme aus der Luft mit Hilfe des Kaskadenimpaktors, wurden sowohl im Stendaler- und Havelberger Dom als auch im Dom zu Halberstadt, in der Klosterkirche Marienstern Panschwitz-Kuckau und in der Nikolaikirche Quedlinburg weitere Proben von der Rückseite originaler Glasmalereifelder mit Hilfe von Kohlenstoffträgern genommen, die auch analytisch im ESEM-EDX ausgewertet wurden. Mit Ausnahme von Marienstern erfolgte in allen Objekten an den Fenstern, an denen Klimamessungen durchgeführt wurden die Exposition von Si-Wafern im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung. Es handelt sich dabei um ca. 25 x 20 mm große Siliziumscheiben, die als Staubsammler dienen. Die Staubablagerungen während eines Jahres Expositionsdauer konnten so gesammelt werden und wurden ebenfalls mit dem ESEM-EDX analysiert. Sowohl die ESEM- als auch die EDX-Untersuchungen wurden im „High - Vakuum“ Modus des Mikroskops vorgenommen. Leitfähig beschichtet wurden die Proben mit Kohlenstoff. Wenn nicht anders ausgewiesen wurden Punktmessungen durchgeführt.

Auf den folgenden Seiten ist die Auswertung der unterschiedlichen Staubprobenahme für die jeweils untersuchten Objekte zusammengestellt.

5.3 Detailergebnisse

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit dem Kaskadenimpaktor im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung am Fenster sV im Stendaler Dom

Stufe 12:



Abb. 180: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

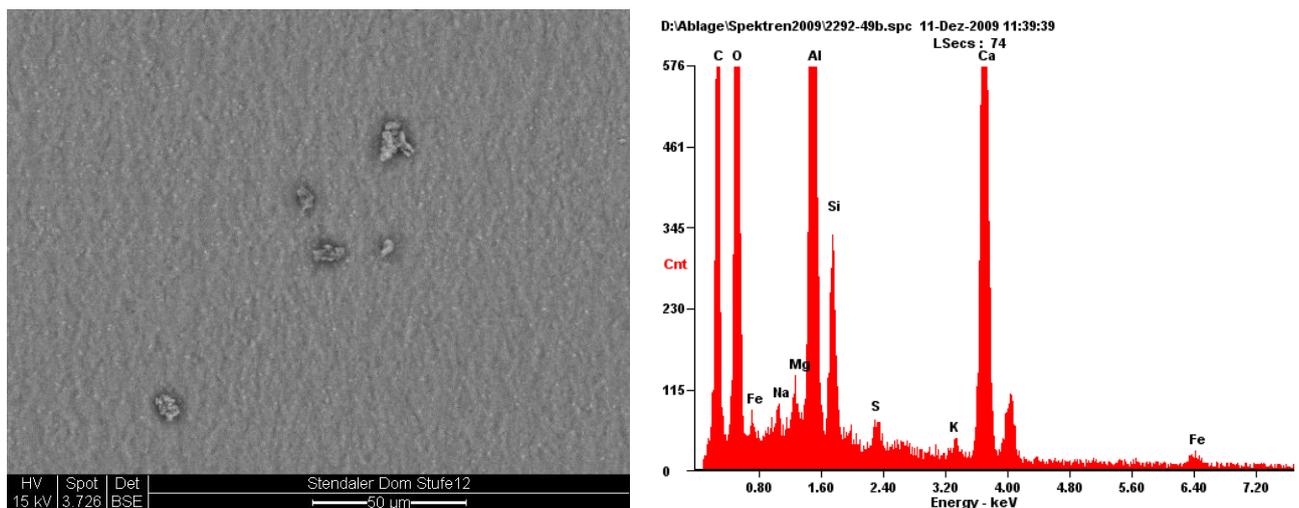


Abb. 181, 182: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)

Stufe 11:

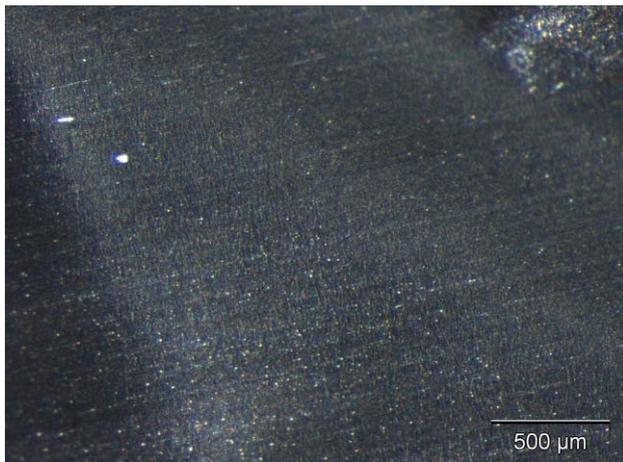


Abb. 183: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

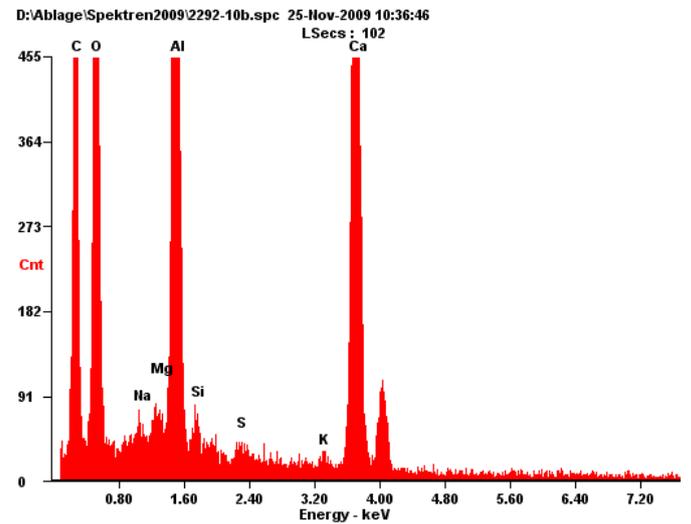
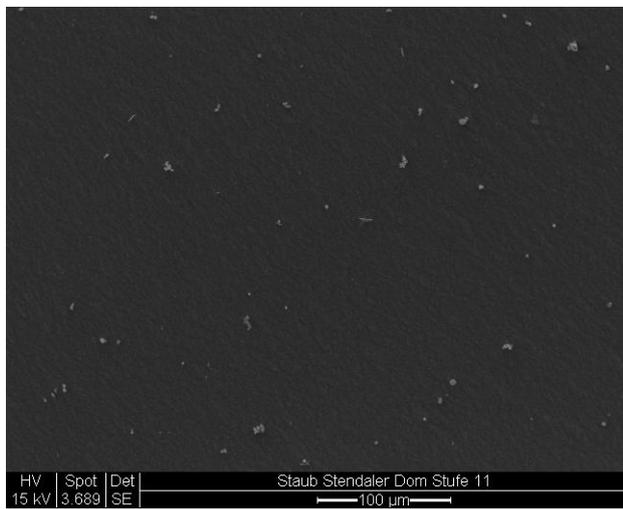
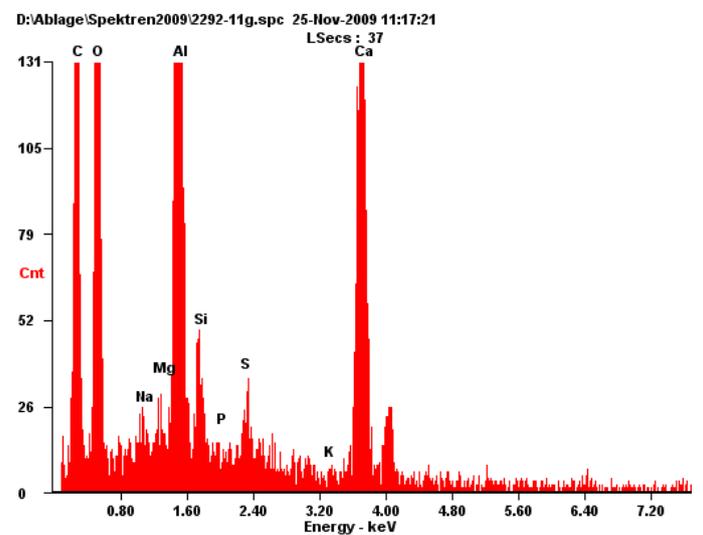


Abb. 184-187: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)



Stufe 10:

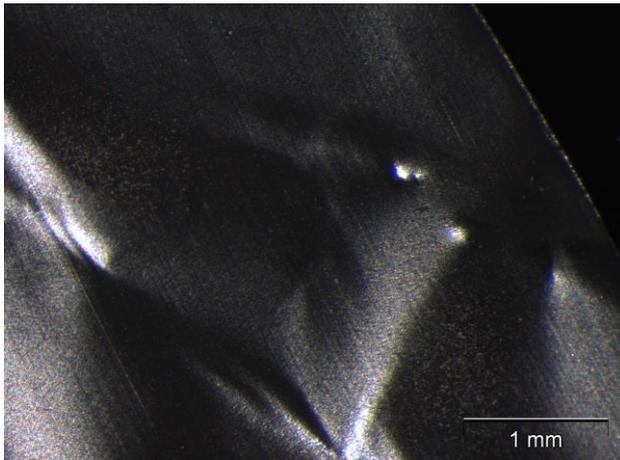


Abb. 188: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

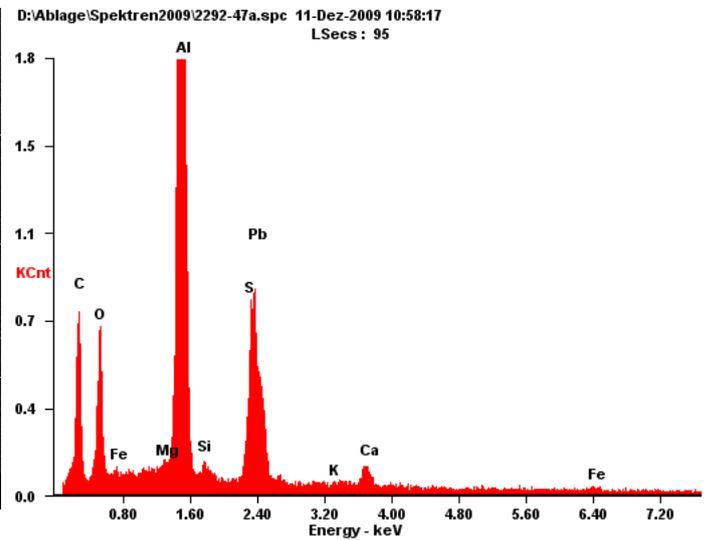
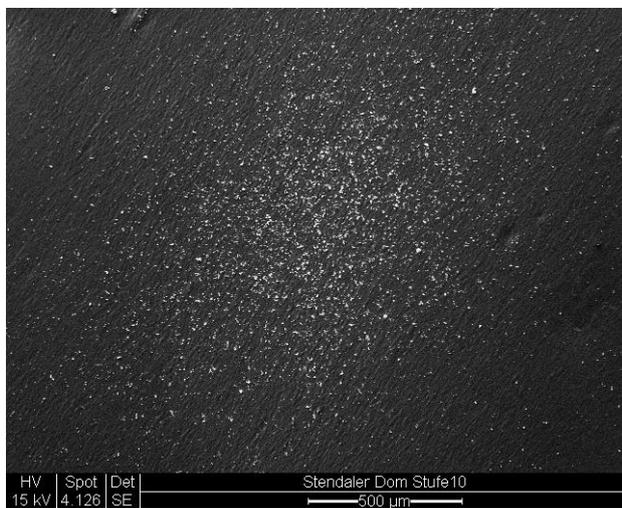
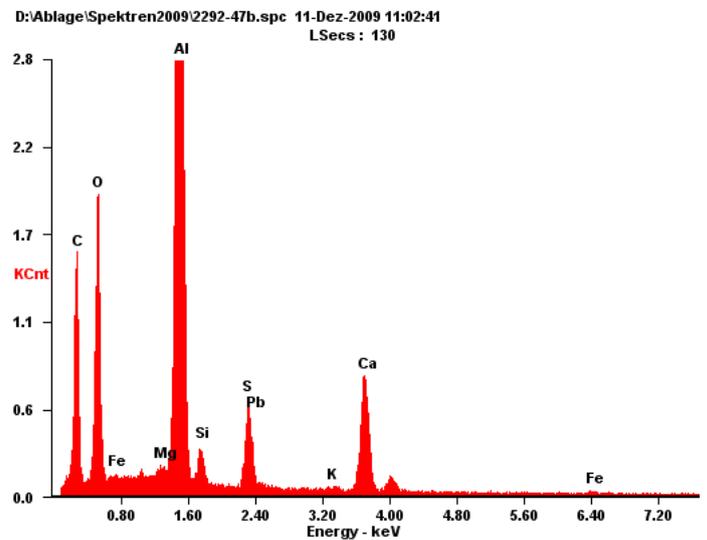
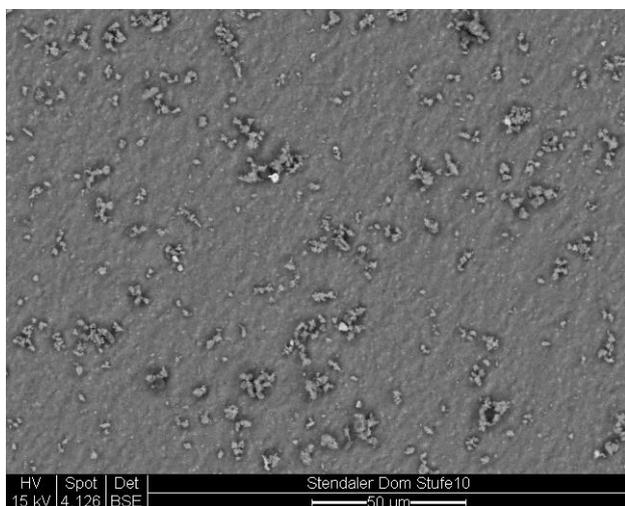


Abb. 189-192: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)



Stufe 9:

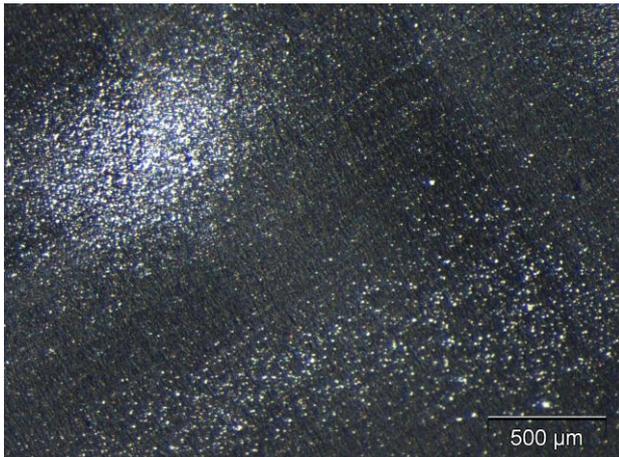


Abb. 193: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

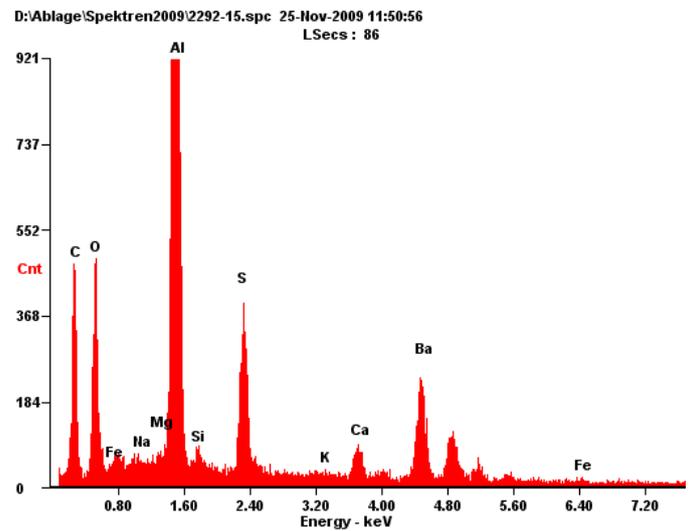
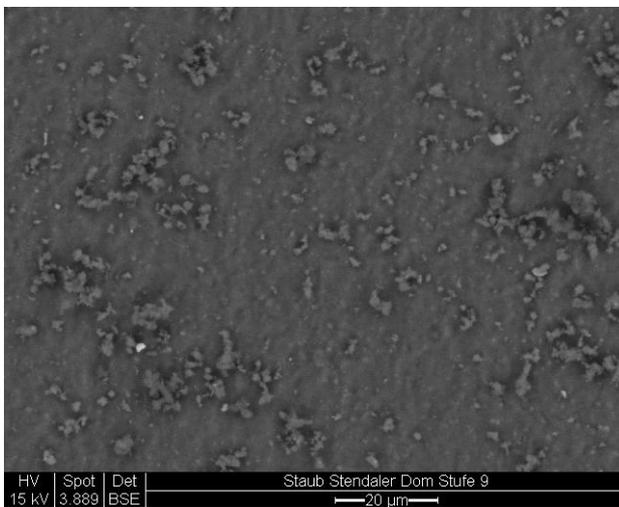
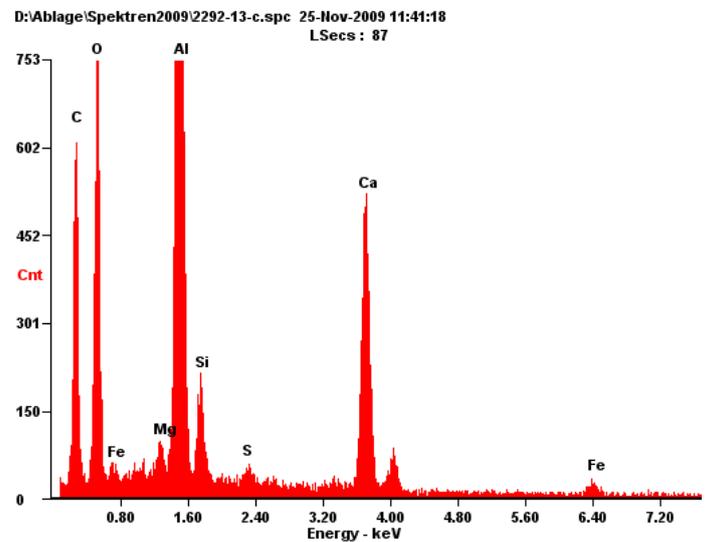
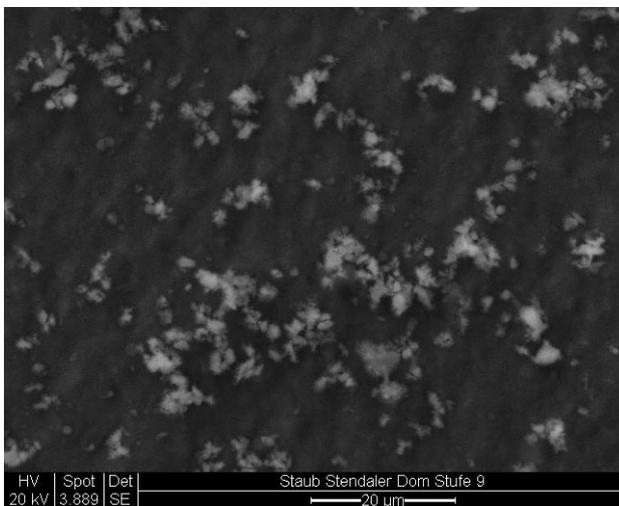


Abb. 194-197: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)



Stufe 8:



Abb. 198: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

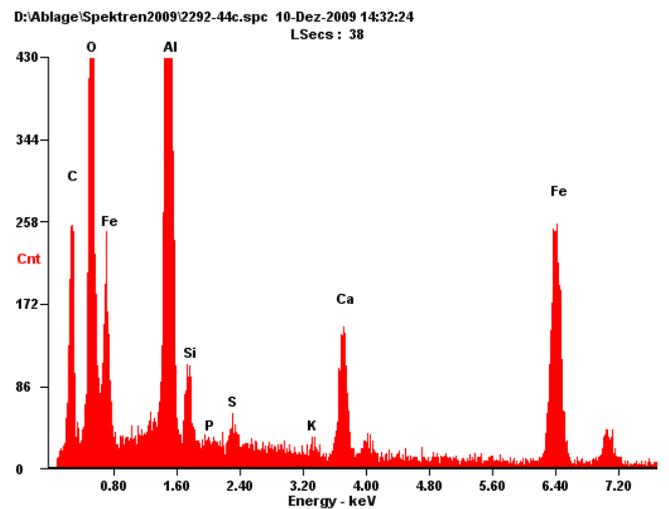
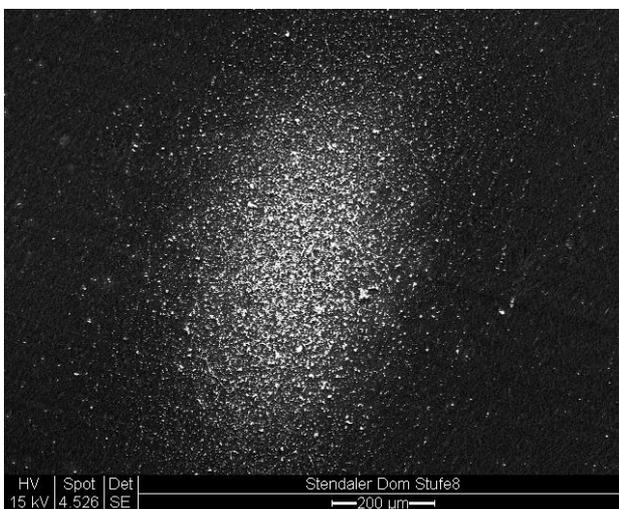
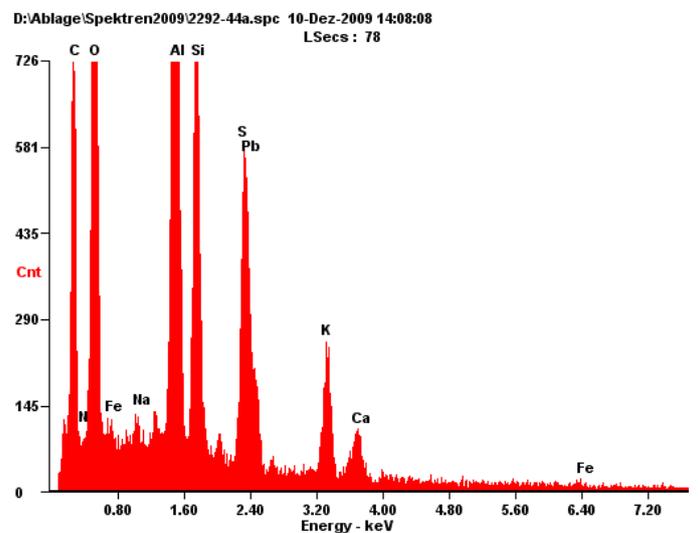
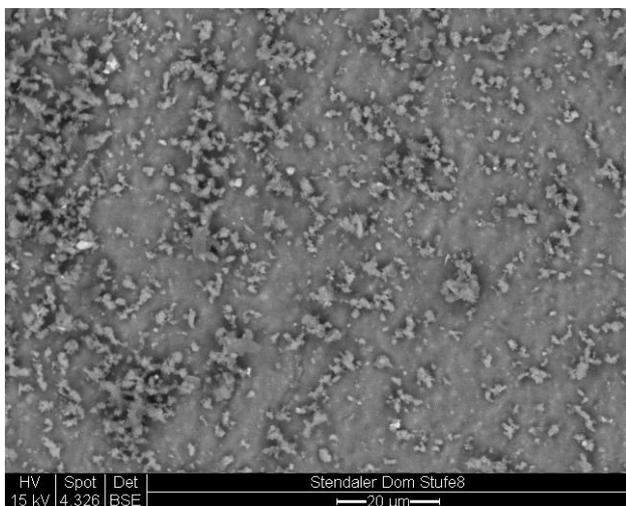


Abb. 199-202: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)



Stufe 7:

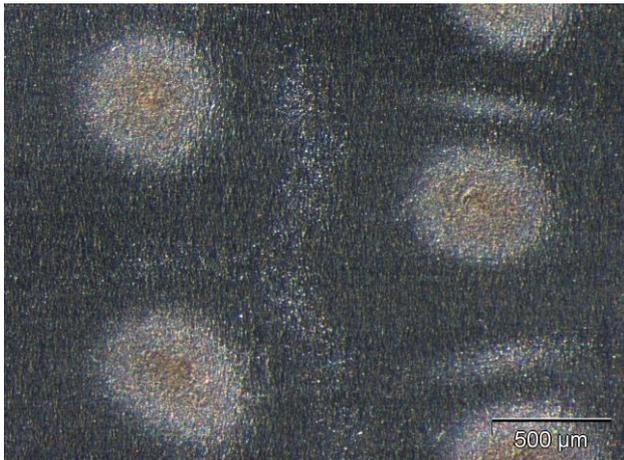


Abb. 203: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

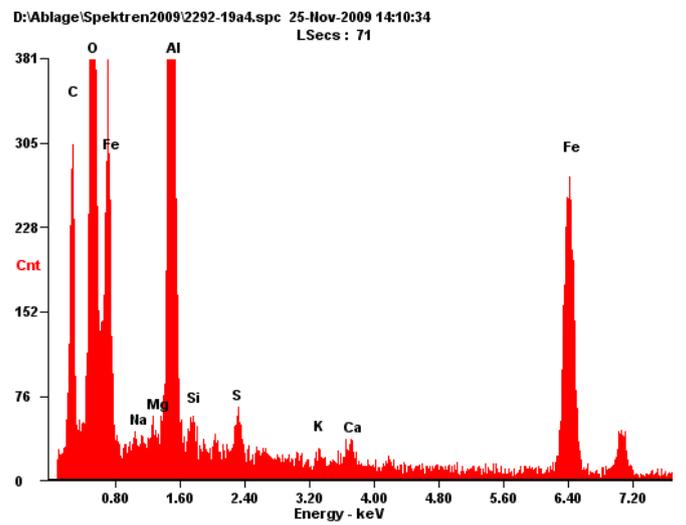
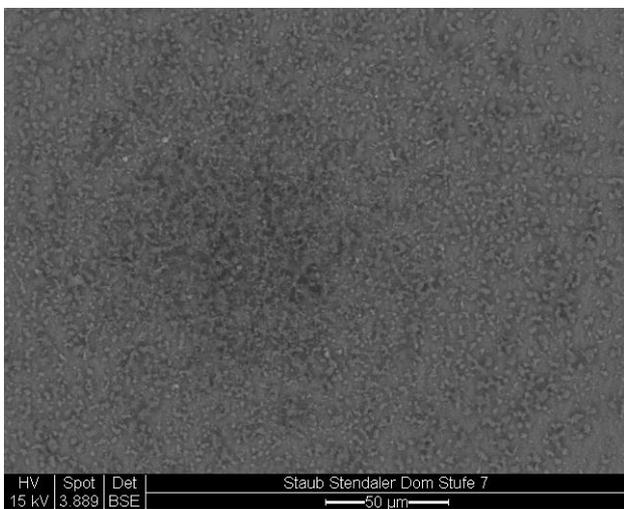
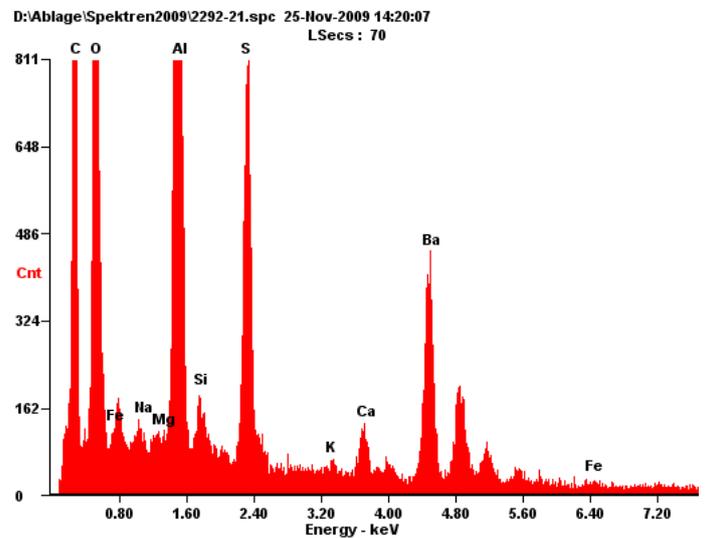
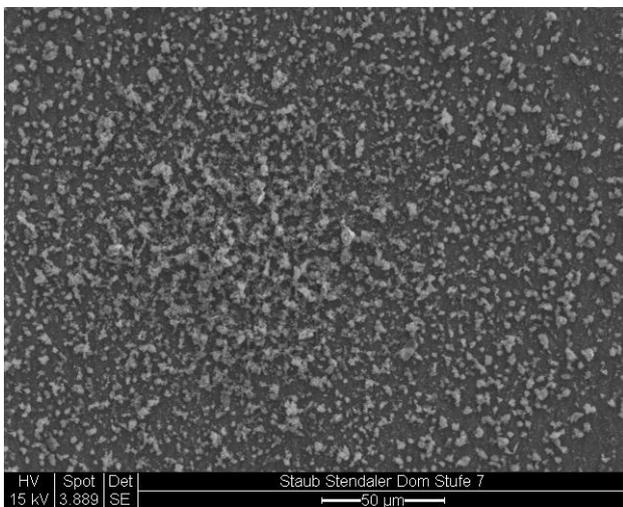


Abb. 204-207: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts)



Stufe 6:

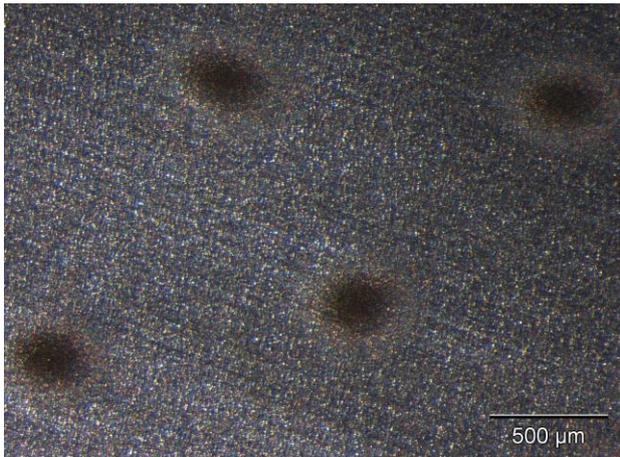


Abb. 208: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

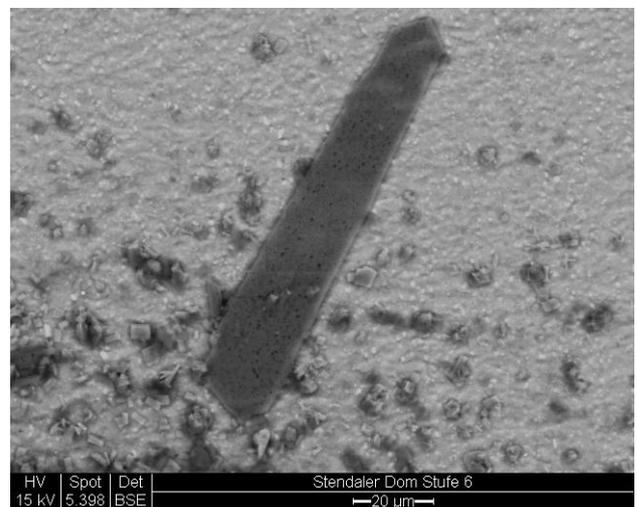
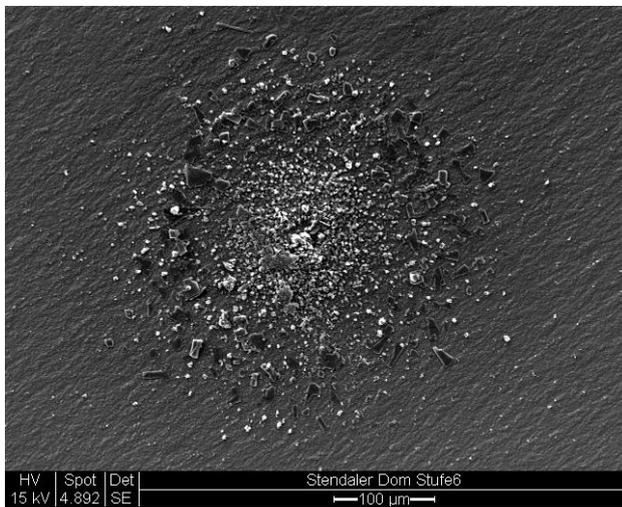
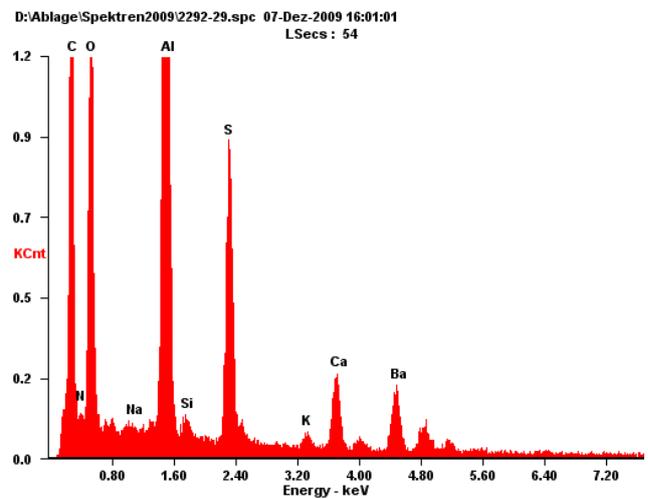
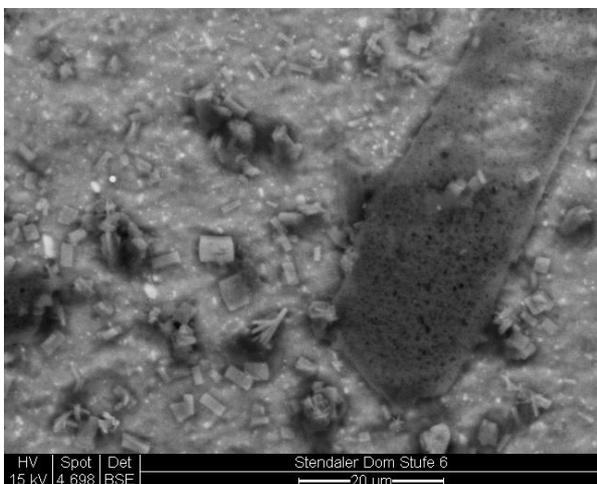


Abb. 209-212: Elektronenmikroskopische Aufnahme neugebildeter Kristalle auf Aluminiumfolie



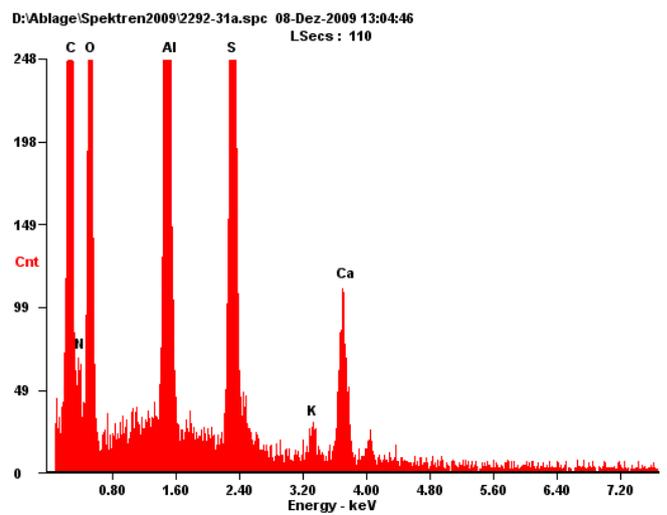
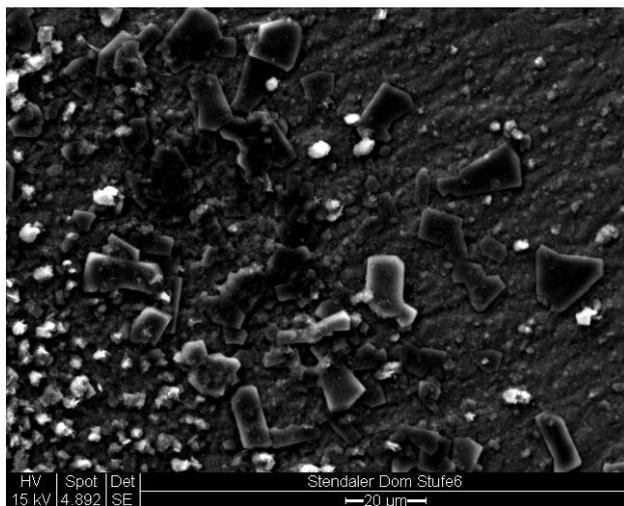


Abb. 213, 214: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Kristalle (rechts)

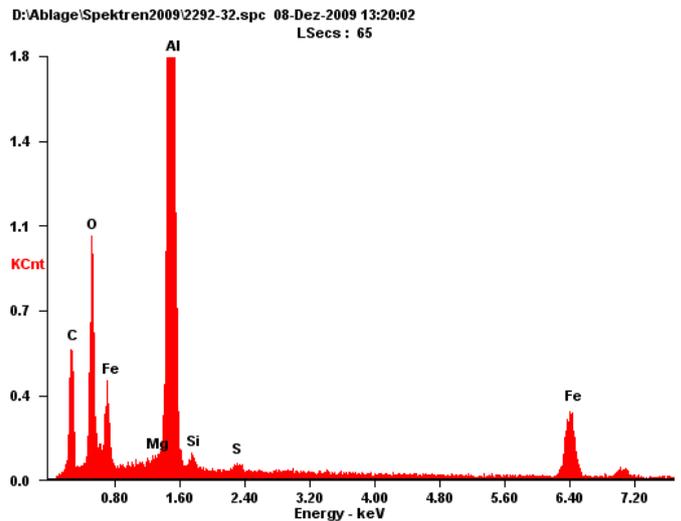
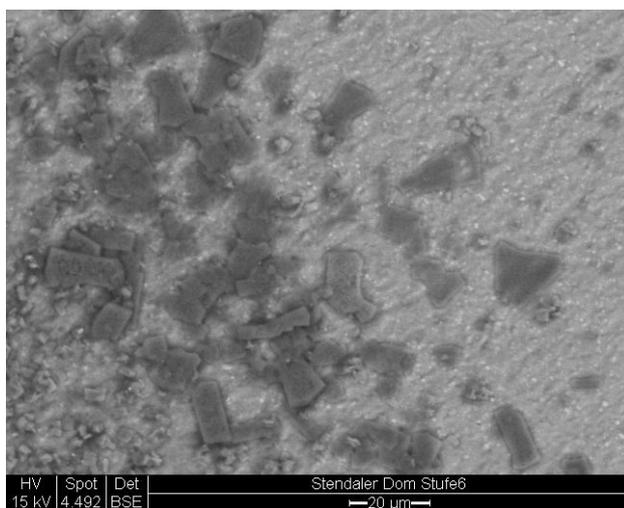


Abb. 215, 216: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Kristalle (rechts)

Stufe 5:

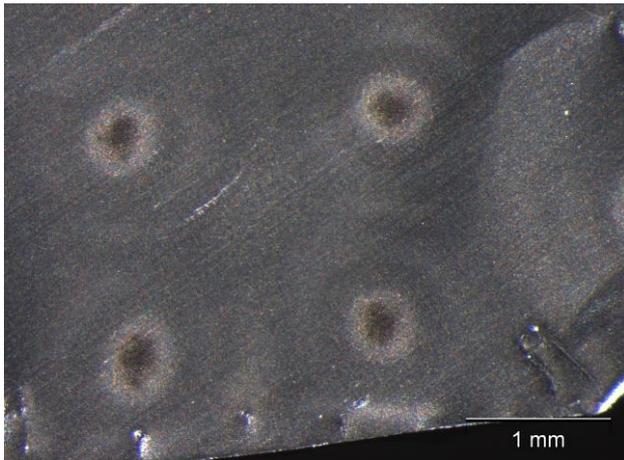


Abb. 217: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

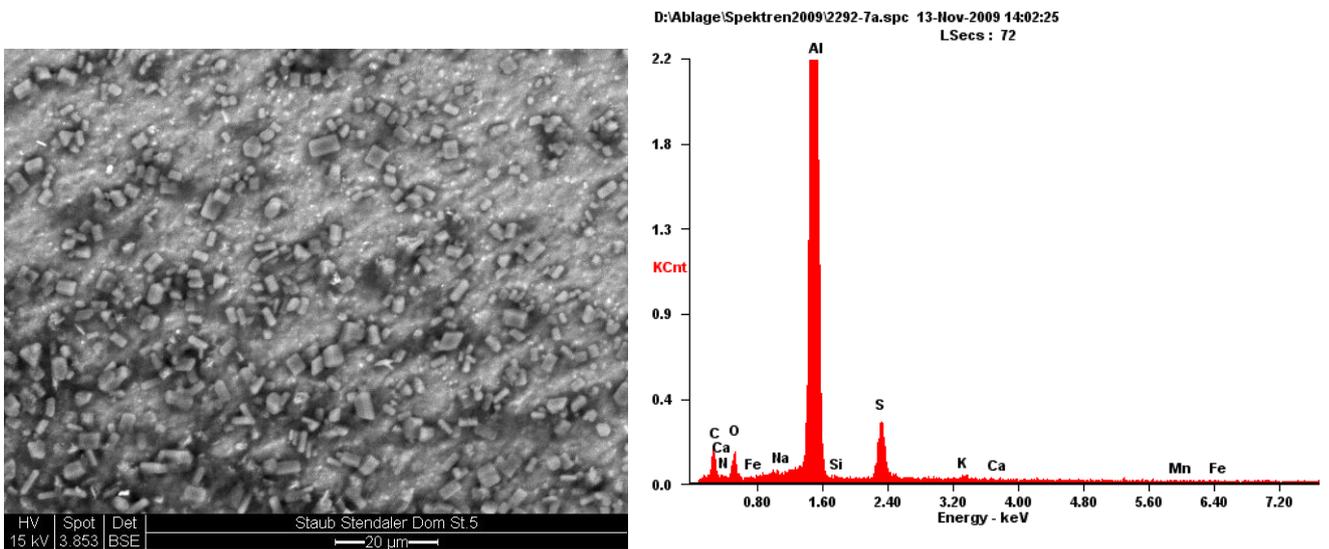
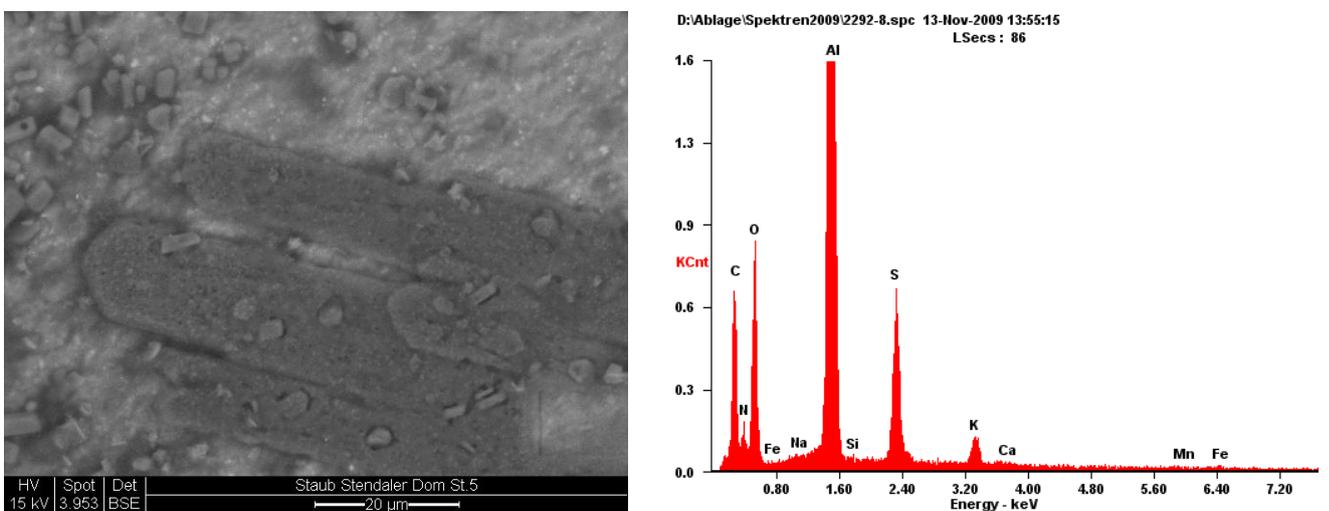


Abb. 218-221: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Kristalle (rechts)



Stufe 4:

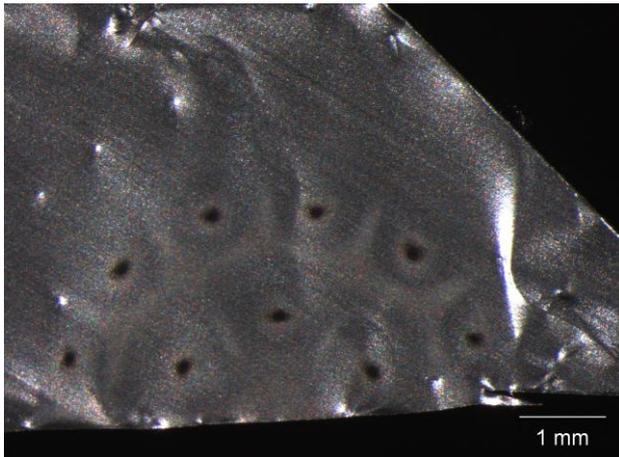


Abb. 222: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

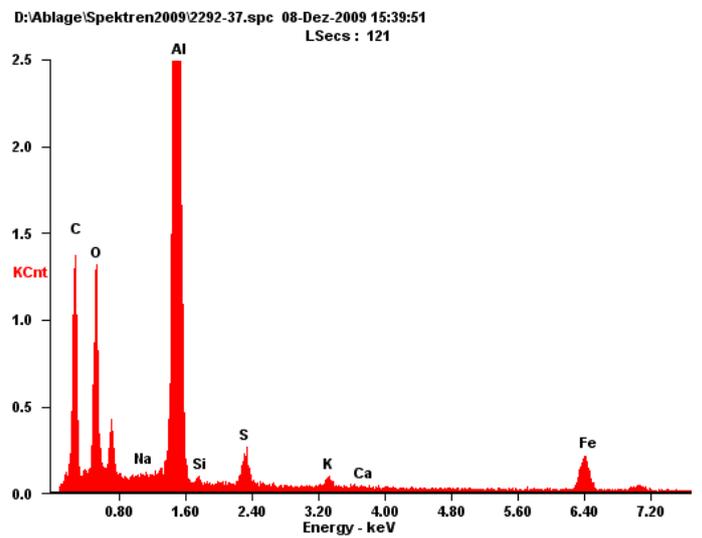
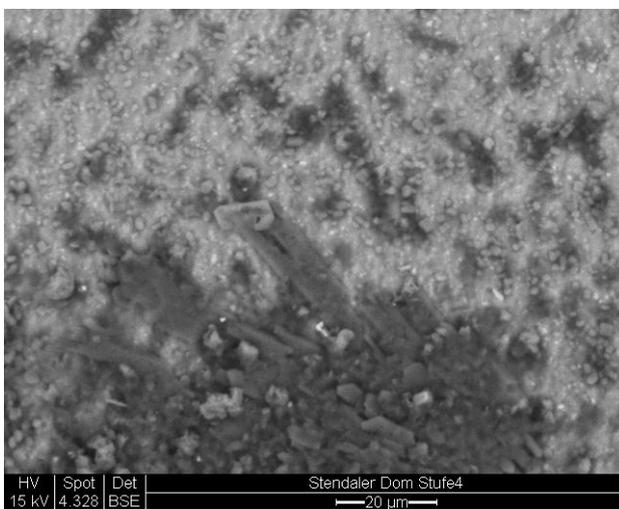
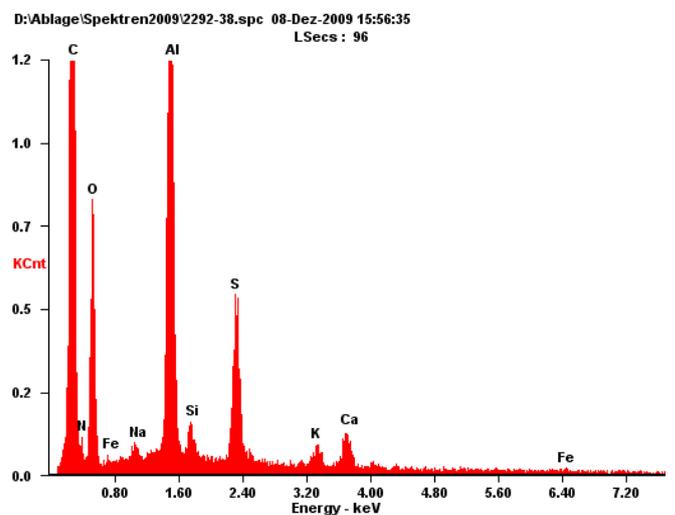
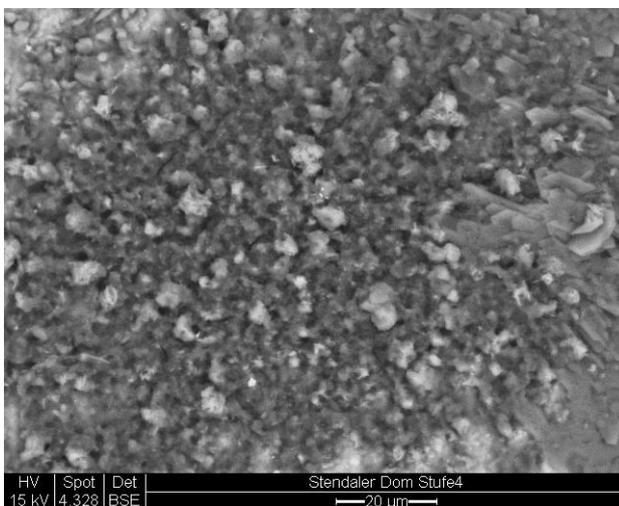


Abb. 223-226: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Kristalle (rechts)



Stufe 3:

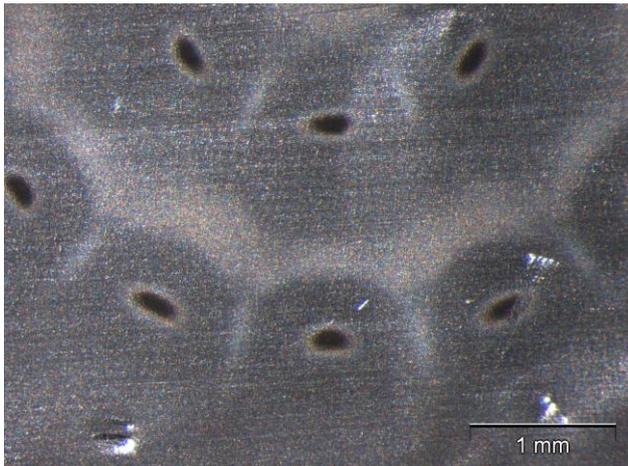


Abb. 227: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

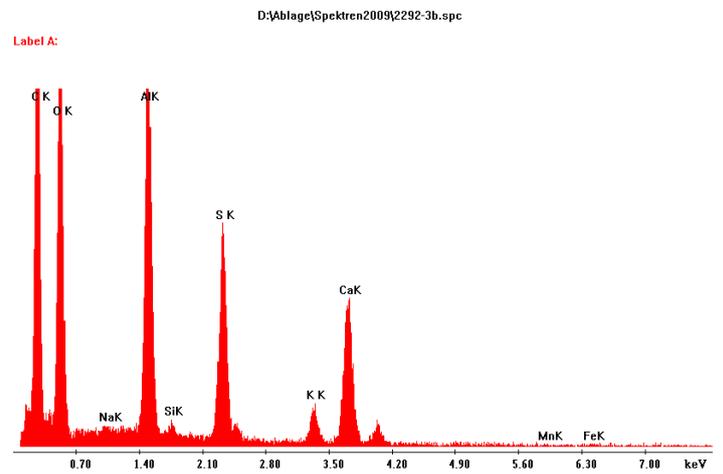
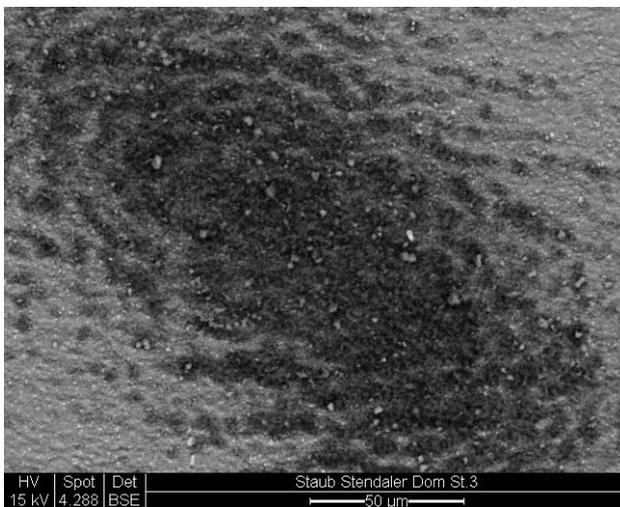
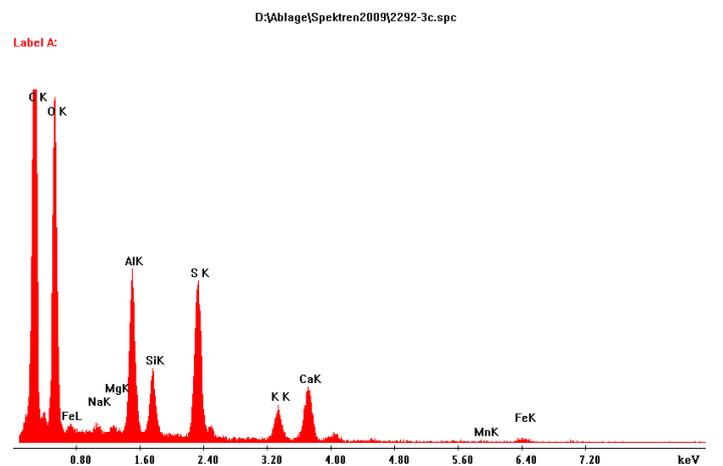
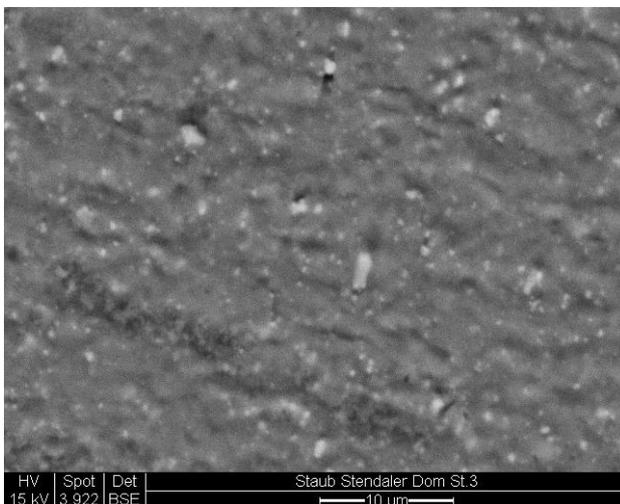


Abb. 228-231: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Ablagerungen (rechts)



Stufe 2:

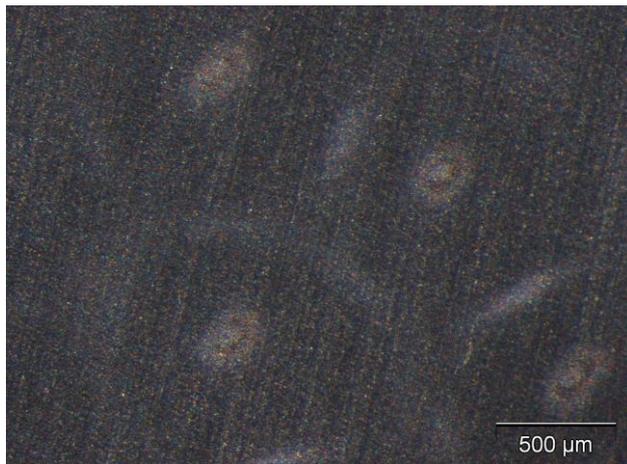


Abb. 232: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

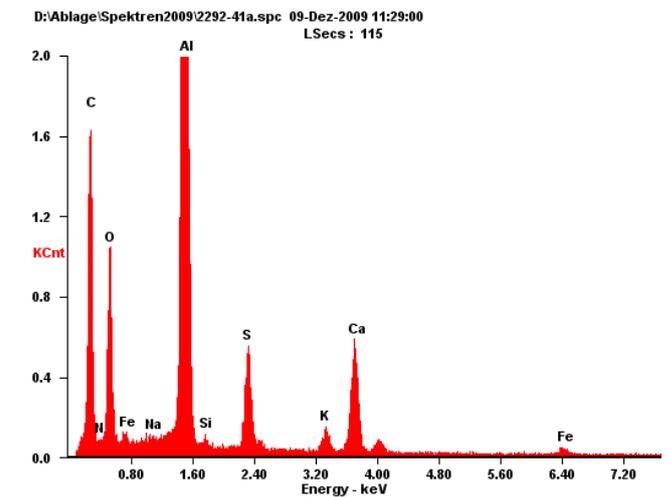
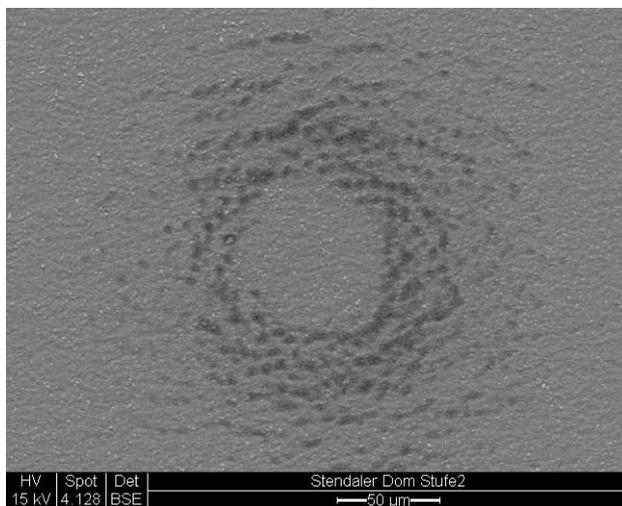
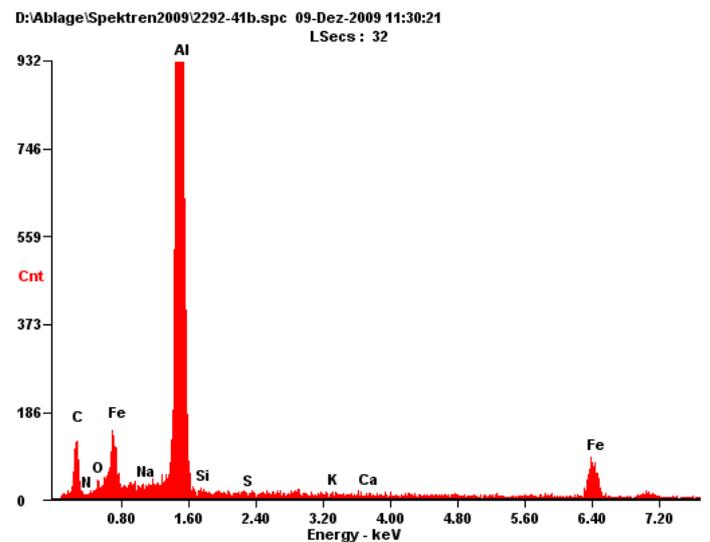
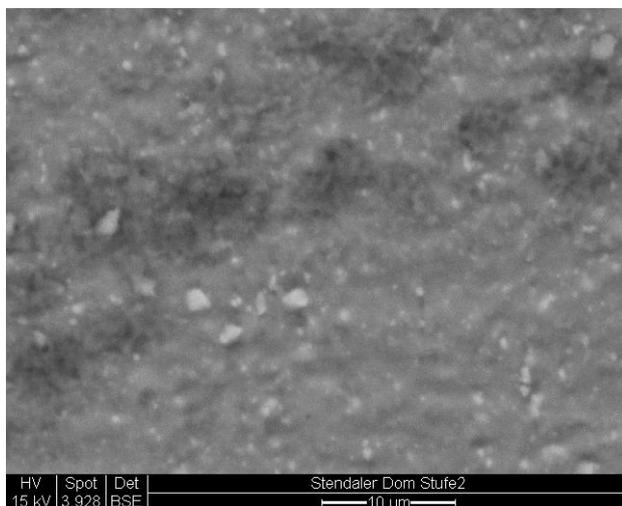


Abb. 233-236: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Ablagerungen (rechts)



Stufe 1:

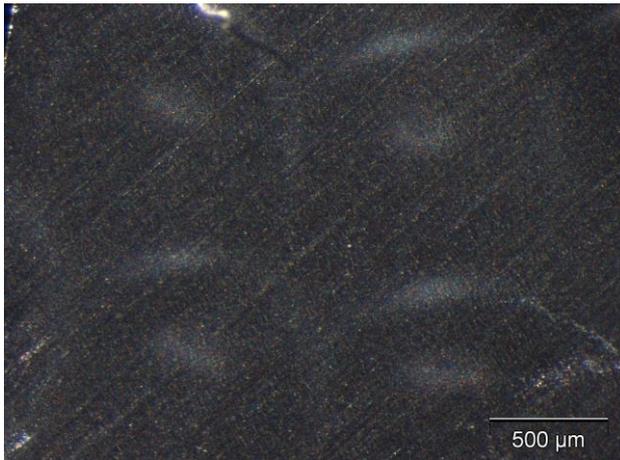


Abb. 237: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

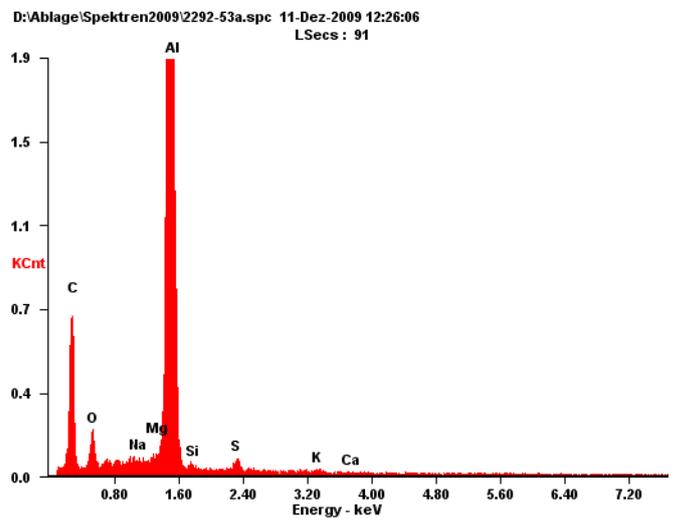
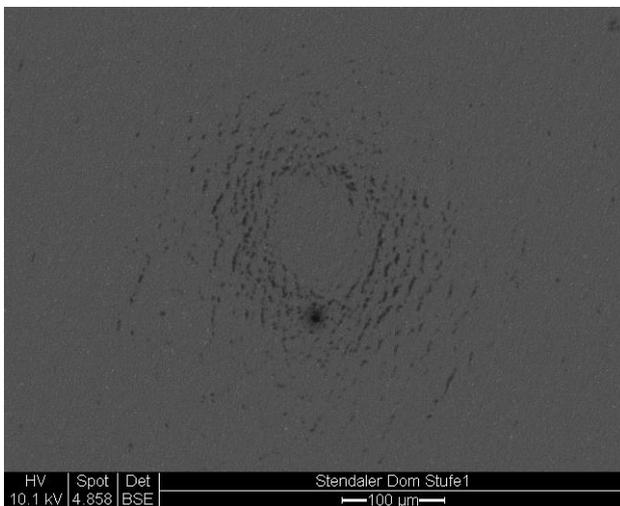
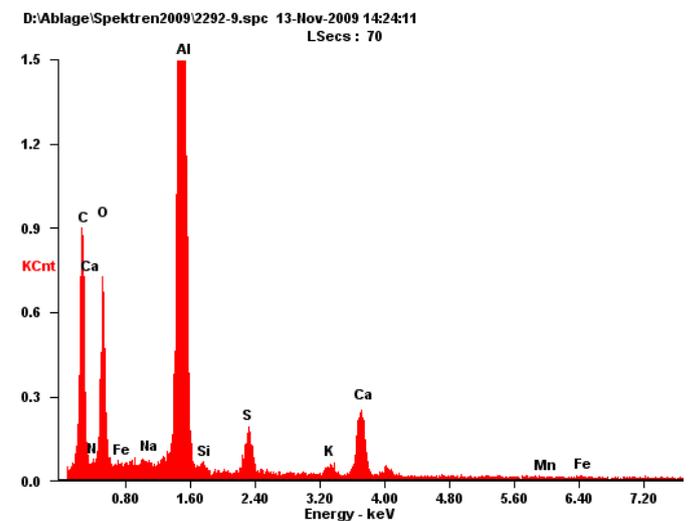
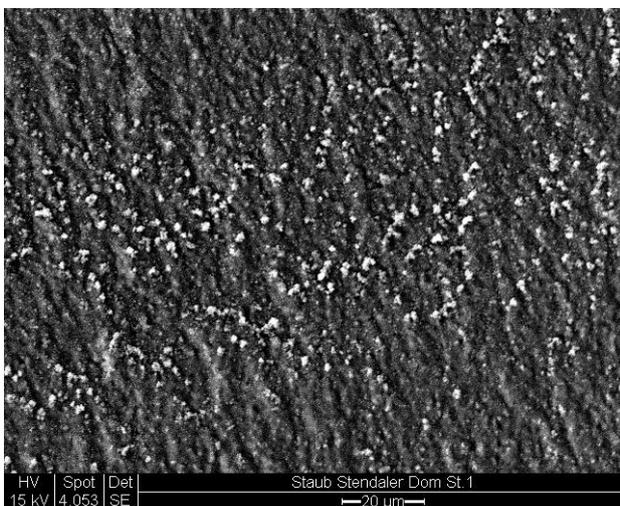


Abb. 238-241: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Ablagerungen (rechts)



Analysenergebnisse der Staubprobenahme auf Kohlenstoff - Probeträger von der Rückseite ausgewählter Glasmalereifelder aus dem Stendaler Dom



Abb. 242: Staubprobenahme auf Feld sV 4b korrodiertes Glas

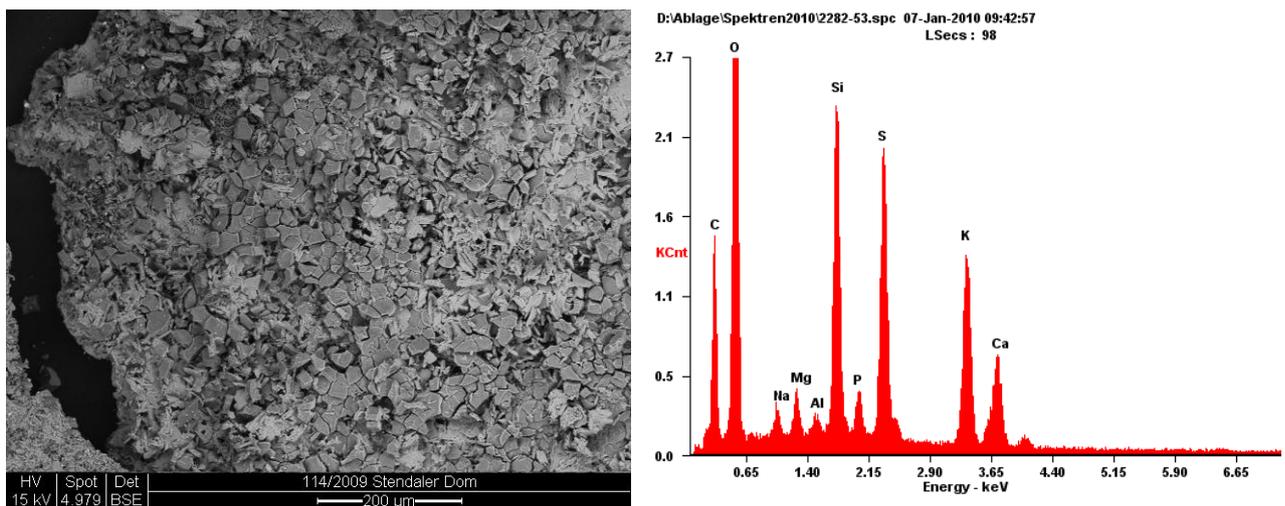


Abb. 243, 244: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen und Korrosionsprodukten (rechts)

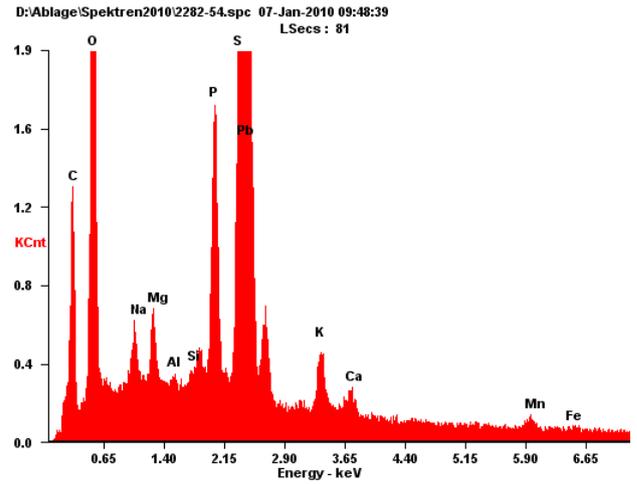
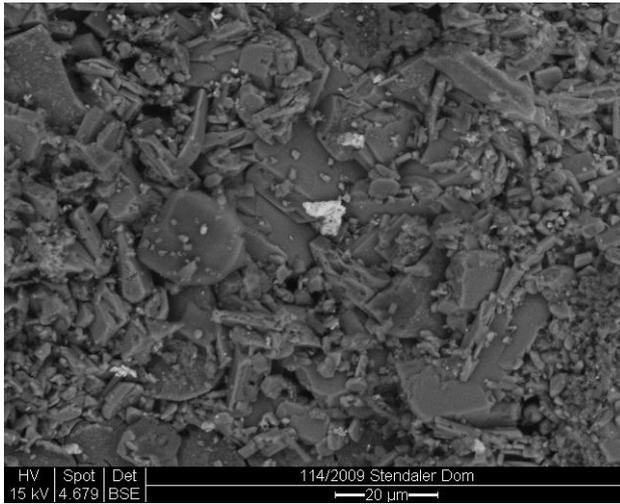


Abb. 245, 246: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen und Korrosionsprodukten (rechts)

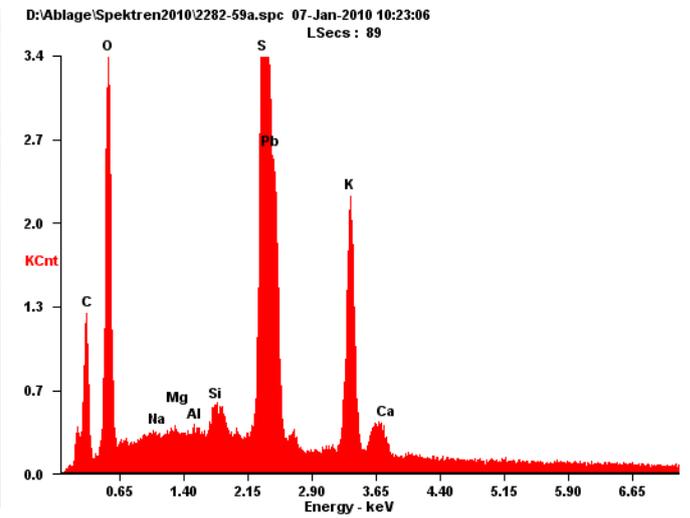
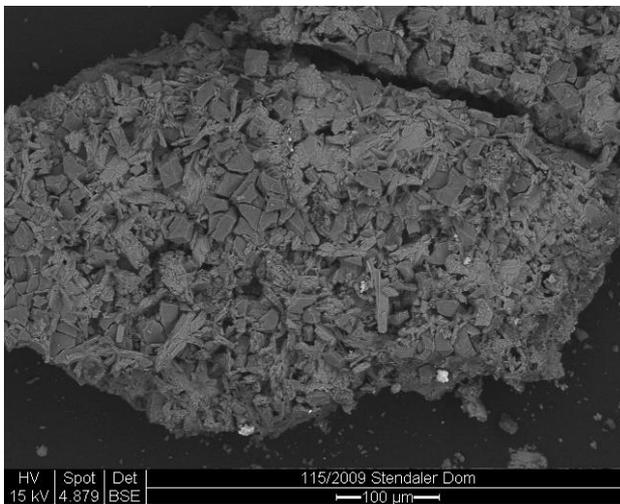


Abb. 247- 250: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen und Korrosionsprodukten (rechts)

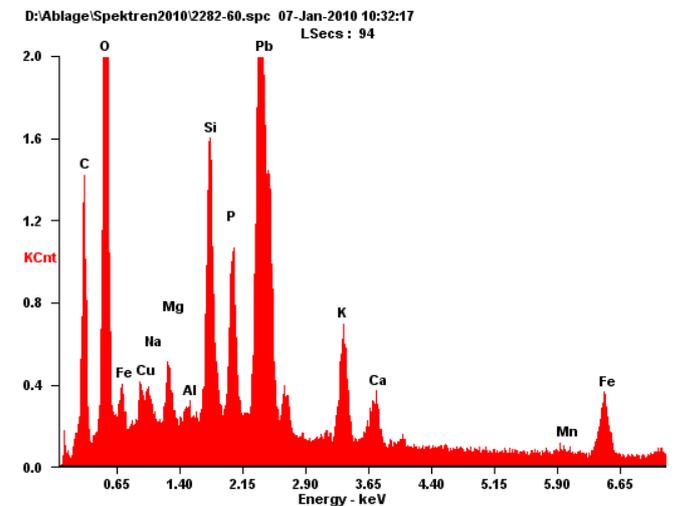
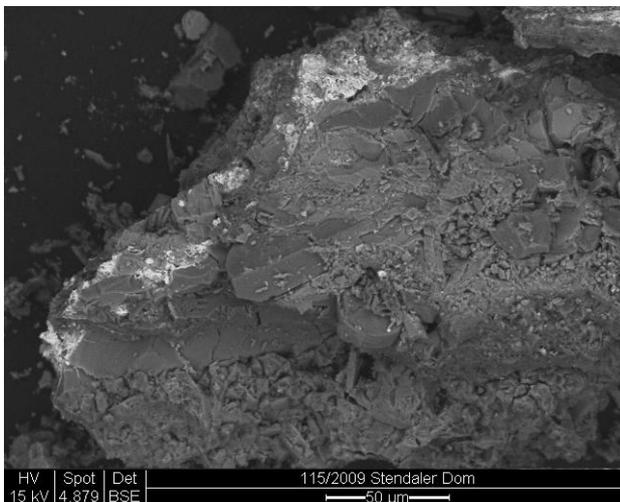




Abb. 251: Staubprobenahme auf Feld sV 10b korrodiertes Glas

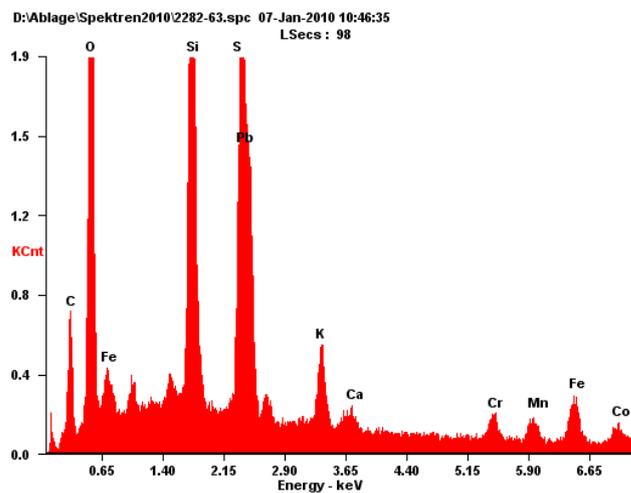
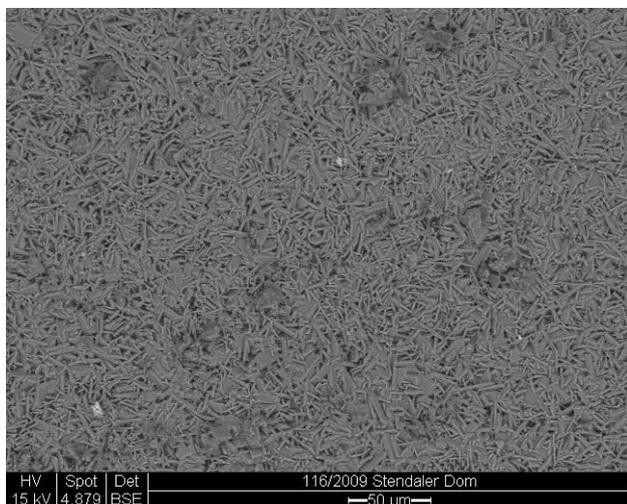


Abb. 252- 255: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen und Korrosionsprodukten (rechts)

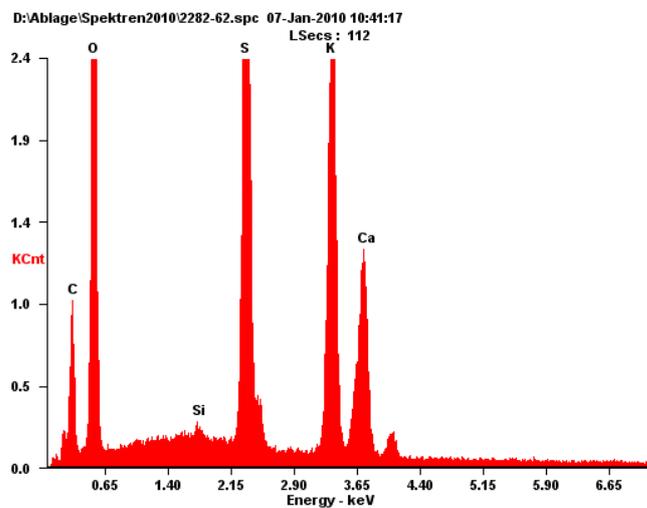
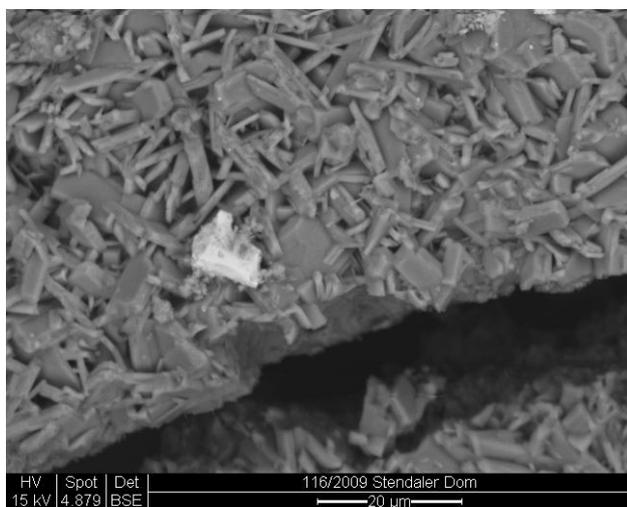


Abb. 256: Staubprobenahme auf Feld sV 4b nichtkorrodiertes Glas

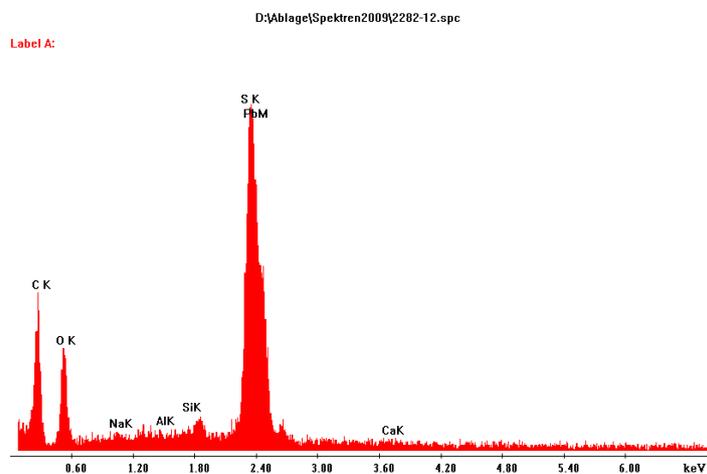
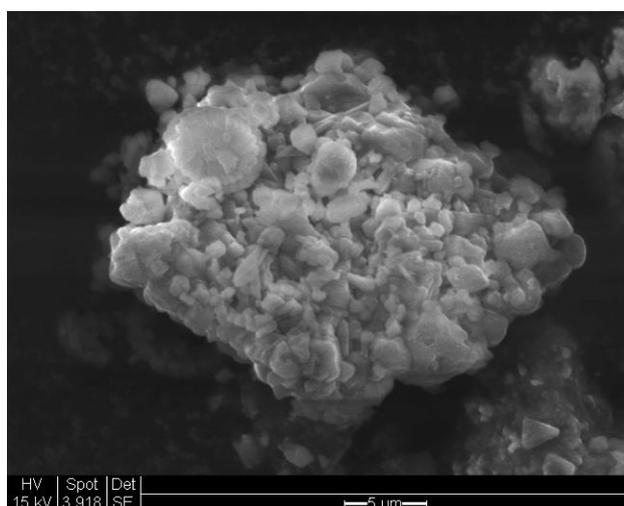
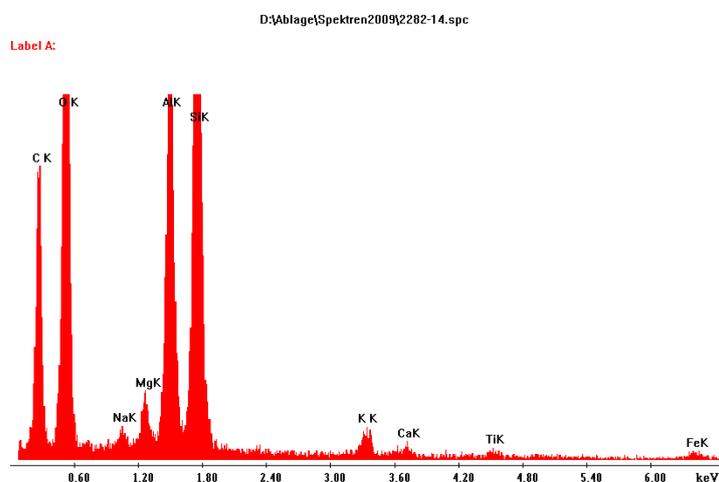
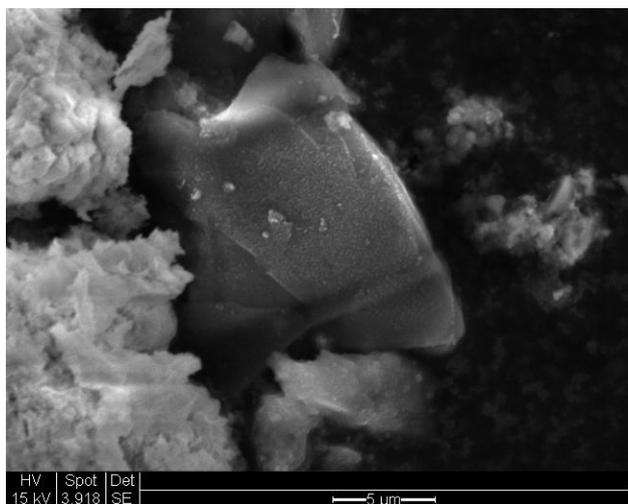


Abb. 257-260: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen auf nichtkorrodierten Gläsern (rechts)



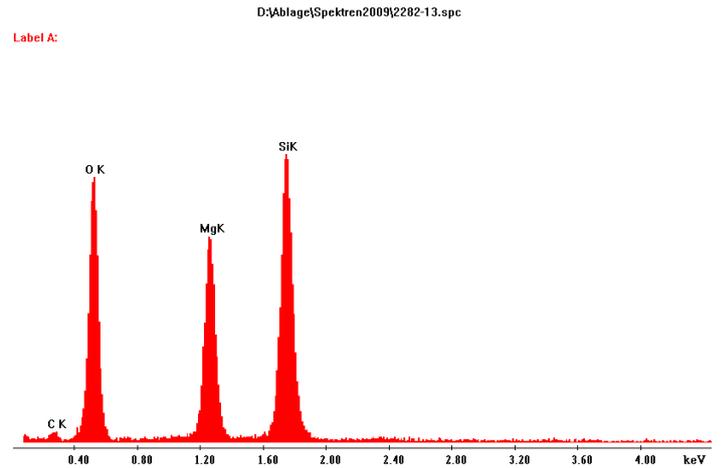
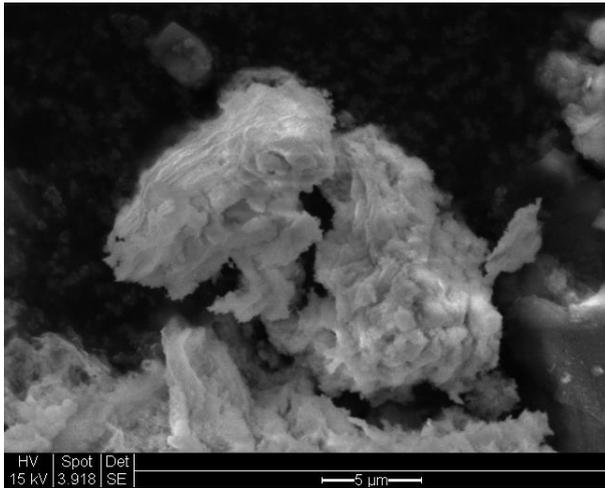


Abb. 261, 262: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen auf nichtkorrodierten Gläsern (rechts)

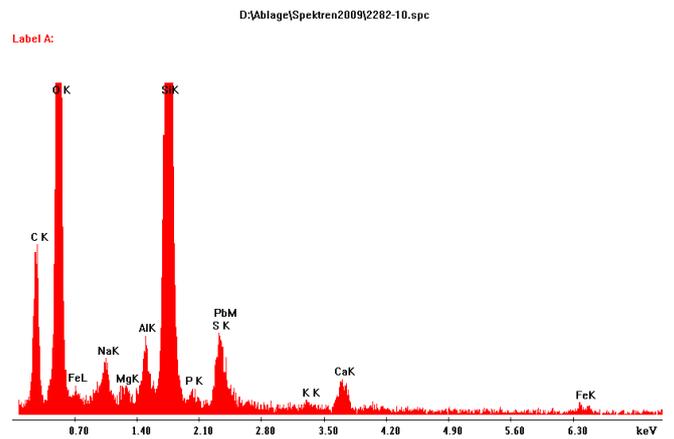
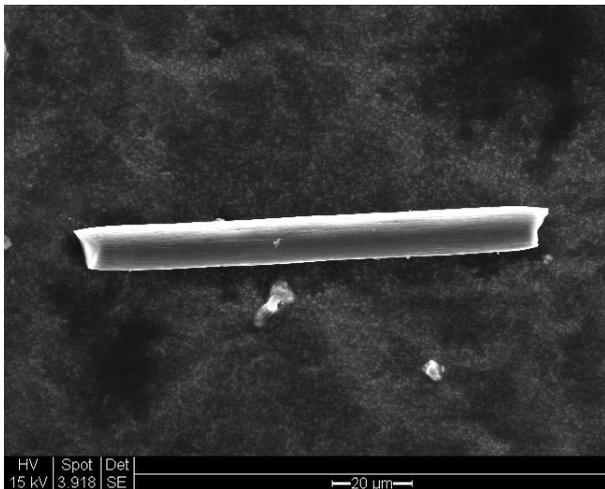
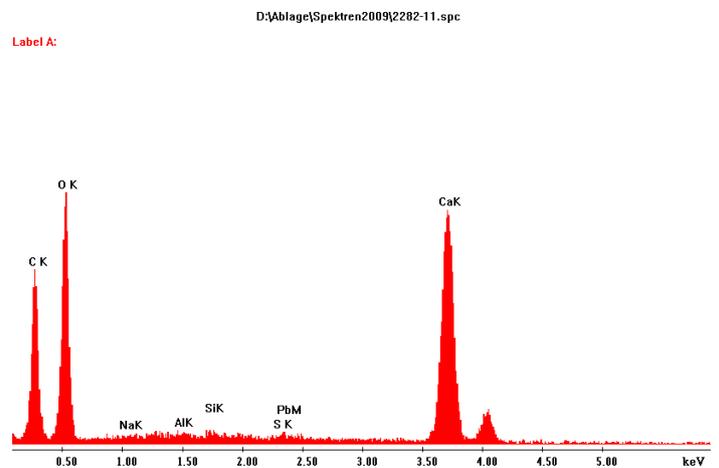
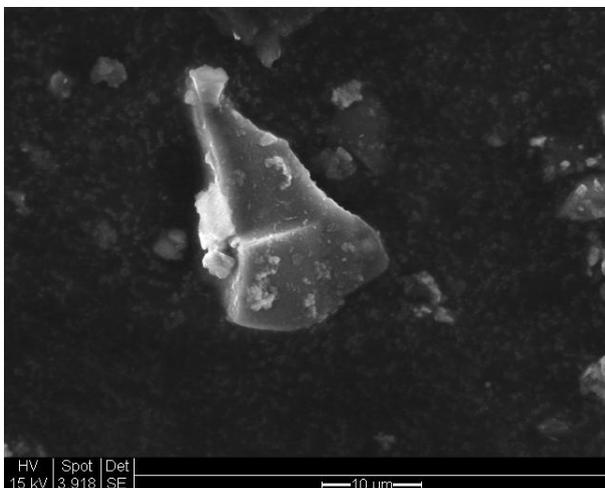


Abb. 263-266: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung von Staubablagerungen auf nichtkorrodierten Gläsern (rechts)



Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit dem Kaskadenimpaktor am Fenster nXI im Havelberger Dom

Stufe 12:

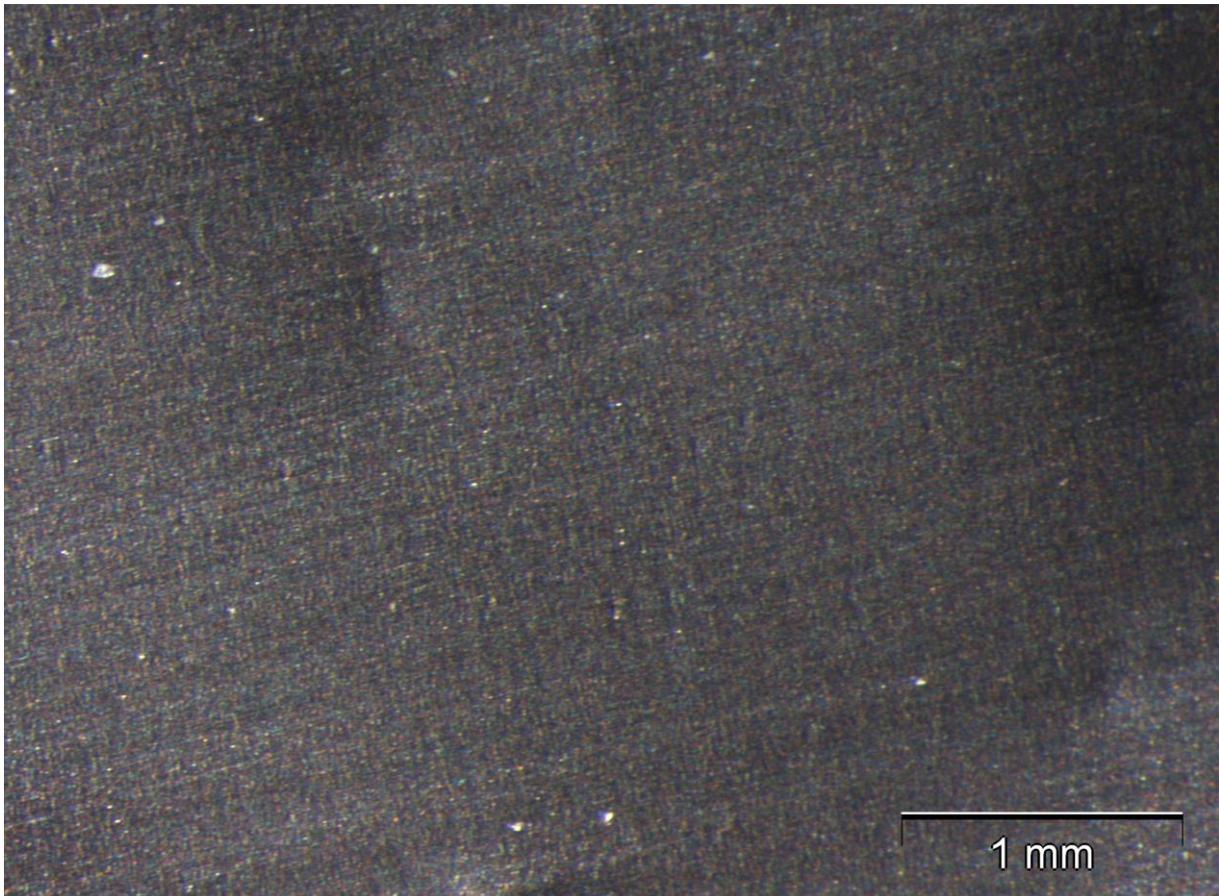


Abb. 267: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

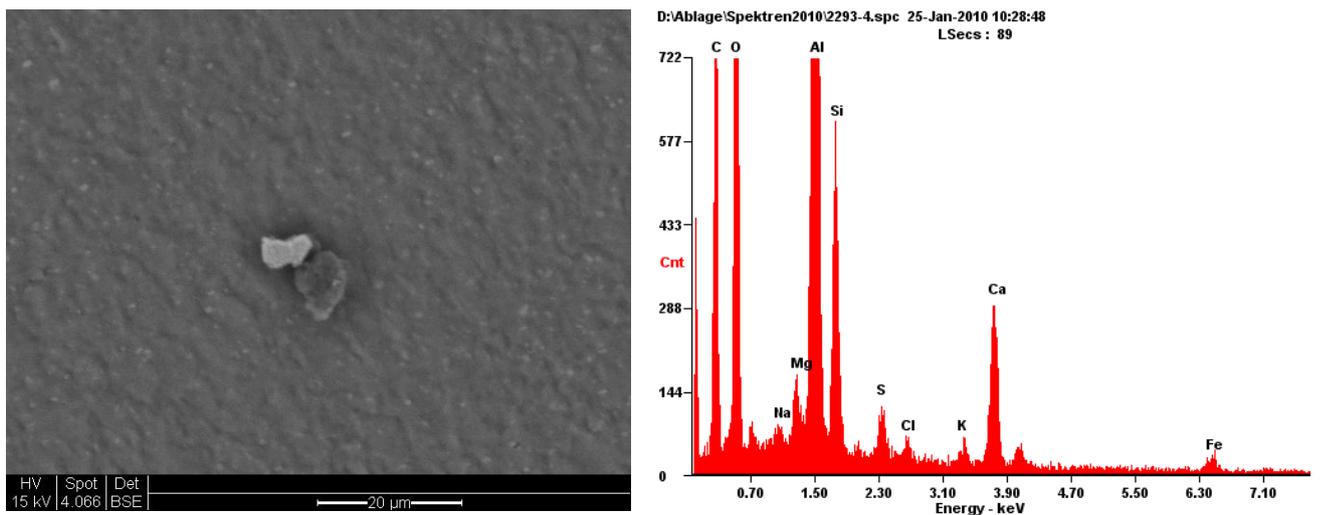


Abb. 268, 269: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts), vereinzelt C - haltige Staubpartikel

Stufe 10:

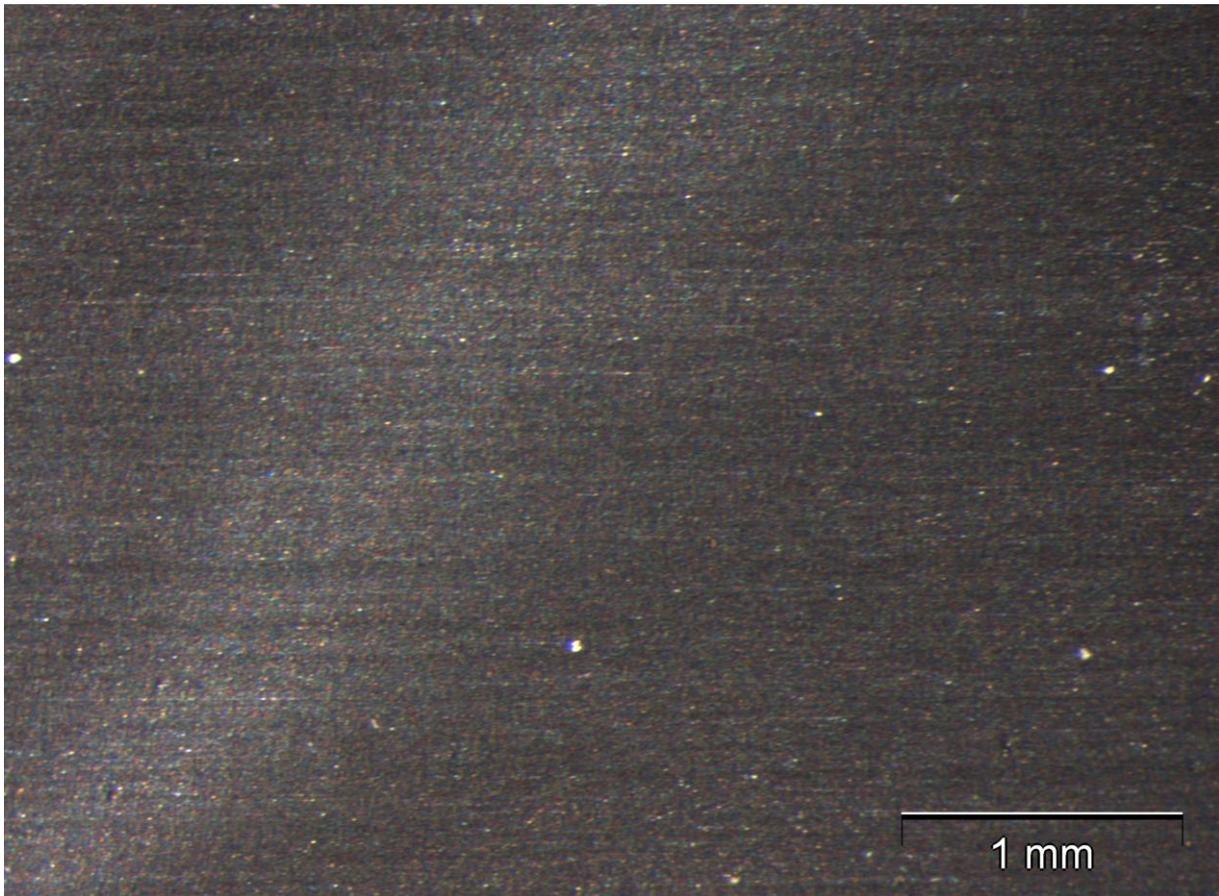


Abb. 270: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

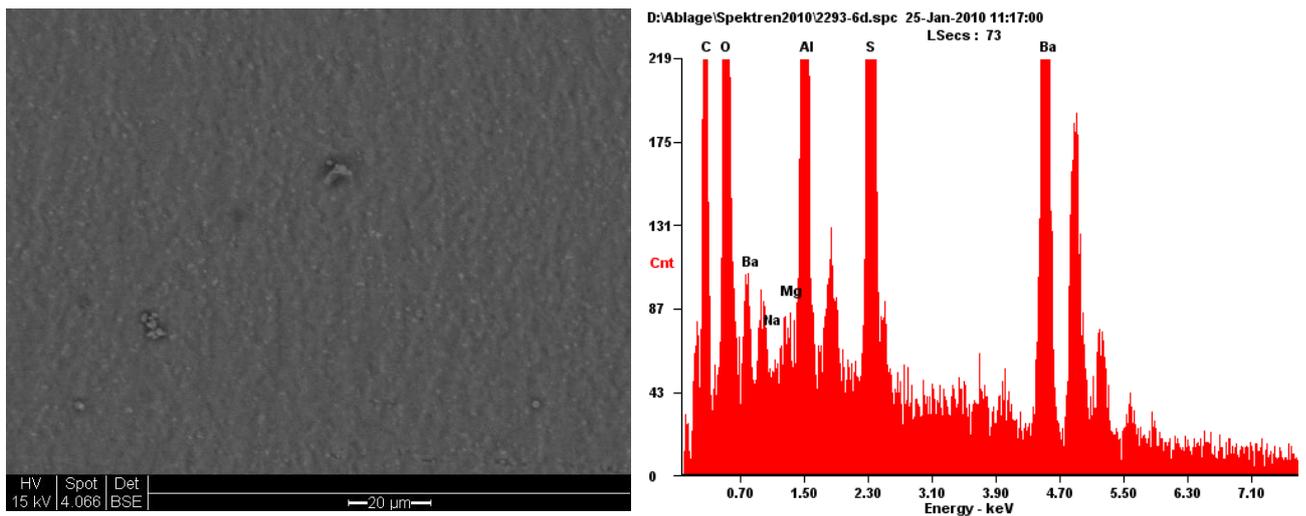


Abb. 271, 272: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts), hauptsächlich C - haltige Staubpartikel, nur vereinzelt Fe- oder Ba- und S - haltige Partikel

Stufe 8:

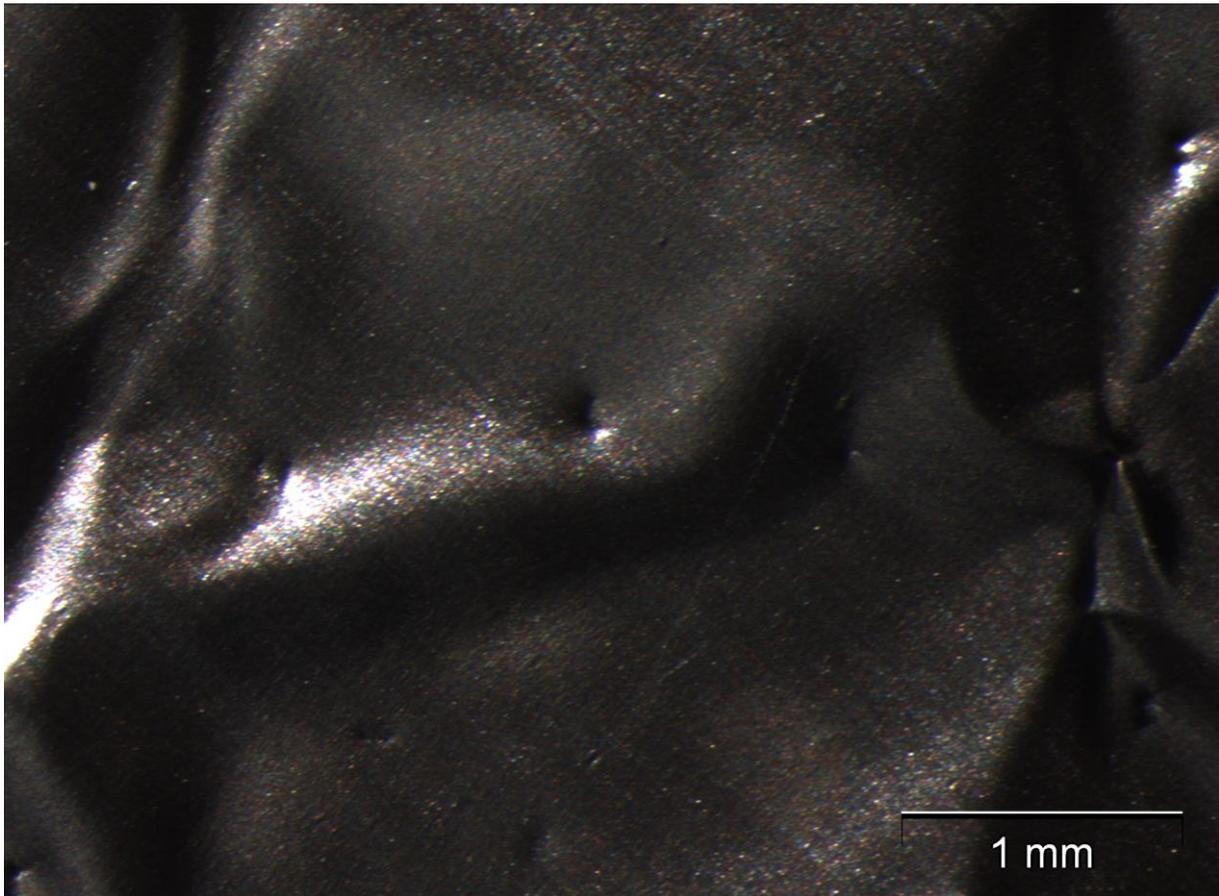


Abb. 273: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

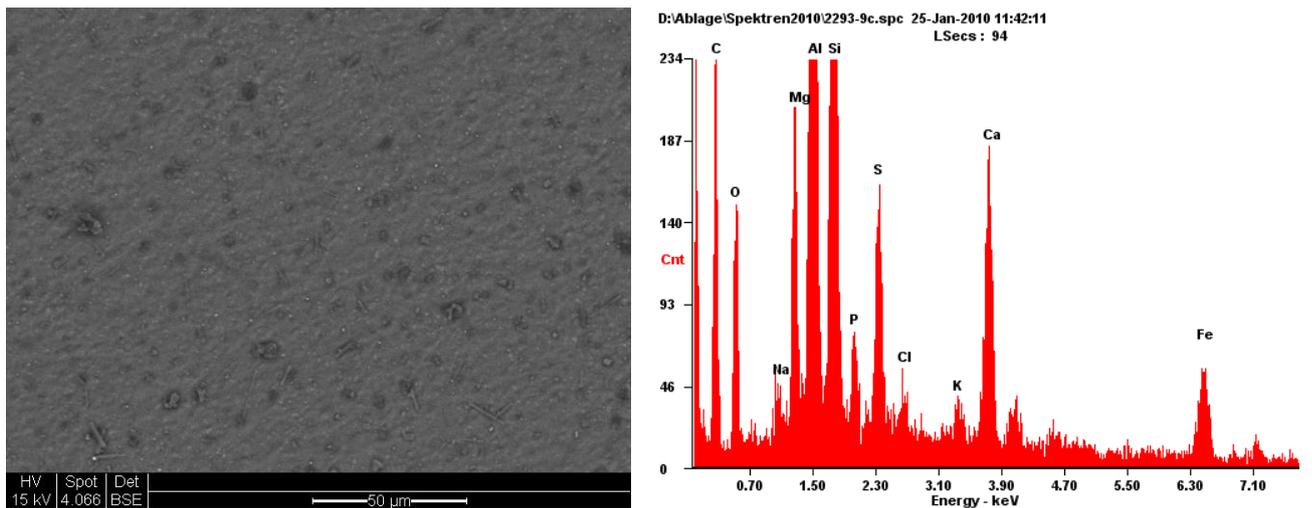


Abb. 274, 275: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts), oft Fe - haltige Partikel (helle Punkte in ESEM Aufnahme), selten Pb - Partikel

Stufe 7:

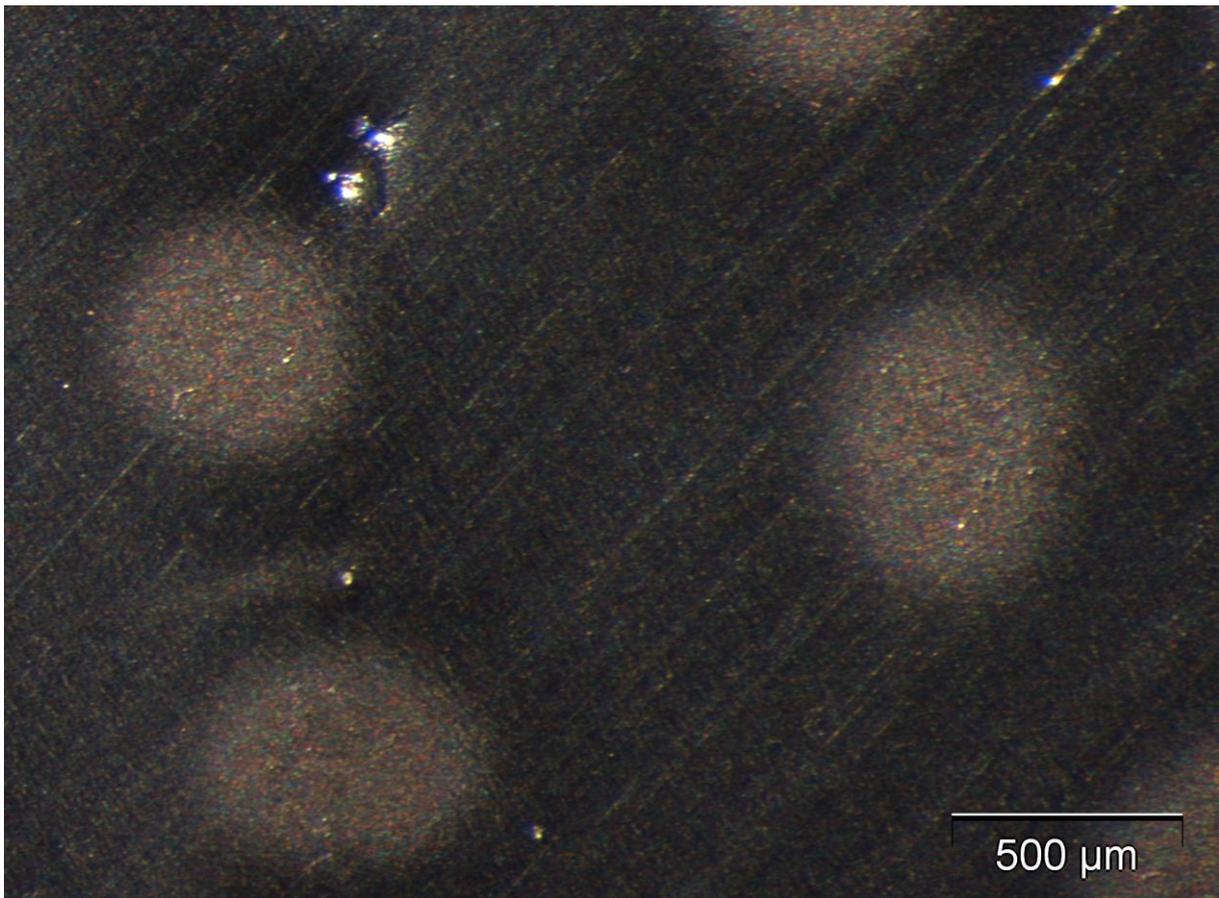


Abb. 276: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

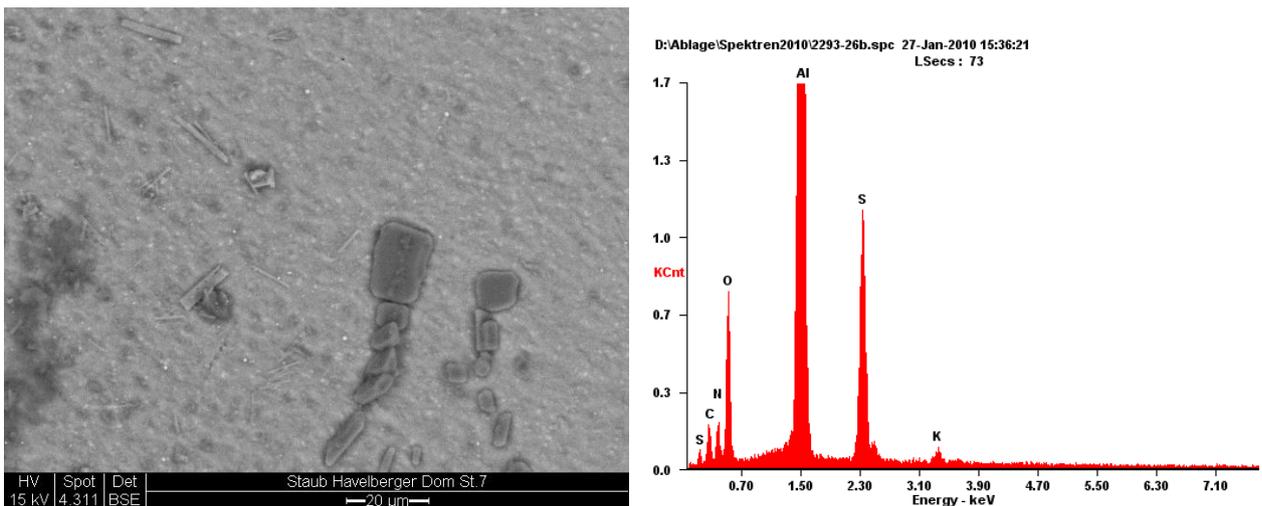


Abb. 277, 278: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts), helle bis ca.20 µm quaderförmige Kristalle!

Stufe 6:

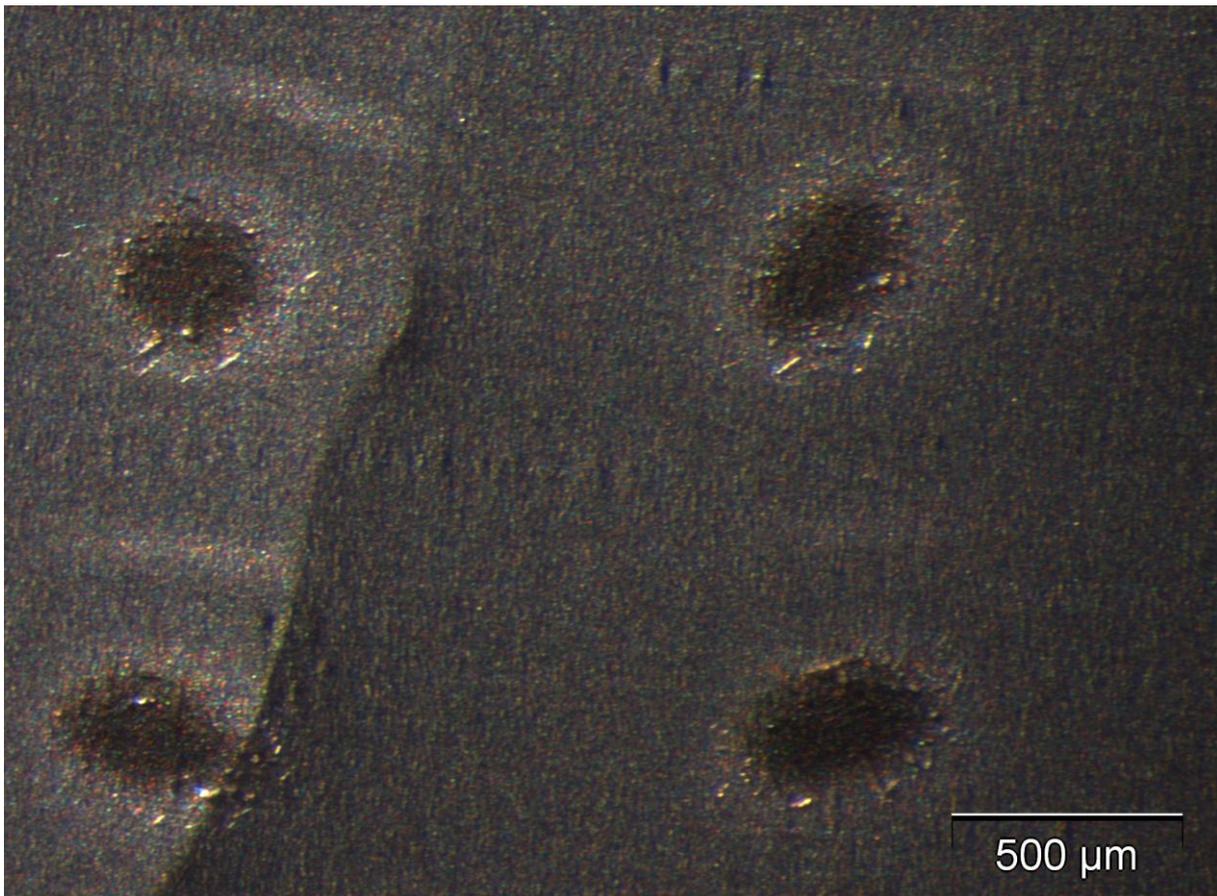


Abb. 279: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

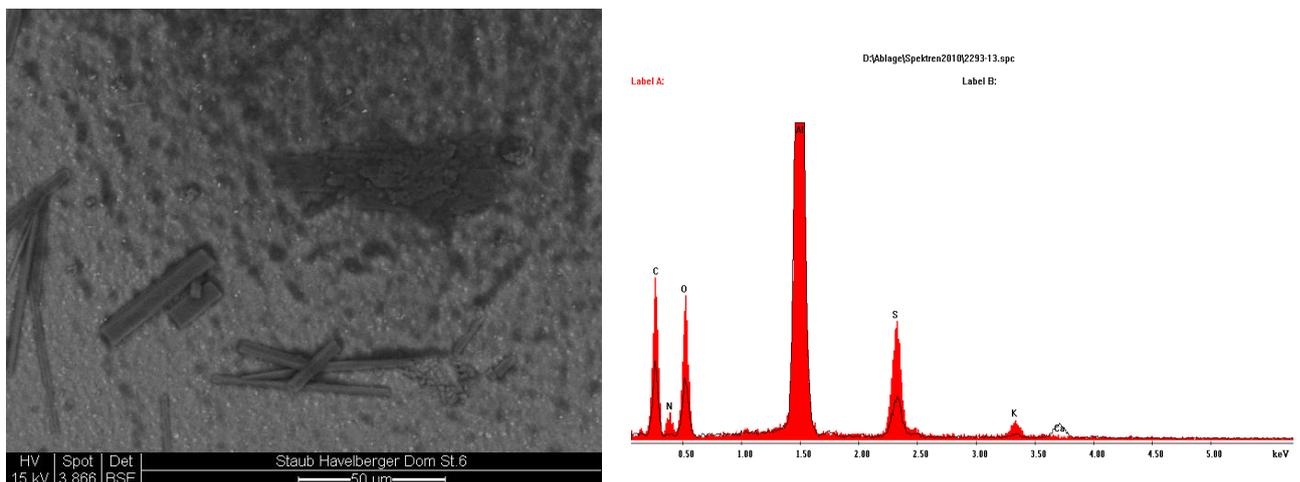


Abb. 280, 281: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen (rechts) dunkle Kristalle ca.50 μm, sowie unsymmetrische dunkle Materialanhäufungen rotes Spektrum, helle quaderförmige Kristalle (<10 μm) schwarzes überlagertes Spektrum

Stufe 5:

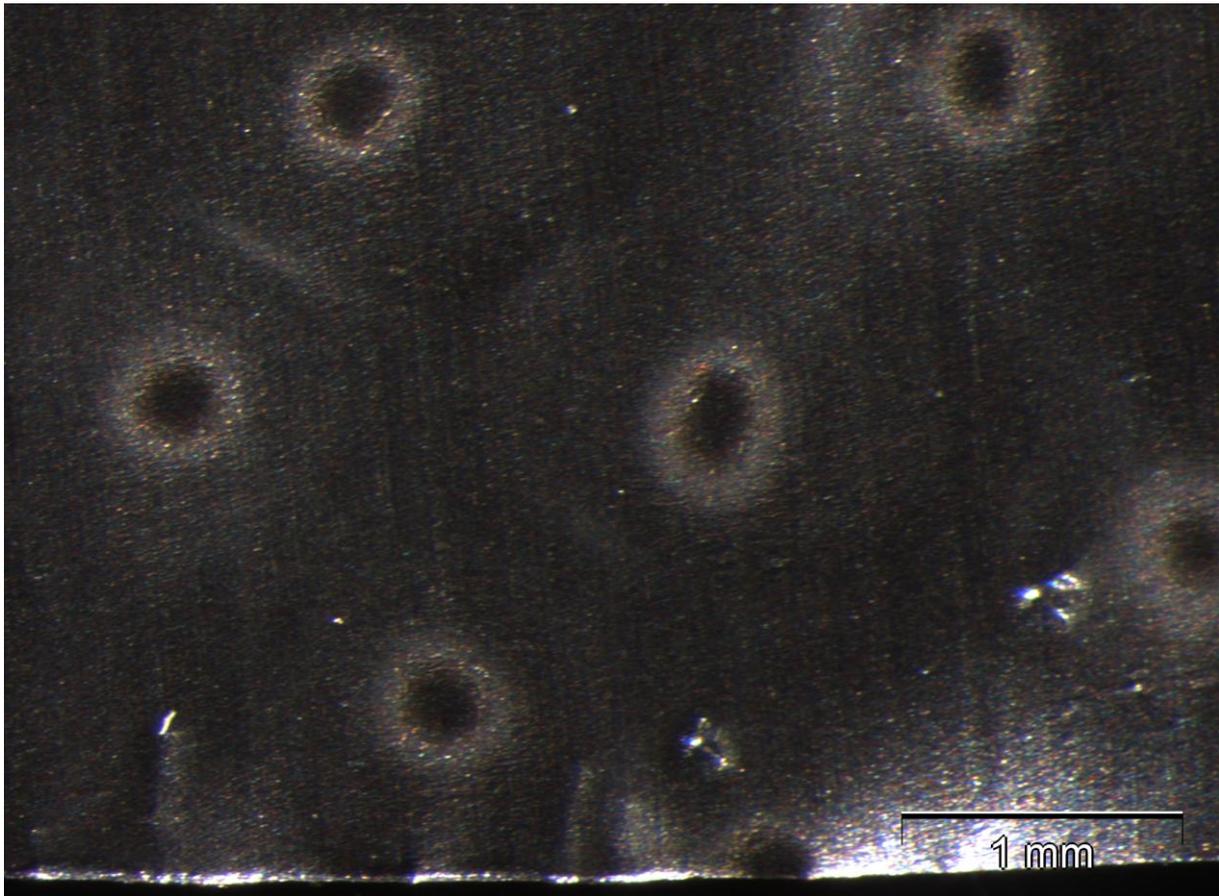


Abb. 282: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

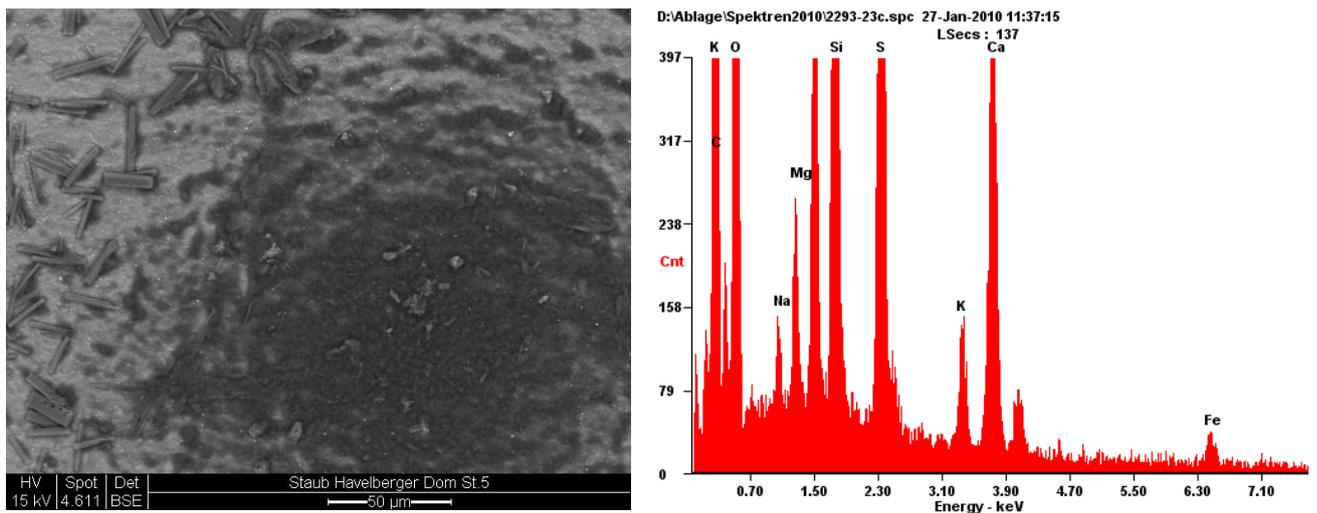


Abb. 283, 284: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen, Kristalle und unsymmetrische dunkle Materialanhäufungen gleicher Zusammensetzung wie Stufe 6, Ablagerungen sehr C - haltig, viele Fe - Partikel detektierbar

Stufe : 4

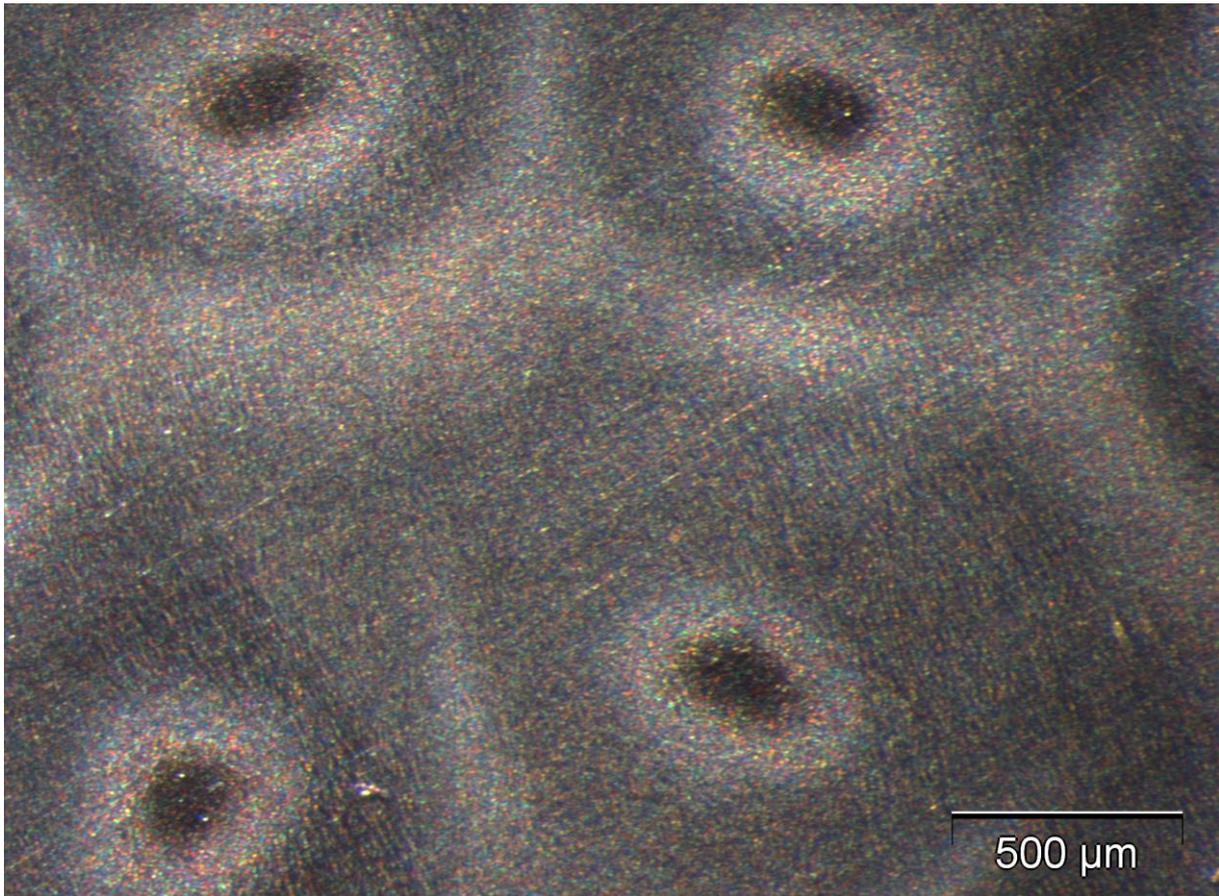


Abb. 285: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

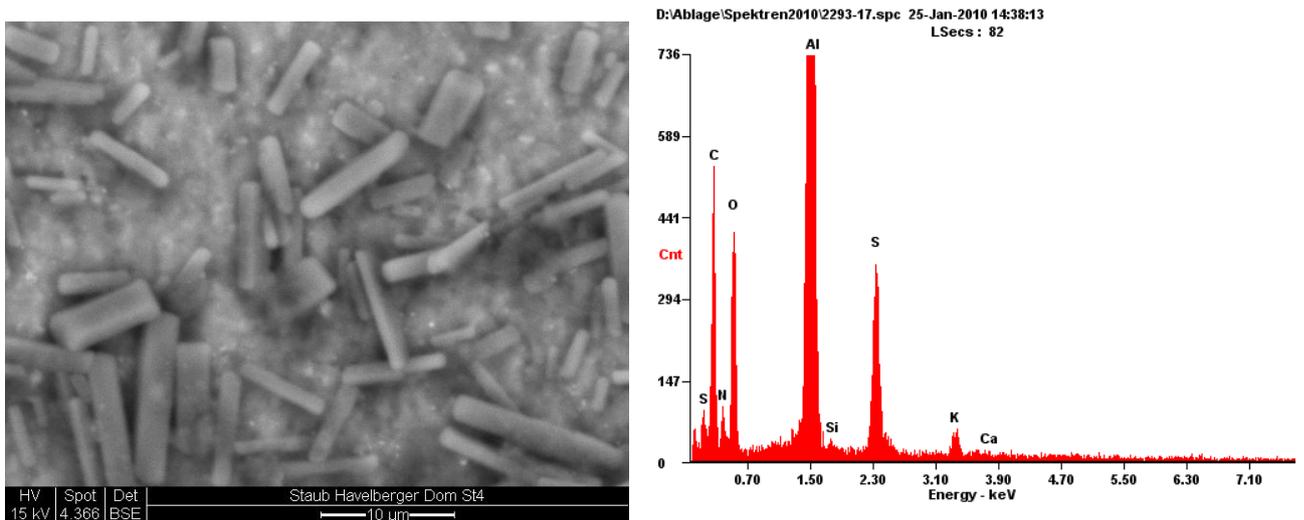


Abb. 286, 287: Elektronenmikroskopische Aufnahme neugebildeter Kristalle auf Aluminiumfolie und Elementzusammensetzung der Kristalle C, N, O, S, K,

Stufe 3:

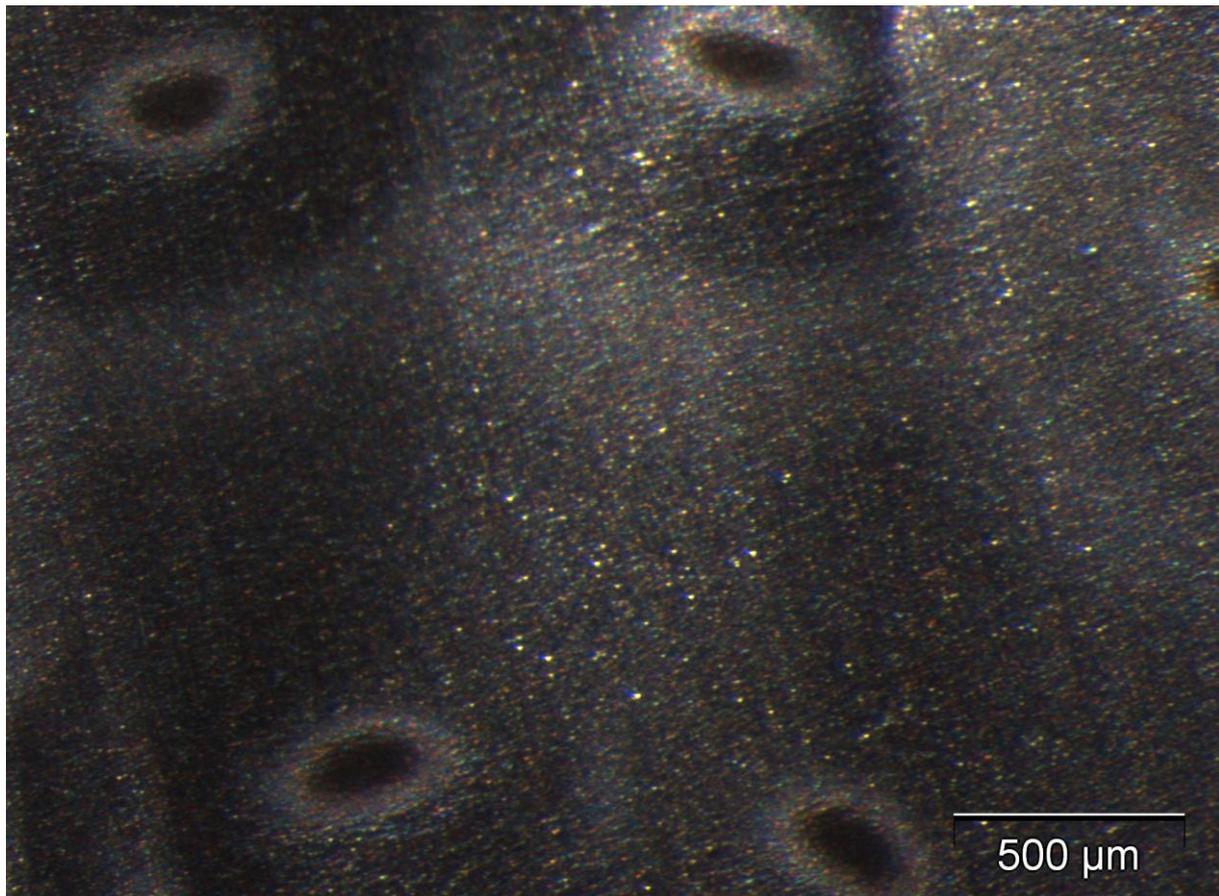


Abb. 288: Lichtmikroskopische Aufnahme der Staubablagerungen auf der Aluminiumfolie

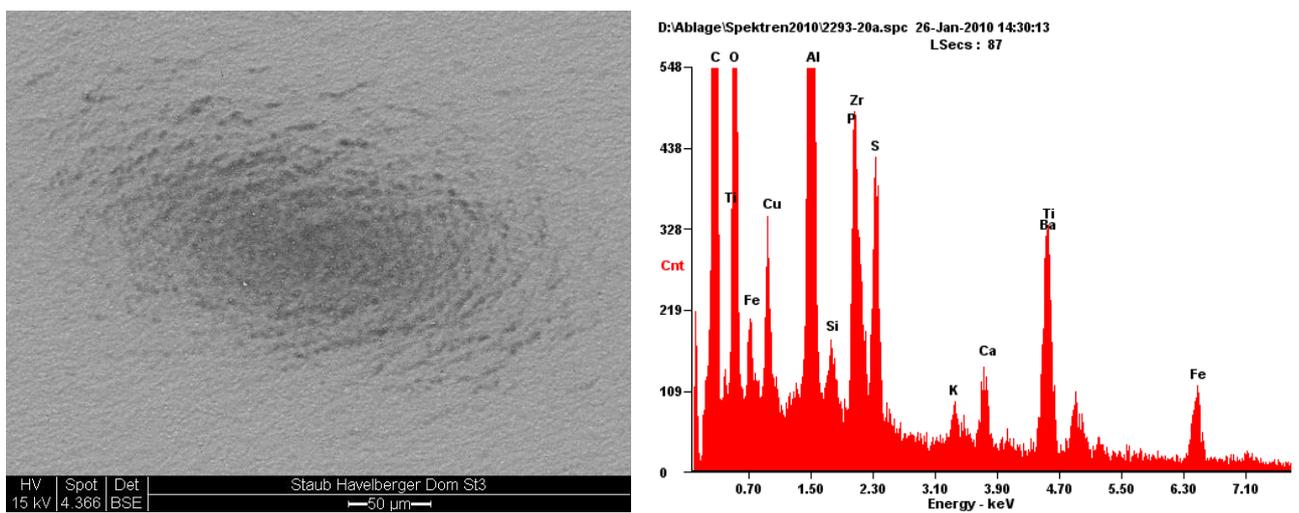


Abb. 289, 290: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung der Staubablagerungen(rechts), viele Fe - haltige Partikel detektiert, sehr selten Ba- und Cu - haltige Partikel

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Kohlenstoff-Probeträger von der Rückseite ausgewählter Glassegmente des Feldes nXI 3c aus dem Havelberger Dom



Abb. 291: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes nXI 3a von der Oberfläche nicht korrodierter und korrodierter Glasoberflächen

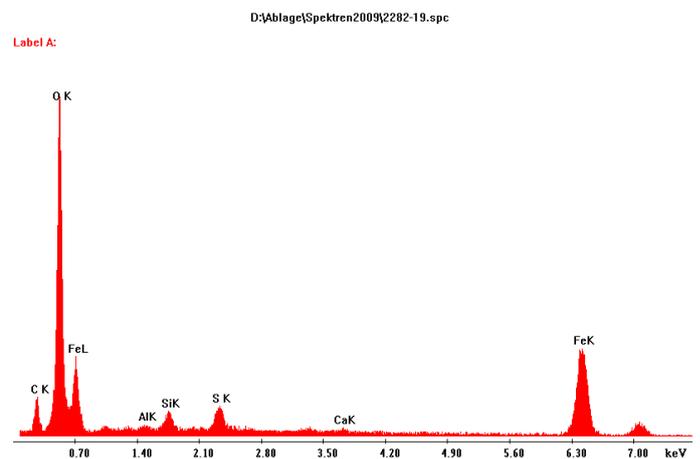
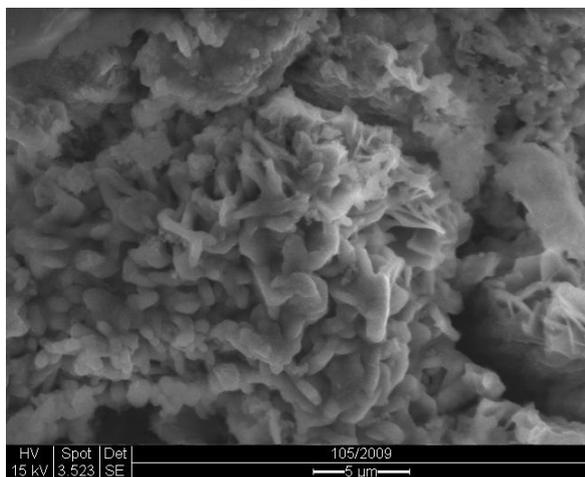


Abb. 292, 293: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der verwitterten Glasoberfläche mit einem hohen Gehalt an Eisenverbindungen

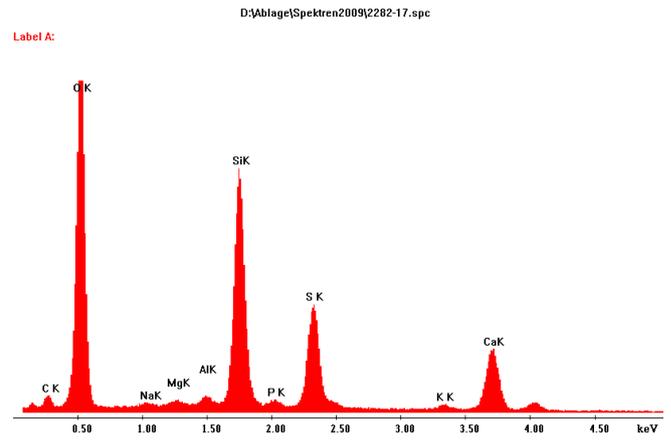
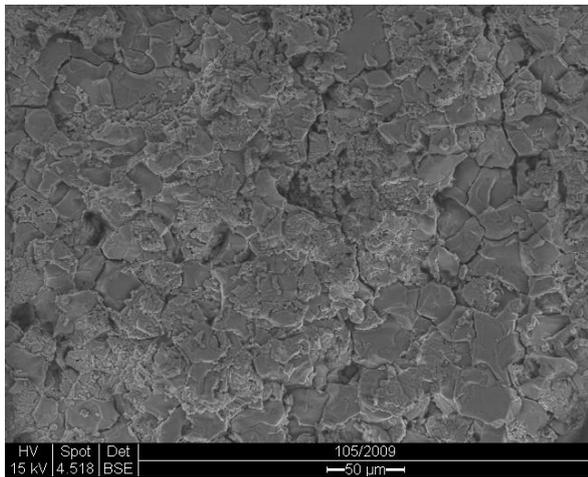


Abb. 294, 295: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der **korrodierten** Glasoberfläche mit Gips (Ca, S) und Gelschichtanteilen

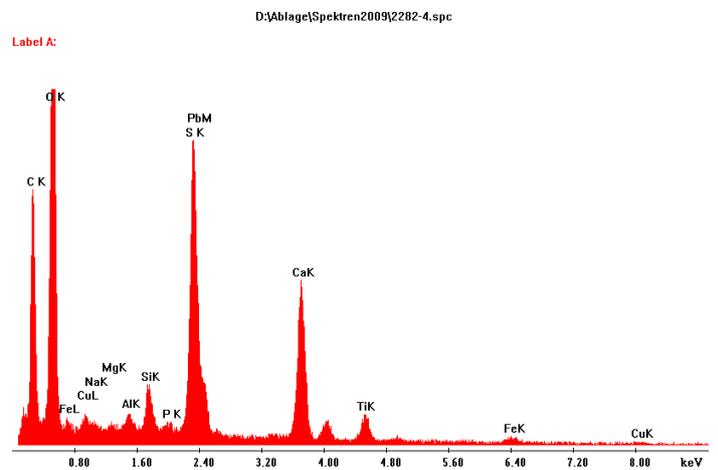
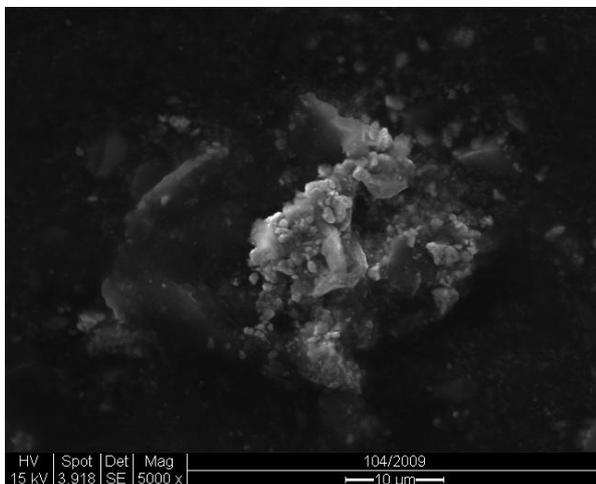
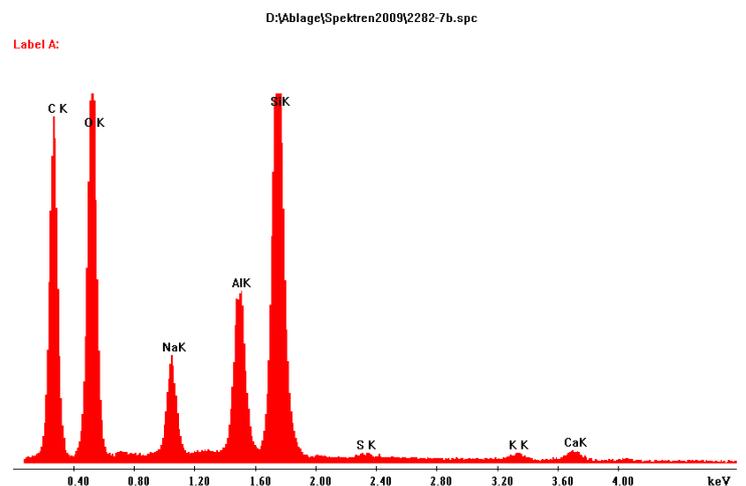
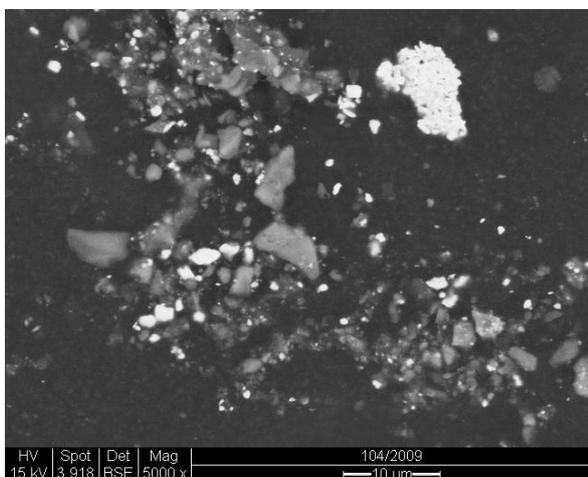


Abb. 296-299: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf **nicht korrodierten Gläsern**. Hauptbestandteile sind Blei (Pb) und Gips (Ca, S)



Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Si - Wafern im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung am Fester nXI des Havelberger Domes

Die Depositionsdauer des Si-Wafers betrug etwa ein Jahr, vom 03.11.2009 bis zum 25.10.2010. Der Staubsammler befand sich auf der Rückseite von Feld nXI 4b. Auf der Siliziumoberfläche hat sich während der Depositionsdauer Staub angelagert. Im ESEM mit EDX-Analyse wurden Partikel in der Größe zwischen 5-100 µm festgestellt und die Elementzusammensetzung bestimmt.

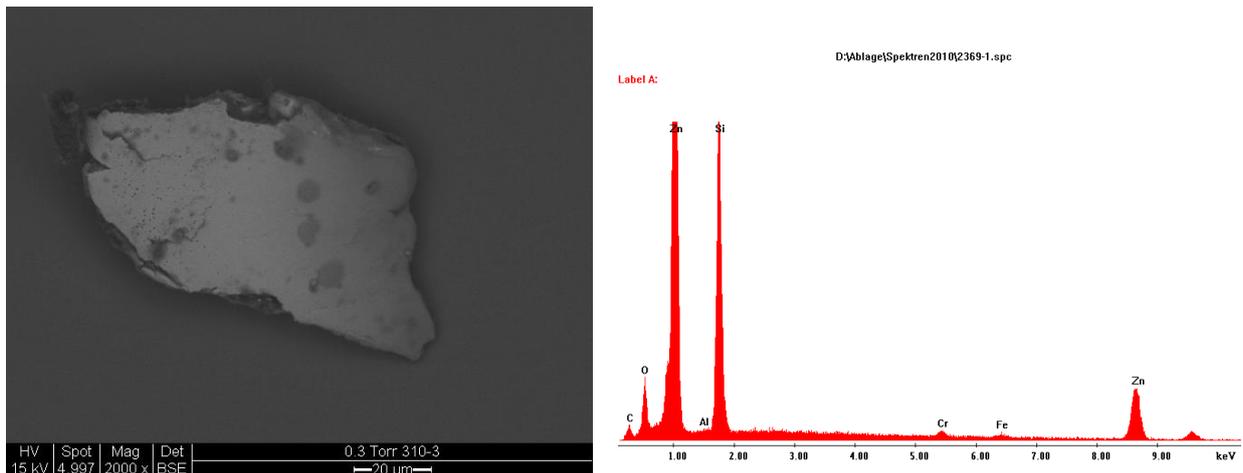


Abb. 300, 301: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit einem hohen Gehalt an Zinkverbindungen

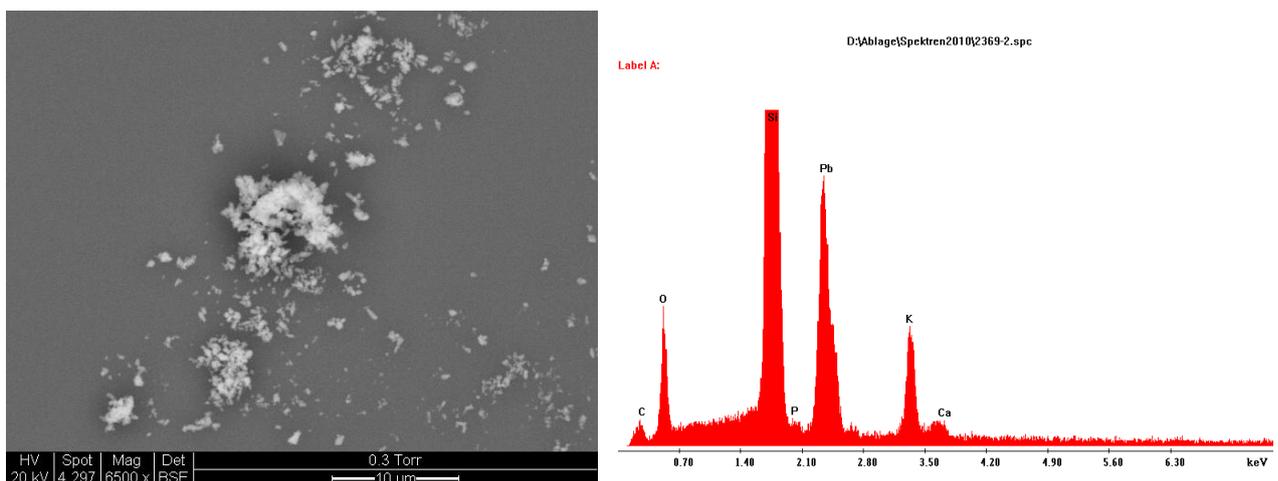


Abb. 302, 303: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit Kalium (K), Calcium (Ca) und Blei (Pb)-Anteilen.

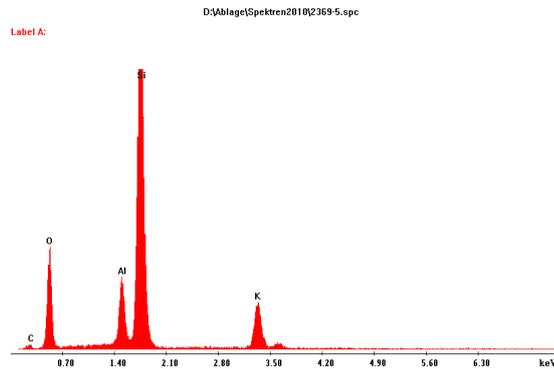
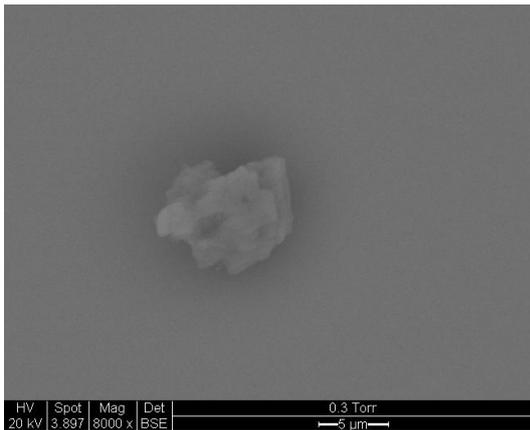


Abb. 304, 305: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit Kalium (K) und Aluminium (Al)-Anteilen.

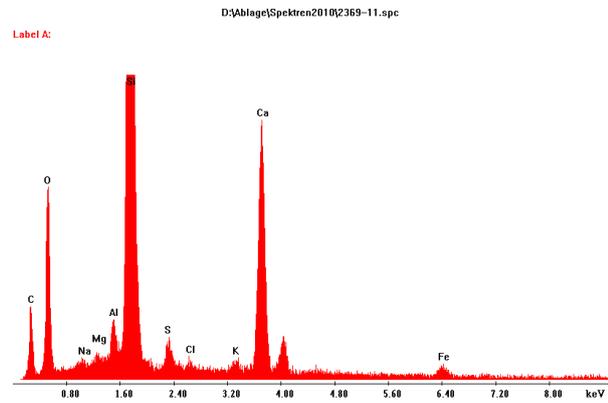
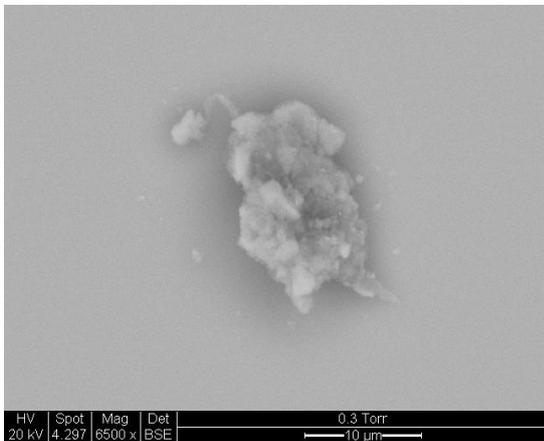


Abb. 306, 307: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit Kalzium (Ca), Schwefel (S), und Eisen (Fe)-Anteilen.

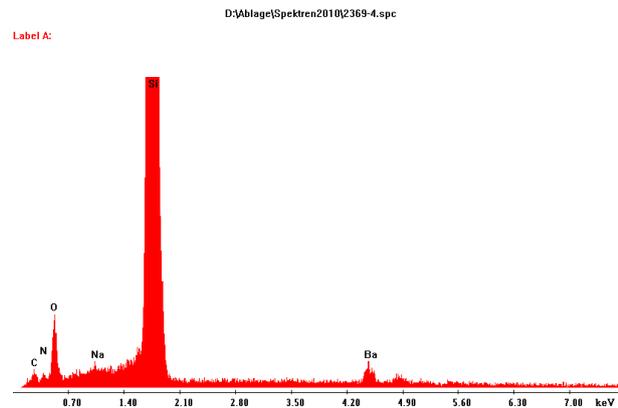
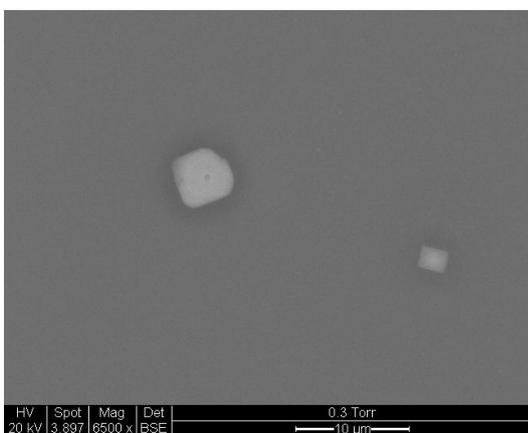


Abb. 308, 309: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit Barium (Ba), Natrium (Na) und Stickstoff (N)-Anteilen.

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Kohlenstoff-Probeträger von der Rückseite ausgewählter Glassegmente mehrerer Felder aus dem Dom in Halberstadt



Abb. 310, 311: Staubprobenahme auf der Rückseite der Felder nIV 1c und nIV 4c von der Oberfläche unverwitterter Gläser

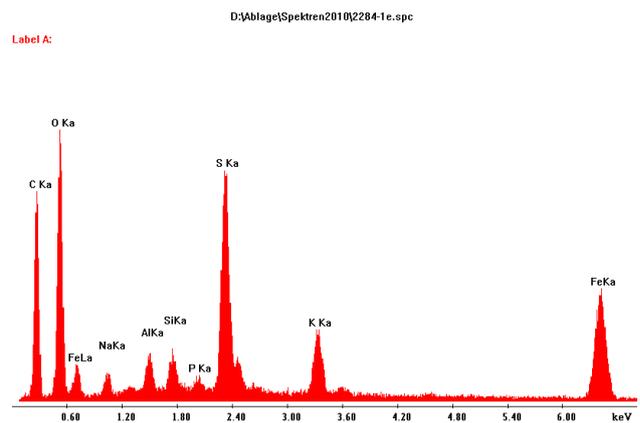
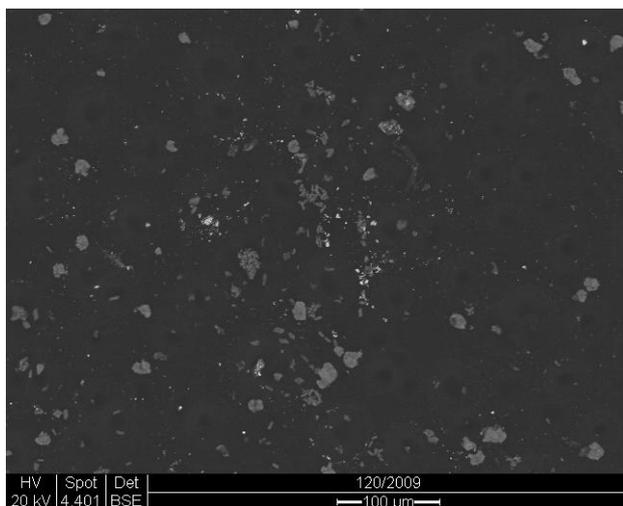


Abb. 312, 313: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der unverwitterten Glasoberfläche. Ablagerungen von Eisen (Fe), Kalium (K) und Schwefel (S).

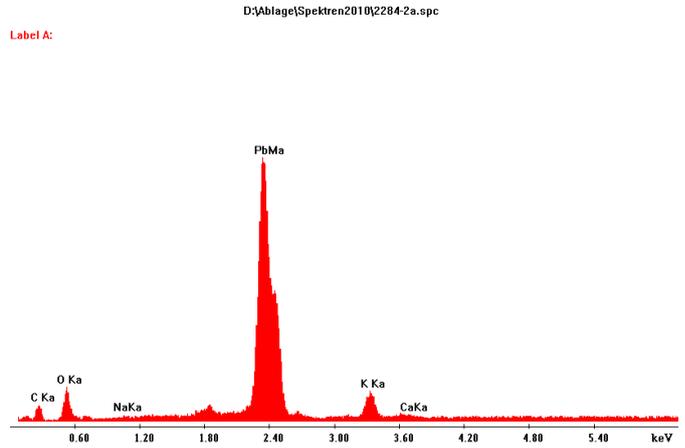
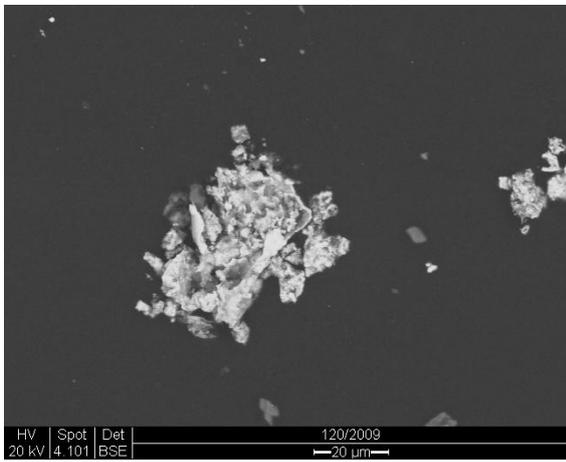


Abb. 314, 315: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der unverwitterten Glasoberfläche. Ablagerungen von Blei (Pb), Kalium (K) und Calcium (Ca).

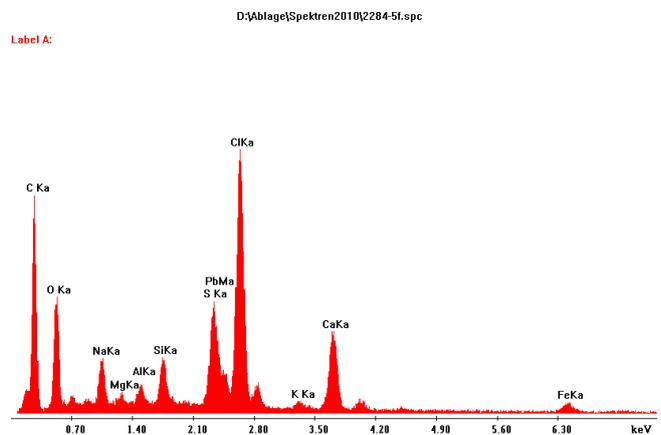
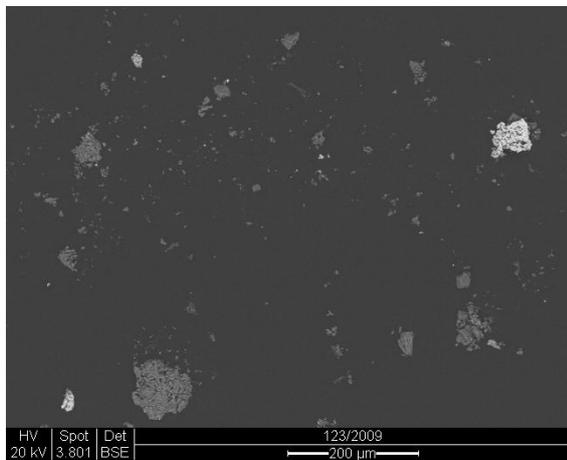


Abb. 316, 317: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der nicht korrodierten Glasoberfläche mit hohen Anteilen von Blei (Pb), Calcium (Ca) und Chlorid (Cl)-Verbindungen.

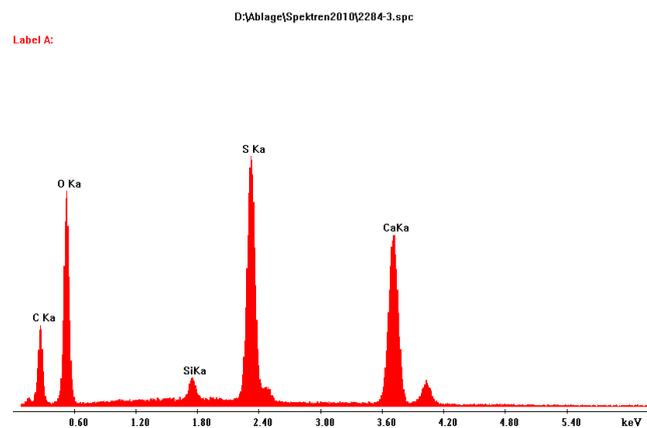
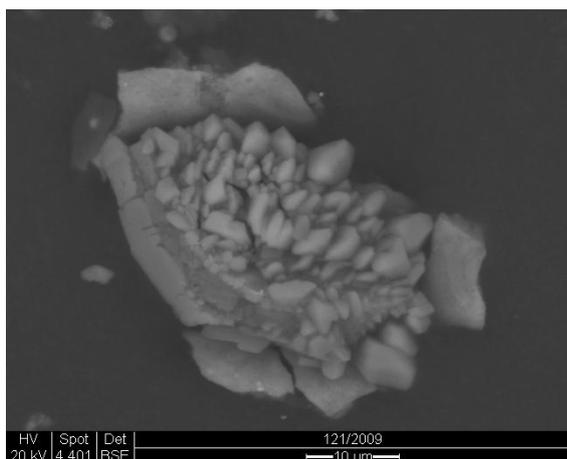


Abb. 318, 319: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf nicht korrodierten Gläsern. Hauptbestandteil sind Calcium- (Ca) und Schwefel (S)-Verbindungen.



Abb. 320: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes n IV 3c von der Oberfläche nicht korrodierter und korrodierter Glasoberflächen

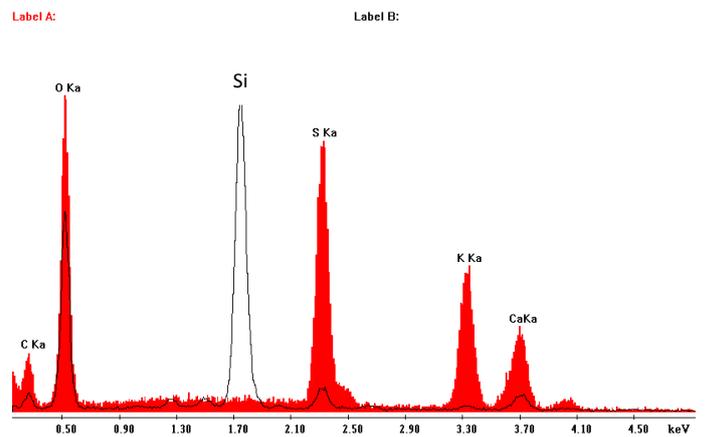
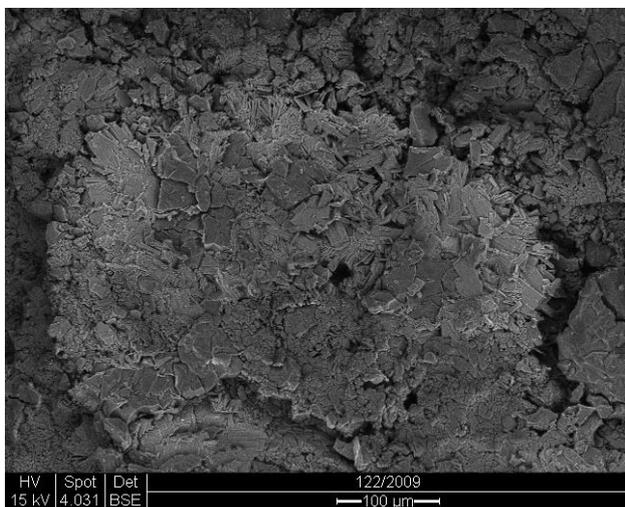


Abb. 321, 322: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf korrodierten Gläsern. Hauptbestandteil sind Calcium- (Ca), Kalium- (K) und Schwefel (S)-Verbindungen, weiterhin werden hohe Anteile an Silizium (Si) identifiziert.

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Si - Wafern im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung am Fenster nIV des Domes zu Halberstadt

Die Depositionsdauer des Si-Wafers betrug ein Jahr, vom 14.09.2009 bis zum 14.09.2010. Der Staubsammler befand sich auf der Rückseite von Feld nIV 1c. Auf der Siliziumoberfläche hat sich während der Depositionsdauer Staub angelagert. Im ESEM mit EDX-Analyse wurden Partikel in der Größe zwischen 5-100 µm festgestellt und die Elementzusammensetzung bestimmt.

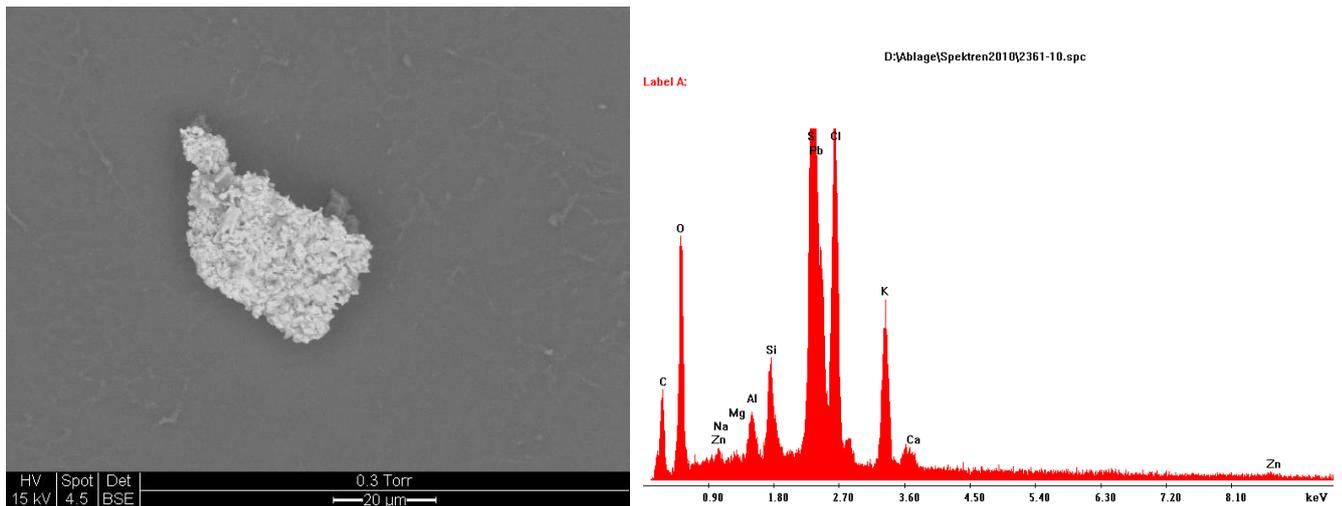


Abb. 323, 324: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nIV 1c mit einem hohen Gehalt an Kalium (K), Calcium (Ca), Schwefel (S), Blei (Pb), Chlor (Cl)

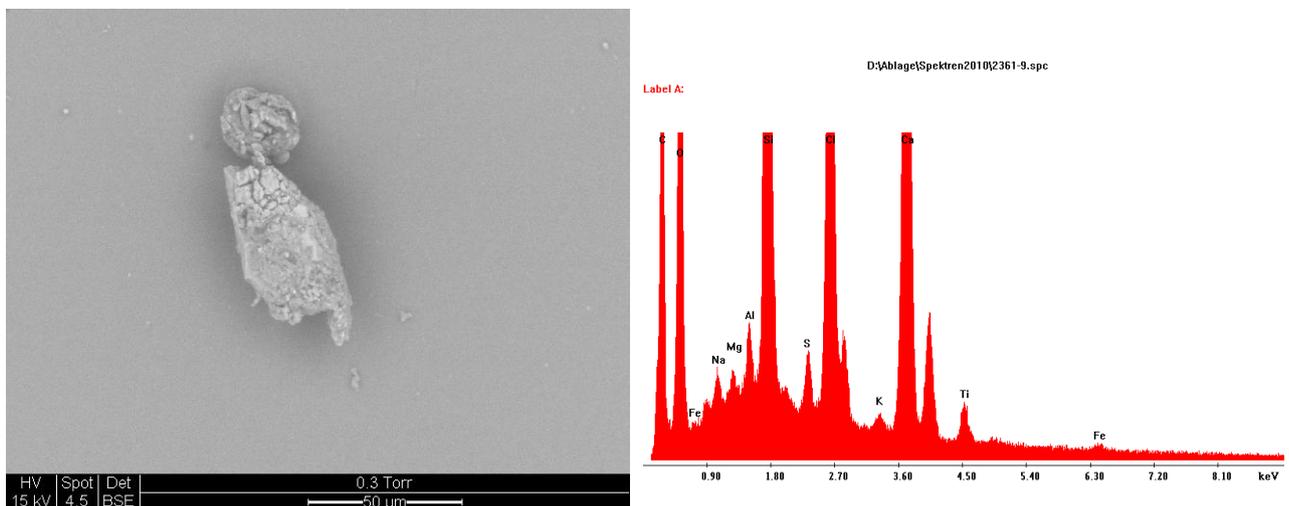


Abb. 325, 326: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nIV 1c mit Kalium (K), Calcium (Ca) Schwefel (S), Chlor (Cl) und Titan (Ti)-Anteilen.

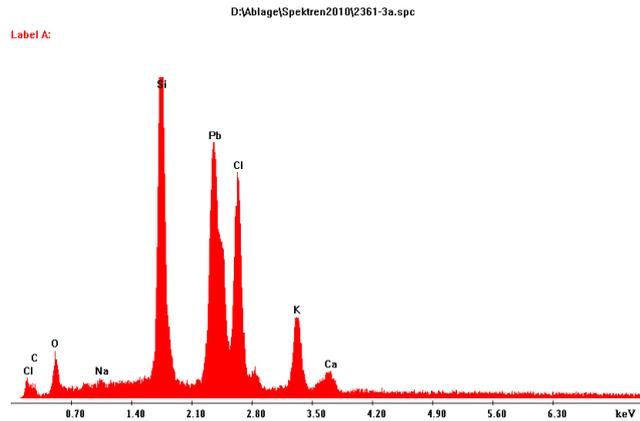
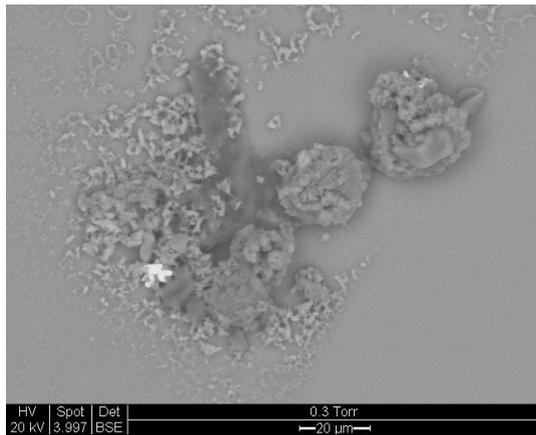


Abb. 327, 328: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nIV 1c mit Kalium (K), Calcium (Ca), Blei (Pb) und Chlor (Cl)-Anteilen.

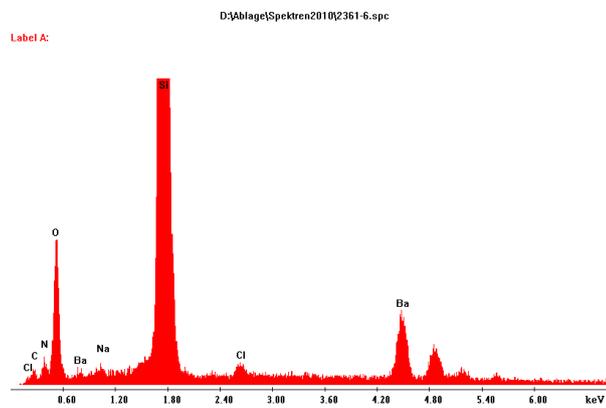
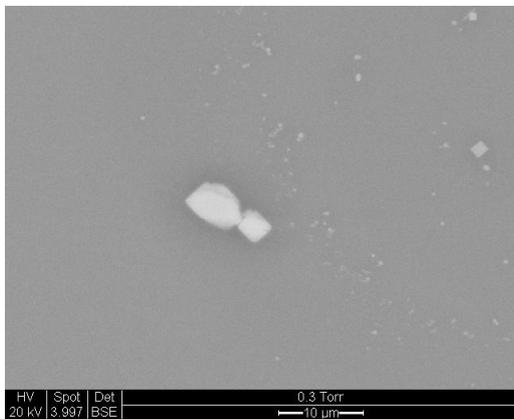


Abb. 329, 330: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nXI 4b mit Barium (Ba), Chlor (Cl), und Stickstoff (N)-Anteilen.

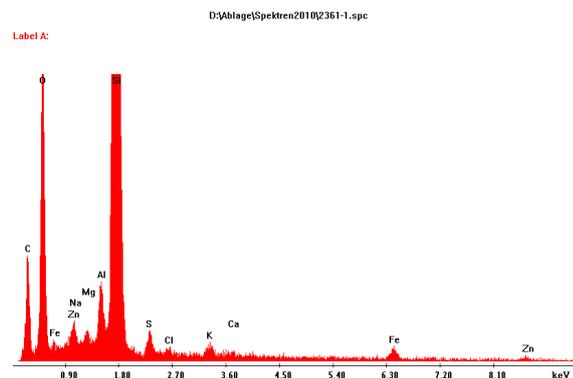
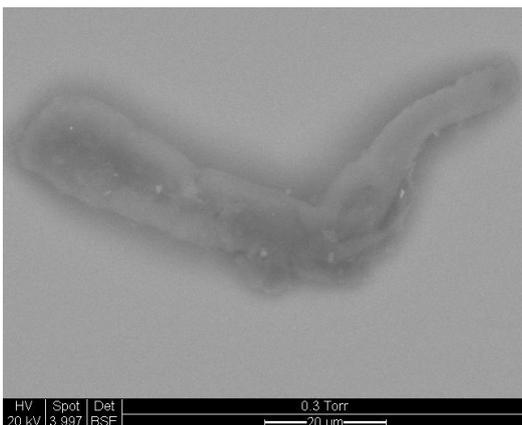


Abb. 331, 332: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes nIV 1c mit Zink (Zn), Eisen (Fe), Kalium (K), Calcium (Ca) und Schwefel (S)-Anteilen.

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Kohlenstoff-Probeträger von der Rückseite ausgewählter Glassegmente eines Feldes aus der Nikolaikirche Quedlinburg



Abb. 333: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes sVI 2c von der Oberfläche nichtkorrodierter Gläser

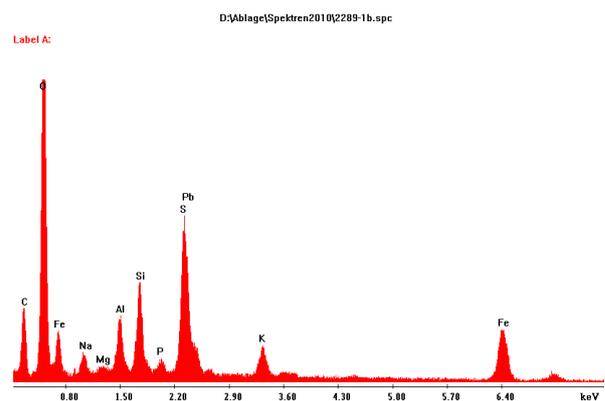
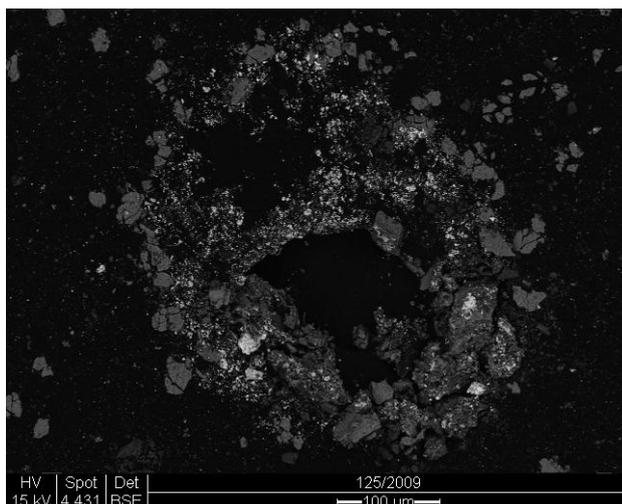


Abb. 334, 335: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der unverwitterten Glasoberfläche. Ablagerungen von Zink (Zn), Kupfer (Cu), Kalium (K), Silizium (Si), Eisen (Fe), Schwefel (S), Blei (Pb), Aluminium (Al) u.a.

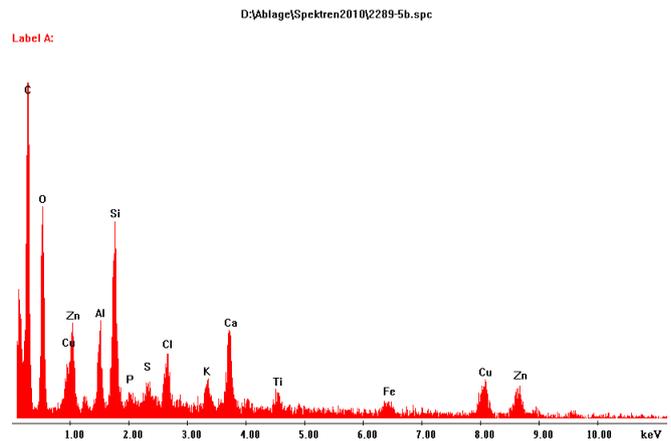
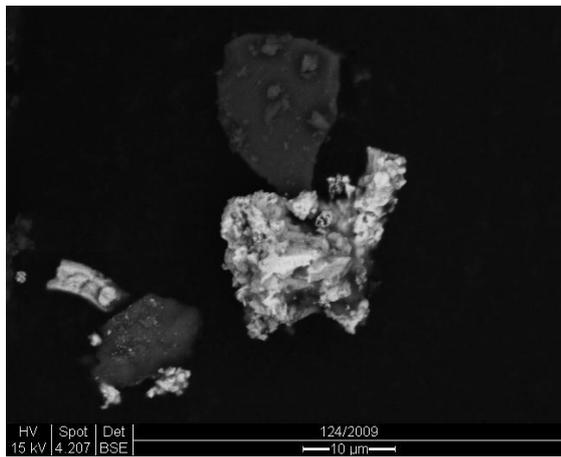


Abb. 336, 336: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der unverwitterten Glasoberfläche. Ablagerungen von Zink (Zn), Kupfer (Cu), Calcium (Ca), Silizium (Si), Eisen (Fe), Chlor (Cl) u.a.

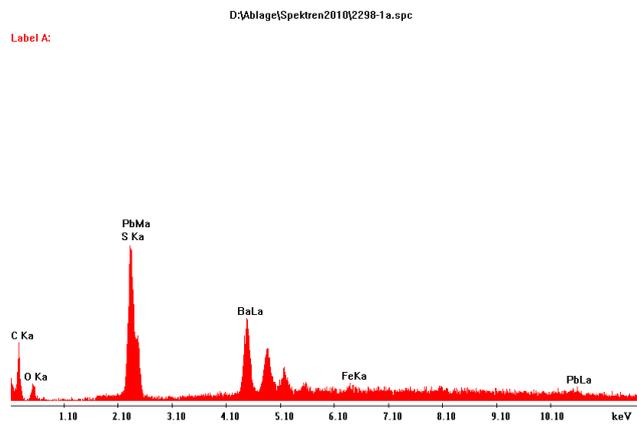
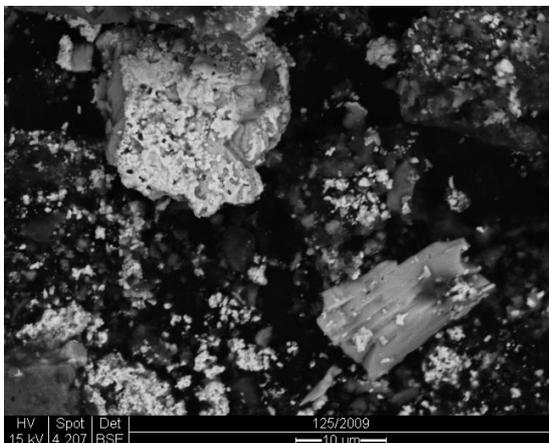


Abb. 338, 339: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der nicht korrodierten Glasoberfläche mit hohen Anteilen von Blei (Pb) und Barium (Ba)-Verbindungen

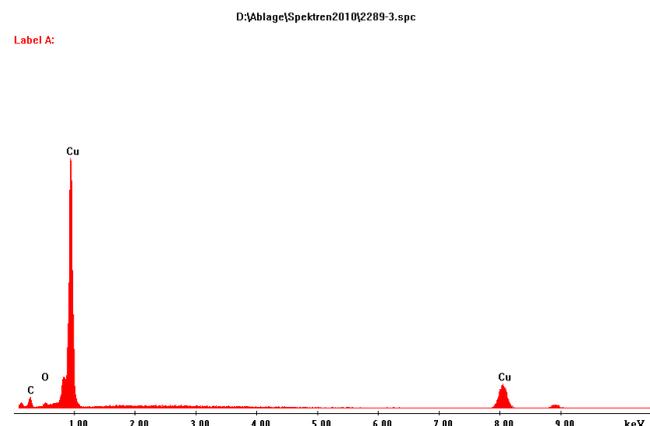
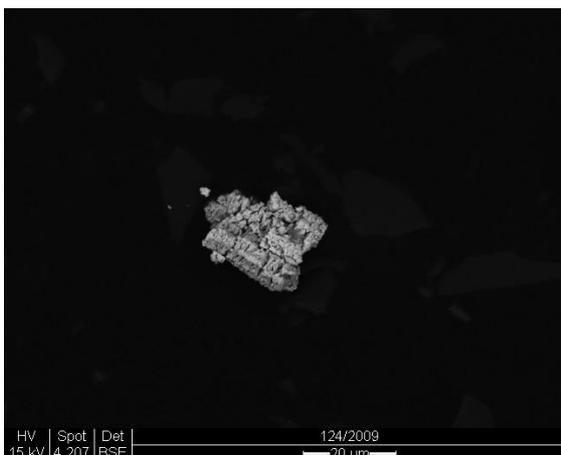


Abb. 340, 341: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf nichtkorrodierten Gläsern. Hauptbestandteil ist Kupfer (Cu)

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Si - Wafern im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung am Fenster sIV der Nikolaikirche Quedlinburg

Die Expositionsdauer des Si-Wafers betrug ein Jahr, vom 19.11.2009 bis zum 19.11.2010. Die Staubsammler befanden sich auf der Rückseite der Felder sIV 1c und sVI 6c. Auf der Siliziumoberfläche hat sich während der Depositionsdauer Staub angelagert. Im ESEM mit EDX-Analyse wurden Partikel in der Größe zwischen 10-400 µm festgestellt und die Elementzusammensetzung bestimmt.

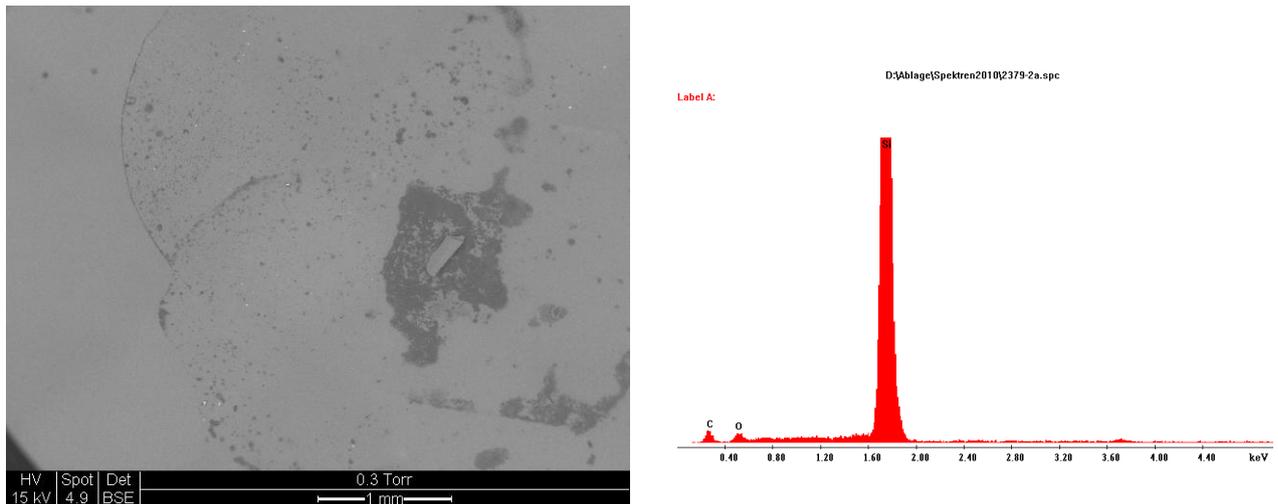


Abb. 342, 343: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) mit relativ großen Ablagerungen auf dem Staubsammler und Elementspektrum des Si-Wafers (rechts)

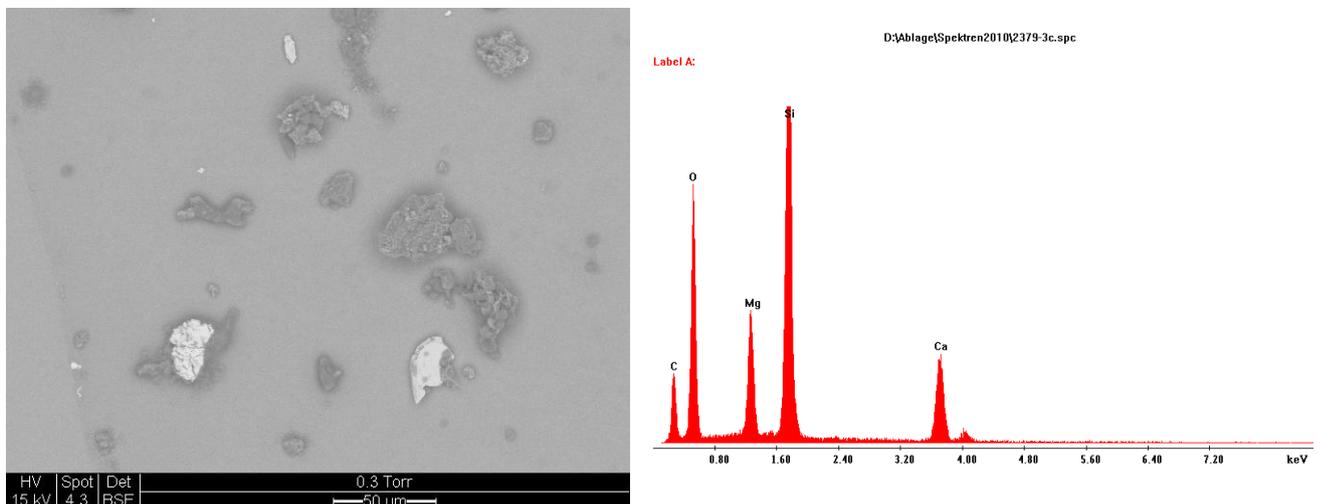


Abb. 344, 345: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes sIV 1c mit Calcium (Ca), Silizium (Si) und Magnesium (Mg)-Ablagerungen

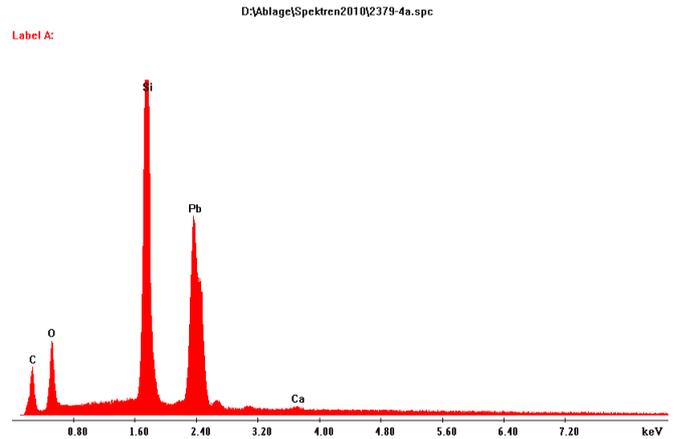
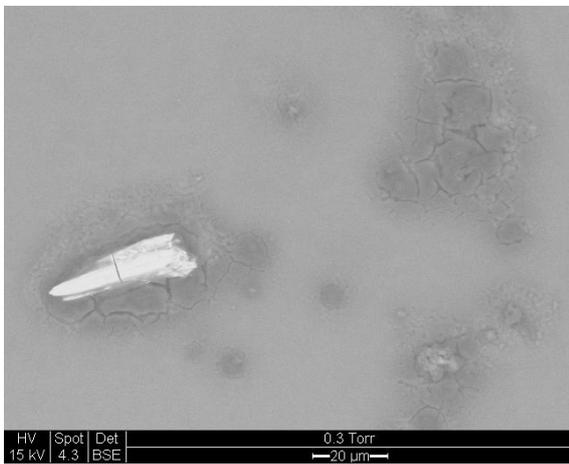


Abb. 346, 347: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes sIV 1c; helle Partikel sind Blei (Pb)-Teilchen

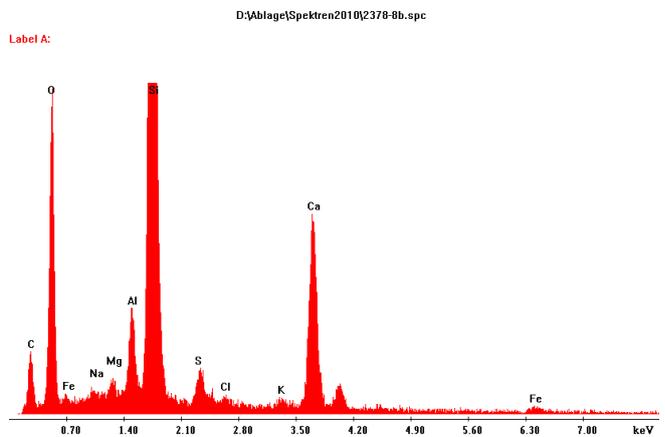
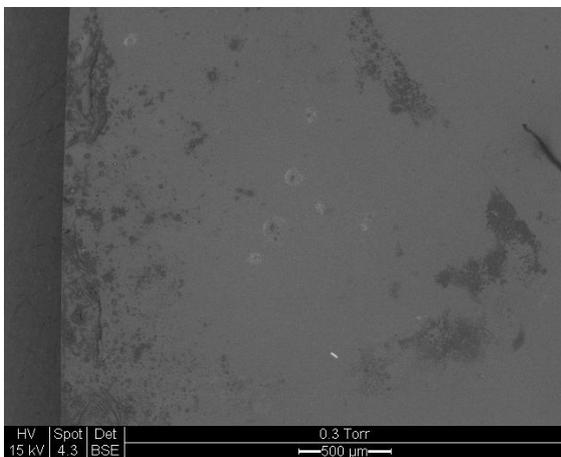


Abb. 348, 349: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes sIV 1c mit Calcium (Ca), Schwefel (S), und Eisen (Fe)-Anteilen.

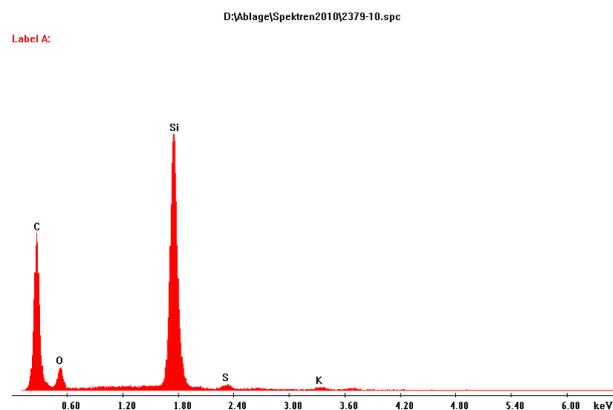
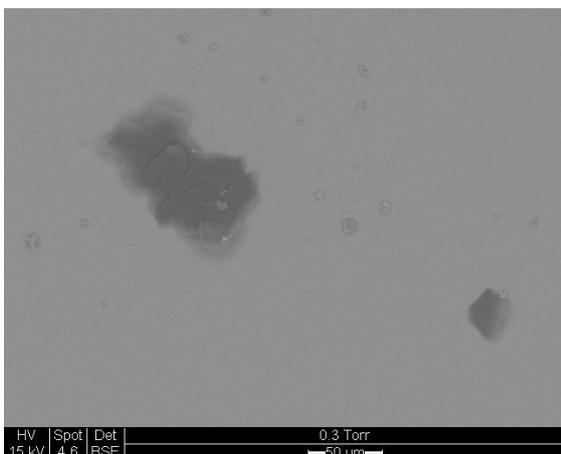


Abb. 350, 351: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf Si-Wafer auf der Rückseite des Feldes sIV 6c mit Silizium(Si), Kalium (K) und Schwefel (S)-Anteilen.

Analysenergebnisse der Staubprobenahme mit Kohlenstoff-Probeträger von der Rückseite ausgewählter Glassegmente unterschiedlicher Felder aus Marienstern in Panschwitz-Kuckau

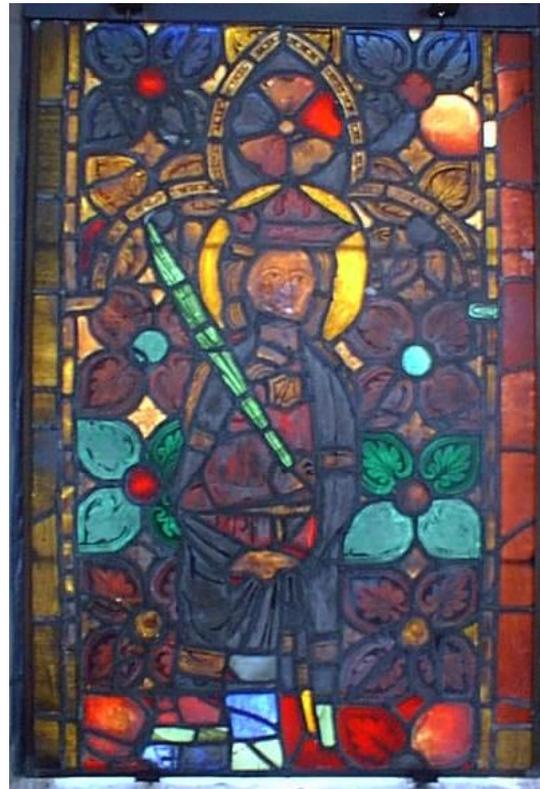


Abb. 352: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes 1a von der Oberfläche nicht korrodierter Glasoberflächen (rotes Glas unten)

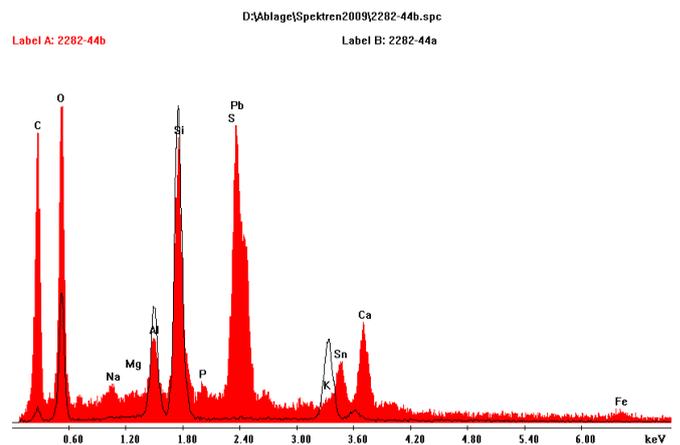
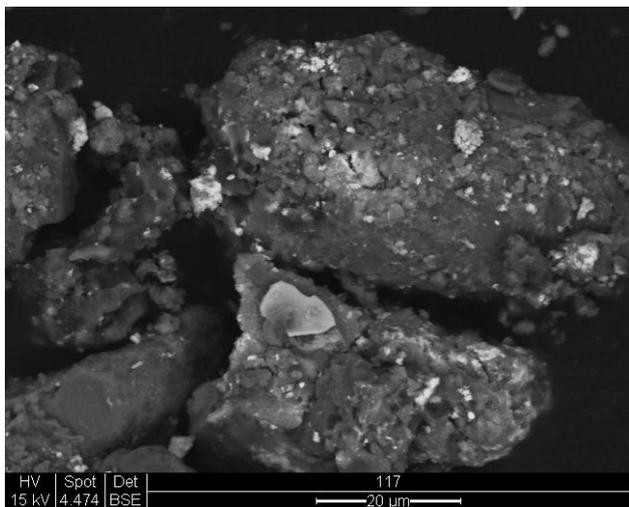


Abb. 353, 354: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der unverwitterten Glasoberfläche mit einem hohen Gehalt an Blei- (Pb), Silizium- (Si), Calcium- (Ca) und Zinn-(Sn)-Verbindungen. Auffällig ist der hohe Kohlenstoffanteil in den Staubproben.



Abb. 355, 356: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes 1b von der Oberfläche nicht korrodierter Glasoberflächen (gelbes Glas unten)

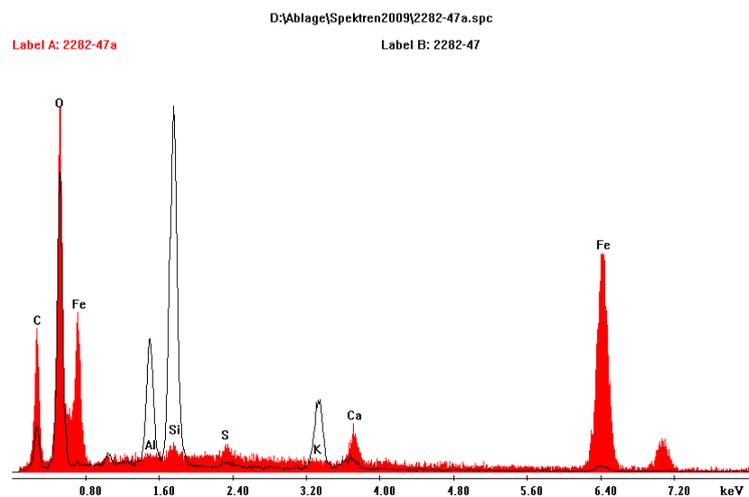
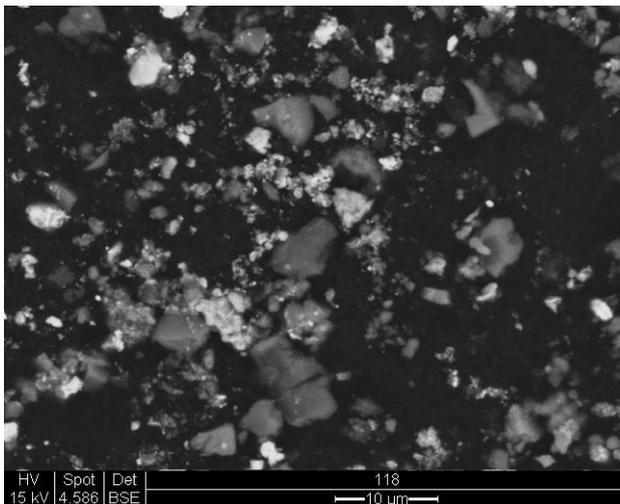


Abb. 357, 358: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf der nicht korrodierten Glasoberfläche mit hohen Anteilen von Eisen- (Fe), Silizium- (Si), Calcium- (Ca), und Aluminium- (Al)-Verbindungen.

Abb. 359: Staubprobenahme auf der Rückseite des Feldes 1c von der Oberfläche nichtkorrodierter Glasoberflächen (grünes Glas unten)

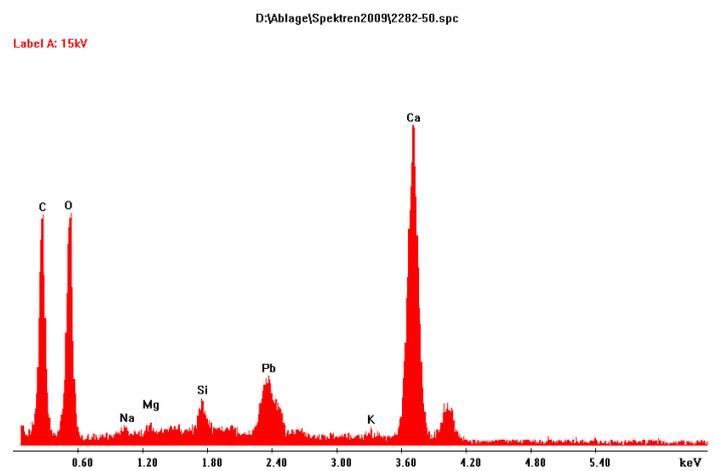
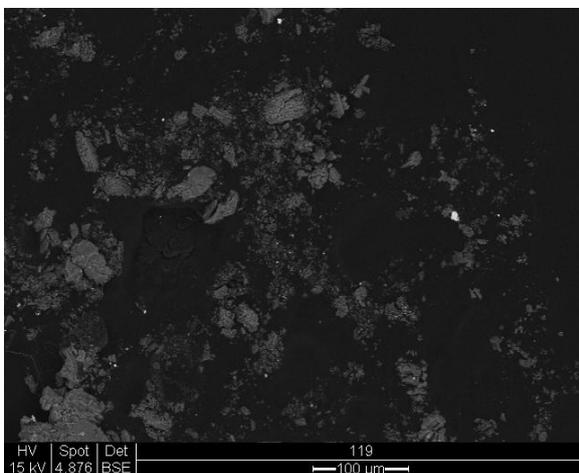
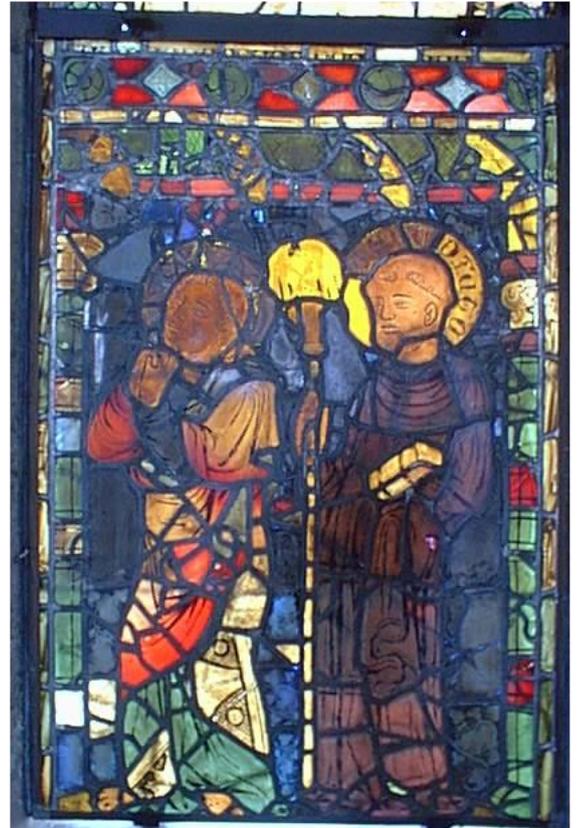


Abb. 360, 361: Elektronenmikroskopische Aufnahme (links) und Elementzusammensetzung (rechts) von Staubablagerungen auf nichtkorrodierten Gläsern. Hauptbestandteile sind Calcium- (Ca), Blei- (Pb) und Silizium- (Si) Verbindungen

5.4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Die Probenahmedauer mit dem Kaskadenimpaktor erfolgte sowohl im Stendaler Dom als auch im Dom zu Havelberg für jeweils 4h, dennoch unterschieden sich die Staubkonzentrationen quantitativ auf den Stufen des Kaskadenimpaktors schon rein visuell deutlich voneinander. Im Vergleich zur Stendaler Probenahme ist die Partikelkonzentration der Staubprobenahme im Havelberger Dom auf den einzelnen Stufen des Kaskadenimpaktors wesentlich geringer. Staubpartikel wurden auf allen Stufen des Kaskadenimpaktors gefunden. Der erfasste Größenbereich liegt zwischen 10 µm und 0,03 µm Partikeldurchmesser. Bei der Probenahme mit Hilfe der Si-Wafer als Staubsammler im Langzeitversuch, wurden auch größere Partikel > 400 µm nachgewiesen. Die Probenahme von der Rückseite der Originalfelder sowohl von korrodierten als auch nicht korrodierten Oberflächen ermöglicht den direkten Vergleich zu den Probenahmeverfahren mit Kaskadenimpaktor und Si-Wafer und liefert möglicherweise Rückschlüsse zur Herkunft und Deposition von Staublasten. Aufgrund der eingesetzten Aluminiumfolien zur Staubabscheidung im Kaskadenimpaktor wird in allen EDX-Spektren ein deutlicher Al-Peak sichtbar. Kohlenstoff wird ebenfalls in allen Spektren detektiert, teilweise aufgrund der Bedampfung der Proben. Der Sauerstoffpeak (O) lässt darauf schließen, dass es sich nicht um elementare Partikel handelt, sondern um chemische Verbindungen.

Eine Gruppe der nachgewiesenen Elemente, die auf allen Stufen des Kaskadenimpaktors gefunden wurde, sind Calcium (Ca), Kalium (K) und Schwefel (S). Eine weitere Gruppe von Elementen sind Eisen (Fe), Blei (Pb) und Aluminium (Al). Desweiteren wurden auch häufig die Elemente Silizium (Si), Barium (Ba), Natrium (Na) und Magnesium (Mg) in diesen Staubproben analysiert.

Auf den Stufen 6, 5 und 4 des Kaskadenimpaktors wurden sowohl für die Staubprobenahme im Stendaler Dom als auch in Havelberg Kristalle festgestellt, die wesentlich größer waren als der zulässige aerodynamische Partikeldurchmesser der entsprechenden Stufe. Diese müssten sich somit aus dem gesammelten Aerosol erst nach der Abscheidung auf diesen Stufen gebildet haben. Ihre Größe beträgt zwischen 20 µm und >100 µm, vereinzelt sind sie bereits im Lichtmikroskop sichtbar (s. Stufe 6 Havelberger Dom). Die EDX-Analysen dieser Kristalle weisen jeweils auf Stickstoff (N), Kohlenstoff (C) und Sauerstoff (O) hin, häufig in Kombination mit Schwefel (S) und Kalium (K). IR-Untersuchungen zur Identifizierung der Kristalle erwiesen sich insofern als schwierig, da die Kristalle nicht langzeitstabil sind und Veränderungen schon nach den Untersuchungen im ESEM festgestellt wurden. Aus Untersuchungen der Luftqualität in Kirchen in Dänemark ist bekannt, dass sich aus Ammoniak, der in der Landwirtschaft und bei der Massentierhaltung freigesetzt wird und aus NO_x (erhöhte Konzentration in der Luft aufgrund des steigenden Autoverkehrs) Ammoniumnitrat NH₄NO₃ bilden kann /20/. Die Bildung dieser Verbindung aus den Ausgangsstoffen (NO_x, NH₄) im gesammelten Aerosol bei entsprechenden Temperatur- und Feuchtigkeitsverhältnissen auf den Stufen 4-6 im Kaskadenimpaktor ist denkbar, zumal es

sich sowohl beim Stendaler- als auch beim Havelberger Dom um Objekte mit intensiver Landwirtschaft und Tierhaltung in der Umgebung handelt. Problematisch bei dieser Reaktion im Kirchenraum ist jedoch, dass dabei Salpetersäure entsteht, die sich auf Wand- und auch Glasoberflächen niederschlagen kann.

Bei der Staubprobenahme mit Hilfe von C-Tabs von der Oberfläche korrodierter Glasoberflächen wurden hauptsächlich Elemente wie Calcium (Ca) und Schwefel (S) bzw. zusätzlich noch Kalium (K) analysiert, die ebenso als Bestandteile der Korrosionsprodukte (Gips, Syngenit) von der Glasoberfläche herausgelöst worden sein können. Insbesondere die Anteile von Silizium (Si) auf korrodierten Oberflächen deuten auf Gelschichtrelikte hin, die Bestandteil der verwitterten Glassubstanz sind. Auf korrodierten und nicht korrodierten Glasoberflächen wurden weiterhin Verbindungen von Blei (Pb), Eisen (Fe), Kupfer (Cu) sowie vereinzelt Barium (Ba), Titan (Ti), Chlor (Cl) und Zink (Zn) - Partikel identifiziert. Aufgrund der Größe dieser Partikel lässt sich abschätzen, dass es sich dabei nicht um Komponenten des Glases, sondern um Ablagerungen aus den übrigen Bestandteilen (Verbleiung, korrodierte Windeisen, Kupferrahmen bzw. auch aus der Umgebung (Farbanstriche) handelt.

Auf allen Si-Wafern haben sich ebenfalls im Langzeitversuch Staubablagerungen angesammelt. Die Partikelgröße lag zwischen 5-100 µm, in der Nikolaikirche Quedlinburg sogar bis etwa 400 µm Größe. Unterschiede in der Art bzw. Konzentration der Partikel ließen sich infolge der unterschiedlichen Expositionshöhen der Staubsammler nicht feststellen. Die Ergebnisse der EDX-Analysen der Si-Wafer lassen sich wiederum in drei Gruppen aufteilen. In der ersten Gruppe findet man auf allen exponierten Si-Wafern die Elemente Kalium (K), Calcium (Ca) und Schwefel (S). Offensichtlich handelt es sich dabei um Partikel der Korrosionsschichten, die aufgrund der Luftbewegung im Spalt von der Rückseite der Glasmalereifelder abgelöst werden. In der zweiten Gruppe sind metallische Partikel wie Eisen (Fe), Blei (Pb), Kupfer (Cu), Aluminium (Al) und Zink (Zn). Hierbei handelt es sich vermutlich um Korrosionsprodukte oder Abrieb von Konstruktionselementen. In der dritten Gruppe wurden die Elemente Magnesium (Mg), und Chlor (Cl) zusammengefasst, die nur relativ selten gefunden wurden. Sowohl in Havelberg als auch in Halberstadt ist auf den Si-Wafern auch Stickstoff analysiert worden, der aus intensiver Landwirtschaft oder Abgasen des Autoverkehrs stammen könnte.

Die Untersuchungen zeigen, dass mit dem Kaskadenimpaktor und der Probenahme mit Si-Wafern nahezu die gleichen Partikel gefunden werden. Die Probenahme von der Rückseite der Glasmalereien mit C-Tabs lassen Rückschlüsse zur Herkunft der Staubbelastung im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung zu. Die Staubpartikel stammen sowohl von der Oberfläche der korrodierten Gläser als auch von den Konstruktionselementen und Farbanstrichen. Die Probenahme mit dem Kaskadenimpaktor im Stendaler Dom lieferte eine höhere Partikelanzahl auf den einzelnen Stufen als die im Havelberger Dom. Die Ursache dafür liegt vermutlich nicht nur in den geometrischen Abmessungen der beiden Fenster. In

dem größeren Fenster im Stendaler Dom wurde auch eine deutlich höhere Luftgeschwindigkeit gemessen, die für den Abtrag von verwitterten Glasbestandteilen verantwortlich sein kann. Um Materialverluste an den Glasmalereifeldern zu vermeiden sollte die Luftgeschwindigkeit im Spalt nicht zu hoch sein, geringe Werte sind in dieser Hinsicht eher günstiger.

Inwiefern Staubanlagerungen auf Gläsern unter den Temperatur – und relativen Luftfeuchtheitswerten zu Veränderungen auf Glasoberflächen führen können, wurde an Modellgläsern mit mittelalterlicher Zusammensetzung durch künstliche Bewitterung im Klimaschrank getestet. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Kapitel beschrieben.

6. Simulationsversuche zur Wirkung von Stäuben auf Modellgläser mittelalterlicher Zusammensetzung

6.1 Bewitterung im Klimaschrank

Aus der Kombination der unterschiedlichen Verfahren zur Staubsammlung und den EDX-Elementanalysen der feinen Partikel kann man auf chemische Verbindungen schließen, die sich im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung auf der historischen Glassubstanz anreichern können. Als chemische Verbindungen sind Calciumsulfathydrat, Syngenit, Calciumkarbonat, Kaliumkarbonat, Eisenoxid, Bleikarbonat u. a. möglich.

Als Hauptbestandteile handelt es sich dabei im Wesentlichen um Partikel der Korrosionsschichten und metallische Partikel der Konstruktionselemente. Die Wirkung solcher Ablagerungen auf Modellgläser mit historischer Zusammensetzung unter simulierten klimatischen Bedingungen wurde im Klimaschrank untersucht.

Die Grundlage für die Modellgläser sind Analysen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung an mittelalterlichen Gläsern. Auf dieser Basis wurden die Modellgläser im Labormaßstab erschmolzen (Tabelle).

Tabelle 12: Chemische Zusammensetzung der Modellgläser in Masse% (Synthese)

	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO
Pk1a	45,0	0,5	31,0	16,0	4,0	1,0	1,5	0,5	0,5
Pk2	46,0	-	23,5	23,5	4,0	1,0	1,5	-	0,5
KS1	45,0	2,0	17,0	23,5	5,4	1,8	3,8	-	1,5

Die Gläser PK1a, PK2 und KS1 sind wie die meisten mittelalterlichen Gläser sehr korrosionsempfindlich. Sie zeigen jedoch aufgrund ihrer Zusammensetzung eine Abstufung in ihrer Empfindlichkeit gegenüber Umwelteinflüssen in der Reihenfolge PK1a > PK2 > KS1. Um Veränderungen auf der Glasoberfläche gut sichtbar zu machen, wurden die Glasblöcke in Scheiben geschnitten und die Proben einseitig mechanisch poliert. Für die Bewitterungstests im Klimaschrank wurden die Modellgläser zuvor im Ultraschallbad mit Alkohol gereinigt und jeweils ca. ¼ der Oberfläche (rechts oben) mit Tesafilm abgeklebt. Etwa 1 cm² der Oberfläche blieb so unbewittert.

Zur Simulation der Staubdeposition auf den Glasoberflächen wurden folgende chemische Verbindungen verwendet: CaSO₄, ½ H₂O, K₂CO₃, CaCO₃, PbCO₃, Fe₂O₃. Etwa die Hälfte der Oberfläche jeder Modellglassorte wurde mit den reinen pulverförmigen Chemikalien belegt. Auf einer weiteren Probe je Modellglassorte erfolgte die Belegung mit einer Mischung aus allen Modellstäuben und jeweils eine Probe je Sorte wurde mit Staub aus dem Stendaler Dom, der aus den Versuchen mit dem Kaskadenimpaktor stammt (von Stufe 4, 5 und 6) in Kontakt gebracht. Auf etwa einem weiteren Viertel aller Modellglasoberflächen befanden sich weder Tesafilmabdeckung noch Staubablagerungen. Diese Flächen waren zwar auch der

direkten Bewitterung ausgesetzt, stellen aber ebenso wie die mit Tesafilm abgeklebte Flächen für die nachfolgenden Untersuchungen eine Referenzfläche dar.

Die Bedingungen im Klimaschrank wurden in Anlehnung an die Ergebnisse der Klimamessungen wie folgt festgelegt. Bei einer Temperatur von 50 °C betrug die relative Luftfeuchte 40 % anschließend sinkt die Temperatur auf 10 °C und die relative Luftfeuchtigkeit steigt auf 90% (Tag-Nachtrhythmus). Zusätzlich wurde ein Zyklus bei -10 °C durchfahren, um Sommer und Winter zu simulieren. Im Tag- und Nachtrhythmus wurden die Extremwerte jeweils 2 Stunden gehalten. Die Temperatur und Feuchteänderungen erfolgten innerhalb von einer Stunde. Nach jeweils 4 Zyklen erfolgte die Absenkung der Temperatur auf -10 °C innerhalb von einer Stunde und wurde für 4 h konstant gehalten. Daran schloss sich dann wieder der Sommerzyklus mit Tag- und Nachtwechsel an. Innerhalb von 24 h konnten so 4 Tag-Nachtwechsel simuliert werden. Die Gesamtversuchsdauer betrug 4 Wochen.

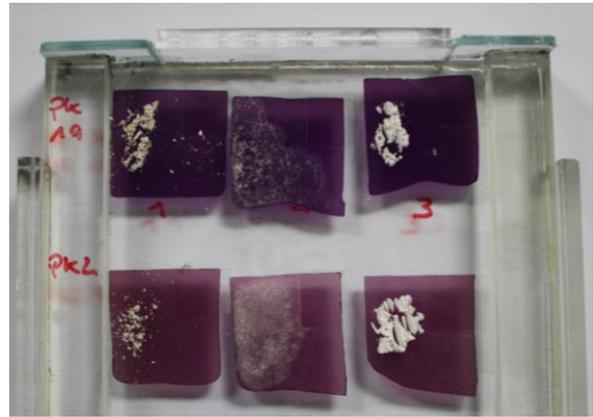
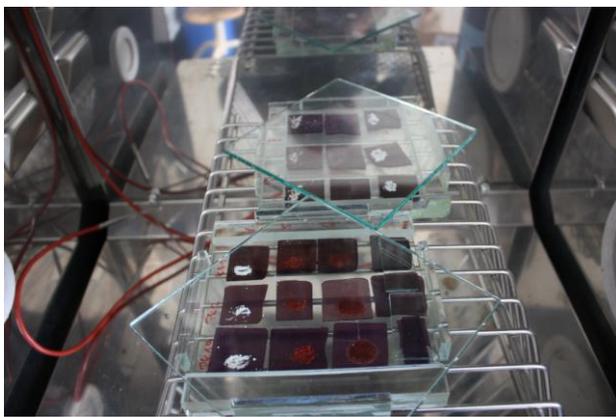


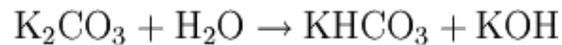
Abb. 362-363: Modellglasproben mit simulierten Staubablagerungen im Klimaschrank (links), rechts Oberflächenzustand nach 4 Wochen Bewitterung (rechts)

Um Verwirbelungen der Staubablagerungen auf der Glasoberfläche zu verhindern, wurden die Proben mit Hilfe spezieller Probeträger so angeordnet, dass die Luftströmung im Klimaschrank nicht unmittelbar auf die Probenoberfläche auftrifft, Temperatur- und Feuchteänderungen dennoch unmittelbar an den Proben erfolgen können.

Nach 4 wöchiger Bewitterungsdauer mit ca. 23 Sommer- und Winterzyklen wurden die unterschiedlichen Oberflächenbereiche (mit Staub belegt, staubfreie Bereiche und mit Tesafilm abgeklebte und daher unbewitterte Bereiche) im Rasterlektronenmikroskop untersucht.

Bereits visuell war sichtbar, dass sich die simulierten Stäube (Chemikalien) unter den Bedingungen im Klimaschrank unterschiedlich verhalten. Besonders deutliche Veränderungen waren auf allen Proben sichtbar, auf denen sich Kaliumkarbonat befand. Nach der Bewitterung ist diese Verbindung nicht mehr pulverförmig auf der Oberfläche, sondern fest mit ihr verklebt und über größere Bereiche verteilt. Der gleiche Effekt wurde auf den Oberflächen beobachtet, auf denen ein Gemisch aus allen Chemikalien lag. Offensichtlich reagiert Kaliumkarbonat bei hoher Luftfeuchtigkeit mit Wasser unter Bildung

von Kaliumhydrogenkarbonat und Kalilauge. Bei Raumtemperatur kristallisiert es als Dihydrat aus der Lösung.



Ein chemischer Angriff auf die Glasoberfläche ist bei dieser Reaktion sehr wahrscheinlich. Die Originalstäube aus dem Kaskadenimpaktorversuch wurden zu Versuchsbeginn mit der Alufolie auf die Glasoberfläche aufgelegt. Nach Abnahme der Alufolie zeichnet sich das Staubmuster deutlich auf der Glasoberfläche ab. Auf allen anderen Glasoberflächen war die Staubdeposition am Ende des Versuches identisch mit der zu Versuchsbeginn. Die Staubablagerungen wurden mit Druckluft von der Glasfläche entfernt und der Tesafilm ebenfalls abgezogen bevor die unterschiedlichen Oberflächenbereiche im ESEM untersucht worden sind.

6.2 Elektronenmikroskopische Untersuchungen an mit Staub belasteten- und unbelasteten Glasoberflächen

Die verschiedenen Oberflächenbereiche aller Glasproben wurden im ESEM abgebildet und EDX-Spektren der Elemente an typischen Stellen aufgenommen. Auf jeder Glasoberfläche gibt es drei Bereiche (Staubdeposition (a), Glas (b) und Tesafilm (c)). Die Wirkung von 7 Stäuben bzw. Kombinationen daraus wurde getestet und alle Untersuchungen erfolgten an 3 Modellglassorten (Pk1a, Pk2, KS1). Hieraus ergeben sich 63 Oberflächenaufnahmen und ebenso viele Elementenspektren. Die wesentlichen Ergebnisse sind im Folgenden an typischen Beispielen dokumentiert. Es ist jeweils die empfindlichste und die am wenigsten empfindliche Glassorte gegenübergestellt.

Staub 1: $\text{CaSO}_4 \cdot \frac{1}{2} \text{H}_2\text{O}$

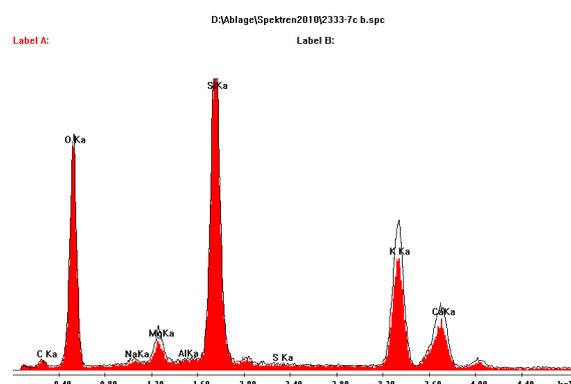
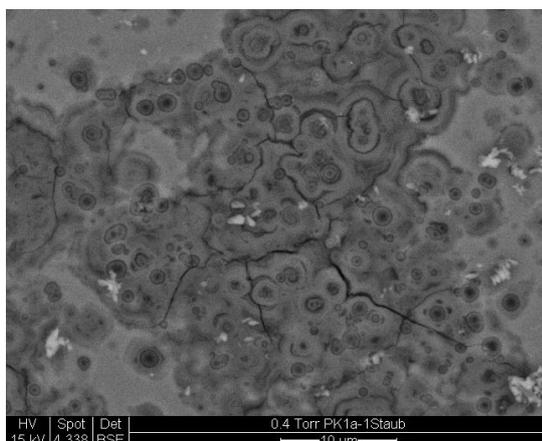


Abb. 364-365: Glas PK1a: ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a), EDX Spektrum korrodierter Bereiche, partiell stark angegriffen, Auslaugung von Mg, K, Ca, Label A (rot) ist das Elementenspektrum des verwitterten Glases im Vergleich zu Label B, dem Elementenspektrum der unverwitterten Glasprobe.

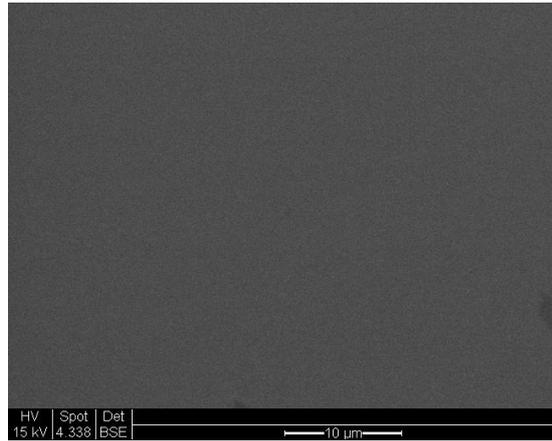
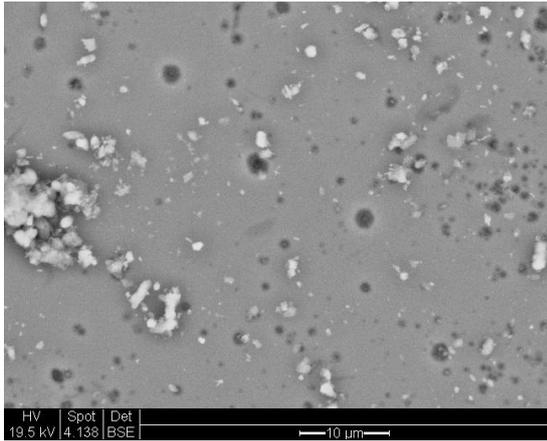


Abb. 366-367: Glas PK1a ;ESEM Abbildung von Expositionsbereich Glas (b), korrodierte Bereiche mit deutlich geringerem Oberflächenangriff (links) im Vergleich zu Bereich (a); mit Tesafilm abgeklebter Bereich (c) zeigt keine Veränderung der Oberfläche (rechts), dies trifft für alle Glassorten und alle Versuche zu

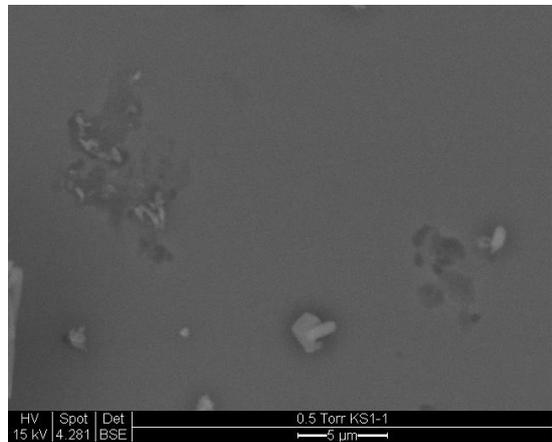
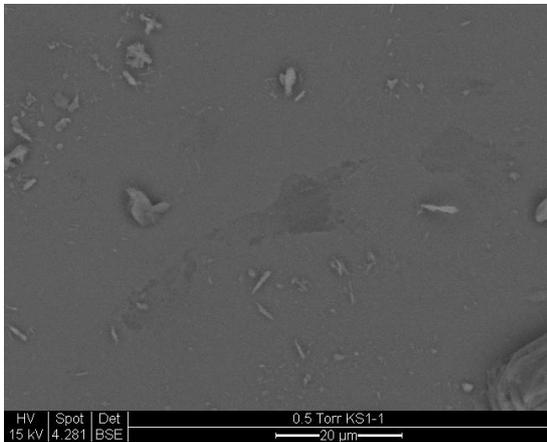


Abb. 368-369: KS1, ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a),korrodierte Bereiche, Kristalle, geringer Oberflächenangriff (links), Expositionsbereich Glas (b), Korrosion, Kristalle, geringer Oberflächenangriff (rechts)

Staub 2: K_2CO_3

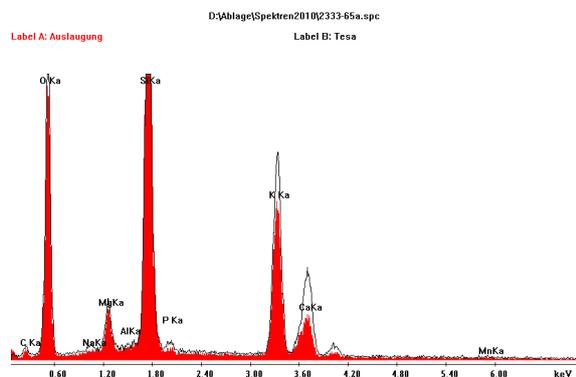
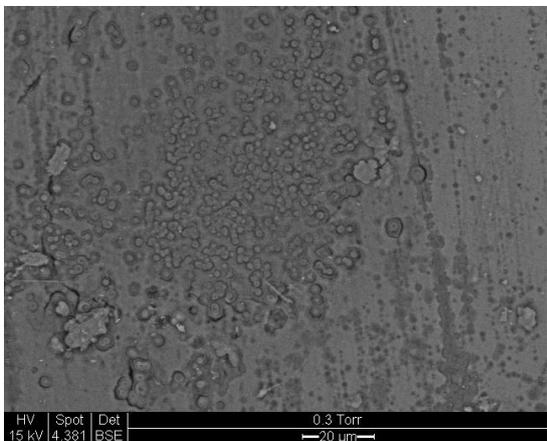


Abb. 370-371: Glas PK1a; ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX Spektrum korrodierteter Bereiche, stark angegriffen, Auslaugung von Na, Mg, P, K, Ca

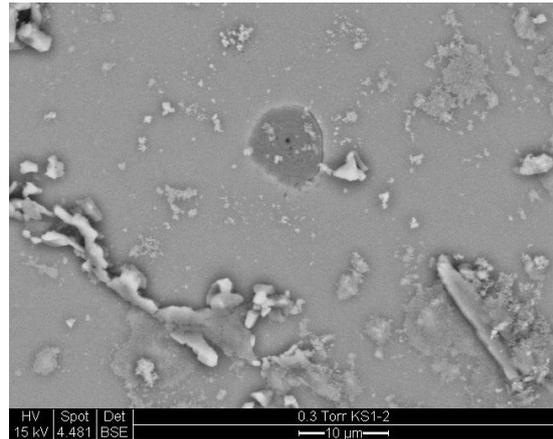
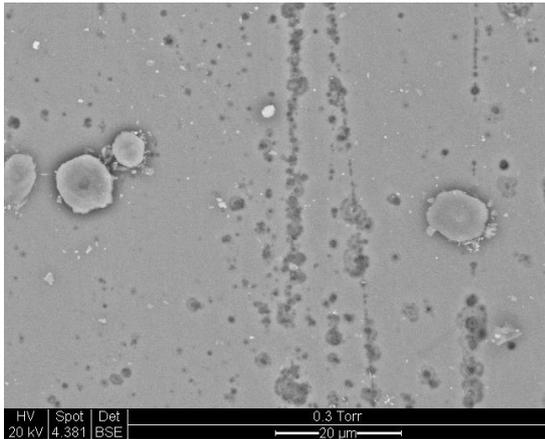


Abb. 372-373: Glas PK1a; ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Glas (b) mit korrodierten Bereichen, jedoch deutlich geringerer Oberflächenangriff (links), Glas KS1 (rechts), Korrosion, Kristalle, geringer Oberflächenangriff

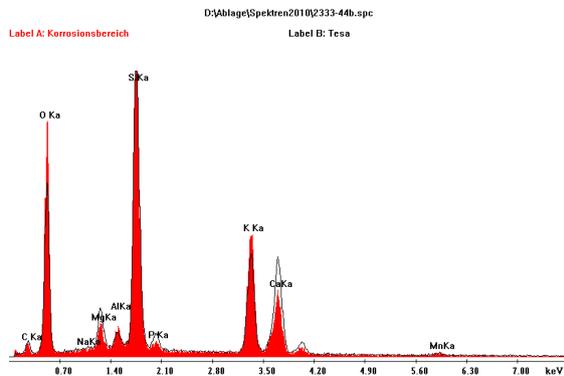
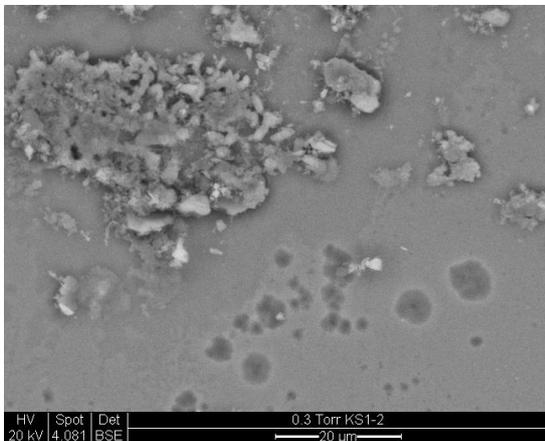


Abb. 374-375: Glas KS1 ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX-spektrum mit partiell korrodierten Bereichen, Auslaugung von Mg, P, Ca

Staub 3: CaCO₃

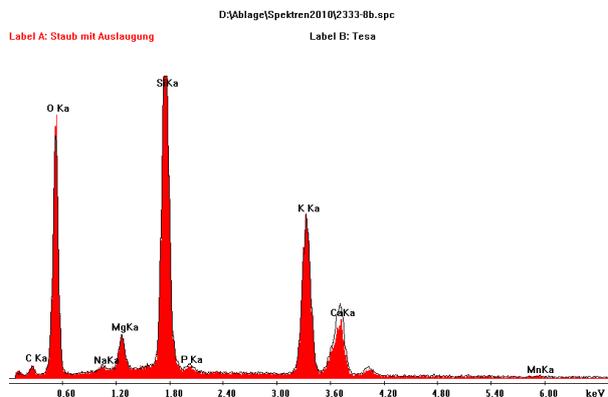
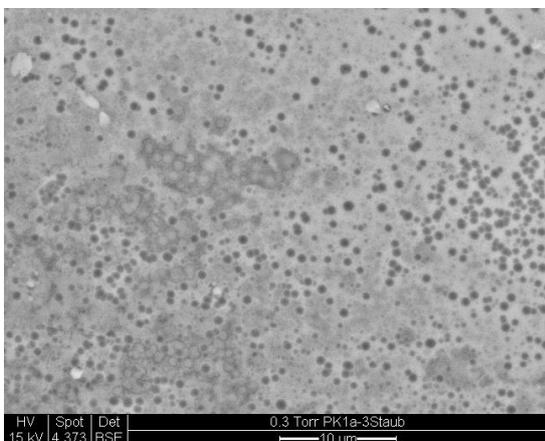


Abb. 376-377: Glas PK1a; ESEM Abbildung mit Expositionsbereich Staub (a) und EDX Spektrum, an wenigen Stellen korrodierte Bereiche, Auslaugung von Ca

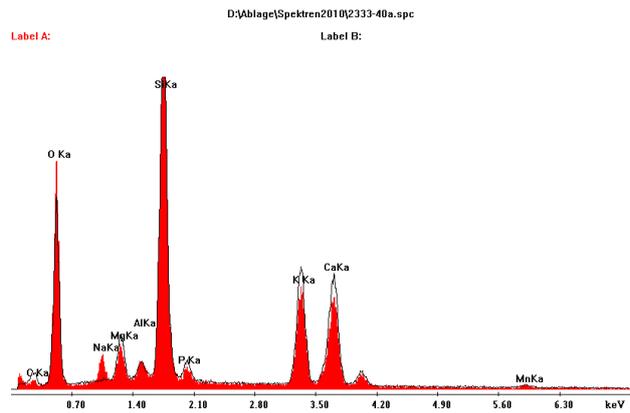
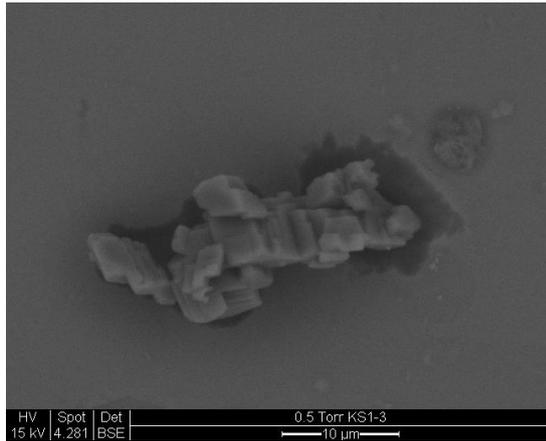


Abb. 378-379: Glas KS1; ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX-Spektrum, vereinzelt kleine korrodierte Bereiche, Auslaugung von Mg, P, K, Ca

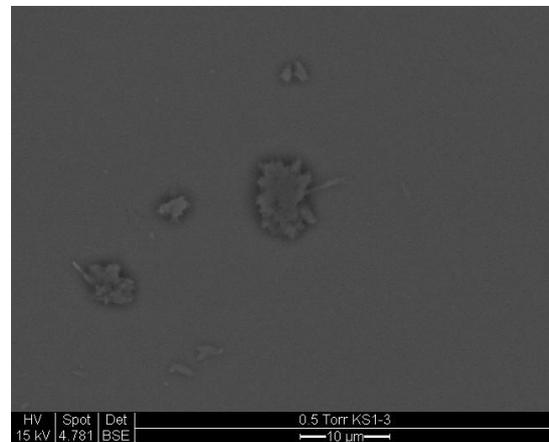
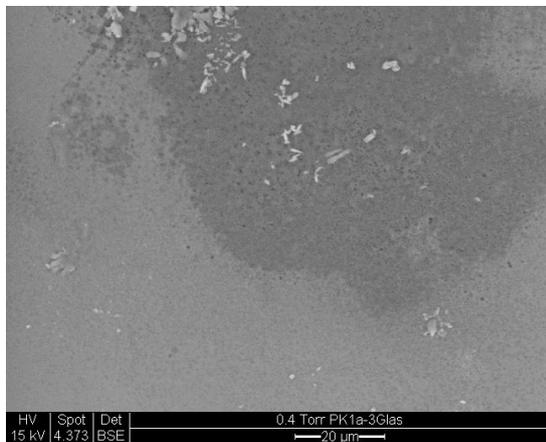


Abb. 380-381: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Glas (b) korrodierte Bereiche, geringerer Oberflächenangriff (links), Glas KS1 (rechts) Auslaugung nur unter Kristallen, geringer Oberflächenangriff

Staub 4: PbCO₃

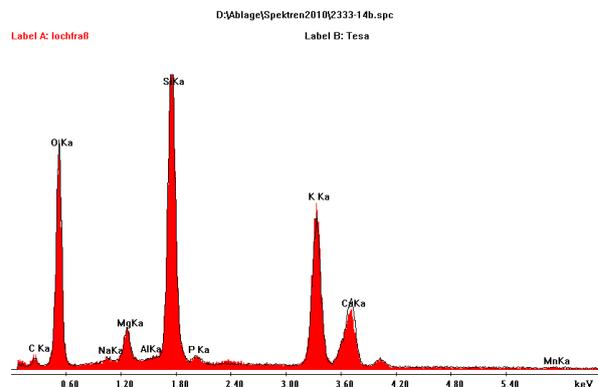
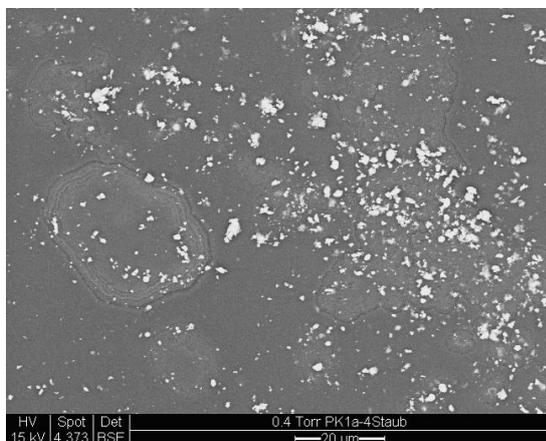


Abb. 382-383: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a), und EDX-Spektrum, an wenigen Stellen korrodierte Bereiche, Auslaugung von Ca, unabhängig von Staubdeposition

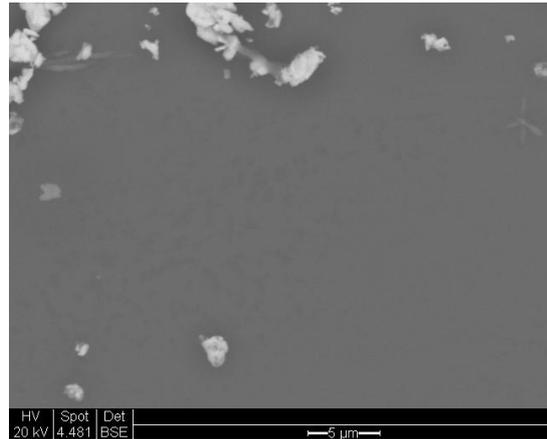
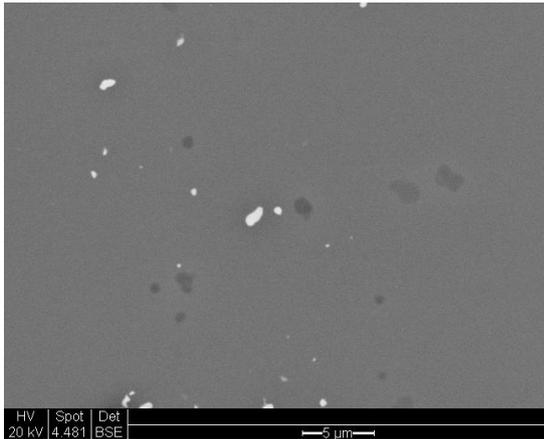


Abb. 384-385: Glas KS1; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und Expositionsbereich Glas (b) (rechts), vereinzelt kleine korrodierte Bereiche nur im Bereich (a), geringer Oberflächenangriff

Staub 5: Fe₂O₃

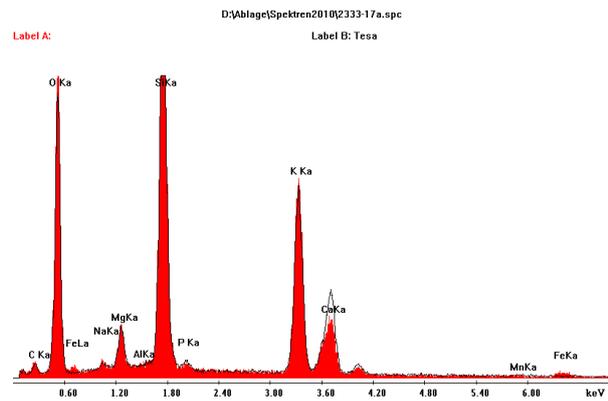
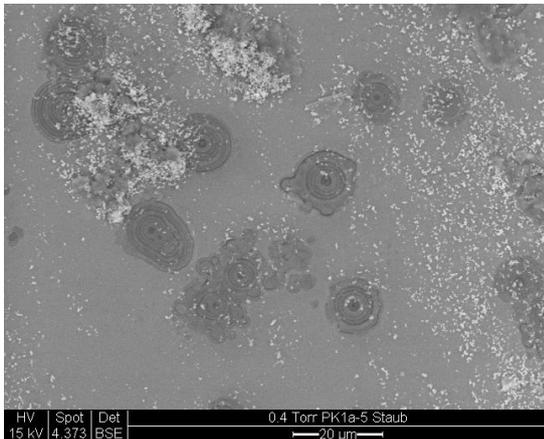


Abb. 386-387: Glas PK1a, ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX- Spektrum, wenige korrodierte Bereiche unabhängig von Staubdeposition, Auslaugung von Ca

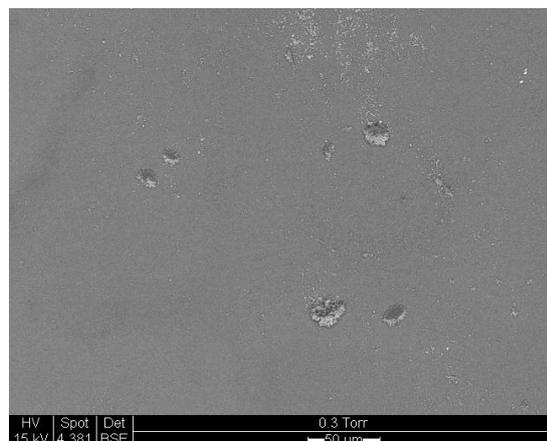
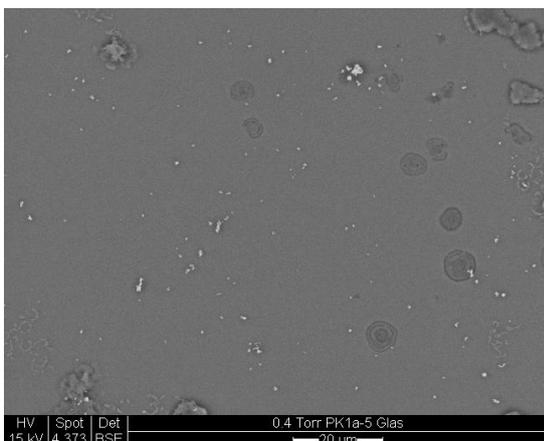


Abb. 388-389: Glas PK1a; ESEM Abbildung vom Expositionsbereich Glas (b) korrodierte Bereiche, geringerer Oberflächenangriff (links), Glas KS1 (rechts) Expositionsbereich Staub (a) mit einzelnen kleinen ausgelagten Bereichen

Staub 6: Staubgemisch

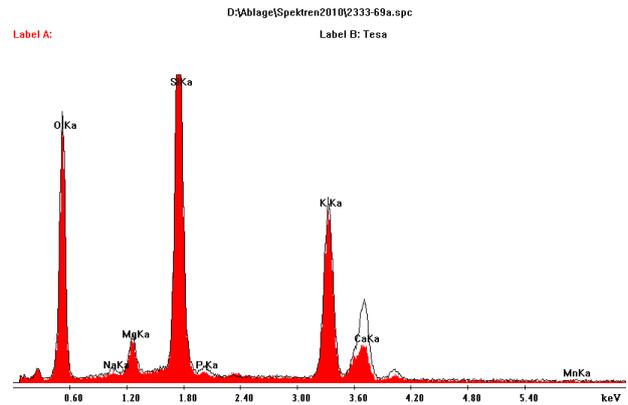
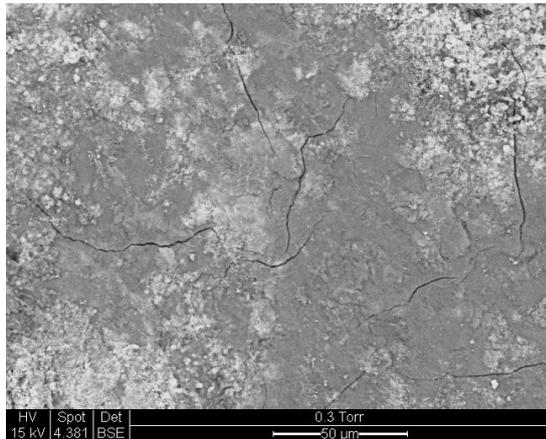


Abb. 390-391: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX- Spektrum, korrodierte Bereiche mit Rissen in Oberfläche, Auslaugung von Na, Mg, P, K, Ca

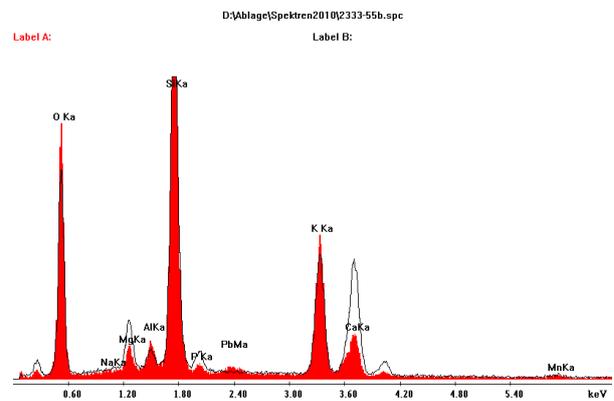
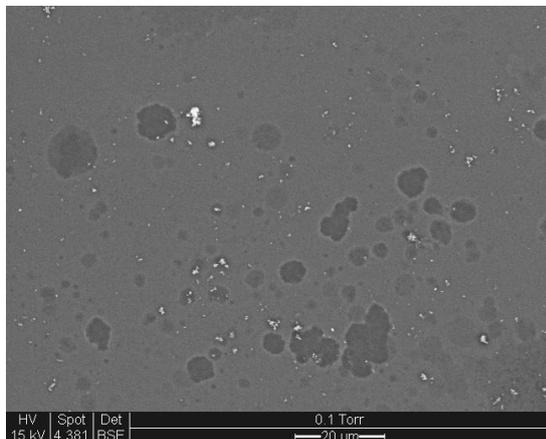


Abb. 392-393: Glas KS1; ESEM-Aufnahme vom Expositionsbereich Staub (a) und EDX Spektrum partiell korrodierte Bereiche, vereinzelt Risse Auslaugung von Mg, P, Ca

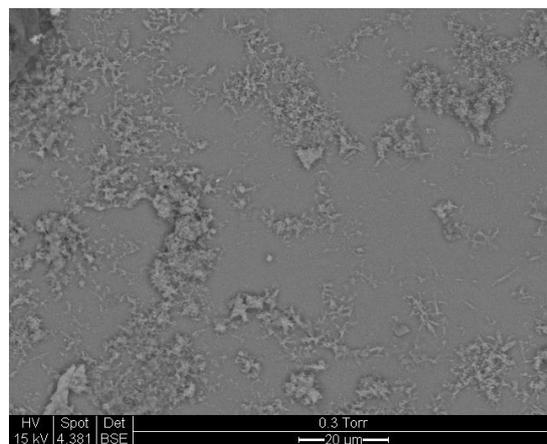
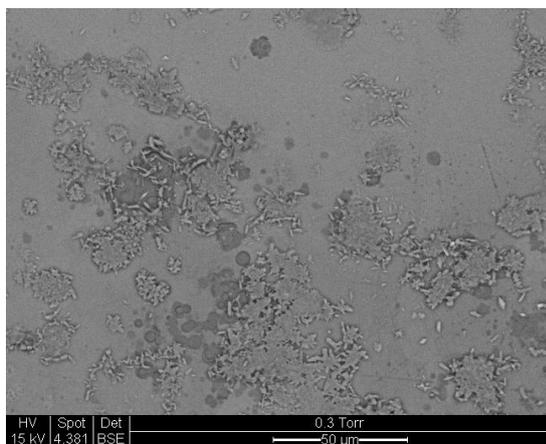


Abb. 394-395: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Glas (b) korrodierte Bereiche unter kristallisiertem Oberflächenbelag (links), Glas KS1 (rechts) keine ausgebluteten Bereiche

Staub 7: Al Target mit Staub aus Stendaler Dom

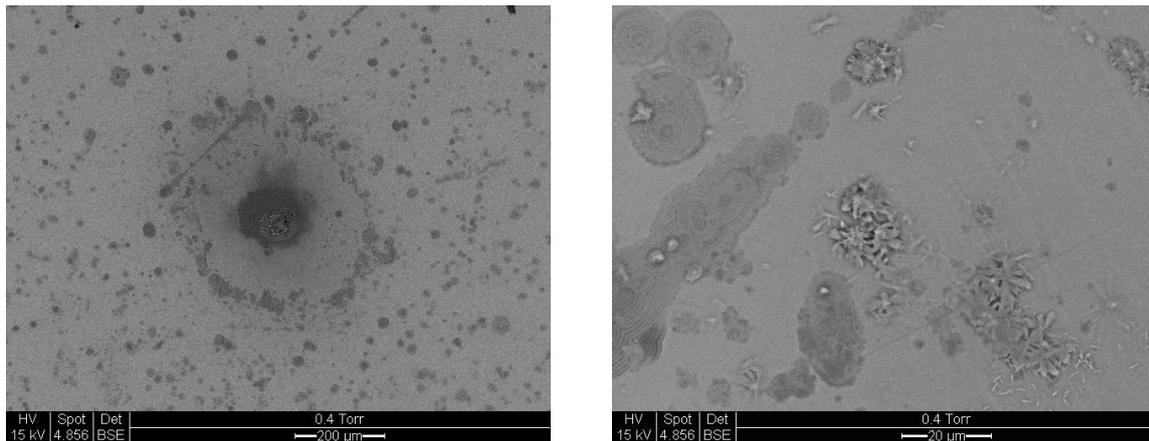


Abb. 396-397: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) links Übersicht, rechts Detail, korrodierte Bereiche sind mit Staubablagerungen auf Al-Target identisch

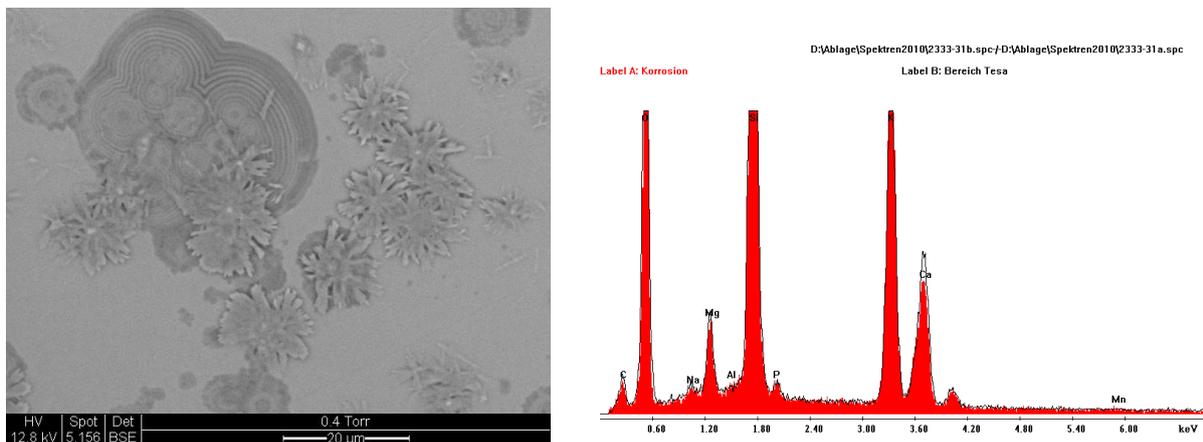


Abb. 398-399: Glas PK1a; ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub (a) korrodierte Bereiche unter kristallinem Oberflächenbelag, EDX Spektrum Auslaugung von Mg, Ca

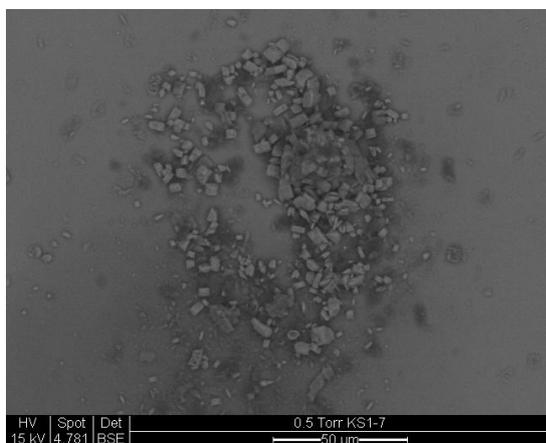


Abb. 400: Glas KS1, ESEM-Abbildung vom Expositionsbereich Staub und EDX-Spektrum, keine korrodierten Bereiche, Oberflächenbeläge aus Gips und Kohlenstoff, keine Schäden auf dem Glas

6.3 Zusammenfassung und Bewertung der Ergebnisse

Die Untersuchungen zeigen, dass durch Staubdeposition auf Glasoberflächen mittelalterlicher Zusammensetzung unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit und Temperatur Schäden entstehen können. Diese Schäden äußern sich in der Veränderung der Zusammensetzung der Glasoberfläche infolge von chemischen Reaktionen zwischen Staub, Luftfeuchtigkeit und Glas. Die aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit bedingte Anlagerung von Wasser an die Glasoberfläche führt bei sehr empfindlichen Gläsern bereits zu einer deutlich sichtbaren Auslaugung von Kalium und Calcium aus der Glasoberfläche und damit zu einer Gelschichtbildung, die am Modelglas PK1a nachgewiesen wurde. Das Glas KS1 ist aufgrund seiner Zusammensetzung korrosionsstabiler und zeigt unter den gegebenen Versuchsbedingungen noch keine messbaren Oberflächenveränderungen auf staubfreien Flächen. Dort wo eine Staubdeposition vorlag, lässt sich häufig auch bei dieser Glaszusammensetzung eine Auslaugung der Glasoberfläche nachweisen. Nicht durch alle Stäube werden unter den gegebenen Versuchsbedingungen in gleicher Weise schädliche Wirkungen für die Glasoberfläche sichtbar. Vor allem hygroskopischer Staub, der Feuchtigkeit bindet und Verbindungen, die zum Beispiel Hydrogenkarbonate bilden können, weisen ein hohes Schädigungspotential für die Glasoberflächen auf. In den Versuchen zeigte sich, dass Kaliumkarbonat aufgrund der Reaktion mit Feuchtigkeit zu Kaliumhydrogenkarbonat und Kaliumhydroxid zu einem direkten Laugenangriff auf die Glasoberfläche führt, wodurch letztendlich die Zerstörung der Glasstruktur erfolgen kann. Daher hat Kaliumkarbonat als Staubdeposition sowohl allein (Staub 2) als auch in Kombination mit den übrigen Verbindungen (Staub 6) das stärkste Schädigungspotential. Stärkere Schäden wurden auch auf Gläsern beobachtet, die mit Calciumsulfathalhydrat (Staub 1) belegt waren. Als Gipsmodifikation befindet sich diese Verbindung auch in den Korrosionsprodukten auf historischen Gläsern. Das Schädigungspotential ergibt sich mit hoher Wahrscheinlichkeit aus der Fähigkeit weiteres Wasser aufzunehmen und zu speichern, so dass zusätzliche Feuchtigkeit auf diese Art und Weise direkt mit der Glasoberfläche in Kontakt kommt und Auslaugungsprozesse in Gang setzen kann. Ein etwas geringeres Schädigungspotential scheint Calciumkarbonat (Staub 3) zu haben. Ausgelaugte Bereiche sind direkt unter den Staubteilchen zu finden. Als Ursache dafür kann die Bildung von Calciumhydrogenkarbonat durch die Reaktion von Calciumkarbonat mit Kohlendioxid und Wasser aus der Luft möglich sein. Bleikarbonat (Staub 4) und Eisenoxidpartikel (Staub 5) zeigten hingegen kein ausgeprägtes Schädigungspotential auf der Glasoberfläche. Durch den Originalstaub (Staub 7) waren Oberflächenschäden auf der empfindlichsten Glassorte PK1a nachzuweisen, jeweils an den Stellen wo Staubkristalle in direktem Kontakt mit der Glasoberfläche waren. Auf dem etwas korrosionsstabileren Glas KS1 waren keine Schäden sichtbar. Inwiefern diese Stäube auch an den originalen Gläsern im Stendaler Dom unter den klimatischen Verhältnissen mit relativ hoher Luftfeuchtigkeit zu Korrosionsschäden führen können, lässt sich aus diesen Versuchen nur schwer abschätzen. Die originalen Gläser sind bereits stark verwittert und haben im Gegensatz zu den Modellgläsern eine Gelschicht ausgebildet, die als Diffusionsbarriere vor weiterer

Verwitterung schützt und daher bei Restaurierungsarbeiten erhalten werden muss. Die Untersuchungen zeigen jedoch auch deutlich, dass lockere Korrosionsprodukte und Staubablagerungen stets vorsichtig von der Glasoberfläche entfernt werden sollten, um chemische Reaktionen der Ablagerungen mit Wasser aus der Luftfeuchtigkeit auszuschließen und hygroskopische Reaktionen zu vermeiden.

7. Zusammenfassung, Schlussfolgerungen und Empfehlungen

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 Bedingungen wirkt hierbei die gegebene Ausrichtung der Fenster (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 – eine der beiden Kirchen, die im Winter beheizt wird – weist über das gesamte Jahr Durchschnittswerte auf, die auch für mittelalterliche Gläser unbedenklich wären. Die klimatischen Messungen haben somit auch in diesem Fall bestätigt, was frühere Untersuchungen an anderen Schutzverglasungen ergeben hatten /2/: die Beheizung des gesamten Kirchenraumes oder auch nur des Spalts zwischen Schutzverglasung und Original (Dom Augsburg) wirkt sich deutlich erniedrigend auf die relative Luftfeuchte aus.

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 vermutlich auch der bewusst vorsichtigen Behandlung der Glasoberflächen bei den Restaurierungsarbeiten von 1994-1999 zu verdanken, bei denen auf den vollständigen Erhalt der schützenden Gelschicht und auf eine äußerst schonende Reinigung Wert gelegt worden war. Die im Evaluierungsprojekt erstmalig an allen fünf Objekten durchgeführten Staubanalysen ergaben, dass man durchaus mit aggressiven Partikeln rechnen muss, die – wie bei Simulationsuntersuchungen an Modellgläsern im Klimaschrank gezeigt werden konnte – die Reaktion der Atmosphäerilien mit mittelalterlichem Glas katalysieren. Das Schädigungspotential der durch den steigenden Autoverkehr hohen Konzentration an NO_x und daraus resultierende Reaktionen mit anderen Umweltemissionen und die Wirkung auf historische Glasfenster muss weiter erforscht werden. Vermutlich ist es nur der diffusionshemmenden und schützenden Wirkung der Gelschichten zu verdanken,

dass sich trotz zeitweilig hoher Luftfeuchte und Anwesenheit aggressiver Staubpartikel bisher keine schädigenden Wirkungen zeigen. Da man nicht davon ausgehen kann, dass dieser Schutz über sehr lange Zeiträume in dieser Weise vollständig erhalten bleiben wird, sollten sich zukünftige Forschungen auch mit der Frage wärmetechnischer Maßnahmen (Spaltheizung) beschäftigen.

Außenschutzverglasungen 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. 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 an einigen Stellen beobachteten Ablösungen der PVB-Folie von den Deckscheiben, die das optische Erscheinungsbild beeinträchtigen, scheinen durch Herstellung und Verarbeitung des Glases bedingt zu sein. Bisher ist eine Verminderung der Schutzfunktion durch Undichtheit noch nicht eingetreten. Neben der Notwendigkeit, einen lokalen, besonders stark betroffenen Bereich zu reparieren (Nikolaikirche Quedlinburg), wird auch hier empfohlen, den ungeklärten Ursachen mit weiteren Untersuchungen nachzugehen.

Die Aufklärung dieser Reaktionen und insbesondere auch die der Langzeitstabilität von Außenschutzverglasungen aus VSG bedarf weiterer materialtechnischer Untersuchungen. Die Tatsache, dass jedes Originalfenster hinter einer fachgerechten Schutzverglasung vor einer direkten Belastung mit Kondenswasser bewahrt wird, hat sich auch an den evaluierten fünf Objekten bestätigt. An der allgemein positiven Wirkung dieser Konservierungsmaßnahme gibt es keinen Zweifel.

Anhang:

Klimadiagramme

Havelberger Dom, Januar 2010

Havelberger Dom, Juli 2010

Dom Halberstadt, Januar 2010

Dom Halberstadt, Januar 2010

Stendaler Dom, Januar 2010

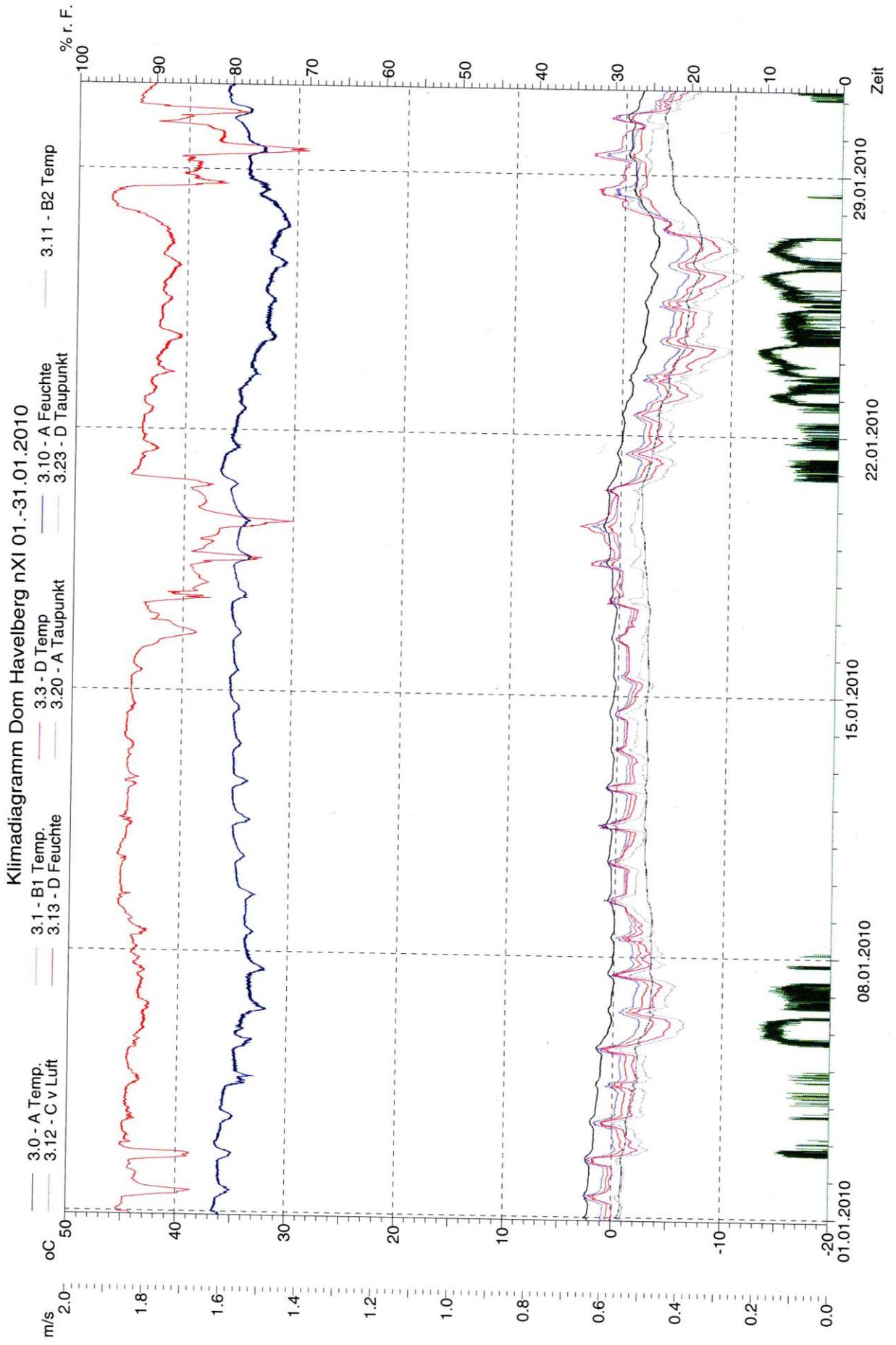
Stendaler Dom, Juli 2010

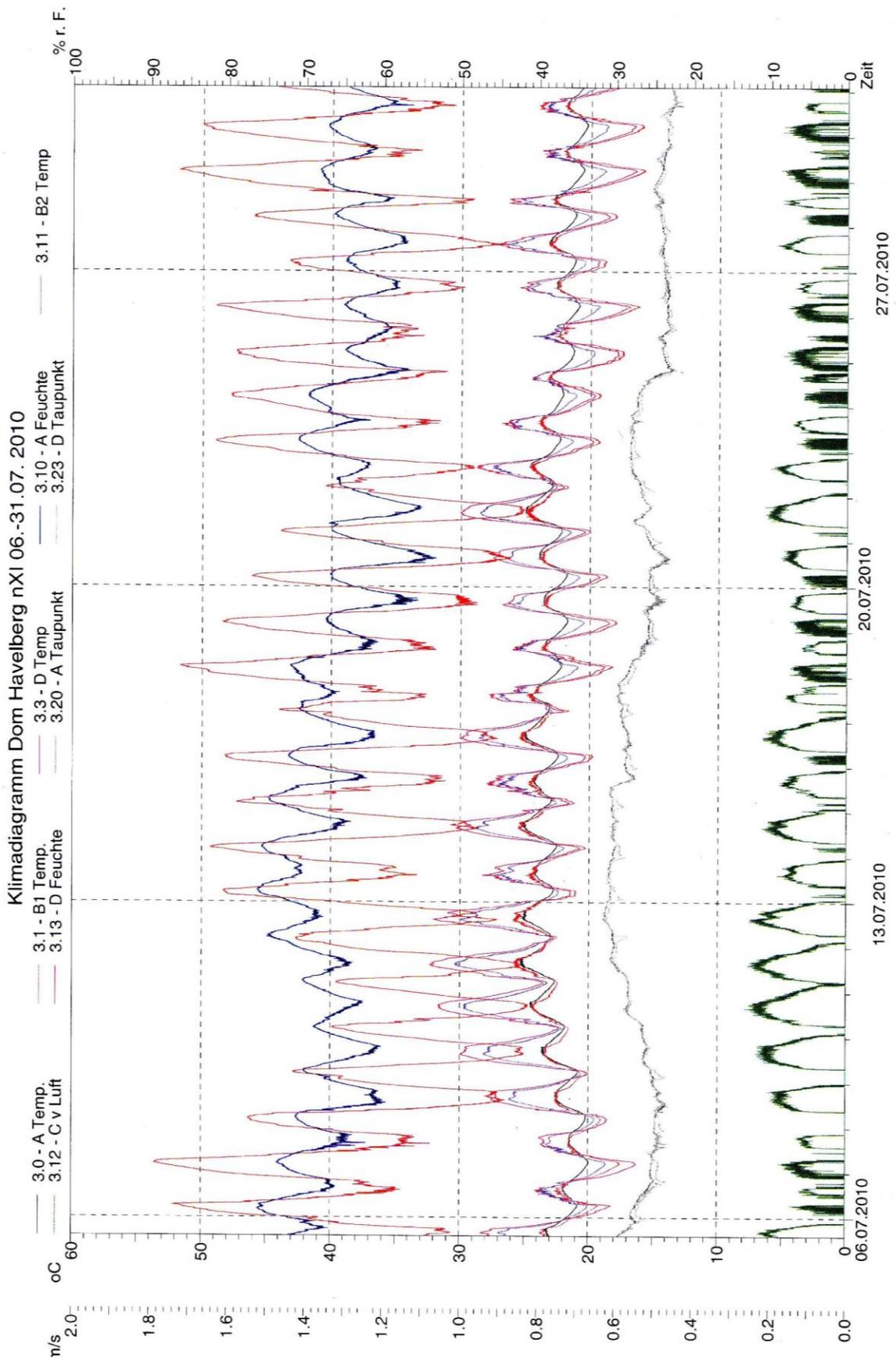
Marienstern Panschwitz-Kuckau, Januar 2010

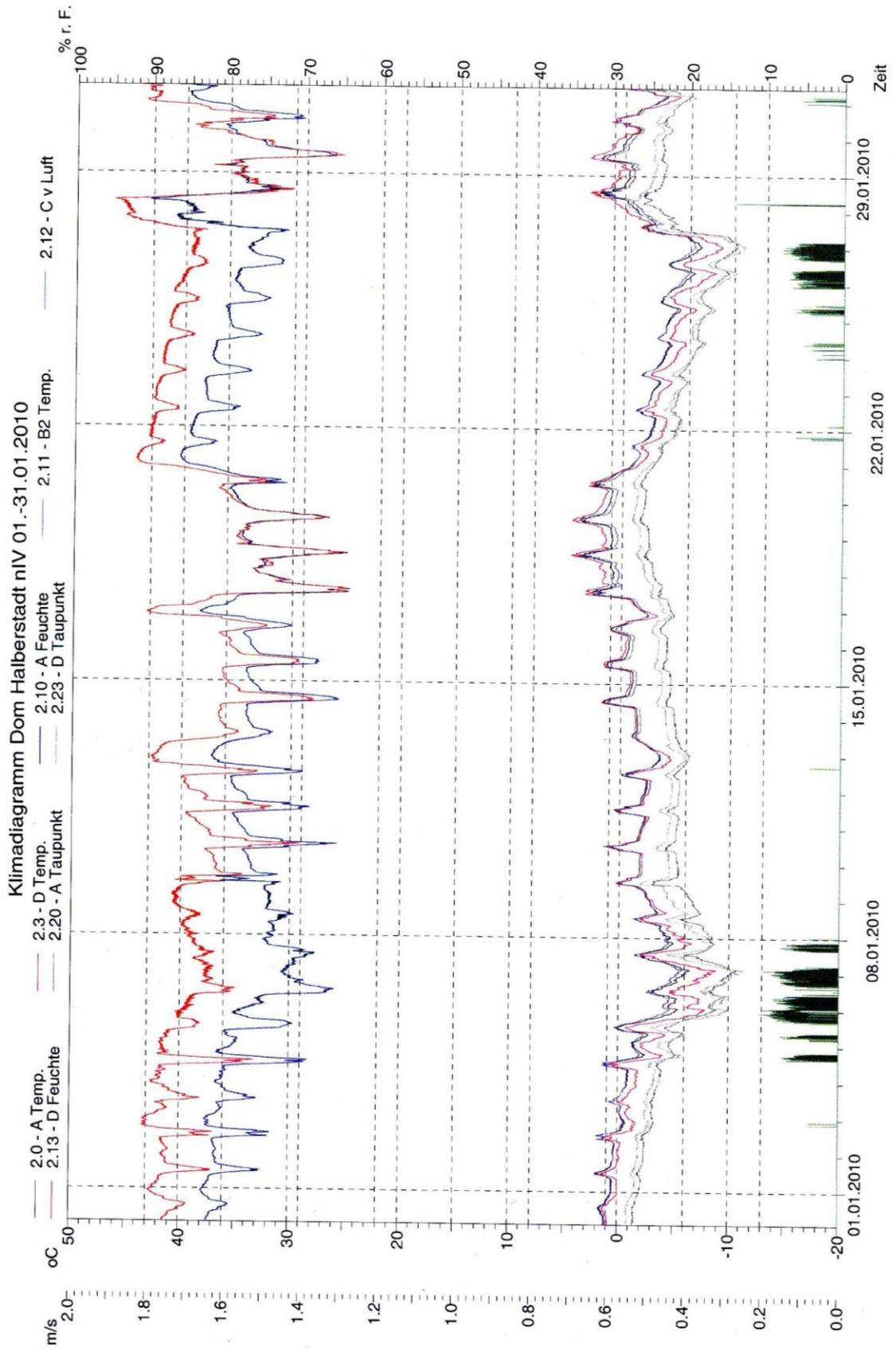
Marienstern Panschwitz-Kuckau, Januar 2010

Nikolaikirche Quedlinburg, Januar 2010

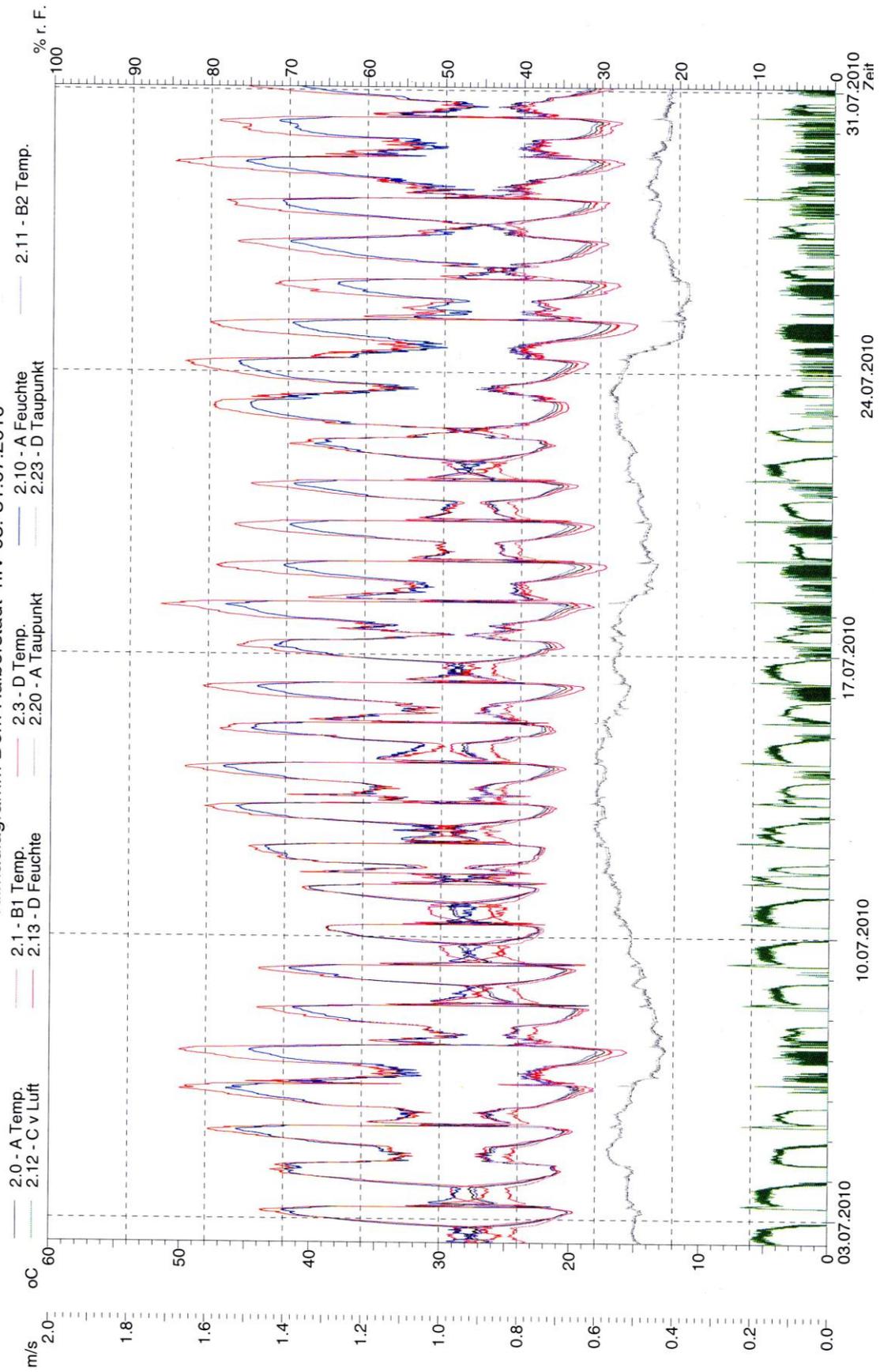
Nikolaikirche Quedlinburg, Januar 2010

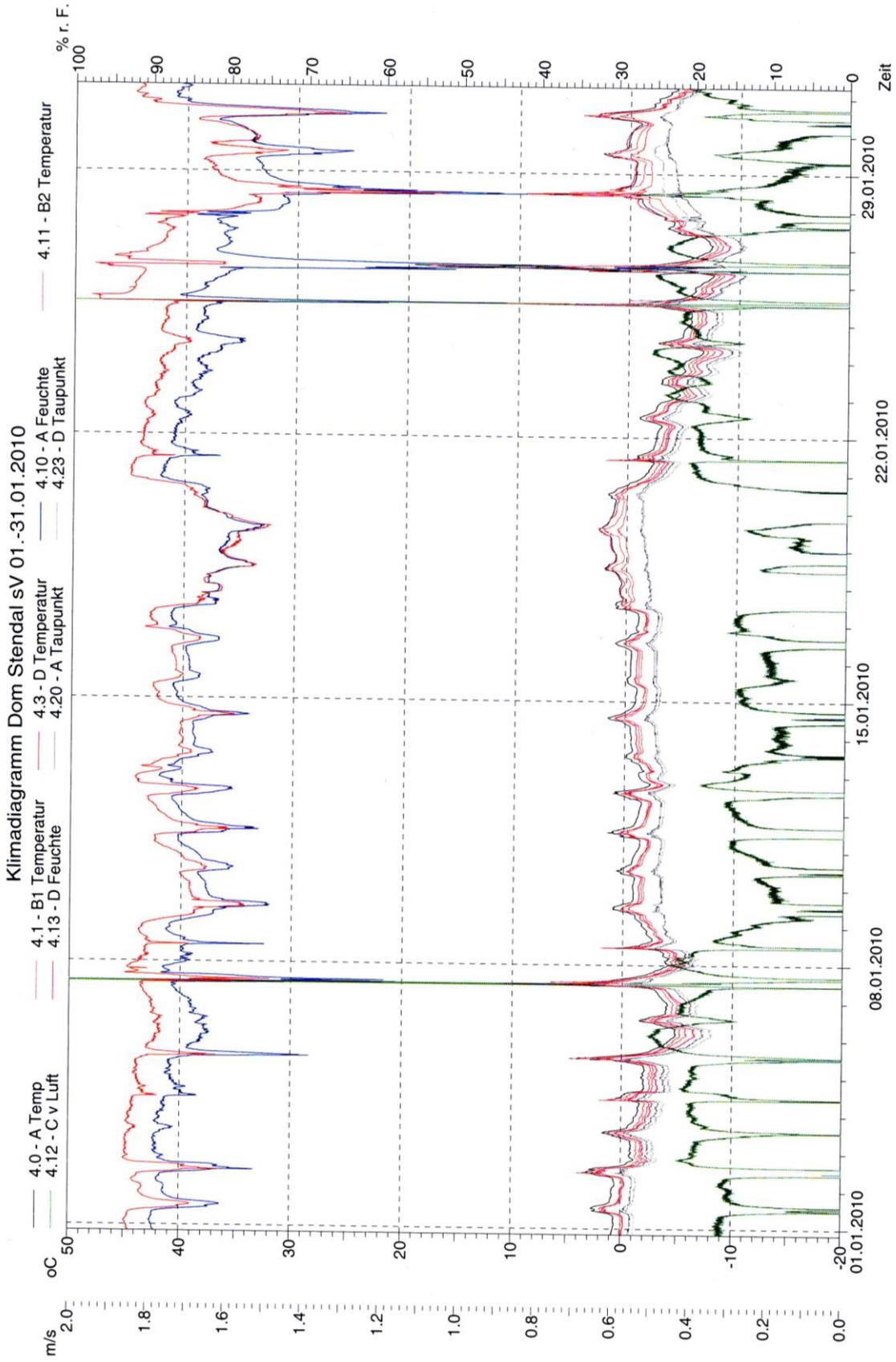




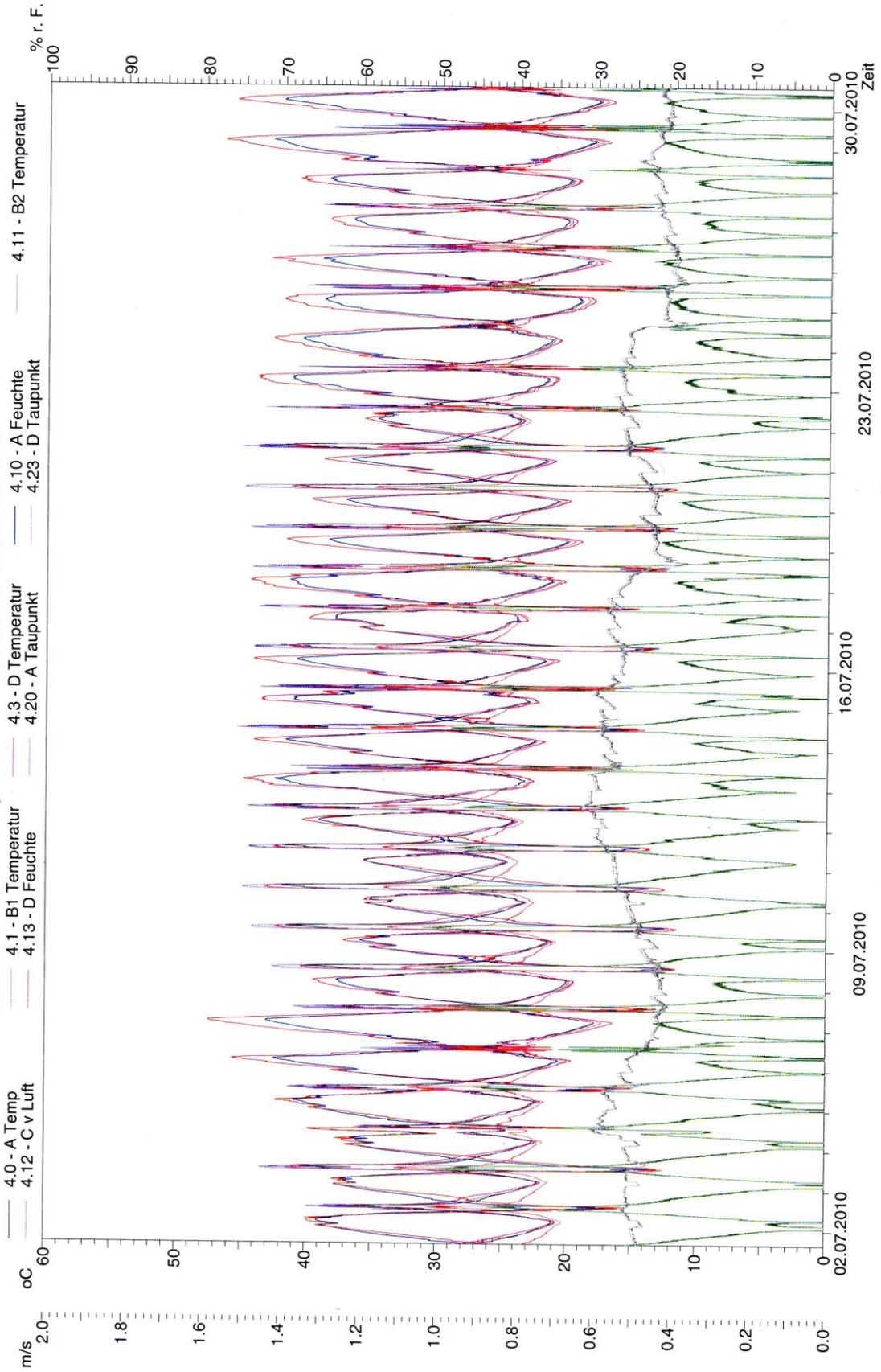


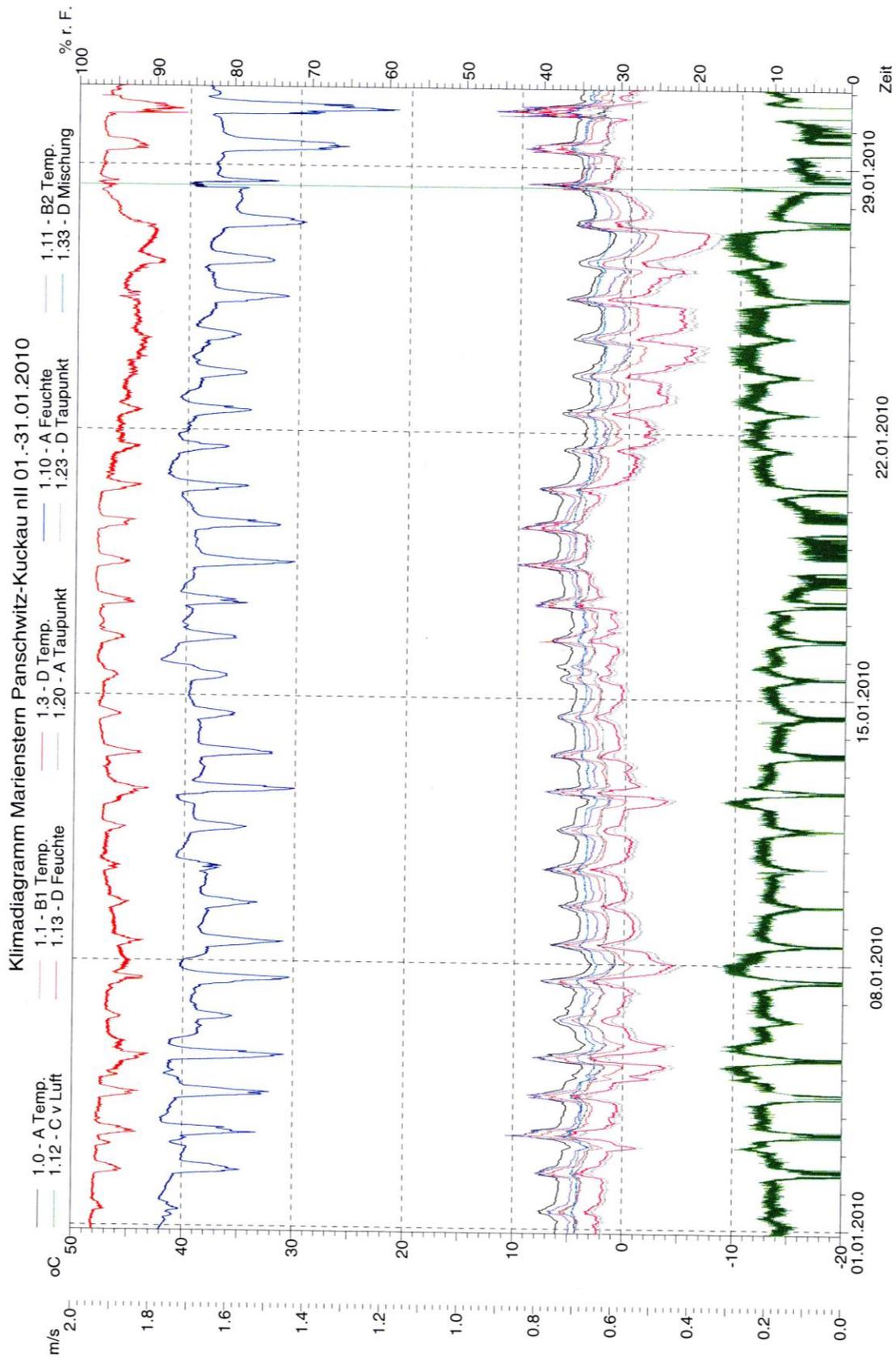
Klimadiagramm Dom Halberstadt nIV 03.-31.07.2010



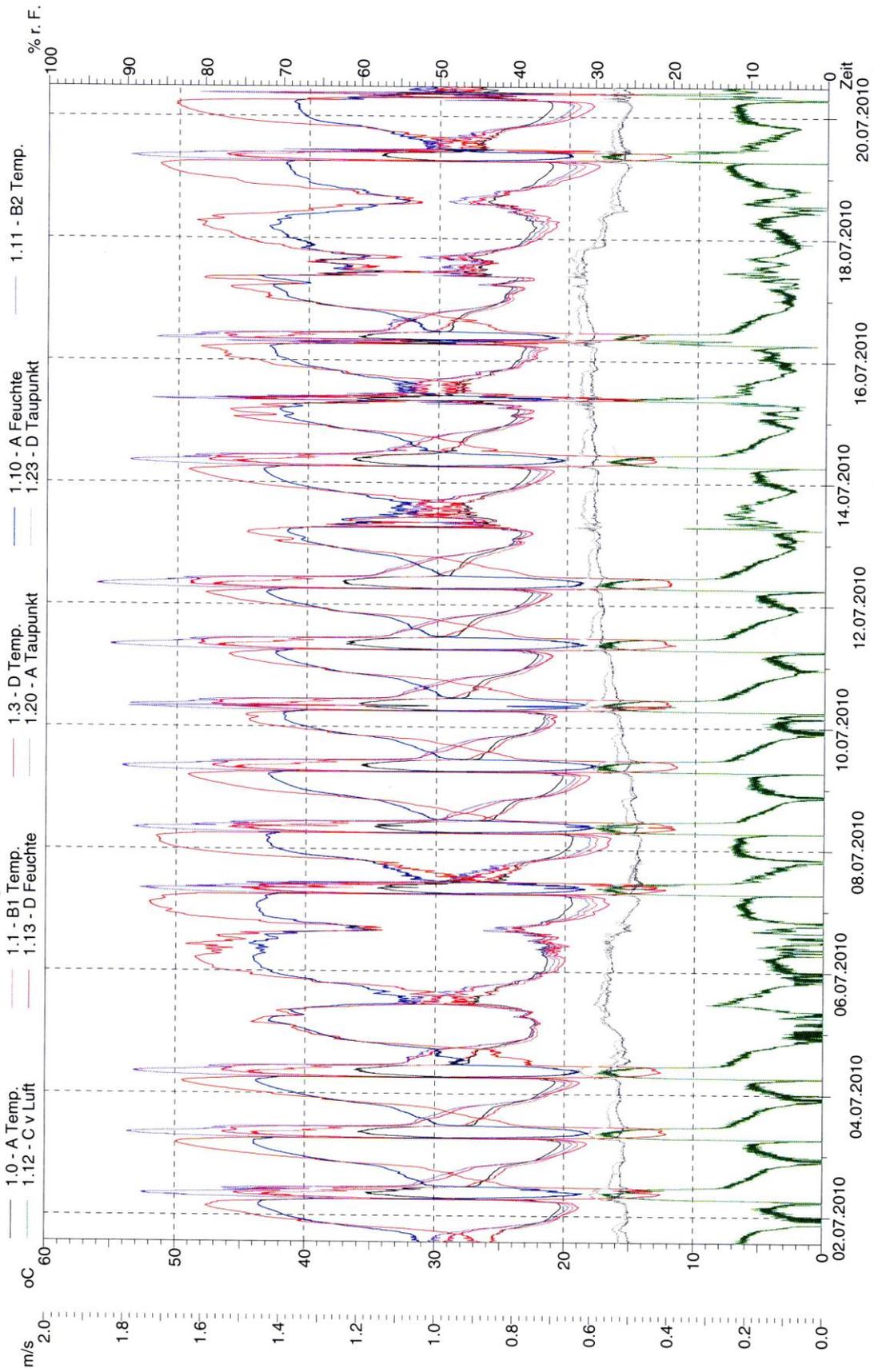


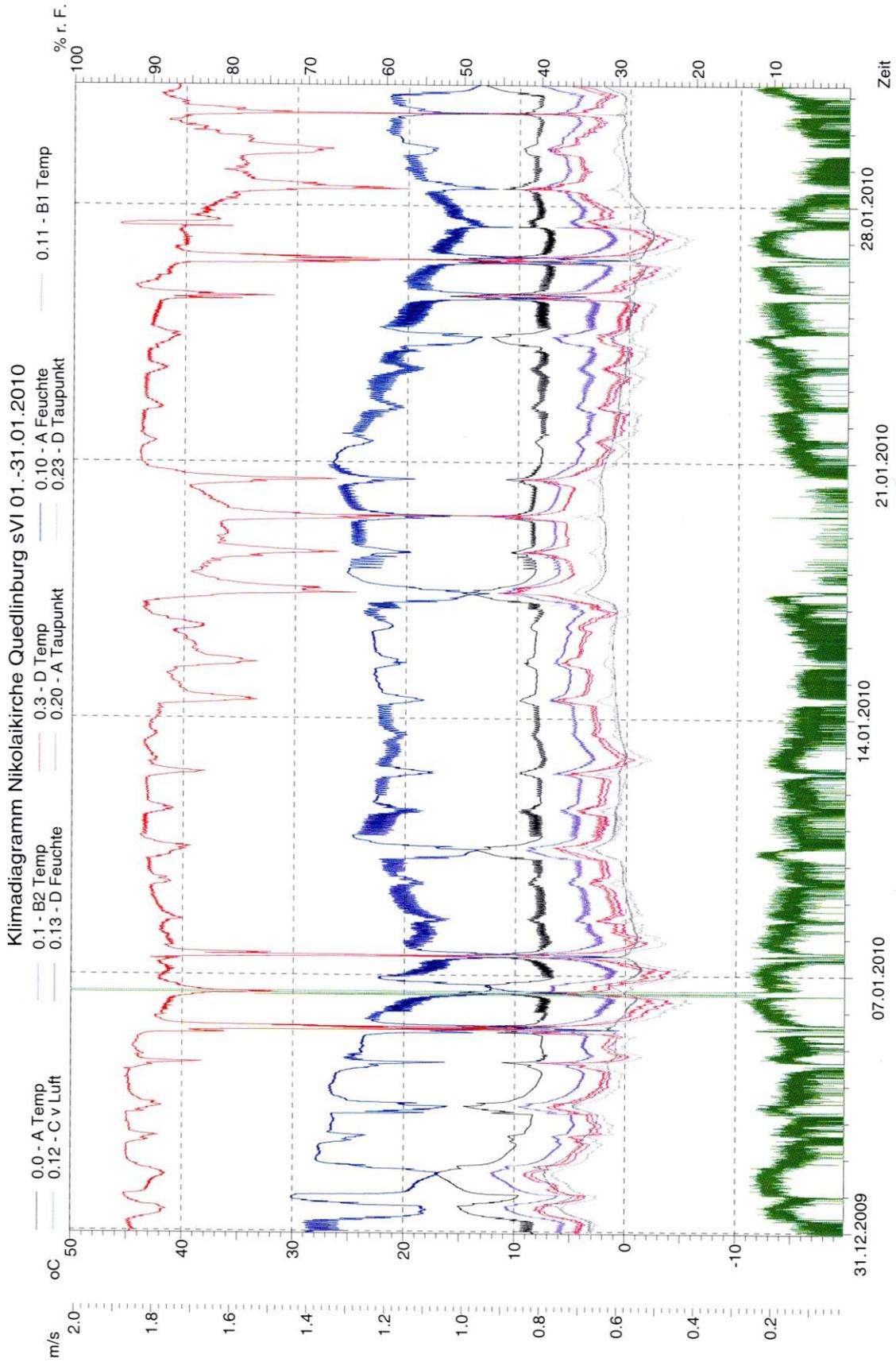
Klimadiagramm Dom Stendal sv 01.-31.07.2010

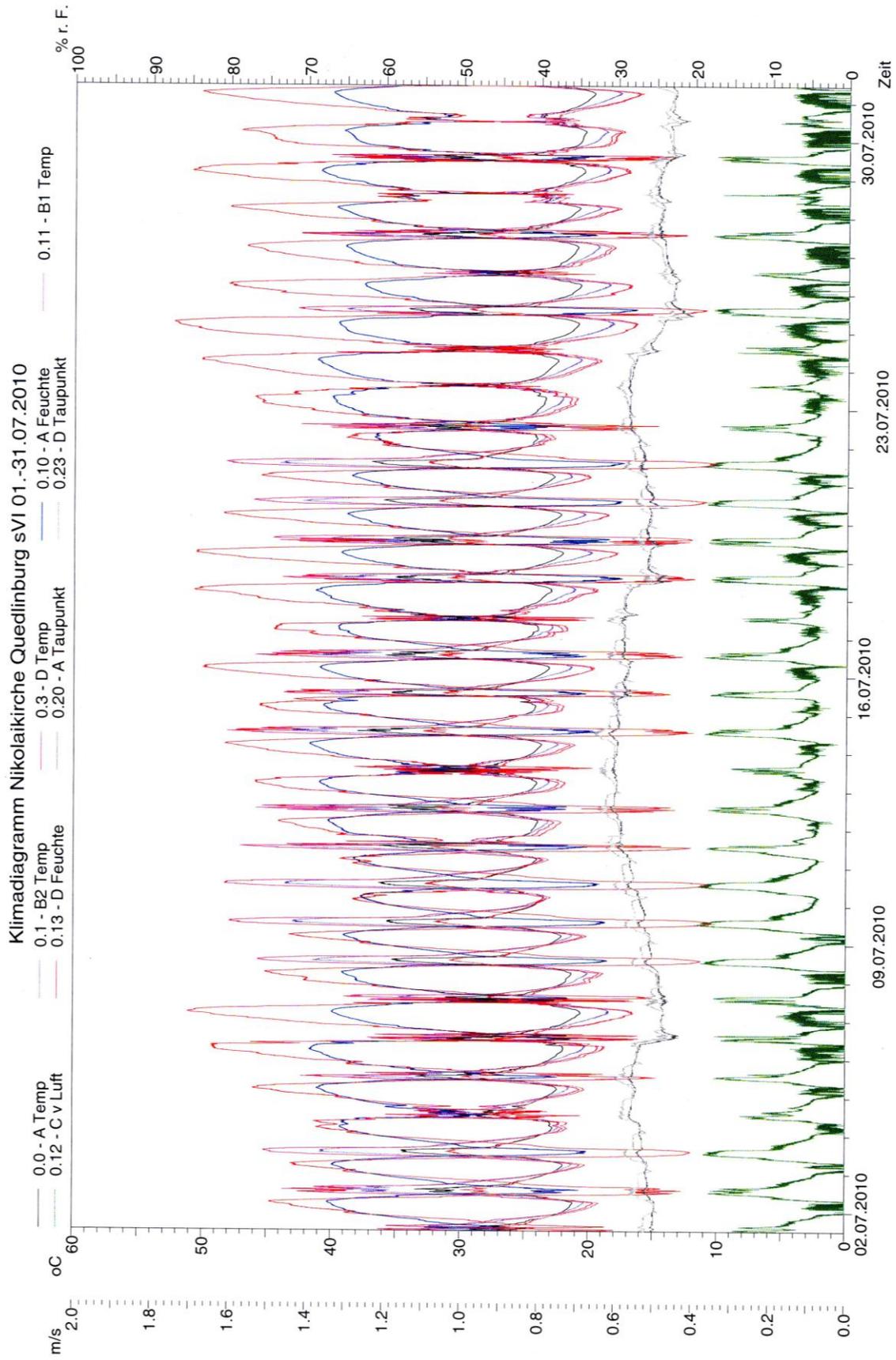




Klimadiagramm Marienstern Panschwitz-Kuckau nll 01.-31-07.2010







Literatur:

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

/2/ Stefan Oidtmann, „Die Schutzverglasung“, Abschlussbericht, Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft, Forschung und Technologie, Kennziffer BAU 5026 C/4, 1997

/3/ Adriana Bernadi, VIDRIO - Final report „Determination of conditions to prevent weathering due to condensation, particle deposition and micro organism growth on ancient stained glass windows with protective glazing“ EVK4-CT-2001-00045, 2005

/4/ Oliver Hahn, „Nahfeldmessungen an zwei mittelalterlichen Chorfenstern des Domes St. Marien in Erfurt“ in Konservierung mittelalterlicher Glasmalereien, Abschlussbericht eines Projektes der Kulturstiftung der Länder, Stuttgart 2011, S. 124-141, ISBN 978-3-8167-8470-8

/5/ Harald Garrecht, Simone Reeb, Oliver Hahn, Cora Pischke „Wissenschaftliche Untersuchungen zur Schadensanalyse und Prävention der Divi-Blasii-Kirche Mühlhausen“ in 30. Mitteldeutsches Bau-Reko-Kolloquium, 13. April 2011 Mühlhausen, Verlag der Bauhausuniversität Weimar 2011, S. 40-63 ISBN 978-3-86068-435-1

/6/ CVMA Deutschland/Potsdam, aus:
<http://telota.bbaw.de/cvma/HyperCVMA/HavelbergDom/>

/7/ CVMA Deutschland/Potsdam, aus: <http://pom.bbaw.de/cvma/>

/8/ Eva Fitz, Historische Glasmalerei, Schutzverglasung-Bestandssicherung-Weiterbildung, S. 120, Edition Leipzig 1999, ISBN 3-361-00500-0

/9/ CVMA Deutschland/Potsdam, aus: <http://telota.bbaw.de/cvma/HyperCVMA/StendalDom/>

/10/ Bernd Konrad, Historische Glasmalerei, Schutzverglasung-Bestandssicherung-Weiterbildung, S. 188, Edition Leipzig 1999, ISBN 3-361-00500-0

/11/ Heinrich Magirius, Kloster Marienstern, S. 80, Leipzig 1974

/12/ Wolfgang Müller; „Verbräunte mittelalterliche Glasmalereien“ Edition Verlag Leipzig 2002, ISBN 3-361-00547-7

/13/ W. Korf; „Die Pfarrkirche in Quedlinburg“, Berlin 1986

/14/ Harald Garrecht, Oliver Hahn, Kim Kappes, Simone Reer, Susanne Scheibner, Nicole Sterzing; „Modellversuch zur Spalttemperierung an der Divi-Blasii-Kirche in Mühlhausen, Deutschland“ in: The Art of Collaboration, Stained Glass Conservation in the twenty-first century, New York 1-3 June 2009, S. 119-126, Harvey Miller publishers, London /Turnhout 2010, ISBN 978-1-905375-46-2

/15/ Arnold Wolff, Restaurierung Konservierung historischer Glasmalerei, S.197-209, Verlag Phillipp von Zabern, Mainz 2000, ISBN 3-8053-2648-3

/16/ Oliver Hahn; „Bauklimatische Untersuchungen an den Chorfenstern und Empfehlungen zur weiteren Pflege“ in: Die Chorfenster der St. Marienkirche in Frankfurt (Oder) S 227-228, Wernersche Verlagsgesellschaft Worms 2008, ISBN 978-3-88462-272-8

/17/ Bernd Konrad; Historische Glasmalerei, Schutzverglasung-Bestandssicherung-Weiterbildung, S. 18-34, Edition Leipzig 1999, ISBN 3-361-00500-0

/18/ A. John, Heinz, Entwicklung und Erprobung eines zweistufigen Impaktors zur Messung alveolengängiger Quarzfeinstaubemissionen und Durchführung von Validierungsmessungen, 2004

/19/ F. Drewnick, Aerosolmesstechnik II, Max-Planck Institut für Chemie, WS 2005/2006, S. 25

/20/ K. L. Rasmussen, L. Skytte; "The indoor air chemistry in Danish churches - with special emphasis to ammonia"; in: Impact of the indoor environment on the preservation of our moveable heritage, p. 41-42, proceedings COST D42-Final Meeting, Dublin 7.-10.11.2010

Projektteam:

An der Bearbeitung des Projektes (BAM-Vorhaben 4298) waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

Projektleiter, BAM 4.21	Dr.-Ing. Manfred Torge
Projektkoordinator (extern)	PD Dr. Erhard Drachenberg
Wissenschaftlicher Gutachter (extern)	Dr. rer.nat.habil. Wolfgang Müller
Arbeitsgruppenleiter, BAM 4.21	Dr.-Ing. Michael Bücken
ESEM/EDX, BAM 4.21	Dipl.-Ing.(FH) Ines Feldmann
Staubprobenahme, Kaskadenimpaktor, BAM 4.2	Dr. rer.nat. Stefan Seeger
Datenauswertung, BAM 5.4	Dr. rer.nat. Brita Unger
UV-VIS, BAM 6.3:	Dr. rer.nat. Volker Wachtendorf
FT-IR-Untersuchungen, BAM 6.3	Dr. rer.nat. Ulrike Braun

Wir danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die finanzielle Förderung des
Projektes

