



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

(AZ 37059/01)

- Abschlussbericht -

Verfasser:

Dr. Katrin Wittstadt, Wiebke Schnepfel, Mayre Maquiné (Dombauhütte Köln)

Dr. Magdalena Roth, Dr. Martin Kilo, Gabriele Maas-Diegeler (Fraunhofer ISC)

Dr. Falko Bornschein, Thomas Glaß (Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt)

Projektlaufzeit: 10/2020 bis 12/2022

Veröffentlichung des Projektberichtes im Juli 2023



Kölner Dom



HOHE DOMKIRCHE
ST. MARIEN ZU ERFURT

INHALTSVERZEICHNIS

1	Zusammenfassung	3
2	Anlass und Zielsetzung des Projekts	4
2.1	Hintergrund	4
2.2	Stand der Technik und Zielstellung des Projektes	5
2.3	Auswahl der Objekte	8
2.3.1	Herrgottskirche Creglingen	9
2.3.1	Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln	10
2.3.2	Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt	12
2.3.3	Zurückliegende Evaluierungen an den Pilotobjekten	15
2.4	Vorgehensweise und Arbeitsablauf der aktuellen Untersuchungen	16
3	Ergebnisse und Diskussion	17
3.1	Visuelle Bewertung der ORMOCER®-Verbundbeschichtung (Korrosionsschutzbeschichtung)	17
3.1.1	Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Herrgottskirche in Creglingen	18
3.1.2	Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln	19
3.1.3	Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt	20
3.2	Visuelle Bewertung der Beschichtung zur flächigen Malschichtsicherung an den Crodel- Fenstern der Hohen Domkirche St. Marien zu Erfurt	22
3.3	Schwingungsspektroskopische Untersuchungen an Proben der ORMOCER®-Verbundbeschichtung und der Malsichtsicherung	23
3.3.1	Spektroskopische Untersuchungen - Herrgottskirche Creglingen	24
3.3.2	Spektroskopische Untersuchungen - Hohe Domkirche St. Petrus zu Köln	27
3.3.3	Spektroskopische Untersuchungen - Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt	33
3.3.4	Zusammenfassende Übersicht über die spektroskopisch untersuchten Proben	47
3.4	Prüfung der Reversibilität	49
3.5	Klimatische Bedingungen am Erfurter Dom	54
4	Zusammenfassung und Ausblick	56
5	Literaturangaben	57
6	Abbildungsverzeichnis	59
7	Anhang	59

1 Zusammenfassung

Die Entwicklung des Konservierungsmaterials Glas-ORMOCER® liegt mehr als 30 Jahre zurück. Ursprünglich war es als Korrosionsschutzbeschichtung für korrosionsempfindliche, mittelalterliche Glasoberflächen konzipiert. Die ältesten Pilotanwendungen stammen aus dem Zeitraum von 1987 bis 1990.

In Abwandlung der Auftragstechnik wurde das Glas-ORMOCER® am Erfurter Dom ab Mitte der 1990er Jahre auch zur flächigen Sicherung stark geschädigter Glasbemalung eingesetzt. Vor allem im Rahmen von Forschungsprojekten mit Leuchtturmcharakter wurde der Einsatz des Materials weiter erprobt. Generell ist die praktische Denkmalpflege am Einsatz neuer Methoden und Materialien interessiert, in der konkreten Anwendung allerdings sehr zurückhaltend, solange keine zuverlässigen Langzeiterfahrungen vorliegen. Langlebige und nachhaltige Konservierungsmaterialien sind jedoch unentbehrlich, zumal vor dem Hintergrund des fortschreitenden Klimawandels, dessen korrosionsbeschleunigende Bedingungen bereits prognostiziert werden.

Für drei Pilotanwendungen des Glas-ORMOCER® – an der Herrgottskirche in Creglingen, am Erfurter Dom und am Kölner Dom – liegen frühere Bewertungen vor, deren positive Einschätzung nach einem weiteren Jahrzehnt und mittlerweile 30 Jahren Expositionszeit zu überprüfen waren. Neben der eingehenden Bewertung des Objektzustandes wurden schwingungsspektroskopische Untersuchungen im Labor durchgeführt, um strukturelle Aussagen zum Alterungsverhalten zu erhalten. Auch der Frage zur Reversibilität der „Altrestaurierung“ sollte nachgegangen werden, also, ob und wie eine Entfernung des Glas-ORMOCER® von den behandelten Oberflächen möglich ist.

2 Anlass und Zielsetzung des Projekts

2.1 Hintergrund

Farbige bleiverglaste Fenster sind seit Jahrhunderten ein integraler Bestandteil sakraler und repräsentativer profaner Architektur. Gestaltet aus farbigem Glas, das zumeist mit künstlerischer Bemalung versehen ist, verleihen sie den Innenräumen ein besonderes, eindrucksvolles Licht. Dabei geht ihre Aufgabe vor allem in Kirchen weit über eine bautechnisch-dekorative Funktion hinaus. Viele Kirchenfenster vergegenwärtigen Gestalten und Szenen der christlichen Heilsgeschichte und sind damit Teil der inhaltlich bedeutsamen Ausstattung. Allerdings zeigen nur die wenigsten historischen Farbverglasungen bis heute ihr ursprüngliches Erscheinungsbild.

Glas und Bemalung erweisen sich in vielen Fällen empfindlich gegenüber Umgebungseinflüssen und bilden teils gravierende Schäden aus. Als „Wetterscheide“, d. h. als Grenzfläche zwischen Außen- und Innenraum, unterliegen Glasmalereien einer hohen klimatischen Beanspruchung. Neben starken Temperaturschwankungen und Kondensationseffekten sowie dem Auftreten von Mikroorganismen ist vor allem der Einfluss von luftgetragenen Luftschadstoffen wie SO₂, NO_x und Ozon als wesentlicher Schädigungsfaktor wissenschaftlich belegt. Aber auch anthropogene Umwelteinflüsse, z. B. Staub, Schmutz und Kleidungspartikel, die von Kirchenbesuchern eingetragen werden, wirken sich schädigend auf die Glasmalereien aus. Lochkorrosion, Verbräunung und Krustenbildung können zur Verdunklung bis hin zu vollständiger Intransparenz der Gläser führen. Dabei unterliegen die Innenseiten und Außenseiten der Fenster zwar etwas unterschiedlichen Einflussfaktoren, diese führen allerdings auf beiden Seiten zu irreversiblen Glaskorrosionsprozessen.

Die künstlerische Bemalung der farbigen Gläser ist in der Regel mit speziellen Glasmalfarben (Bleisilikatglas, gefärbt mit Metalloxiden) ausgeführt, die durch einen Einbrand mit dem Trägerglas verbunden bzw. dem Trägerglas aufgeschmolzen werden. Sie ist ähnlichen Schadensprozessen ausgesetzt wie das farbige Glas. Je nach Art, Beschaffenheit und Zusammensetzung kann sich die Glasmalfarbe korrosiv verändern oder sich sogar vom Glasträger lösen. Neben klimatischen Faktoren können auch Fehler in der Herstellung wie z. B. niedrige Einbrenntemperaturen dafür verantwortlich sein. Wird der Ablösung nicht Einhalt geboten, sind großflächige Bemalungsverluste bis zum völligen Verschwinden die Folge. Die Fenster sind dann zwar noch vorhanden, doch die Darstellung ist nicht mehr „lesbar“. Wesen und Sinn der Glasmalerei gehen verloren. Dass damit auch die Existenz der betroffenen Kunstwerke infrage gestellt werden kann, zeigt das Beispiel der von Charles Crodel entworfenen Fenster des Erfurter Domes [BOR 99], die Gegenstand der vorliegenden Untersuchungen sind.

Die Restaurierungsgeschichte von Glasmalereien ist anhand vieler Fallbeispiele gut belegt. Grobe Reinigungsverfahren mit scheuernden Werkzeugen oder aggressiven chemischen Mitteln gehören mittlerweile der Vergangenheit an, doch bleiben sie ein Teil der „Schädigungsgeschichte“. Heute sind angepasste Prävention und minimalinvasive Maßnahmen zum maximalen Materialerhalt die konservatorischen Zielvorgaben. **Vor dem Hintergrund des Klimawandels, dem auch Kunst- und Kulturgut ausgesetzt sind, werden dauerhafte und nachhaltige Erhaltungskonzepte und langlebige Konservierungsmaterialien benötigt.**¹

¹ Im EU-Projekt „Climate for Culture“ wurden unter anderem für Mittel- und Nordeuropa steigende Temperaturen und höherer Feuchtigkeitseintrag prognostiziert (www.climateforculture.eu). Diese Parameter sind stark korrosionsfördernd und alterungsbeschleunigend.

2.2 Stand der Technik und Zielstellung des Projektes

Zum unmittelbaren Schutz des Glases vor Korrosion und den damit verbundenen Schadensprozessen versuchte man in der zweiten Hälfte des vorigen Jahrhunderts, durch **flächige Beschichtungen** Feuchtigkeit und Schadstoffe von den innen- und außenseitigen Glasoberflächen fernzuhalten. Seit den 1980er Jahren kamen hierfür synthetische **organische Polymere** zum Einsatz, vor allem Acrylate und Epoxide, die als (Dickfilm)beschichtungen aufgetragen wurden [WOL 00]. Allerdings waren diese Materialien umstritten, da sie, bedingt durch ihre Durchlässigkeit für Feuchtigkeit und Schadstoffe, zu lokalen Haftungsverlusten sowie zu spannungsreichen Versprödungen neigten, welche die historischen Gläser neuerlich zu schädigen drohten. Die Schutzbeschichtung mit Acrylaten und Epoxiden bot also keine befriedigende Lösung. Deshalb wurde in den 1990ern ein neues **Konservierungsmaterial auf der Basis von ORMOCER®en** entwickelt [FUC 91, RÖM 93, WOL 00]. Die ORMOCER®e (Organically Modified Ceramics) bezeichnen eine Materialklasse mit zahlreichen Anwendungsmöglichkeiten. Eine Variante – die sogenannte „Glas-ORMOCER®-Mischung“ oder „ORMOCER®-G-Mischung“, kurz ORG – ist speziell auf die Anforderungen, die mit der Konservierung historischer Glasfenster verbunden sind, abgestimmt. Sie besitzt sowohl organische als auch anorganische Eigenschaften, die eine optimierte Haftung zum Glasgrund und eine verbesserte Alterungsbeständigkeit gewährleisten.² Drei wesentliche materialwissenschaftliche sowie denkmalpflegerische Aspekte wurden bei der Entwicklung berücksichtigt:

- hohe Sperrwirkung gegen Wasser und Schadstoffe³
- gute Haftung zu Glas und Korrosionsprodukten⁴
- Reversibilität der Maßnahme.

Die gebrauchsfertige, farblos-klare Glas-ORMOCER®-Lösung wird der Verwendung entsprechend verdünnt⁵ und kann mit dem Pinsel appliziert werden. Als flächige Beschichtung wurde sie in der Regel über die gesamte Glasoberfläche und auch durchgängig über die Verbleiung hinweg appliziert.⁶ Nach Verdunsten des Lösungsmittels härtet das Material physikalisch aus. Zusätzlich ermöglichen die vorhandenen Rest-SiOH-Gruppen des Hybridpolymers auch eine reaktive Anbindung an die SiOH-Gruppen des Glases, was eine optimierte Schichthaftung bewirkt.

² Grundlage für die ORMOCER®e sind organisch modifizierte Heteropolysiloxane. Das hochviskose Siliconharz des Glas-ORMOCER®s wird bislang aus (Organo)chlorsilanen oder Alkoxysilanen hergestellt, mit dem in der Restaurierung etablierten Copolymer Paraloid™ B72 abgemischt und mit Lösungsmitteln anwendungsbezogen eingestellt. Das Glas-ORMOCER® wurde im Rahmen einer späteren Entwicklung auch als eine Komponente der sogenannten Email-ORMOCER®mischung für die Festigung von korrosionsgeschädigten Emailobjekten eingesetzt (DBU-Projekte Az. 09715 sowie Az. 33205).

³ Die Wasserdampfpermeationsrate (WVPR) wurde während der Entwicklungsphase des Materials für unterschiedliche Beschichtungsvarianten geprüft. Es zeigte sich, dass die Wasserdampfsperrewirkung der ORMOCER®-G Mischung (WVPR=140,25 g/m²d) doppelt so hoch ist wie für reines Paraloid™ B72 (WVPR = 257,08 g/m²d). Durch Mehrfachaufträge von ORMOCER®-G sowie die Einbettung von Glasflakes lässt sich die Sperrwirkung nochmals deutlich erhöhen ([RÖM 93], Teil 2; Kapitel 1.2.3.1 Wasserdampfpermeabilität S. 17 ff).

⁴ Im Rahmen der Materialentwicklung hat man die Schutzwirkung von 13 Beschichtungsvarianten, ORMOCER®e bzw. Paraloid™ B72, im Klimaschrank und bei Freilandwitterung untersucht. Die Auswertung ergab unter anderem: „Die einzige Probe, an der Lackabhebungen zu beobachten sind, ist Variante Nr. 12 (Paraloid) nach Freilandwitterung, was die schlechten Haftungseigenschaften von rein organischen Polymeren auf Glas verdeutlicht.“ [RÖM 93, S. 24 ff].

⁵ Die Verdünnung wurde jeweils der Beschaffenheit des korrodierten Glases angepasst und variiert bei den Pilotobjekten zwischen 1:3 bis 1:10.

⁶ Glasflakes befinden sich ausschließlich auf beschichteten Glasoberflächen, nicht auf den Bleiruten.

Im Gegensatz zu früheren (Dickfilm)beschichtungen, die als Mehrfachaufträge mit organischen Polymeren ausgeführt wurden, ist die **ORMOCER®-Verbundbeschichtung** deutlich komplexer aufgebaut (Abbildung 1). Sie besteht aus einer Grundierung mit Glas-ORMOCER® und mehrfach aufgetragenen Zwischenschichten aus Glas-ORMOCER® mit eingebetteten diffusionshemmenden Glasflakes sowie einem schützenden Decklack aus Paraloid™ B72.

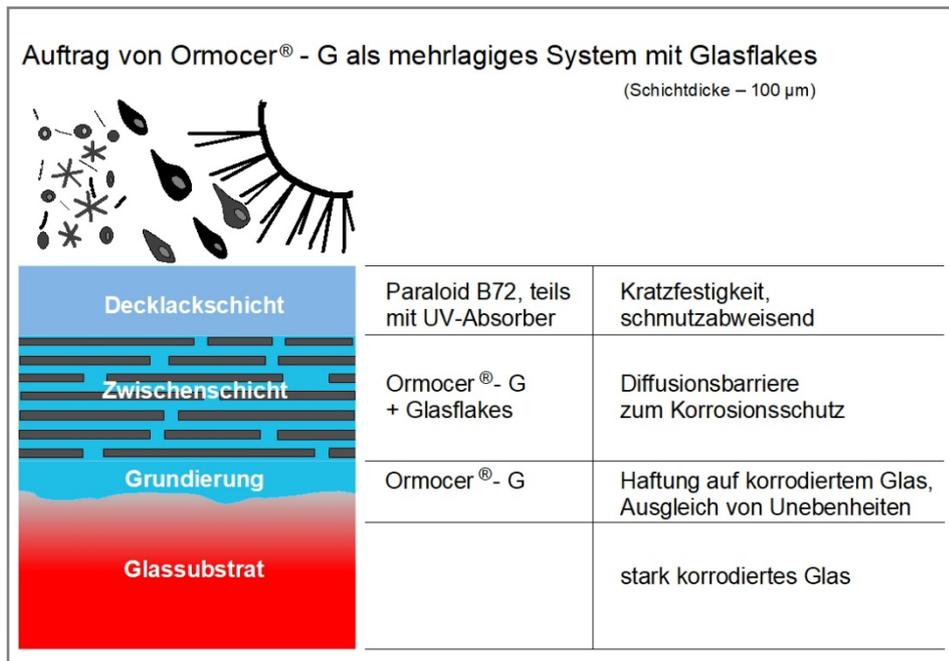


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Korrosionsschutzbeschichtung als dreilagiges Verbundsystem; Konzentrationen und Lösungsmittel des ORMOCER®-G sind veränderlich; die ORMOCER®-G-Mischung enthält in der Regel 50% Paraloid™ B72 als Bestandteil.

Parallel zur Entwicklung der ORMOCER®-Verbundbeschichtung wurde seit Ende der 1980er Jahre verstärkt die Wirksamkeit von Schutzverglasungen erforscht, die – wie auch Beschichtungen – Witterungseinflüsse und Schadstoffbelastungen von historischen Fenstern fernhalten sollen. Mit zunehmender Akzeptanz der baulichen und ästhetischen Veränderungen, die eine Schutzverglasung mit sich bringt, verlor das Konzept der Schutzbeschichtung zwar bald an Bedeutung, nicht jedoch das Konservierungsmaterial Glas-ORMOCER® an sich. Seine Materialeigenschaften, vor allem seine gute Haftung auf Glas und Korrosionsprodukten legten es nahe, die Anwendung auf die Sicherung geschädigter Malschichten zu erweitern. Zur Festigung fragiler, spannungsreicher Malschichtpartien standen bis dahin lediglich die bereits oben erwähnten organischen Polymere (vorwiegend Acrylate, auch Wachse) zur Verfügung, die lokal zur Sicherung fragiler Konturen und Überzüge eingesetzt wurden. Insbesondere für großflächige Malschichtprobleme fehlte es jedoch an Lösungsansätzen. Das Glas-ORMOCER® versprach aufgrund seiner guten Durchdringung korrodierter Glasmalfarben sowie seiner strukturell besseren Anbindung an das Trägerglas neue Möglichkeiten.

Dementsprechend wurde ORMOCER®-G bei Glasmalereien seit Ende der 1980er Jahre nicht nur als **Korrosionsschutzbeschichtung**⁷ verwendet, sondern, wie schon erwähnt, seit Mitte der 1990er Jahre auch als **flächige Malschichtsicherung bzw. als lokal begrenzte Kontursicherung**. 2010 wurde es in Kombination mit einem Glasfasergewebe modellhaft auch zur flächigen Stabilisierung von

⁷ Die ältesten Applikationen sind die Pilotanwendungen an Glasmalereiefeldern in Gotland (1986), Erfurt (1987), Köln (1988), Creglingen (1989) und York (1989) [FUC91, RÖM 93].

craquelierten Gläsern in einem Fenster des Kölner Domes eingesetzt.⁸ Darüber hinaus kam ORMOCER®-G, teils in pigmentierten Varianten, auch zur Festigung von glasierten Ziegeln im Außenraum sowie als Glasurersatzmaterial zur Anwendung.⁹

Das vorliegende DBU-Projekt verfolgte das Ziel, das Langzeitverhalten von ORMOCER®-G auf Glasoberflächen mehr als 30 Jahre seit der Erstanwendung zu bewerten. Das Langzeitverhalten ist das entscheidende Kriterium für einen weiteren Einsatz. Dabei sollten folgende Punkte beleuchtet werden:

- Schutzdauer der Verbundbeschichtung in Abhängigkeit der Umgebungseinflüsse (z. B. klimatische Parameter, Zustand des Glasträgers, Vorhandensein einer Außenschutzverglasung)
- Möglichkeiten der Reaktivierung der Beschichtung in lokalen Defektbereichen bzw. der Abnahme der Beschichtung (Reversibilität)
- Versuch zur Abschätzung der erwartbaren Schutzdauer der Verbundbeschichtung
- Effektivität und Dauerhaftigkeit der Malschichtsicherung als Dünnschichtauftrag
- Alterungsverhalten auf molekularstruktureller Ebene

⁸ DBU-Projekt zur Sicherung craquelierter Glasmalereien im Kölner Dom, Az. 24583.

⁹ DBU-Projekt zur Erhaltung geschädigter Ziegelfassaden, Az. 20307/01 sowie [GRA 16], [BUL 21].

2.3 Auswahl der Objekte

Das Langzeitverhalten des Glas-ORMOCER® sollte anhand der Beschichtungen an drei verschiedenen Standorten bewertet werden (Tabelle 1). Kriterien für die Auswahl waren unter anderem das vergleichsweise hohe Alter der Beschichtung, die Zugänglichkeit der Objekte und bereits erfolgte Zwischenevaluierungen.

Die Objektauswahl ist repräsentativ für den Einsatz als:

- **Verbundbeschichtung** als Korrosionsschutz
 - ohne Außenschutzverglasung
 - mit zeitweiser Außenschutzverglasung
 - mit Außenschutzverglasung
- **Flächige Malschichtsicherung** in Verbindung mit einer Schutzverglasung.

Tabelle 1: Übersicht zu den drei Pilotstandorten mit ORMOCER®-Beschichtungen.

Objekte	Auftragsart/ Datum	Exposition
Creglingen Westfenster	1988: Verbundbeschichtung, beidseitig	Originalstandort, Westseite, direkte Bewitterung ohne Außenschutzverglasung
Erfurt Hoher Chor, Fenster nII, Feld 6d („Erfurt III“)	1989: Verbundbeschichtung, beidseitig	Originalstandort, Nordseite, mit Außenschutzverglasung
Erfurt Testfeld „Erfurt I“	1989: Verbundbeschichtung, beidseitig	Größe: 28 cm x 28 cm offener Kreuzgang ca. 14 Jahre Innenraum ca. 17 Jahre
Erfurt Crodell-Fenster	1995 bis 1999: Malschichtsicherung als flächiger Überzug, ca. 100 m ² Fensterfläche, Innenseiten	5 Fenster am Originalstandort, seit Beschichtung mit Außenschutzverglasung eingebaut
Erfurt Testfeld „Crodell II“	1989: Malschichtsicherung als flächiger Überzug in Varianten, Innenseite	Größe: 30 cm x 30 cm offener Kreuzgang ca. 14 Jahre Innenraum ca. 17 Jahre
Köln Obergaden Fenster NVI, Felder 4bl und 4br sowie Felder 4dl und 4dr	1988: Verbundbeschichtung, 4dr und 4dl: nur Außenseite 4br und 4dl: beidseitig	bis 1998 testhalber ohne Außenschutz: 4dl+4dr Nordseite 4bl+4br Südseite Innenraumlagerung bis 2001 Seit 2001 in situ mit Außenschutzverglasung

2.3.1 Herrgottskirche Creglingen

Die Herrgottskirche in Creglingen besitzt in der Westwand ein Rundfenster, in dem moderne Gläser mit mittelalterlichen Glastücken kombiniert sind. Die Farbgläser eines kleinen Vierpasses (markiert in Abbildung 2) stammen aus der Zeit um 1350, wobei teilweise noch die originale Verbleiung erhalten ist. Die unbemalten mittelalterlichen Glasoberflächen sind stark korrodiert. Im Labor des Fraunhofer ISC erfolgte 1988 eine **ORMOCER®-Verbundbeschichtung** der Innen- und Außenseite des Vierpasses (Tabelle 2). Dabei wurde der flächige Auftrag über die Glasoberflächen und auch die Bleie hinweg ausgeführt. Anschließend hat man das Feld wieder eingebaut. Es ist nach wie vor **direkter Bewitterung ohne Außenschutzverglasung** ausgesetzt.



Abbildung 2: Links: Westfassade der Herrgottskirche während der Untersuchung der teilweise beschichteten Verglasung in situ im Jahr 2021. Oben: Ansicht des Rundfensters von der Innenseite; der beschichtete Vierpass befindet sich oben links; die Bewertung der Beschichtung erfolgte auf der Außenseite.

Tabelle 2: Herrgottskirche Creglingen - Auftragsvariante der Beschichtung auf der untersuchten Außenseite des Vierpasses, 1988 [FUC 91, S. A8].

Beschichtungs-variante	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung
VB	3 (je 3 min)	A	50	50	Glasflakes	1:3 (EE)
	4 (4.5 h/16 h/5.5 h/1.5 h)	B	50	50		1:10 (EE)
	2 (1.5 h/16 h)	A	50	50		1:3 (EE)
	2 (je 24 h)	A		100		1:10 (Tol)

VB: Verbundbeschichtung; A: Pinselauftrag; B: Einlagern der Glasflakes in frisch gestrichenen Lack mit einer Hostafon-Folie; ORM: Rohharz; PB72: Paraloid™B72; EE: Ethylacetat; Tol: Toluol.

2.3.1 Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln

Das UNESCO-Weltkulturerbe Kölner Dom befindet sich im Zentrum der Stadt. Die unmittelbare Lage am Hauptbahnhof und am Rhein hat vor allem in Zeiten der Kohleverbrennung über viele Jahrzehnte massive Schäden an den Glasmalereien bewirkt. Heute verursachen die jährlich etwa sechs Millionen Besucher sowie der intensive Kerzenbrand im Innenraum eine immense Staubbelastung und teils sehr hohe NO_x-Werte. Mit einer mittleren Niederschlagsmenge von 774 mm und einer durchschnittlichen Jahrestemperatur von 10,1°C ist Köln der wärmste und feuchteste der drei ausgewählten Standorte.¹⁰

Die Glasrestaurierungswerkstatt der Dombauhütte Köln pflegt und wartet kontinuierlich den etwa 8.000 m² umfassenden hochrangigen Glasmalereibestand. Als Projektpartner in zahlreichen nationalen und internationalen Projekten werden neue Forschungs- und Entwicklungsansätze stetig verfolgt und erprobt. So wurde 1988 auch die **ORMOCER®-Verbundbeschichtung** an vier mittelalterlichen Glasmalereischeiben des Chorobergadens testweise aufgetragen (Abbildung 3, Tabelle 3). In den ersten neun Jahren nach der Applikation der Beschichtung waren die Felder bis 1998 zunächst ungeschützt der direkten Bewitterung ausgesetzt: Felder 4dl+4dr weiterhin auf der Nordseite und 4bl+4br durch Umhängung auf der Südseite. An zwei der Felder sind zusätzlich zu den Außenseiten auch die ebenfalls bereits stark verwitterten, unbemalten Innenseiten mit der Verbundbeschichtung versehen worden, um einen Korrosionsschutz während möglicher Kondensationsereignisse zu gewährleisten. Für die Glasmalereiausstellung „Himmelslicht“ 1998/99 in Köln waren die Felder ausgebaut und danach im Depot der Glasrestaurierungswerkstatt aufbewahrt worden. Seit 2001 befinden sich alle Felder an ihrem ursprünglichen Standort und sind nun seit etwa 20 Jahren mit einer Außenschutzverglasung versehen (Details im Anhang A3, A4 und A15, A16).

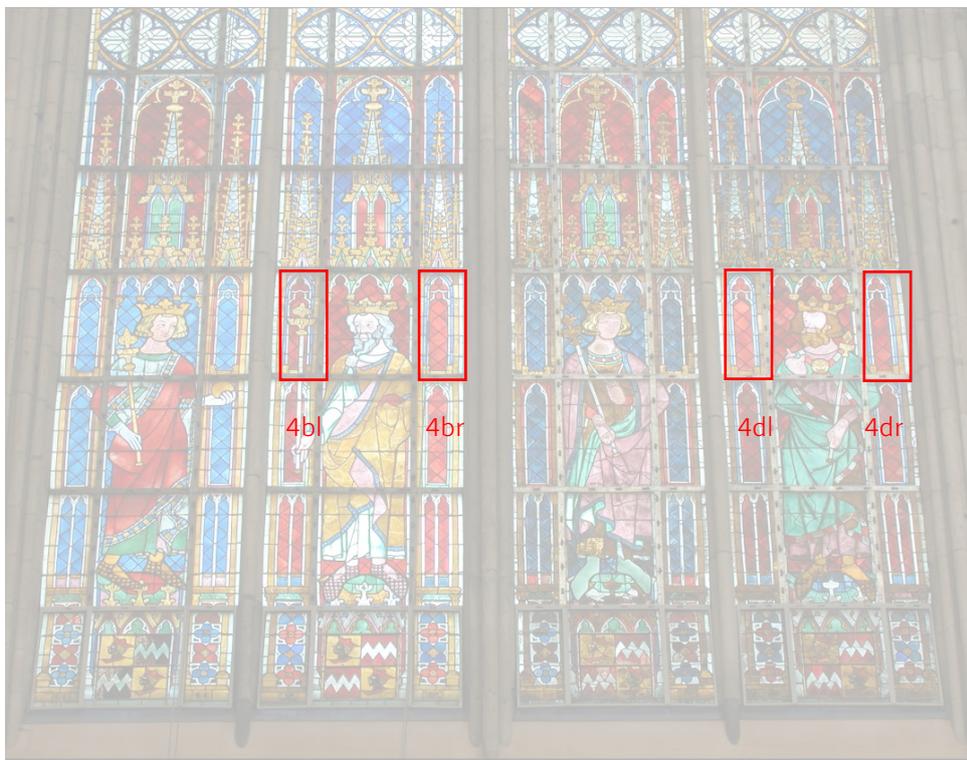


Abbildung 3: Fenster Nord VI des Chorobergadens im Kölner Dom; auf den markierten Feldern 4bl und 4br (heute 4b1 und 4b3) sowie 4dl und 4dr (heute 4d1 und 4d3) befindet sich flächig die ORMOCER®-Verbundbeschichtung; bei den Feldern 4br und 4dl wurde zusätzlich die unbemalte Innenseite beschichtet.

¹⁰ <https://de.climate-data.org/europa/deutschland>; 23.02.2022, 14:52 Uhr.

Tabelle 3: Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln - Auftrag der Beschichtung von 1988 [FUC 91, S. A10].

Beschichtungs- variante	Auftrag der Schichten Anzahl	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung
VB ^[a]	2	A ^[b]	50	50	Glasflakes	1:3 (EE)
	3	B ^[c]	50	50		1:10 (Tol)
	2	A		100		

[a] VB: Verbundbeschichtung; [b] A: Pinselauftrag; [c] B: Einlagern der Glasflakes in frisch gestrichenen Lack mit einer Hostaflon-Folie; ORM: Rohharz; PB72: Paraloid™B72; EE: Ethylacetat; Tol: Toluol.

2.3.2 Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt

Der Erfurter Mariendom liegt im Stadtzentrum auf einer Anhöhe und überragt weithin sichtbar die ganze Stadt. Die mittlere jährliche Niederschlagsmenge liegt mit 512 mm und einer mittleren Jahresdurchschnittstemperatur von 8,5°C etwas niedriger als in Creglingen.¹¹ Der hochkarätige mittelalterliche Glasmalereibestand im Hohen Chor und der Sakristei des Domes befindet sich noch an seinem ursprünglichen Platz. Darüber hinaus zählt der Dom im Kirchenschiff und dem Chor fünf große Fenster von Charles Crodel zu seinem Bestand. Sie entstanden zwischen 1960 und 1962 und gelten als glasmalerische Spitzenwerke aus der Zeit nach dem Zweiten Weltkrieg. Die Wartung und Konservierung aller Fenster ist Aufgabe der Glasrestaurierungswerkstatt des Domes.

An den mittelalterlichen Glasmalereien sind umweltbedingte Schäden in Form von Gips/Syngenit-Krusten extrem stark ausgeprägt. Um die Transparenz und Lesbarkeit der Glasmalereien wiederherzustellen, werden diese Krusten seit Jahrzehnten mit einem eigens dafür entwickelten Verfahren ausgedünnt und in situ durch eine **Außenschutzverglasung** geschützt [WOL 00]. Im Rahmen einer Pilotanwendung wurde 1989 an einem zuvor gereinigten¹² Feld die **ORMOCER®-Verbundbeschichtung** aufgetragen (Abbildung 4). Dies erfolgte nicht vollflächig, sondern lediglich auf einzelnen Segmenten (Tabelle 4, Anhang A31 bis A33). Es handelt sich daher um vergleichsweise kleine Testflächen sowohl auf der Innen- und der Außenseite. Auch wurde damals aus einzelnen historischen Glasstücken des Depotbestandes ein kleines Testfeld zusammengesetzt und mit verschiedenen ORMOCER®-Varianten beschichtet (Tabelle 5). Dieses Testfeld, bezeichnet als „Erfurt I“, wurde im Laufe der Zeit variabel exponiert (Tabelle 1) und zwischenzeitlich untersucht (Tabelle 7).



Abbildung 4: Links: Blick in den Hohen Chor mit den mittelalterlichen Glasmalereien, wobei Fenster süd II und nord II ausgebaut sind und farblos/grau erscheinen. Rechts: mittelalterliches, stark korrodiertes Glasmalereifeld des Fensters nord II, Feld 6 d, auf dem verschiedene ORMOCER®-Beschichtungsvarianten auf einzelnen Segmenten der Innen- und Außenseite aufgetragen wurden – bezeichnet als „Erfurt III“.

¹¹ Ebenda.

¹² Trockene Reinigung mit Pinsel; die Belegung bzw. Ausdünnung der Krusten mit Ammoniumcarbonat fand zu dem Zeitpunkt noch nicht statt.

Tabelle 4: Auftrag der Beschichtung von 1989 an Fensters nll Feld 6d (Bezeichnung Erfurt III, beprobte Proben/Segmente 3, 4, und 5), [FUC 91, S. A16].

Beschichtungs- variante	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung
GL ^[a]	2 (je 3 min)	A ^[b]	50	50		1:6 (EE)
	1 (1 d)	A	50	50		1:3 (EE)
VB ^[c]	2 (je 3 min)	A	50	50		1:6 (EE)
	1 (3 min)	A	50	50		1:3 (EE)
	3 (25.5 h/26 h/42 h)	B ^[d]	50	50	Glasflakes	1:10 (EE)
	2 (2 h/1 d)	A		100		1:9 (Tol)

[a] GL: Grundlack (Seg. 3 und 4); [b] A: Pinselauftrag; [c] VB: Verbundbeschichtung (Seg. 5); [d] B: Einlagern der Glasflakes in frisch gestrichenen Lack mit einer Hostaflon-Folie; ORM: Rohharz; PB72: Paraloid™B72; EE: Ethylacetat; Tol: Toluol.

Tabelle 5: Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt - Auftrag der Beschichtung von 1989 am Testfeld Erfurt I auf den Segmenten 1.19 und 1.3, die im Rahmen des Projektes beprobt wurden, [FUC 91, S. A11].

Beschichtungs- variante	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung
VB ^[a]	1 (je 3 min)	A ^[b]	50	50		1:6 (EE)
	1 (je 3 min)	A	50	50		1:10 (EE)
	3 (5 h/17 h/3 d)	B ^[c]	50	50	Glasflakes	1:10 (EE)
	2 (2 h/1 d)	A		100		1:9 (Tol)

[a] VB: Verbundbeschichtung; [b] A: Pinselauftrag; [c] B: Einlagern der Glasflakes in frisch gestrichenen Lack mit einer Hostaflon-Folie; ORM: Rohharz; PB72: Paraloid™B72; EE: Ethylacetat; Tol: Toluol.

Bei den modernen Glasmalereien von Charles Crodel führten großflächige Haftungsprobleme der Bemalung zum Verlust der Lesbarkeit und Aussagekraft (Abbildung 5). Dies hatte in den 1990er Jahren zu einer kritischen Diskussion um ihren Erhalt und weiteren Verbleib im Kirchenraum geführt [BOR 99]. Die schwerwiegenden Ablösungen der Malschichten sind primär auf einen mangelhaften, weil bei zu niedrigen Temperaturen durchgeführten Einbrand zurückzuführen [BOR 99, BOR 22], wobei schwankende Umgebungsbedingungen mit Feucht-Trockenwechseln und hoher Schadstoffbelastung die fortschreitende Schädigung begünstigten. Zur Sicherung der flächigen Halbtonbemalung und innenseitigen Konturen wurde zwischen 1995 und 1999 ein **dünnere Glas-ORMOCER®-Film** aufgebracht (Tabelle 6). Diese Anwendung ist bislang einzigartig in ihrem Umfang und umfasst eine Fläche von etwa 100 m². Auch hier hatte man aus Werkstattbeständen eine leicht handhabbare, kleine Testscheibe mit Crodel-Originalgläsern angefertigt („Crodel II“ in Anhang A55); sie war verschiedenen Expositionsbedingungen ausgesetzt (Tabelle 1).

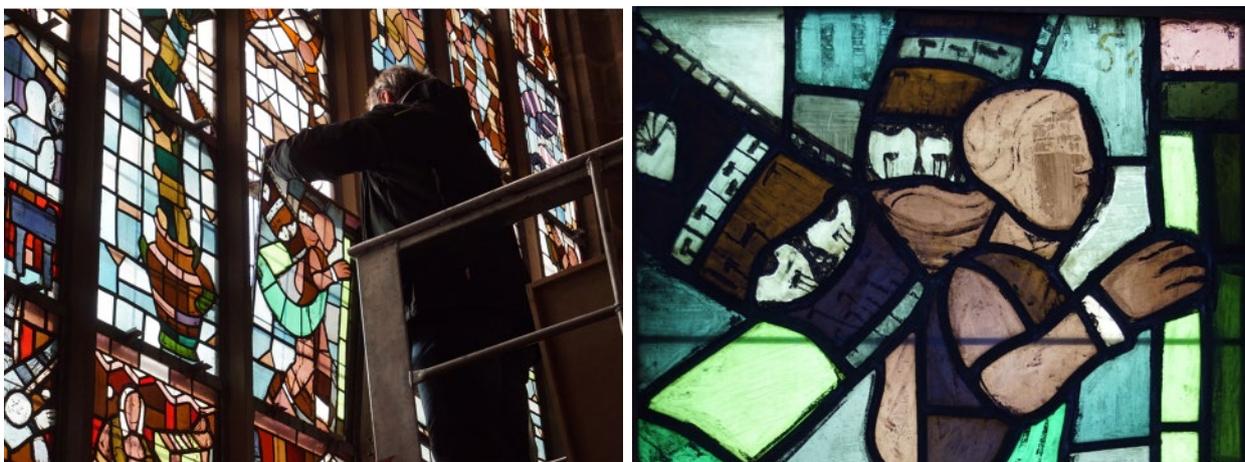


Abbildung 5: Links: Ausbau des Feldes Feld 2c an Fenster süd X für die anschließende Untersuchung in der Werkstatt; rechts: Detailaufnahme des Feldes 2c zeigt deutliche Malschichtverluste und teils lediglich noch als Negativ erhaltener Zeichnung.

Tabelle 6: Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt - Auftrag der dünnen ORMOCER®-Beschichtung zur Malschichtsicherung auf den Fenstern von Charles Crodel.

Beschichtungs- variante	Auftrag der Schichten Anzahl	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Verdünnung
Malschicht- sicherung	Konturen: mehrfach bis zur Sättigung	Pinsel	50	50	1:10 (EE)
	Fläche: ein Auftrag, vertrieben	Pinsel	50	50	1:10 (EE)
	Besonders dicke Konturbereiche: vereinzelt nochmaliger Auftrag	Pinsel	50	50	1:10 (EE)

ORM: Rohharz; PB72: Paraloid™ B72; EE: Ethylacetat.

2.3.3 Zurückliegende Evaluierungen an den Pilotobjekten

An allen ausgewählten Objekten wurden bereits Zwischenbewertungen der unterschiedlichen ORMOCER®-Behandlungen vorgenommen (Tabelle 7). Für den Standort **Creglingen** war das Fraunhofer ISC stets beteiligt. Während der visuellen Sichtung der Außenseite in situ wurde 2010 eine Beschichtungsprobe zur weitergehenden Analyse entnommen. Die schwingungsspektroskopische Untersuchung im Labor lieferte keine signifikanten Hinweise auf eine Materialveränderung bzw. Alterung. Sicht- und Laborbefund zeigten eine gute Übereinstimmung. Nach einem weiteren Jahrzehnt erfolgte nun eine neuerliche Begutachtung und intensivere Untersuchung des Langzeitverhaltens von ORMOCER®-G.

Die Aufzeichnungen zu den visuellen Bewertungen der verschiedenen ORMOCER®-Applikationen am **Erfurter Dom** liegen ebenfalls vor. Bis auf die Evaluierung der Verbundbeschichtungen im Jahr 1993, die vier Jahre nach der Applikation stattfand, sind aber keine Ergebnisse veröffentlicht. Die bisherigen Sichtkontrollen an der Verbundbeschichtung wie auch der großflächigen Malschichtsicherung wiesen keinen negativen oder gar schädigenden Einfluss der Beschichtungen nach. Es zeigte sich eine grundsätzlich gute Haftung. Lediglich an der Verbundbeschichtung auf dem Testfeld Erfurt I waren erste kleinere Defektstellen im Grenzbereich zum Bleinetz aufgetreten. Zudem führten ungenügend eingebettete Glasflakes lokal zu Trübungen.

Für die vier mit Glas-ORMOCER® beschichteten Felder des **Kölner Domes** liegen die Ergebnisse der Bewertungen von 1990 und 1993 vor, ebenso die Untersuchungen im Rahmen des EU-Projektes „Constglass“¹³ aus dem Jahr 2009. **Die Ergebnisse decken sich weitestgehend mit denen von Creglingen und Erfurt. Auch in Köln traten kaum Veränderungen auf.**

Tabelle 7: Angaben über Evaluierungen der beschichteten Pilotobjekte.

Objekte	Evaluierung
Creglingen Westfenster	1992: nur Außenseite [RÖM 93] 2010: nur Außenseite, Gerüst, Firma Rothkegel/Fraunhofer ISC 2021: DBU-Projekt, nur Außenseite, Befahrung mit Hubsteiger
Erfurt Hoher Chor, Fenster nII, Feld 6d („Erfurt III“)	1993: [RÖM 93] aufgrund schwieriger Zugänglichkeit keine weiteren Zwischenkontrollen 2020/2022: DBU-Projekt, Werkstatt
Erfurt Testfeld „Erfurt I“	1993: [RÖM 93] 2003: [NAW 03], unveröffentlichte Studienarbeit 2020/2022: DBU-Projekt, Werkstatt
Erfurt Crodell-Fenster	Stichprobenartige Sichtkontrollen an Referenzfeldern, Dombauhütte Erfurt, unveröffentlicht 2020: DBU-Projekt, Befahrung mit Hubsteiger und Entnahme einzelner Felder für Begutachtung in Werkstatt

¹³ Veröffentlichung in [FUC 91] sowie im EU-Projekt CONSTGLASS, Projektlaufzeit 2007 bis 2010, www.constglass.eu.

Erfurt Testfeld „Crodel II“	1993: [RÖM 93] 2003: [NAW 03; unveröffentlichte Studienarbeit] 2020/2022: DBU-Projekt, Werkstatt
Köln Obergaden Fenster NVI, Felder 4bl und 4br sowie Felder 4dl und 4dr	1990: [FUC 91] 1993: [RÖM 93] 2009: EU-Projekt „CONSTGLASS“ mehrfache turnusmäßige Sichtkontrollen, unveröffentlicht 2021/2022: DBU-Projekt, Werkstatt

2.4 Vorgehensweise und Arbeitsablauf der aktuellen Untersuchungen

Die drei Pilot-Standorte – Creglingen, Köln und Erfurt – wurden von den Projektpartnern gemeinsam vor Ort begutachtet und untersucht. An der Herrgottskirche Creglingen war ein Ausbau des Glasmalereifeldes nicht möglich; die Begutachtung erfolgte daher in situ vom Gerüst bzw. dem Fahrkorb aus. Am Mariendom in Erfurt sowie am Kölner Dom ergaben sich in den Räumlichkeiten der Glaswerkstätten umfassendere Möglichkeiten.

Die Evaluierung der Beschichtungen mit Glas-ORMOCER® umfasst jeweils folgende Schritte:

- **Zustandserfassung**
 - **der Verbundbeschichtungen** und des Glases, visuell mit dem Auge und unter dem Mikroskop, hinsichtlich Vergilbung, Grauschleier, Mikrorissbildung, Blasenbildung etc.
 - **der Malsichtsicherung** und der Bemalung an den fünf Crodel-Fenstern; Screening der Fläche und detaillierte Begutachtung an einzelnen Referenzfeldern
 - fotografische Makro- und Mikroaufnahmen, grafische und schriftliche Dokumentation
 - Abgleich des aktuell vorgefundenen Zustandes mit früheren Evaluierungsergebnissen
- **Bewertung chemischer Veränderungen durch**
 - minimalinvasive Probennahme an relevanten Bereichen der Beschichtung, Flittergröße 1-2 mm²
 - Mikro-Raman-spektroskopische und IR-spektroskopische Untersuchung und Bewertung der ORMOCER®-Proben im Labor hinsichtlich chemischer Veränderungen im Zuge der Alterung
- **Tests zur Reversibilität** mit Lösungsmitteln
- **Tests zur Reaktivierung der Haftung** durch Behandlung mit Lösungsmitteln, falls kleinere Ablösungen der Beschichtung vorliegen¹⁴

Zudem wurden begleitende klimatische Untersuchungen durchgeführt:

- Glasdosimeterstudie an den schutzverglasten Glasmalereien des Erfurter Doms über 12 Monate zur Bewertung des aktuellen Korrosionsrisikos im Vergleich zur Glasdosimeterstudie von 1990; Einbeziehung des Custos Aeris zur Gewinnung von Einzeldaten¹⁵

¹⁴ An einigen ORMOCER®-Beschichtungen – wie in Creglingen und Köln – sind nach der Applikation Blasen aufgetreten, die durch Betupfen mit einem Lösungsmittel niedergelegt werden konnten.

¹⁵ Am Kölner Dom wurde die Außenschutzverglasung des Chorobergadens bereits in Klima- und Sensorstudien überprüft. Eine neuerliche Prüfung war nicht erforderlich.

3 Ergebnisse und Diskussion

3.1 Visuelle Bewertung der ORMOCER®-Verbundbeschichtung (Korrosionsschutzbeschichtung)

Die vergleichsweise dick aufgetragene Verbundbeschichtung (ca. 100 µm) erscheint an allen untersuchten Pilotobjekten auch heute noch farblos-transparent. Der Farbeindruck lässt sich auf den sehr hellen Gläsern durchaus bewerten und auch im Vergleich mit unbeschichteten Gläsern abschätzen. Charakteristisch für die Verbundbeschichtung ist eine leicht unregelmäßige Oberfläche, wobei sich das Profil des zumeist stark korrodierten Untergrundes abzeichnet. Bedingt durch den Schichtaufbau fiel die Stärke des abschließenden Decklackes unterschiedlich aus (Abbildung 8). In besonders dicken Bereichen wirkt er heute noch stark glänzend und die Beschichtung sehr transparent. Generell erscheinen beschichtete Oberflächen etwas farbintensiver mit mehr Tiefenlicht (Nasseffekt) als unbeschichtetes Glas (siehe z.B.

Abbildung 45, Abbildung 47 im Kapitel 3.4 Prüfung der Reversibilität).

Die früheren Evaluierungen zeigen, dass mögliche Veränderungen der Beschichtung vor allem die (Neu)Bildung von kleinen Blasen im Lacksystem umfassen, sowie oberflächliche Vergrauungen/raue Bereiche oder „Grauschleier“. Diese können verschiedene Ursachen haben:

- ungenügend eingebettete Glasflakes bzw. Veränderungen an unmittelbar über einander liegenden Glasflakes
- Bereiche mit sehr dünnem Decklack aus Paraloid™ B72
- Oberflächliche Verschmutzungen, Auflagerungen
- lokale Haftungsverluste zwischen den Schichtaufträgen.

Da die optischen Erscheinungen jeweils sehr ähnlich sind, ist es schwierig, die Ursache(n) exakt zu benennen. Blasen im Lacksystem lassen sich, ähnlich wie in Versuchen Anfang der 1990er Jahre, durch Betupfen oder Auftropfen mit z.B. Methylglykolan (MEK) oder Butoxyethanol (BE) niederlegen bzw. entfernen. Zudem erscheint die Oberfläche der Beschichtung in Bereichen mit „Grauschleier“ nach der Einwirkung von Lösungsmittel wieder glänzend (siehe auch Kapitel 3.4 Prüfung der Reversibilität).

Bereits früher wurden vereinzelt Risse der Beschichtung im Übergang zum Blei beschrieben, was auf die mechanische Beanspruchung dieser grundsätzlich beweglichen Zone zurückzuführen ist. Dieses Phänomen beschränkt sich auf Objekte mit großflächiger Beschichtung über Glas und Blei hinweg. Die Risse führten allerdings nicht zu einer weiteren Ablösung der Beschichtung. Dies ist auch heute noch für alle untersuchten Objekte der Fall. Auch die Kombination von Glas-ORMOCER® mit alten Sprungklebungen oder mit dem Kitt der Verbleiung ist im Allgemeinen unkritisch; in einzelnen wenigen Bereichen sind Veränderungen auffällig (siehe Kapitel 3.1.2 Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln).

Falls sich die Korrosionsprozesse in den teils kompakten Korrosionskrusten unter der Beschichtung fortgesetzt haben sollten, so ist dies bislang visuell nicht erkennbar. Es gibt keine aufgebrochenen Krater, abgefallene Krusten oder ähnliches.

3.1.1 Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Herrgottskirche in Creglingen

Für die Herrgottskirche in Creglingen erfolgte die Bewertung ORMOCER®-Verbundbeschichtung von 1988 ausschließlich in situ vom Hubsteiger aus auf der Außenseite des kleinen mittelalterlichen Vierpasses im Rundfenster der Westfassade. Die beschichtete Innenseite war nicht zugänglich. Von früheren Untersuchungen lagen eine schriftliche Bewertung sowie eine Kartierung vor - vor allem hinsichtlich der Blasenbildung (Abbildung 6). Es scheint heute, als hätten sich weitere kleine Blasen in der Beschichtung gebildet, die als punktuelle Trübung auffallen und sich nicht nur auf die Randbereiche zum Blei oder Staukanten des Wassers beschränken. Eine Ablösung ist nirgends zu beobachten, auch nicht entlang kleiner Risse im Übergang zum Blei. Die Entnahme von Probenmaterial für spektroskopische Untersuchungen gestaltete sich aufgrund der guten Anbindung schwierig. Wie zuvor bereits beschrieben, zeigt die beschichtete Oberfläche mit dickem Decklackauftrag stark glänzende Bereiche; Zonen mit dünnem Decklack wirken matter. **Trotz der im Auflicht visuell erkennbaren Veränderungen haftet die außenseitige Beschichtung, die seit 1988 der Witterung ungeschützt ausgesetzt ist, nach wie vor sehr gut und zeigt keine Ablösungen.**

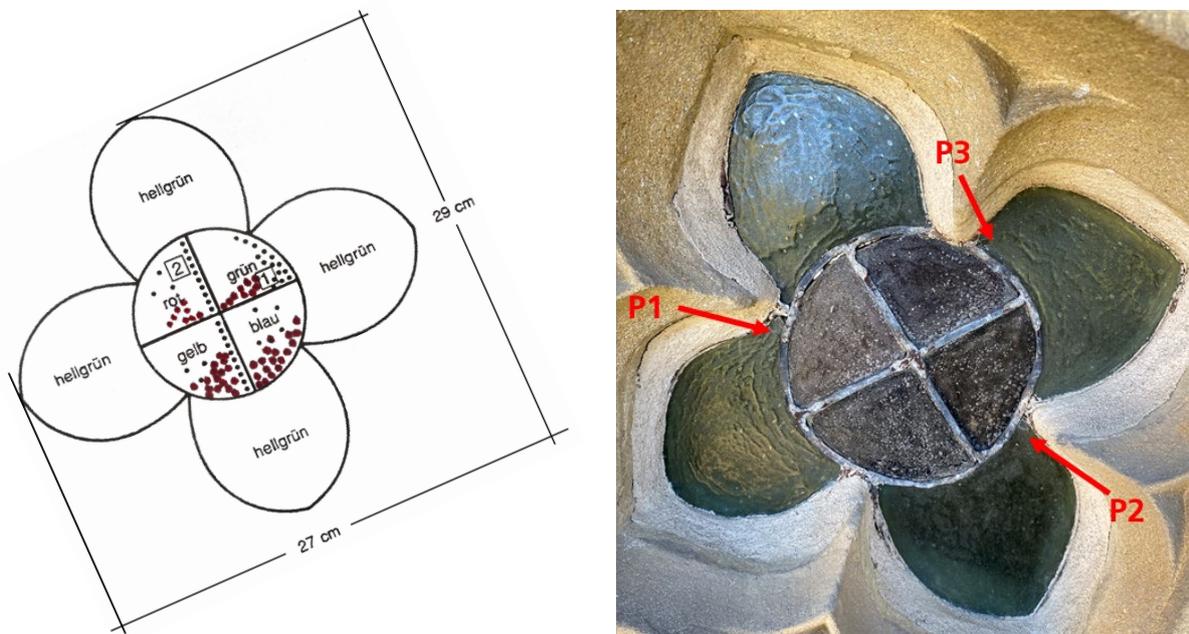


Abbildung 6: links: schwarz-weiß Kartierung von 1992 mit zusätzlichen roten Eintragungen aus 2010 (punktuelle Trübung); rechts: Übersichtsaufnahme aus 2021 - gut erkennbar sind die hellgrauen, punktuellen Trübungen und auch die glänzenden Pinselspuren des Auftrages, rote Pfeile deuten auf Bereiche für Probenahmen für analytische Untersuchungen.

3.1.2 Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Hohe Domkirche Sankt Petrus zu Köln

Die vollflächigen Glas-ORMOCER®-Verbundbeschichtungen von 1988 an vier Feldern des Kölner Domes sind im Rahmen der Evaluierung die größten beschichteten Flächen. Wie in Kapitel 2.3.1 beschrieben, wurden zusätzlich an zwei der vier Felder auch die (unbemalten) Innenseiten beschichtet. Die Scheiben wurden durch die Dombauhütte bereits mehrfach dokumentiert. Der Vergleich mit diesen umfangreichen Evaluierungen erleichterte die visuelle Bewertung im Rahmen des vorliegenden DBU-Projektes erheblich.

Insgesamt befinden sich die Beschichtungen der vier Felder – auf zwei Innenseiten und vier Außenseiten – in einem guten Gesamtzustand und weisen das typische Erscheinungsbild auf (siehe Kapitel 3.1). Durch die inzwischen fortgeschrittene Alterung und somit Verstärkung bereits früher beobachteter Phänomene wie Blasen¹⁶ und Vergrauungen, lässt sich nun deutlicher eine Tendenz im Erhaltungszustand ablesen – vor allem für die Verbundbeschichtung der vier Außenseiten. Feld 4bl und 4br waren als Paar anderen Bedingungen ausgesetzt als das Paar Feld 4dl und 4dr. Was die außenseitige Beschichtung betrifft, so ist der Erhaltungszustand der beiden Felder von Bahn d (4dl und 4dr) vergleichbar, wohingegen er in den Feldern der Bahn b erstaunlich differiert: Feld 4bl zeigte den schlechtesten Erhaltungszustand (Abbildung 7) und Feld 4br den besten aller vier Felder. Man kann mutmaßen, dass nicht nur die Beschaffenheit des Untergrundes und die Umgebungsbedingungen, sondern wohl auch die Auftragsbedingungen bei der Beschichtung dafür verantwortlich sind. Die innenseitigen Beschichtungen der Felder 4br und 4dl sind ungeachtet ihrer zeitweise unterschiedlichen Exposition vergleichbar.

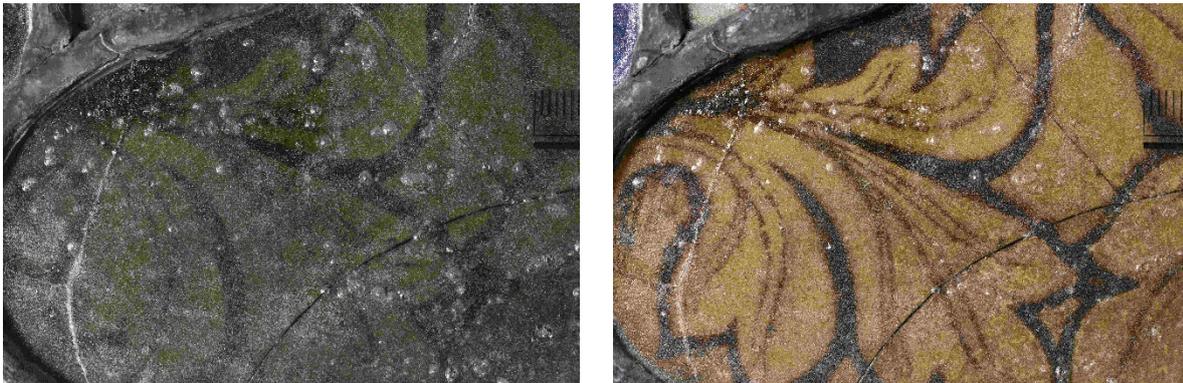


Abbildung 7: Detailaufnahmen der außenseitigen ORMOCER®-Verbundbeschichtung auf Feld 4bl im Auflicht (links) und Durchlicht (rechts); die Beschichtung wirkt in diesem Bereich matt und zeigt auffallend viele kleine Blasen, eine Ablösung ist nicht erkennbar; 4bl weist den schlechtesten Erhaltungszustand aller vier Felder auf.

Die aktuellen Beobachtungen wurden erneut kartiert und sind im Anhang wiedergegeben (Anhang A7-A9, A18-A19): In einzelnen, sehr kleinen Bereichen löst sich die Beschichtung vom Glas bzw. lösen sich Auftragsschichten voneinander – zumeist unmittelbar und begrenzt entlang von Rissen im Übergang zum Blei und entlang von geklebten Sprüngen. Die bereits mehrfach fotografisch dokumentierten Referenzbereiche haben sich seit der letzten Untersuchung 2014 nicht verändert. Bis dahin waren seit der ersten Begutachtung von 1992 ohnehin nur minimale Veränderungen feststellbar (Anhang A21 bis A25). **Für die Glas-ORMOCER®-Verbundbeschichtung am Kölner Dom sind lokal sehr kleine Veränderungen sichtbar, wobei die Haftung nach wie vor gut und die Beschichtung fast überall intakt ist.**

¹⁶ Schon früh wurde übrigens beobachtet, dass sich an den beiden Feldern der Bahn b durch die zeitweise Exposition an der Südseite (Sonnenlicht, Wärme) von Anfang an mehr Blasen entwickelten und auch eine stärkere Vergrauung eintrat.

3.1.3 Visuelle Bewertung der Verbundbeschichtung – Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt

Die ORMOCER®-Verbundbeschichtung wurde innenseitig und außenseitig an Segmenten eines mittelalterlichen Glasmalereifeldes aufgetragen (Feld 6c des Fensters nord II); als Variante auch nur der Grundlack ohne Gasflakes und Decklackschicht. Sowohl makroskopisch als auch mikroskopisch zeigte die Beschichtung auf der Innen- wie auch der Außenseite ein intaktes Erscheinungsbild mit überwiegend leichtem Oberflächenglanz (Abbildung 8) und nur lokal minimal grauer/rauer Oberfläche im Randbereich zum Blei. Zonen mit dickem Decklack glänzen auch hier noch stark. Die transparenzmindernden Korrosionsschichten scheinen unverändert, und die Beschichtung zeigt keine Ablösung oder Risse.

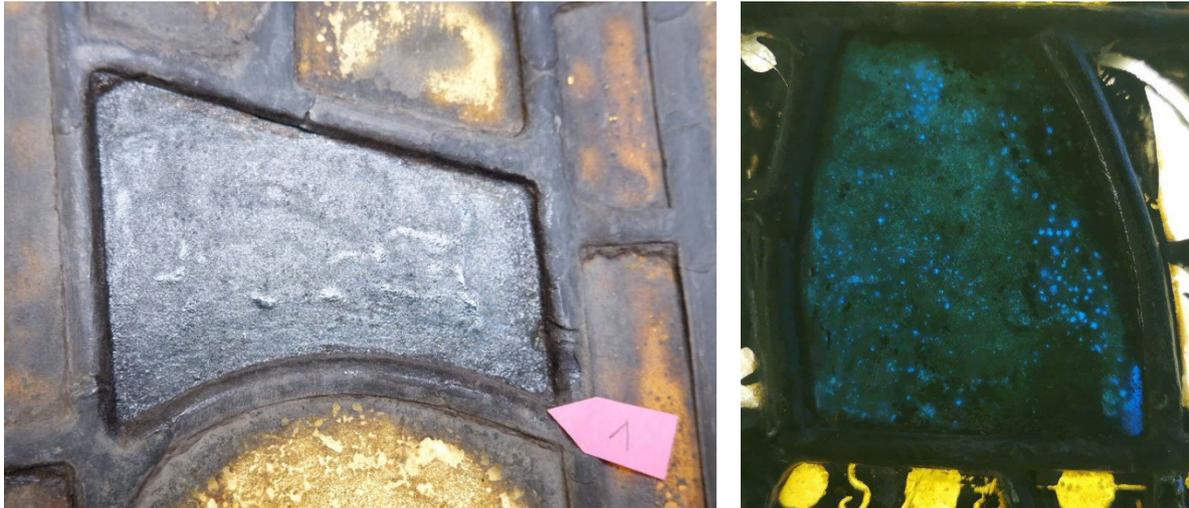


Abbildung 8: links: Intakte, glänzende Verbundbeschichtung auf der Außenseite von Segment 5 des Glasmalereifeldes 6c von Fenster nord II (Erfurt III); es zeichnen sich sowohl die Topografie der Korrosionsschichten ab, als auch der Pinselduktus des Beschichtungsauftrages. Rechts: Innenseite des beschichtetes Segmentes 4 mit Wettersteinkruste im Durchlicht, die Korrosionskruste verändert die Transparenz und Farbigkeit des eigentlich blauen Glases deutlich; die Beschichtung ist im Durchlicht nicht erkennbar.

Der Erhaltungszustand der Verbundbeschichtung auf dem kleinen, leicht handhabbaren „Testfeld Erfurt I“ ist aufgrund der häufig wechselnden Exposition nur bedingt aussagekräftig und wurde deshalb nicht eingehend untersucht. Es hatte sich beispielsweise lokal Schimmel gebildet (Abbildung 9), der auf den historischen Verglasungen in situ nicht zu beobachten ist.



Abbildung 9: Übersichtsaufnahme der Innenseite von „Testfeld Erfurt I“. Innerhalb der roten Markierung auf Segment 1.9 befindet sich augenscheinlich Schimmel – erkennbar auf der Abbildung als dunkle Flecken. Alle Gläser sind vollflächig mit der Verbundbeschichtung beschichtet. Segment 1.12 – oben links – mit (früheren) Testflächen zur Reversibilität.

3.2 Visuelle Bewertung der Beschichtung zur flächigen Malschichtsicherung an den Crodel-Fenstern der Hohen Domkirche St. Marien zu Erfurt

Im Rahmen des aktuellen Projektes wurden im Erfurter Dom drei der fünf ORMOCER®-beschichteten Fenster von Charles Crodel (süd X, südwest II, nord XIX) untersucht. Die nur innenseitig aufgetragene Beschichtung konnte vom Hubsteiger aus inspiziert werden. Aus jedem Fenster wurden jeweils zwei Felder ausgebaut und in der Werkstatt untersucht, exemplarisch ausgewählt hinsichtlich ihrer Exposition in Höhe und Himmelsrichtung. Damit sind die Auswirkungen unterschiedlicher Witterungseinflüsse (z.B. Sonneneinstrahlung, Temperatur, Feuchte) berücksichtigt.

Die Oberflächen der ausgebauten Felder (nord XIX: 4b, 9c; Südwest II: 2c, 6c und süd X: 2c, 8e) waren alle gleichermaßen leicht mit einer nur lose aufliegenden Staubschicht bedeckt, die sich problemlos mit einem weichen Pinsel entfernen ließ. Das Glas-ORMOCER® liegt als sehr dünner Film auf den glatten modernen Gläsern und ist, auch mikroskopisch, kaum wahrnehmbar. **Blasen, Trübungen oder Vergrauungen gibt es nicht. Die gesamte Oberfläche erscheint – nur im Streiflicht erkennbar – einheitlich mattglänzend. Im Durchlicht gibt es keinerlei Transparenzminderung** (Abbildung 10, links). Dort, wo die Bemalung mit Glas-ORMOCER® vorgefestigt wurde, sind Übergänge (Beschichtungsstufen) des lokal mehrfachen Auftrages erkennbar (Abbildung 10, rechts). Diese Beobachtungen den einzelnen Feldern gelten übertragen auch für alle drei inspizierten Crodel-Fenster.



Abbildung 10: Links: Malschichtsicherung an Fenster süd X, Feld 8e – Streiflicht mit mattem Glanz und auftragsbedingter, feiner Streifigkeit. Rechts: Malschichtsicherung an Fenster süd X, Feld 2c, sichtbar ist zusätzlich die Beschichtungskante (Pfeil) im Übergangsbereich der mehrfachen Malschichtsicherung.

Ältere Referenzaufnahmen zu den Fensterbeschichtungen gibt es nicht. Vom Testfeld „Crodel II“ hingegen liegen Detailaufnahmen von Referenzbereichen vor. Sie belegen, dass sich bis heute keine visuell erkennbaren Veränderungen entwickelt haben (Fotoserie im Anhang A56). Die Aufbewahrungsbedingungen des Testfeldes unterscheiden sich allerdings so beträchtlich von denen der Fenster, dass sich die Untersuchungsergebnisse nur sehr eingeschränkt aufeinander beziehen lassen.

3.3 Schwingungsspektroskopische Untersuchungen an Proben der ORMOCER®-Verbundbeschichtung und der Malsichtsicherung

Für die analytischen Untersuchungen im Labor mussten Beschichtungsproben entnommen werden. Die mechanische Abnahme mit dem Skalpell zeigte, dass die Beschichtung in allen Fällen sehr gut auf der Glasoberfläche haftete. Das ORMOCER®-G der Verbundbeschichtung erwies sich dabei als nicht spröde, und das Probenmaterial rollte sich nach der Abnahme teilweise zusammen (Abbildung 11). In der Regel setzten sich die Proben aus dem Beschichtungsmaterial (ORMOCER®-Grundlack und Paraloid™ B72-Decklack) und Schmutzpartikeln mit Auflagerungen zusammen, was die Analyse bzw. Spektreninterpretation erschwerte. Die Beprobung der Malsichtsicherung an den Crodel-Scheiben war aufgrund des sehr dünnen Beschichtungsauftrages besonders schwierig. Deshalb setzten sich sogenannte „Mischproben“ aus mehreren oder etwas großflächigeren Probennahmebereichen zusammen; zudem finden sich mehr Fremdpartikel an den Beschichtungsproben.

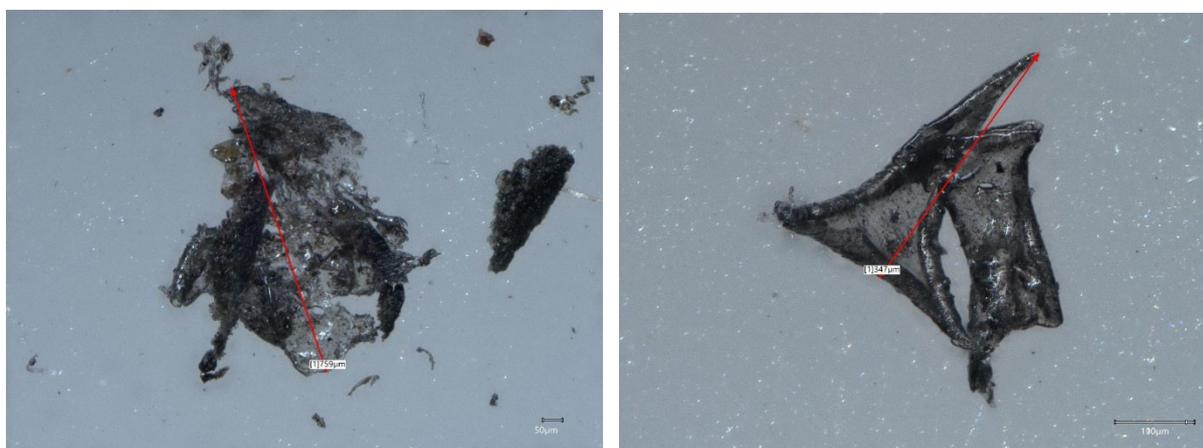


Abbildung 11: Beispiele für Probensplitter der Verbundbeschichtung, die spektroskopisch untersucht wurden; angegebene Dimensionen von 759 µm (links) und 347 µm (rechts).

3.3.1 Spektroskopische Untersuchungen - Herrgottskirche Creglingen

Im Rahmen der erneuten Evaluierung wurden 2021 drei Proben der außenseitigen Verbundbeschichtung von unterschiedlichen Stellen entnommen (P1, P2 und P3, siehe Abbildung 12) und deren Zustand mittels Mikro-FTIR-Spektroskopie und Mikro-Raman-Spektroskopie untersucht.

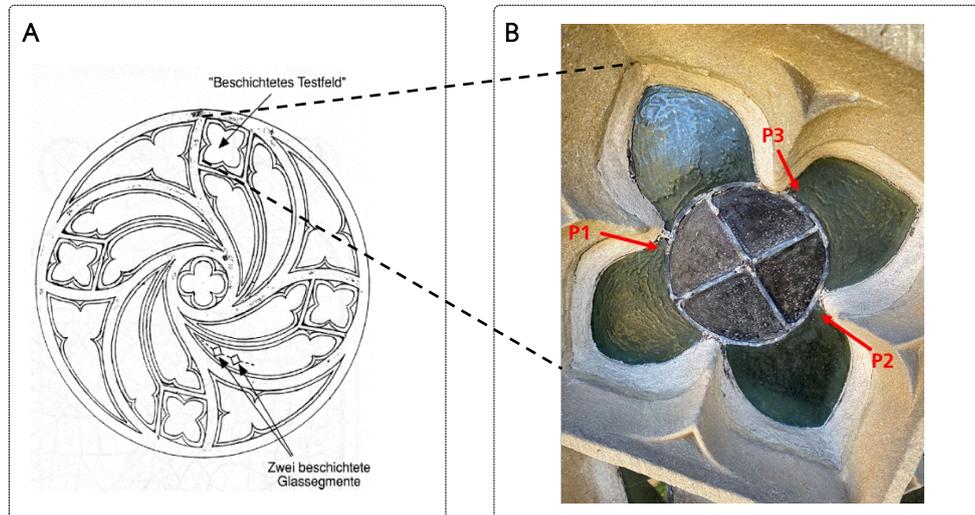


Abbildung 12: A: Skizze des Glasfensters; B: Foto (2021) des beschichteten Fenstersegments. Die Stellen der Probennahme auf der Außenseite wurden markiert (P1, P2, P3).

Die IR-spektroskopischen Untersuchungen der Proben P1 und P3 zeigten im Vergleich zu einer im Jahr 2015 synthetisierten Referenz (FK476) keine detektierbaren Veränderungen in Form neuer Banden oder der Verschiebung von Banden (engl. *Peakshifts*) (Abbildung 13).

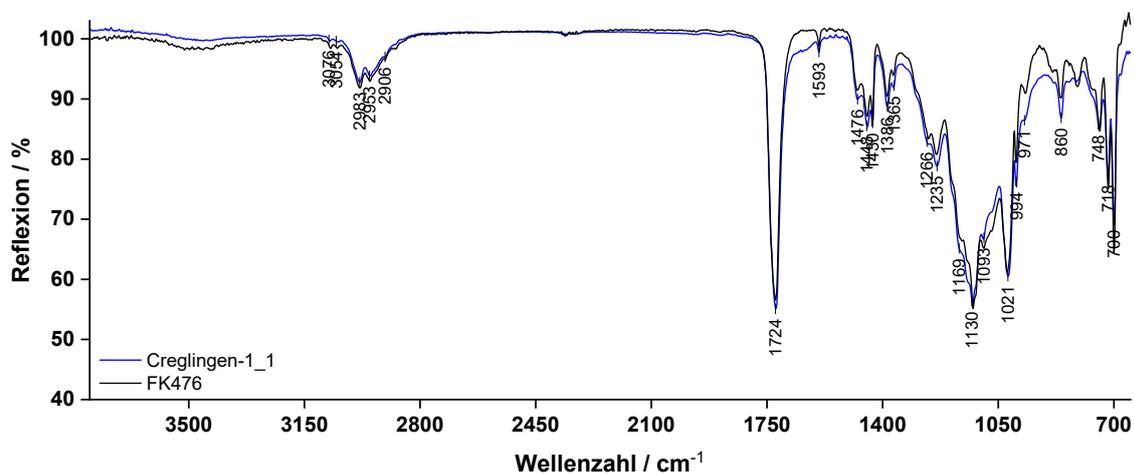


Abbildung 13: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet - 6700-Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe P1. Die Banden der untersuchten Probe (P1) und der Referenz (FK476) sind nahezu deckungsgleich.

Die untersuchte Probe P2 zeigte eine geringere Übereinstimmung zur Referenz. Allerdings stellte sich hierbei die Qualität des Spektrums insgesamt als schlechter dar, sodass eine konkrete Aussage zum Zustand der Probe P2 allein aus dem IR-Spektrum nur schwer zu treffen ist. Neben den Messungen der Proben mittels FTIR-Spektroskopie erfolgte zusätzlich eine Mikro-Raman-Analyse. Dabei konnte eine sehr gute Übereinstimmung des Referenzspektrums und P2 festgestellt werden.

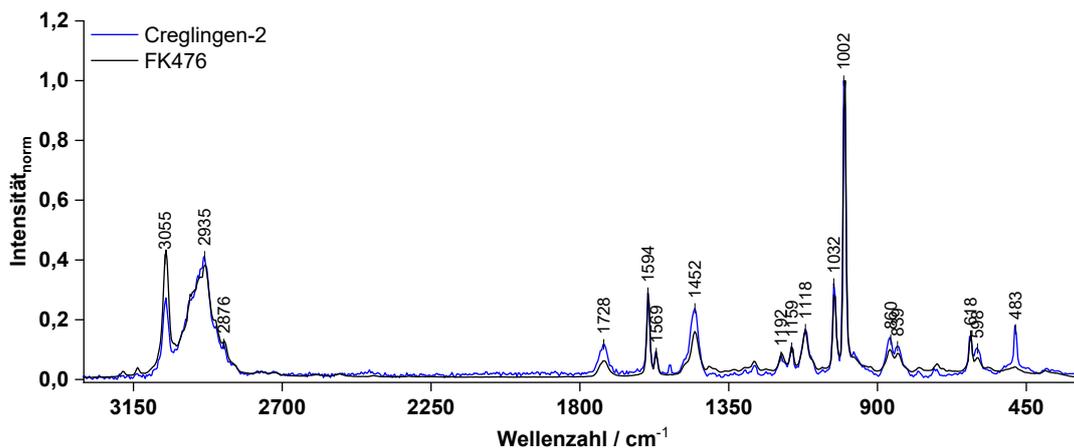


Abbildung 14: Raman-Spektrum (aufgenommen mit: WITec Alpha 300; Laser: 532 nm) der Probe P2. Die Banden der untersuchten Probe (P2) und der Referenz (FK476) sind nahezu deckungsgleich.

Die Raman-Untersuchungen der Proben P1 und P3 zeigten einen deutlich höheren PB72-Anteil. Die ursprüngliche Beschichtung erfolgte als 3-lagige Verbundbeschichtung mit einer PB72-Deckschicht. Aufgrund der Probenbeschaffenheit ist es nicht möglich, die exakt selbe Stelle mit beiden Messverfahren zu untersuchen. Gleichzeitig unterscheiden sich beide Verfahren hinsichtlich der Messtiefe. Es ist davon auszugehen, dass für die Proben P1 und P3 ein erheblicher Anteil an Deckschicht gemessen wurde. Dennoch konnten alle wichtigen ORMOCER®-G-Banden dargestellt werden (siehe Abbildung 15 und

Tabelle 8).

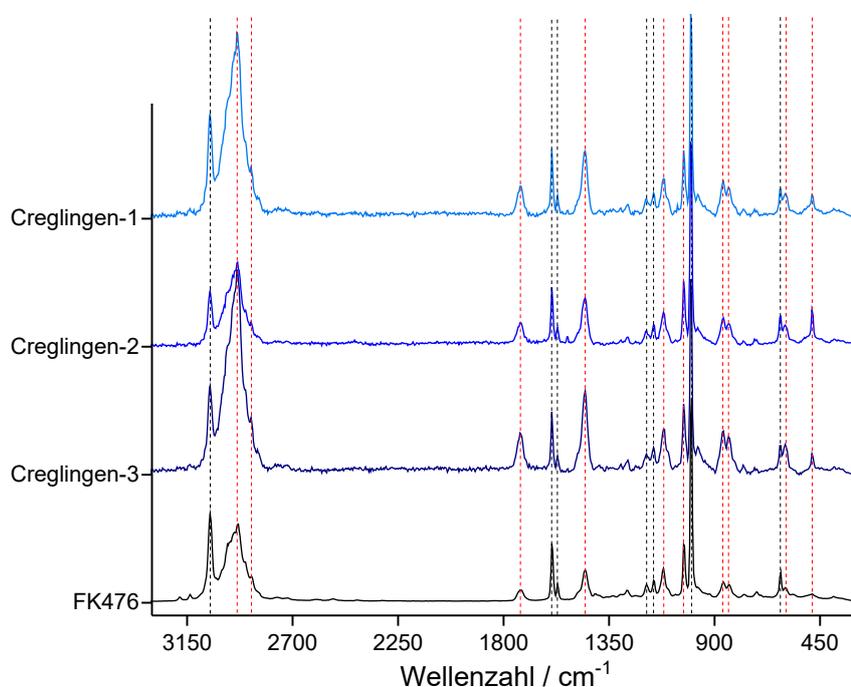


Abbildung 15: Vergleich der untersuchten Proben P1, P2 und P3. Die rot-gestrichelten Linien sind die Banden, die primär dem PB72 zugeordnet werden können. Die Intensivierung einiger Banden (u.a. bei 2935 cm^{-1}), lassen die Vermutung zu, dass für die Proben P1 und P3 in der Raman-Spektroskopie ein großer Anteil an Deckschicht gemessen wurde.

Es zeigten sich auch hier weder Bandenverschiebungen noch neue Banden, was für eine sehr gute Integrität des Materials spricht.

Tabelle 8: Gefundene Banden der Mikro-Raman-Untersuchung der Proben P1-3 im Vergleich mit der Referenz FK476 und einer Paraloid™B72-Probe aus dem Jahr 1997. Die fett-markierten Zahlen zeigten sich als besonders intensiv (i) und/oder konnten eindeutig einem erhöhten PB72-Anteil zugeordnet werden.

P1 [cm⁻¹]	P2 [cm⁻¹]	P3 [cm⁻¹]	FK476 [cm⁻¹]	PB72 [cm⁻¹]
3052	3052	3052	3052	
2938 i	2935	2938 i	2938	2935
2877	2879	2877	2877	2877
1727 i	1732	1730 i	1727	1725
1594	1594	1594	1594	
1570	1571	1571	1570	
1452 i	1452	1452 i	1452	1452
1194	1194	1193	1194	
1160	1160	1162	1160	
1121	1120	1118	1121	1114
1032	1032	1032	1032	1027
1002	1002	1002	1002	
				969
869 i	868	862 i	869	862
840 i	839	837 i	840	839
				777
619	619	622	619	
598 i	602	601 i	598	601
486	490	484		481

Insgesamt kann der Zustand der im Jahr 2021 genommenen Proben als sehr gut evaluiert werden. Die Raman-Spektren unterscheiden sich im relevanten Bandenbereich weder von dem Spektrum, das 2011 aufgenommen wurde, noch von einem frischen Referenzmaterial. Ebenso wenig konnten anhand der IR-Spektren signifikante Veränderungen des Materials festgestellt werden.

3.3.2 Spektroskopische Untersuchungen - Hohe Domkirche St. Petrus zu Köln

Im Rahmen der erneuten Evaluierung der Beschichtung erfolgten schwingungsspektroskopische Untersuchungen den außenseitigen Verbundbeschichtungen von NVI-4dl und NVI-4bl:

A) Feld NVI-4dl



Bereich vor der Probenahme
Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)



Bereich nach der Probenahme
Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)

- Probe
1 K-NVI-4dl-locker
2 K-NVI-4dl-fest

NVI 4dl Außenseite
Foto: Glaswerkstatt (DBH Köln)

Abbildung 16: Untersuchtes Fenster (NVI 4dl), sowie Detailaufnahmen der Probenahmestellen.

Wie in Abbildung 16 dargestellt, erfolgten die Probenahmen an zwei unmittelbar benachbarten Stellen der Glas-ORMOCER®-Beschichtung. Es wurde bewusst ein Bereich ausgewählt, der nicht transparent, sondern trüb erscheint. Eine der beiden oberflächennahen Proben, die mit dem Skalpell abgetragen

wurden, war noch relativ fest in die Beschichtung eingebunden (K-NVI-4dL-fest-Nord); die andere lag locker auf (K-NVI-4dL-locker-Nord).

Für die Probe K-NVI-4dL-fest-Nord konnte mittels FTIR ausschließlich Paraloid™ 72 nachgewiesen werden (siehe Abbildung 17). Es ist daher naheliegend zu vermuten, dass hier lediglich die Deckschicht gemessen wurde.

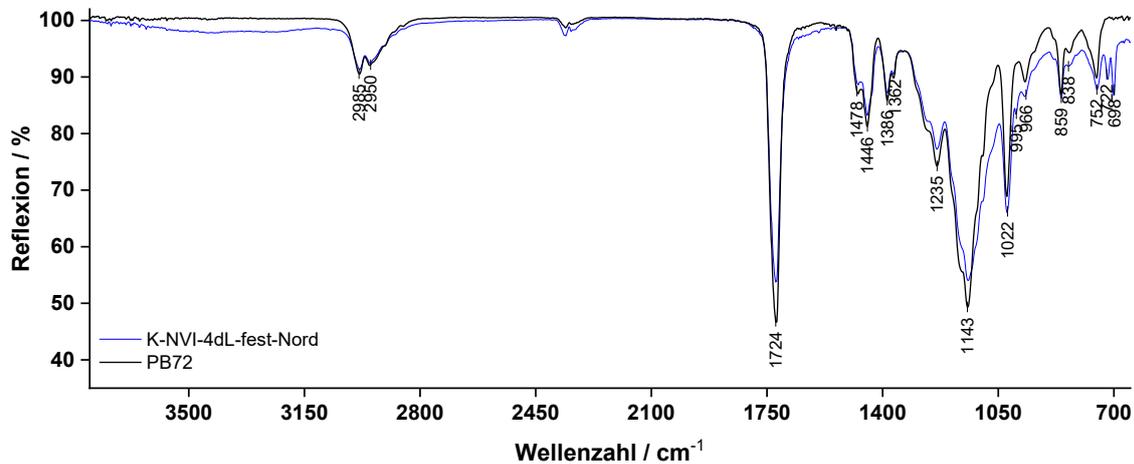


Abbildung 17: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe K-NVI-4dL-fest-Nord im Vergleich zu PB72 (Probenmaterial von 1997), die Spektren sind nahezu deckungsgleich und sprechen für einen sehr hohen PB72-Anteil.

Auch die Raman-Untersuchung ergab, dass ein hoher PB72-Anteil vorliegt, was sich u. a. in einer intensiven Bande (u.a. bei 2938 cm⁻¹) äußert. Dennoch konnten auch ORG-spezifische Banden ausgemacht werden (z.B. bei 1002 cm⁻¹; siehe Abbildung 18).

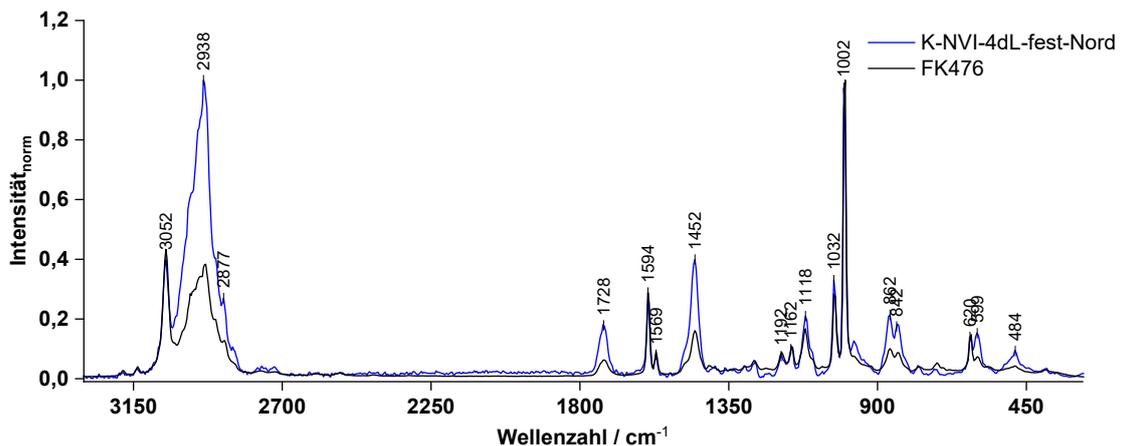


Abbildung 18: Raman-Spektrum (aufgenommen mit: WITec Alpha 300; Laser: 532 nm) der Probe K-NVI-4dL-fest-Nord.

Aufgrund des hohen PB72-Anteils, der darauf zurückzuführen ist, dass primär die Deckschicht abgenommen wurde, lässt sich der Zustand des ORG kaum evaluieren. In den Raman-Spektren (vgl. Abbildung 19 und Tabelle 9) lassen sich dennoch alle ORG-Banden eindeutig zuordnen. Dabei erfolgte – analog zu den Proben aus Creglingen – weder eine Verschiebung der Banden, noch traten zusätzliche Banden auf, was prinzipiell für eine sehr gute Materialintegrität spricht. Das Auftreten der Bande bei

484 cm^{-1} ist ein Hinweis auf die Bildung von Spuren hydratisierten SiO_2 [IVA], was aber keine Bedeutung für die Stabilität der Schicht hat.

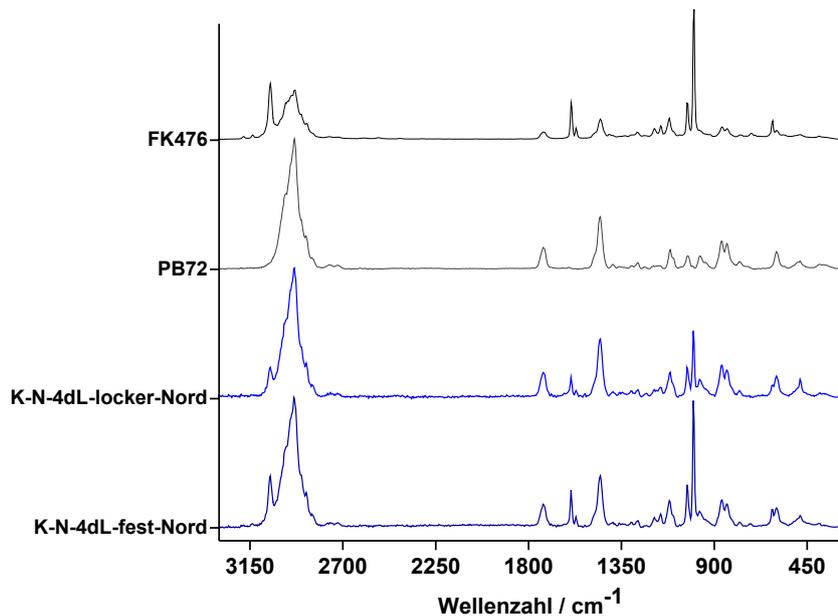


Abbildung 19: Raman-Spektren der Proben K-NVI-4dL locker und fest im Vergleich zur Referenz (FK476) und Paraloid™ B72 (PB72)

Es ist zu erkennen, dass der PB72-Anteil der lockeren Schicht etwas höher ist als der der festen Schicht (hierzu wurde das Verhältnis der aliphatischen C-H-Banden bei 2938 cm^{-1} (ORG + PB72) und den aromatischen C-H-Banden bei 3052 cm^{-1} (ORG) betrachtet).

Tabelle 9: Gefundene Banden der Mikro-Raman-Untersuchung der Proben P1-3 im Vergleich mit der Referenz FK476 und einer Paraloid™ B72-Probe aus dem Jahr 1997. Die fett-markierten Zahlen zeigten sich als besonders intensiv (i) und/oder konnten eindeutig einem erhöhten PB72-Anteil zugeordnet werden.

fest [cm^{-1}]	locker [cm^{-1}]	FK476 [cm^{-1}]	PB72 [cm^{-1}]
3052	3052	3052	
2938 i	2935 i	2938	2935
2877	2877	2877	2877
1728 i	1727 i	1727	1725
1594	1594	1594	
1569	1573	1570	
1452 i	1452 i	1452	1452
1192	1193	1194	
1162	1163	1160	
1118	1114	1121	1114
1032	1032	1032	1027
1002	1002	1002	
	973		969
862	862	869	862
842	840	840	839
			777
620	620	619	
599	599	598	601
484	486		481

Es kann daher vermutet werden, dass in diesem Fall die lockeren Schichten, die nur das visuelle Erscheinungsbild beeinträchtigen, primär abgelöste Deckschichten (d. h. Paraloid™B72) sind.

B) Feld NVI-4bl

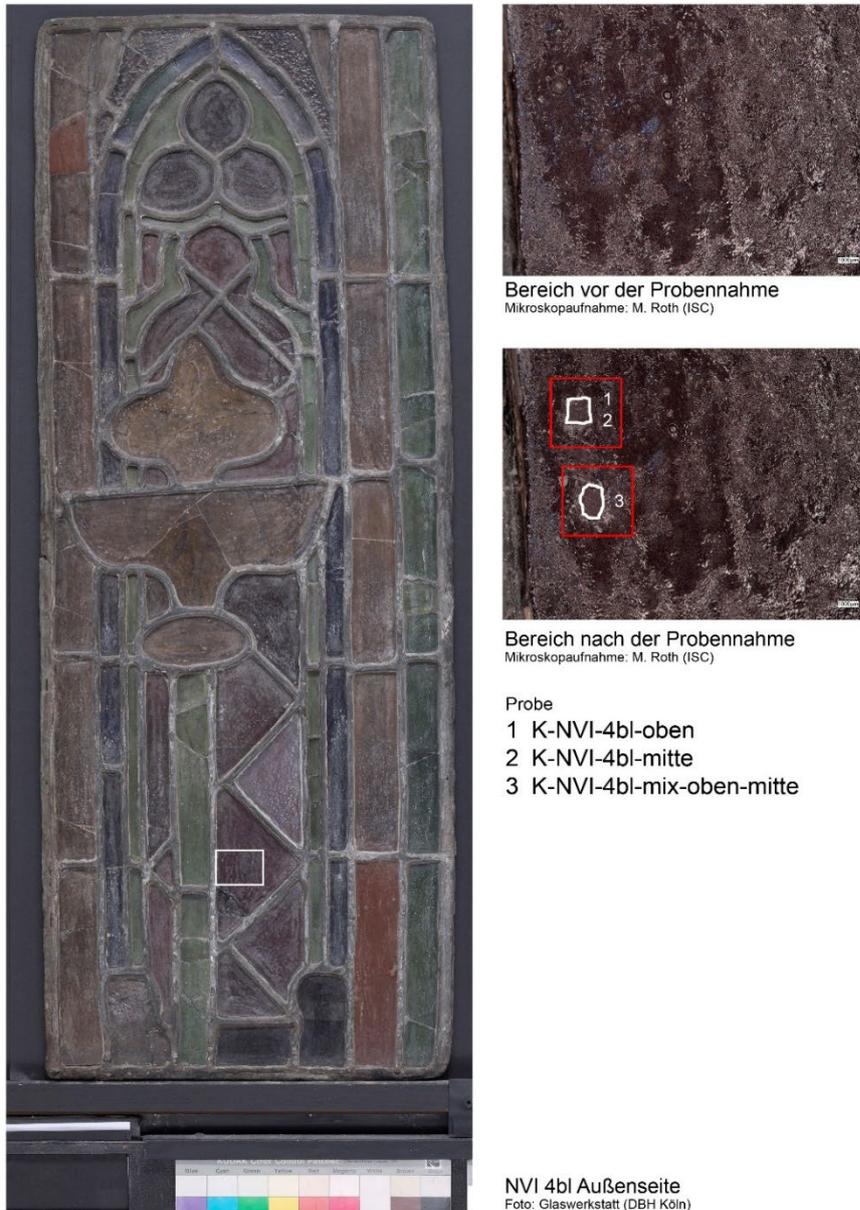


Abbildung 20: Untersuchtetes Fenster (NVI 4bl) und Detailaufnahmen der Probenahmestellen.

Für das Feld K-NVI-4bl (Abbildung 20) wurde versucht, die Proben aus unterschiedlichen Schichttiefen zu entnehmen: von der unmittelbaren Oberfläche einer Blase und anschließend von der darunter befindlichen Zone, sowie eine dickere Probe, die aber nicht bis zum Glas abgetragen wurde. Damit sollte geprüft werden, ob unter der Deckschicht aus PB72 eine intakte ORG-Schicht zu finden ist. Das entsprechende FTIR-Spektrum zeigt weder zusätzliche Banden noch eine Verschiebung der ORMOCER®-G-Banden und ist nahezu deckungsgleich zum Referenzspektrum, sodass auch hier von einem sehr guten Zustand des Materials ausgegangen werden kann (siehe Abbildung 21).

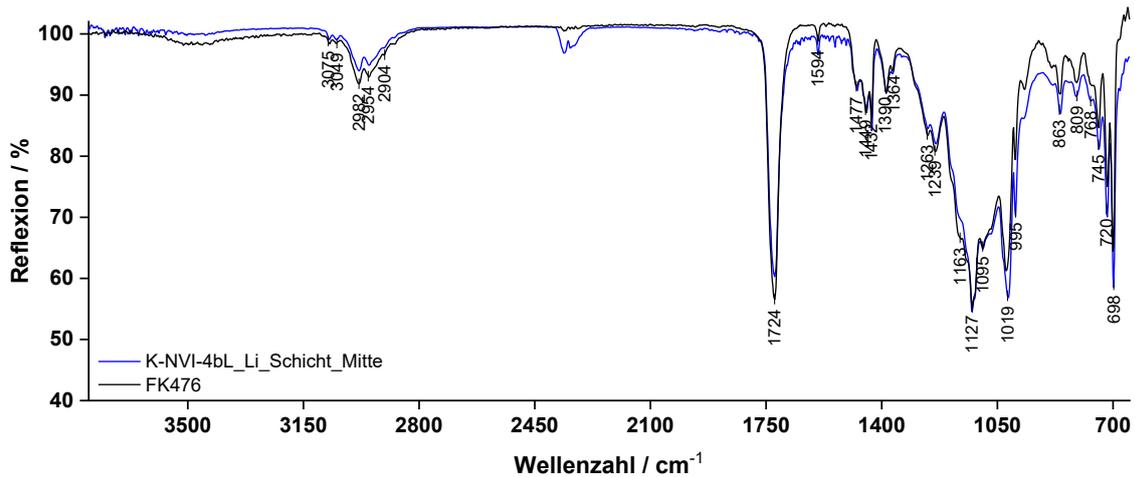


Abbildung 21: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe K-NVI-4bL_Li_Schicht_mitte im Vergleich zur Referenz (FK476). Die Spektren sind nahezu Deckungsgleich.

Die Raman-Spektren geben diese Tendenz ansatzweise wieder: Während für die obere Schicht sowohl via FTIR als auch via Raman-Spektroskopie ein eindeutig sehr hoher PB72-Anteil detektiert werden konnte, wurde für die Schichten „Mitte“ und Mitte-oben“ via Raman-Analyse ein dem IR entgegengesetztes PB72-Verhältnis detektiert (vgl. Abbildung 22).

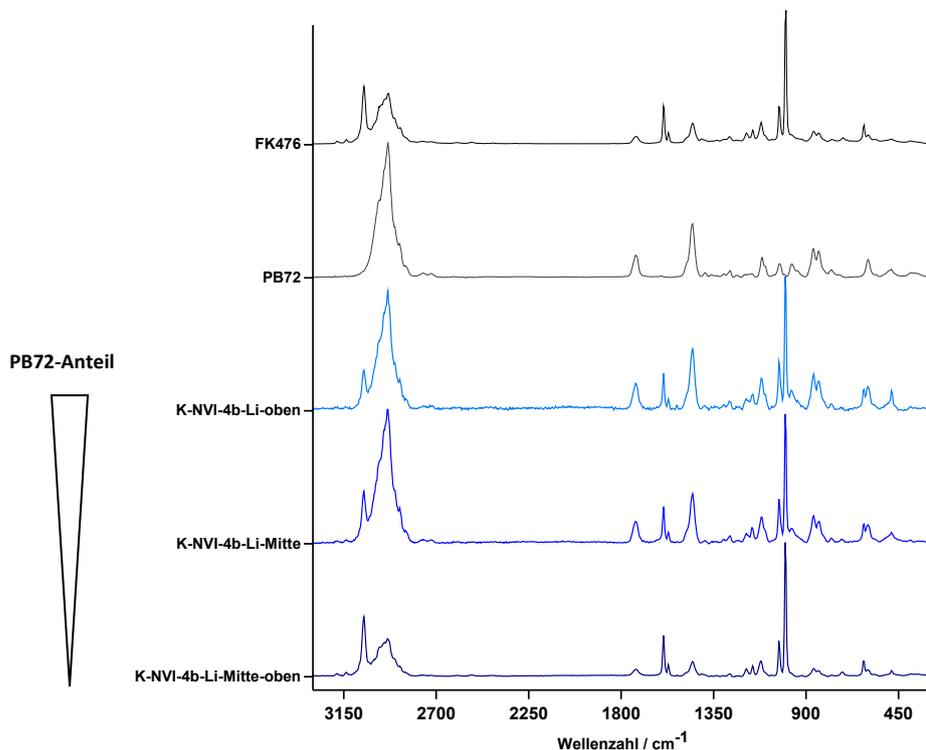


Abbildung 22: Raman-Spektren der verschiedenen Schichten der Proben K-NVI-4bL im Vergleich zur Referenz (FK476) und Paraloid™ B72 (PB72).

Da die Messungen aus technischen Gründen jeweils nicht an der exakt gleichen Stelle der Proben erfolgen kann, ist es denkbar, dass nicht nur an einer anderen Stelle, sondern vor allem auf der gegenüberliegenden Seite der Proben gemessen wurde, dadurch wäre auch die Schichtenreihenfolge

entsprechend vertauscht (vgl. Tabelle 10). Prinzipiell sollte mit zunehmender Schichttiefe, der Anteil an PB72-Banden abnehmen, wie es via FTIR-Spektroskopie auch beobachtet wurde.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass der ORMOCER®-G-Zustand auf beiden Fenstern insgesamt sehr gut ist und das Material keine detektierbaren chemischen Veränderungen aufweist. Es konnten weder (durch z. B. Oxidationsprozesse hervorgerufenen) neue Peaks detektiert werden, noch kam es zu einer Verschiebung der Banden.

Tabelle 10: Zusammenfassung der IR- und Raman-Messungen von NVI-4dL und NVI-4bL.

Bezeichnung	IR-Spektroskopie			Raman-Spektroskopie		
	PB72-Anteil	Zus. Banden	Peakshifts	PB72-Anteil	Zus. Banden	Peakshifts
K-NVI-4dl-fest Nord	+++	-	-	++	0 ¹⁷	-
K-NVI-4dl-locker Nord	n. d.	-	-	+++	-	-
K-NVI-4bl Schicht_mix oben-Mitte	++	-	-	o	-	-
K-NVI-4bl Schicht-Mitte	o	-	-	++	-	-
K-NVI-4bl Schicht-oben	+++	-	-	+++	-	-

Nomenklatur: +++ höchster Anteil, ++ hoher Anteil, + geringer Anteil, O sehr geringer Anteil, - keine, n.d. = nicht bestimmbar.

¹⁷ Wie beschrieben sind diese zusätzlichen Banden auf Spuren von hydratisierten SiO₂ zurückzuführen, was keine Bedeutung für die Stabilität der Schicht hat.

3.3.3 Spektroskopische Untersuchungen - Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt

Im Rahmen der erneuten Evaluation des Zustands der ORMOCER®-Beschichtung erfolgten mehreren Objekten schwingungsspektroskopische Untersuchungen. Zunächst wurde das Testfeld „Erfurt I“ (vgl. Abbildung 23) mit Verbundbeschichtung untersucht.

Testfeld Erfurt I, Segment 1.19

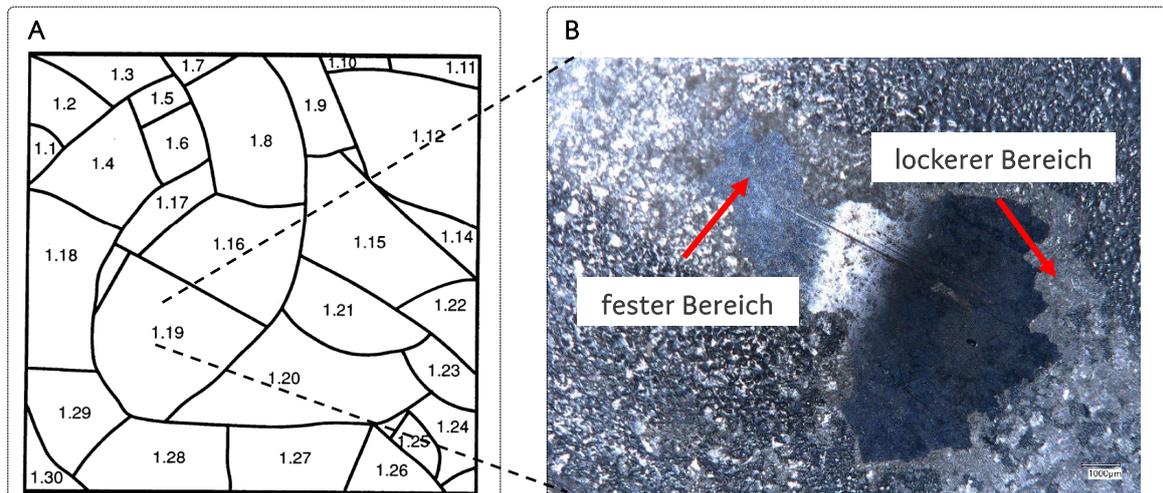


Abbildung 23: A) Skizze des Testfelds „Erfurt I“; B) Detailaufnahme des Probenbereichs im Segment 1.19, von dem die Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich entnommen wurde.

Die FTIR-Analyse der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich zeigt teilweise erhebliche Abweichungen zum Referenzspektrum (FK476). Zwar konnten alle ORG-spezifischen Banden identifiziert werden, allerdings wurden auch zusätzliche Peaks bei 3528 cm^{-1} , 3401 cm^{-1} , 1684 cm^{-1} , 1619 cm^{-1} und bei 669 cm^{-1} detektiert (vgl. Abbildung 24).

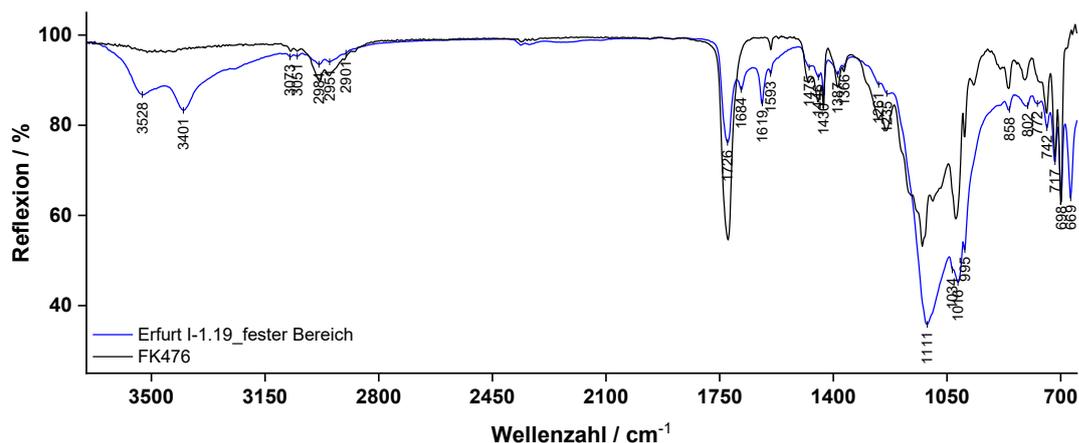
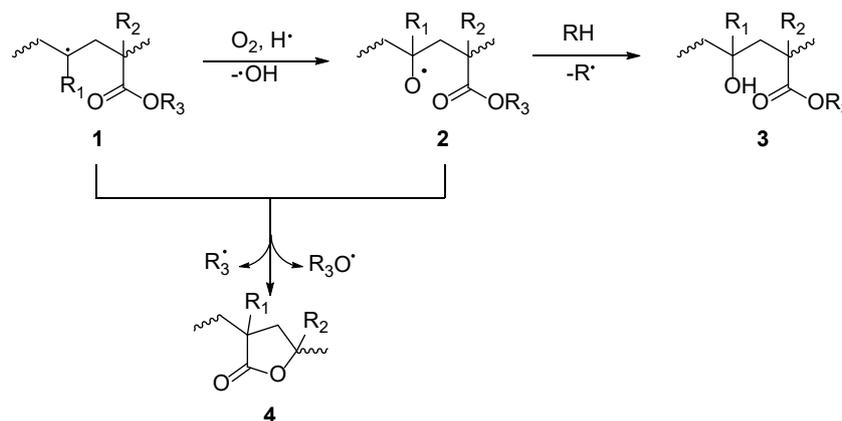


Abbildung 24: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

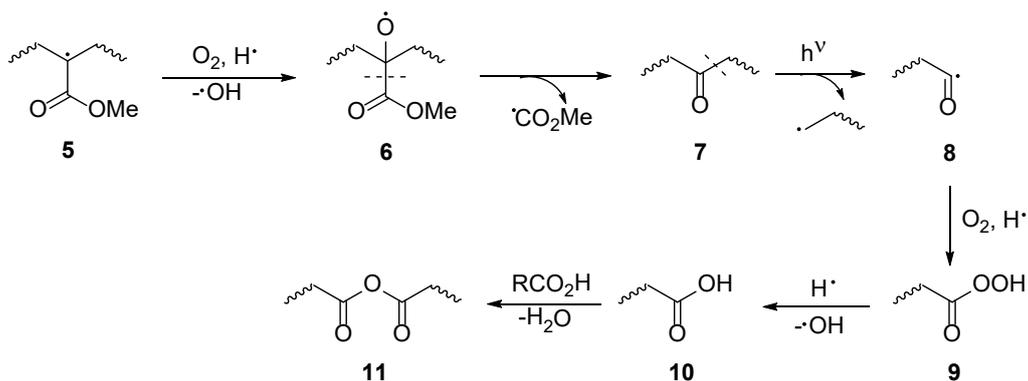
Die zusätzlichen Banden zwischen 3528 und 3401 cm^{-1} könnten auf Amidgruppen deuten (N-H-Streckschwingungen). Dies wird durch die Banden bei 1684 und 1619 cm^{-1} bestätigt, wo typischerweise N-H-Biegeschwingungen liegen. Eine genaue chemische Identifikation einer bestimmten Verbindung war aber nicht möglich. Die chemische Struktur von ORMOCER®-G ist frei von

jeglichen Stickstoffatomen. Die Bildung eines Amids könnte durch eine Reaktion einer Carbonsäure mit einem Amin erklärt werden. Hierzu müsste allerdings eine der funktionellen Gruppen im ORMOCER®-G zu einer Carbonsäure oxidieren. Grundsätzlich kann dieser Vorgang nicht ausgeschlossen werden. Der Ursprung der Aminspezies liegt sehr wahrscheinlich im Vorhandensein von mikrobiellem Befall, wie in Kapitel 3.1.3, Abbildung 9, beschrieben. Im Gegensatz zu den Verbundbeschichtungen auf den Fenstern der drei Pilotstandorte, wurde das Testfeld Erfurt I mehrfach umgehängt, umgelagert, verpackt und transportiert. Es ist anzunehmen, dass darin ein wichtiger Grund für den schlechteren Zustand der Beschichtung liegt.

Dass Paraloid™B72 Photooxidationsreaktionen durchläuft, wurde bereits 2001 beschrieben [CHI 01]. Dabei stellte sich heraus, dass PB72 prinzipiell und vor allem im Vergleich zu PB67 über sehr gute Photostabilitäten verfügt. Dennoch können auch hier oxidative, lichtinduzierte Spaltungsreaktionen beobachtet werden, die im FTIR in charakteristischen Bandenformationen resultieren. Neben γ -Laktonen (**4**) (vgl. Schema 1), Ketonen (**8**) und Anhydriden (**11**) entstehen durch die photooxidative Spaltung auch Carbonsäuren (**10**) (vgl. Schema 2). Letztere führen zu breiten Absorptionszentren bei etwa $3450 - 3250 \text{ cm}^{-1}$, wobei gleichzeitig die C=O-Bande beidseitig verbreitert wird und dabei insgesamt an Intensität verliert [CHI 01]. Diese Beobachtungen sind teilweise auch im FTIR-Spektrum der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich erkennbar (vgl. Abbildung 24).



Schema 1: Photooxidative γ -Lakton **4** Bildung. Mechanismus nach [CHI 01].



Schema 2: Photooxidation von PB72 (**5**) zu Ketonderivaten (**8**), Hydroperoxiden (**9**), Carbonsäuren (**10**) und schließlich Anhydridderivaten (**11**). Mechanismus nach [CHI 01].

Die Intensität der zusätzlichen Banden zwischen 3528 und 3401 cm^{-1} , wie sie im IR-Spektrum der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich (Abbildung 24), erreichen allerdings nahezu die Intensität der C=O-Bande (1724 cm^{-1}) und scheinen zudem für Carbonsäurebanden zu scharf/schmal zu sein, sodass die Bildung

einer Amid-Spezies als wahrscheinlicher erachtet werden kann. Eine solche Amidbindung könnte, wie bereits erörtert, über eine Reaktion zwischen einer Carbonsäure (**10**) und einem Amin (z. B. aus mikrobiellem Befall) entstehen. Es ist anhand der FTIR-Analyse allerdings nicht ersichtlich, ob die beobachtete Degradation lediglich ein Phänomen der reinen Paraloid™ B72-Deckschicht ist oder auch im ORMOCER®-G stattfindet, da dieses zu 50 wt% ebenso aus PB72 besteht. Interessanterweise ergab die IR-Analyse der Probe Erfurt I-1-19_lockerer Bereich, dass diese (anders als für Köln NVI-4dL beobachtet) über einen insgesamt höheren ORMOCER®-G-Anteil verfügt. Auch hier konnten, wenn gleich schwach, neue Banden bei 3398 cm^{-1} und 1621 cm^{-1} detektiert werden (siehe Abbildung 25).

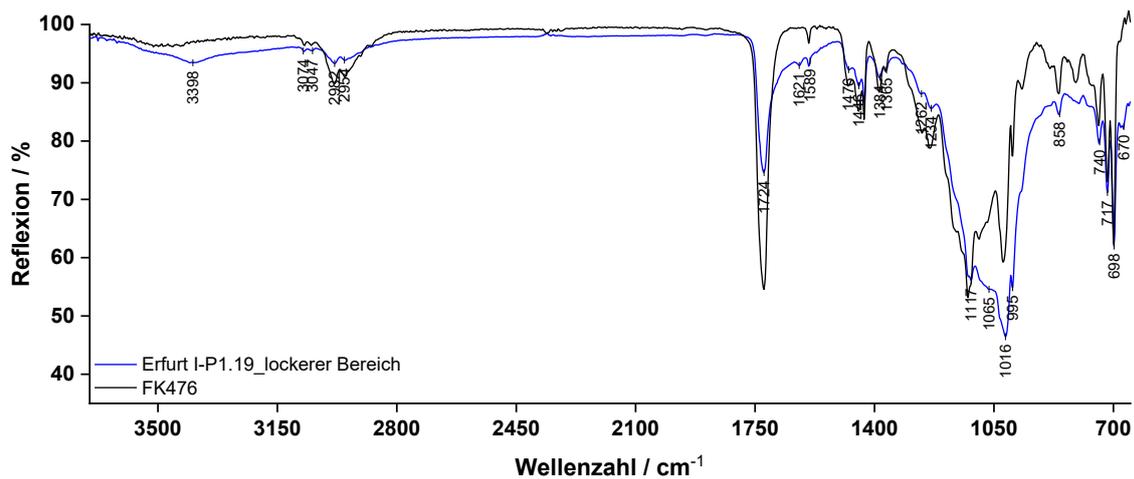


Abbildung 25: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe Erfurt I-1.19_lockerer Bereich (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Sowohl die breite Bande bei 3398 cm^{-1} als auch die Verbreiterung der C=O-Bande (1724 cm^{-1}) könnten auf eine Oxidation der Beschichtung zur Carbonsäure (vgl. Schema 2, Verbindung **10**) hinweisen.

Testfeld Erfurt I, Segment-1.3

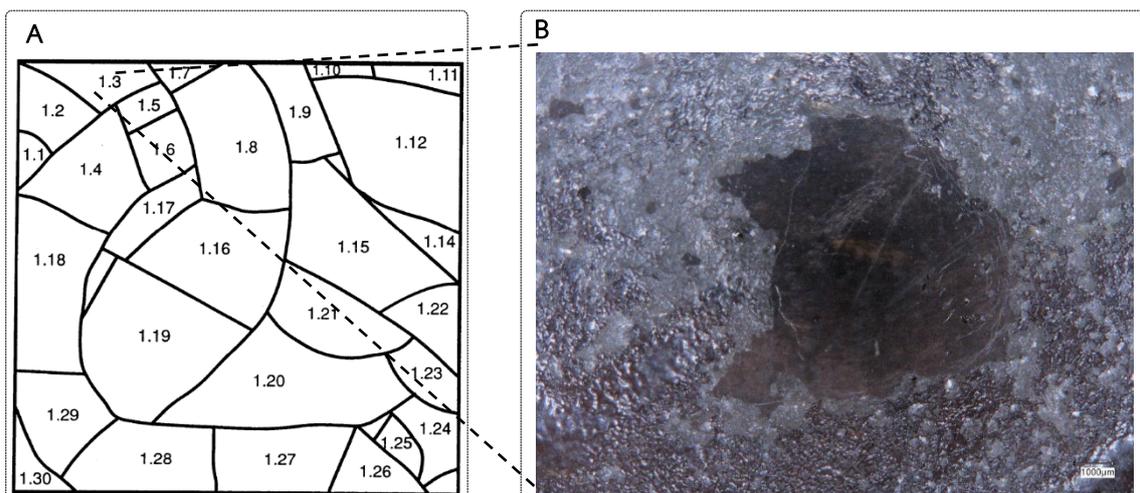


Abbildung 26: **A)** Skizze des Testfelds „Erfurt I“; **B)** Detailaufnahme des Probenbereichs im Segment 1.3 von dem die Probe Erfurt I-1.3 entnommen wurde.

Das FTIR-Spektrum der Probe Erfurt I-1.3 zeigt Ähnlichkeiten zum Spektrum der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich: auch hier konnten zusätzliche Banden bei 3533 cm^{-1} , 3405 cm^{-1} und 1621 cm^{-1} beobachtet werden. Zudem tritt auch hier eine Verbreiterung der C=O-Bande (1724 cm^{-1}) auf (vgl. Abbildung 27).

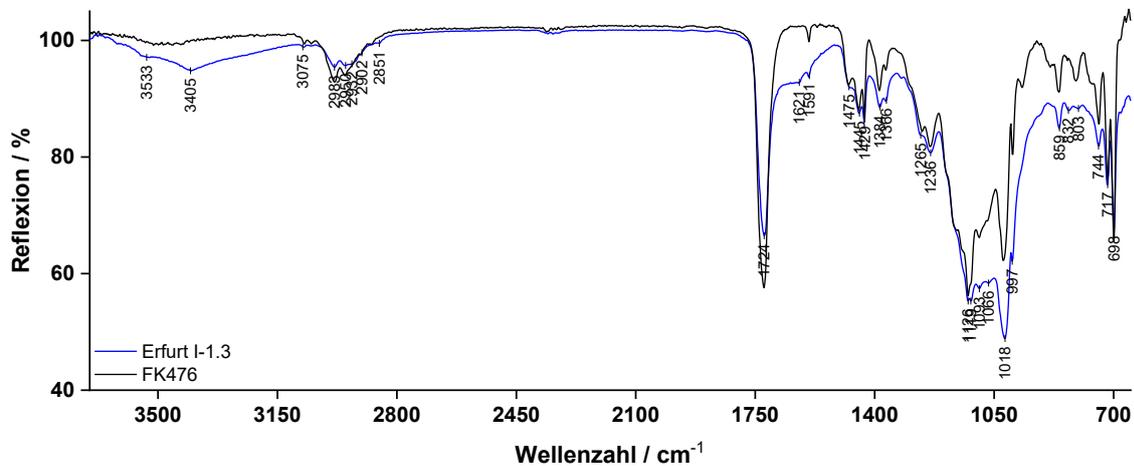


Abbildung 27: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe Erfurt I-1.3 (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

In Abbildung 28 sind die drei Spektren, die von den Proben des Testfeldes Erfurt I entnommen wurden, vergleichend und im Detail dargestellt: Deutlich erkennbar ist, dass die Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich (dunkelblaue durchgezogene Linie) die stärkste Abweichung zur Referenz (gestrichelte Linie) aufweist.

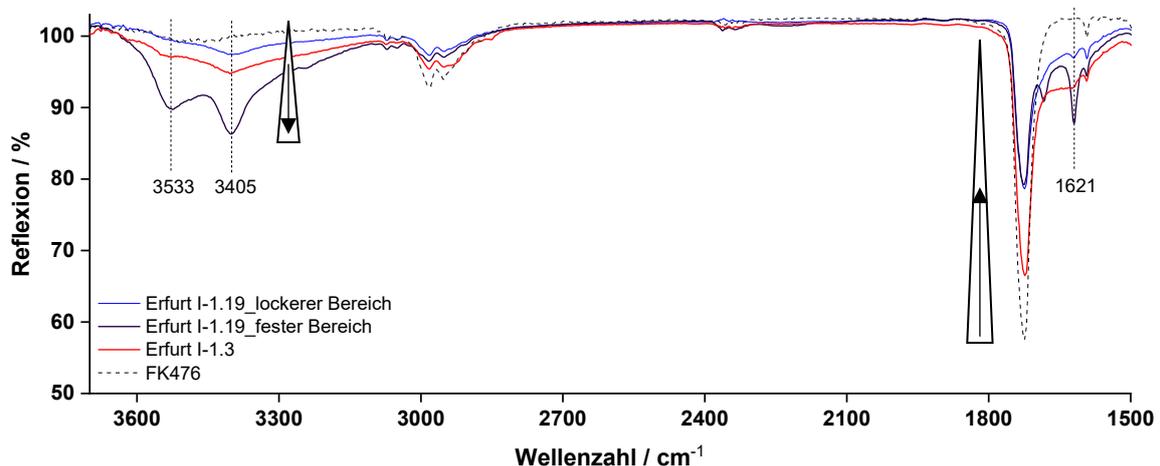


Abbildung 28: Vergleich der Spektren zu 1.19_fester Bereich (dunkelblaue Linie), 1.19_lockerer Bereich (blaue Linie), 1.3 (rote Linie) und der Referenz FK476 (gestrichelte Linie). Die größten Abweichungen zur Referenz weist die Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich auf.

Die FTIR-Analyse der Beschichtungen des Testfeldes Erfurt I deuten darauf hin, dass durchaus Oxidationsprozesse stattgefunden haben. Es ist allerdings nicht ersichtlich, ob diese chemischen Veränderungen lediglich in der Paraloid™ B72-Deckschicht auftreten, die Glas-ORMOCER-Beschichtung an sich, oder beide Systeme betreffen.

Da im Ramanspektrum keinerlei zusätzliche Banden aufgetreten sind, müssen die Oxidationsprodukte Raman-inaktiv sein. Es konnten ebenso keine signifikanten Bandenverschiebungen beobachtet werden (vgl. hierzu exemplarisch Abbildung 29).

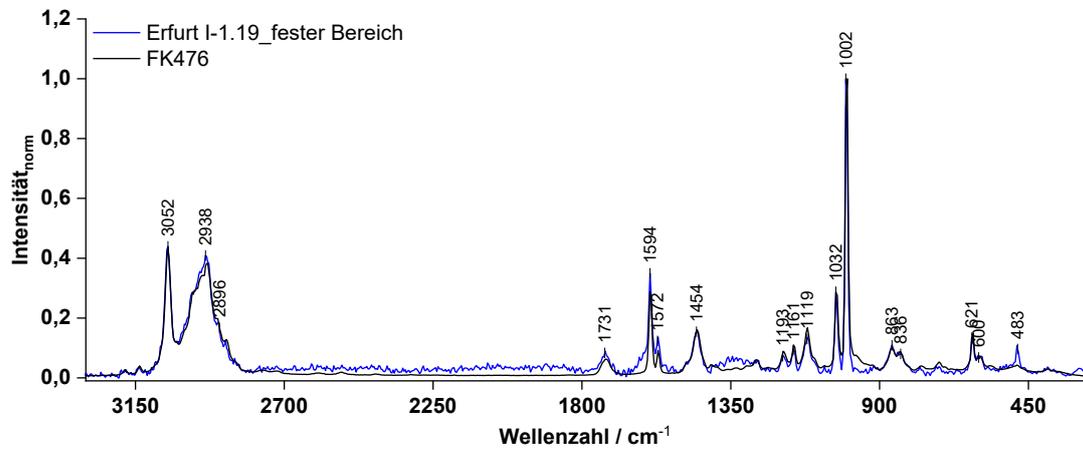


Abbildung 29: Mikro-Raman-Aufnahme der Probe Erfurt I-1.19_fester Bereich im Vergleich zur Referenz (FK476). Die Beiden Spektren sind nahezu deckungsgleich.

Glasmalereifeld Erfurt III (Hoher Chor, Fenster nII, Feld 6d)

Die spektroskopische Untersuchung des Glasmalereifeldes 6d aus Fenster nord II (Bezeichnung „Erfurt III“) erfolgte anhand von Proben auf der Innenseite der Segmente 3, 4 und 5 (Abbildung 30, Anhang A32 bis A34). Die Beschichtungen wurden 1989 als Verbundbeschichtung in Varianten aufgetragen, wobei auf Segment 3 und 4 gleichermaßen nur der Grundlack appliziert wurde (Tabelle 4).

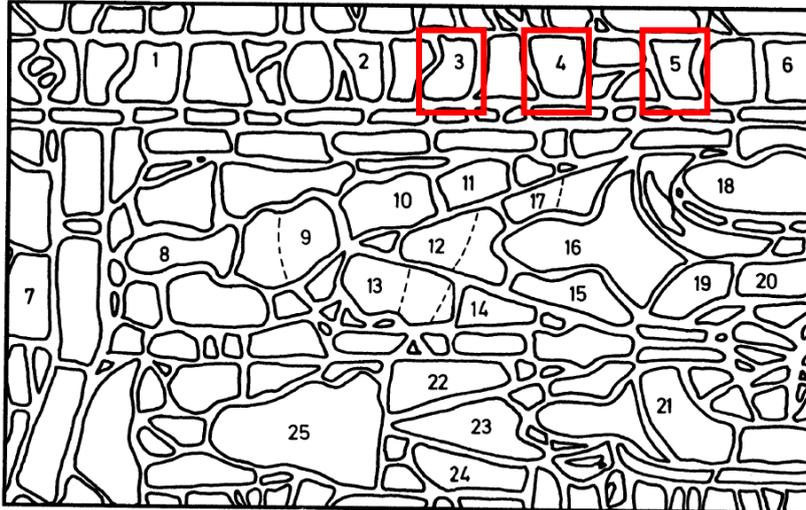


Abbildung 30: Skizze der Innenansicht des Glasmalereifeldes „Erfurt III“, die beschichteten und beprobten Flächen 3, 4 und 5 sind rot markiert [FUC 91, S. A18].

Die IR-Spektren der Segmente 3 und 4 sind insgesamt sehr ähnlich und unterscheiden sich jeweils deutlich von dem Segment 5. Für die Segmente 3 und 4 konnten neben den bereits für Erfurt I beobachteten neuen Banden bei 3530, 3404 und 1620 cm^{-1} zusätzlich noch zwei intensive, schmale Banden bei 2920 und 2848 cm^{-1} , sowie eine kleine Bande bei 1647 cm^{-1} (nur für Segment 4) identifiziert werden (vgl. Abbildung 31). Dabei sind die zusätzlichen Banden für Segment 4 deutlich intensiver als für Segment 3. Beide Flächen wurden nur mit Grundlack (behandelt).

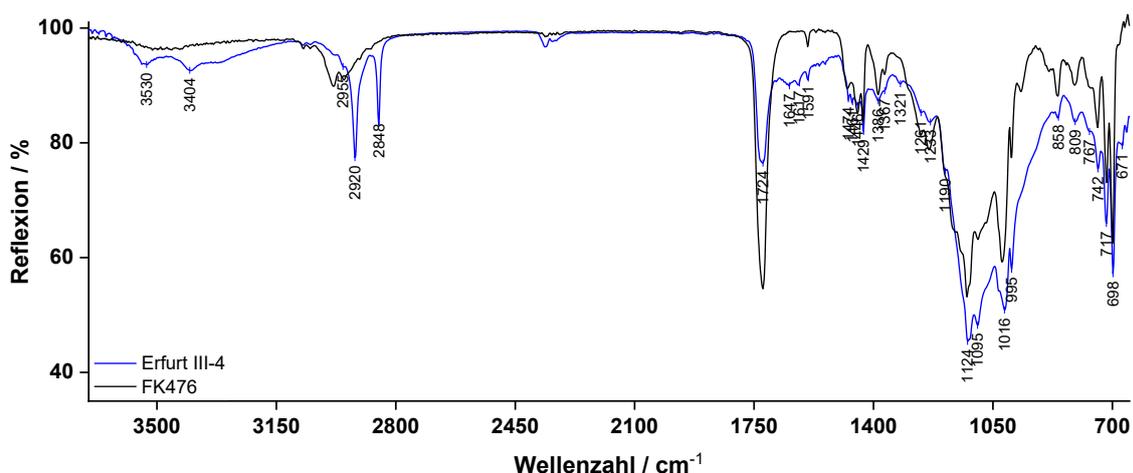


Abbildung 31: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe Erfurt III-4 (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Demgegenüber zeigt das IR-Spektrum der Probe aus Erfurt III-5, das als einzige Fläche auf diesem Fenster mit einer Vollverbundbeschichtung behandelt wurde, weder neue Banden noch Bandenverschiebungen auf und ist nahezu deckungsgleich zum Referenzspektrum, was für eine hohe Integrität des Beschichtungsmaterials spricht (vgl. Abbildung 32). Hier wird deutlich, dass eine mehrlagige Beschichtung im Verbundsystem von Vorteil für die Langzeitbeständigkeit des Materials zu sein scheint.

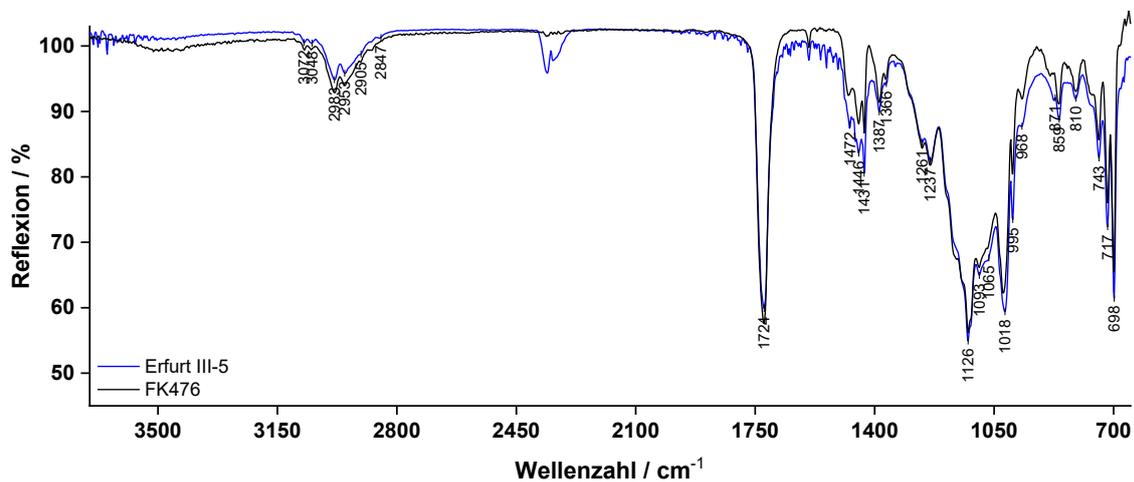


Abbildung 32: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe Erfurt III-5 (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Die Raman-Spektren der drei Proben (Erfurt III-3, Erfurt III-4 und Erfurt III-5) sind im Gegensatz dazu nahezu identisch und stimmen mit dem Referenzspektrum sehr gut überein (vgl. Abbildung 33). Die im IR-sichtbaren zusätzlichen Banden stammen daher von Raman-inaktiven funktionellen Gruppen. Diese Beobachtung verdeutlicht, dass es notwendig ist beide (komplementäre) schwingungsspektroskopische Messverfahren zur Evaluation gealterter Beschichtungen heranzuziehen.

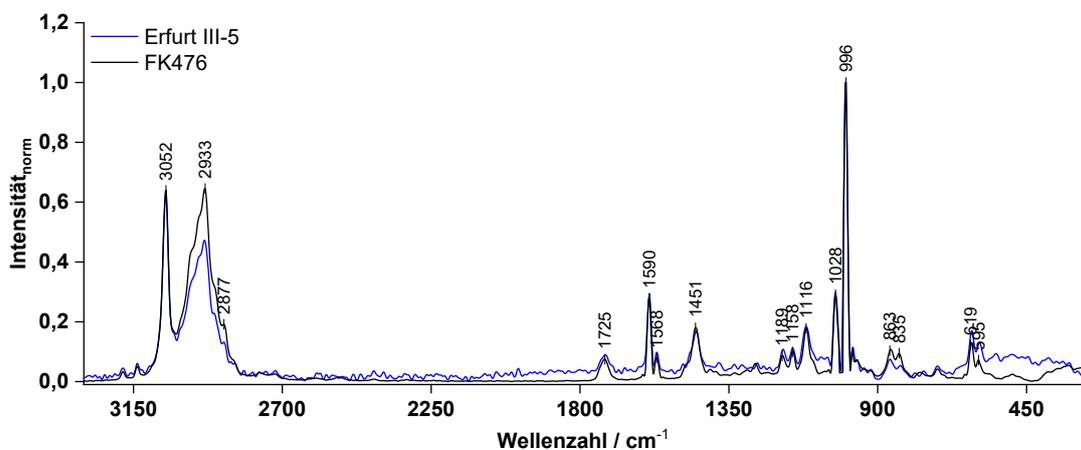


Abbildung 33: Mikro-Raman-Aufnahme (aufgenommen mit HORIBA, LabRAM Soleil, Laser: 532 nm) der Probe Erfurt III-5 im Vergleich zur Referenz (FK476). Die Beiden Spektren sind nahezu deckungsgleich.

Glasmalereifelder von Charles Crodel

Der dünne Beschichtungsauftrag zur flächigen Malschichtsicherung erfolgte von 1995 bis 1999 mit einem in Essigester gelösten Glas-ORMOCER® [BOR 99]. Der Auftrag ist sehr viel dünner als die Verbundbeschichtung und wurde ohne Glasflakes und den abschließenden Paraloid™ B72-Decklack appliziert.

Probennahme der Malschichtsicherung am Heilig-Kreuz-Fenster (nord XIX)

Die Proben nXIX-9c-Malschicht und nXIX-9c zur Untersuchung des Beschichtungszustands wurden in dem in Abbildung 34 dargestellten Bereich entnommen.

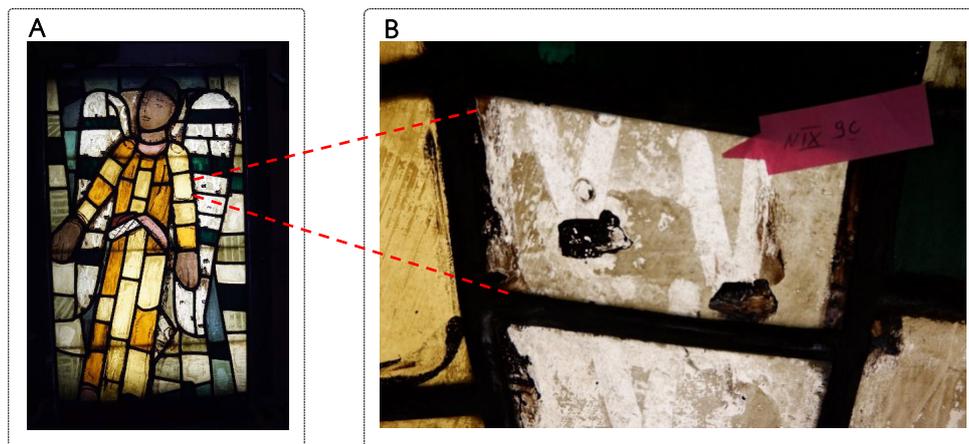


Abbildung 34: **A)** Untersuchtetes Fenster (Erfurt – Crodel – Heilig-Kreuz-Fenster), sowie Detailaufnahme **(B)** der Probenahmestellen zu den Proben nXIX-9c-Malschicht und nXIX-9c.

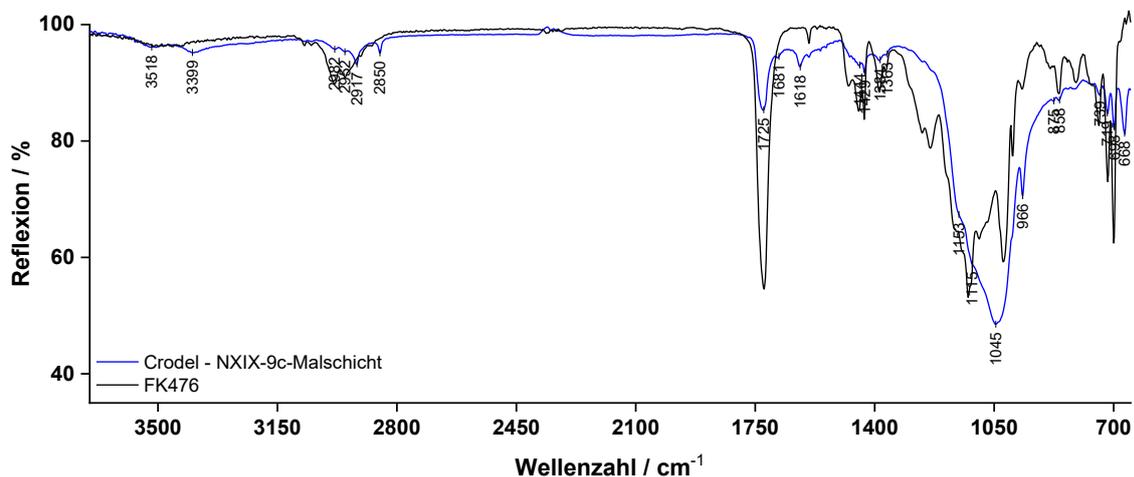


Abbildung 35: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe nXIX-9c-Malschicht (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Die Evaluierung des Zustands der Probe nXIX-9c-Malschicht auf Basis der IR-Spektroskopie war sehr schwierig. Es lassen sich nur noch vereinzelte ORMOCER®-G-Banden erkennen (vgl. Abbildung 35). Abermals treten neue Banden bei 3518, 3399, 1681, 1618 und 668 cm⁻¹ auf, während gleichzeitig die Banden zwischen 1444 und 1240 cm⁻¹ in den Hintergrund treten oder nicht mehr detektiert werden

können. Zusätzlich treten noch zwei relativ schmale, scharfe Banden bei 2917 und 2850 cm^{-1} auf, die auch im IR-Spektrum der Probe Erfurt III-4 gefunden wurden. Da direkt die Malschicht untersucht wurde, lässt sich schwer einschätzen inwieweit hier während der Messung überhaupt ORMOCER®-G erfasst wurde bzw. in Abhängigkeit des Malmaterials könnten die ORG-Banden von diesen überlagert sein. Demgegenüber kann anhand des IR-Spektrums der Probe nXIX-9c (keine Malschicht!) ein sehr guter Zustand des ORGs festgestellt werden. Hier sind weder neue Banden zu verzeichnen, noch konnten Bandenverschiebungen festgestellt werden (vgl. Abbildung 36):

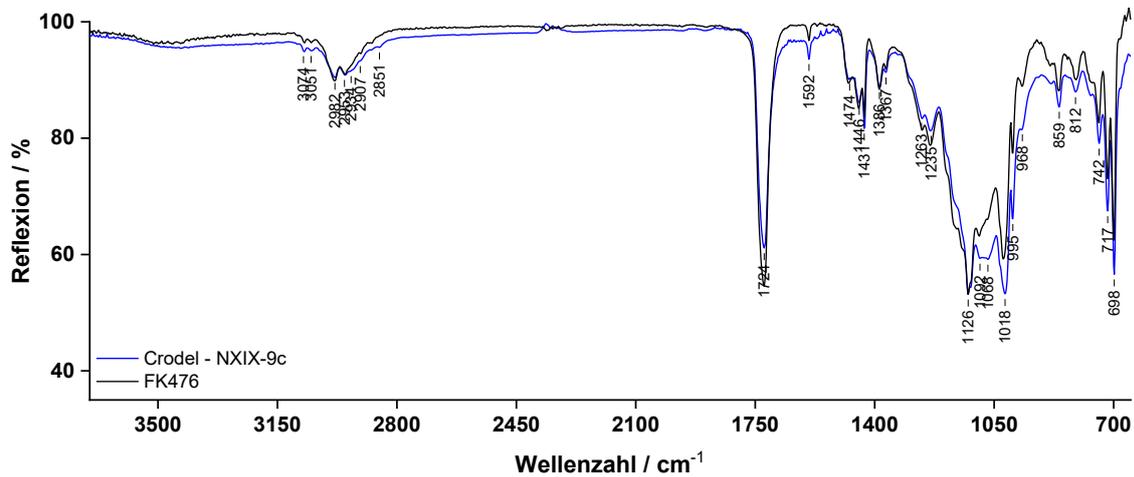


Abbildung 36: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe NXIX-9c (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Probennahme der Malschichtsicung am Marienfenster (süd X)

Die Proben zur Untersuchung des Beschichtungszustands wurden in dem in Abbildung 37 dargestellten Bereich entnommen:

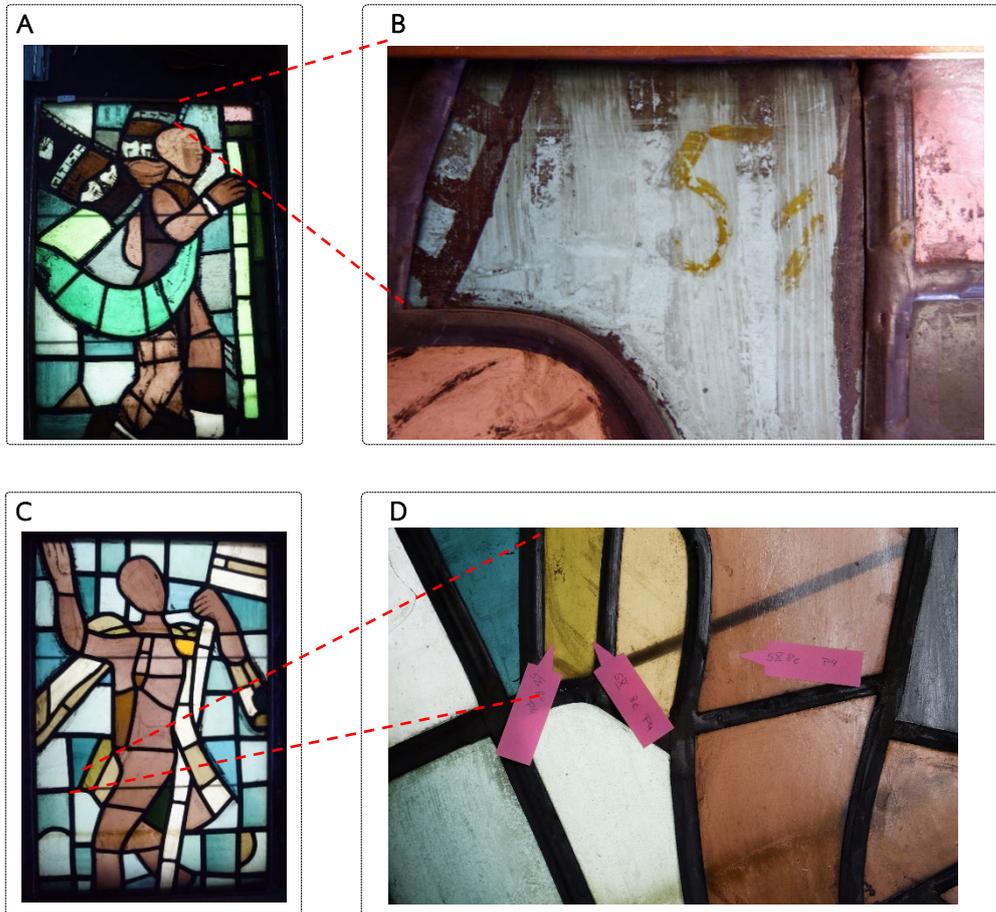


Abbildung 37: **A)** und **C)** Untersuchtes Fenster (Erfurt – Crodel – Marienfenster), sowie Detailaufnahmen (**B** und **D**) der Probenahmestellen zu den Proben SX-2c und SX-8e_Mischprobe.

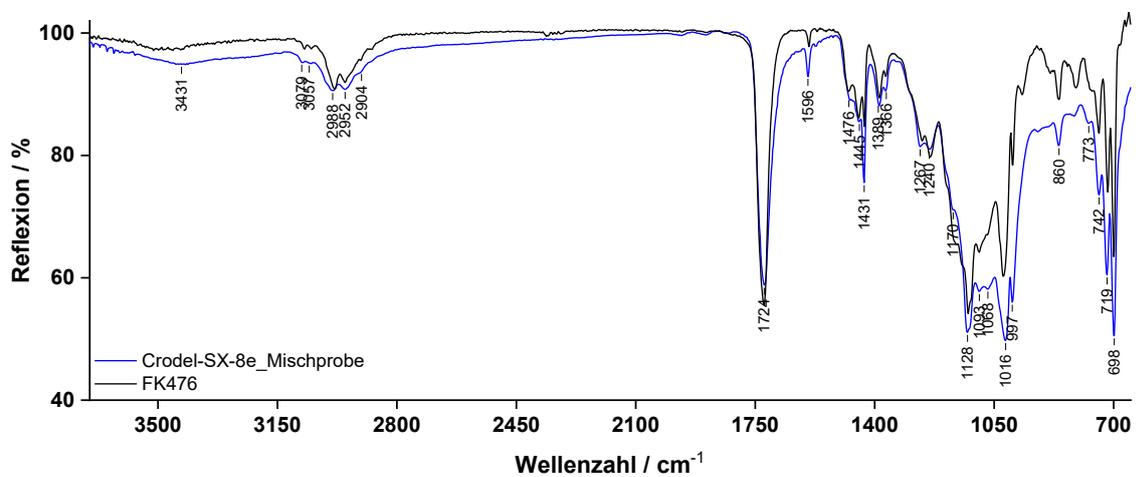
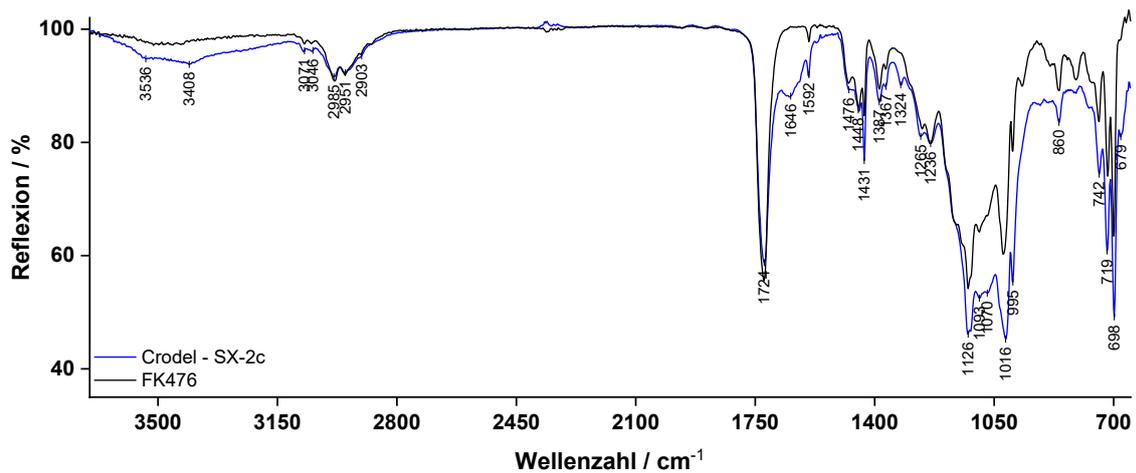


Abbildung 38: **oben**: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe SX-2c (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476) und **unten**) der Probe 2X-8e_Mischprobe (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Ähnlich wie für Erfurt I zeigen die IR-Spektren der Proben sX-2c und sX-8e zusätzliche Banden. Während für sX-2c zusätzliche Banden bei 3536, 3408 und 1646 cm^{-1} (siehe Abbildung 38 oben) gefunden wurden (Interpretation vgl. Erfurt I), scheint die Veränderung der Probe sX-8e weniger weit fortgeschritten. Hier deutet sich lediglich eine zusätzlich Bande im Bereich 3431 cm^{-1} an (siehe Abbildung 38 unten).

Probennahme der Malschichtsicung am Cäcilienfenster (südwest II)

Die Proben zur Untersuchung des Beschichtungszustands wurden in dem in Abbildung 39 dargestellten Bereich entnommen.

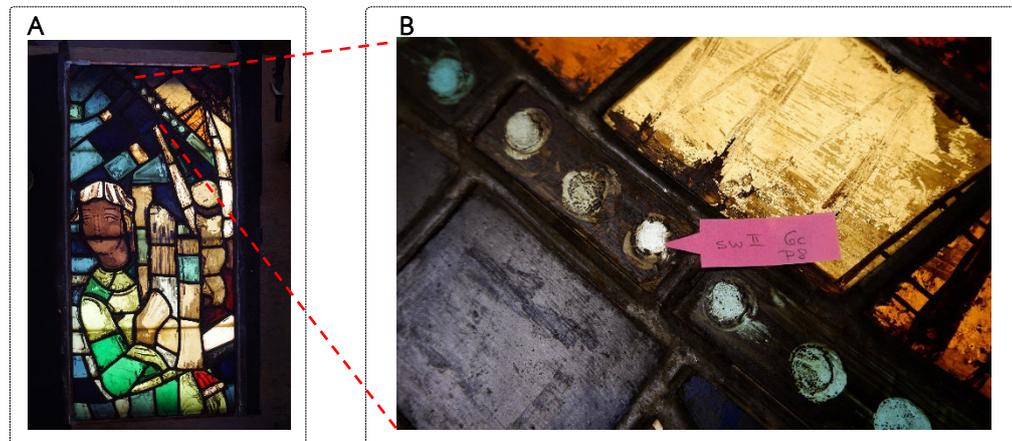


Abbildung 39: **A)** Untersuchtetes Fenster (Erfurt – Crodel – Cäcilienfenster), sowie Detailaufnahme **(B)** der Probenahme stelle zur Proben swII-6c.

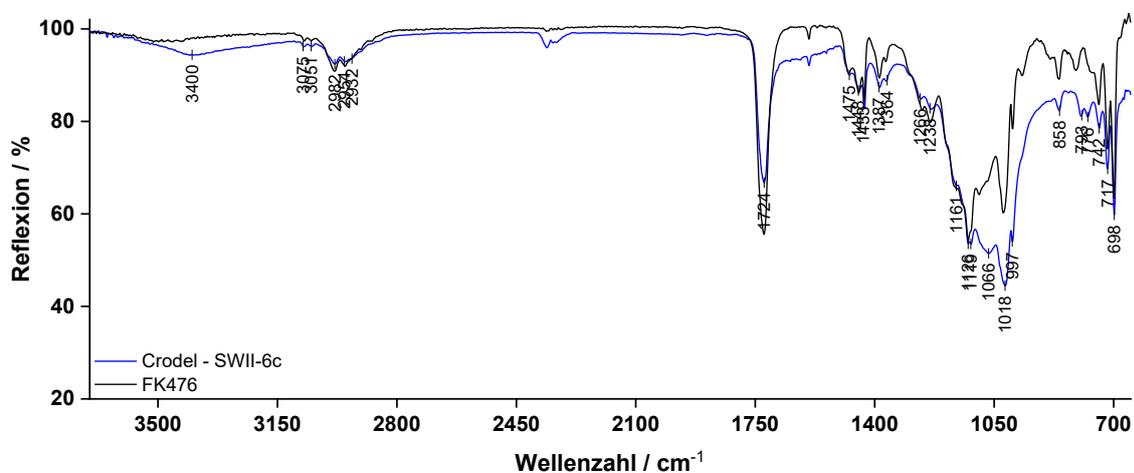


Abbildung 40: IR-Spektrum (aufgenommen mit: Nicolet 6700 - Continuum, FT-IR-Mikroskop; Mikro ATR/Germanium-Kristall) der Probe swII-6c (blaue Linie) im Vergleich zur Referenz (FK476).

Das IR-Spektrum der Probe swII-6c (vgl. Abbildung 40) ist dem der Probe sX-8e recht ähnlich. Auch hier deuten sich erste neue Banden bei 3400 cm⁻¹ an. Der Bereich um die C=O-Bande (1724 cm⁻¹) läuft in Richtung kleinerer Wellenzahlen breiter aus, was, wie bereits erläutert auf Oxidationsprozesse im Paraloid™ B72 deuten könnte. Ansonsten zeigt sich eine relativ gute Übereinstimmung zur Referenz (FK476). Anzumerken wäre noch die umgekehrte Bandenintensität im Bereich 1120–1018 cm⁻¹.

Die Proben Crodel – Cäcilienfenster – sX-8e und Crodel – Heilig-Kreuz-Fenster – nXIX-9c wurden Ramanspektroskopisch analysiert. Beide Spektren sind nahezu identisch und fast deckungsgleich zur Referenz (vgl. Abbildung 41). Es konnten hier keine zusätzlichen Banden oder Bandenverschiebungen

identifiziert werden. Die in der FTIR-Spektroskopie beobachteten Veränderungen sind, wie bereits erwähnt, entsprechend vermutlich Raman-inaktiv, was für polare Oxidationsprodukte nicht unwahrscheinlich wäre.

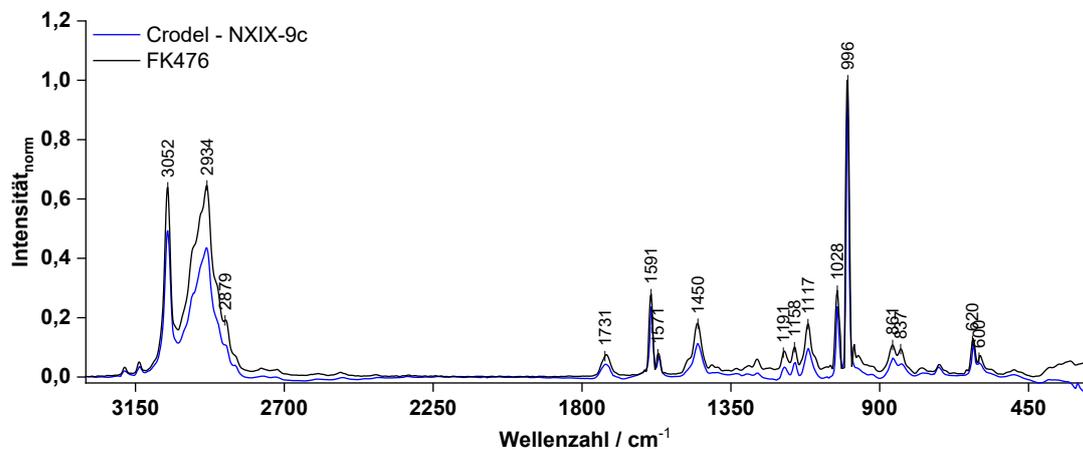


Abbildung 41: Mikro-Raman-Aufnahme (aufgenommen mit HORIBA, LabRAM Soleil, Laser: 532 nm) der Probe Crodel- nXIX-9c im Vergleich zur Referenz (FK476). Die beiden Spektren sind nahezu deckungsgleich.

Die IR-Evaluierung des Zustands der Beschichtung ist in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Übersicht der untersuchten Proben in absteigender Reihenfolge des Beschichtungszustands. Je mehr zusätzliche Banden gefunden wurden, desto wahrscheinlicher hat eine chemische Veränderung stattgefunden (vermutlich primär innerhalb der Paraloid™ B72-Anteile/Deckschicht). Gleichfarbige Markierungen gehören zu gleichen Bandenlagen.

Name der Probe	zusätzliche Banden [cm ⁻¹]	Peakshifts
Erfurt III-5		nein
Crodel – NXIX-9c		nein
Crodel – SWII-6c	3400	nein
Crodel – SX-8e_Mischprobe	3431	nein
Erfurt I – 1.19 lockerer Bereich	3398, 1621	nein
Crodel – SX-2c	3536, 3408, 1646	nein
Erfurt I – 1.3	3533, 3405, 1621	nein
Erfurt I – 1.19 fester Bereich	3528, 3401, 1684, 1619	nein
Erfurt III-3	3539, 3407, 2917, 2846, 1617	nein
Erfurt III-4	3530, 3404, 2920, 2848, 1647, 1617	nein
Crodel – NXIX-9c-Malschicht	3518, 3399, 2917, 2850, 1681, 1618, 668	nein

Die Banden bei 1619 cm⁻¹ und die (Doppel)bande bei 3530/3404 cm⁻¹ treten immer gemeinschaftlich auf, so dass vermutet werden kann, dass sie durch identische Moleküle bzw. Molekülfragmente hervorgerufen werden. Die (Doppel)bande bei 2848/2917 cm⁻¹ tritt davon unabhängig auf, ist also durch ein anderes Molekül bzw. Molekülfragment verursacht.

Die Doppelbande bei $2848/2917\text{ cm}^{-1}$ ist ein Hinweis für längerkettige gesättigte Kohlenwasserstoffeinheiten in der Schicht [SMI] und könnte evtl. durch Polyethylen verursacht worden sein. Möglicherweise liegt auch eine oberflächliche Verunreinigung durch verdampftes, unverbranntes Kerzenwachs wie Paraffin oder Stearin vor.

Für die Banden bei 1619 und $3530/3404\text{ cm}^{-1}$ wurde schon oben vermutet, dass es sich um stickstoffhaltige Molekül(fragment)e handeln könnte. Die an den Crodell-Fenstern teilweise beobachteten, sehr schwachen Banden bei 3400 cm^{-1} könnten erste Anzeichen für die Ausbildung der stickstoffhaltigen Molekülfragmente sein.

3.3.4 Zusammenfassende Übersicht über die spektroskopisch untersuchten Proben

Tabelle 12: Übersicht aller spektroskopisch untersuchten Proben, bei denen die Spektren unverändert im Vergleich zu den Referenzmessungen sind.

Standort/Name der Probe	Art der Beschichtung	Orientierung des Fensters
Creglingen (3 Proben)	Verbundbeschichtung, außen	West (direkte Bewitterung)
Köln (5 Proben)	Verbundbeschichtung, außen	N, S (zeitweise geschützt durch ASV)
Erfurt (Erfurt III-5)	Verbundbeschichtung, innen	Nordost (geschützt durch ASV)
Erfurt (Crodel – NXIX-9c)	Malschichtsicherung, innen	Nord (geschützt durch ASV)

Tabelle 13: Übersicht aller spektroskopisch untersuchten Proben, bei denen zusätzliche Banden in den Spektren gefunden wurden. Es ist sehr wahrscheinlich, dass chemische Veränderungen stattgefunden haben (vermutlich Primär innerhalb der Paraloid™ B72-Anteile/Deckschicht).

Name der Probe	Art der Beschichtung	Orientierung des Objektes; Bemerkung
Crodel – swII-6c	Malschichtsicherung	Südwest; Bemerkung: ähnlich zu sX-8e, erste Oxidationsprozesse – vermutlich im Paraloid™ B72
Crodel – sX-8e _Mischprobe und Crodel – sX-2c	Malschichtsicherung	Süd; Bemerkung: SX-8e weniger Veränderungen als für SX-2c, zusätzliche Banden wie für Erfurt I
<u>Proben mit Besonderheiten:</u>		
Crodel – NXIX-9c- Malschicht	Malschichtsicherung, Probe mit Partikeln	Nord; Bemerkung: Vergleichsprobe zu Crodel – nXIX-9c (unauffällig), Spektrum aufgrund der ebenfalls abgenommenen geschädigten Malschicht schwer identifizierbar
Erfurt I – 1.19 lockerer Bereich Erfurt I – 1.3 Erfurt I – 1.19 fester Bereich	Verbundbeschichtung	Handliche Testscheibe mit mehrfachem Standortwechsel und verschiedenen Lagerungsorten, mehrfach zu unterschiedlichen Zeiten im Labor untersucht, Aufbewahrungsumstände vielfältig, Oxidationsprozesse wahrscheinlich (Decklack oder gesamtes System?); evtl. auch Verunreinigungen, lokal mikrobieller Befall
Erfurt III-3 Erfurt III-4	Varianten der Verbundbeschichtung, <u>nur Grundlack</u>	Nordost Fenster n II, Feld 6c; Bemerkung: mehrere zusätzliche Banden im Spektrum gegenüber unauffälliger Probe Erfurt III-5 (Verbundsystem)

Fazit zu den schwingungsspektroskopischen Untersuchungen

- Eine Kombination von Infrarot- und Raman-Analytik ist sinnvoll, weil die interessanten chemischen Veränderungen zu polaren Oxidationsprodukten führen können, die Raman-inaktiv sind und nur IR-spektroskopisch erkannt werden.
- Es ist schwer bis unmöglich, im IR und im Raman immer exakt dieselbe Stelle einer Probe zu messen; hinzu kommt, dass beide Verfahren in unterschiedlichen Schichttiefen messen. Hier könnten Mapping-Verfahren helfen, wobei orts aufgelöst Spektren über einen größeren Flächenbereich gemessen werden.
 - Um die Unsicherheiten in der Messtiefe zu klären, könnte man SIMS- bzw. XPS-Messungen nutzen, mit denen man sehr oberflächennah messen kann. Hierfür müssten die Proben allerdings ins Vakuum gebracht werden, was unter Umständen für die Beschichtungen ungünstig ist.
- **Bewertung des Zustandes der Verbundbeschichtungen**
 - Überwiegend unveränderte Spektren an allen Verbundbeschichtungen der Glasmalereien der drei Pilotstandorte in Creglingen, Köln und Erfurt
 - Erste Veränderungen sind auf der Verbundbeschichtung des Testfeldes Erfurt I detektierbar; unklar muss hier allerdings bleiben, ob jeweils primär die Deckschicht (PB72) gemessen wurde, oder tatsächlich die ORMOCER®-G-Beschichtung. Ebenso könnten durch den mehrfachen Standortwechsel Verunreinigungen aufgetreten sein; biologischer Befall ist nachweisbar
 - Deutliche Veränderungen beim Grundlack als eine Beschichtungsvariante der Verbundbeschichtung an Testfeld Erfurt III (Erfurt III-3 und Erfurt III-4)
- **Bewertung des Zustandes der Malschichtsicherung (Crodell-Fenster, Erfurt)**
 - Die Spektren zeigen überwiegend einen sehr guten Zustand der Beschichtungsproben von der Verglasung der Nordseite und einen guten Zustand auf Fenstern der Südwest/Südseite
 - Es lässt sich nicht eindeutig schlussfolgern, ist aber zu vermuten, dass die ersten detektierbaren Veränderungen der Spektren auf photochemischen Prozessen der Beschichtungen beruhen
- Die detektierten zusätzlichen Banden in den Spektren sprechen für Oxidationsprozesse, die vermutlich primär im Paraloid™ B72 stattgefunden haben (Paraloid™ B72-Decklack oder in der Paraloid™ B72 Komponente der Glas-ORMOCER®-Mischung)

3.4 Prüfung der Reversibilität

Die Reversibilität war ein zentraler denkmalpflegerischer Aspekt, den es bei der Entwicklung des Konservierungsmaterials Glas-ORMOCER® von Beginn an zu berücksichtigen galt. Das Ablösen des Lacksystems mit Lösungsmitteln, damals vorrangig Toluol, gelang an natürlich gealterten und künstlich bewitterten Proben [FUC 91], [RÖM 93]. An den 1988 bzw. 1989 beschichteten Pilotobjekten wurden erstmals Tests zur Reversibilität im Jahr 2003 [NAW 03] und 2009 im Rahmen des EU-Projektes CONSTGLASS¹⁸ durchgeführt. Die natürlich gealterten ORMOCER®-Beschichtungen erwiesen sich zum damaligen Zeitpunkt als gut reversibel.

Für aktuelle Tests nach mehr als einem weiteren Jahrzehnt der Exposition wurden sieben Lösungsmittel bzw. -gemische geprüft (Abbildung 42). Da es sich beim ORMOCER®-G um ein organisch-anorganisches Stoffgemisch handelt, ist lediglich der organische Anteil lösbar. Hierbei handelt es sich um das Acrylat Paraloid™ B72, eines der gängigsten in der Restaurierung eingesetzten Acrylate.

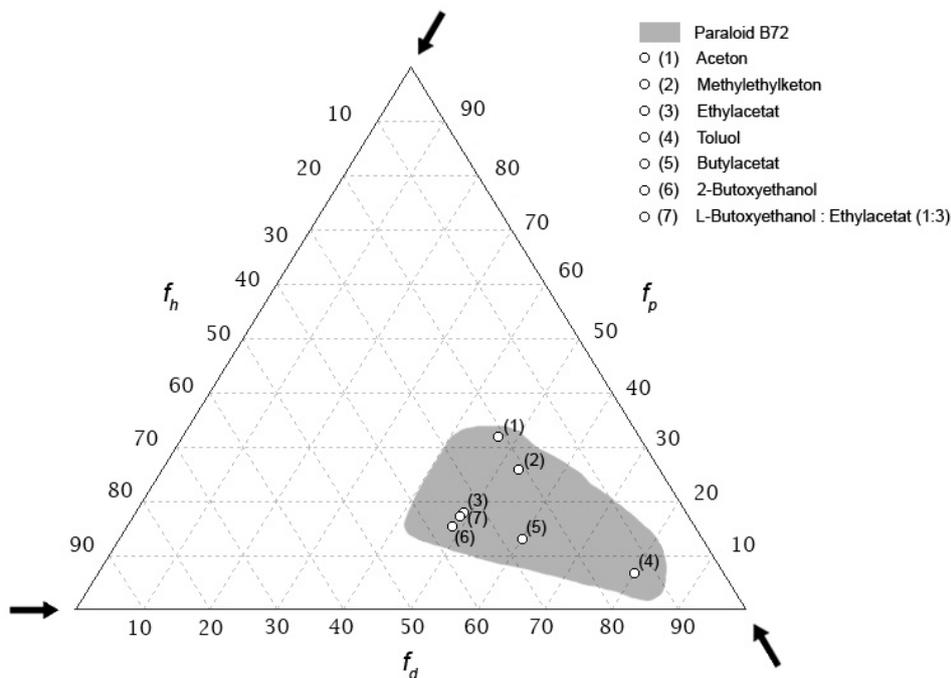


Abbildung 42: Lösungsmitteldreieck nach J. P. Teas¹⁹; grau gekennzeichnet ist der Löslichkeitsbereich für Paraloid™B72²⁰ und markiert sind die ausgewählten Lösungsmittel²¹ für die Reversibilitätstests der natürlich gealterten Glas-ORMOCER® Beschichtung.

¹⁸ http://www.constglass.eu/TableResults_COL_NVI.pdf.

¹⁹ Zusammenstellung nach: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/16/Gibbsches_Dreieck.png; 06.08.2021; 08:24 Uhr.

²⁰ https://www.researchgate.net/figure/Teas-Triangle-Violet-dashed-line-Paraloid™-B72-solubility-zone-black-dashed-line_fig5_309611352; 06.08.2021; 08:38 Uhr.

²¹ [BAN 89] S. 94f.

Vorgehensweise und Diskussion der Ergebnisse

Tests zur Reversibilität sind am mittelalterlichen Glasmalereifeld „4bl“ aus dem Fenster Nord VI des Kölner Doms durchgeführt worden. Die ausgewählten Lösungsmittel wurden in verschiedenen Zonen/Testbereichen angewendet und die Lösungseigenschaften der Verbundbeschichtung durch unterschiedliche Methoden geprüft. Folgende Varianten sind durchgeführt worden:

Quell- und Lösungsverhalten mittels Tropfentest: Mit einer Pasteurpipette wurde jeweils ein Tropfen Lösungsmittel aus einem halben Zentimeter Höhe aufgetropft. Das Benetzungsverhalten auf der beschichteten Glasoberfläche wurde visuell erfasst und die mechanischen Eigenschaften wurden mit einem Skalpell geprüft. Alle Lösungsmittel reagierten mit der Beschichtung. Das unterschiedliche Fließverhalten der Tropfen wie auch detaillierte Beobachtungen während der mechanischen Belastung finden sich im Anhang A26, A27.

Nach dem Kontakt mit den Lösungsmitteln erschienen matt-raue Bereiche der beschichteten Oberfläche wieder dauerhaft glänzend (Abbildung 43). Vermutlich sind mikroskopisch feine Rauigkeiten oder feinste Mikrorisse durch das Anlösen geschlossen worden. Je nach Intensität der Lösungsmittelinwirkung kann eine Mischung/Umlagerung der Decklackschicht mit den darunter befindlichen ORMOCER®-Schichten nicht ausgeschlossen werden.

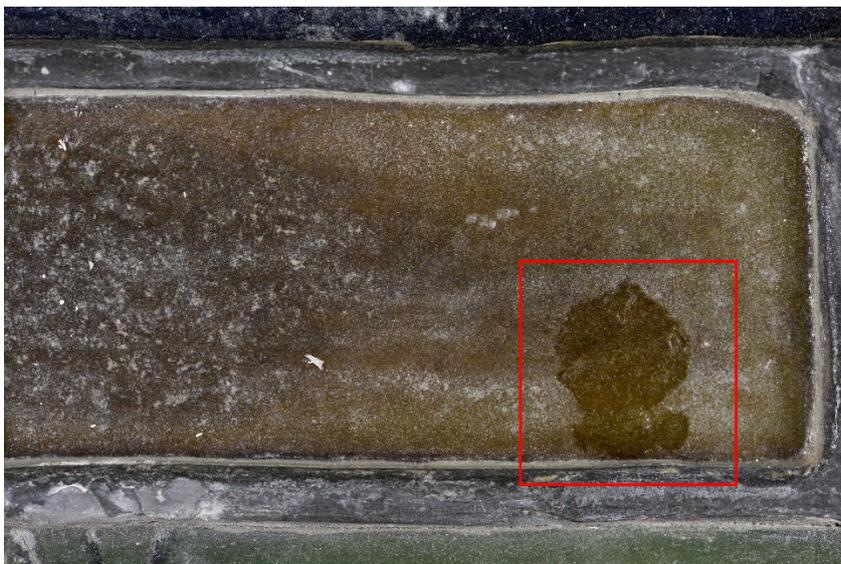


Abbildung 43: Details von Feld 4bl aus Fenster Nord VI, Beschichtungssystem erscheint durch aufgetropftes Lösungsmittel dauerhaft transparent und glänzend. Im Auflicht ist die Beschichtung auch nach dem Verdunsten des Lösungsmittels dunkler als in Bereichen, die keinen Kontakt mit dem Lösungsmittel hatten.

Abnahme mit getränktem Wattestäbchen: In einem weiteren Schritt wurden Wattestäbchen mit den Lösungsmitteln befeuchtet und in definierten Bereichen auf der Oberfläche abgerollt, um die Beschichtung abzunehmen. Dies betraf gezielt nur kleine Teilbereiche. Zwar konnten erwartungsgemäß alle Lösungsmittel die Beschichtung lösen, aber sie eignen sich mit dieser Methode unterschiedlich gut. Das Verfahren und die Beobachtungen finden sich im Anhang A28.

Abnahme mit Kompresse: Für eine großflächige und rationelle Abnahme der Beschichtung bietet sich der Einsatz von Kompressen an. Die drei vielversprechendsten Lösungsmittel aus den vorhergehenden Versuchen – Methylethylketon (MEK), Butylacetat, Ethylacetat – sind in den Tests verwendet worden. Als Kompressen dienten Watte, Zellstofftupfer und mit Klucel G angedickte Lösungsmittelgele. Um

möglichst wenig Kompressenmaterial auf der Oberfläche zurückzulassen, wurde zwischen Gel bzw. Watte und Glasoberfläche ein Japanpapier (Falzer Langfaser, 30g) gelegt (siehe Abbildung 44). Die feuchten Kompressen lagen jeweils 3 x 10 min auf den beschichteten Glasoberflächen (Anhang A29). Eine Abdeckung als Verdunstungsschutz (Nitril-Handschuh²²) und eine leichte Beschwerung gewährleisteten optimierte Einwirkbedingungen (Abbildung 46).



Abbildung 44: Belegung der Testbereiche mit verschiedenen Kompressenmaterialien, von links: Japanpapier mit Watte, Zellstofftupfer, Japanpapier mit Klucel G (angedickt durch Lösungsmittel).

Die Beschichtung wurde durch den Einfluss der Lösungsmittel gelöst und vom jeweiligen Kompressenmaterial aufgesaugt. Auch die zunehmend freigelegten Glasflakes hafteten an der Komresse bzw. der Zwischenlage aus Japanpapier. Nach dreimaliger Einwirkzeit war die Beschichtung zumeist bereits vollständig entfernt und die verbliebenen losen Glasflakes konnten abgepinselt bzw. abgesaugt werden (Abbildung 45, Abbildung 47). Lediglich bei dem Gel in Kombination mit Ethylacetat und Methylketon verblieb noch eine dünne ORMOCER®-Restschicht, deren Entfernung einen weiteren Arbeitsschritt erforderlich machte. **Die Versuchsreihe belegt erneut die nach wie vor gute Reversibilität der mittlerweile 33 Jahre alten ORMOCER®-Beschichtung.**

²² Fabrikat: Rotioprotect-NITRIL evo.

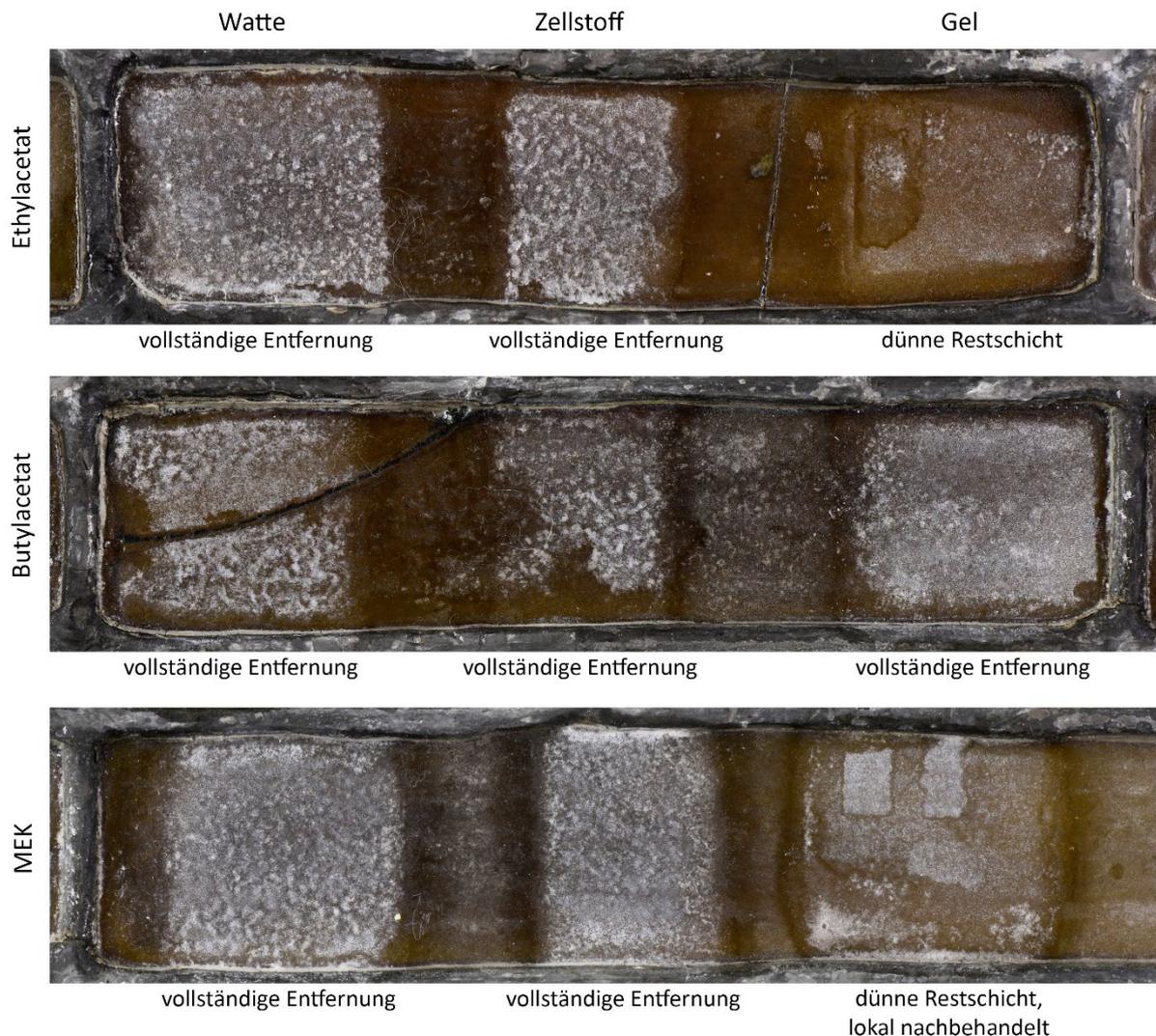


Abbildung 45 : Zustand der beschichteten Oberflächen nach 3-maliger Belegung mit unterschiedlichen Kompressen und Lösungsmitteln. Die mittelalterliche Glasoberfläche lag entweder frei, da die Beschichtung vollständig entfernt wurde, oder es verblieb noch ein dünner ORMOCER®-Film, der sich erst in einem weiteren Arbeitsschritt entfernen ließ; der Kleber der alten Sprungklebung (Epoxidharz) reagierte nicht mit dem Lösungsmittel Butylacetat (Mitte, links).

Zur vollständigen Entfernung der flächigen ORMOCER®-Beschichtung kann es notwendig sein, bestimmte Bereiche separat nachzubehandeln (z.B. durch mit lösungsmittelgetränkte Wattestäbchen). Das betrifft mögliche verbliebene Beschichtungsreste entlang von Kitträndern, Sprungklebungen oder Bleiruten. Bei Sprungklebungen ist vorab zu prüfen, ob die Klebematerialien durch den Kontakt mit Lösungsmittel möglicherweise erweicht oder gelöst werden. An den Testfeldern des Kölner Domes waren die Klebungen mit Hahnzement SH1²³ nach 33 Jahren nach wie vor stabil und reagierten nicht mit den Lösungsmitteln (siehe Abbildung 45, Mitte links).

²³ Epoxidharz, das in der Kölner Dombauhütte zur Klebung der Sprünge in Fenster Nord VI verwendet wurde.



Abbildung 46: Belegung der Testbereiche mit Kompressen, die gegen zu schnelle Verdunstung abgedeckt und für guten Kontakt zum Untergrund leicht beschwert wurden.



Abbildung 47: Entfernung aufliegender Glasflakes mit einem Pinsel nach Abnahme der Beschichtung mit einer Komresse in einem Testbereich; die korrodierte mittelalterliche Glasoberfläche liegt frei.

3.5 Klimatische Bedingungen am Erfurter Dom

Im Gegensatz zur Herrgottskirche in Creglingen sind am Erfurter und Kölner Dom die mit ORMOCER® beschichteten Glasmalereien mit einer Außenschutzverglasung kombiniert. Man kann daher annehmen, dass hier die klimatischen Einflüsse auf die Beschichtung deutlich milder sind als in Creglingen. Um die Effizienz der Schutzverglasung zu beurteilen und die Auswirkungen auf das Langzeitverhalten der ORMOCER®e abschätzen zu können, galt es die klimatischen Verhältnisse am Ort zu prüfen. Da am Kölner Dom in den letzten Jahren umfangreiche Messungen²⁴ stattgefunden haben, konzentrierten sich die Untersuchungen im aktuellen Projektvorhaben auf Fenster des Erfurter Doms. Hier erfolgten die letzten umfassenden Klimamessungen Anfang der 1990er Jahre.

Bei der Effizienzprüfung von Schutzglassystemen hat die Bewertung der klimatischen Umgebungseinflüsse eine zentrale Bedeutung.²⁵ Neben der Einzelerfassung von Temperatur und Luftfeuchtigkeit sind die Taupunkt ereignisse und das Luftströmungsverhalten am Fenster relevant. Im Rahmen des aktuellen Projektes wurde an einer Position des Fensters süd X eine 12-monatige Messungen mit dem **Sensorsystem Custos Aeris**²⁶ durchgeführt. Einzelgasuntersuchungen erfolgten nicht. Stattdessen wurden die Synergieeffekte aller Umgebungsfaktoren und das daraus abgeleitete Gesamtrisiko für korrosive Prozesse mit den seit vielen Jahren etablierten **Glasdosimetern**²⁷ des Fraunhofer ISC erfasst (siehe Anhang A63 bis A71). Als Wirkungsdosimeter lassen sie eindeutige Aussagen darüber zu, ob und in wie weit die (gemessenen) Umgebungsbedingungen einen korrosiven Einfluss auf die empfindlichen historischen Glasoberflächen haben [RÖM 05, NAW 08].

Der Messzeitraum umfasste einen Jahreszyklus von Dezember 2020 bis November 2021. Das Marienfenster süd X von Charles Crodel mit der Orientierung nach Süden wurde sowohl mit dem Sensorsystem Custos Aeris bemessen (süd X, Feld 8e) als auch mit Glasdosimetern (süd X, Felder 2c + 8e) bestückt. Das nach Norden ausgerichtete Heilig-Kreuz-Fenster (nord XIX) diente zum Vergleich, wobei hier ausschließlich die Glasdosimeter eingesetzt wurden (Rosette, Felder 4b + 9c). Mit dem Custos Aeris wurde also ein Bereich genauer gemessen. Mit den Glasdosimetern wurden vier unterschiedliche Messbereiche in verschiedenen Fensterhöhen eingerichtet, einschließlich der Außenseite der Schutzverglasung. Eine weitere Dosimetermessung erfolgte im Schrank der Glaswerkstatt, in dem seit langem zwei beschichtete Glasmalereifelder von Charles Crodel aus dem Heilig-Kreuz-Fenster aufbewahrt werden.

²⁴ Es können für die Südseite Messungen an Chorobergadenfenstern des Kölner Doms aus dem Jahr 2017 herangezogen werden, für die Nordseite aus dem Jahr 2004; interne Berichte der Dombauhütte.

²⁵ WTA Merkblatt 10-2: Präventive Konservierung architekturgebundener Glasmalerei, Ausgabe: 05.2019/D.

²⁶ <https://custos-aeris.ixtronics.com/de/>.

²⁷ Glasdosimeter werden seit Mitte der 1990er Jahre weltweit vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung eingesetzt <https://www.isc.fraunhofer.de/content/dam/isc/en/documents/GlassDosimeters.pdf>. Es handelt sich um speziell präparierte, sensitive Modellglasplättchen, die auf das komplexe Zusammenwirken unterschiedlicher Umwelteinflüsse reagieren - als eine Art Frühwarnsystem. Im Rahmen von DBU-Projekten kamen Glasdosimeter an Glasmalereien bereits mehrfach zum Einsatz, beispielsweise an der Divi Blasii Kirche in Mühlhausen, St. Sebald in Nürnberg, Marienkirche in Frankfurt/Oder oder am Xantener Dom.

Ergebnisse

Die Messergebnisse des Custos Aeris (süd X) konnten jederzeit online abgerufen werden (siehe Anhang A57 bis A62). Es zeigten sich am Südfenster süd X im Sommerhalbjahr (z.B. Mai, August) erwartungsgemäß teils starke Temperaturwechsel, was in südlicher Ausrichtung zu erwarten ist [TOR 11]. Im Winterhalbjahr (z.B. Januar, November) fielen die Temperatur- und Feuchtewechsel sehr viel gedämpfter aus. Taupunktunterschreitungen fanden im Jahresverlauf nur selten und ausnahmslos an der Innenseite der Außenschutzverglasung statt. Insgesamt lassen die Messungen auf eine funktionstüchtige Schutzverglasung schließen.

Die Auswertung der Glasdosimeter erfolgte nach einem Jahr. Es zeigte sich, dass das Gesamtkorrosionsrisiko für den Standort „Erfurter Dom“ im Jahr 2021 um ein Vielfaches niedriger lag als 1991, als schon einmal mit Glasdosimetern gemessen wurde (Anhang A69). Damals waren die Messungen mit einem unempfindlicheren Glastyp durchgeführt worden, und dennoch zeigten die Dosimeter nach 12 Monaten so starke Korrosionserscheinungen, dass sie sich nicht mehr zuverlässig auswerten ließen. Heute haben sich luftgetragene Schadstoffe, insbesondere Schwefelverbindungen, und das damit verbundene Risiko deutlich reduziert. Die Außenraummessungen²⁸ zeigen, dass das Korrosionsrisiko am Erfurter Dom heute in etwa dem am Kölner Dom entspricht (interner Bericht des Fraunhofer ISC und der Dombauverwaltung Köln, 2017; siehe auch Anhang A69). Die korrosive Belastung an den besonders schützenswerten, bemalten Innenseiten der Crodelfenster ist sowohl auf der Nord- als auch der Südseite leicht höher als an Fenstern des Kölner Domes.

Generell belegen die Glasdosimeter eine sehr gute Wirksamkeit der Außenschutzverglasung (Anhang A68 bis A70) - vor allem am Nordseitenfenster (P4 > P3 > P2). Auf der Südseite ist der Schutzeffekt vergleichsweise geringer, da hier insbesondere die Feuchtebelastung moderater ist als an der Nordseite. Der Schrank in der Glaswerkstatt weist trotz optimaler Temperatur- und Luftfeuchteverhältnisse ein gewisses Risiko für korrosive Prozesse auf, die auf Emissionen der verbauten Holzverbundwerkstoffe zurückzuführen sind. Der Schrank muss regelmäßig gelüftet werden.

Wichtig ist festzuhalten, dass die Außenschutzverglasung der Crodelfenster nachweislich Temperaturschwankungen und Feuchtebelastung an den empfindlichen Glasmaleroberflächen reduziert. Für die flächig aufgetragene ORMOCER®-Beschichtung zur Malsichtsicherung bedeutet dies einen unverzichtbaren Schutz.

²⁸ Als Außenraummessung wird bei Glasdosimeterstudien das Ergebnis der Messposition P4 an der Außenseite der Außenschutzverglasung bezeichnet, siehe Anhang A66.

4 Zusammenfassung und Ausblick

Die neuerliche Untersuchung der mehr als 30 Jahre gealterten **Glas-ORMOCER®-Verbundbeschichtungen** auf den Glasmalereien in Creglingen, Köln und Erfurt erlaubt eine grundsätzlich positive Bewertung. Die Haftung, sogar auf stark korrodierten Gläsern, ist nach wie vor sehr gut. Selbst lokale Defektstellen, wie vereinzelte Risse im Übergang zum mitbeschichteten Blei oder entlang von Sprungkanten, führten nicht zu einer Delamination der beschichteten Bereiche.

Eine Außenschutzverglasung wirkt sich positiv auf die Langlebigkeit der Beschichtungen aus. Lokale, oberflächliche Trübungen bzw. „Grauschleier“ und vereinzelte Bläschen innerhalb der Beschichtung treten nämlich am deutlichsten am Standort Creglingen auf, wo das Fenster dauerhaft ungeschützt der direkten Witterung ausgesetzt ist.

Die spektroskopische Untersuchung der Verbundbeschichtungen der in situ befindlichen Fenster zeigte an allen drei Standorten keine Veränderungen gegenüber Referenzmessungen an ungealtertem Material. Das belegt die gute Alterungsbeständigkeit von Glas-ORMOCER®. Raman- und Infrarotspektroskopische Messungen sind als komplementäre Untersuchungsmethoden zu verstehen. Auffälligkeiten im Spektrum lassen sich nur für die Verbundbeschichtung des mehrfach umgehängten Testfeldes Erfurt I belegen. Sie sind mutmaßlich auf mikrobiellen Befall zurückzuführen. Die dünne Beschichtungsvariante ohne den üblichen Decklack zeigte Auffälligkeiten im Spektrum, die sich visuell aber nicht bemerkbar machen.

Lokale Trübungen bzw. „Grauschleier“ sind oberflächennahe Phänomene. Unter dem Einfluss von Lösungsmitteln nimmt die Beschichtung erneut das ursprünglich glänzende Erscheinungsbild an. Hinsichtlich der Reversibilität erweist sich die Beschichtung als nach wie vor vollständig entfernbar mit Lösungsmitteln wie Butylacetat, Methylethylketon und Ethylacetat.

Die zwischen 1995 und 1999 aufgetragene, sehr dünne **Glas-ORMOCER®-Beschichtung zur flächigen Malsichtsicherung** auf den bemalten Innenseiten der Crodell-Fenster des Erfurter Domes erscheint visuell an den drei untersuchten Fenstern absolut intakt. Es gibt keine Defektstellen oder Auffälligkeiten – weder auf dem intakten Antikglas, noch auf der fragilen Bemalung, keine Blasen, Trübungen, Risse oder Abplatzungen. Die Schwingungsspektren von Proben des Nordseitenfensters sind unverändert. An den Proben des Südwest-Fensters und des Südfensters zeigten sich Veränderungen in den Spektren. Vermutlich beruhen diese auf oxidativen, lichtinduzierten Spaltungsreaktionen im Paraloid™ B72-Anteil (als Bestandteil der Glas-ORMOCER®-Mischung). Bei künftigen Vorhaben wäre daher eine zusätzliche Funktionalisierung der Außenschutzverglasung zur Vermeidung von Strahlungsschäden sehr sinnvoll.

Als Alternative zur Außenschutzverglasung ist die Glas-ORMOCER®-Verbundbeschichtung in ihrer Funktion als Korrosionsschutz heute überholt. Anders sieht es hingegen mit der Verwendung als flächige Malsichtsicherung oder zur flächigen Hinterlegung craquelierter Gläser aus. Auch zur Beschichtung und Konsolidierung glasierter Ziegel ist ORMOCER® von großem Interesse. Die positiven Ergebnisse der vorliegenden Studie zur Langlebigkeit des Materials rechtfertigen einen weiteren Einsatz des Glas-ORMOCER® in der Denkmalpflege. Eine steigende Nachfrage dürfte dazu führen, dass Glas-ORMOCER® zukünftig stetig und in variablen Gebindegrößen verfügbar sein wird.

5 Literaturangaben

- [AMA 97] Aman, C.: Glasmalereien aus acht Jahrhunderten. Meisterwerke in Deutschland, Österreich und der Schweiz. Ihre Gefährdung und Erhaltung, hrsg. von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, in Zusammenarbeit mit dem Österreichischen Bundesdenkmalamt Wien und dem Schweizerischen Zentrum für Forschung und Information zur Glasmalerei in Romont, Leipzig 1997.
- [BAN 89] Banik, G. (Hrsg.); Lösungsmittel in der Restaurierung, Verlag der Apfel, Wien 1989, S. 94f.
- [BAY 85] Bayerisches Landesamt für Denkmalpflege (Hrsg.): Glaskonservierung Historische Glasfenster und ihre Erhaltung. Internationales Kolloquium, München und Nürnberg, 29./30. Oktober 1984, Arbeitsheft 32, München 1985.
- [BOR 99] Bornschein, F., Glass, T. und Jähn, M.: Die Glasmalereien von Charles Crodel im Dom zu Erfurt, Leipzig 1999.
- [BOR 22] Bornschein, F.: Evaluierung der Malschichtsicherung an den Crodelfenstern des Erfurter Domes in den Jahren 2021/2022. Archiv für Mittelrheinische Kirchengeschichte, Band 74, 2022.
- [BUL 21] Bulian, L.: ORMOCER® Glas als Glasur-Ergänzungstoff in der Konservierung und Restaurierung von Baukeramik des 19. und 20. Jahrhunderts im Außenbereich. Anwendungsbezogene Evaluation anhand von Testreihen. Masterarbeit, FH Potsdam, 2021.
- [Chi 01] O. Chiantore, M. Lazzari: Photo-oxidative stability of paraloid acrylic protective polymers, Polymer, 42, 2001, S. 17-27.
- [DRA 90] Drachenberg, E.: Mittelalterliche Glasmalerei in Erfurt. Dresden 1990.
- [FUC 91] Fuchs, D. R., Römich, H., Leißner J. und P. Tur: Konservierung historischer Glasfenster – Internationale Untersuchungen neuer Methoden. Forschungsbericht Teil 1, UFOPLAN Nr. 108 07 005/03, 1991.
- [FUC] Fuchs, D. R., Patzelt, M. und H. Schmidt: Umweltbedingte Schädigungen an historischen Glasfenstern. Phänomene, Mechanismen, Konservierungskonzepte, Sonderdruck aus Themenband Engin Bagda u.a., Umwelteinflüsse auf Oberflächen, o.O., o.J.
- [GRA 16] Gradmann, R.: Analysis of historical islamic glazes and the development of a substitution material, Dissertation, Würzburg, 2016, URN: nbn:de:bvb:20-opus-136233
- [NAW 03] Nawroth, K.: Neue Konservierungsmaterialien für Glasmalereien: ORMOCER® / SZA. Bewertung der Pilotstudien „Erfurt I“ und „Crodel II“, unveröffentlichte Studienarbeit, FH-Erfurt, 2003.
- [NAW 08] Nawroth, K.: Glassensormessungen zur Bewertung der Außenschutzverglasung. In: Die Chorfenster der St. Marienkirche in Frankfurt (Oder). Hrsg. Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege, Wernersche Verlagsgesellschaft, ISBN 978-3-88462-272-8, Worms, 2008, S. 225.

[RÖM 93] Römich, H., Pilz, M. und D. R. Fuchs: Konservierung historischer Glasfenster – Internationale Untersuchungen neuer Methoden. Forschungsbericht Teil 2, UFOPLAN Nr. 108 07 005/03, 1993.

[RÖM 99] Römich, H. und D. R. Fuchs: Laufende Arbeiten zur ORMOCER®-Schwarzlotfixierung an den Crodel-Fenstern des Erfurter Domes. in: Corpus Vitrearum News Letter 46, 1999.

[RÖM 05] Römich, H.: Umwelteinflüsse: Einsatz von Glassensoren; In: Die Glasmalereifenster des 14.-16. Jahrhunderts an der Kirche St. Sebald in Nürnberg – Bewertung zurückliegender Erhaltungsmaßnahmen, Abschlussbericht DBU-Projekt 18351, Verlag Roth & Bielmeier GmbH, Fürth, 2005.

[TOR 11] Torge, M. et al: Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen Glasmalereien mit starken Schäden durch anthropogene Einflüsse. Abschlussbericht des Forschungsvorhabens, gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück Az 27312-45, 2011.

[WOL 00] Wolf, A. (Hrsg): Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien. Mainz, 2000.

DBU-Forschungsprojektberichte

Modellhaftes Konservierungskonzept für umweltgeschädigte Email-Prätiosen im Grünen Gewölbe/Dresden, DBU-Projekt Az. 09715, 1996-1999.

Modellhafte Forschungen und Erhaltungsmaßnahmen an der umweltgeschädigten glasierten Ziegelfassade des Lübecker Rathauses (Weltkulturerbe) unter besonderer Berücksichtigung von Glasurersatzmaterialien (Schleswig-Holstein), DBU-Projekt Az. 20307/01, 2003-2007.

Restaurierung der wertvollen mittelalterlichen, umweltgeschädigten Glasfenster der Divi Blasii Kirche in Mühlhausen unter Berücksichtigung klimatischer Faktoren, DBU-Projekt 24545/01, 2007-2010.

Entwicklung und modellhafte Erprobung von energetisch optimierten Schutzverglasungen für anthropogen umweltgeschädigte historische Glasmalereien am Beispiel des Xantener Doms, DBU-Projekt 27471/01, 2009-2012.

Modellhafte Anwendung innovativer Restaurierungsmaterialien und -methoden zur Sicherung craquelierter Glasmalereien am Beispiel eines Bestandes umweltgeschädigter Glasfenster des Kölner Doms (Weltkulturerbe), DBU-Projekt, Az. 24583, 2009-2012.

Evaluierung und Modifizierung neuartiger Schutzkonzepte für durch anthropogene Umwelteinflüsse geschädigte Goldemailprätiosen, Elfenbein- und Bergkristallkunstobjekte – Modellhafte Anwendung am national bedeutenden Sammlungsbestand des Grünen Gewölbes, Dresden, DBU-Projekt Az. 33205, 2015 -2019.

6 Abbildungsverzeichnis

Abbildungen: 6-links, 12-links, 25-links, 29-links stammen aus Publikationen vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung [FUC 91] bzw. [RÖM 93]

Alle weiteren Abbildungen stammen von den Projektpartnern:

© Dombauarchiv Köln, Glasrestaurierungswerkstatt

© Fraunhofer-Institut für Silicatforschung

© Bischöfliches Bauamt Bistum Erfurt

7 Anhang

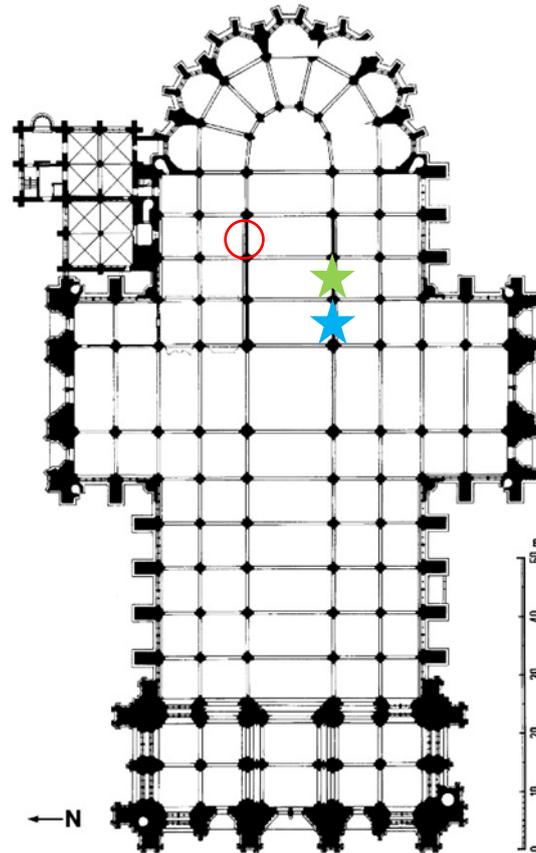
A1-A12	Erfassungsbogen Köln NVI 4bl 4br
A13-A20	Erfassungsbogen Köln NVI 4dl 4dr
A21-A25	Fotovergleich der Referenzflächen Köln
A26-A29	Reversibilitätstest Köln
A30-A34	Erfassungsbogen Erfurt nII 6d
A35-A39	Erfassungsbogen Erfurt nXIX 3b, 3c
A40-A44	Erfassungsbogen Erfurt nXIX 4b, 9c
A45-A49	Erfassungsbogen Erfurt swII 2d, 6c
A50-A54	Erfassungsbogen Erfurt sX 7c, 8e
A55-A56	Fotovergleich der Referenzflächen Erfurt
A57-A62	Klimamessdaten Erfurt
A63-70	Glasdosimeterstudie Erfurt

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

OBJEKTBESCHREIBUNG

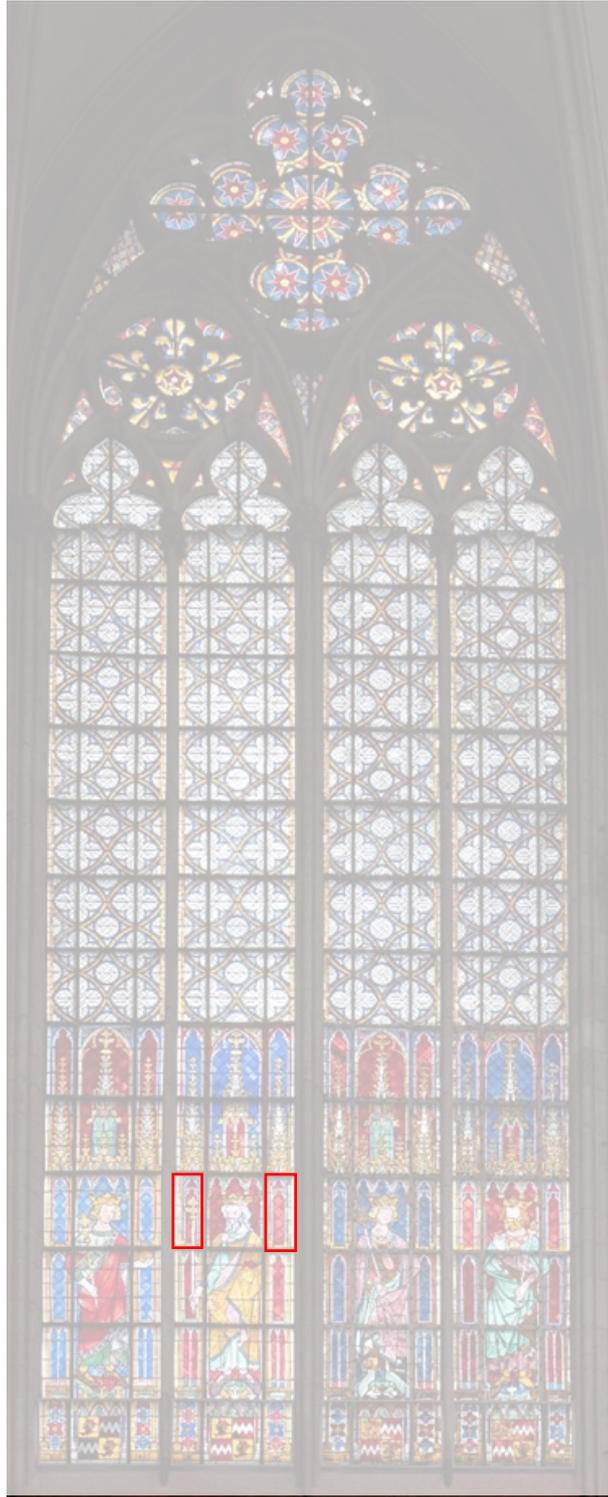
Standort, Lageplan

Köln, Hohe Domkirche Sankt Petrus



- ★ Standort SVII 1989 bis 1992
- ★ Standort SVIII 1993 bis 1998
- Originalstandort NVI

Gesamtaufnahme



Fenster Nord VI, Feld 4bl und 4br (heute 4b1 und 4b3) in situ.

Datierung

1300 / 1310

Kurzbeschreibung zum Objekt

Aus dem Königsfensterzyklus des Kölner Domchores, stehende Könige unter Architekturbaldachinen

Besitzer

Hohe Domkirche Sankt Petrus

Schutzverglasung	1992 Interimslösung mit Makrolonscheiben <i>Die historischen Scheiben blieben in ihrer ursprünglichen Fensterebene. Im Abstand von 12 cm wurden von außen an den Längsbahnen und im Maßwerk Makrolonscheiben vorgesetzt. An den Rändern lagen sie an den Steinprofilen an, die Abdichtung zum Stein erfolgte durch aufgelegte Silikonbänder. Fixiert wurden die Schutzscheiben durch Metallklammern an den mittelalterlichen Quereisen. Der Spalt zwischen der historischen Verglasung und den Makrolonscheiben war im oberen Bereich dicht; unten gab es zeitweilig einen Lüftungsschlitz nach außen.</i>
	2004 <i>Außen vorgesetzte neue Eisenkonstruktion mit entspiegeltem VSG-Glas</i>
	<i>Spaltbreite historisches Glas Schutzglas: 7,0 cm</i>
	<i>Spaltbreite zwischen den Eisen: 4,0 cm</i> <i>Spaltöffnungen an den Sockelfeldern: 3,5 cm</i> <i>Spaltöffnungen unterhalb der Spitzen je 16,0 cm</i>
Herstellungstechnik	<i>Mittelalterliches Ton- und Buntglas, teilweise bemalt mit Schwarzlot, eingefasst in mittelalterliches Blei</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	1. Schicht: Grundierungslack 50% Harz, 1:3 in Essigsäureethylester 50% Paraloid™ B72, 1:3 in Essigsäureethylester <i>Pinselauftrag in zwei Lagen</i>
	2. Schicht: Zwischenlack (= verdünnter Grundierungslack) 50% Harz, 1:10 in Essigsäureethylester 50% Paraloid™ B72, 1:10 in Essigsäureethylester <i>Pinselauftrag in drei Lagen</i> <i>In diesem Stadium werden Glasflakes (Größe: 1/64 Inch) unter Zuhilfenahme einer Hostaflonfolie eingebettet. Durch statische Aufladung haften die Glasflakes an der Folie. Nach einer kurzen Trockenphase der obersten Lackschicht (der passende Zeitpunkt hierfür ist u.a. temperatur- und luftfeuchtigkeitsabhängig) wird die Folie aufgelegt und wieder abgezogen; die Glasflakes bleiben in der noch leicht klebrigen Schicht zurück.</i>
	3. Schicht Decklack (mit UV- und Oxidationsschutzmitteln) 100% Paraloid™ B72, 1:6 in Toluol mit 0,5% Hostavin TMN 20 0,5% Hostavin Av 0,1% Hostanox 03 <i>Pinselauftrag in zwei Lagen; Angaben stammen aus der Dokumentation der Dombauhütte</i>

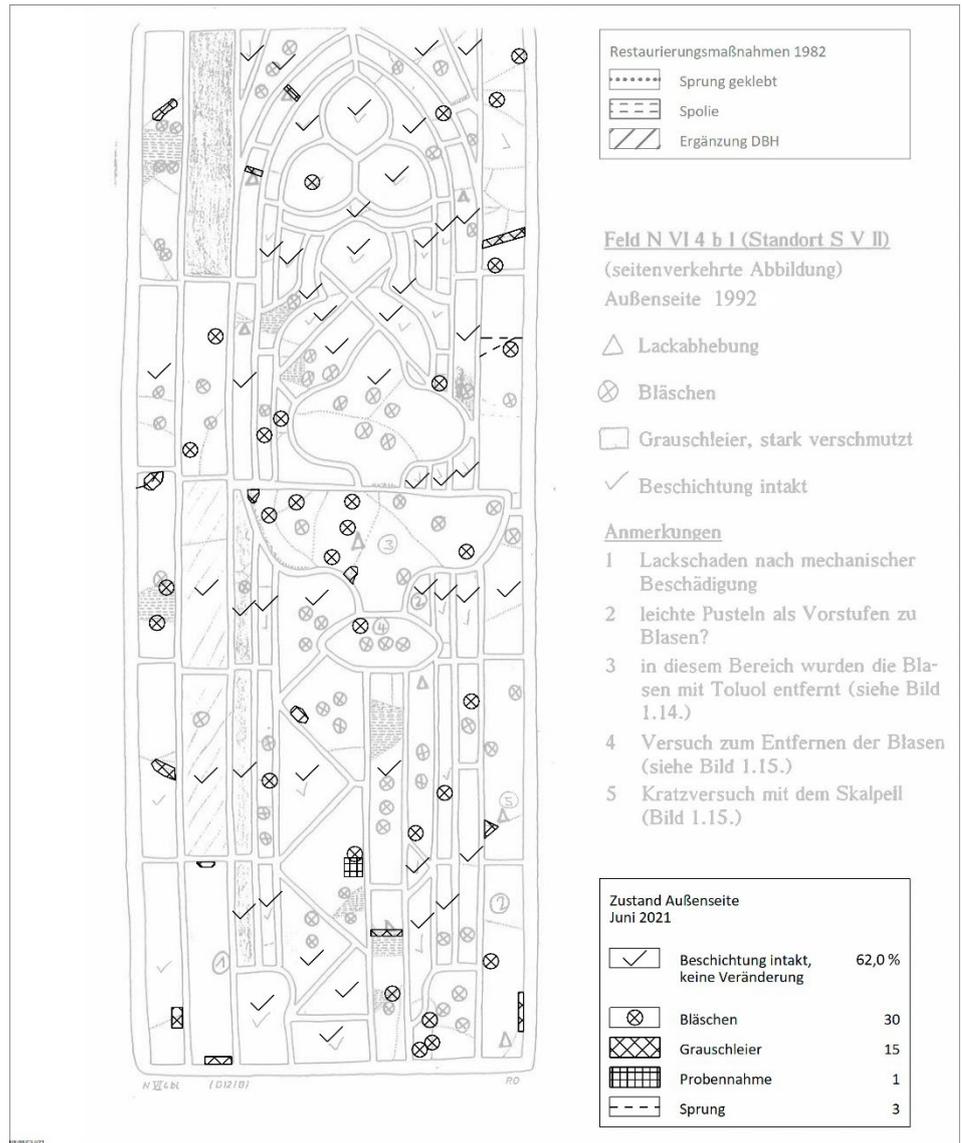
Expositionsgeschichte	<p>März 1989: <i>Feld NVI, 4bl wurde mit Beschichtung ohne Außenschutzverglasung in SVII eingebaut.</i> <i>Feld NVI, 4br wurde mit Beschichtung ohne Außenschutzverglasung in SVII eingebaut.</i></p> <p>März 1993: <i>Felder 4bl und 4br wurden ohne Außenschutzverglasung umgesetzt in das Fenster SVIII.</i></p> <p>September 1998: <i>Felder NVI, 4bl und 4br wurden für Ausstellung „Himmelslicht“ ausgebaut und bis 2001 in der Glasrestaurierungswerkstatt der Dombauhütte gelagert.</i></p> <p>2001: <i>Beide Felder wurden an ihrem ursprünglichen Standort in NVI hinter Makrolon-Schutzverglasung wieder eingebaut.</i></p> <p>2004: <i>Einbau hinter neuer Schutzverglasung.</i></p>
Frühere Begutachtungen	<p>November 1992: <i>Ausbau und Kontrolle in der Werkstatt</i></p> <p>2009: <i>Ausbau und Untersuchung im Rahmen des EU-Projektes „CONSTGLASS“</i></p> <p>2014: <i>Ausbau und Kontrolle in der Werkstatt</i></p> <p>2018: <i>Kontrolle in situ</i></p>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau und Wiedereinbau	16-06-2021; F. Busse, S. Aretz 29-11-2021; F. Busse, W. Schnepfel
Foto der Felder	 <p><i>NVI, 4bl und 4br Innenseite im Auflicht</i></p> <p><i>4bl unbeschichtet</i></p> <p><i>4br Innenseite mit ORMOCER®- Verbundbeschichtung</i></p> <p><i>NVI, 4bl und 4br Außenseite im Auflicht</i></p> <p><i>Außenseiten mit ORMOCER®- Verbundbeschichtung</i></p> <p><i>Die Beschichtung wirkt insgesamt etwas matter als die innenseitige Verbundbeschichtung auf Feld 4br.</i></p>

<p>Zustandsbeschreibung der ORMOCER®-Verbundbeschichtung</p>	<p><i>Die Beschichtungen auf den beiden Außenseiten und der Innenseite sind generell in einem guten Zustand. An einigen wenigen Stellen haben sich Blasen gebildet oder die Beschichtung scheint sich vom Glas zu lösen.</i></p> <p><i>Feld 4bl: In der außenseitigen Beschichtung finden sich Blasen vor allem in der Kreuzblume und in den rosafarbenen Architekturteilen am oberen Ende des Feldes. Abplatzungen befinden sich insbesondere auf dem blauen Glas am unteren Rand, den Randstücken und Sprüngen.</i></p> <p><i>Feld 4br: Während die Blasen an mehreren Stellen auf dem Feld zu finden sind, treten die sich ablösenden Schichten hauptsächlich an den Übergangsbereichen zum Blei und in der Umgebung von geklebten Sprüngen auf. Es gibt keine Anzeichen für neue Sprünge.</i></p> <p><i>Bei früheren Untersuchungen wurde festgestellt, dass die beiden Felder aus Lanzette b im Vergleich zu den beiden Feldern der Lanzette d mehr Blasen und Lufteinschlüsse aufwiesen. Damals wurde vermutet, dass die direkte Sonneneinstrahlung und höhere Temperaturen während der Exposition an der Südseite die Ursache sein könnten. Aus heutiger Beurteilung hat sich diese Tendenz nicht fortgesetzt. Die Beschichtungen beider Felder sind unterschiedlich erhalten: besser (4br) bzw. schlechter (4bl). Bei den beiden Feldern der d-Bahn (4dl und 4dr) ist dies anders.</i></p> <p><i>Besonderheiten an Feld NVI, 4br</i></p> <p><i>Auf der beschichteten Innenseite oben befindet sich eine raue, erhabene, braune Oberfläche. Allem Anschein nach handelt es sich hierbei um Rückstände eines Etiketts (Papier, Klebstoff etc.). Diese wurden wie die Glasoberfläche mit Glas-ORMOCER® beschichtet. Die Beschichtung ist stabil, wirkt aber durch die abweichende Untergrundbeschaffenheit wie eine Ablösung.</i></p> <p><i>Am rechten Rand des Feldes sind innenseitig Laufspuren in der Glas-ORMOCER®-Schicht sichtbar, die sich über drei Glasstücke erstrecken. Unklar ist, ab wann und weshalb diese Laufspuren aufgetreten sind; sie sind bereits 2009 dokumentiert worden.</i></p> <p><i>Auf der Außenseite befindet sich unter der ORMOCER®-Schicht eine graue, blasige Bahn, und im Randstück ist ein bräunlicher Fleck unterhalb der ORMOCER®-Schicht. Diese Phänomene sind zwischen 2014 und 2021 aufgetreten. Die Ursache ist unklar.</i></p> <p><i>Koordinaten X: 28,5 cm Y: 17,5 cm</i></p> 
---	---

Kartierung

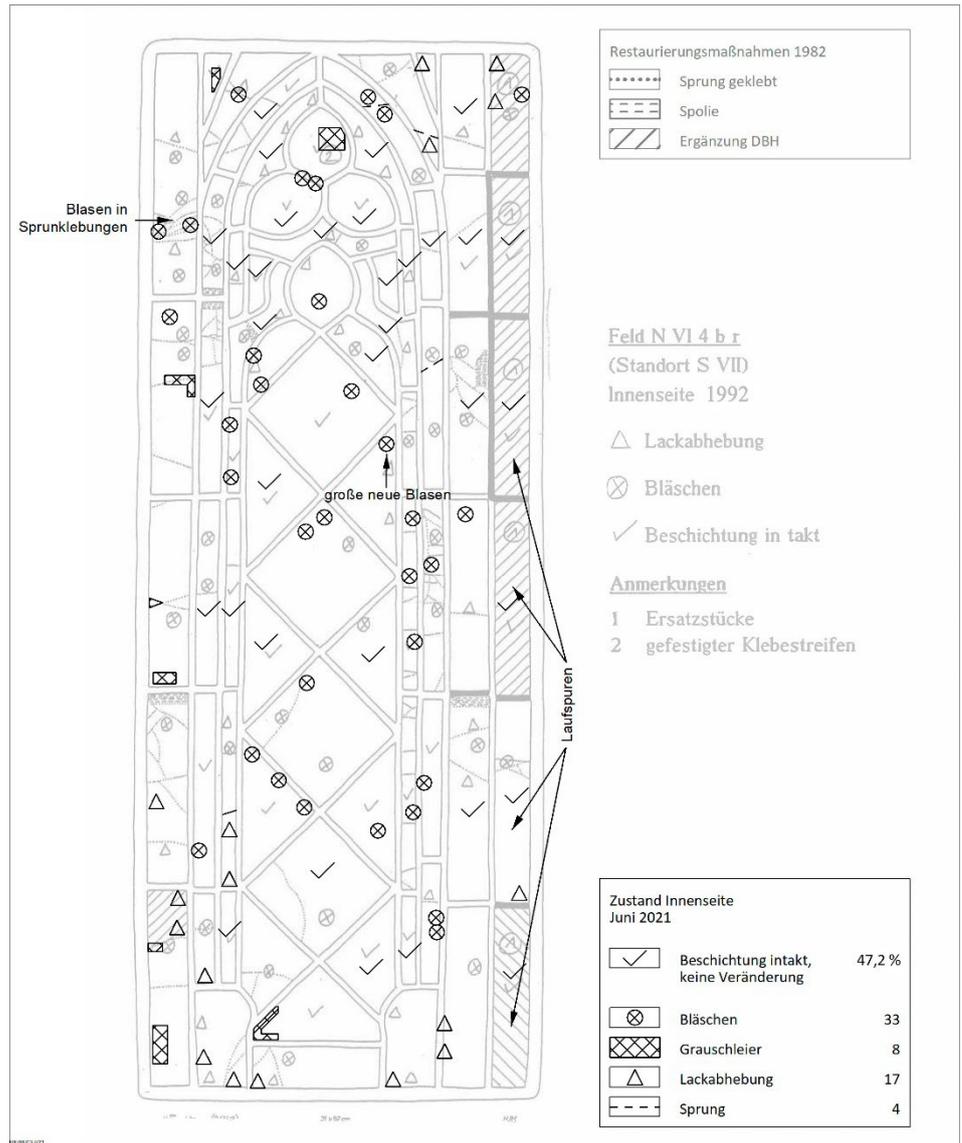
Nord VI, 4bl
Außenseite



Anmerkung: Grundlage ist die Kartierung von 1992, wobei die alten Eintragungen grau und die neuen schwarz sind. Blasen im Lacksystem wurden 1992 teils nur sehr grob kartiert – es steht also ein Symbol für mehrere Blasen. Das schränkt die Aussagekraft bei der Kartierung neuer Blasen/Schäden ein.

Kartierung

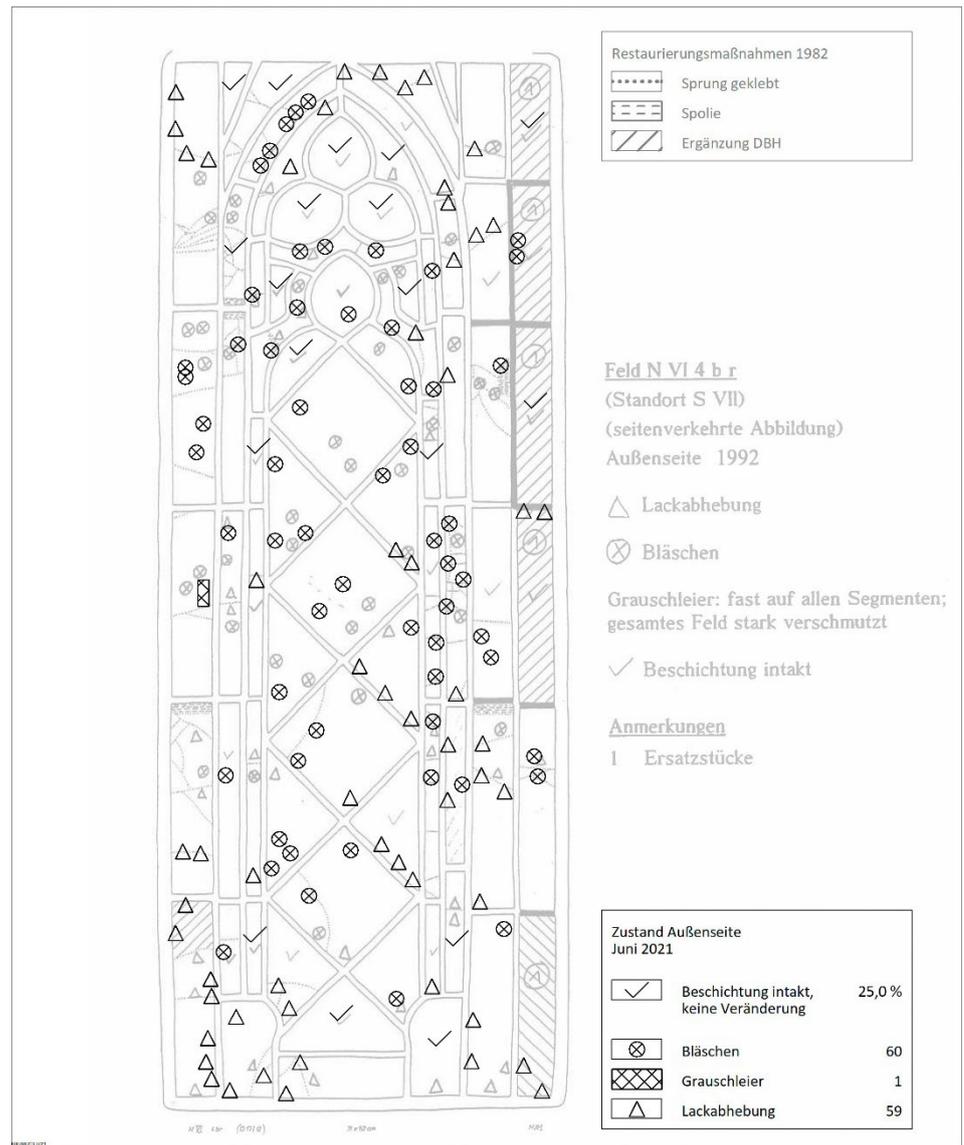
Nord VI, 4br
Innenseite



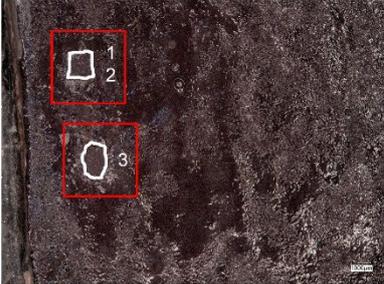
Anmerkung: Grundlage ist die Kartierung von 1992, wobei die alten Eintragungen grau und die neuen schwarz sind. Blasen im Lacksystem wurden 1992 teils nur sehr grob kartiert – es steht also ein Symbol für mehrere Blasen. Das schränkt die Aussagekraft bei der Kartierung neuer Blasen/Schäden ein.

Kartierung

Nord VI, 4br
Außenseite



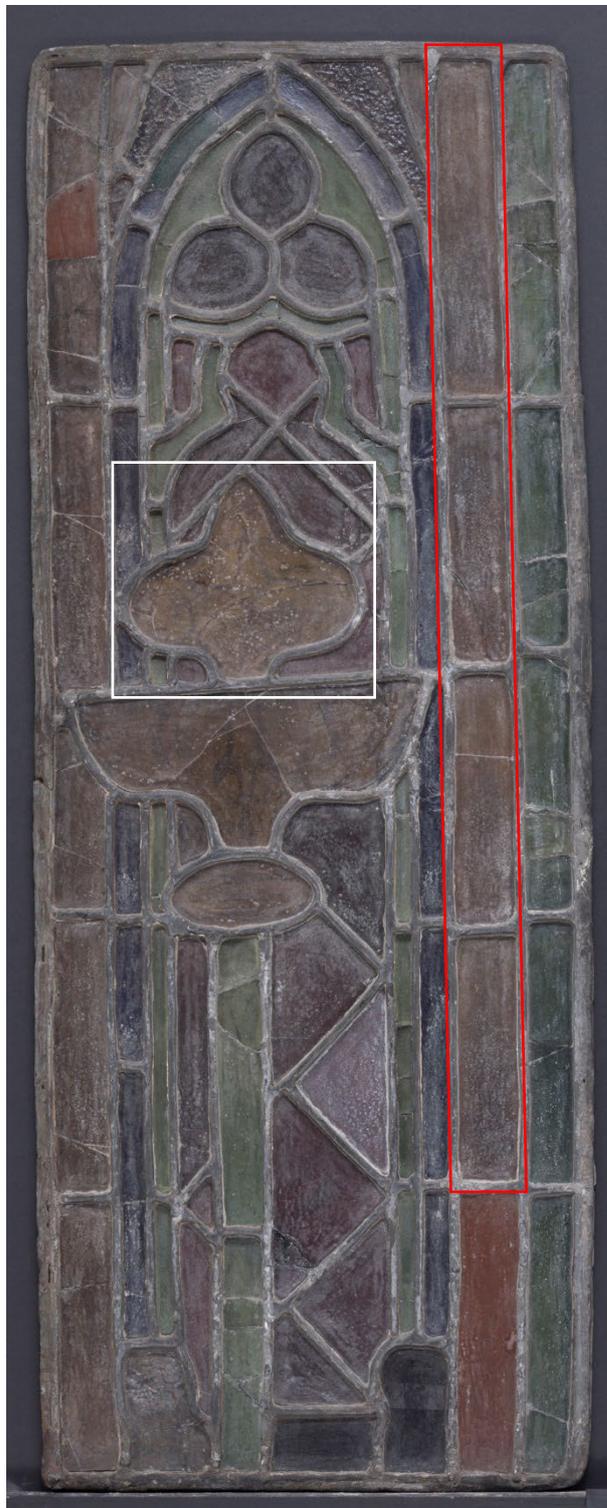
Anmerkung: Grundlage ist die Kartierung von 1992, wobei die alten Eintragungen grau und die neuen schwarz sind. Blasen im Lacksystem wurden 1992 teils nur sehr grob kartiert – es steht also ein Symbol für mehrere Blasen. Das schränkt die Aussagekraft bei der Kartierung neuer Blasen/Schäden ein.

<p>Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)</p>	<p><i>N VI 4dl – Probe K-NVI-4bl-oben und K-NVI-4bl-mitte und K-NVI-4bl-mix-oben-mitte</i> <i>Probenahme auf der Außenseite der ORMOCER®-Verbundschicht aus intaktem Bereich.</i> <i>X:14,5 cm Y: 16,3 cm; Koordinatenangabe in cm über x-y-Achse (x = von links, y = von unten)</i></p>   <p>Bereich vor der Probennahme Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)</p>  <p>Bereich nach der Probennahme Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)</p> <p>Probe 1 K-NVI-4bl-oben 2 K-NVI-4bl-mitte 3 K-NVI-4bl-mix-oben-mitte</p> <p>NVI 4bl Außenseite Foto: Glaswerkstatt (DBH Köln)</p>
<p>Bemerkungen zu den Materialproben</p>	<p><i>K-NVI-4bl-oben: Beschichtung ist augenscheinlich intakt, Abnahme eines Splitters von der Oberfläche der Beschichtung - unmittelbare Oberfläche einer Blase</i></p> <p><i>K-NVI-4bl-mitte: derselbe Entnahmebereich wie vorher, jedoch Abnahme eines Splitters aus der darunter befindlichen Zone des Schichtenpaketes</i></p> <p><i>K-NVI-4bl-mix-oben-mitte: anderer Probenahmebereich, Beschichtung ist augenscheinlich intakt; oberflächennaher aber etwas dicker Splitter – nicht bis zum Glas abgetragen</i></p>

Weitere Informationen

Auf Feld 4bl, Außenseite, wurden im Randbereich (roter Rahmen) Reversibilitätstests durchgeführt, beschrieben in Kapitel 3.4 Prüfung der Reversibilität.

In der Kreuzblume (weißer Rahmen) sind versuchsshalber zwei Blasen mit Ethylacetat und Methylethylketon niedergelegt worden (siehe Detailfoto).





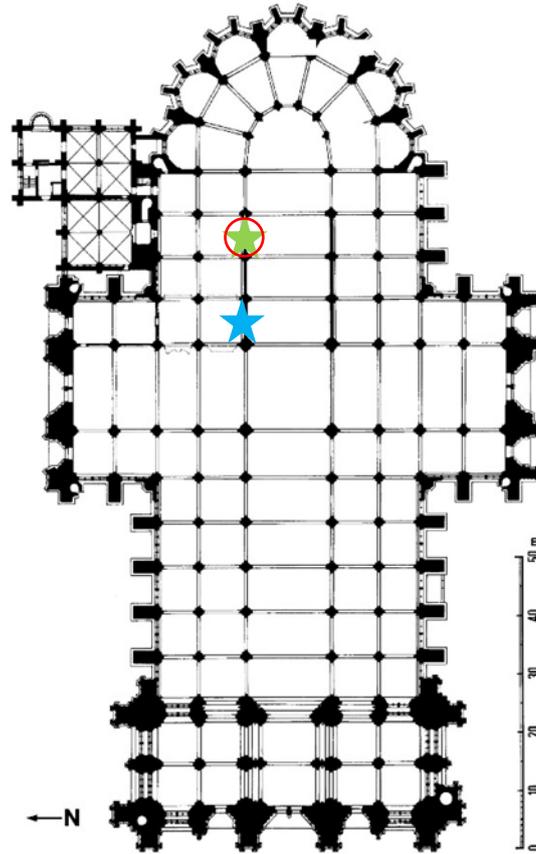
Detailfoto mit niedergelegten Blasen (rot gerahmt): die Blasen ließen sich mit Ethylacetat bzw. Methylethylketon leicht entfernen, die Beschichtung zeigt dauerhaft eine glänzende Oberfläche.

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

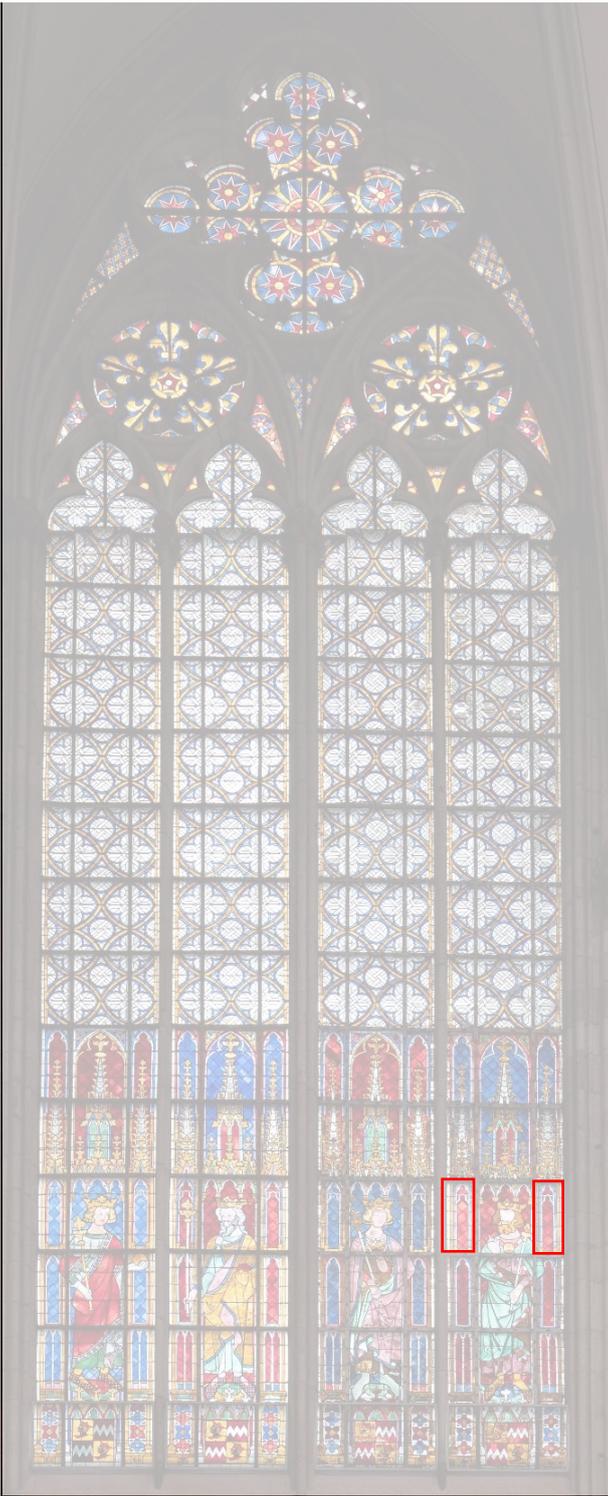
OBJEKTBESCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Köln, Hohe Domkirche Sankt Petrus



- ★ Standort SVII 1989 bis 1992
- ★ Standort SVIII 1993 bis 1998
- Originalstandort NVI

Gesamtaufnahme	 <p data-bbox="667 1742 1326 1771"><i>Fenster Nord VI, Feld 4dl und 4dr (heute 4d1 und 4d3) in situ.</i></p>
Datierung	1300 / 1310
Kurzbeschreibung zum Objekt	<i>Aus dem Königsfensterzyklus des Kölner Domchores, stehende Könige unter Architekturbaldachinen</i>
Besitzer	<i>Hohe Domkirche Sankt Petrus</i>

Schutzverglasung	1992 Interimslösung mit Makrolonscheiben <i>Die historischen Scheiben blieben in ihrer ursprünglichen Fensterebene. Im Abstand von 12 cm wurden von außen an den Längsbahnen und im Maßwerk Makrolonscheiben vorgesetzt. An den Rändern lagen sie an den Steinprofilen an, die Abdichtung zum Stein erfolgte durch aufgelegte Silikonbänder. Fixiert wurden die Schutzscheiben durch Metallklammern an den mittelalterlichen Quereisen. Der Spalt zwischen der historischen Verglasung und den Makrolonscheiben war im oberen Bereich dicht; unten gab es zeitweilig einen Lüftungsschlitz nach außen.</i>
	2004 <i>Außen vorgesetzte neue Eisenkonstruktion mit entspiegeltem VSG-Glas.</i>
	<i>Spaltbreite historisches Glas Schutzglas: 7,0 cm</i>
	<i>Spaltbreite zwischen den Eisen: 4,0 cm</i> <i>Spaltöffnungen an den Sockelfeldern: 3,5 cm</i> <i>Spaltöffnungen unterhalb der Spitzen je 16,0 cm</i>
Herstellungstechnik	<i>Mittelalterliches Ton- und Buntglas, teilweise bemalt mit Schwarzlot, eingefasst in mittelalterliches Blei</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	1. Schicht: ORMOCER®-G Grundierungslack 50% Harz, 1:3 in Essigsäureethylester 50% Paraloid™ B72, 1:3 in Essigsäureethylester <i>Pinselauftrag in zwei Lagen</i>
	2. Schicht: Zwischenlack (= verdünnter Grundierungslack) 50% Harz, 1:10 in Essigsäureethylester 50% Paraloid™ B72, 1:10 in Essigsäureethylester <i>Pinselauftrag in drei Lagen</i> <i>In diesem Stadium werden Glasflakes (Größe: 1/64 Inch) unter Zuhilfenahme einer Hostaflonfolie eingebettet. Durch statische Aufladung haften die Glasflakes an der Folie. Nach einer kurzen Trockenphase der obersten Lackschicht (der passende Zeitpunkt hierfür ist u.a. temperatur- und luftfeuchtigkeitsabhängig) wird die Folie aufgelegt und wieder abgezogen; die Glasflakes bleiben in der noch leicht klebrigen Schicht zurück.</i>
	3. Schicht Decklack (mit UV- und Oxidationsschutzmitteln) 100% Paraloid™ B72, 1:6 in Toluol mit 0,5% Hostavin TMN 20 0,5% Hostavin Av 0,1% Hostanox 03 <i>Pinselauftrag in zwei Lagen; Angaben stammen aus der Dokumentation der Dombauhütte</i>

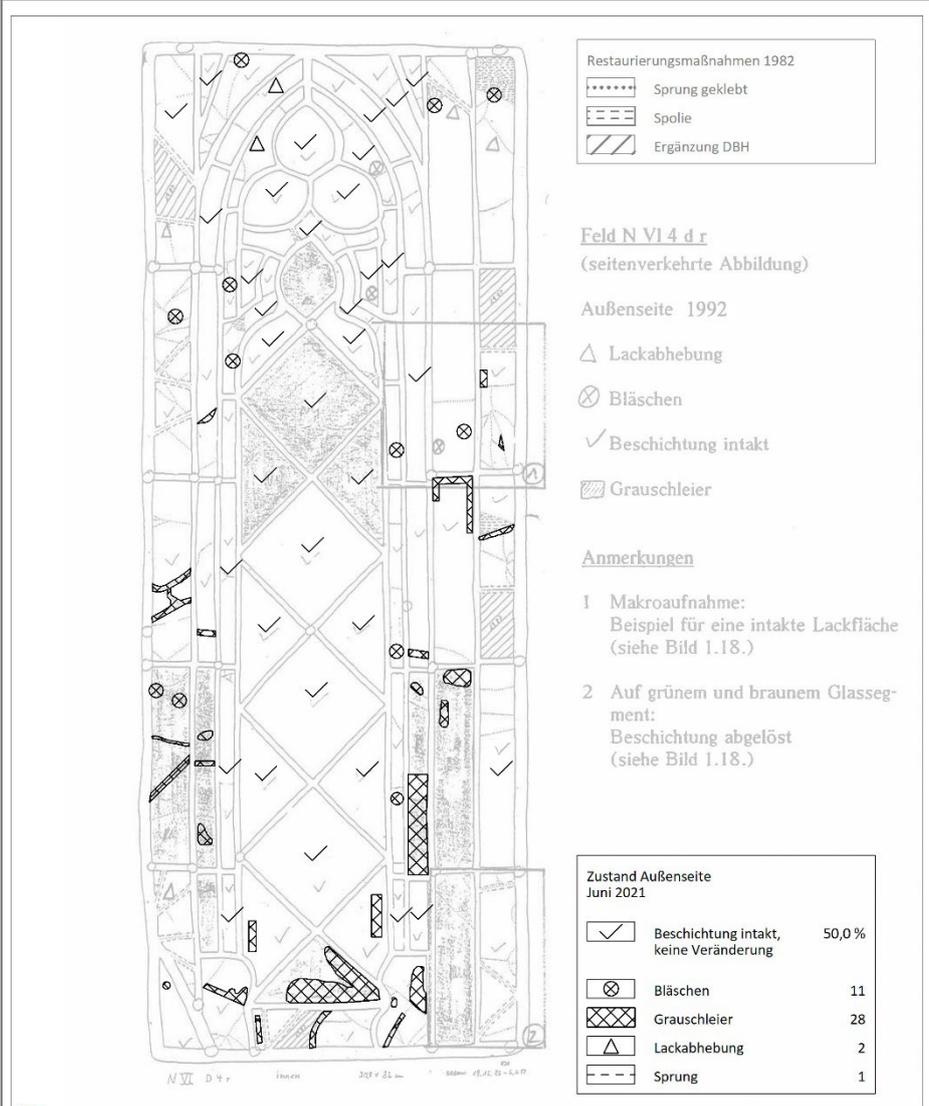
Expositionsgeschichte	<p>März 1989: <i>Feld N VI 4dl wurde mit Beschichtung ohne Außenschutzverglasung am ursprünglichen Standort eingebaut.</i> <i>Feld N VI 4dr wurde mit Beschichtung ohne Außenschutzverglasung am ursprünglichen Standort eingebaut</i></p> <p>März 1993: <i>Feld 4dl und 4dr wurden ohne Außenschutzverglasung in das Fenster NVIII umgesetzt.</i></p> <p>September 1998: <i>Felder N VI 4dl und 4dr für die Ausstellung „Himmelslicht“ ausgebaut. Sie wurden anschließend mit der kompletten Königsfigur aus der d-Lanzette in der Kunsthalle ausgestellt.</i></p> <p>März 1999: <i>Felder N VI 4dl und 4dr im Tresor der Glasrestaurierungswerkstatt gelagert</i></p> <p>2001: <i>Beide Felder wurden an ihrem ursprünglichen Standort in NVI hinter Makrolon-Schutzverglasung wieder eingebaut.</i></p> <p>2004: <i>Einbau hinter neuer Schutzverglasung.</i></p>
Frühere Begutachtungen	<p>November 1992: <i>Ausbau und Untersuchung in der Werkstatt</i></p> <p>2009: <i>Ausbau und Untersuchung im Rahmen des EU-Projektes „CONSTGLASS“</i></p> <p>2014: <i>Ausbau und Kontrolle in der Werkstatt</i></p> <p>2018: <i>Kontrolle in situ</i></p>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau und Wiedereinbau	16-06-2021; F. Busse, S. Aretz 29-11-2021; F. Busse, W. Schnepfel
Foto der Felder	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;">  </div> <div style="width: 35%;"> <p><i>N VI 4dl und 4dr Innenseite im Auflicht</i></p> <p><i>4dl Innenseite mit ORMOCER®- Verbundbeschichtung</i></p> <p><i>4dr unbeschichtet</i></p> </div> </div> <div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;">  </div> <div style="width: 35%;"> <p><i>N VI 4dl und 4dr Außenseite im Auflicht</i></p> <p><i>Außenseiten mit ORMOCER®- Verbundbeschichtung</i></p> <p><i>Die Beschichtung wirkt insgesamt etwas matter als die innenseitige Verbundbeschichtung auf Feld 4dl.</i></p> </div> </div>

<p>Zustandsbeschreibung der ORMOCER®-Verbundbeschichtung</p>	<p>Die Beschichtungen auf den beiden Außenseiten und der Innenseite sind generell in einem guten und miteinander vergleichbaren Zustand. An einigen wenigen Stellen haben sich Blasen gebildet oder die Schicht scheint sich vom Glas zu lösen. Während die Blasen verteilt an mehreren Stellen auf den Feldern zu finden sind, treten die wenigen lose Schichten an den Übergangsbereichen zum Blei und in der Umgebung von geklebten Sprüngen auf. Es gibt keine Anzeichen für neue Sprünge.</p> <p>Zum Zustand der Glas-ORMOCER®-Beschichtung auf der Innenseite von Feld 4dl gibt es keine Kartierung und auch keine Detailaufnahmen. Die Beschichtung ist im Zustand vergleichbar mit der auf der Innenseite von Feld 4br (Kartierung vorhanden).</p> <p>Wie bereits erwähnt, befinden sich die Bereiche mit Lufteinschlüssen, Blasen und kleinen Rissen hauptsächlich an den Kanten des Glases und an den Sprungklebungen. Es gibt mehrere Erklärungsmöglichkeiten:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Diese Bereiche sind anfälliger für Spannungen und/oder Bewegungen in den Feldern (Handhabung der Scheiben, Winddruck etc.). 2. Die im Paraloid™ B72 und Glas-ORMOCER® verwendeten Lösungsmittel reagieren auf das Kittöl und/oder auf den zur Sprungklebung verwendeten Klebstoff. 3. Die Dicke der aufgetragenen Schichten beeinflusst den Trocknungsprozess. Wenn eine Schicht sehr dick ist, kann sie ungleichmäßig trocknen, was zu Luftblasen und möglicherweise zu einer verminderten Haftung auf der ursprünglichen Oberfläche führen kann. 																		
<p>Kartierung</p> <p>Nord VI, 4dl Außenseite</p>	<p>Restaurierungsmaßnahmen 1982</p> <ul style="list-style-type: none"> Sprung geklebt - - - Spolie /// Ergänzung DBH <p>Feld N VI 4 d I</p> <p>Außenseite 1992</p> <ul style="list-style-type: none"> △ Lackabhebung ⊗ Bläschen (sehr klein) ▨ Grauschleier ✓ Beschichtung intakt <p>1 Mikroskopaufnahmen: Behandeln der angegrauten Lack- schicht mit Toluol (Bild 1.17.)</p> <p>Zustand Außenseite Juni 2021</p> <table border="1"> <tr> <td>✓</td> <td>Beschichtung intakt, keine Veränderung</td> <td>45,9 %</td> </tr> <tr> <td>⊗</td> <td>Bläschen</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>⊙</td> <td>defektes Bläschen</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>▨</td> <td>Grauschleier</td> <td>30</td> </tr> <tr> <td>■</td> <td>Probennahme</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>- - -</td> <td>Sprung</td> <td>2</td> </tr> </table>	✓	Beschichtung intakt, keine Veränderung	45,9 %	⊗	Bläschen	30	⊙	defektes Bläschen	6	▨	Grauschleier	30	■	Probennahme	1	- - -	Sprung	2
✓	Beschichtung intakt, keine Veränderung	45,9 %																	
⊗	Bläschen	30																	
⊙	defektes Bläschen	6																	
▨	Grauschleier	30																	
■	Probennahme	1																	
- - -	Sprung	2																	

Kartierung

Nord VI, 4dr
Außenseite

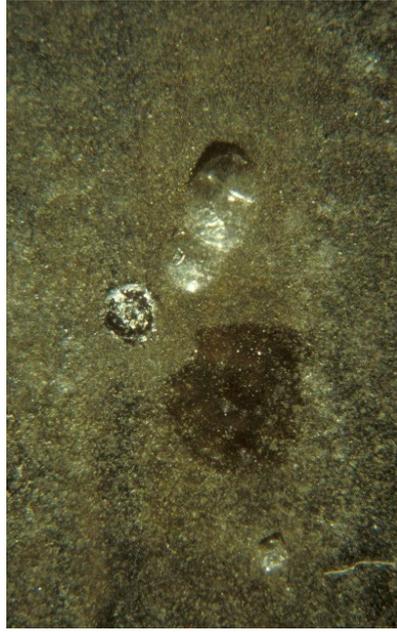


Anmerkung: Grundlage ist die Kartierung von 1992, wobei die alten Eintragungen grau und die neuen schwarz sind. Blasen im Lacksystem wurden 1992 teils nur sehr grob kartiert – es steht also ein Symbol stellvertretend für mehrere Blasen. Das schränkt die Aussagekraft bei der Kartierung neuer Blasen/Schäden ein.

<p>Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)</p>	<p><i>N VI 4dl – Probe K-NVI-4dl-locker-Nord und K-NVI-4dl-fest-Nord</i></p> <p><i>Probenahme auf der Außenseite der ORMOCER®-Verbundschicht im Bereich einer deutlichen Veränderung/Grauschleier.</i></p> <p><i>X:9,5 cm Y: 7,0 cm; Koordinatenangabe in cm über x,y-Achse (x = von links, y = von unten)</i></p>   <p>Bereich vor der Probennahme Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)</p>  <p>Bereich nach der Probennahme Mikroskopaufnahme: M. Roth (ISC)</p> <p>Probe 1 K-NVI-4dl-locker-Nord 2 K-NVI-4dl-fest-Nord</p> <p>NVI 4dl Außenseite Foto: Glaswerkstatt (DBH Köln)</p>
<p>Bemerkungen zu den Materialproben</p>	<p><i>Probenbereich mit trüber, leicht grauer Beschichtung:</i></p> <p><i>K-NVI-4dl-fest-Nord: Probensplitter war relativ fest in die Beschichtung eingebunden</i></p> <p><i>K-NVI-4dl-locker-Nord: Probensplitter ließ sich leicht entnehmen, Schichtentrennung</i></p>
<p>Weitere Informationen</p>	<p><i>An Feld 4bl wurden die aktuellen Reversibilitätstests durchgeführt.</i></p>

Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

DIA 1992

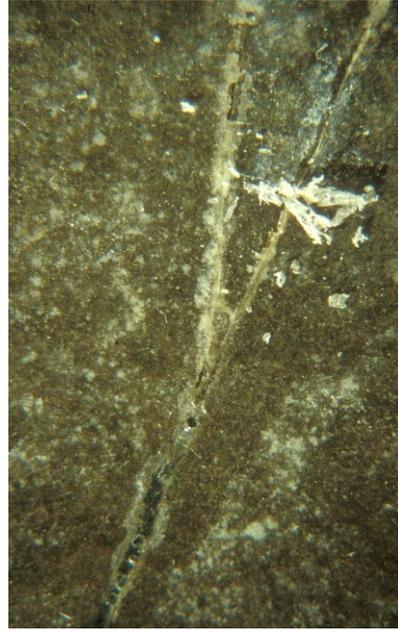


NVI 4bl außen 15_B-1-4

Foto 2009



Foto 2021



NVI 4bl außen 15_B6



Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

DIA 1992

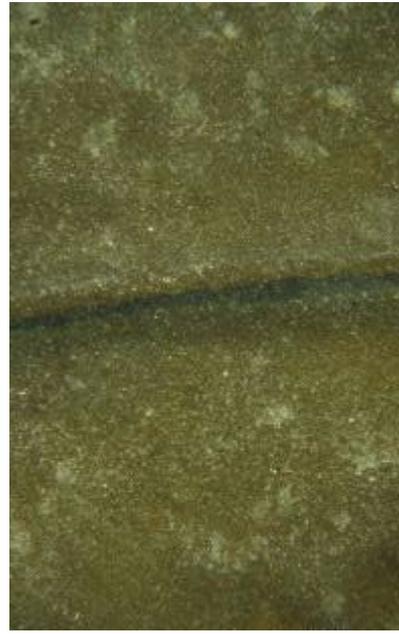
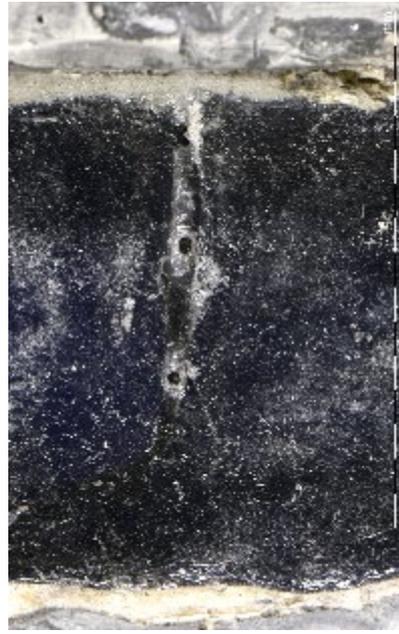


NVI 4bl außen 15_87

Foto 2009



Foto 2021



NVI 4bl außen 15_88



Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

DIA 1992



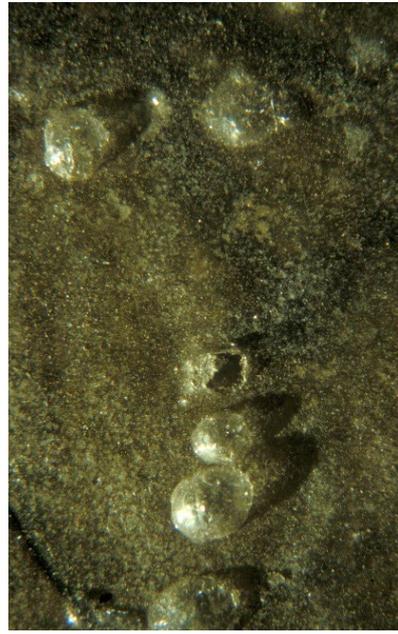
Foto 2009



Foto 2021



NVI 4bl außen J5_B10



NVI 4bl außen J5_B11

Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

DIA 1992

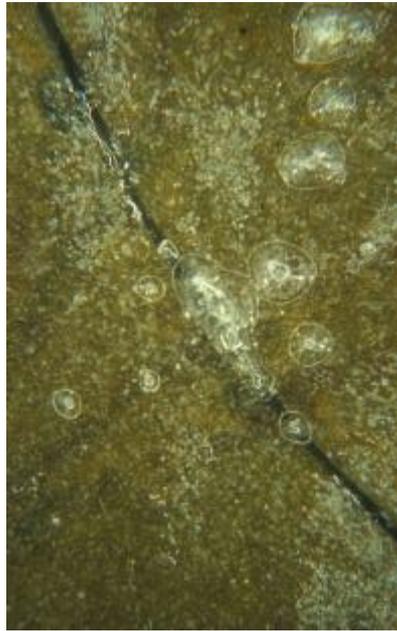


Foto 2009

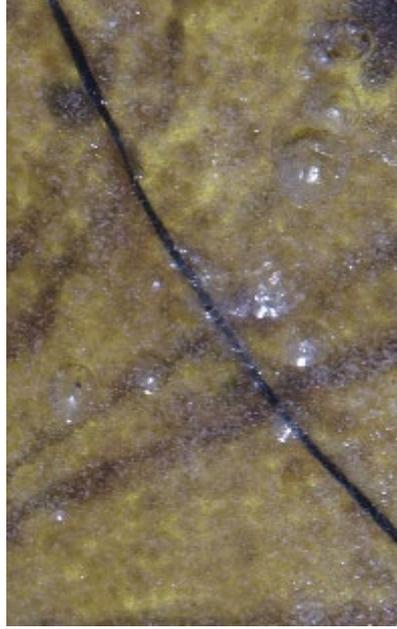
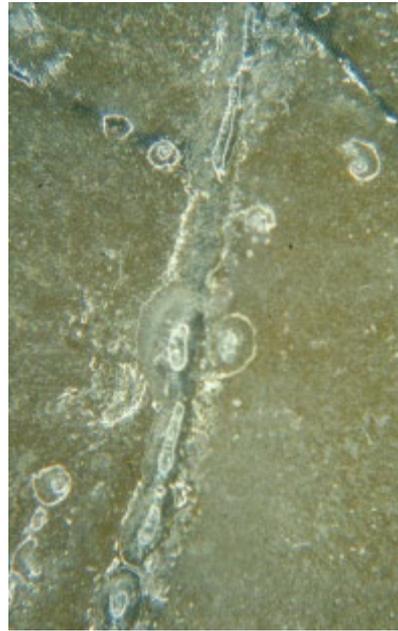


Foto 2021

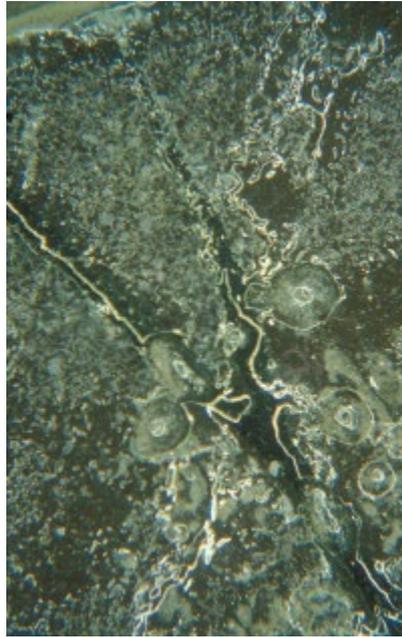


NVI 4bl außen J5_B11a

NVI 4br außen J86_B5

Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

DIA 1992

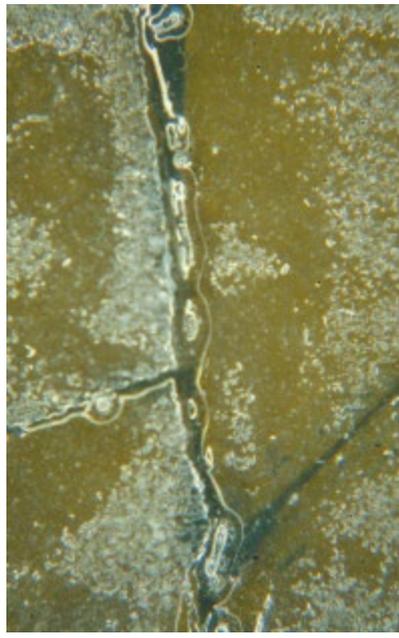


NVI 4br außen 186_B6

Foto 2009

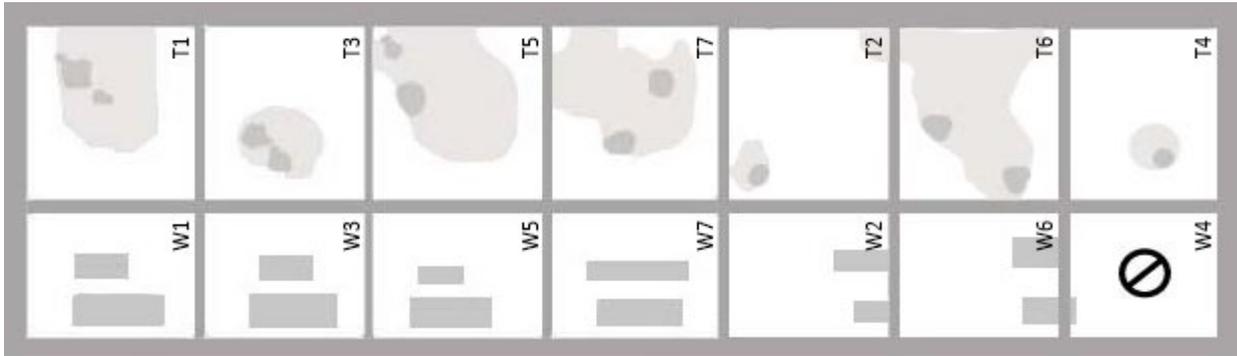


Foto 2021



NVI 4br innen 186_B7





Nr.	Lösungsmittel	Tropffest (T)	Mechanische Abnahme mit Skalpell
(1)	Aceton	Der Tropfen breitet sich sofort und unregelmäßig über eine große Fläche aus und wird erst am Glasrand durch das anliegende Blei gestoppt. Nach ca. 2 min ist das aufliegende Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung ist leicht gequollen und weich. Es bleibt ein Nasseffekt.	Die mit Lösungsmittel benetzte Fläche erweicht sehr schnell, wird allerdings nicht gelöst (vergleichbar mit Honig). Nach einem kurzen elastischen Widerstand ist das Schichtsystem leicht mechanisch bis aufs Glas entfernbar, ohne dass Material am Skalpell kleben bleibt. Das System lässt sich verhältnismäßig flächig und gezielt abheben und aufrollen. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist trocken.
(3)	Ethylacetat	Der Tropfen steht auf der Oberfläche ohne sich auszubreiten. Nach ca. 5 min ist das aufliegende Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung ist zu diesem Zeitpunkt stark gequollen, sehr weich, klebrig und schmierig. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Die benetzte Fläche erweicht mit Ethylacetat ähnlich schnell wie (1). Es gibt mit dem Skalpell weder einen merklichen Widerstand, noch einen Kontakt mit dem Glas. Das Schichtsystem klebt stark an der Skalpellklinge, umschließt diese und wird eher verschmiert als abgenommen (vergleichbar mit Karamell). Zudem zieht es nach kurzer Zeit Fäden bis ca. 2 cm Länge. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist trocken.
(5)	Butylacetat	Der Tropfen steht zunächst auf der Oberfläche, breitet sich aber nach sehr kurzer Zeit schnell bis zum Blei hin aus. Nach ca. 15 min ist das Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung ist nach mehreren Tagen noch weich. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Die mit Butylacetat benetzte Fläche wird vollständig gelöst und liegt mehrere Minuten flüssig auf der Oberfläche auf. Beim Ansetzen des Skalpells besteht sofort Glaskontakt. Nach ca. 5 min ist die erneute Verfestigung so weit fortgeschritten, dass das Schichtsystem geschoben werden kann. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist feucht. Auch nach mehreren Tagen ist die benetzte Beschichtung noch deutlich weich.
(7)	L-Butoxyethanol : Ethylacetat	Der Tropfen breitet sich sofort in unregelmäßige Richtungen aus. Nach ca. 45 min ist das aufliegende Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung wird komplett gelöst und ist auch am nächsten Tag noch sehr weich. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Die benetzte Fläche wird vollständig gelöst und ist ca. 30 min mäßig viskos. Bei der Berührung mit dem Skalpell besteht sofort Glaskontakt. Nach ca. 35 min verfestigt sich die Lösung schlagartig und erzeugt bei Berührung bis zu 5 cm lange, gleichmäßig dünne Fäden. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist feucht. Auch nach ca. 180 min ist die Fläche noch so weich, dass eine größere Menge Beschichtung abgeschoben werden kann. Die Festigkeit nimmt erst ab ca. 210 min merklich zu.
(2)	MEK	Der Tropfen steht auf der Oberfläche ohne sich auszubreiten. Nach ca. 3 min ist das aufliegende Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung ist zu diesem Zeitpunkt stark gequollen und weich. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Die mit Lösungsmittel benetzte Fläche erweicht sehr schnell. Beim Ansetzen des Skalpells ist zunächst ein leichter Widerstand des Schichtsystems spürbar. Verglichen mit (1) bildet sich hier allerdings ein elastischer Film, der sich radial abziehen lässt. Ist die Elastizitätsgrenze erreicht, reißt der Film und es bleiben scharfe Kanten stehen. Das Schichtsystem lässt sich leicht bis aufs Glas entfernen. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist trocken.
(6)	2-Butoxyethanol	Der Tropfen breitet sich sofort in unregelmäßige Richtungen aus. Nach ca. 45 min ist das aufliegende Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung wird komplett gelöst und ist auch am nächsten Tag weich. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Die mit Lösungsmittel benetzte Fläche wird vollständig gelöst und ist ca. 5 min flüssig. Danach setzt eine leichte Verfestigung ein, die ca. 40 min anhält. Nach ca. 45 min verfestigt sich die Beschichtung schlagartig deutlich und erzeugt bis zu 10 cm lange, gleichmäßig dünne Fäden an der Klinge, wobei die Beschichtung nicht bis aufs Glas abgenommen wird. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist feucht.
(4)	Toluol	Der Tropfen steht auf der Oberfläche ohne sich auszubreiten. Unmittelbar um den Tropfen herum bildet sich ein „flirrender“ Rand (benzinähnlich). Nach ca. 4 min ist das Lösungsmittel verdunstet. Die Beschichtung ist zu diesem Zeitpunkt stark gequollen und weich. Es bleibt dauerhaft ein Nasseffekt.	Während sich die unmittelbar mit Lösungsmittel benetzte Beschichtung vollständig löst, erweichen auch die umliegenden Bereiche. Bei einer Berührung der benetzten Fläche mit dem Skalpell besteht sofort Glaskontakt. Nach ca. 10 min ist sie klebrig, sodass das Schichtsystem am Skalpell haftet und flächig abgenommen werden kann. Hierbei entstehen mehrere, verschieden dicke Fäden von ca. 2 cm Länge. Die Glasoberfläche unter der Beschichtung ist feucht.

Besondere Beobachtungen während der mechanischen Abnahme mit Skalpell bei verschiedenen Lösungsmitteln.



Aceton – 2:40 min nach Benetzung



Ethylacetat – 1:10 min nach Benetzung

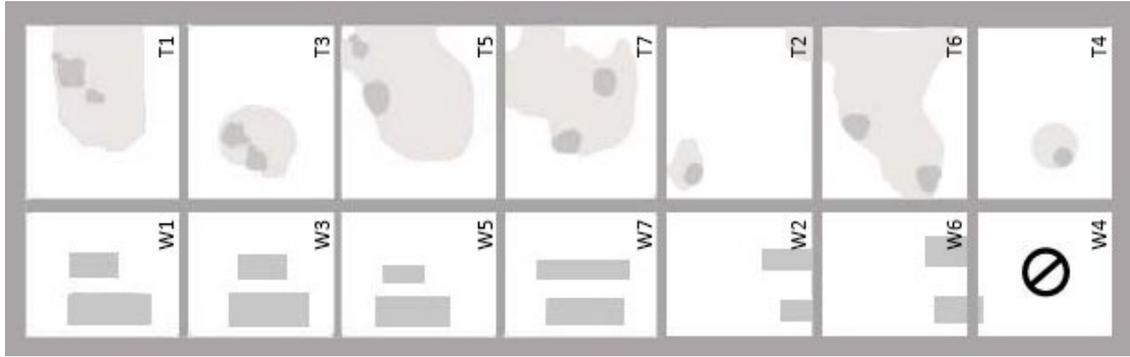


Methylethylketon (MEK) – 2:40 min nach Benetzung



Butylacetat – 5:00 min nach Benetzung

Die Abbildungen dieser Seite zeigen exemplarisch das unterschiedliche Verhalten der ORMOCER®-Verbundbeschichtung nach Auftropfen von Lösungsmittel und Berührung der Beschichtung mit einer Skalpellklinge; siehe auch vorhergehende Tabelle im Anhang A30.



Nr.	Lösungsmittel	Chemische Abnahme mit Wattestäbchen (W)
(1)	Aceton	Nach einer kurzen Einwirkzeit ist beim Abrollen und bei leichten Reibbewegungen eine haptische Veränderung deutlich spürbar. Die anfängliche Rauigkeit geht für einen sehr kurzen Moment in eine Glätte über, bei der das Wattestäbchen förmlich wegzurutschen scheint. Die sofort folgende erneute Rauigkeit signalisiert das Erreichen der Glasoberfläche. Die Abnahme ist gut und kann gezielt erfolgen und zeichnet sich durch eine klar begrenzte Fläche ohne Randbildung (Nasseffekt) mit nur wenigen Glasflakeresten aus.
(3)	Ethylacetat	Die bei (1) beschriebenen Veränderung sind auch hier spürbar, wobei die glatte Phase deutlich länger anhält. Zudem bildet sich um die Probenfläche herum ein leicht verdickter, schmaler, dunkler Rand (Nasseffekt). Es verbleiben mehr Glasflakes als bei (1) auf der Glasoberfläche.
(5)	Butylacetat	Nach einer kurzen Lösungsphase zieht die Beschichtung so schnell wieder an, dass Wattlefasern mit eingebettet werden. Diese lassen sich mit einem frischen Stäbchen kaum entfernen, es kommen eher neue Fasern hinzu. Die Aufnahme der gelösten Beschichtung ist schlecht - es entsteht eher der Eindruck die Beschichtung nur zu verschieben, statt abzunehmen. Es bildet sich um die Probenfläche herum ein verdickter, dunkler Rand (Nasseffekt).
(7)	L-Butoxyethanol : Ethylacetat	Durch die sofortige Lösung und die lange Verdunstungsphase ist die Quantität der Aufnahme nicht einschätzbar. Der behandelte Bereich bleibt lange feucht, sodass keine Glasoberfläche sichtbar wird und eine Einschätzung erst nach der vollständigen Verdunstung erfolgen kann. Hierbei fällt auf, dass der Übergang zur intakten Beschichtung eher fließend ist, mehr Glasflakes auf der Oberfläche verbleiben und eine wesentlich größerer Randbildung (Nasseffekt) um den Testbereich stattfindet.
(2)	MEK	Nach einer kurzen Lösungsphase zieht die Beschichtung sehr schnell wieder an. Die Watte scheint sich mit zunehmender Bearbeitungszeit aufzuspreizen, sodass einzelne Fasern mit eingebettet werden. Diese lassen sich mit einem frischen Stäbchen nicht entfernen, es kommen eher neue Fasern hinzu. Die Aufnahme selbst ist gut und es bleiben wenige Glasflakes auf der Oberfläche zurück.
(6)	2-Butoxyethanol	Durch die sofortige Lösung und die lange Verdunstungsphase ist die Quantität der Aufnahme nicht einschätzbar. Der behandelte Bereich bleibt lange feucht, sodass keine Glasoberfläche sichtbar wird und eine Einschätzung erst nach der vollständigen Verdunstung erfolgen kann. Hierbei fällt auf, dass die Glasoberfläche nur minimal im Zentrum des Tests freigelegt wurde, wohingegen auf der übrigen Fläche eine dünne Schicht verblieben zu sein scheint.
(4)	Toluol	Nicht durchgeführt; es stehen weniger gesundheitsbedenkliche Alternativen zur Verfügung.

Chemische Abnahme mit Kompressen

Für jedes Lösungsmittel wird am mittellaiderlichen Feld NV 4bl (4b1) ein eigenes Glasstück¹ für die Anwendung ausgewählt und anschließend in 3 Bereiche unterteilt. Für eine eindeutige Unterscheidung bleibt zwischen den einzelnen Kompressen ein schmaler Bereich unbehandelt. Ein Durchgang wirkt 10 min ein und wird pro Kompressenmaterial dreimal durchlaufen.

Nr.	Lösungsmittel	Gel (Klucel G + Lösungsmittel)	Zellstofftupfer	Watte
(3)	Ethylacetat	<p>1. Schritt: Am Japanpapier zeigen sich Glasflakes; offenbar hat sich die oberste Schicht des Glas-ORMOCER® gelöst hat. Das Glas sieht aus, als sei es mit niedrigviskosen Flüssigkeit (Lösungsmittel mit teilweise gelöstem ORMOCER®) bedeckt. Einige Glasflakes sind zusammengeschwemmt und lagern sich an einer Stelle ab.</p> <p>2. Schritt: Einige weitere Glasflakes sind vom Papier aufgenommen worden, an einigen Stellen scheint die Glasoberfläche hervorzutreten. Die verbliebenen Glasflakes haben sich auf der Fläche umverteilt.</p> <p>3. Schritt: Der größte Teil des Glas-ORMOCER® wurde entfernt. Es sind immer noch Glasflakes vorhanden, die in einer dünnen Restschicht ORMOCER® gebunden sind.</p>	<p>1. Schritt: Bei gutem Kontakt zur Oberfläche wurde ein großer Teil der ORMOCER®-Schicht in die Komprese transportiert, bei schlechtem Kontakt bildete sich eine Lösungsmittelpfütze mit teilweise gelöstem Glas-ORMOCER®, die nicht vom Zellstofftupfer absorbiert wurde.</p> <p>2. Schritt: Ein Großteil des Glas-ORMOCER®'s ist aufgesaugt und die Glasflakes sind freigelegt worden, wodurch die Oberfläche sehr weiß erscheint und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Der größte Teil des Glas-ORMOCER®'s ist aufgesaugt, die Glasflakes liegen frei und die Oberfläche glitzert stark. Die Flakes sind lose und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden. Einige Reste von Flakes verbleiben auf dem Glas.</p>	<p>1. Schritt: Die Watte stimmt sehr viel gelöstes Material auf. Ein großer Teil der Glas-ORMOCER®-Schicht wurde entfernt und die Glasflakes sind teilweise freigelegt.</p> <p>2. Schritt: Ein großer Teil der ORMOCER®-Schicht und einige der Glasflakes werden aufgenommen. Die Oberfläche erscheint weiß und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Die letzten Reste des Glas-ORMOCER®'s scheinen absorbiert worden zu sein, die Glasflakes liegen flächig locker auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden. An den Rändern sind kleine Fasern von Watte zurückgeblieben.</p>
(5)	Butylacetat	<p>1. Schritt: Dieses Gel scheint weniger Glas-ORMOCER® und Glasflakes zu absorbieren als das Ethylacetat-Gel. Die Oberfläche trocknet relativ schnell.</p> <p>2. Schritt: Das Lösungsmittel scheint sich schneller zu verflüchtigen. Die Glasflakes werden stärker gelöst, sodass ist die Oberfläche nach dem Trocknen sehr weiß erscheint und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Das Glas-ORMOCER® scheint vollständig entfernt worden zu sein. Die Glasflakes befinden sich noch auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden. Die ursprüngliche Glasoberfläche erscheint weiß.</p>	<p>1. Schritt: Ein großer Teil der Glas-ORMOCER®-Schicht ist absorbiert, die meisten Glasflakes bleiben auf dem Glas. Ein Teil der weißen Glasoberfläche ist bereits sichtbar</p> <p>2. Schritt: Ein größerer Teil der Glas-ORMOCER®-Schicht wurde zusammen mit einigen Glasflakes entfernt. Die Oberfläche erscheint weiß und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Die letzten Reste des Glas-ORMOCER®'s scheinen absorbiert worden zu sein, die Glasflakes liegen locker auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden.</p>	<p>1. Schritt: Das Lösungsmittel hat sich weit ausgebreitet und ist teilweise in den Zellstofftupfer-Testbereich geflossen. Wie auch bei den anderen Tests zu sehen ist, löst sich ein Teil des Glas-ORMOCER®'s ab.</p> <p>2. Schritt: Ein großer Teil der ORMOCER®-Schicht wurde entfernt, sodass an einigen Stellen die Oberfläche des Glases sichtbar ist. Einige der Glasflakes haben sich gelöst.</p> <p>3. Schritt: Die letzten Reste des Glas-ORMOCER®'s scheinen absorbiert worden zu sein, die Glasflakes liegen locker auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden.</p>
(2)	MEK	<p>1. Schritt: Das Gel scheint etwas weniger Glas-ORMOCER® und Glasflakes zu absorbieren als das Ethylacetat-Gel. Die Oberfläche trocknet relativ schnell.</p> <p>2. Schritt: Weitere Glasflakes sind vom Papier aufgesaugt worden, an einigen Stellen scheint die Glasoberfläche hervorzutreten.</p> <p>3. Schritt: Der größte Teil des Glas-ORMOCER®'s wurde entfernt, nur eine dünne Lage bleibt übrig. Es sind immer noch Glasflakes vorhanden, die im verbliebenen Glas-ORMOCER® haften.</p>	<p>1. Schritt: Ein großer Teil der Glas-ORMOCER®-Schicht ist absorbiert, die meisten Glasoberfläche ist bereits sichtbar</p> <p>2. Schritt: Ein größerer Teil der Glas-ORMOCER®-Schicht und einige der Glasflakes wurden entfernt. Die Oberfläche ist weiß und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Die letzten Reste des Glas-ORMOCER®'s scheinen absorbiert worden zu sein, die Glasflakes liegen locker auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden.</p>	<p>1. Schritt: Die Watte nimmt sehr viel gelöstes Material auf. Ein großer Teil der ORMOCER®-Schicht wurde entfernt und die Glasflakes sind teilweise freigelegt.</p> <p>2. Schritt: Ein größerer Teil der ORMOCER®-Schicht und einige der Glasflakes wurden entfernt. Die Oberfläche erscheint weiß und glitzert.</p> <p>3. Schritt: Die letzten Reste des Glas-ORMOCER®'s scheinen absorbiert worden zu sein, die Glasflakes liegen locker auf dem Glas und können mit einem weichen Haarpinsel entfernt werden. An den Rändern sind kleine Fasern von Watte zurückgeblieben.</p>

¹ Die Unterteilung ist in der Kartierung markiert.

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

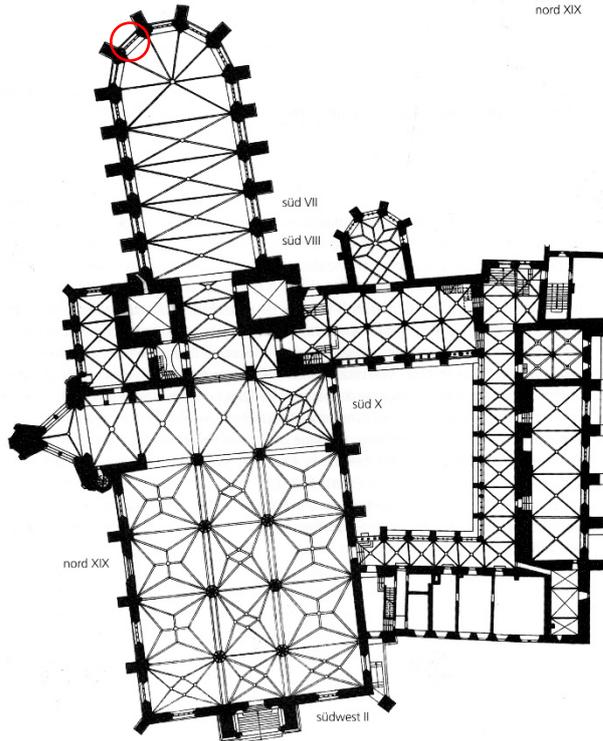
OBJEKTBESCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Erfurt, Hohe Domkirche St. Marien



süd VII Elisabethfenster
 süd VIII Offenbarungsfenster
 süd X Marienfenster
 südwest II Musikfenster
 nord XIX Heilig-Kreuz-Fenster



3 Dom zu Erfurt, Grundriss

 Originalstandort

Detailangaben, Fensternummer, sonstiger Expositionsort (aktuell)

Passionsfenster, Chor, nord II,
 Feld 6d (Projektbezeichnung Erfurt III)

Datierung

Um 1380/90

Kurzbeschreibung zum Objekt

wohl Nürnberger Werkstatt
 Darstellung: Architekturfeld

Besitzer

Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt

Schutzverglasung

Drahtgitter seit dem Mittelalter; seit 1982 Schutzverglasung ohne Kopffelder und Couronnement, seit 1991 mit denselben

Fensterglas in Rechteckteilung, 5-7 cm Abstand zwischen den zwei Verglasungsebenen, Spaltbreite: ca. 6 cm; Kopffelder in den Kirchenraum angekippt

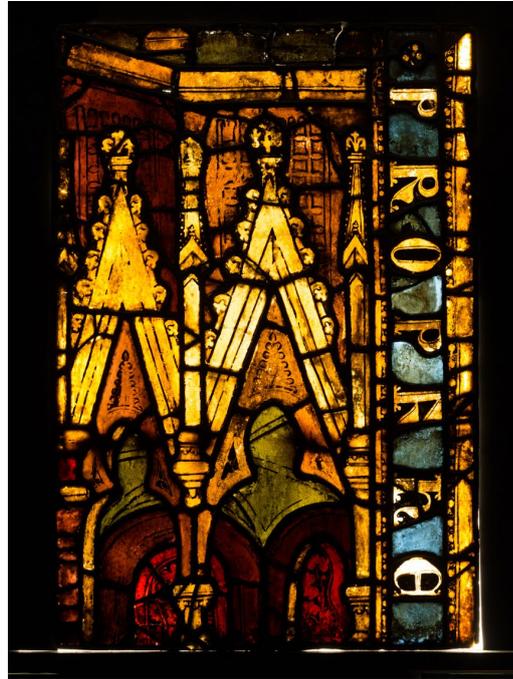
Herstellungstechnik	<i>Schwarz- und Braunlotmalerei auf Hüttenglas, das Bleinetz 1899/1900 vollständig erneuert. Glasergänzungen 1899 und 1947-49.</i>																																													
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	<p><i>ORMOCER®-Verbundbeschichtung in Varianten [FUC 91], Auftrag beidseitig, Probennahme auf der Innenseite auf von drei Segmenten</i></p> <table border="1" data-bbox="568 423 1358 600"> <thead> <tr> <th>Beschichtungsvar.</th> <th>Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)</th> <th>Methode</th> <th>ORM [%]</th> <th>PB72 [%]</th> <th>Füllstoff</th> <th>Verdünnung</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">GL^[a]</td> <td>2 (je 3 min)</td> <td>A^[b]</td> <td>50</td> <td>50</td> <td></td> <td>1:6 (EE)</td> </tr> <tr> <td>1 (1 d)</td> <td>A</td> <td>50</td> <td>50</td> <td></td> <td>1:3 (EE)</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">VB^[c]</td> <td>2 (je 3 min)</td> <td>A</td> <td>50</td> <td>50</td> <td></td> <td>1:6 (EE)</td> </tr> <tr> <td>1 (3 min)</td> <td>A</td> <td>50</td> <td>50</td> <td></td> <td>1:3 (EE)</td> </tr> <tr> <td>3 (25.5 h/26 h/42 h)</td> <td>B^[d]</td> <td>50</td> <td>50</td> <td>Glasflakes</td> <td>1:10 (EE)</td> </tr> <tr> <td>2 (2 h/1 d)</td> <td>A</td> <td></td> <td>100</td> <td></td> <td>1:9 (Tol)</td> </tr> </tbody> </table> <p>[a] GL: Grundlack (Seg. 3 und 4); [b] A: Pinselauftrag; [c] VB: Vollbeschichtung (Seg. 5); [d] B: Einlagern der Glasflakes in frisch gestrichenen Lack mit einer Hostaflon-Folie; ORM: Rohharz; PB72: Paraloid®B72; EE: Ethylacetat; Tol: Toluol.</p>	Beschichtungsvar.	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung	GL ^[a]	2 (je 3 min)	A ^[b]	50	50		1:6 (EE)	1 (1 d)	A	50	50		1:3 (EE)	VB ^[c]	2 (je 3 min)	A	50	50		1:6 (EE)	1 (3 min)	A	50	50		1:3 (EE)	3 (25.5 h/26 h/42 h)	B ^[d]	50	50	Glasflakes	1:10 (EE)	2 (2 h/1 d)	A		100		1:9 (Tol)
Beschichtungsvar.	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Methode	ORM [%]	PB72 [%]	Füllstoff	Verdünnung																																								
GL ^[a]	2 (je 3 min)	A ^[b]	50	50		1:6 (EE)																																								
	1 (1 d)	A	50	50		1:3 (EE)																																								
VB ^[c]	2 (je 3 min)	A	50	50		1:6 (EE)																																								
	1 (3 min)	A	50	50		1:3 (EE)																																								
	3 (25.5 h/26 h/42 h)	B ^[d]	50	50	Glasflakes	1:10 (EE)																																								
	2 (2 h/1 d)	A		100		1:9 (Tol)																																								
Expositionsgeschichte	<i>Seit Entstehung in situ mit folgenden Unterbrechungen: 1899/1900 zur Restaurierung in Berlin-Charlottenburg, 1940/41-1947/49 Lagerung in Kellerraum unter der Krypta (Kriegsschutz), Auslagerung und Reparatur, 1981/82 Einbau Außenschutz, Restaurierung, 1989 ORMOCER-Verbundbeschichtung, 1991 Einbau Außenschutz, seit April 2018 in Glaswerkstatt zur Restaurierung.</i>																																													
Frühere Begutachtungen	<i>1991 [FUC 91] und 1993 [RÖM 93]</i>																																													

TESTFELD, OBJEKT

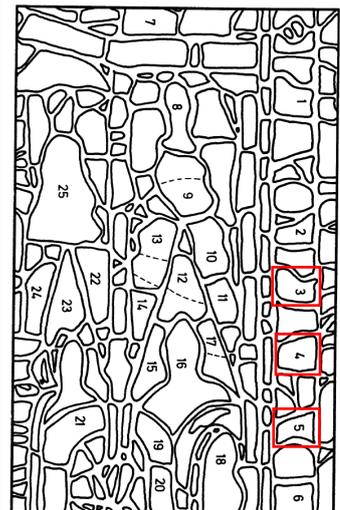
**Ausbau
Wiedereinbau**

*April 2018; T. Glaß
Einbau des gesamten Fensters ausstehend*

**Foto des Feldes bzw. des
Probenbereiches**



Fenster nord II, Feld 6d, Innenseite im Durchlicht



Links: Fenster nord II, Feld 6d, Innenseite im Auflicht mit beschichteten Segmenten; rechts: die Nummerierung in der Grafik markiert beschichtete Segmente.

	 <p><i>Fenster nord II, Feld 6d, Außenseite im Auflicht mit drei beschichteten Segmenten, die dadurch dunkler erscheinen.</i></p>
<p>Zustandsbeschreibung der beschichteten Bereiche</p>	<p><i>Feld wurde noch nicht mit Ammoniumcarbonat behandelt (durchgängiges Maßnahmenkonzept am Erfurter Dom zur Reduzierung der Wettersteinkrusten)</i></p> <p><i>Staubauflagerungen, teils stark glänzende Oberfläche in Bereichen mit dickem Decklackauftrag (Segment 5) sonst vergleichbares Erscheinungsbild, allgemein leichter Oberflächenglanz, stark bewegte Oberflächentextur aufgrund der darunterliegenden Korrosionsschichten zeichnet sich auch in der Beschichtung ab, keine Risse oder Abplatzungen der Beschichtung</i></p>
<p>Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)</p>	 <p><i>Innenseite Segment 3 = „EFIII-3“ bzw. „P13“, nur Grundlack</i></p>



Innenseite Segment 4 = EFIII-4“ bzw. „P11“, nur Grundlack



Innenseite Segment 5 = EFIII-5 bzw. „P12“, Verbundbeschichtung

Weitere Informationen

Die mit ORMOCER®-beschichteten Segmente werden nicht wie der Rest des Feldes und des Fensters mit Ammoniumcarbonat behandelt. Die Beschichtung verbleibt unverändert für zukünftige Kontrollen; dass die Segmente aufgrund der verbliebenen Wettersteinkrusten optisch herausfallen wird akzeptiert.

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

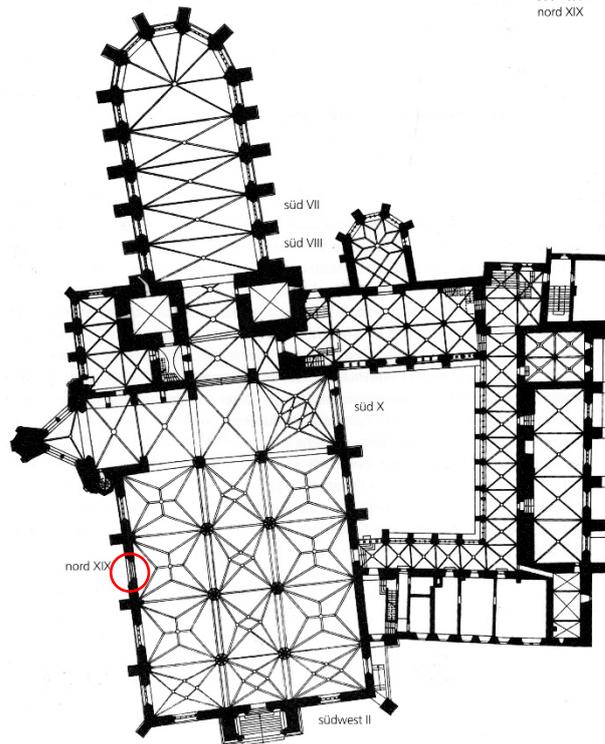
OBJEKTBE SCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Erfurt, Hohe Domkirche St. Marien

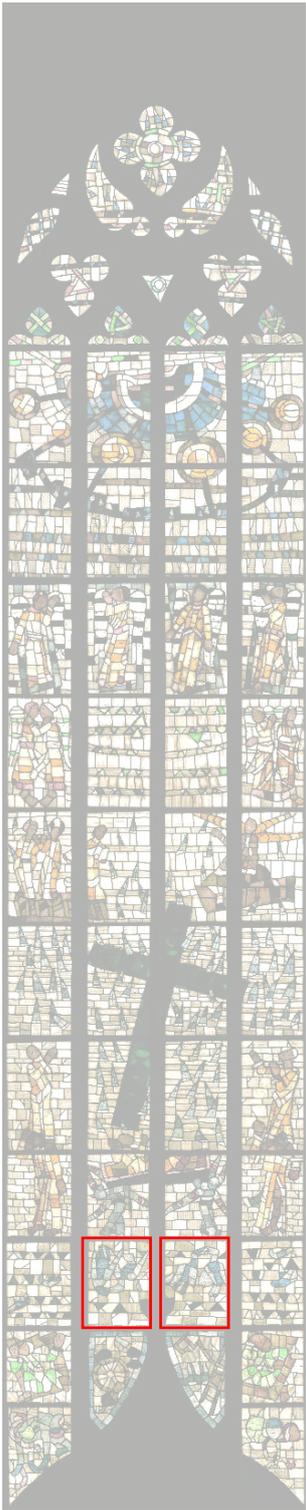


süd VII	Elisabethfenster
süd VIII	Offenbarungsfenster
süd X	Marienfenster
südwest II	Musikfenster
nord XIX	Heilig-Kreuz-Fenster



3 Dom zu Erfurt, Grundriss

Originalstandort

<p>Gesamtaufnahme</p>	 <p><i>Hl.-Kreuz-Fenster, Langhaus nord XIX 3b und 3c</i> <i>Aktueller Expositionsort: in der Werkstatt</i></p>
<p>Datierung</p>	<p>1962</p>
<p>Kurzbeschreibung zum Objekt</p>	<p><i>Malerei: Charles Crodel (München)</i> <i>Brand und Verbleiung: Glaswerkstatt Ferdinand Müller (Quedlinburg)</i> <i>Darstellung: Vögel</i></p>

Besitzer	<i>Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt</i>
Schutzverglasung	<i>N.A.</i>
Herstellungstechnik	<i>Musivische Glasmalerei; Schwarz- und Braunlotmalerei auf (modernem) Antikglas</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	<i>Glas-ORMOCER® (ORG Rohharz:Paraloid, 50:50 Gew. %), Verdünnung 1:10 Gew. %, Lösungsmittel Essigester (Konturen bis zur Sättigung, anschließend dünn über die gesamte Fläche, z.T. mit Bleien, bei dicken Konturen ggf. ein drittes Mal) Durchführung der Maßnahmen am Fenster nord XIX zwischen April 1998 und Oktober 1999</i>
Expositionsgeschichte	<i>Seit 1963 in situ; April 1998 ausgebaut, zwischen April 1998 und Oktober 1999 in der Glaswerkstatt Malschichtgesichert; seither in der Glaswerkstatt in einem Fach (ohne Lichteinwirkung dunkel) gelagert. Original in situ durch ein auf Plexiglas aufgezoogenes Foto ersetzt.</i>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau Wiedereinbau	<i>April 1998; T. Glaß Verbleibt in Glaswerkstatt</i>
Fotos der Felder	 <p><i>nXIX 3b, Innenseite im Durchlicht</i></p>  <p><i>nXIX 3c, Innenseite im Durchlicht</i></p>

Zustandsbeschreibung der beschichteten Bereiche	<i>Optische Begutachtung: augenscheinlich und durch Zeiss-Lichtmikroskop. Leicht verstaubt; glänzende Oberfläche; keinerlei Schäden in der Beschichtung zu erkennen</i>
Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)	<i>Keine Probeentnahme</i>
Mikroskopische Befunde	<i>Sicherung augenscheinlich und durch optische Begutachtung mit Zeiss-Lichtmikroskop völlig intakt</i>
Weitere Informationen	<i>Bemessung der Lagerungsbedingungen mittels Glasdosimetern, siehe Anhang „Glasdosimeterstudie am Erfurter Dom“</i>

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

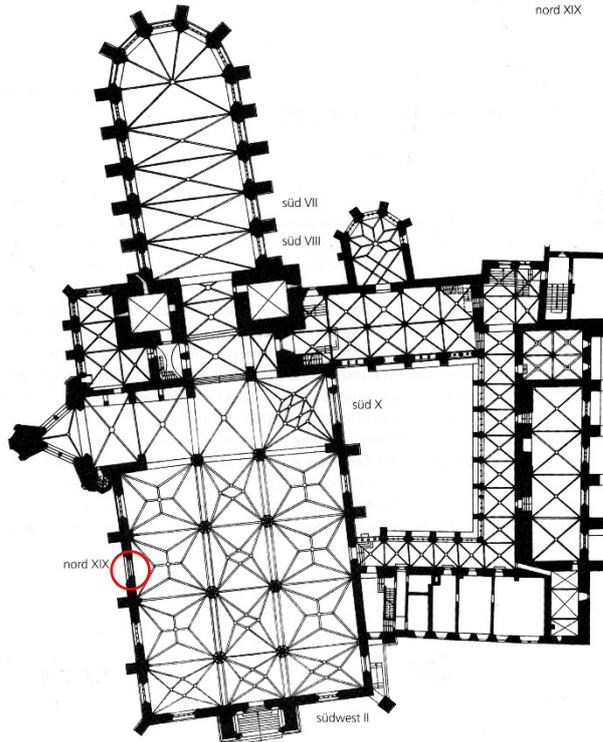
OBJEKTBE SCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Erfurt, Hohe Domkirche St. Marien

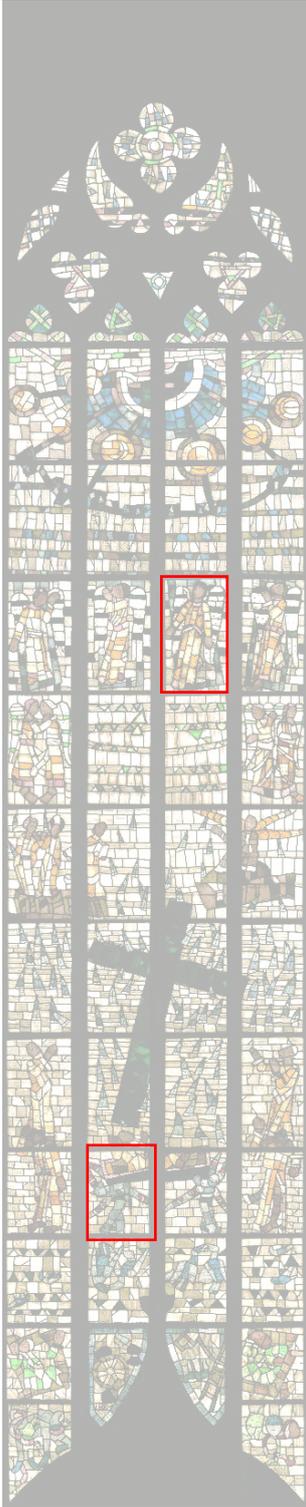


süd VII	Elisabethfenster
süd VIII	Offenbarungsfenster
süd X	Marienfenster
südwest II	Musikfenster
nord XIX	Heilig-Kreuz-Fenster



3 Dom zu Erfurt, Grundriss

Originalstandort

<p>Gesamtaufnahme</p>	 <p><i>Hl.-Kreuz-Fenster, Langhaus nord XIX, Felder 4b und 9c</i></p> <p><i>Aktueller Expositionsort: in situ</i></p>
<p>Datierung</p>	<p>1962</p>
<p>Kurzbeschreibung zum Objekt</p>	<p><i>Malerei: Charles Crodel (München)</i> <i>Brand und Verbleiung: Glaswerkstatt Ferdinand Müller (Quedlinburg)</i> <i>Darstellung: Engel</i></p>

Besitzer	<i>Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt</i>
Schutzverglasung	<i>Seit Oktober 1999 hinter Schutzverglasung</i>
	<i>Fensterglas in Rechteckteilung, 5-7 cm Abstand zwischen den zwei Verglasungsebenen, Spaltbreite: ca. 6 cm; Kopffelder in den Kirchenraum angekippt</i>
Herstellungstechnik	<i>Musivische Glasmalerei; Schwarz- und Braunlotmalerei auf (modernem) Antikglas.</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	<i>Glas-ORMOCER® (ORG Rohharz:Paraloid, 50:50 Gew. %), Verdünnung 1:10 Gew. %, Lösungsmittel Essigester (Konturen bis zur Sättigung, anschließend dünn über die gesamte Fläche, z.T. mit Bleien, bei dicken Konturen ggf. ein drittes Mal) Durchführung der Maßnahmen am Fenster nord XIX zwischen April 1998 und Oktober 1999</i>
Expositionsgeschichte	<i>Seit 1963 in situ; April 1998 ausgebaut, zwischen April 1998 und Oktober 1999 in der Glaswerkstatt Malschicht gesichert; zwischen 5. November und 1. Dezember 2020 zur Begutachtung in Glaswerkstatt</i>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau Wiedereinbau	5. November 2020; T. Glaß 1. Dezember 2020; T. Glaß
Fotos der Felder	<div data-bbox="571 365 1043 967" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="571 981 975 1014"><i>nord XIX 4b, Innenseite im Durchlicht</i></p> <div data-bbox="571 1077 1043 1899" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="571 1912 975 1946"><i>nord XIX 9c, Innenseite im Durchlicht</i></p>
Zustandsbeschreibung der beschichteten Bereiche	<i>Leicht verstaubt; glänzende Oberfläche</i>

Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)	<p><i>Feld 4b: (Mischprobe, nicht analysiert)</i> <i>Probe P9: 3,5 cm x 16,7 cm und 15,0 x 16,8 cm und 18,0 x 18,5 cm</i></p> <p><i>Feld 9c:</i> <i>Probe P5 bzw. „Crodel-nXIX-9c“: 45,0 cm x 31,5 cm (Malschichtsicherung)</i> <i>Probe P6 bzw. „Crodel-nXIX-9c-Malschicht“: Schwarzlot</i></p> <p><i>(Koordinaten gemessen jeweils von der Innenseite der Innenkante Rahmung)</i></p>
Mikroskopische Befunde	<p><i>Sicherung augenscheinlich und durch optische Begutachtung mit Zeiss-Lichtmikroskop völlig intakt</i></p>
Weitere Informationen	<p><i>P9: Abkratzen auf fast blankem Glas, min. Halbtonbemalung</i></p> <p><i>P5: auf unbemaltem Glas, größerer Bereich als Probe</i> <i>Probeentnahme optimiert, sehr kleinteilige Teilchen, keine Flitter</i></p> <p><i>P6: dicke Kontur, am Rand ausgedünnt</i></p>

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

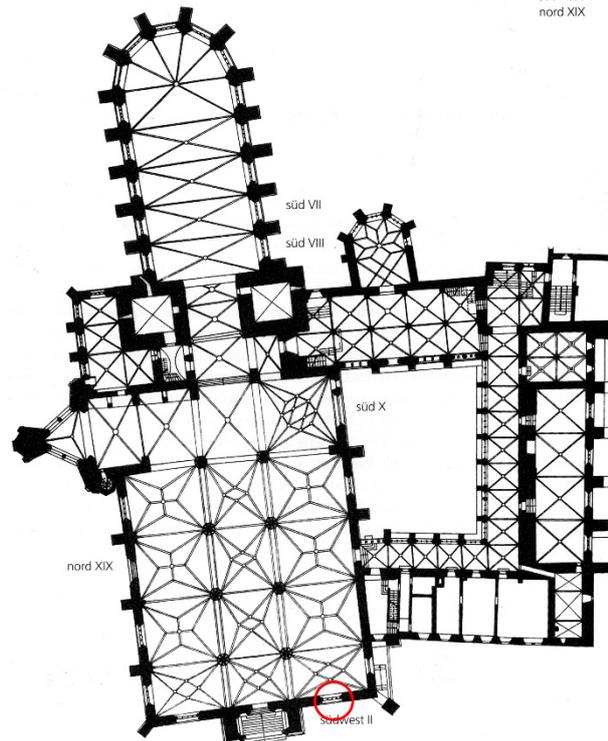
OBJEKTBESCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Erfurt, Hohe Domkirche St. Marien

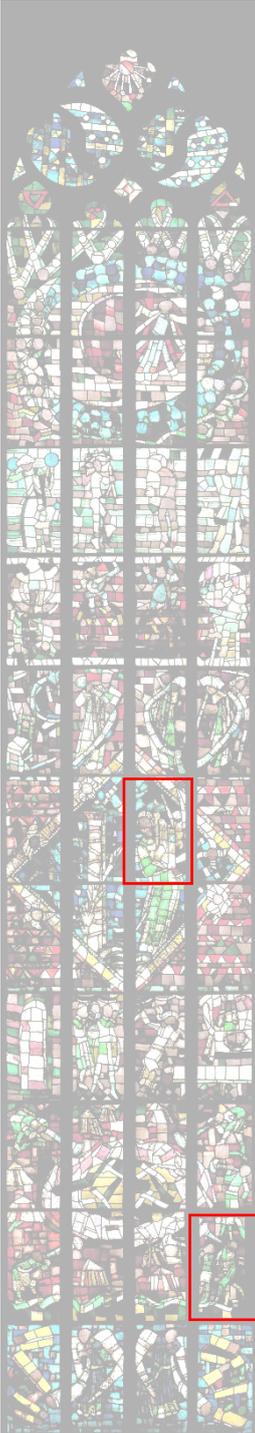


süd VII Elisabethfenster
süd VIII Offenbarungsfenster
süd X Marienfenster
südwest II Musikfenster
nord XIX Heilig-Kreuz-Fenster



3 Dom zu Erfurt, Grundriss

 Originalstandort

Gesamtaufnahme	 <p data-bbox="628 1659 1378 1693"><i>Musik- oder Caecilien-Fenster, Langhaus südwest II, Felder 2d und 6c</i></p> <p data-bbox="831 1709 1171 1738"><i>Aktueller Expositionsort: in situ</i></p>
Datierung	1962
Kurzbeschreibung zum Objekt	<p data-bbox="563 1823 943 1852"><i>Malerei: Charles Crodel (München)</i></p> <p data-bbox="563 1856 1315 1886"><i>Brand und Verbleiung: Glaswerkstatt Ferdinand Müller (Quedlinburg)</i></p> <p data-bbox="563 1890 823 1919"><i>Darstellung: Hl. Caecilie</i></p>

Besitzer	<i>Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt</i>
Schutzverglasung	<i>Seit März 1999 hinter Schutzverglasung</i>
	<i>Fensterglas in Rechteckteilung, 5-7 cm Abstand zwischen den zwei Verglasungsebenen, Spaltbreite: ca. 6 cm; Kopffelder in den Kirchenraum angekippt</i>
Herstellungstechnik	<i>Musivische Glasmalerei; Schwarz- und Braunlotmalerei auf (modernem) Antikglas</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	<i>Glas-ORMOCER® (ORG Rohharz: Paraloid, 50:50 Gew. %), Verdünnung 1:10 Gew. %, Lösungsmittel Essigester (Konturen bis zur Sättigung, anschließend dünn über die gesamte Fläche, z.T. mit Bleien, bei dicken Konturen ggf. ein drittes Mal) <i>Durchführung der Maßnahmen am Fenster südwest II zwischen Juni 1997 und März 1999.</i></i>
Expositionsgeschichte	<i>Seit Entstehung in situ; Juni 1997 ausgebaut, zwischen Juni 1997 und März 1999 in der Glaswerkstatt Malschicht gesichert; Wiedereinbau im März 1999; zwischen 5. November und 1. Dezember 2020 zur Begutachtung in Glaswerkstatt</i>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau Wiedereinbau	5. November 2020; T. Glaß 1. Dezember 2020; T. Glaß
Fotos der Felder	<div data-bbox="571 362 911 1028" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="571 1048 997 1077"><i>südwest II, 2d, Innenseite im Durchlicht</i></p> <div data-bbox="571 1140 911 1843" data-label="Image"> </div> <p data-bbox="571 1863 997 1892"><i>südwest II, 6c, Innenseite im Durchlicht</i></p>
Zustandsbeschreibung der beschichteten Bereiche	<p data-bbox="571 1926 1364 1955"><i>Optische Begutachtung: augenscheinlich und durch Zeiss-Lichtmikroskop.</i></p> <p data-bbox="571 1975 1417 2033"><i>Leicht verstaubt; glänzende Oberfläche; keinerlei Schäden in der Beschichtung zu erkennen</i></p>

Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)	<i>2d: keine Probeentnahme 6c: Probe P8 bzw. „CrodelswII-6c“: 23,5 cm x 11,1 cm und 17,0 cm x 4,8 cm (Koordinaten gemessen jeweils von der Innenseite der Innenkante Rahmung), Mischprobe</i>
Mikroskopische Befunde	<i>Sicherung augenscheinlich und durch optische Begutachtung mit Zeiss-Lichtmikroskop völlig intakt</i>
Weitere Informationen	<i>Probe P8: Malschichtsicherung, vergleichsweise leichtes Abkratzen mit Skalpell, darunter glänzendes Glas</i>

Projekt: Evaluierung der modellhaften Anwendung von ORMOCER®-Beschichtungen zum Schutz wertvoller historischer Glasmalereien vor klimatischen Einflüssen und anthropogenen Emissionen

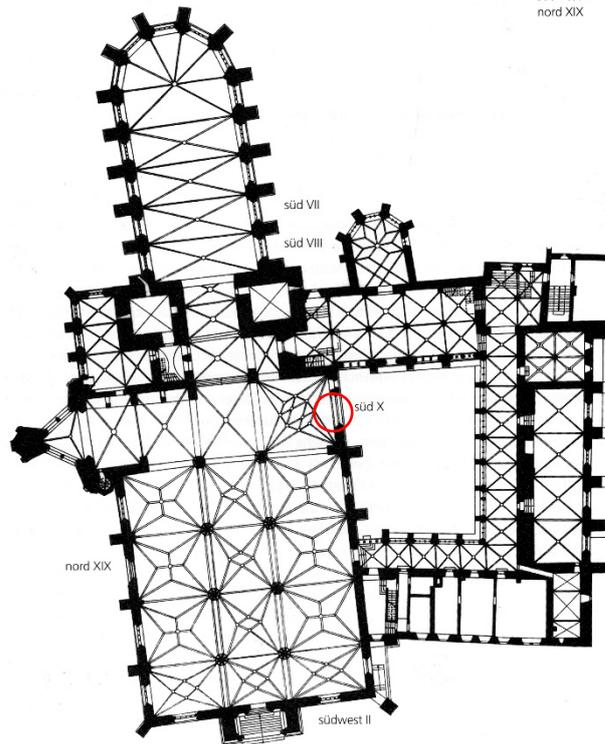
OBJEKTBE SCHREIBUNG

Standort, Lageplan

Erfurt, Hohe Domkirche St. Marien

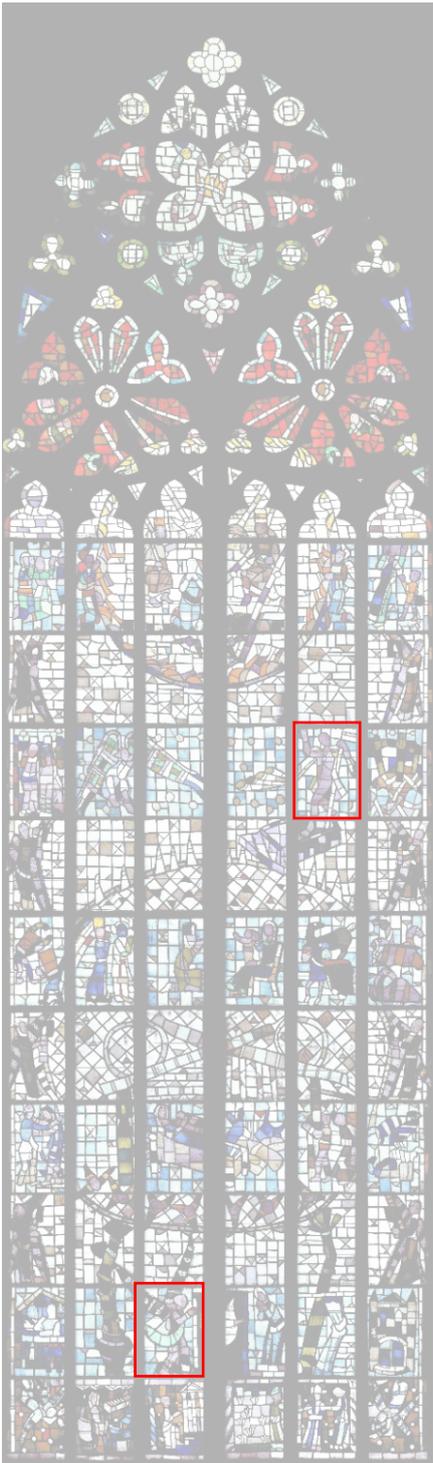


süd VII	Elisabethfenster
süd VIII	Offenbarungsfenster
süd X	Marienfenster
südwest II	Musikfenster
nord XIX	Heilig-Kreuz-Fenster

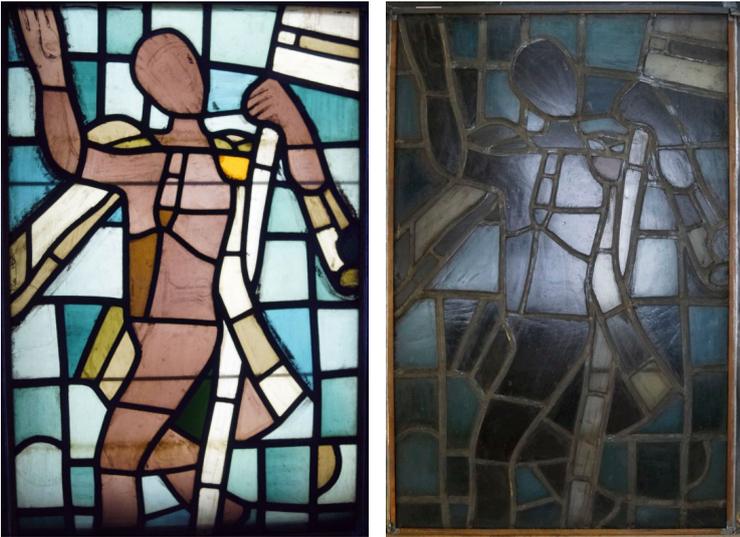


3 Dom zu Erfurt, Grundriss

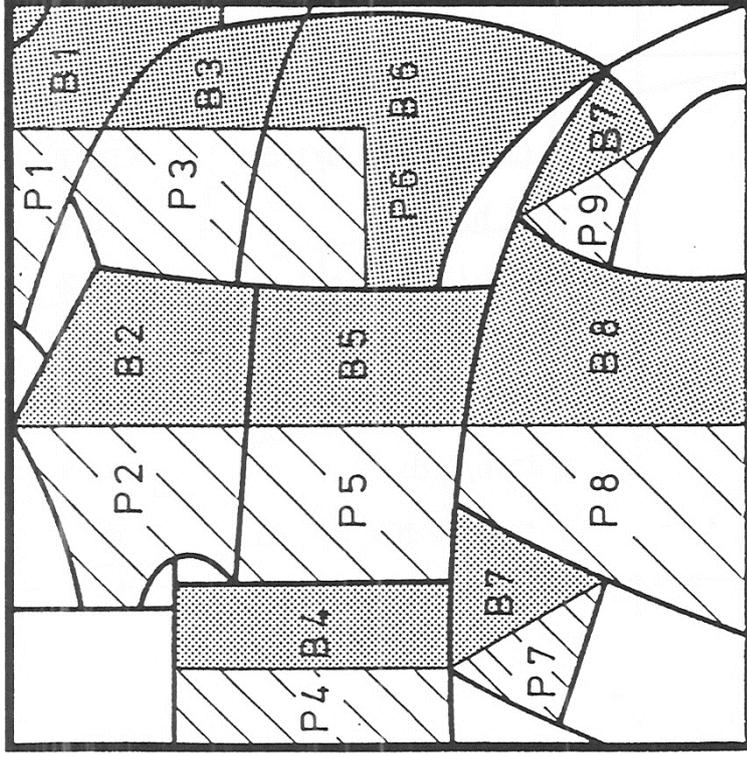
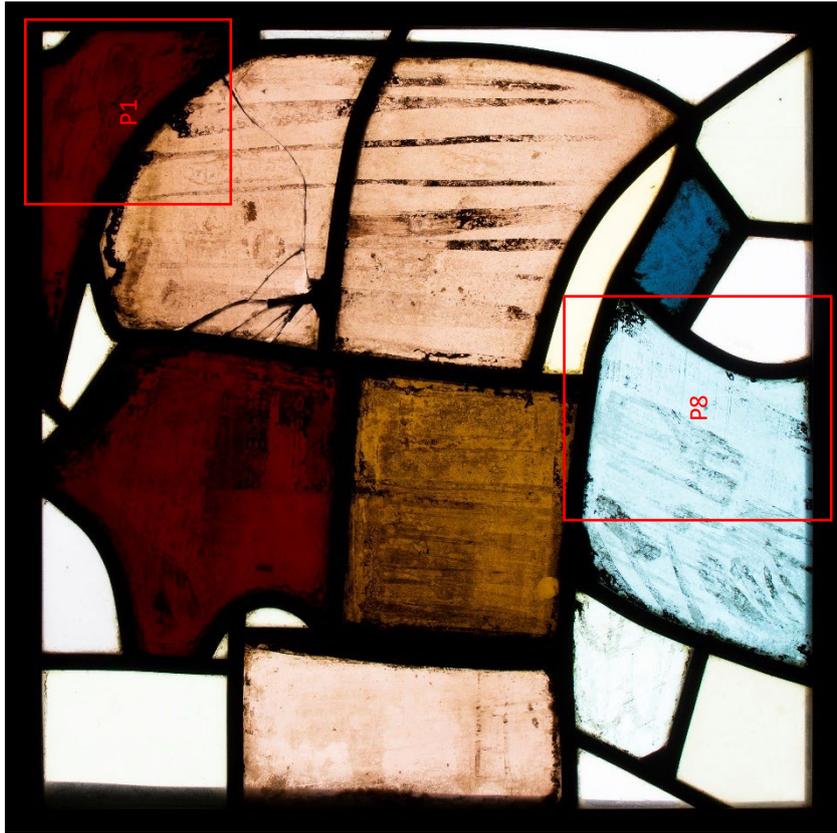
 Originalstandort

<p>Gesamtaufnahme</p>	 <p><i>Marienfenster, Langhaus/ Querhaus, süd X, Felder 2c und 8e</i></p> <p><i>Aktueller Expositionsort: in situ</i></p>
<p>Datierung</p>	<p>1960</p>
<p>Kurzbeschreibung zum Objekt</p>	<p><i>Malerei: Charles Crodel (München)</i> <i>Brand und Verbleiung: Glaswerkstatt Ferdinand Müller (Quedlinburg)</i></p>

Besitzer	<i>Hohe Domkirche St. Marien zu Erfurt</i>
Schutzverglasung	<i>Seit Oktober 1996 hinter einer Schutzverglasung</i>
	<i>Fensterglas in Rechteckteilung, 5-7 cm Abstand zwischen den zwei Verglasungsebenen, Spaltbreite: ca. 6 cm; Kopffelder in den Kirchenraum angekippt</i>
Herstellungstechnik	<i>Musivische Glasmalerei; Schwarz- und Braunlotmalerei auf (modernem) Antikglas</i>
Auftrag der ORMOCER®-Beschichtung	<i>Glas-ORMOCER® (ORG Rohharz: Paraloid, 50:50 Gew. %), Verdünnung 1:10 Gew. %, Lösungsmittel Essigester (Konturen bis zur Sättigung, anschließend dünn über die gesamte Fläche, z.T. mit Bleien, bei dicken Konturen ggf. ein drittes Mal) Durchführung der Maßnahmen am Fenster süd X zwischen Juli 1995 und Oktober 1996</i>
Expositionsgeschichte	<i>Seit Entstehung im Jahre 1960 in situ; zwischen Juli 1995 und Oktober 1996 in der Glaswerkstatt zur Restaurierung; zwischen 5. November und 1. Dezember 2020 zur Begutachtung in Glaswerkstatt</i>

TESTFELD, OBJEKT	
Ausbau Wiedereinbau	5. November 2020; T. Glaß 1. Dezember 2020; T. Glaß
Fotos der Felder	 <p>süd X, 2c, Innenseite Durchlicht (links), Innenseite Auflicht (rechts)</p>  <p>süd X, 8e, Innenseite Durchlicht (links), Innenseite Auflicht (rechts)</p>
Zustandsbeschreibung der beschichteten Bereiche	Leicht verstaubt; glänzende Oberfläche

Probenbereich(e) zur Analyse (FT-IR, Raman)	<p><u>Feld 2c:</u> <i>Probe P1: .33,1 cm x 1,1 cm (Malschichtsicherung, nicht analysiert)</i> <i>Probe P7 bzw. „CrodelsX-2c“: 12,2 cm x 18,7 cm und 29,5 cm x 30,7 cm (Mischprobe, ohne Abnahme der darunterliegenden Halbtonmalerei)</i></p> <p><u>Feld 8e:</u> <i>Probe P2: 22,9 cm x 16,5 cm (Malschichtsicherung, nicht analysiert)</i> <i>Probe P3: 20,3 cm x 16,2 cm (Malschichtsicherung, nicht analysiert)</i> <i>Probe P4 bzw. „CrodelsX-8e_Mischprobe“: Mischprobe (Malschichtsicherung)</i> <i>Probe P10: Windeisen (Außenseite, nicht analysiert)</i></p> <p><i>(Koordinaten gemessen jeweils von der Innenseite der Innenkante Rahmung)</i></p>
Mikroskopische Befunde	<p><i>Sicherung augenscheinlich und durch optische Begutachtung mit Zeiss-Lichtmikroskop völlig intakt</i></p>
Weitere Informationen	<p><i>P1: „weich“ bei Abnahme</i></p> <p><i>P7: bei starkem Kratzen kein blankes Glas</i></p> <p><i>P2: „härter“ als Probe P1 bei Abnahme</i></p> <p><i>P3: Randbereich zum Blei, ähnlich wie bei P2</i></p> <p><i>P10: Ruß, Weihrauchablagerungen und Staub von Windeisen, ggf. als Referenz</i></p>



Testfeld „Crodell II“, Vorderseite Durchlicht

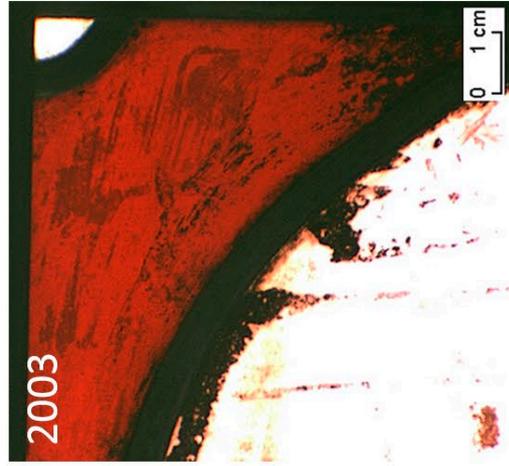
Quelle: FUC 91, S. A23.

Beschichtungs- variante	Auftrag der Schichten Anzahl (Trocknungszeit)	Zusammensetzung der Schichten		Verdünnung (in Essigsäure- ethyltester)	Beschichtung auf Probe Nr.
		ORMO- CER	Para- loid		
Malschicht- sicherung mit Pinsel	2 (3 h/1 d)	50 %	50 %	1:10	1
	4 (3 h/17 h/4 h/1 d)	80 %	10 %	1:15	8

Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.

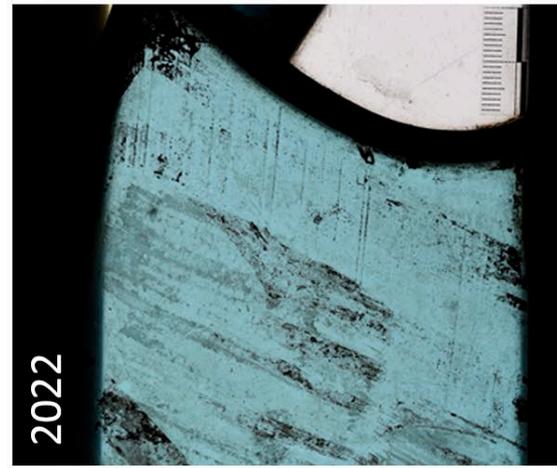
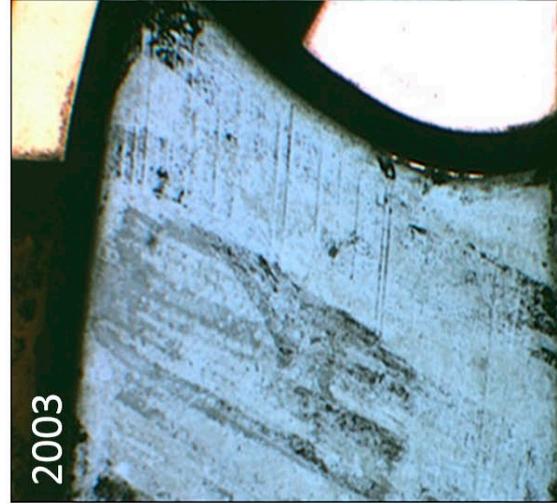
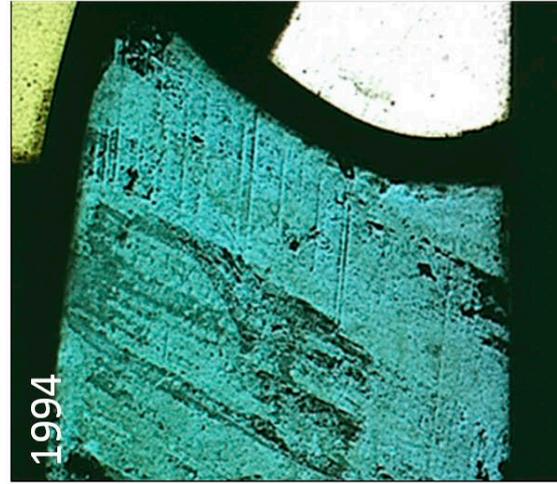
Quelle: FUC 91, S. A22.

Anmerkung: Farbabweichungen variieren in Abhängigkeit des fotografischen Equipments.



P1¹

A 56

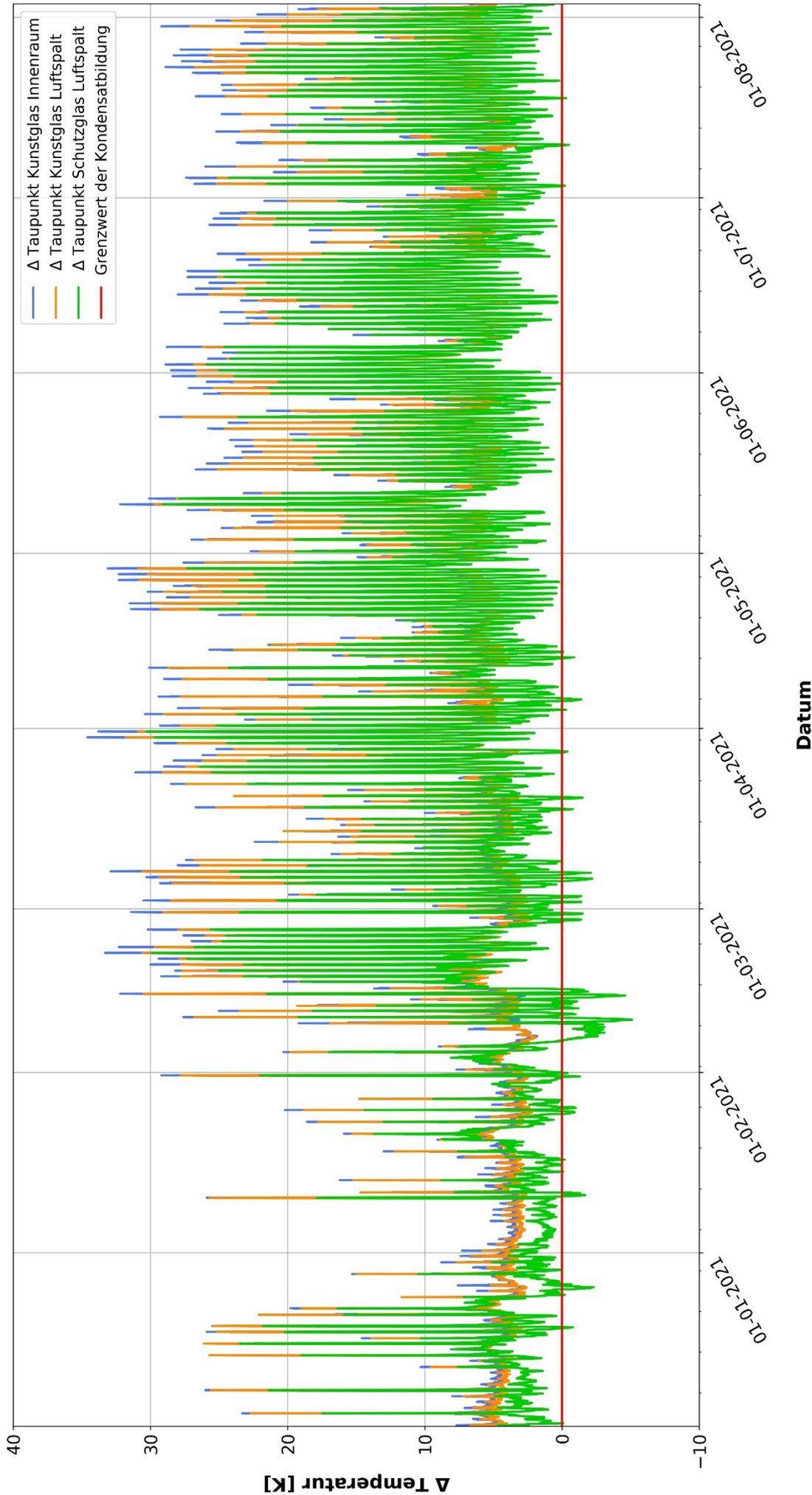


P8²

¹ Segment Nr.: P1; Vorderseite Durchlicht - K. Nawroth: Neue Konservierungsmaterialien für Glasmalereien: „Erfurt I“ und „Crodel II“; C. Mazzon.
² Ebenda.

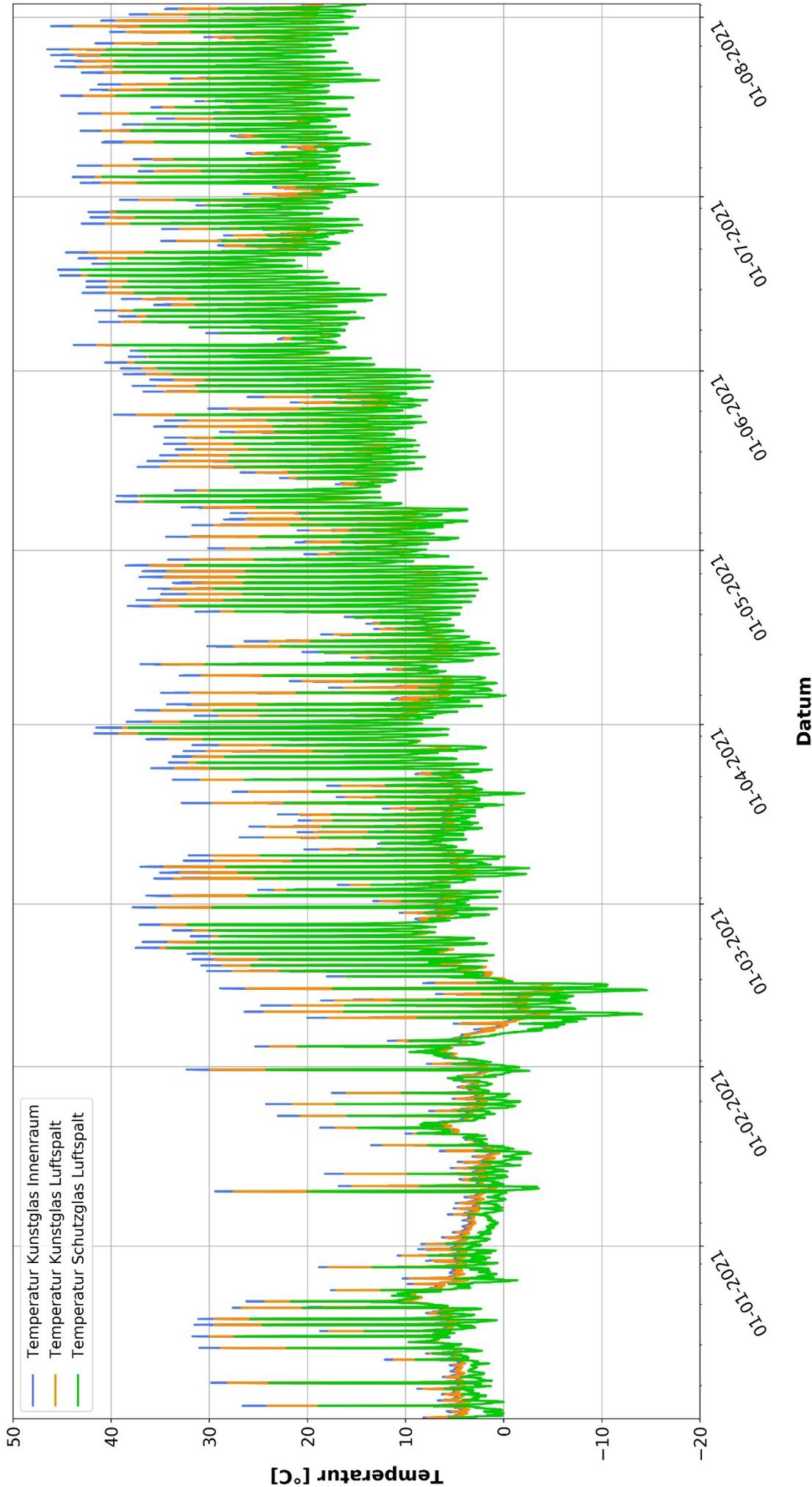
Überwachung der Kondensatbildung - Erfurter Dom Marienfenster s X

Zeitspanne: 02.12.2020 - 03.08.2021



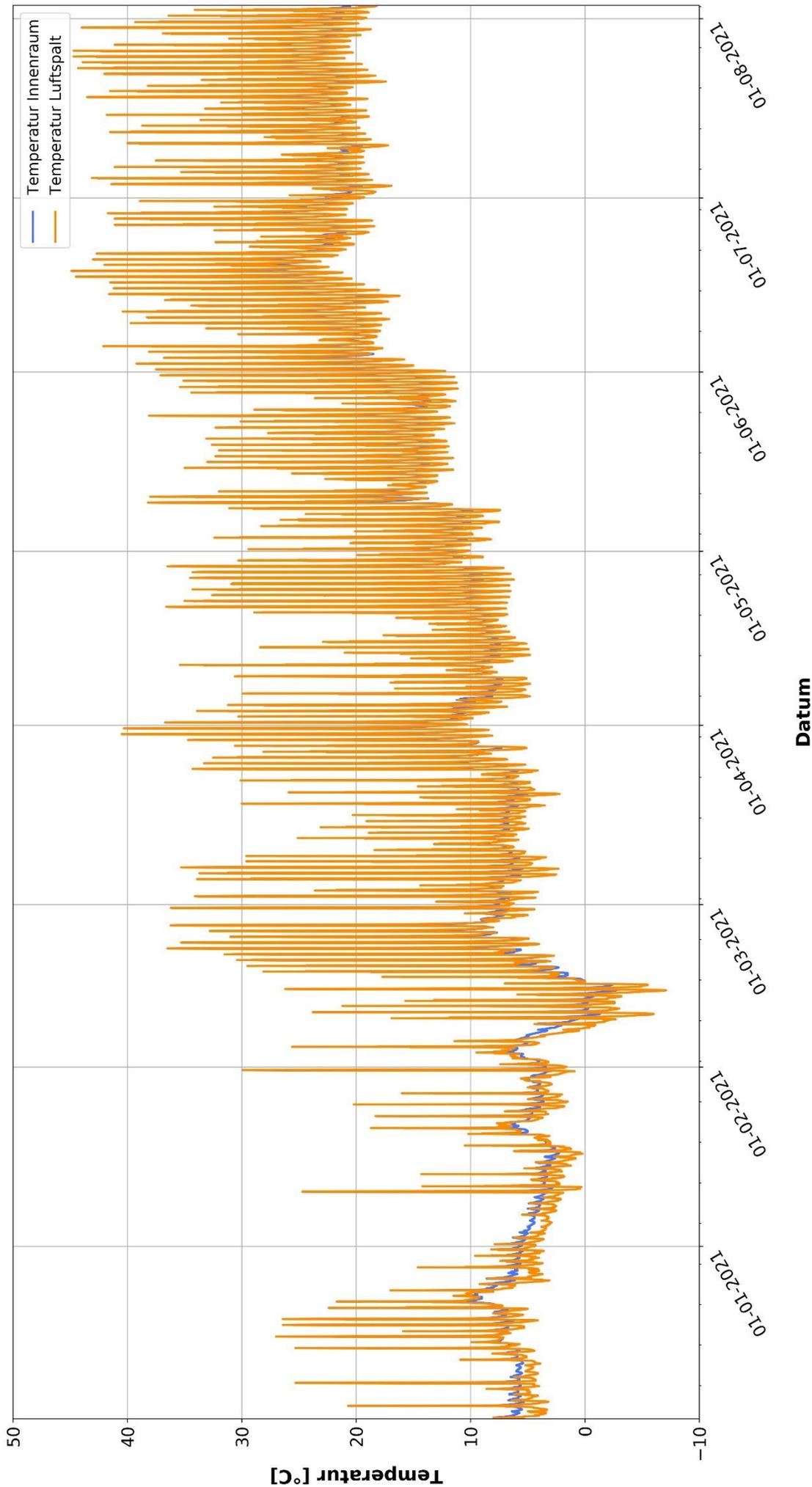
Temperatur der Glasoberflächen - Erfurter Dom Marienfenster s X

Zeitspanne: 02.12.2020 - 03.08.2021



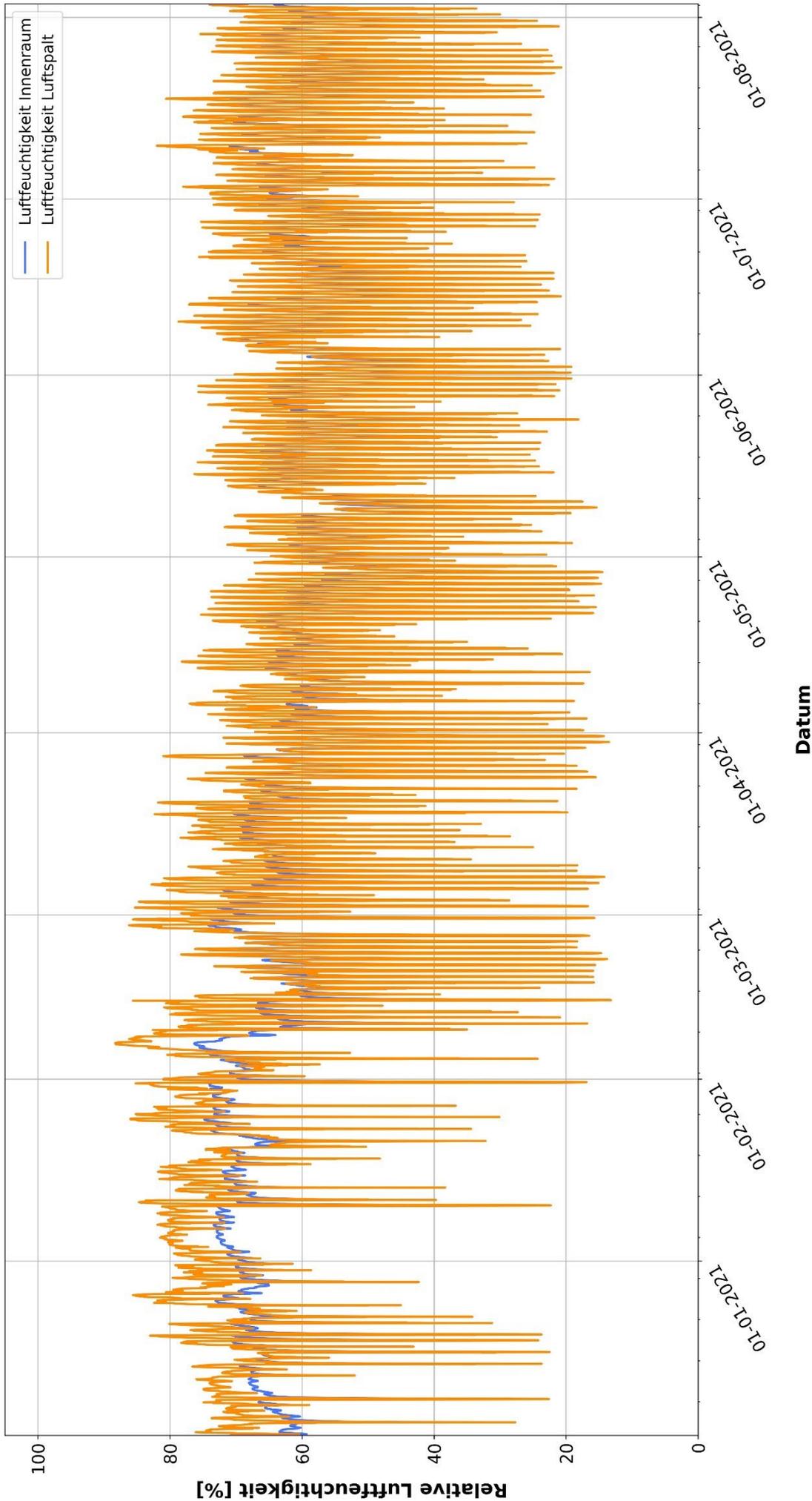
Lufttemperaturen - Erfurter Dom Marienfenster s X

Zeitspanne: 02.12.2020 - 03.08.2021



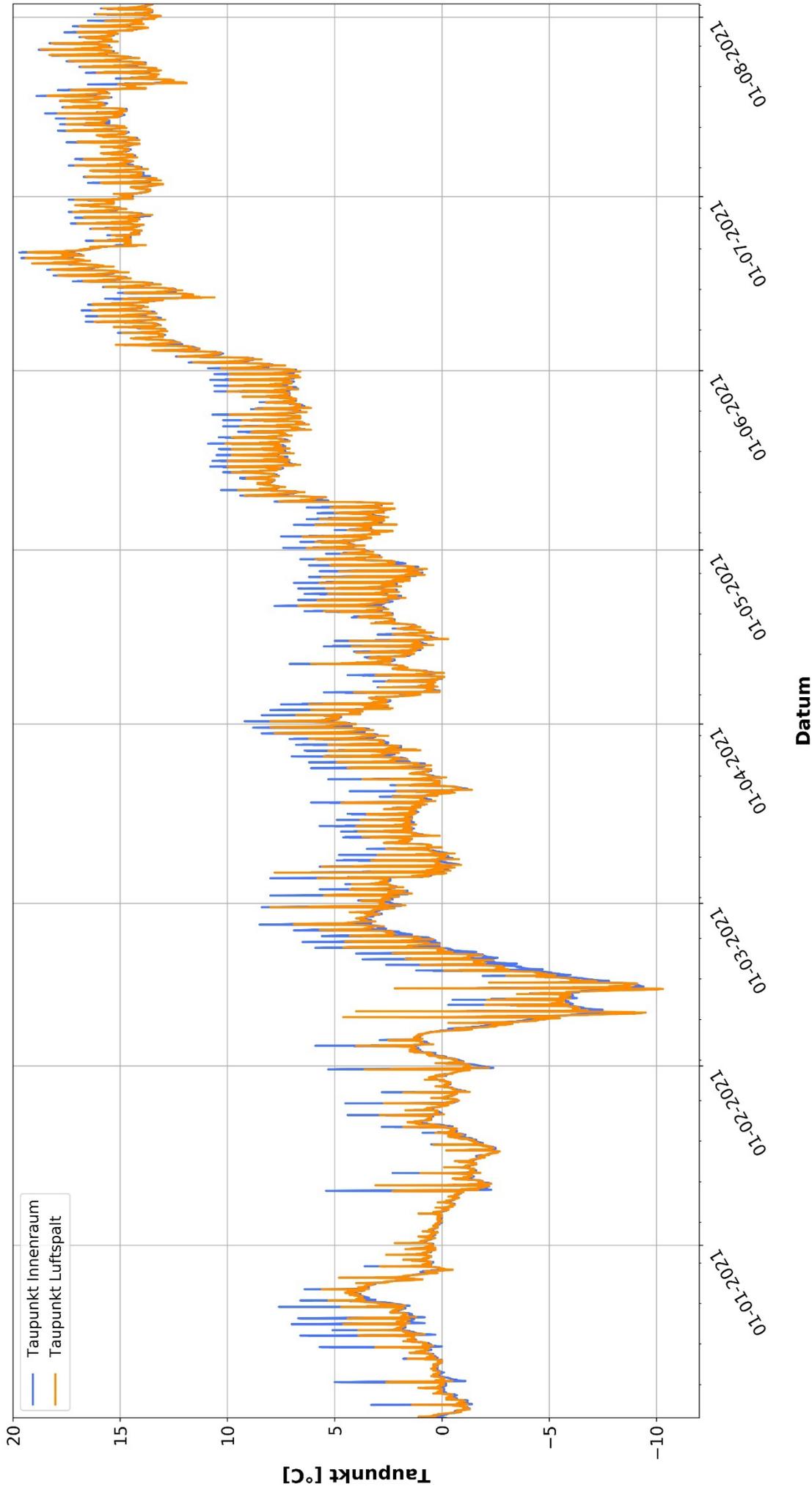
Relative Luftfeuchtigkeit - Erfurter Dom Marienfenster s X

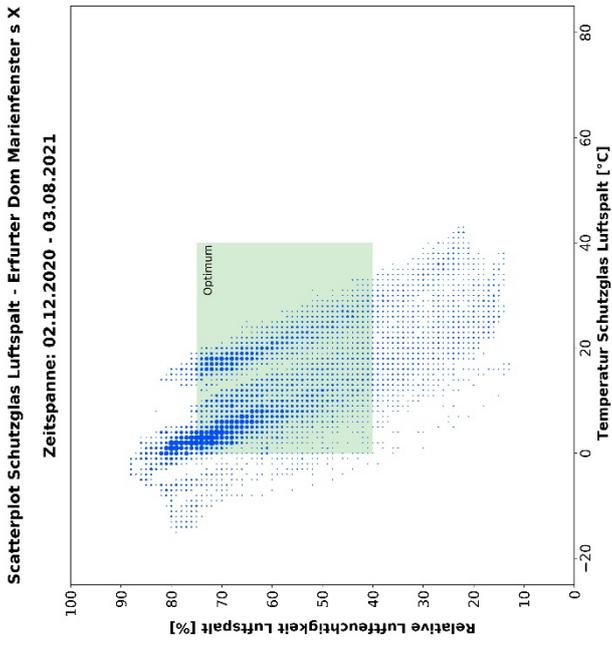
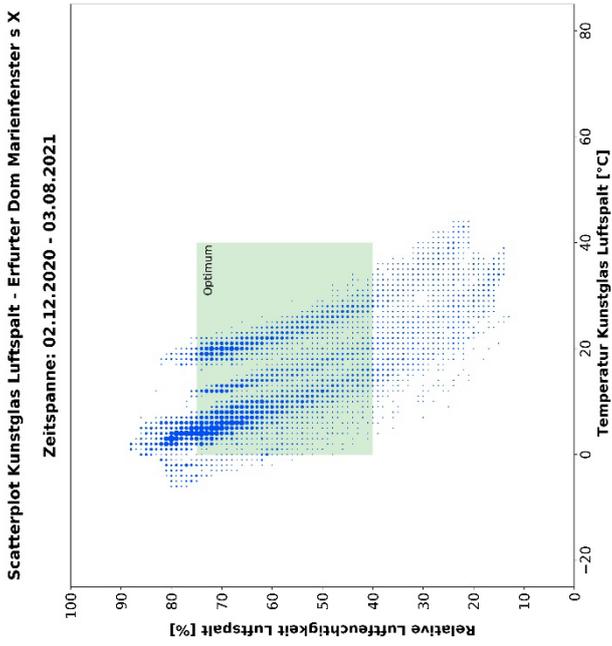
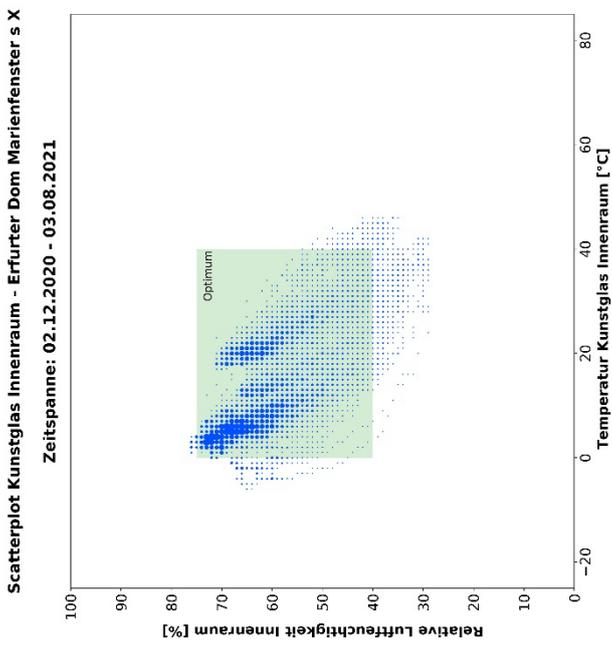
Zeitspanne: 02.12.2020 - 03.08.2021



Taupunkte - Erfurter Dom Marienfenster s X

Zeitspanne: 02.12.2020 - 03.08.2021





DBU-PROJEKT:

„EVALUIERUNG DER MODELLHAFTEN ANWENDUNG VON ORMOCER®-BESCHICHTUNGEN ZUM SCHUTZ WERTVOLLER HISTORISCHER GLASMALEREIEN VOR KLIMATISCHEN EINFLÜSSEN UND ANTHROPOGENEN EMISSIONEN“

Glasdosimeter-Studie am Erfurter Dom



 **Fraunhofer**



© Fraunhofer

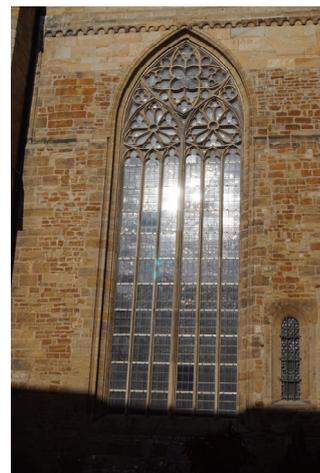


© Fotos der Präsentation: Erfurter Dom, Fraunhofer ISC

Wartung an den Crodel-Fenstern des Erfurter Doms – Bewertung der klimatischen Situation



Schutzverglaste Crodel-Fenster mit starken Malschichtschäden



Südseite: starker Temperaturwechsel

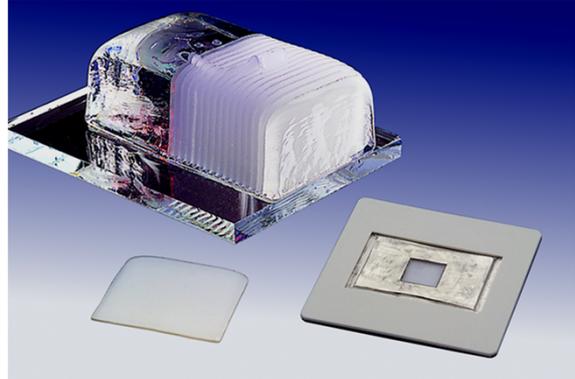
2
© Fraunhofer



 **Fraunhofer**
ISC

Glasdosimeter: Das Prinzip

- Korrosionsempfindliche Glasplättchen als Dosimeter
- Korrosion durch umweltrelevante Faktoren (Feuchtigkeit, Temperatur, Schadgase, Mikroorganismen)
- Einfache Analytik zur Auswertung der Korrosion



Glasblock, Glasplättchen, fertiger Sensor

© Fraunhofer



Kölner
Dombauhütte

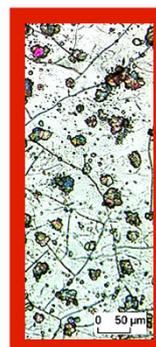
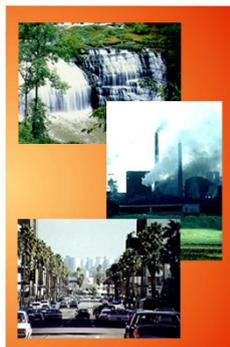


Fraunhofer
ISC

Umweltwirkung auf Glas: globale Betrachtung



Glasdosimeter,
frisch hergestellt



Glasdosimeter,
nach 3 Monaten Exposition in
Deckenfronn (2003)

© Fraunhofer

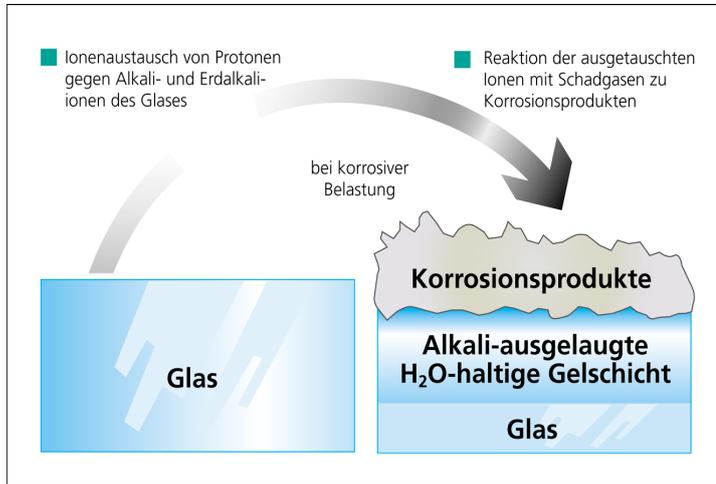


Kölner
Dombauhütte



Fraunhofer
ISC

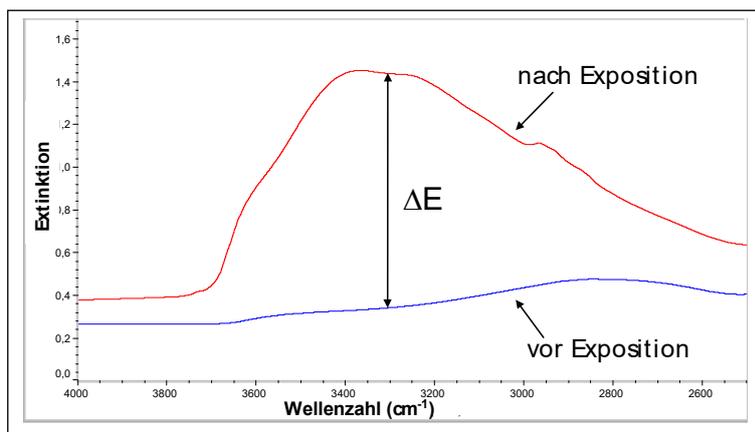
Umweltwirkung auf Glas: im Detail



© Fraunhofer



Auswertung mittels Infrarot-Spektroskopie



Die strukturellen Änderungen, die mit der Korrosion des sensitiven Modellglases einhergehen, lassen sich später im Labor anhand einer geeigneten OH-Bande (des Wassers bei 3300 cm^{-1}) im IR-Spektrum exakt quantifizieren. Je höher die Korrosionsrate, ausgedrückt in ΔE -Werten (E = Extinktion), desto höher ist das korrosive Potential der Umgebungsbedingungen.

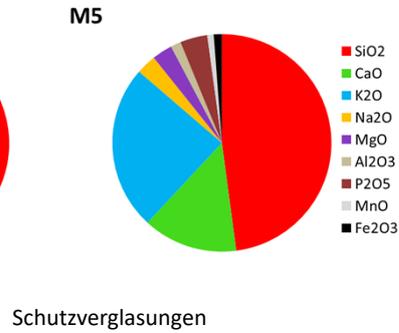
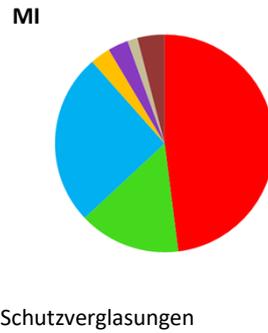
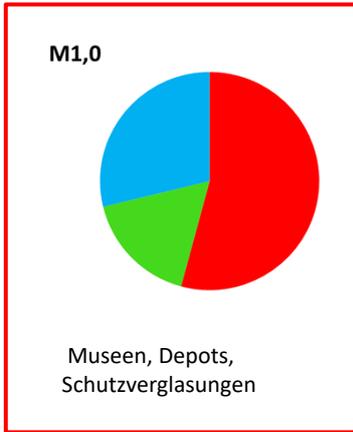
In der Regel werden an Kirchenfenstern 12-Monats-Messungen durchgeführt, um einen gesamten Jahreszyklus zu erfassen.

Die Einsatzmöglichkeiten der Glasdosimeter als Risikodosimeter wurden von Fachgremien überprüft, die das Verfahren als VDI-Richtlinie standardisierten.

© Fraunhofer



Glasdosimetertypen und ihre Eigenschaften



- SiO₂
- CaO
- K₂O
- Na₂O
- MgO
- Al₂O₃
- P₂O₅
- MnO
- Fe₂O₃

Einsatz: 2020/21 Erfurter Dom

1990/91 Erfurter Dom

© Fraunhofer



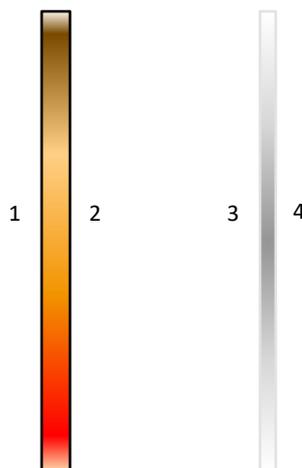
Exposition der Glasdosimeter an Kirchenfenster und Außenschutzverglasung

Dosimeter-Positionen:



Beispiel Pos. 1

Kircheninnenraum



Glasmalerei

Schutzverglasung



Beispiele Pos. 2 - 4

Außenbereich,
direkte Bewitterung

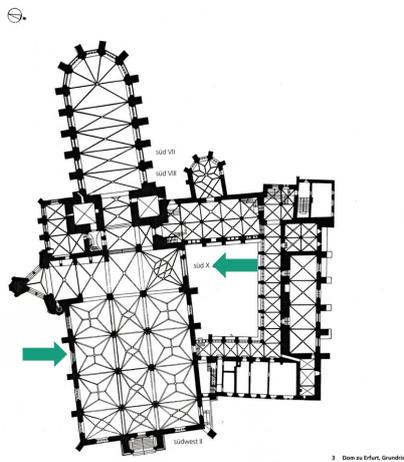
© Fraunhofer



Auswahl der Expositionsstandorte



nXIX – Heilig-Kreuz-Fenster



sX – Marienfenster

© Fraunhofer



Auswahl der Expositionsstandorte



nXIX, Rosette, P4



sX, P4



Werkstatt - Depot

© Fraunhofer



Expositionsprogramm, Zeitraum 12-2020 bis 11-2021

M1,0 fp+RSV

Dosimeter-Nr.	Standort	E0-Wert	E1-Wert	ΔE -Wert
s200191	sX, 8e, P2	0,051	0,093	0,042
s200201	sX, 8e, P1	0,052	0,098	0,046
s200211	sX, 2c, P2	0,055	0,091	0,036
s200221	sX, 2c, P1	0,049	0,101	0,052
s200231	Glaswerkstatt. 3c, in Kiste	0,046	0,113	0,067
s200251	sX, 2c, P3	0,050	0,105	0,055
s200261	sX, 8e, P3 + Custus Aeris	0,048	0,096	0,048
s200271	nXIX, 4b, P3	0,052	0,155	0,103
s200281	nXIX, 4b, P2	0,054	0,103	0,049
s200291	nXIX, 4b, P1	0,049	0,108	0,059
s200301	nXIX, 9c, P3	0,049	0,162	0,113
s200311	nXIX, 9c, P2	0,047	0,113	0,066
s200321	nXIX, 9c, P1	0,048	0,103	0,055
s200331	sX, 2e, P4	0,050	0,107	0,057
s200341	nXIX, Roseira, P4	0,046	0,167	0,121

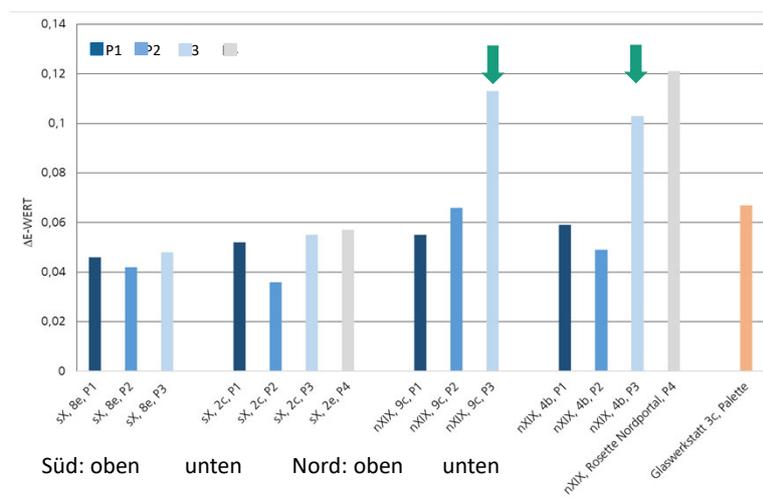
Bestückungsplan:

- Fenster Nordseite nXIX und Fenster Südseite sX
- Pro Fenster Untersuchung in 2 Höhen („unten“ und „oben“)
- Bestückung jeweils
 - P1 – Innenseite Original
 - P2 – Außenseite Original
 - P3 – Innenseite Schutzverglasung
 - P4 – Außenseite Schutzverglasung (pro Fenster nur einmal, dort wo es technisch möglich ist die Dosimeter anzubringen)

© Fraunhofer



Zusammenfassung der Glasdosimeter – Jahresstudie M1,0_(fp/RSV), Auffälligkeiten



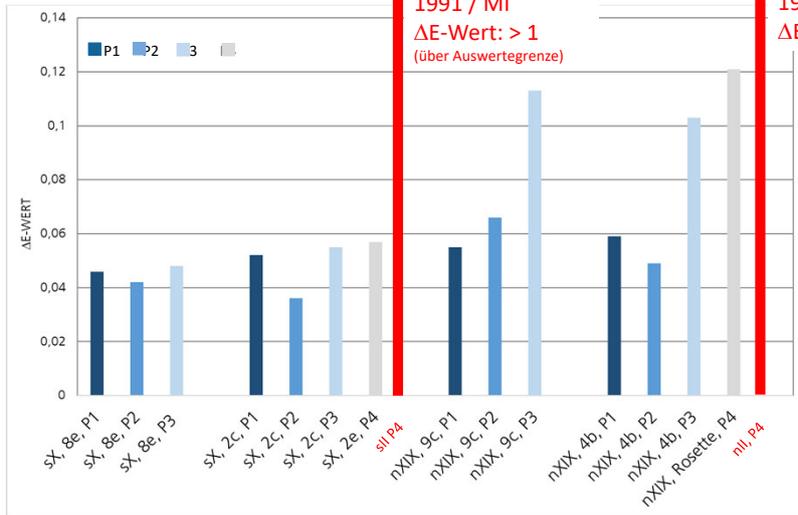
Interpretation:

- Spaltpositionen (P3) von nXIX 9c und 4b zeigen erhöhte ΔE -Werte
 -> Nordseite trocknet kaum ab, keine Sonne
 -> Schutzverglasung als Kondensationsebene
- Schutzverglasung sX mit leichter Schutzwirkung
 -> Südseite P3 und P4 deutlich geringere Korrosion, trocknet zyklisch ab
 -> geringes Gefährdungspotential
- Erhöhter ΔE -Wert im Depot
 -> Essigsäureemission aus Holzboden und Holzverschalung

© Fraunhofer



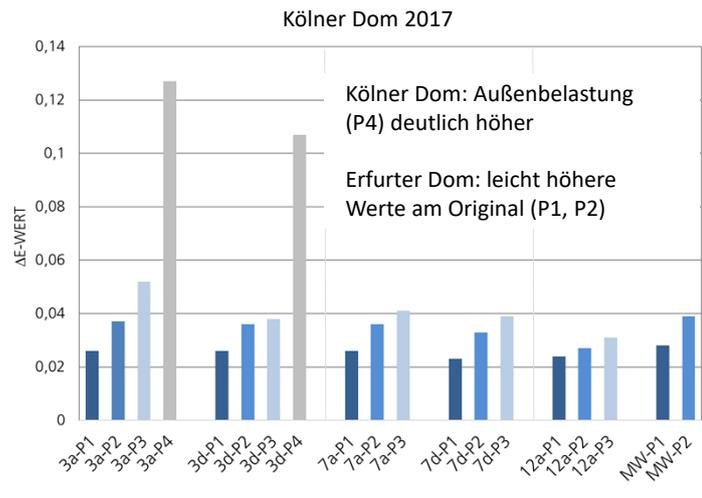
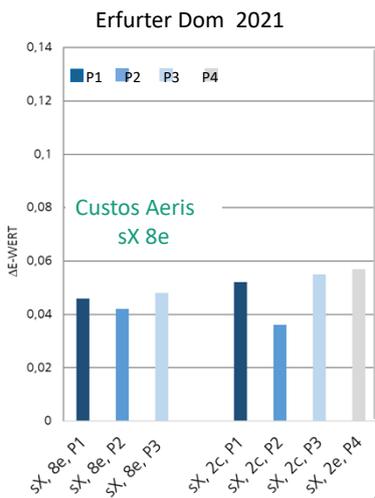
Vergleich der Studien Erfurter Dom 1991 mit 2021



Studie 1991- Dosimeter MI
-> unempfindlicher Glastype (rot markiert)

Studie 2021 – Dosimeter M1,0
-> sehr empfindlicher Glastype

Vergleich der Studien Erfurter Dom / Kölner Dom Südseite – M1,0 fp + RSV



Kölner Dom: Außenbelastung (P4) deutlich höher

Erfurter Dom: leicht höhere Werte am Original (P1, P2)

Fazit

- Gesamt-Korrosionsrisiko für Standort „Erfurter Dom“ 2021 deutlich geringer als 1991
- Nordseite: Sehr gute Wirksamkeit der Außenschutzverglasung ($P4 > P3 > P2$)
- Südseite: Wirksamkeit der Außenschutzverglasung bestätigt ($P4 > P3 > P2$), Schutzeffekt geringer, da Umgebungsbedingungen moderater als an Nordseite
- Keine nennenswerten Unterschiede zwischen oberen und unteren Fensterbereichen
- Innenraumbelastung auf Nord- und Südseite leicht höher im Vergleich zu Studie „Kölner Dom“

- Messungen des Custos Aeris (Südseite) bestätigen das gute Ergebnis der Dosimeter-Studie