

Abschlussbericht

des Forschungsvorhabens

**„Untersuchung und modellhafte Sanierung schwer
geschädigter mittelalterlicher Glasmalereien bedeutender
sakraler Bauten in den durch Umweltschadstoffe extrem
belasteten Städten Kujawiens Thorn/Torun und
Leslau/Wloclawek (Polen)“**

Az. 31275 - 45

April 2017



Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung, Fachbereich 4.2
„Materialien und Luftschadstoffe“

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

**„Untersuchung und modellhafte Sanierung schwer geschädigter
mittelalterlicher Glasmalereien bedeutender sakraler Bauten in den durch
Umweltschadstoffe extrem belasteten Städten Kujawiens Thorn/Torun und
Leslau/Wloclawek (Polen)“**

Projektlaufzeit: 15.09.2014 – 28.02.2017
BAM-Vorhaben: 4146
Projektleiter (BAM): Dr.-Ing. Manfred Torge

Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurden gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Az. 31275 - 45



Inhaltsverzeichnis

1.	Konzept und Ziele des Projektes	1
2.	Objekte und ihre Bedeutung	2
2.1	Johanniskirche in Thorn (Torun)	2
2.2	Dom zu Leslau (Wloclawek)	3
2.3	Zu den Glasmalereien aus Kulm (Chelmno)	4
3.	Restaurierungsmethode nach Kwiatkowski	5
3.1	Das Reinigen der Gläser	5
3.2	Das Festigen der Flussfarbe	5
3.3	Das Imprägnieren der Glasscheiben	6
3.4	Das Ausbessern von gesprungenen und zerbrochenen Scheiben sowie das Ergänzen kleiner Fehlstellen	7
4.	Aufbewahrungsbedingungen der restaurierten Glasmalereien	8
5.	Fotografische Dokumentation an konservierten Glasoberflächen und Probenahme	10
5.1	Johanniskirche Thorn, Feld 15B und Feld 1b	10
5.1.1	Dokumentation von Glasoberflächen Johanniskirche Thorn, Feld 15B	12
5.1.2	Dokumentation von Glasoberflächen Johanniskirche Thorn, Feld 1b	16
5.2	Dom zu Leslau, Fenster nIX	20
5.2.1	Dokumentation von beschichteten Glasoberflächen, Fenster nIX	22
5.2.2	Dokumentation von Glasproben aus dem Fenster nIX	27
5.3	Dokumentation eines Glasmalereifeldes aus Kulm im Stadtmuseum in Thorn	34
5.3.1	Dokumentation der Kulmer Scheibe (Ad 1339)-Innenseite	35
5.3.2	Dokumentation der Kulmer Scheibe (Ad 1339)-Außenseite	41
5.4	Dokumentation eines Glasmalereifeldes der Dominikanerkirche im Stadtmuseum in Thorn	44
5.4.1	Dokumentation der Dominikaner Scheibe (Ad 1363)-Innenseite	45
5.4.2	Dokumentation der Dominikaner Scheibe (Ad1363)-Außenseite	52
6.	Analytische Untersuchungen an Glasproben und Beschichtungsmaterialien	58

6.1	Johanniskirche Thorn	58
6.2	Dom zu Leslau	70
6.3	Charakterisierung der mikrobiellen Kontamination von Glasproben aus Thorn und Leslau	85
6.4	Laboruntersuchungen zur Simulation der Restaurierung nach Kwiatkowski	88
6.5	Untersuchungen zur Reversibilität von Beschichtungsmaterialien und Klebungen	98
7.	Schlussfolgerungen für das Restaurierungskonzept	100
8.	Außenschutzverglasungen	101
8.1.	Restaurierung und Einbau der Außenschutzverglasung im Dom zu Leslau	101
8.2.	Restaurierung und Einbau der Außenschutzverglasung in der Johanniskirche in Thorn	103
9.	Klima- und Schadstoffmessungen	105
9.1	Messkonzept und -zeitraum	105
9.2	Messgeräte und Messfühler	105
9.3	Anordnung der Messtechnik	107
9.3.1	Dom zu Leslau	108
9.3.2	Johanniskirche Thorn	109
9.4	Messergebnisse	110
9.4.1	Dom zu Leslau, Fenster nIX	110
9.4.2	Johanniskirche Thorn, Fenster I	121
10.	Vergleich und Bewertung der Messergebnisse	131
10.1	Temperatur und relative Luftfeuchte	131
10.2	Luftschadstoffe	132
10.3	Glasdosimeterstudie	134
10.4	Schlussfolgerungen	135
11.	Zusammenfassung	136

Anhang: XRF-Untersuchungen; Klimadiagramme

Literaturverzeichnis

Projektteam

1. Konzept und Ziele des Projektes

Mittelalterliche Glasmalereifenster, aber auch die in den letzten Jahrzehnten in ihrer Bedeutung wieder entdeckten Glasmalereien des 19. und 20. Jahrhunderts sind von unschätzbarem Wert und gehören zu dem bedeutenden Teil des europäischen Kulturerbes, den es zu bewahren gilt. Im heutigen Polen waren häufig - geschichtsbedingt - bei der Errichtung von Bauten und der Schaffung ihrer künstlerischen Ausstattung deutsche Architekten und Künstler beteiligt. Die so entstandenen Meisterwerke zu erhalten, ist eine große Aufgabe, die bei den von Jahr zu Jahr bedenklich zunehmenden Umweltschäden nicht unterschätzt werden darf. Dies gilt nicht nur für die schlesischen Regionen, sondern ebenso für die angrenzenden Gebiete, wie z. B. in Kujawien mit bedeutenden, aber gleichzeitig durch Umweltschadstoffe stark gefährdeten Kunstdenkmälern. Dazu gehören auch frühe Glasmalereien aus dem 13. bis 14. Jahrhundert in der zum Weltkulturerbe gehörenden Johanniskirche zu Thorn (Torun) und im Dom zu Leslau (Wloclawek).

Zur Konservierung und Restaurierung von historischen Glasmalereien werden schon seit Jahrzehnten auch synthetische Polymere als Oberflächenschutz, zur Festigung von Malschichten und dem Kleben von Glasbrüchen eingesetzt. Im Falle der mittelalterlichen Glasmalereien in Thorn und Leslau sind solche Konservierungsmethoden von Edward Kwiatkowski bereits zu Anfang der 50er Jahre des letzten Jahrhunderts konzipiert und angewendet worden. Die eingesetzten Materialien und ihre Applikationsbedingungen sind ausführlich dokumentiert /Kwiatowski 1961/ und waren eine Innovation im Stand des Wissens seiner Zeit. In der Johanniskirche in Thorn wurden die Arbeiten am Fenster I bis 1951 abgeschlossen und die Glasmalereifelder ohne Außenschutzverglasung wieder eingebaut. Die Konservierungsarbeiten am Fenster nIX der Kathedrale von Leslau fanden ebenfalls in den 50-er Jahren statt und die mittelalterlichen Glasmalereien waren durch eine nach heutigen Maßstäben nur unzureichende Außenschutzverglasung geschützt. Die geplante Restaurierung der Glasmalereifenster und der Einbau einer Außenschutzverglasung nach den Richtlinien des CVMA bot somit die Möglichkeit, den Zustand der Polymerbeschichtung nach mehr als 50 Jahren unter dem Einfluss der natürlichen Umgebungsbedingungen zu untersuchen und ein darauf abgestimmtes Restaurierungskonzept zu entwickeln. Mittelalterliche Glasmalereien aus der Kulmer Marienkirche und der Dominikaner Kirche in Thorn wurden ebenfalls zwischen 1957 und 1959 von Kwiatkowski nach der von ihm entwickelten Methode gesichert und befinden sich seither geschützt vor Umwelteinflüssen im Thorner Stadtmuseum. Sie boten daher eine zusätzliche Vergleichsmöglichkeit bei der beabsichtigten Erforschung des Erhaltungszustandes von Beschichtungsmaterialien aus der Mitte des 20. Jahrhunderts.

Naturwissenschaftliche Untersuchungen als Grundlage für die Restaurierung einerseits und die praktischen Ausführungen zur Sicherung der Glasmalereien auf der anderen Seite waren nur durch eine intensive deutsch-polnische Zusammenarbeit möglich. Die Restaurierung der Glasmalereien und der Einbau einer Außenschutzverglasung erfolgten durch die Werkstatt Creo Beata Oleszczuk aus Breslau unter Einbeziehung deutscher und polnischer Fachleute (Frau Dr. Gajewska-Prorok, Herr Dr. Pavel Karaskiewicz). Innerhalb des Restaurierungsprojektes hatte ein polnischer Student aus Thorn die Gelegenheit, während eines mehrwöchigen Arbeitsaufenthalts in der Restaurierungswerkstatt die praktischen Abläufe kennenzulernen und eine Zustandsdokumentation des Fensters I in Thorn zu erstellen. Ein Austausch auf naturwissenschaftlichem Gebiet fand zwischen der BAM und der Universität Thorn durch die Anwendung sich ergänzender Untersuchungsmethoden bei der Zustandsdokumentation eines mittelalterlichen Feldes aus Thorn statt. Die Glasmalereien aus Thorn (Fenster I) und die mittelalterlichen Glasfenster in Leslau (Fenster nIX)

konnten durch eine Außenschutzverglasung nach dem Stand der Technik vor schädlichen Umwelteinwirkungen geschützt werden. Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen wurde durch ein Klimamonitoring mit Hilfe von Messungen der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit, der Luftbewegung im Spalt zwischen Originalverglasung und Außenschutzverglasung sowie der Bestimmung der SO₂- und NO_x-Konzentration an den Glasmalereien als auch durch den Einsatz von Glasdosimetern zur Bewertung der Gesamtbelastungssituation überprüft. Das Projekt wurde durch die DBU am 15.09.2014 nach einer über mehrere Monate andauernden Vorbereitungsphase mit fachlichen Vorgesprächen zwischen Deutsch-Polnischer Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) und den externen Gutachtern bewilligt. Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen und die Arbeiten zur Restaurierung und dem Schutz der Glasmalereien in Leslau verliefen planmäßig. In Thorn gab es aufgrund von veränderten Zuständigkeiten vor Ort eine mehrmonatige Verzögerung im Ablauf, so dass eine kostenneutrale Projektverlängerung notwendig war, um die Klimamessungen über den Zeitraum von einem Jahr durchzuführen.

2. Objekte und ihre Bedeutung

2.1 Johanniskirche in Thorn (Torun)

Der breit gelagerte Backsteinbau gehört zu den wertvollsten gotischen Kunstdenkmälern der Region. Sein weiträumiger, gerade geschlossener Chor mit einem dominierenden großen vierbahnigen Fenster (44 Felder mit reich gestaltetem Maßwerk im Spitzbogen) entstand schon nach 1250, das vierjochige Langhaus mit einem auffällig gedrungene Turm wurde im 14. und 15. Jahrhundert vollendet. Das hervorgehobene Ostfenster im Chor erhielt bereits zur Bauzeit, also im 13. Jahrhundert, eine farbige Verglasung. Reste davon aus geometrischen und vegetabilen Mustern haben sich im Maßwerk des Fensters erhalten. Eine Zweitverglasung der vier Lanzetten entstand offenbar im 14. Jahrhundert. Zu vermuten ist, dass im Hauptfenster der Kirche die Legende des hl. Johannes vor diesem Hintergrund dargestellt war. Die heute noch bewahrten Teile mit pflanzlichen Motiven zeigen stilistische Merkmale, die sich gut mit der zeitgleichen malerischen Ausschmückung des Kircheninneren verbinden lassen. Nach vorgefundenen Baunachrichten war das Ostfenster zugunsten eines neuen großen Altars ab 1633 zugemauert.

Im Zusammenhang mit allgemeinen Restaurierungsarbeiten um die Mitte des 20. Jahrhunderts entschloss man sich 1949 zur denkmalpflegerisch gestützten Wiederherstellung des gesamten farbigen Fensterensembles. Dabei wurden die mittelalterlichen Fragmente saniert und konserviert. Für die umfangreichen Fehlstellen konzipierte 1949 Edward Kwiatkowski (Thorn), angepasst an den Duktus der Glasmalereien des 13./14. Jahrhunderts und an die Ausstattung im Inneren, entsprechende Vorlagen, so dass im Chor für das Ostfenster eine geschlossene, harmonisch ausgeglichene Farbverglasung entstand. Sie wurde bis 1951 ausgeführt und im Fenster ohne Schutzverglasung eingesetzt.



Bild 1: Johanniskirche Thorn

2.2 Dom zu Leslau (Wloclawek)

Die Stadt Leslau gehört, vor etwa 1000 Jahren gegründet, zu den ältesten Ansiedlungen in der Region Kujawien. Der hier schon früh errichtete Bischofssitz gewann ständig an Bedeutung, was auch in den Kirchenbauten zum Ausdruck kam. Der letzte 1411 errichtete und heute noch stehende Dom ist eine weitgefaste basilikale Anlage aus Backstein mit langem Chorbals im 3/6-Schluß und einem breiten dreischiffigen Langhaus in 6 Jochen, das auf der Nord- und Südseite durch Kapellenanbauten ergänzt wird. Die Türme im Westen wurden im 19. Jahrhundert angefügt. Die mittelalterlichen Glasmalereien aus der Zeit um 1350, ein typologisches Fenster mit Szenen aus dem Leben Christi, begleitet von Propheten, füllt heute in der zweiten nördlichen Kapelle von Westen ein Fenster (nIX) mit acht Zeilen und drei Bahnen sowie den Maßwerkabschluss. Ursprünglich soll es im Chorbauptfenster des Domes angeordnet gewesen sein. Da die Glasmalereien nach ihren stilistischen Merkmalen aber um die Mitte des 14. Jahrhunderts entstanden sein müssen, wird es wahrscheinlich aus einem der Vorgängerbauten des heutigen Domes hier wiederverwendet worden sein – ein Vorgang, der auch anderenorts, z.B. in der Erfurter Barfüßerkirche, durchaus üblich war. Die Restaurierung des Fensters nIX erfolgte durch Kwiatkowski in den Jahren 1956/57.



Bild 2: Dom zu Leslau

2.3 Zu den Glasmalereien aus Kulm (Chelmno)

Die in der Region des heutigen Kujawien bedeutende Kulmer Marienkirche entstand als flach gelagerter Bau in zwei Etappen. Der gerade geschlossene, dreijochige Chor mit Querhaus wurde zwischen 1280 und 1290, das Langhaus mit drei gleich großen Schiffen erst Anfang des 14. Jahrhunderts errichtet. Das vierbahnige und zehnzeilige Chorhauptfenster mit einer formenreich gestalteten Maßwerkzone im Spitzbogen enthielt ursprünglich 44 Glasmalereifelder aus der Zeit um 1380. Dargestellt war eine von Propheten und Aposteln begleitete, ausführliche Mariengeschichte. Aus archivalischen Nachrichten (L. Kalinowski, Krakau, 1996) geht hervor, dass an diesem Fenster bereits 1688 erste Reparaturen ausgeführt werden mussten. 1887 sind im Fenster noch 32 Glasmalereifelder erhalten, die 1888 verkauft und zur Füllung der Fensteröffnungen in der Schlosskapelle der rekonstruierten Marienburg des Deutschen Ritterordens in Ostpreußen dienten. Hier erfolgte 1891-1892 durch Johann Baptist Haselberger, Leipzig, eine weitere „Überarbeitung“, wobei zur Vervollständigung des ikonografischen Programms noch 26 neue „im Stil passende Felder“ hinzugefügt wurden. 1939, nach Ausbruch des Zweiten Weltkrieges, mussten die Glasmalereien erneut ausgebaut, in Holzkisten verpackt und in den Kellern der Marienburg gelagert werden. Von diesem Bestand sind nach Kriegsende 1945 noch 13 mittelalterliche Felder erhalten geblieben. Sie kamen 1956 in das Städtische Museum zu Thorn, um dort von 1957 bis 1959 durch Mgr. Edward Kwiatkowski restauriert zu werden.



Bilder 3, 4: Glasmalereien aus Kulm um 1380 (Städtisches Museum Thorn), rechts Detail Restaurierungswerkstatt und Jahreszahl – PKZ 58 (Polnischen Konservierungszentrum, Arbeitsstätte von Kwiatkowski, s. Pfeil)

3. Restaurierungsmethode nach KWIATKOWSKI

Kwiatkowski beschreibt die von ihm angewandte Restaurierungsmethode in den ANNALES du 2^d CONGRÈS INTERNATIONALES du VERRE, Leyde 30 juin – 4 juillet 1962. Er verweist auf eine langjährige Werkstatterfahrung und nennt neben anderen die Glasmalereien aus Thorn, sowie die aus der Kathedrale in Leslau und Kulm, an denen Konservierungsarbeiten durchgeführt worden sind. Er referiert den ihm bekannten Stand der Technik zur Entwicklung der Konservierungsmethoden für Glasmalereien und benennt als den „gefährlichsten Feind des Glases...zweifellos das Wasser, deshalb gehen die Bemühungen der Konservatoren vor allem dahin, die Scheiben vor seinem Einfluss zu bewahren.“ Die Konservierung der Glasmalereien beschreibt er in den folgenden vier Schritten:

3.1 Das Reinigen der Gläser

„Die Gläser werden mit weichem Pinsel von Staub und lose aufliegenden Verunreinigungen gesäubert, darauf spült man sie während 5 und mehr Stunden in fließendem Wasser, wobei die Glasoberfläche von Zeit zu Zeit mit weichem Pinsel oder weicher Bürste abgekehrt wird. Grobe Verunreinigungen wie Kitt und Mörtel werden mit einem Skalpell entfernt. Nachdem die Gläser auf Zimmertemperatur getrocknet wurden, wäscht man ihre Oberfläche mit organischen Lösungsmitteln wie Tetrachlorkohlenstoff (CCl_4), Trichloräthylen ($\text{CHCl}=\text{CCl}_2$), Äthylenchlorid ($\text{CH}_2\text{Cl}-\text{CH}_2\text{Cl}$) usw., spült wieder mit fließendem Wasser und zuletzt mit destilliertem. Dann werden die Scheiben 1-2 Tage bei Zimmertemperatur und Normaldruck getrocknet, sodann bei vermindertem Druck (5-25mm Quecksilbersäule) und einer Temperatur von 50-100 °C etwa 2h lang. Während dieser Prozedur wird das poröse Kieselgel nicht entfernt. Nur solche Gläser können mit Hilfe von Wasser gereinigt werden, die in gutem Zustande, d.h. mechanisch widerstandsfähig sind und deren Bemalung genügend fest haftet. Andernfalls muss man sich damit genügen, die lose aufliegenden Verunreinigungen auf trockene Weise zu entfernen.“

3.2 Das Festigen der Flussfarbe

Malschichten bestehen aus einem Glasfluss, der bei Temperaturen oberhalb von 600 °C aufschmilzt und so auf den farbigen Gläsern eingebrannt wird. „Der Glasfluss ist spröde, und falls er seine Haftung zum Untergrund verliert, splittert er ab. Der Konservator erhält Objekte mit teilweise erhaltener Bemalung, deren Haftkraft gesichert werden muss. Zu diesem Zwecke bilden wir (Kwiatkowski) auf der Oberfläche der Flussfarbe einen Sicherungsfilm ... mit Hilfe einer verdünnten Lösung von elastiziertem Polyvenylazetat, der mit Methyltriethoxisilan $/\text{CH}_2\text{Si}(\text{OC}_2\text{H}_5)_3/$ in Xylen modifiziert wurde. Nachdem das Lösungsmittel sich bei Zimmertemperatur verflüchtigt hat, entsteht auf der Bemalung und etwa 1 mm auf die angrenzende Oberfläche übergreifend eine elastische Deckschicht, die vor weiterem Absplittern schützt. Gläser deren Bemalung auf diese Weise gesichert worden ist, sollten unter steter Kontrolle des Konservators sein, um im Falle von auftretenden Veränderungen entsprechende Mittel anwenden zu können. Dies würde aber keinerlei Schwierigkeiten bereiten, da das genannte Kunstharz im Laufe der Zeit weder seine Löslichkeit noch Schmelzbarkeit einbüßt“.

3.3 Das Imprägnieren der Glasscheiben

Das Imprägnieren der Gläser soll die poröse Oberfläche, die infolge von Auslaugungsprozessen entstanden ist schließen und das weitere Eindringen von Wasser verhindern. „Aus diesem Grund ist es die Aufgabe der Konservierung, die Öffnungen der Glasschicht mit entsprechenden Substanzen auszufüllen, die nicht nur dem Wasser den Zutritt verschließen, aber gleichzeitig auch die korrodierte Schicht verstärken sollen. Damit die Konservierung den gewünschten Erfolg bringt, müssen die angewandten Substanzen folgenden Forderungen genügen:

- a) sie müssen farblos und durchsichtig sein, dabei widerstandsfähig gegen atmosphärische Einflüsse (besonders gegen Wasser und Temperaturschwankungen), Mikroorganismen und Alterung;
- b) sie sollen gute mechanische Eigenschaften aufweisen, elastisch und scheuerfest sein;
- c) sie müssen fest am Glas haften und dürfen nicht porös sein;
- d) sie müssen leicht entfernbar sein und das mit Hilfe von einfachen unschädlichen Mitteln;
- e) sie sollen schmutzabweisend sein und keine farblichen, tonalen oder frakturrellen Änderungen des Glases hervorrufen.

„...Auf Grund von Erfahrungen wurde zur Festigung des Glases Polymethylmetacrylat gewählt, das am besten den gestellten Bedingungen entspricht. Die Prüfungen dieses Kunstharzes ergaben, dass es, falls es bei Zimmertemperatur getrocknet wird, eine Anzahl Fehler aufweist wie z.B. schlechte Haftung am Glase, geringe Widerstandsfähigkeit gegen Wasser, (das sein Schwellen verursacht) sowie geringe Oberflächenhärtung... Die Eigenschaften der Filme verbessern sich, wenn sie bei höherer Temperatur getrocknet werden und erlangen ihr Optimum bei einer Trocknungstemperatur, die etwas unterhalb der Depolymerisationstemperatur liegt. Beim Polymethylmetacrylat sind die entsprechenden Temperaturgrenzen 225-235 °C... Es wurde festgestellt, dass Polymethylmetacrylat – im Gegensatz zu vielen anderen Polymeren seinen Kettenbau ständig beibehält und also auch was damit zusammenhängt – seine Löslichkeit in bestimmten Lösungsmitteln... Heute verstärken wir (Kwiatkowski) die zerstörten porösen Oberflächen der Scheiben mit dem modifizierten Polymethylmetacrylat mit Silikonat von mittlerem Polymerisationsgrad (Fickscher Zahl 30-40) und verwenden eine 12 % Lösung (früher 4 %) in Benzen (C_6H_6). Imprägniert wird durch die von A. Hedval

vorgeschriebene Weise, d.h. bei vermindertem Luftdruck (ca. 75 mm Quecksilbersäule). Die Gläser werden drei Tage lang bei Zimmertemperatur und normalem Luftdruck getrocknet, dann wird auf ihre Oberfläche mit einem Pinsel eine verdünnte Lösung von Polymethylsiloxan in Benzen aufgetragen. Nach eintägigem Trocknen werden die Gläser mit der korrodierten Oberfläche nach oben in einen elektrischen Trockenschrank gelegt, in dem die Temperatur langsam bis 225-235°C gesteigert wird. Diese Temperatur wird 15 Minuten lang beibehalten, dann der Strom ausgeschaltet damit die Glasscheiben langsam abkühlen können...“

3.4 Das Ausbessern von gesprungenen und zerbrochenen Scheiben sowie das Ergänzen kleiner Fehlstellen

Für das Kleben von Glasbrüchen mit nicht passenden Bruchkanten gibt es nach Kwiatkowski die folgenden zwei Methoden:

„a) Die Bruchkanten werden auf Zellophan gelegt und so aneinandergesamt, dass zwischen ihnen eine Spalte bleibt. In diese schüttet man eine Mischung aus pulverisiertem Polyvenylacetat und pulverisiertem Polymethylmetacrylat mit einem Zusatz des Initiierungsmittels (Benzoilsuperoxid - $C_6H_5CO\cdot O\cdot O\cdot OC_6H_5$). Die Polymere füllen die Spalte und bilden auf der Oberfläche eine Schicht von 0,3-0,6 mm Dicke und 5-8mm Breite. Das Harz wird mit Methylmetacrylat getränkt, das den Aktivator enthält (N,N-Dimethylparatoluidin / $(CH_3)_2N\cdot C_6H_4\cdot CH_3$ /, und danach bedeckt man alles mit einem Zellophanblatt, um die Einwirkung des Sauerstoffs zu verhindern, der eine inhibierende Wirkung ausüben würde. Nach 10-20 Minuten erstarrt die Mischung zu einer harten farblosen Masse. Nach der Entfernung des Zellophans wird die gleiche Schicht von Polymeren auf der Rückseite der Scheibe gefertigt...

b) Die geplatzen Scheiben werden mit Klebestreifen verbunden, wobei zwischen den Bruchstellen eine Spalte belassen wird. Auf der Rückseite werden längs der Bruchstellen in etwa 2 mm Entfernung von ihnen kleine Klebestreifen aufgelegt. In den auf diese Weise entstandenen Behälter wird Epoxidharz gegossen, das mit dem Härtungsmittel Triäthylentetraamin / $H_2N\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot NH\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot NH\cdot CH_2\cdot CH_2\cdot NH_2$ / und dem Plastifikator Trikresylphosphat / $(CH_3\cdot C_6H_4\cdot O)_3PO$ / vermischt ist. Nach Erhärtung des Harzes verfährt man genauso von der entgegengesetzten Seite der Scheiben. Nach der Entfernung der Klebestreifen wird das Glas bis zu einer Temperatur von 100°C erwärmt.

Bei der ersten Methode kann man das Harz auf jede gewünschte Farbe mit organischen, im Monomer löslichen Farbstoffen anfärben. Es kann auch die erhärtete Oberfläche der Polymere mit entsprechendem Lack überzogen werden (Lösung von Polymethylmetacrylat + Farbstoffe)“. „...Die Verkittung der Scheiben mit Epoxidharz ist dauerhafter, da es widerstandsfähiger gegen Wasser und Temperaturschwankungen ist. Sein Hauptfehler ist der, dass es sich kaum entfernen lässt und ein unlösliches und schwer schmelzbares Mittel bildet. Dagegen können die mit thermoplastischen Polymeren hergestellten Verkittungen ohne Schwierigkeiten wieder entfernt werden“.



Bild 5a: Johanniskirche Thorn, Feld 1b mit Kennzeichnung mittelalterlicher Glassegmente und konservatorisch behandelter Bereiche

4. Aufbewahrungsbedingungen der restaurierten Glasmalereien

Nachdem die Glasmalereien in den 1950er Jahren von Kwiatkowski restauriert worden sind, wurde das Ostfenster (Fenster I) der Johanniskirche in Thorn ohne Schutzverglasung wieder eingebaut. Die konservierten mittelalterlichen Glassegmente befinden sich in den Maßwerkfeldern und im Feld 1b. Sie waren bis zum Projektbeginn 2015, also mehr als 60 Jahre den Umweltbedingungen ungeschützt ausgesetzt.

Die Glasmalereien aus Leslau und Kulm wurden ebenfalls in den 50er Jahren des letzten Jahrhunderts konserviert. Das mittelalterliche Fenster nIX wurde in die zweite nördliche Kapelle des Domes zu Leslau wieder eingebaut und vermutlich in den 70er Jahren mit einer innenbelüfteten Außenschutzverglasung und einem Drahtgitter versehen. Zu Projektbeginn 2014 wies diese Außenschutzverglasung zahlreiche Unzulänglichkeiten und Schäden auf. Sowohl die Johanniskirche in Thorn (Torun) als auch die Kathedrale von Leslau (Wlozlawek) sind in unmittelbarer Nähe der Weichsel gelegen und somit einer natürlichen höheren Luftfeuchte in der Flussniederung ausgesetzt. An beiden Kirchen führen verkehrsreiche Durchgangsstraßen vorbei, am mittelalterlichen Fenster der Kathedrale von Leslau sogar in nur wenigen Metern Entfernung. Die Thorner Johanniskirche ist etwa einhundert Meter von der Hauptverkehrsstraße entfernt und damit den Autoabgasen etwas weniger stark ausgesetzt. Zusätzlich ist jedoch eine Belastung an beiden Objekten ganzjährig durch Industrieabgase und im Winterhalbjahr auch durch Emissionen aus Heizanlagen zu erwarten.

Die mittelalterlichen Glasmalereien aus Kulm gelangten bereits 1956 in das Städtische Museum nach Thorn und wurden dort zwischen 1957 und 1959 restauriert. Die damaligen Aufbewahrungsbedingungen sind nicht bekannt. Sie werden unter den musealen Bedingungen

wahrscheinlich auf jeden Fall besser gewesen sein als ohne Außenschutzverglasung in der Johanniskirche in Thorn oder als die mit einer relativ undichten Schutzverglasung versehenen Glasmalereien in Leslau. Zu Projektbeginn befanden sich die Kulmer Scheiben in Rahmen gefasst in unterschiedlichen Wandvitruinen, die teilweise hinter lüftet und beleuchtet waren. Das Raumklima ist somit bestimmend für die Aufbewahrungssituation der Glasgemälde. Klimadiagramme aus dem November 2014 zeigen einen konstanten Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in den Grenzen von 18 -22 °C und 45-55 % r. F. Mit einer Belastung der Luft durch anorganische- und organische Luftverunreinigungen ist aufgrund der relativ großen und miteinander verbundenen Räume und des damit einhergehenden Luftaustausches nicht zu rechnen. An den Glasmalereien in Thorn und Leslau wurde die Konzentration der Luftschadstoffe SO₂ und NO_x im Außen- und Innenbereich mit Hilfe von Passivsammlern bestimmt /2/. Die Expositionsdauer der Passivsammler betrug jeweils 4 Wochen (Thorn 26.02.-26.03.2015, Leslau 28.01.-25.02.2015).

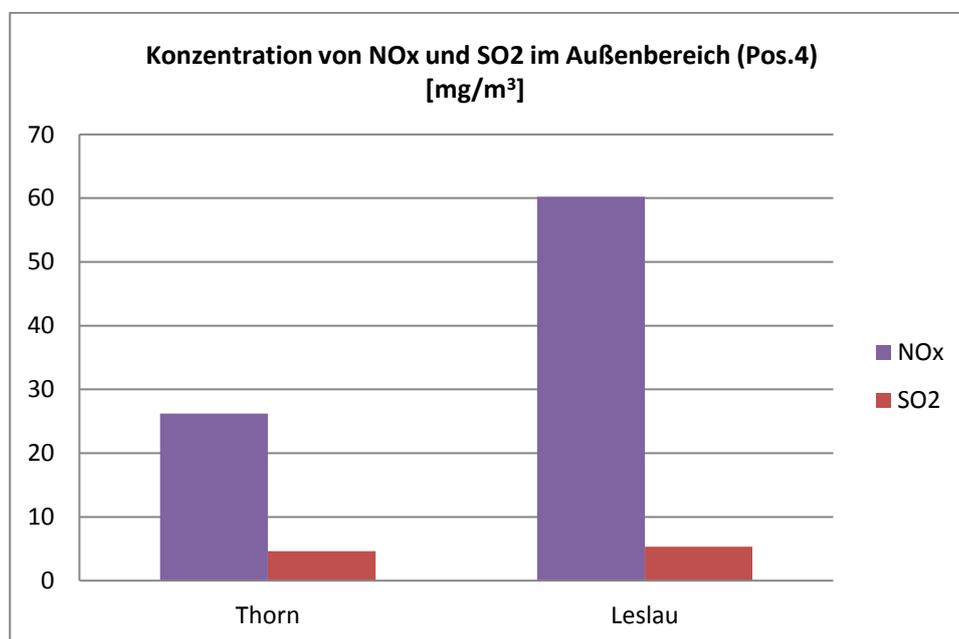


Bild 5b: Messung der SO₂ - und NO_x-Konzentration in der Umgebung der Glasmalereien in der Johanniskirche Thorn (Fenster I) und dem Dom zu Leslau (nIX).

Die Ergebnisse in Bild 5b zeigen, dass die Umstellung auf moderne Heizungssysteme und Emissionsschutzauflagen für die Industrie auch in Polen zu einer deutlichen Verringerung der SO₂ -Konzentration geführt haben. Die relativ hohen NO_x-Werte sind insbesondere dem gestiegenen Autoverkehr zuzuschreiben. Der Dom zu Leslau liegt direkt an einer Hauptverkehrsstraße mit einer Verkehrsampel in der Nähe von Fenster nIX, wo es in der Hauptverkehrszeit immer wieder zu Staus kommt. Die Messwerte sind repräsentativ nur für den unmittelbaren Messort und den Messzeitraum. Es ist anzunehmen, dass insbesondere die SO₂-Konzentrationen in den vergangenen Jahrzehnten deutlich höher waren. Die Außenklimabedingungen (Temperatur und relative Luftfeuchte) wurden über den Zeitraum eines Jahres gemessen und können den Diagrammen im Anhang entnommen werden. Ohne Außenschutzverglasung war das Fenster I der Johanniskirche in Thorn über Jahrzehnte der direkten Witterung ausgesetzt, während die Glasmalereien in Leslau zumindest einen gewissen Schutz vor direktem Einfluss von Feuchtigkeit in Form von Regen hatten und die Glasmalereien im Städtischen Museum zweifellos unter den besten klimatischen Bedingungen aufbewahrt wurden.

5. Fotografische Dokumentation an konservierten Glasoberflächen und Probenahme

Die mikroskopische Begutachtung der konservierten Glasoberflächen erfolgte an ausgewählten Glasmalereifeldern aus Thorn und Leslau nach deren Ausbau jeweils in der Restaurierungswerkstatt in Breslau. Im Städtischen Museum in Thorn standen zwei weitere Glasmalereifelder für eine mikroskopische Dokumentation des Oberflächenzustandes zur Verfügung (Kulm-Ad1339, Dominikaner Kloster-Ad1363). Die fotografische Dokumentation erfolgte sowohl durch Übersichtsaufnahmen als auch anhand von mikroskopischen Detailaufnahmen mit Hilfe eines KEYENCE Digital Mikroskops (VHX-600).

5.1 Johanniskirche Thorn, Feld 15B und Feld 1b

In Thorn erfolgten die Untersuchungen am Maßwerkfeld 15B und dem Feld 1b jeweils auf der Innen- und Außenseite.



Bild 6, 7: Johanniskirche Thorn, Feld 15B Innenseite (links), Außenseite (rechts) mit Kennzeichnung der dokumentierten Glassegmente

Die Auswahl der dokumentierten Glassegmente erfolgte nach der Begutachtung des gesamten mittelalterlichen Bestandes. Sie zeigen die typischen Oberflächenerscheinungen, die jeweils charakteristisch für die Innen- und Außenseite sind. Eine eindeutige Entscheidung, ob es sich dabei um Korrosionsprodukte oder Beschichtungsmaterial handelt, ist durch die visuelle Betrachtung auch mit Hilfe des Mikroskops nicht immer möglich. Daher wurden einige Materialproben auch für analytische Untersuchungen entnommen. Eine Probenahme erfolgte nur in den Fällen wo lockere Materialproben vorhanden waren, die sich leicht von der Oberfläche abnehmen ließen, ohne das darunterliegende Glas zu beschädigen.

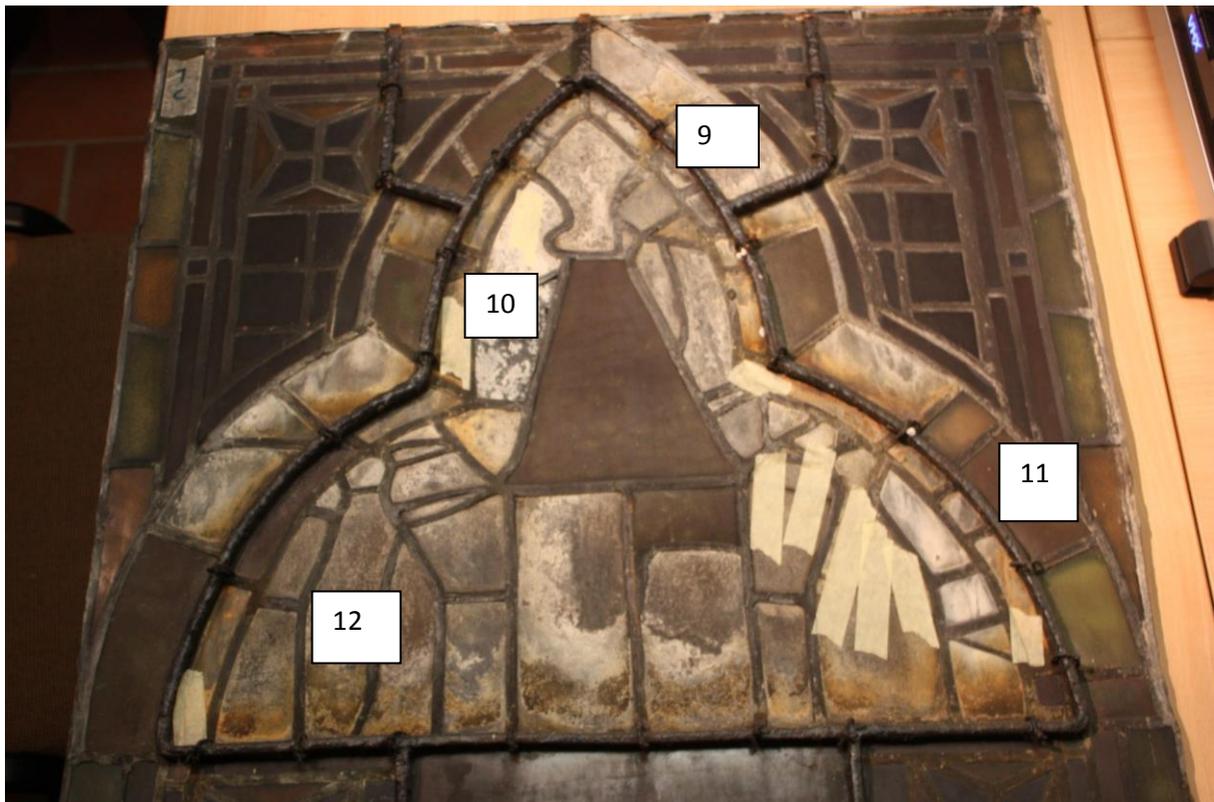


Bild 8: Johanniskirche Thorn, Feld 1b, Außenseite mit Kennzeichnung der dokumentierten Glassegmente

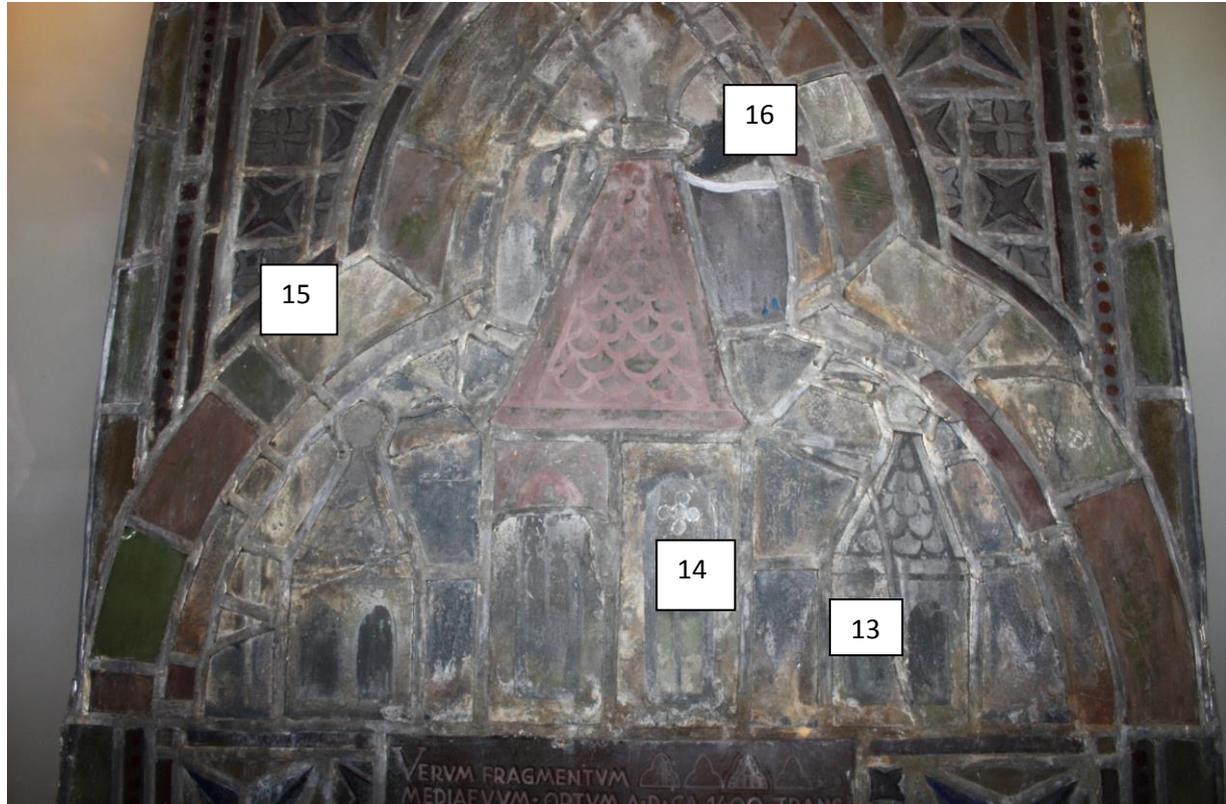


Bild 9: Johanniskirche Thorn, Feld 1b, Innenseite mit Kennzeichnung der dokumentierten Glassegmente

5.1.1 Dokumentation von Glasoberflächen Johanniskirche Thorn, Feld 15B

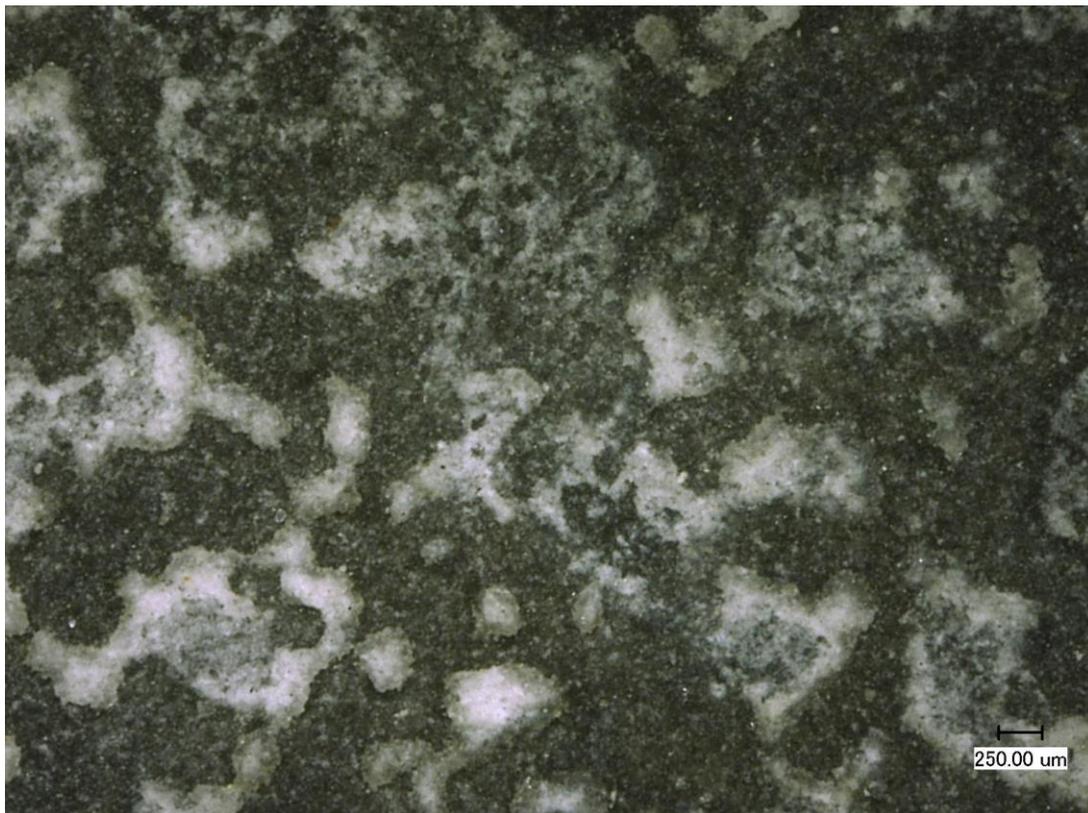


Bild 10: Feld 15B- Innenseite, Glaskorrosion auf T1

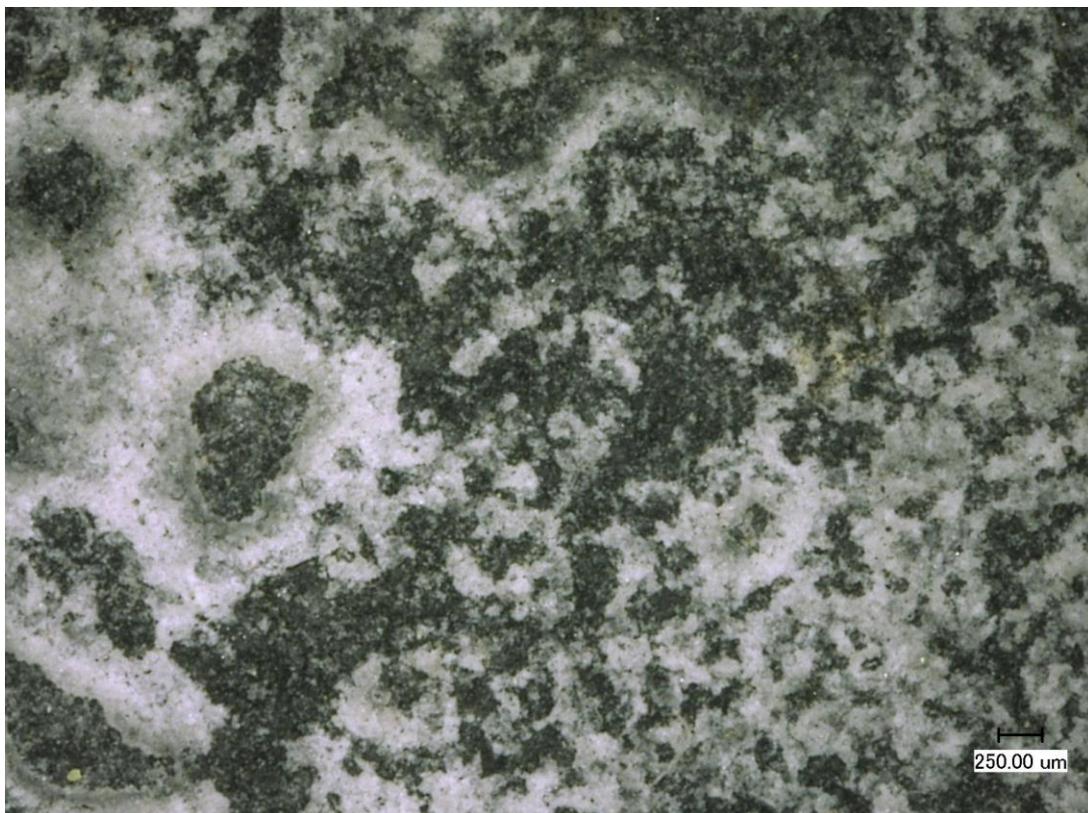


Bild 11: Feld 15B- Innenseite, Glaskorrosion auf T2

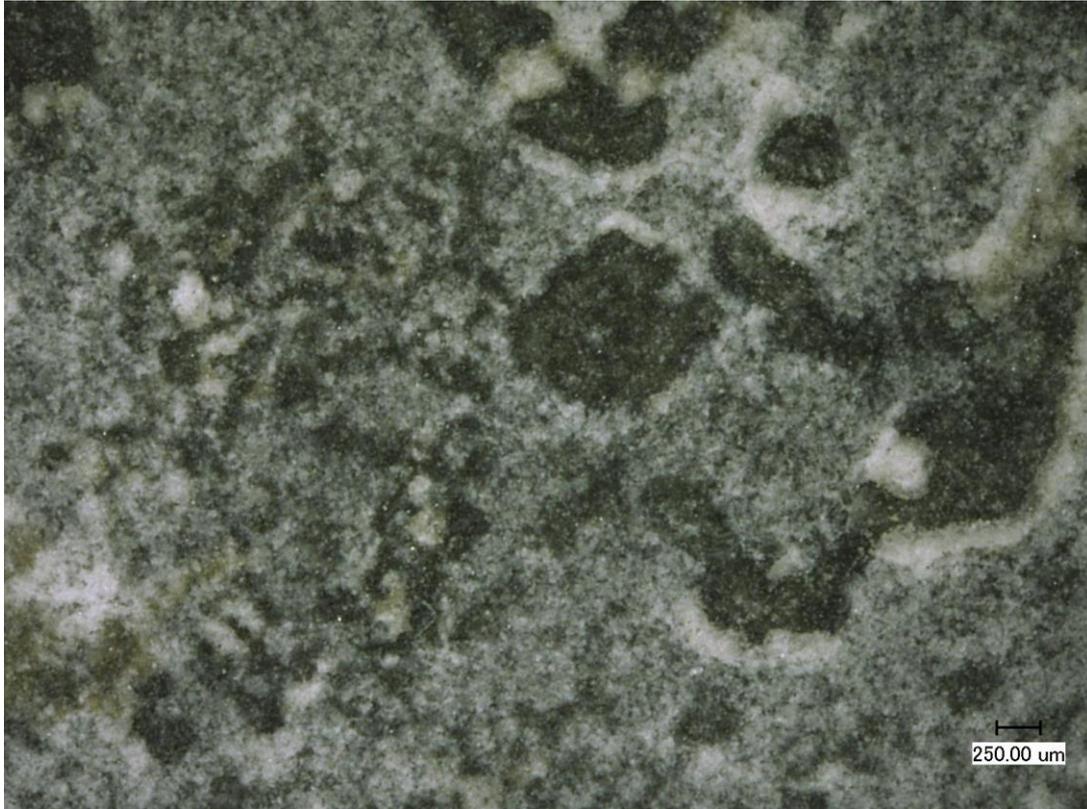


Bild 12: Feld 15B- Innenseite, Glaskorrosion auf T3

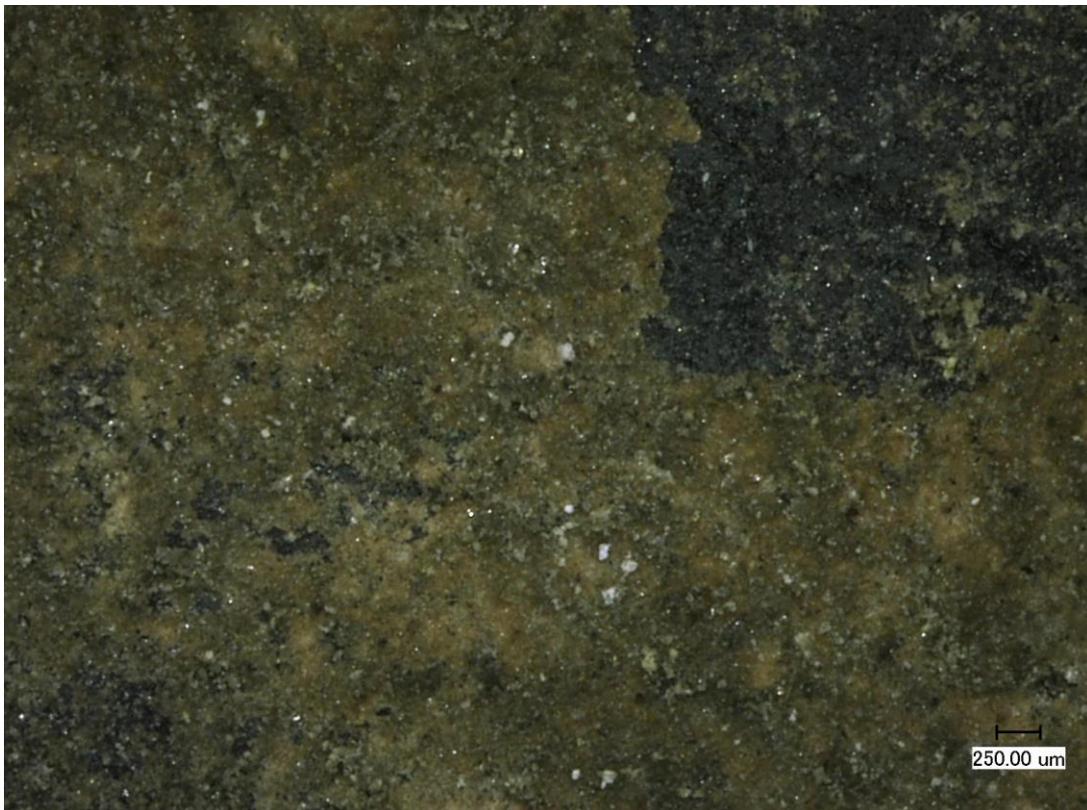


Bild 13: Feld 15B- Außenseite, lockeres Material (braun) auf T4, Probe für Mikrobiologie/ESEM

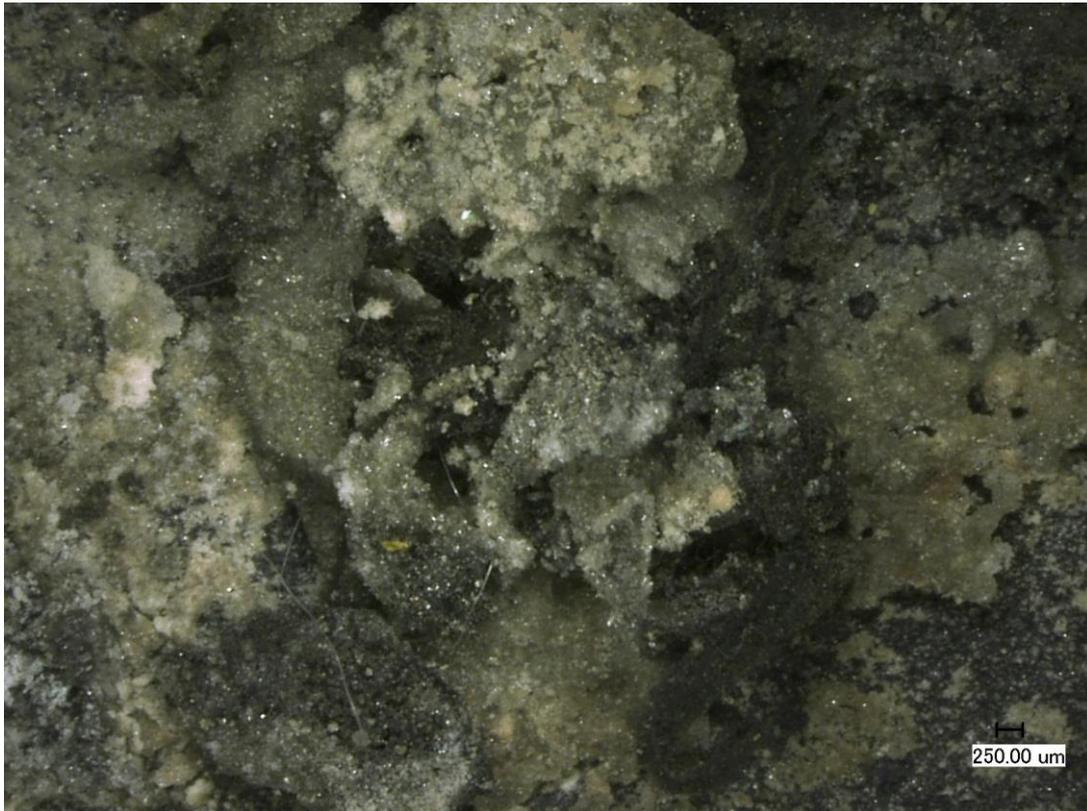


Bild 14: Feld 15B- Außenseite, lockeres Material (hell) auf T5, Probe für Mikrobiologie

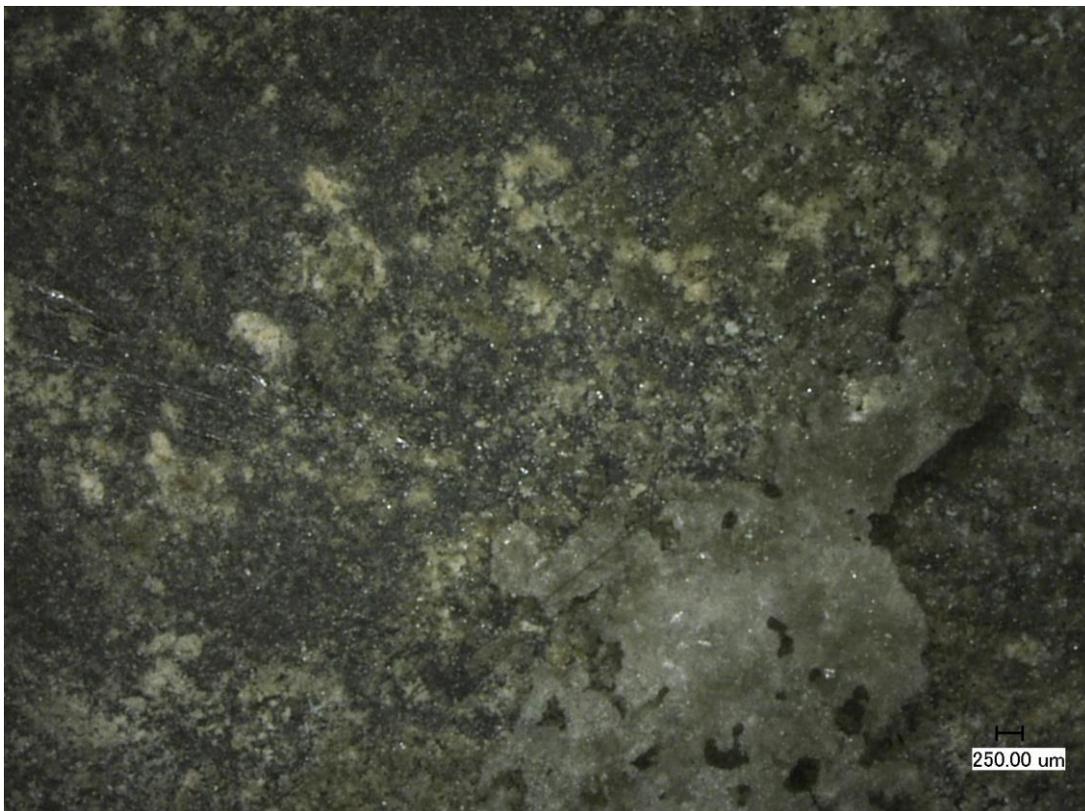
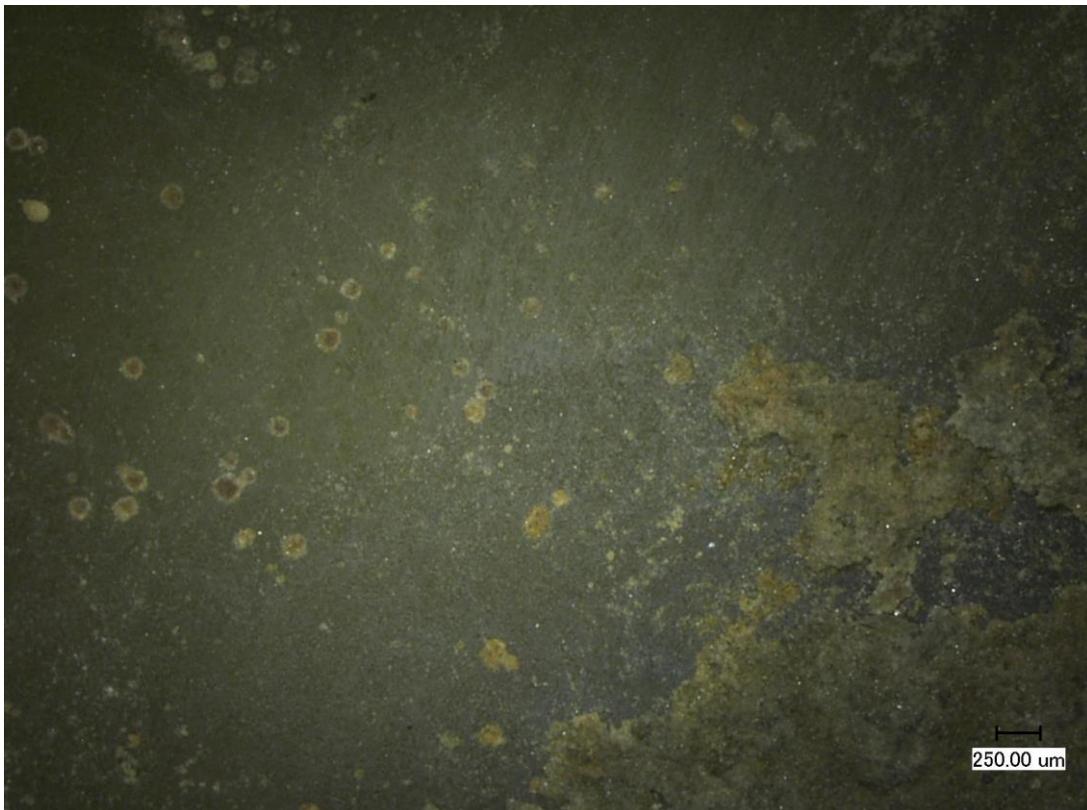


Bild 15: Feld 15B- Außenseite, lockeres Material (hell) auf T6, Probe für FTIR



Bild 16: Feld 15B- Außenseite, lockeres Material (hell) auf T7, Probe für FTIR/ESEM



Feld 17: 15B- Außenseite, Übergangsbereich lockeres Material/Glasoberfläche mit Reinigungsspuren auf T8

5.1.2 Dokumentation von Glasoberflächen Johanniskirche Thorn, Feld 1b

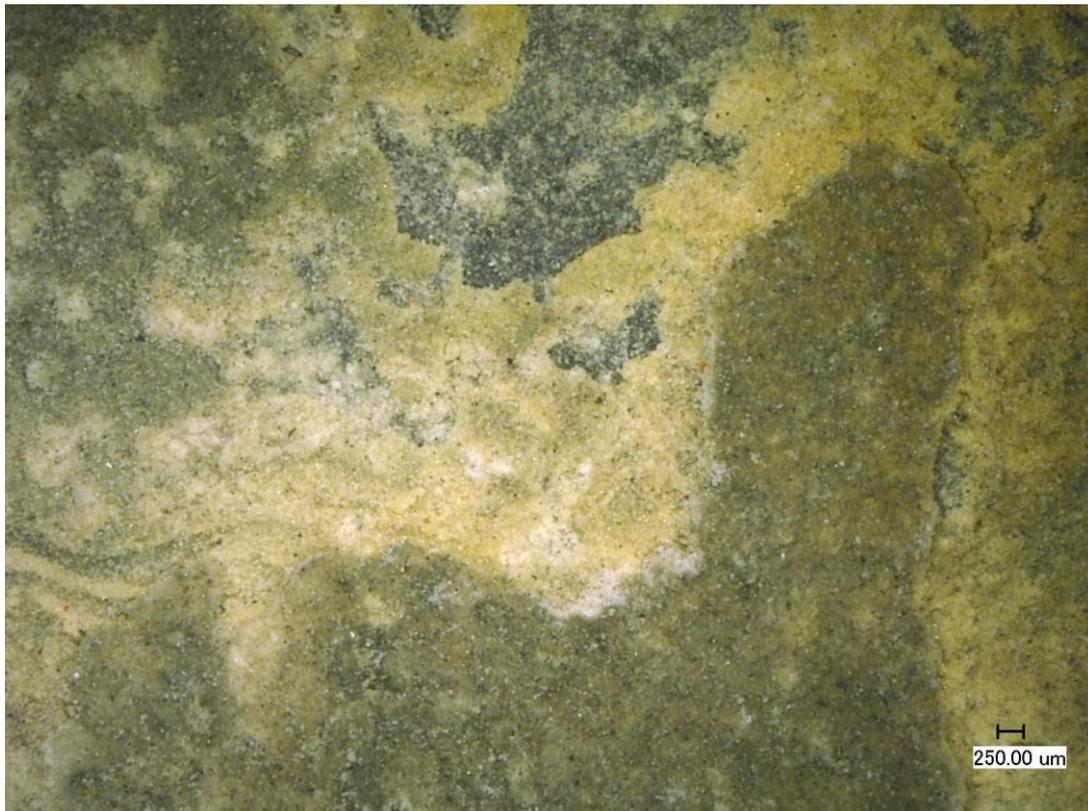


Bild 18: Feld 1b - Außenseite, Glaskorrosion auf T9, Probe Mikrobiologie

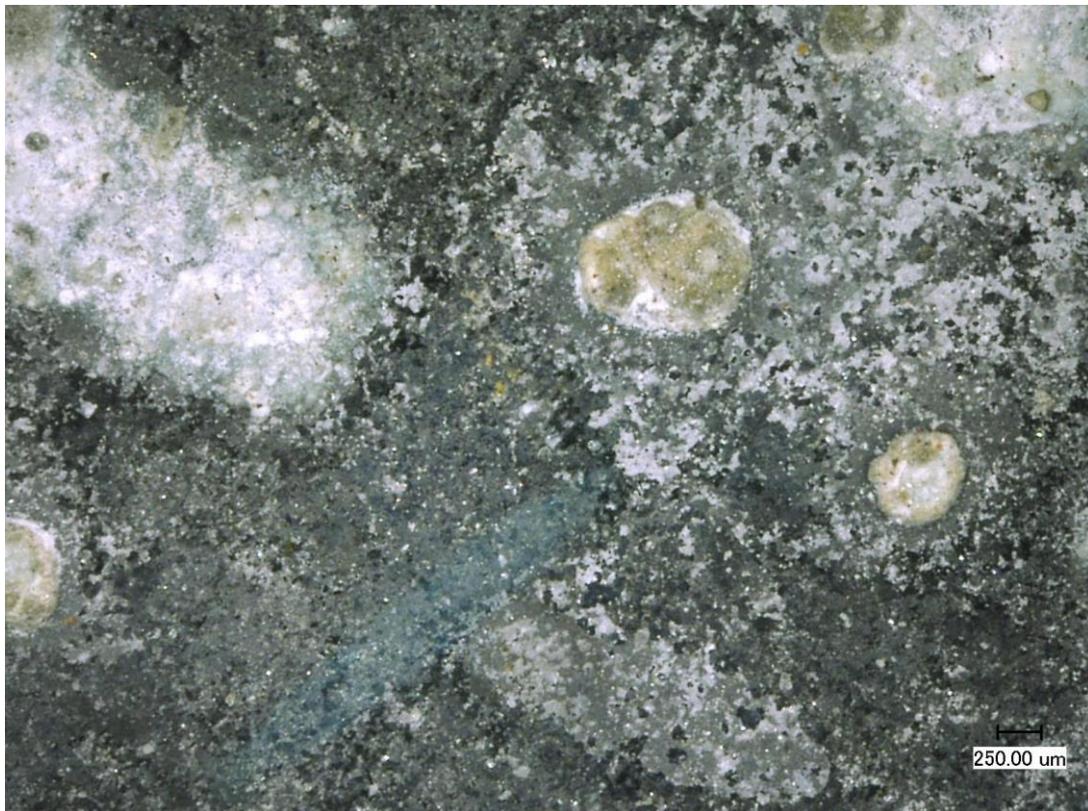


Bild 19: Feld 1b - Außenseite, Glaskorrosion auf T10, Probe ESEM



Bild 20: Feld 1b - Außenseite, Material auf T11, Probe ESEM



Bild 21: Feld 1b - Außenseite, Reste des lockeren Materials auf T12



Bild 22: Feld 1b - Innenseite, lockeres Material (hell) auf T13, Probe Mikrobiologie

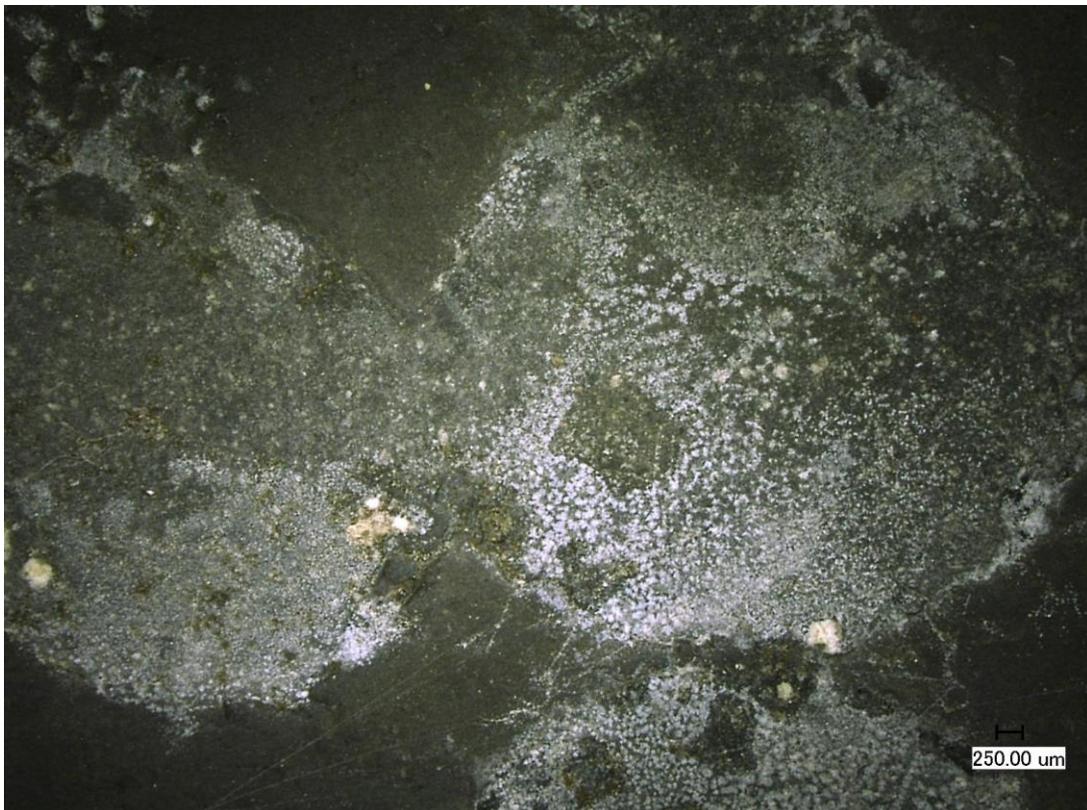


Bild 23: Feld 1b - Innenseite, Oberflächenablagerungen (hell) auf T14

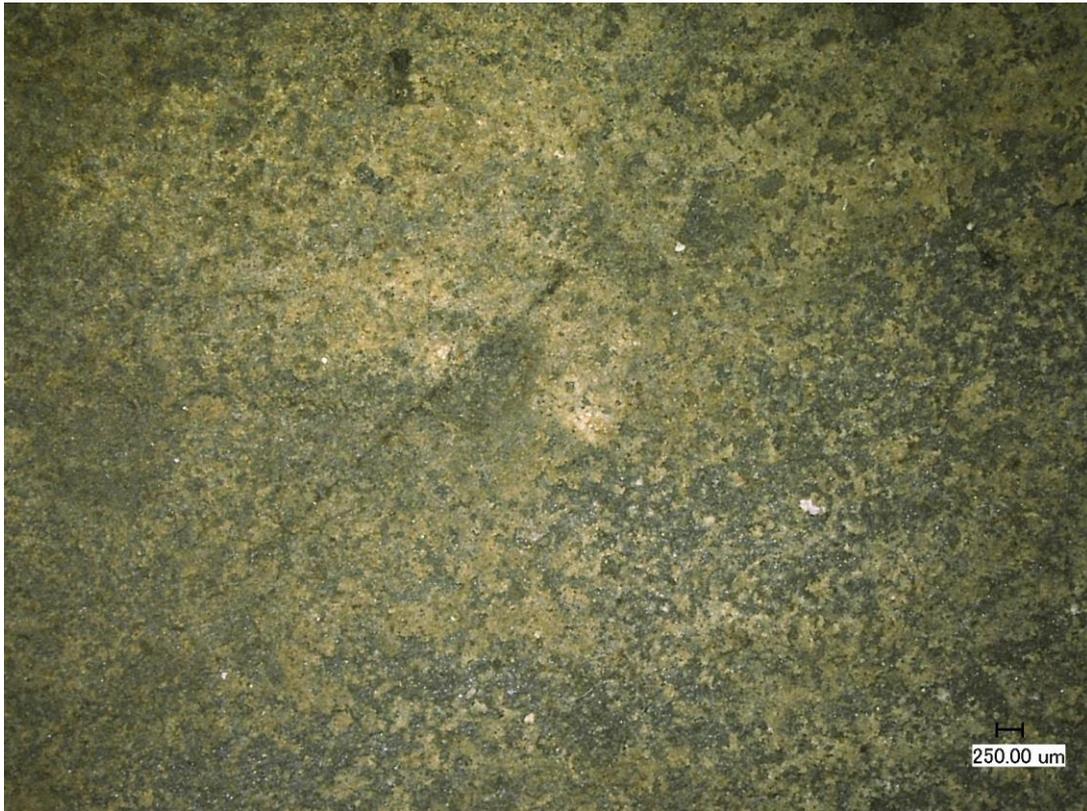


Bild 24: Feld 1b - Innenseite, Oberflächenablagerungen (braun) auf T15

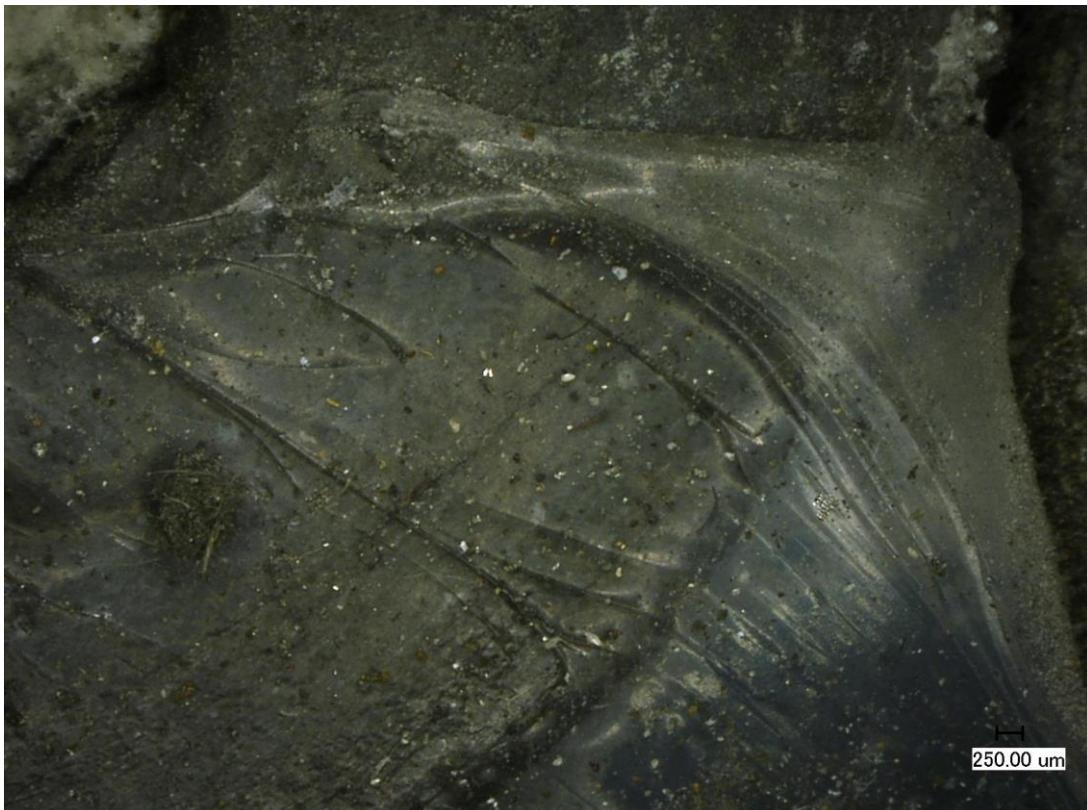


Bild 25. Feld 1b - Innenseite, vollflächige Verklebung auf Glasoberfläche auf T16, Probe FTIR

5.2 Dom zu Leslau, Fenster nIX

Auf dem Feld 6b befinden sich Inschriften die Rückschlüsse auf den Zeitraum der Restaurierung und die durchgeführten Konservierungsmaßnahmen ermöglichen.



Bild 26: Dom zu Leslau, Feld nIX 6b mit Inschriften zu den Konservierungsmaßnahmen



Bild 27: Dom zu Leslau, Feld nIX 6b mit Inschriften des Restaurierungszeitraumes und den Beteiligten

Für den Bestand typische Oberflächenbereiche wurden auf den Felder 1b, 3b, 3c, 6b, 6c, 7a, 7b, 7c, 8a, 8b und 8c fotografisch dokumentiert. Die Aufnahmen erfolgten sowohl als Makroaufnahmen als auch mit Hilfe eines USB-Mikroskops und des Keyence Digital Mikroskops. Einige Glassegmente konnten für analytische Untersuchungen mit dem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) ausgebleit werden. Nach Abschluss der Untersuchungen wurden die Glasstücke wieder in den Bestand eingesetzt. Weiterhin wurden Materialproben von der Oberfläche mit einem Skalpell entnommen.

Tabelle 1: Glasproben für naturwissenschaftliche Untersuchungen aus dem Fenster nIX

Probe-Nr.	Feld	Bemerkung	Foto
PG1	1a	rote Glasprobe vom oberen Randbereich	s. Abschnitt 5.2.2 Bild 38
PG2	3b	grünes Glas mit Beschichtung/Klebung	Bild 42
PG3	3b	braunes Glas	Bild 46
PG4	4c	weißes Glas mit Schwarzlotkontur	Bild 48
PG5	8b	blaues Glas aus Randbereich unten	Bild 50

Visuelle Beurteilung der Glasproben (s. Fotografische Dokumentation Abschnitt 5.2-2)

PG 1: rotes Überfangglas; Beschichtungsmaterial auf Vorder und Rückseite, häufig im Randbereich dicker als in Probenmitte, auf Rückseite partiell Neukorrosion ansonsten dort kaum sichtbare Imprägnierung. Lochfraß auf Vorderseite mit Beschichtungsmaterial gefüllt, lockere Schollen der Oberfläche werden zusammengehalten, Reinigungsspuren und Kratzer auf Glasoberfläche;

PG 2: grünes Bleiglas mit 2 kompakten Klebungen dazwischen grüne Glasoberfläche sichtbar, Klebung versprödet und löchrig, auf grüner Glasoberfläche vermutlich Beschichtung teilweise versprödet und ausgebrochen;

PG 3: gelb-braunes Glas mit Beschichtung auf beiden Seiten, Beschichtung auch auf Schwarzlot, teilweise ausgebrochen, im Randbereich Beschichtung wieder dicker, Rückseite mit dünner Imprägnierung;

PG 4: weißes Glas mit Schwarzlot und Lochfraß, Beschichtung auf Vorderseite nicht sichtbar, auf Rückseite imprägnierte Oberfläche? mit wenig Korrosion

PG 5: blaues Glas mit kompakter Beschichtung nur auf Vorderseite der Oberfläche teilweise versprödet, in der Mitte vermutlich ausgebrochen (blaues Glas sichtbar), Rückseite vermutlich mit partiellen Imprägnierung;

5.2.1 Dokumentation von beschichteten Glasoberflächen, Fenster nIX



Bild 28: PM1: Feld nIX 6b; Außenseite, grauer Oberflächenbelag, Probenahme mit Skalpell



Bild 29: PM2: Feld nIX 6b; Außenseite, grauer Oberflächenbelag, Probenahme mit Skalpell



Bild 30: PM3: Feld nIX 6b; Außenseite, glänzende Beschichtung, Probenahme mit Skalpell



Bild 31: PM4: Feld nIX 6b; Außenseite, Klebung/Beschichtungsmaterial abstehend



Bild 32: PM5: Feld nIX 3b; Innenseite, flächige Klebung, beidseitig verbräunt



Bild 33: PM6: Feld nIX 3c; Innenseite, gefestigte Schwarzlotkontur



Bild 34: PM 7: Feld nIX 1b; Innenseite, Festigungsmaterial für Schwarzlotkontur

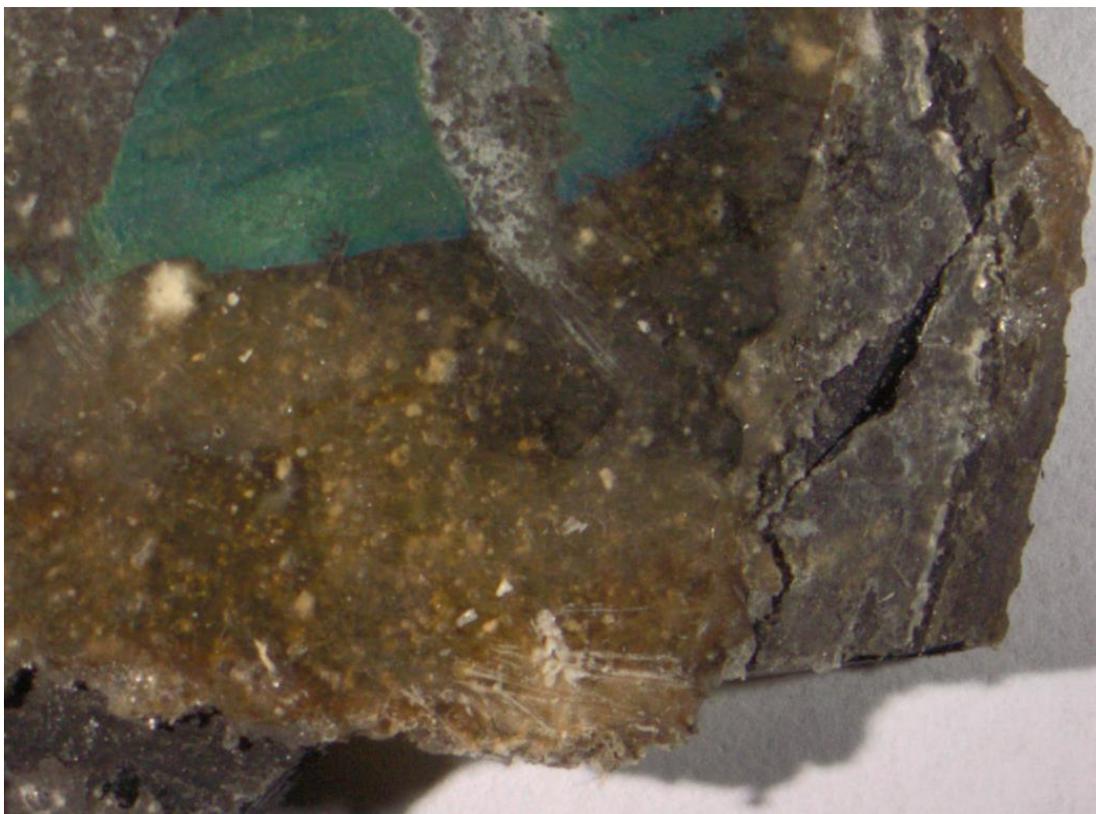


Bild 35: PM8: Feld nIX 6b; Innenseite, Festigungs-/Beschichtungsmaterial

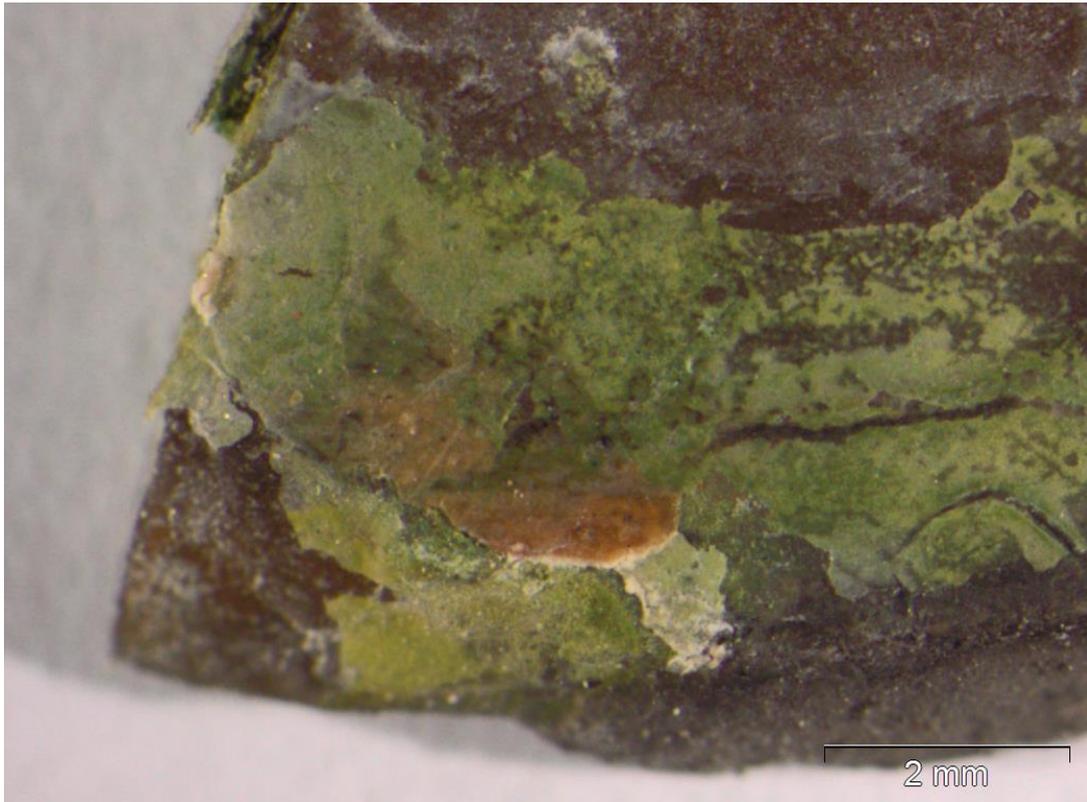


Bild 36: PM9: Feld nIX 6b; Innenseite, Festigungs-/Beschichtungsmaterial

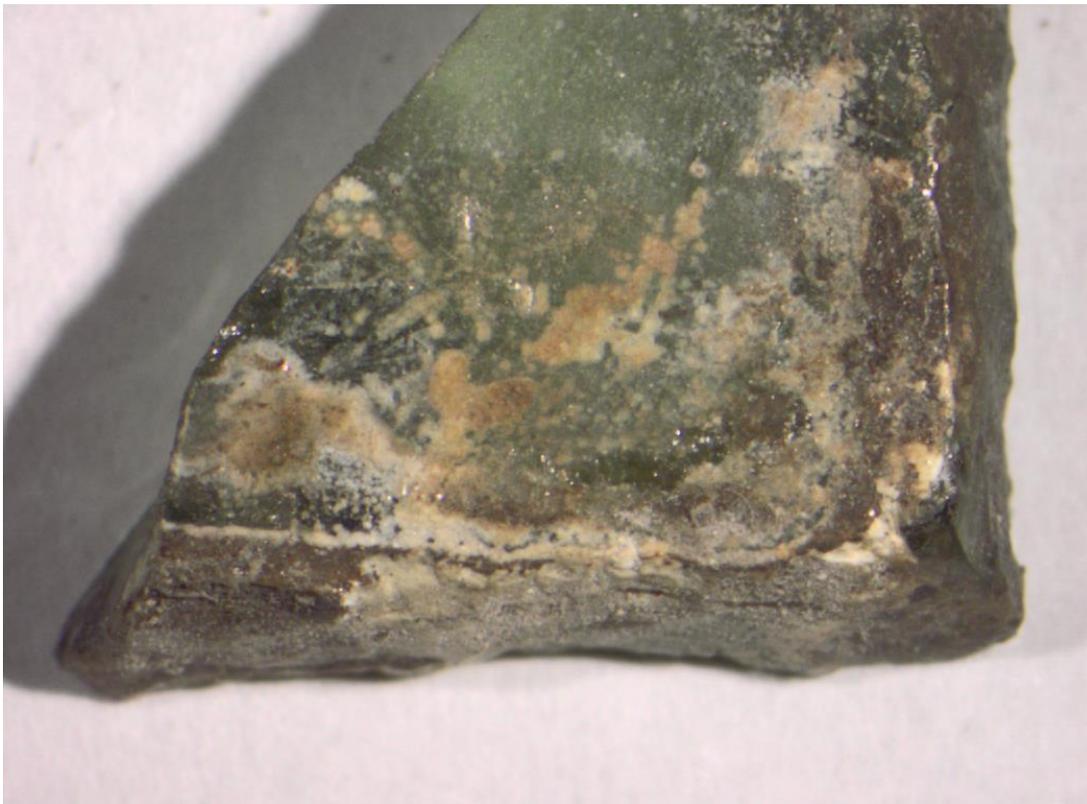


Bild 37: PM10: Feld nIX 6b; Außenseite, Beschichtungsmaterial

5.2.2 Dokumentation von Glasproben aus dem Fenster nIX

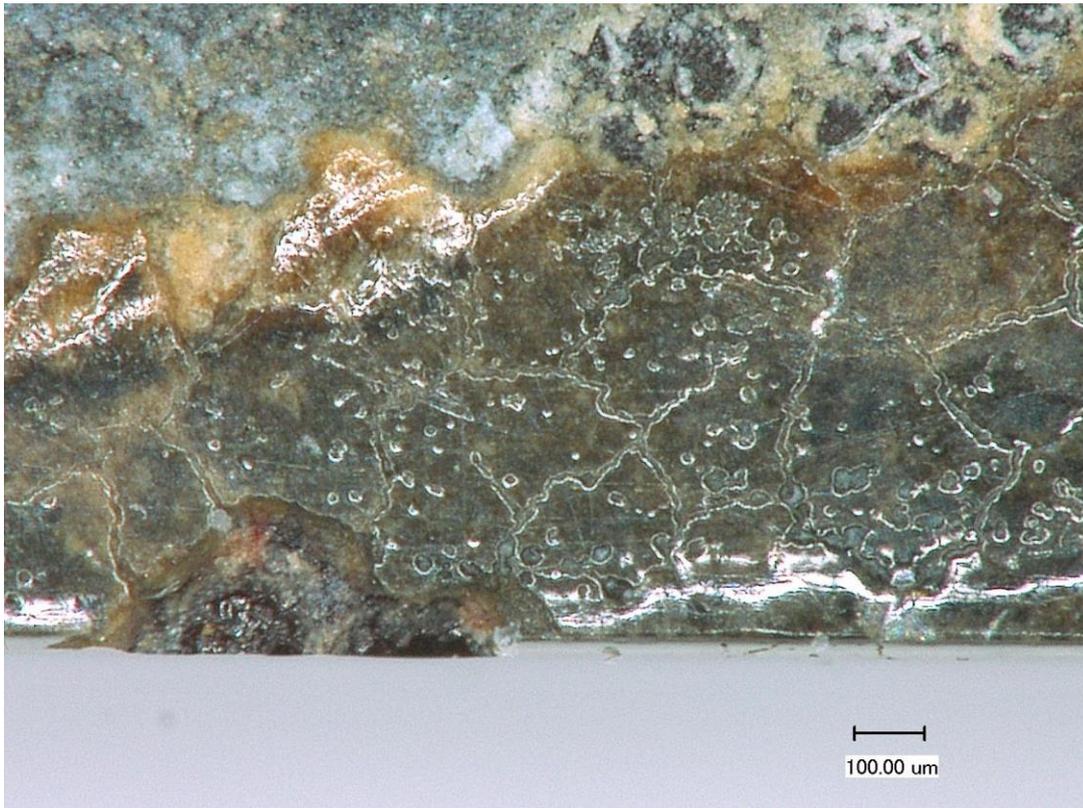


Bild 38: PG 1: Feld nIX 1a; Innenseite mit Beschichtung entlang der Kante (Polymethylmethacrylat)

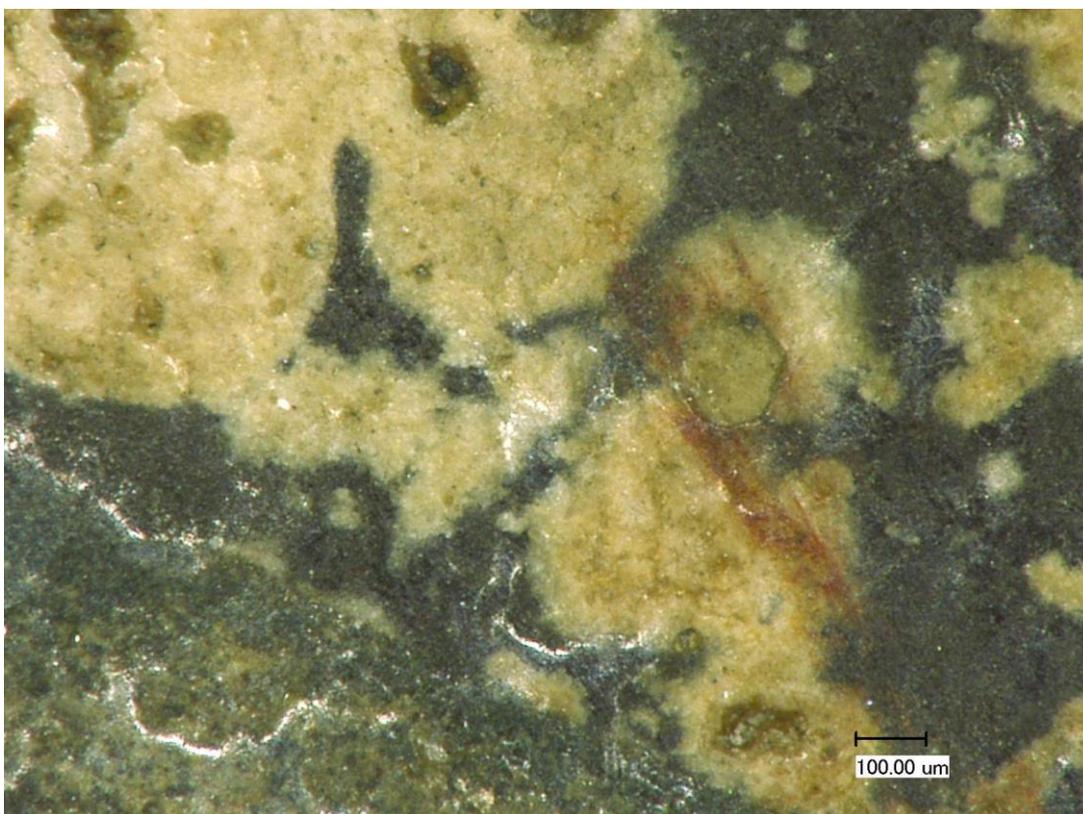


Bild 39: PG 1: Feld nIX 1a; Innenseite, Beschichtung auf Schwarzlot und Korrosion

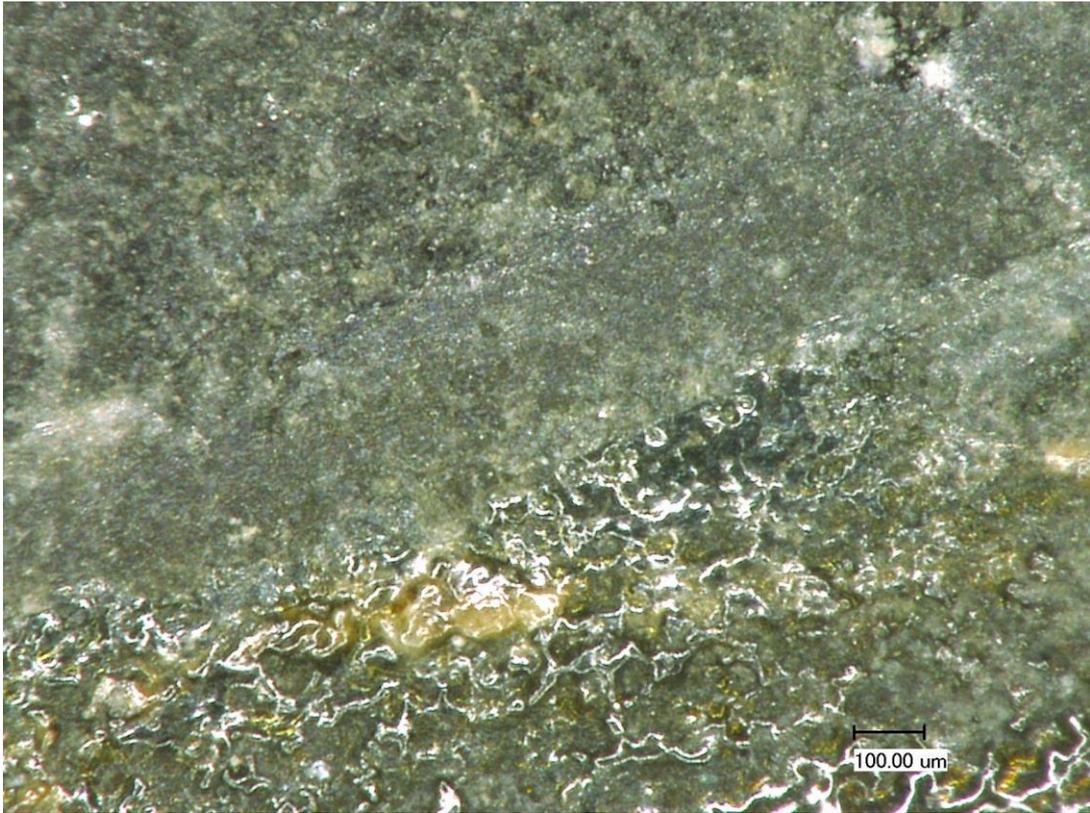


Bild 40: PG1: Feld nIX 1a; Außenseite mit Beschichtung bzw. Imprägnierung



Bild 41: PG1: Feld nIX 1a; Außenseite mit Beschichtung bzw. Imprägnierung

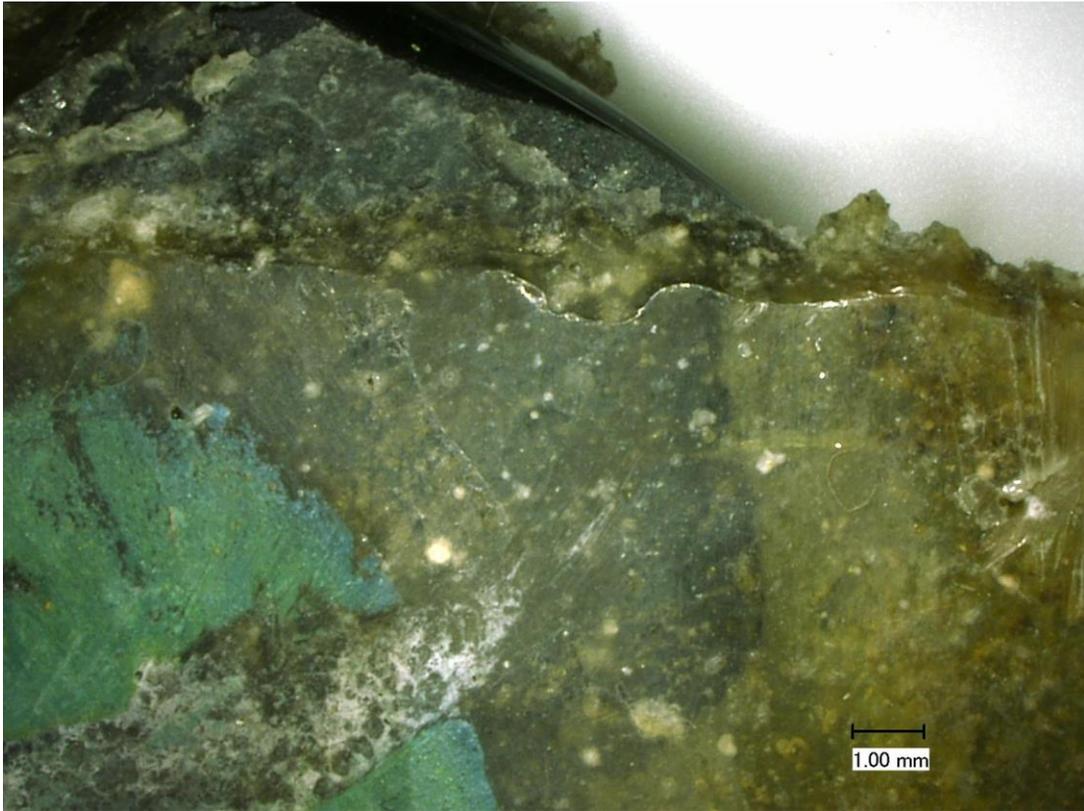


Bild 42: PG2: Feld nIX 3b; Innenseite mit dicker Beschichtung der Oberfläche (Flächenklebung)

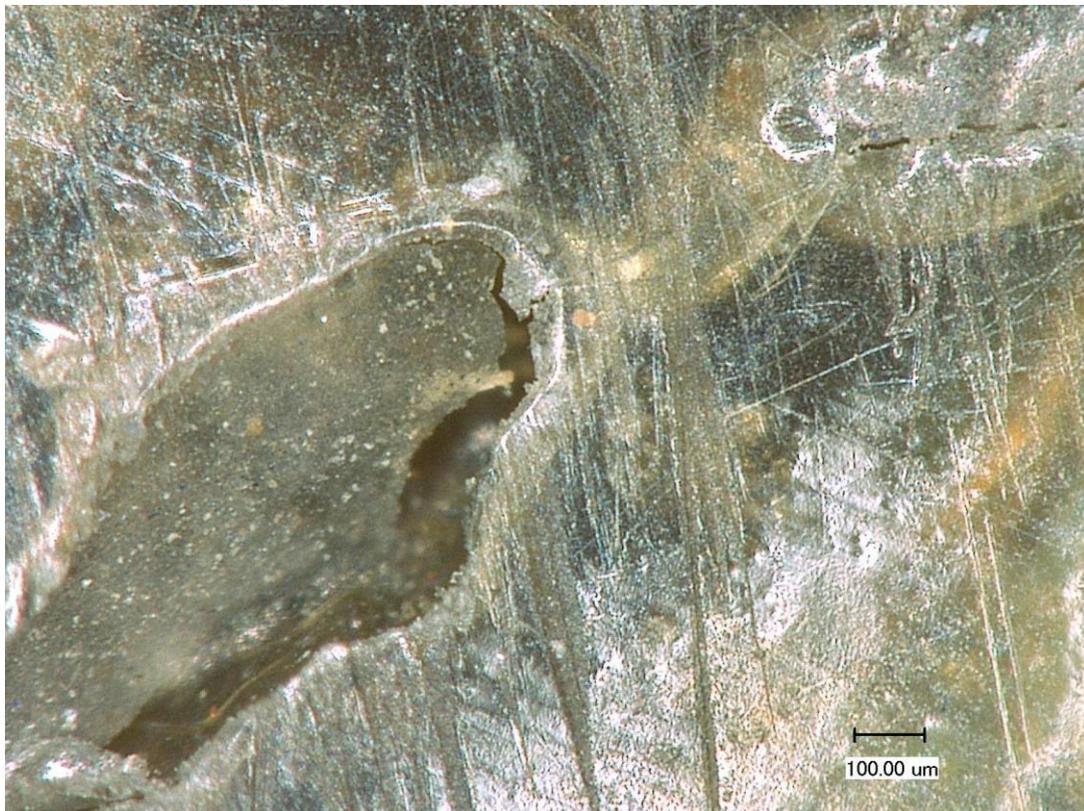


Bild 43: PG2: Feld nIX 3b; Außenseite mit dicker Beschichtung der Oberfläche mit Fehlstellen (Versprödung)

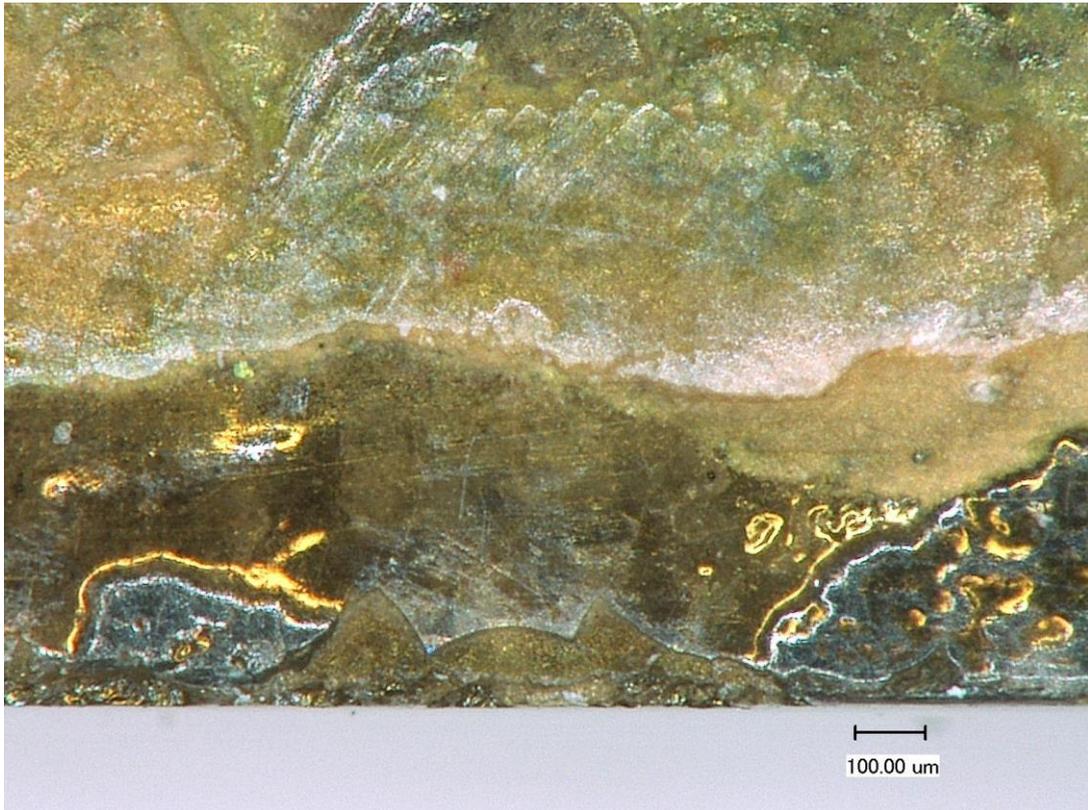


Bild 44: PG3: Feld nIX3b; Innenseite, Beschichtung entlang der angeschliffenen Probenkante



Bild 45: PG 3: Feld nIX 3b; Innenseite, defekte Beschichtung auf Schwarzlot (Polyvinylacetat/Silanhaftvermittler oder Polymethylmethacrylat?)

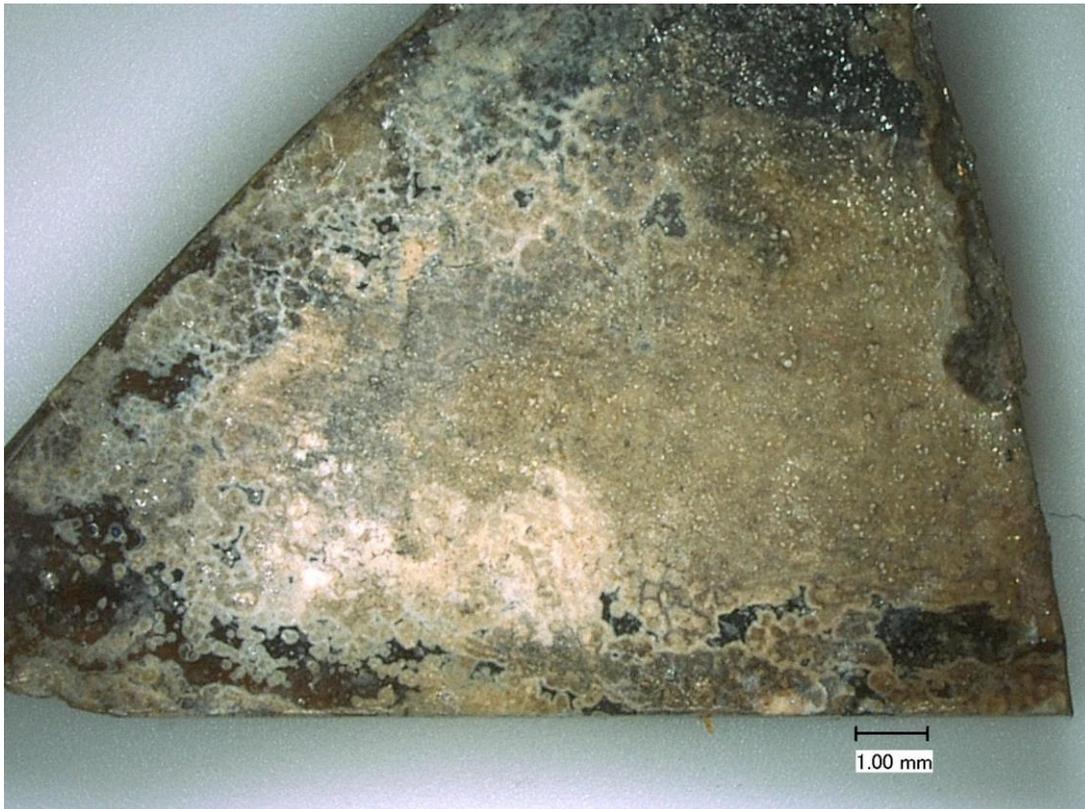


Bild 46: PG3: Feld nIX 3b; Außenseite

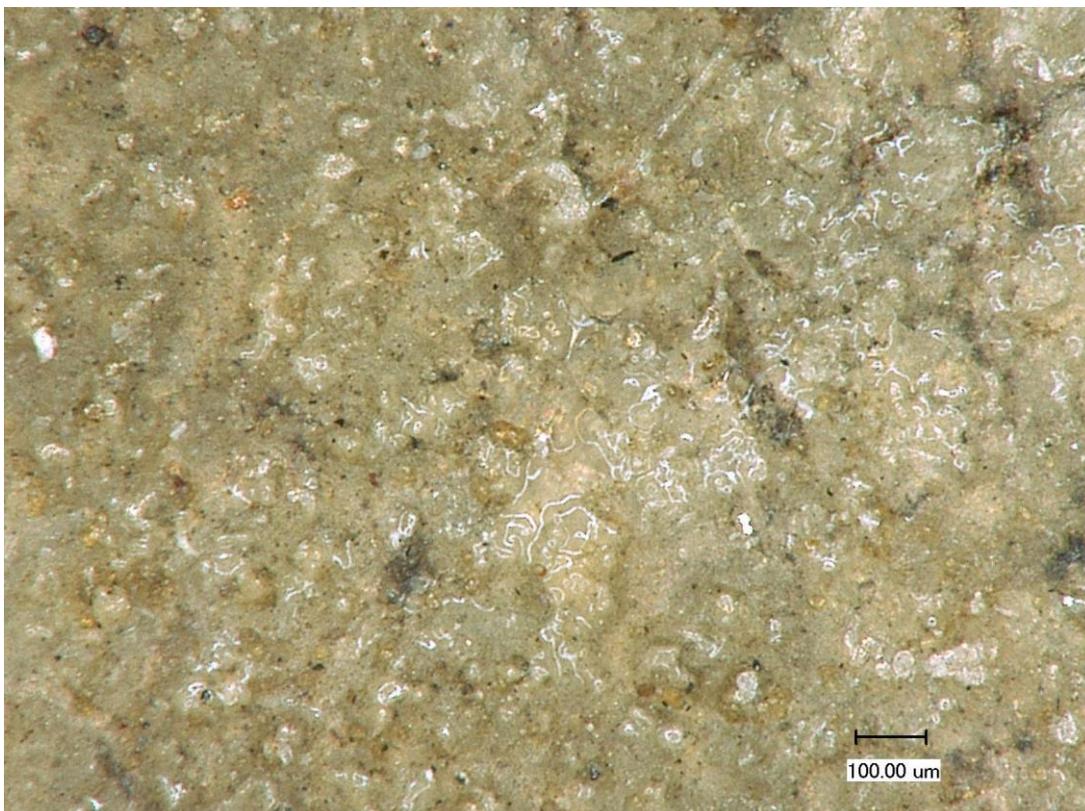


Bild 47: PG 3: Feld nIX 3b; Außenseite mit Beschichtung bzw. Imprägnierung (Polymethylmethacrylat)



Bild 48: PG4: Feld nIX 4c; Innenseite, gefestigte Schwarzlotbereiche

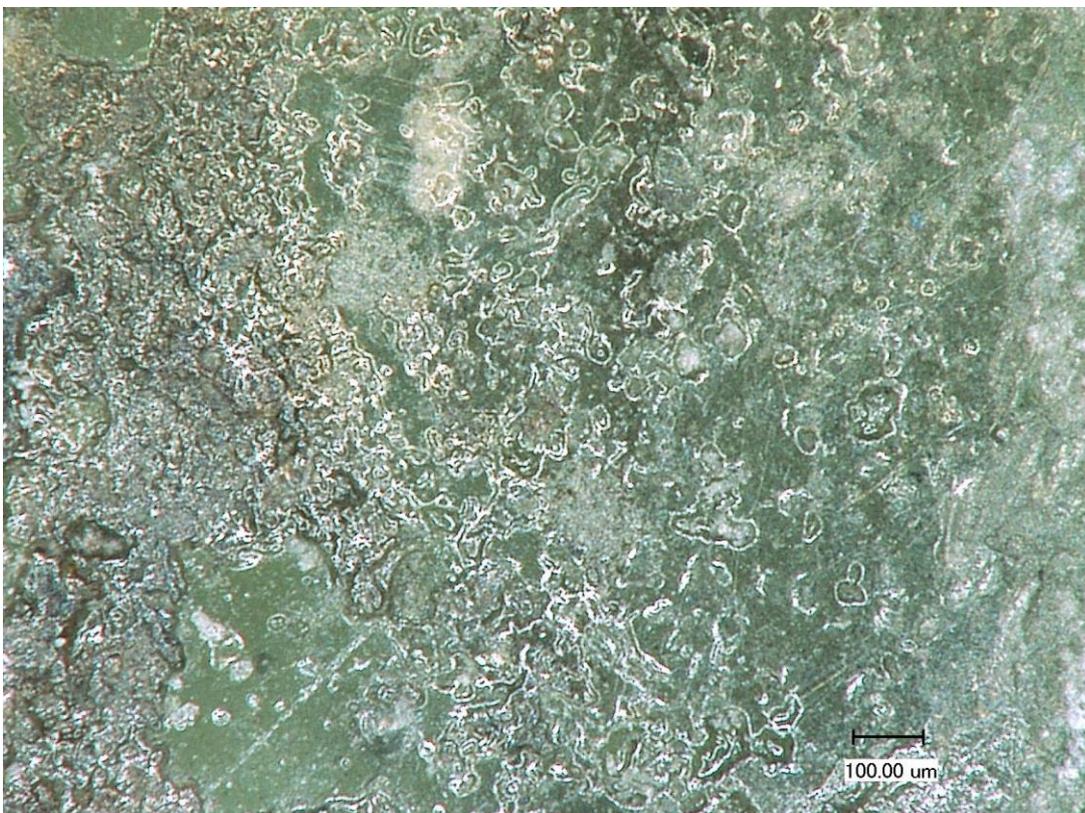


Bild 49: PG4: Feld nIX 4c; Außenseite mit Beschichtung bzw. Imprägnierung



Bild 50: PG 5: Feld nIX 8b; Innenseite mit Beschichtung/Klebung

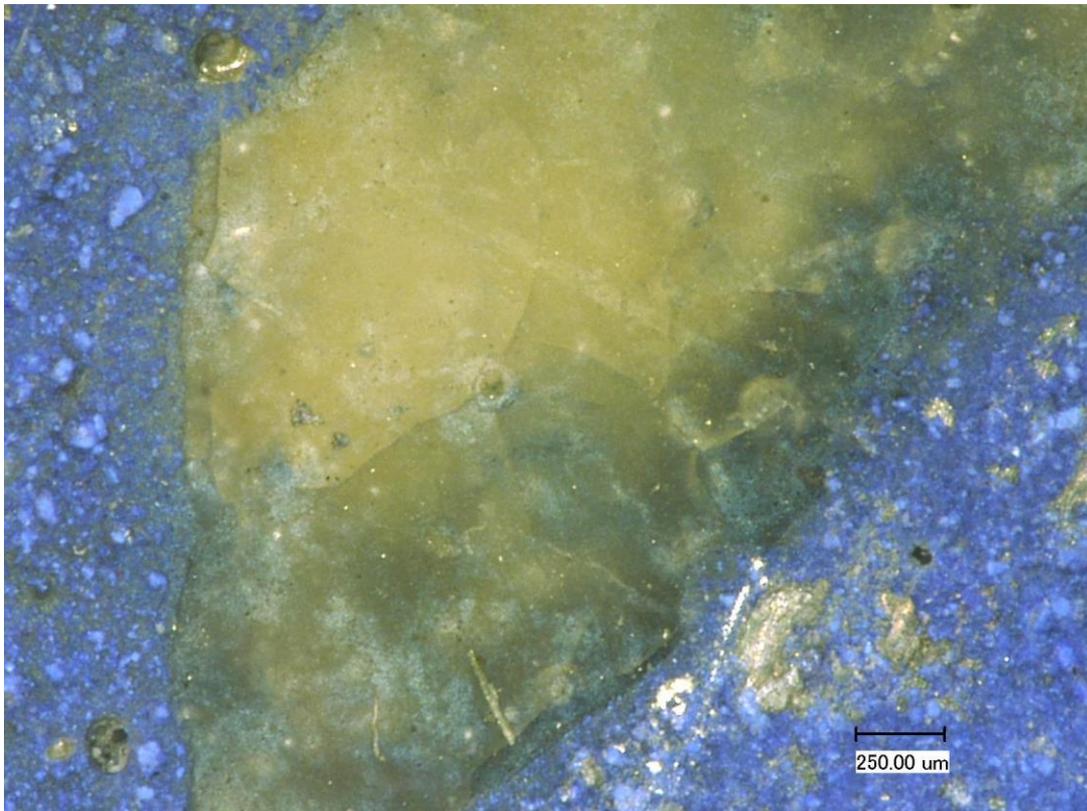


Bild 51: PG 5: Feld nIX 8b; Innenseite, Glasoberfläche mit versprödeter Klebung

5.3 Dokumentation eines Glasmalereifeldes aus Kulm (Ad1339) im Stadtmuseum Thorn



Bild 52: Innenseite (KM1-KM6)



Bild 53: Außenseite (KM1-KM6)

5.3.1 Dokumentation der Kulmer Scheibe (Ad 1339) im Stadtmuseum Thorn

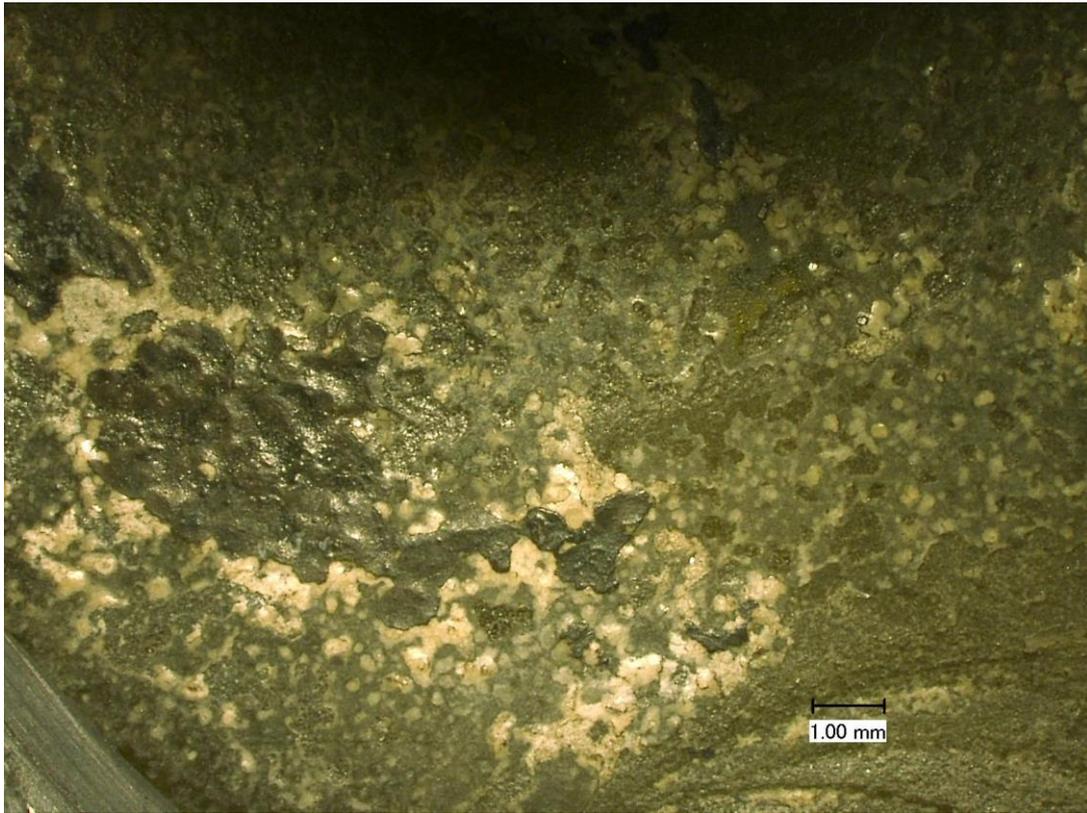


Bild 54: Innenseite, Beschichtung auf korrodierter Glasoberfläche auf KM1



Bild 55: Innenseite, Beschichtungsmaterial auf korrodiertem Glas und Schwarzlot auf KM1



Bild 56: Innenseite, Detail - Beschichtung auf Glasoberfläche und Schwarzlot auf KM1



Bild 57: Innenseite, dicke Flächenklebung auf KM2

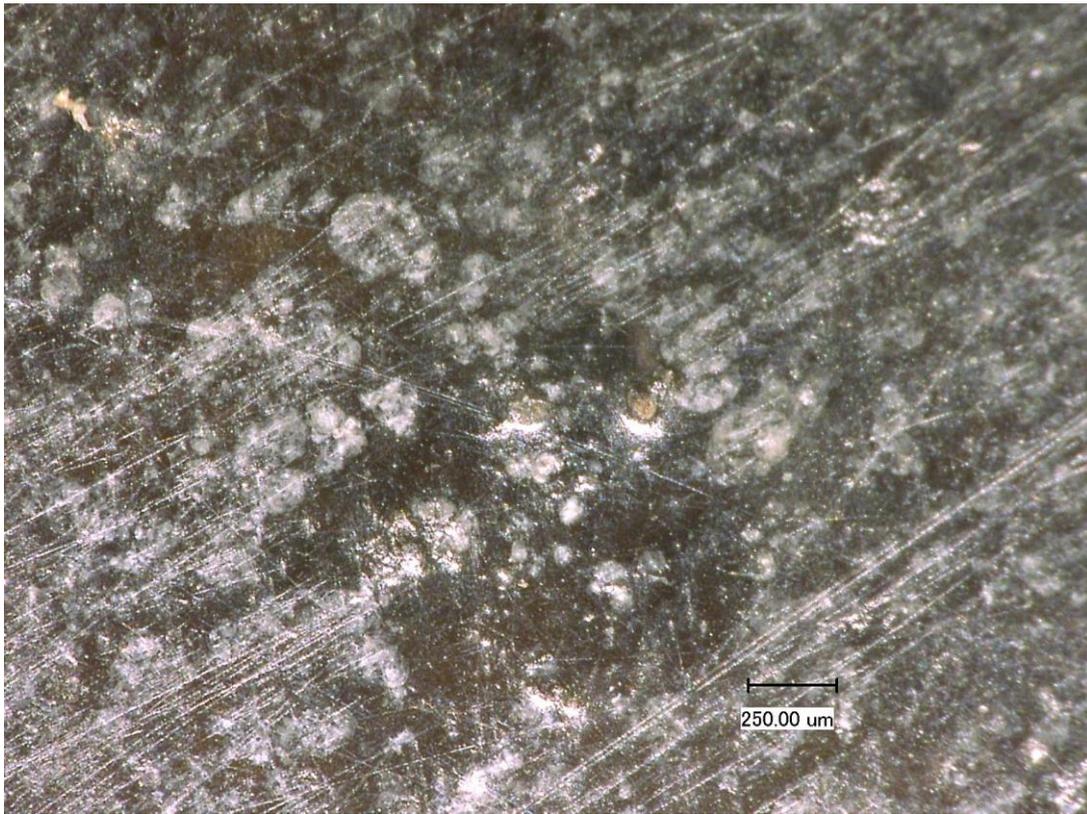


Bild 58: Innenseite, Reinigungsspuren auf Glasoberfläche auf KM2

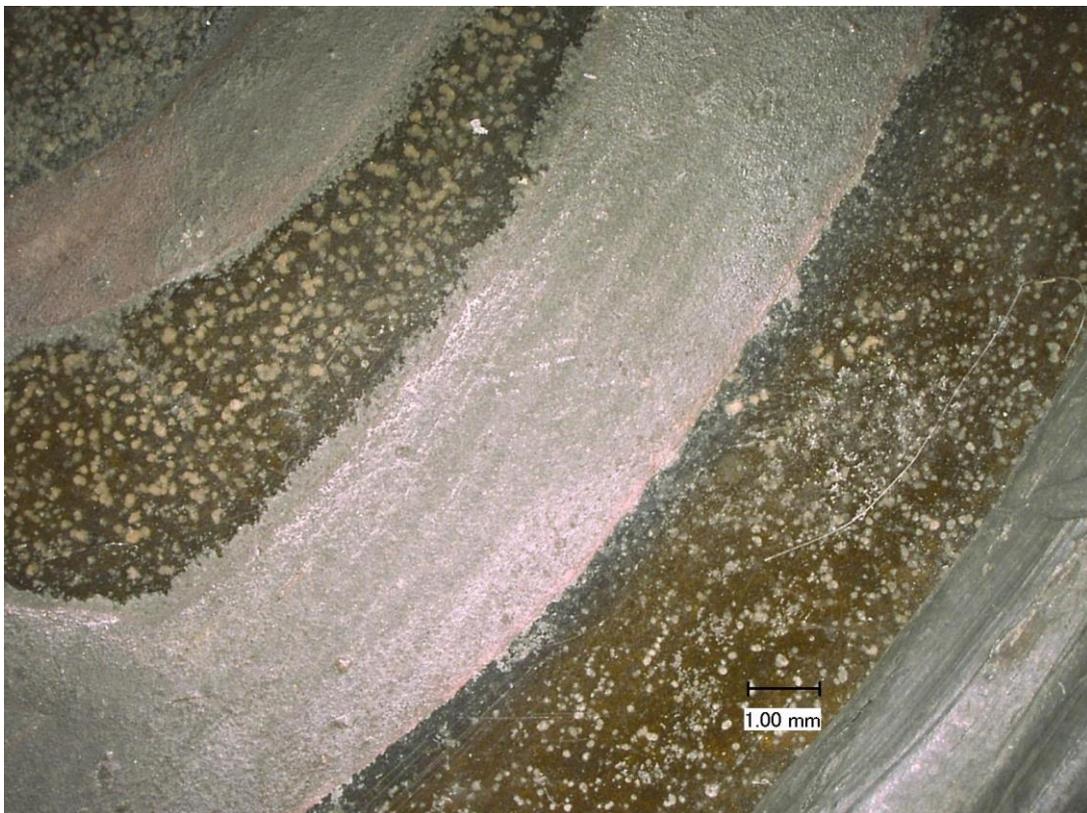


Bild 59: Innenseite, Schwarzlot gefestigt und Glasoberfläche beschichtet auf KM3



Bild 60: Innenseite, Detail – relativ dickes Beschichtungsmaterial auf Schwarzlot und Glas auf KM3

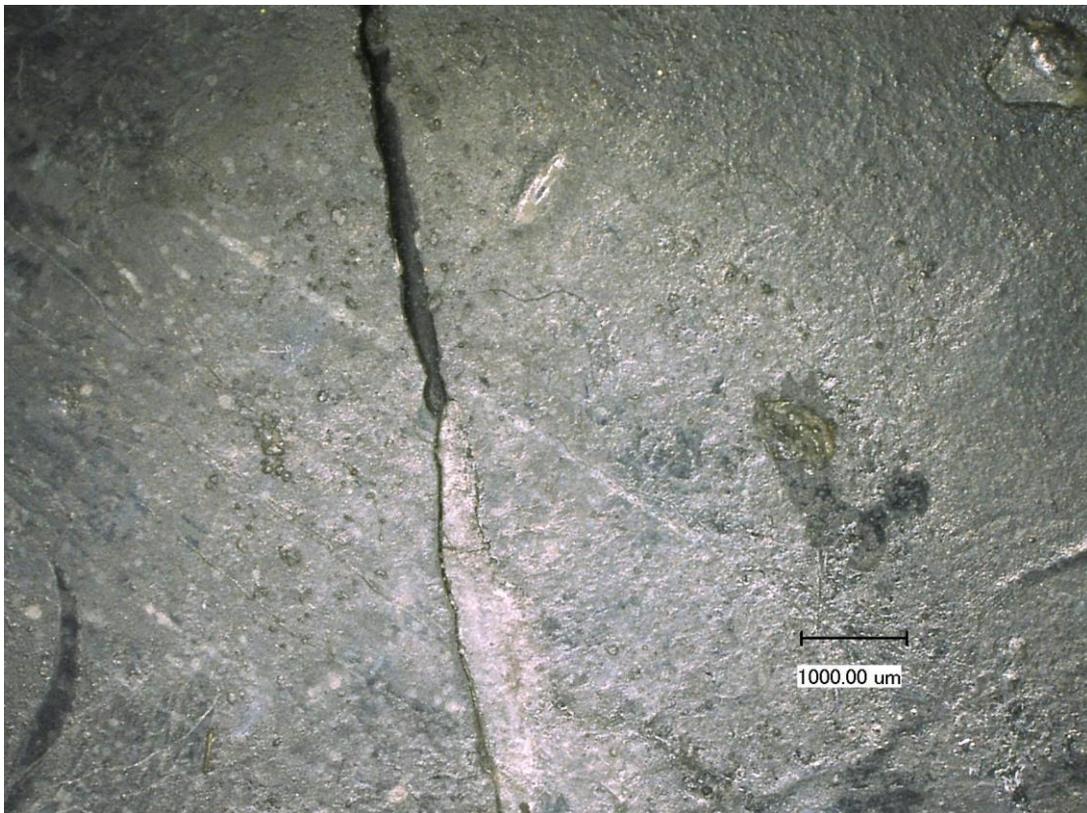


Bild 61: Innenseite, Sprungklebung und Flächenimprägung auf KM4



Bild 62: Innenseite, Detail - Flächenimprägierung auf KM4



Bild 63: Innenseite, Schwarzlotfestigung auf KM5

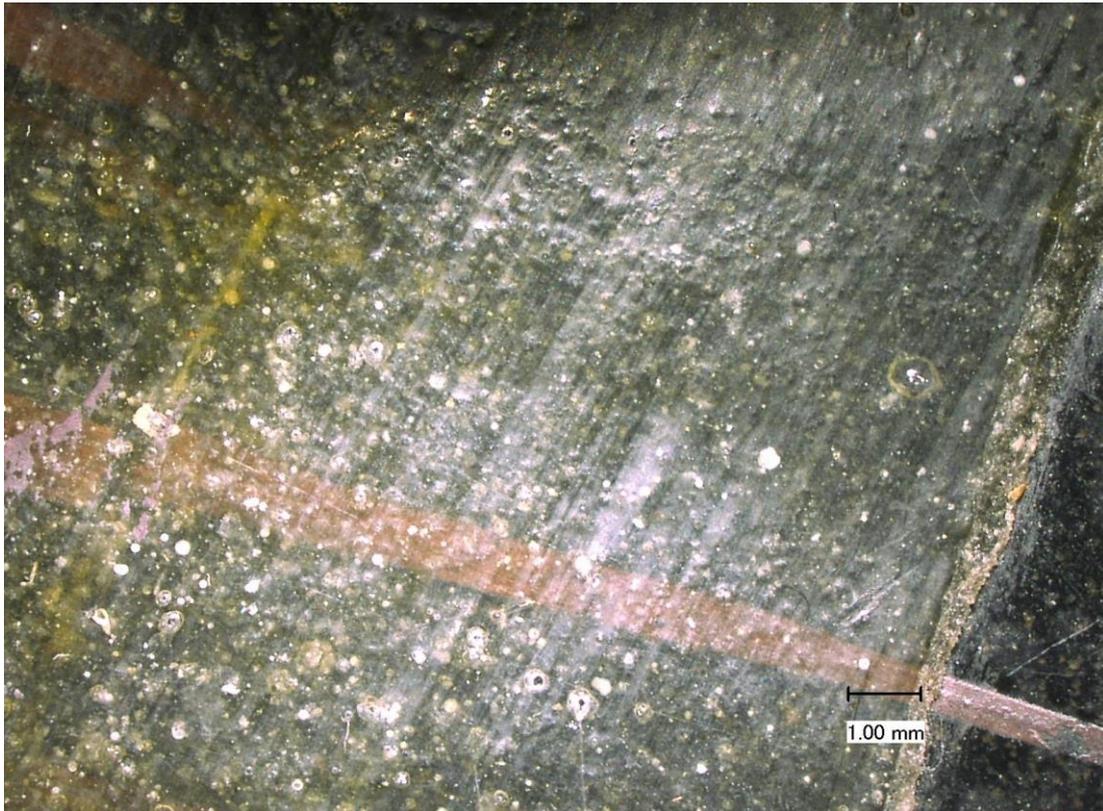


Bild 64: Innenseite, dickes Beschichtungsmaterial auf KM6



Bild 65: Innenseite, Flächenimprägnierung von Schwarzlot und Glasoberfläche auf KM6

5.3.2 Dokumentation: Kulmer Scheibe (Ad 1339) im Stadtmuseum Thorn



Bild 66: Außenseite, Beschichtung und Flächenimprägnierung mit Korrosion und Lochfraß auf KM1

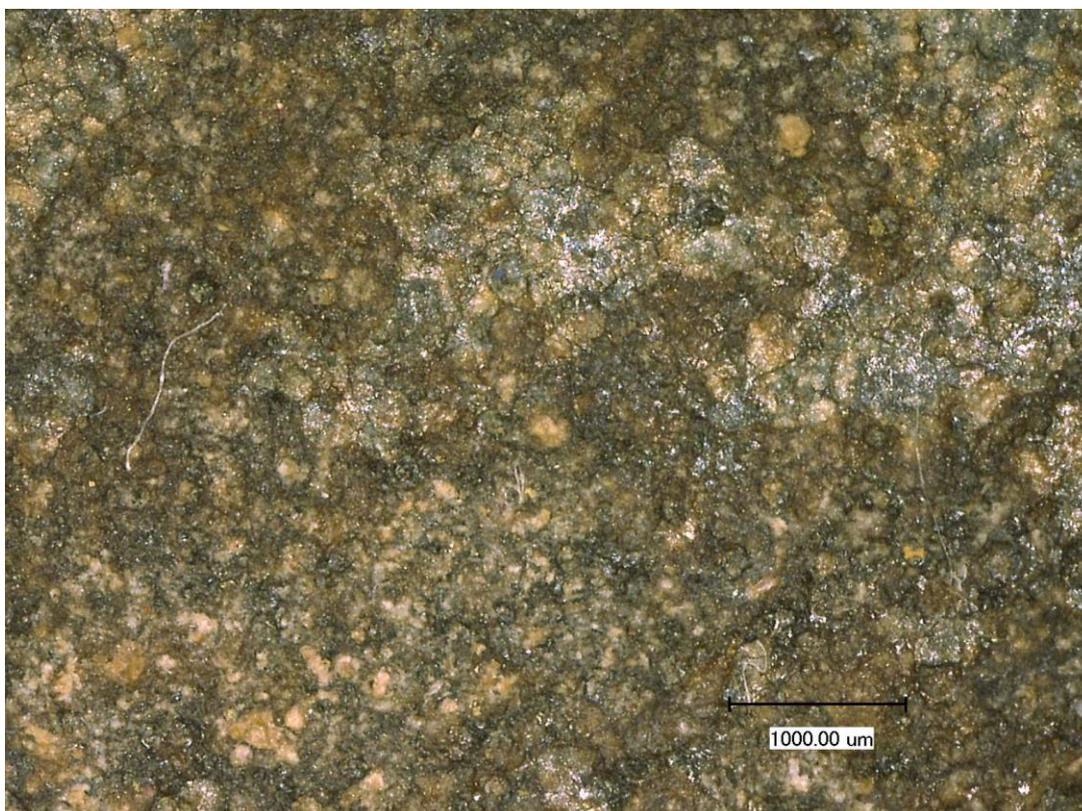


Bild 67: Außenseite, Beschichtungsmaterial (Flächenimprägnierung) auf korrodiertem Glas auf KM2

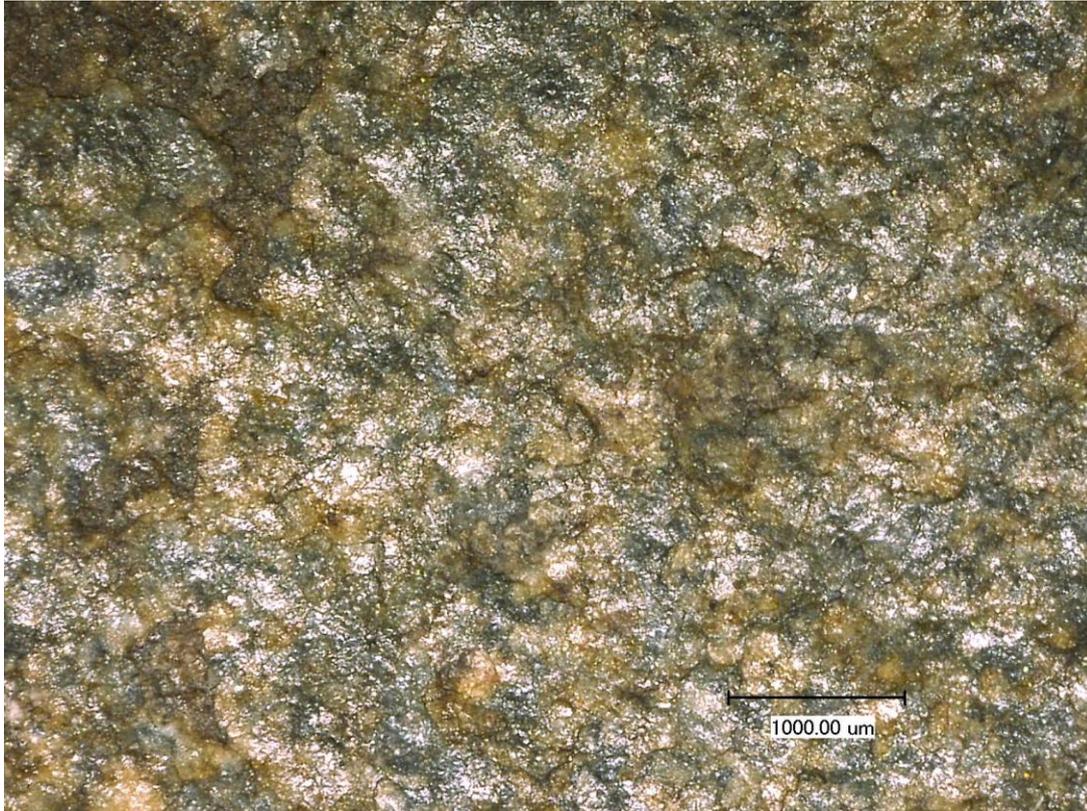


Bild 68: Außenseite, Detail - Beschichtung (Flächenimprägnierung) auf Glasoberfläche auf KM3

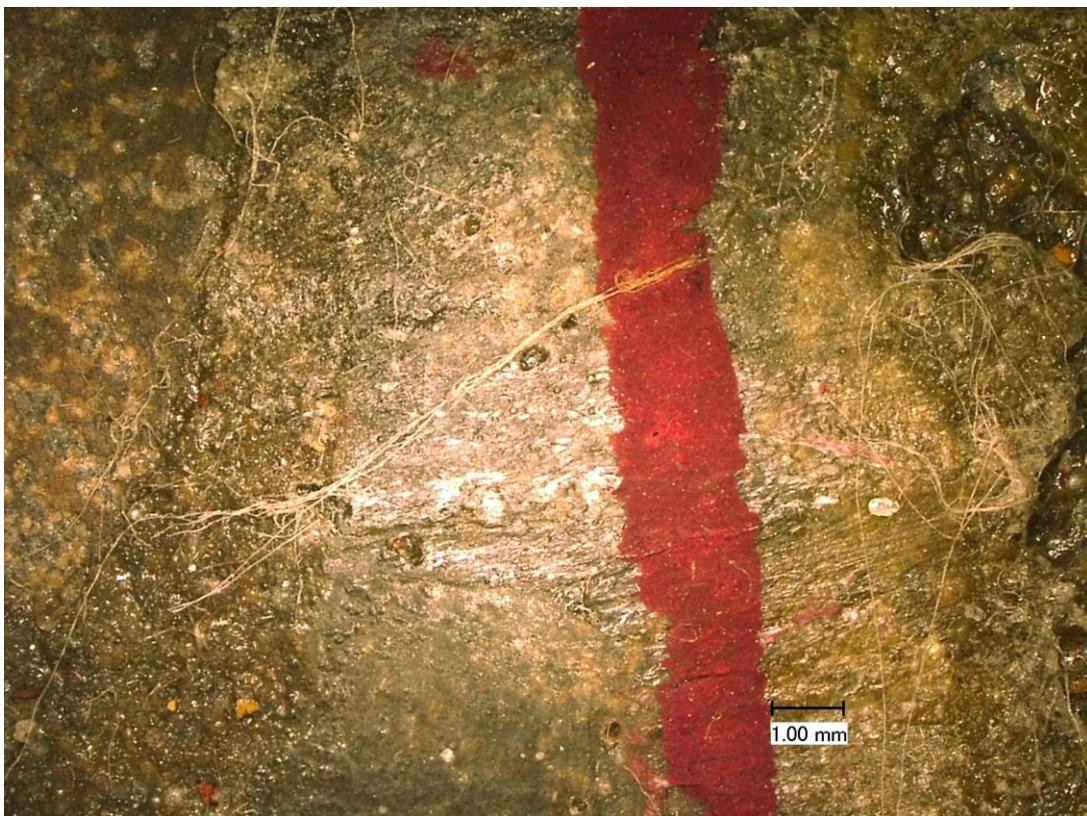


Bild 69: Außenseite, eingefärbte Klebung auf KM4

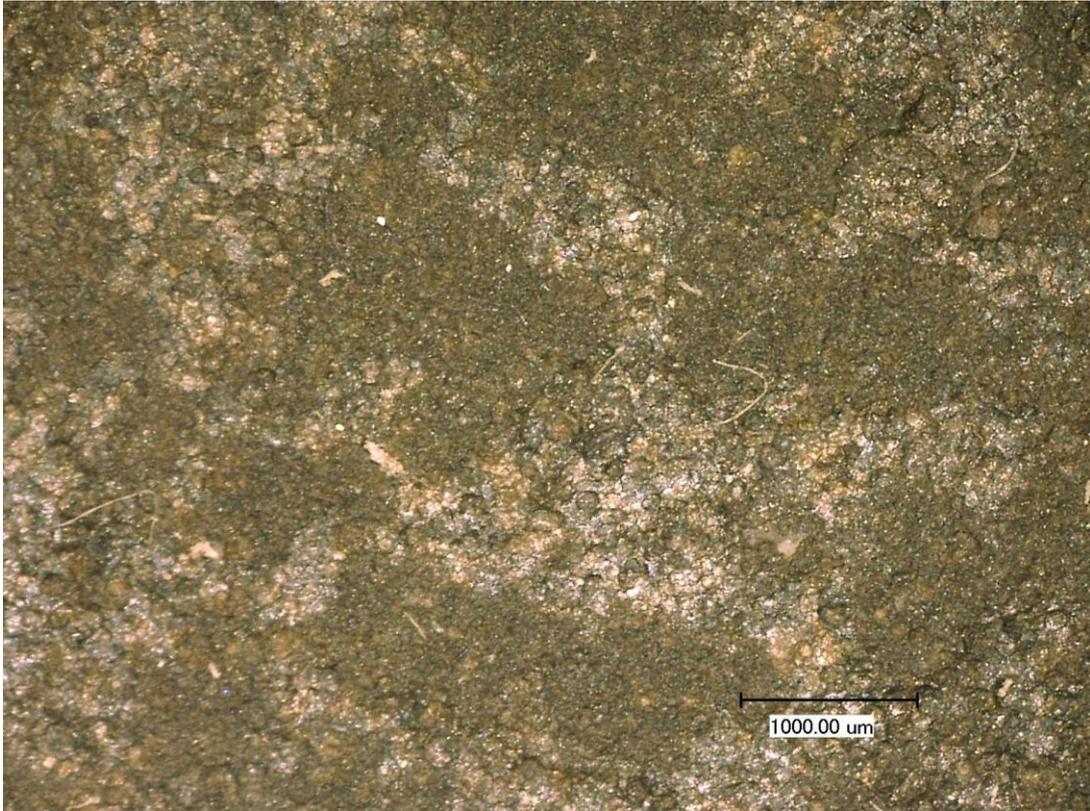


Bild 70: Außenseite, Flächenimprägnierung auf korrodiertes Glasoberfläche auf KM5

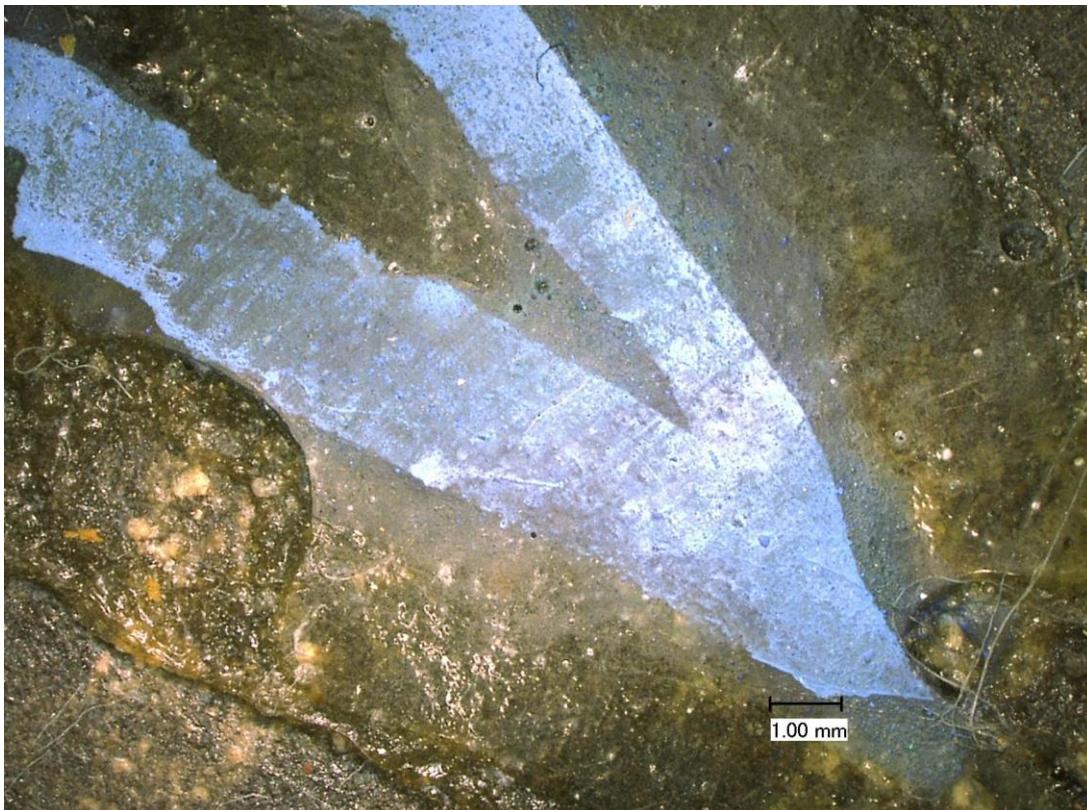


Bild 71: Außenseite, eingefärbte Klebung auf Glasoberfläche auf KM6

5.4 Dokumentation eines Glasmalereifeldes der Dominikanerkirche (Ad1363) im Stadtmuseum Thorn



Bild 72: Innenseite (DM1-DM6)

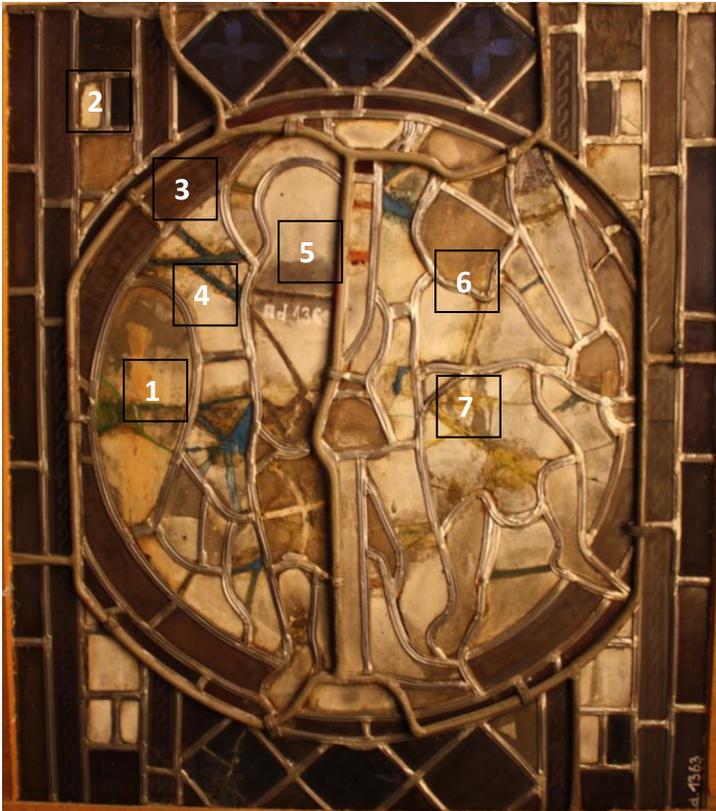


Bild 73: Außenseite (DM1-DM6)

5.4.1 Dokumentation der Dominikaner Scheibe (Ad 1363) im Stadtmuseum Thorn



Bild 74: Innenseite, Beschichtung auf Schwarzlot auf DM1



Bild 75: Innenseite, Detail- Beschichtungsmaterial auf Schwarzlot auf DM1

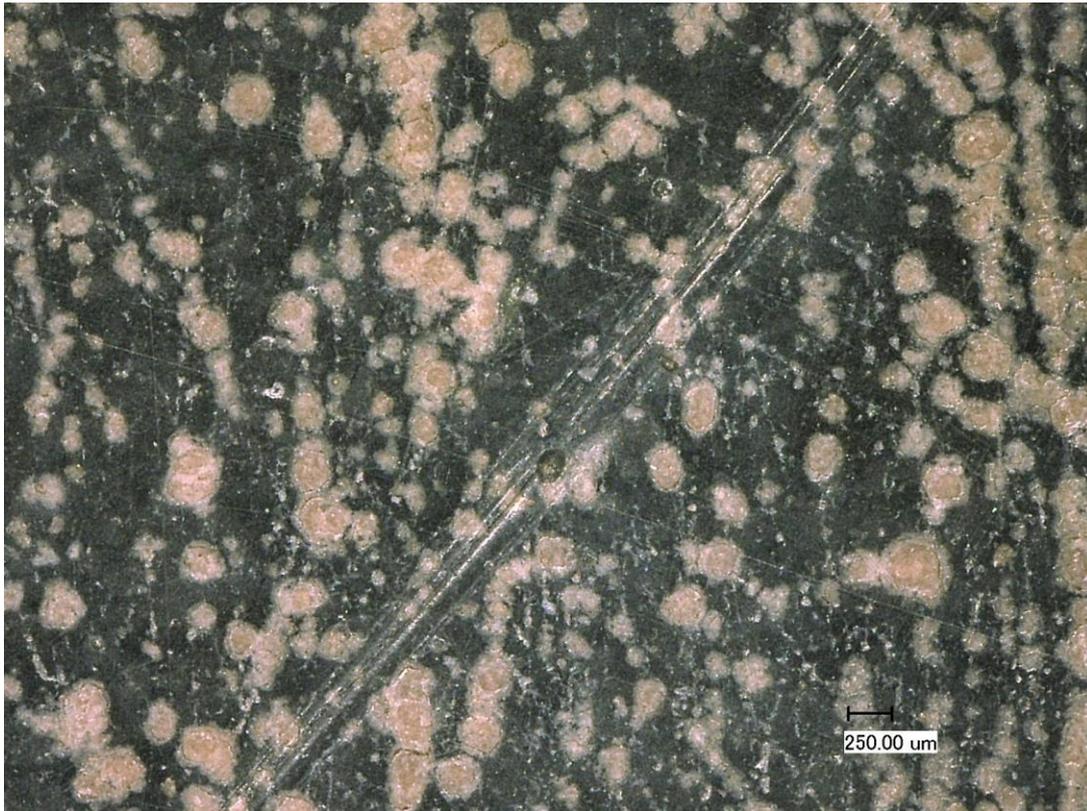


Bild 76: Innenseite, korrodierte Glasoberfläche zwischen Schwarzlotkonturen auf DM1



Bild 77: Innenseite, intakte Flächenklebung auf DM1

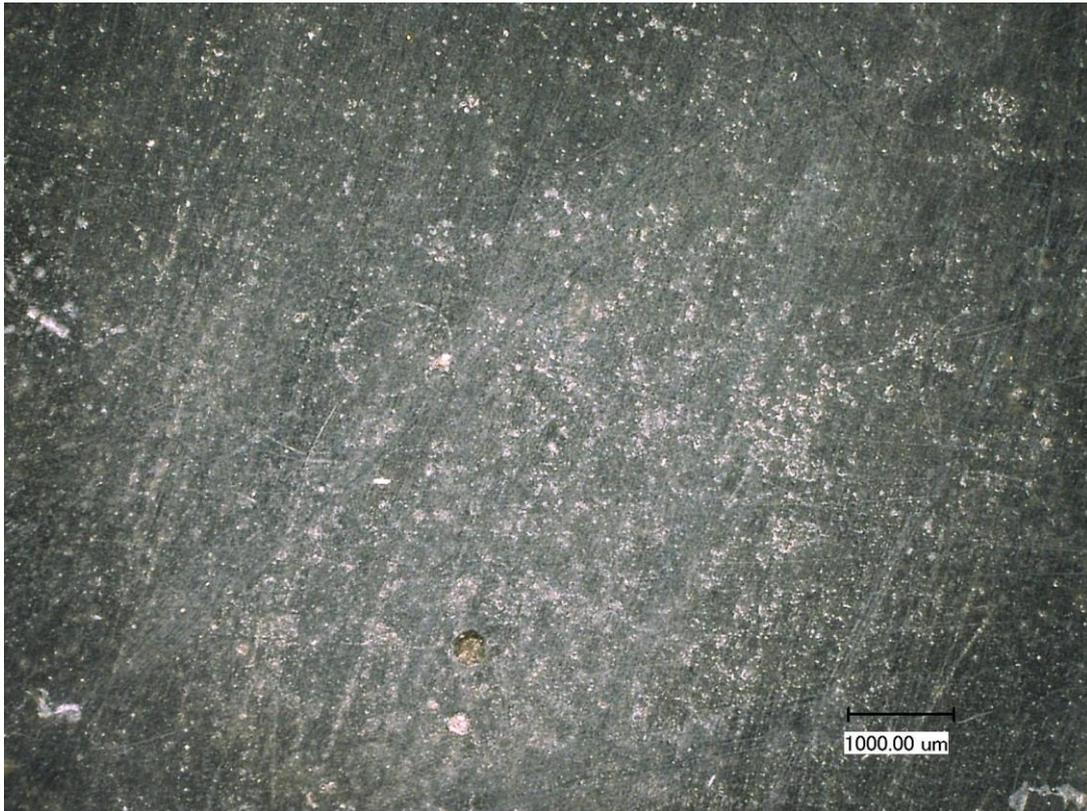


Bild 78: Innenseite, unbehandelte Glasoberfläche auf DM2

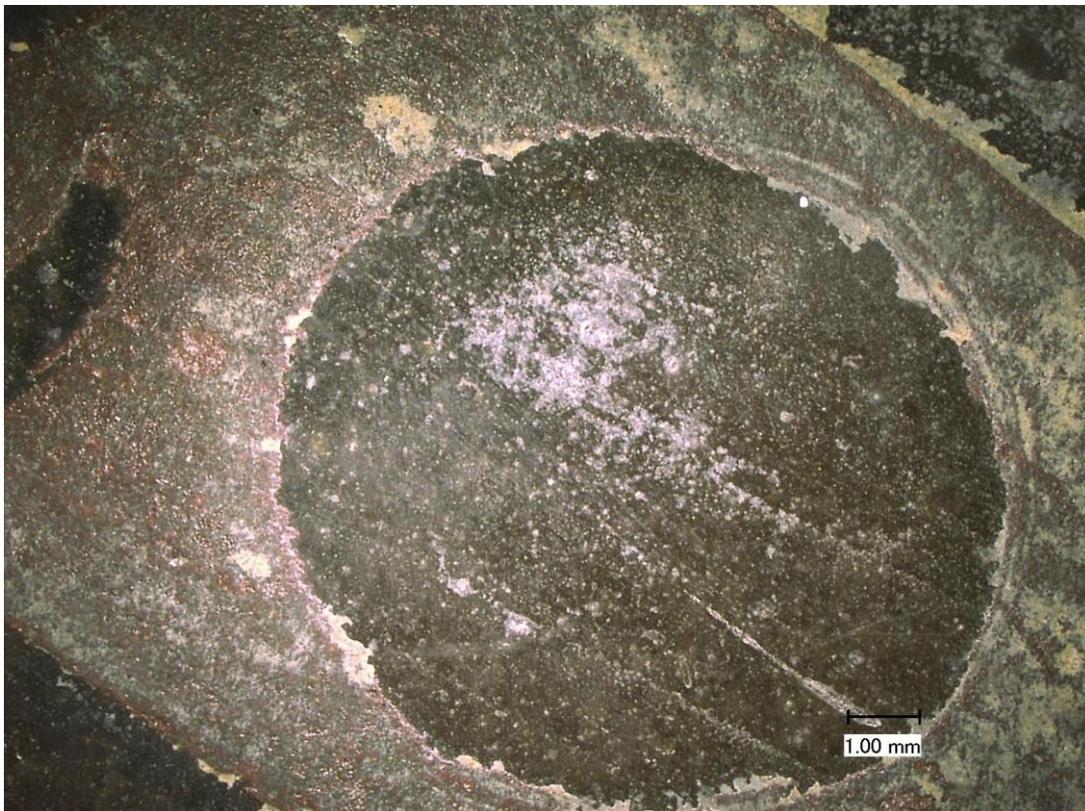


Bild 79: Innenseite, Schwarzlot gefestigt und Glasoberfläche beschichtet auf DM3

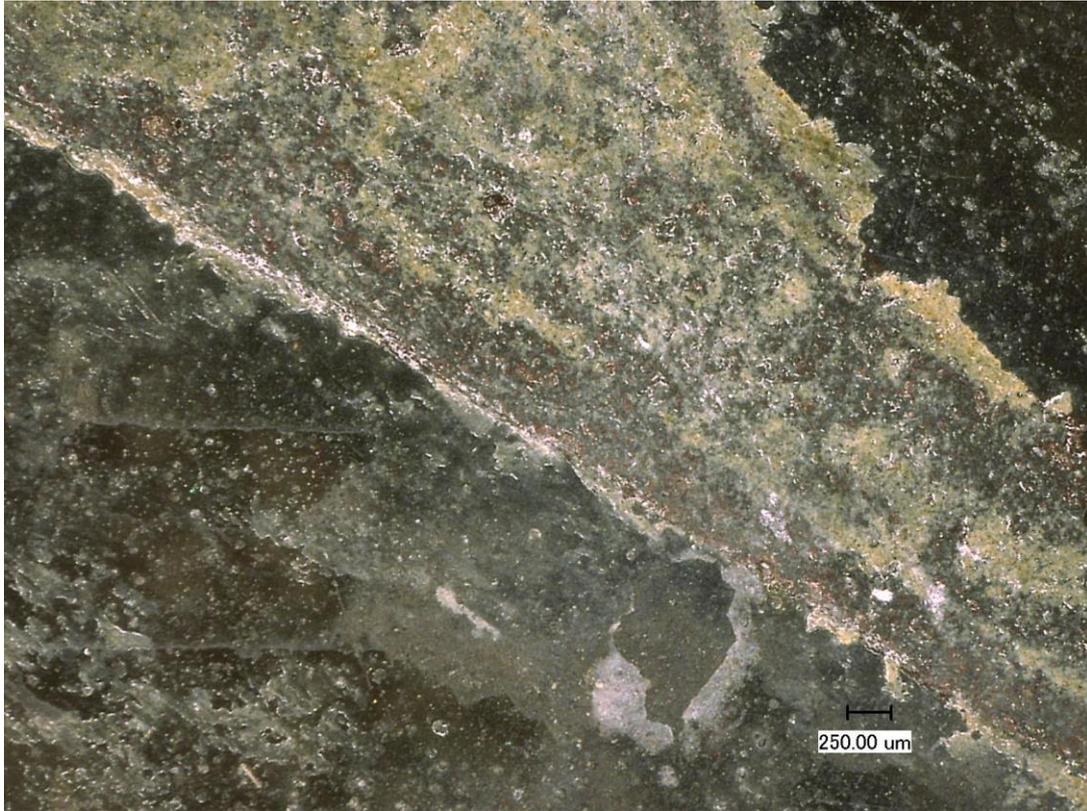


Bild 80: Innenseite, Detail - Schwarzlot gefestigt und Glasoberfläche beschichtet auf DM3

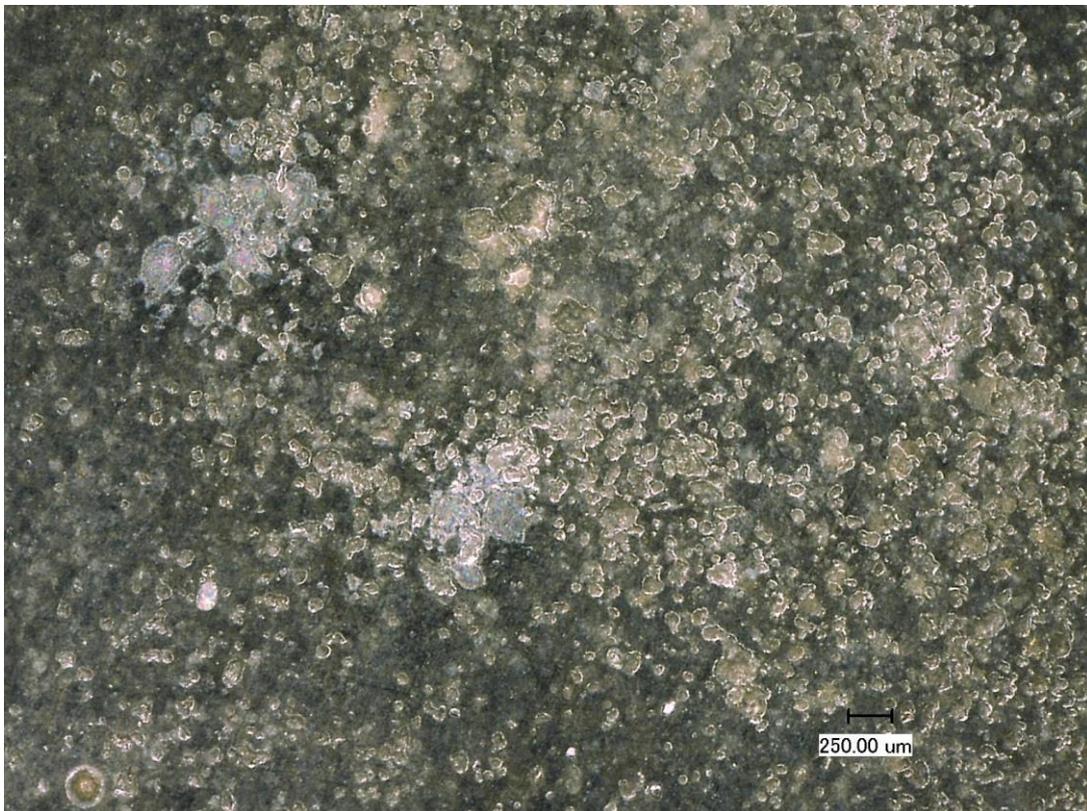


Bild 81: Innenseite, Detail - Flächenimprägnierung auf Oberfläche mit Korrosionsprodukten auf DM4



Bild 82: Innenseite, Beschichtungsmaterial mit Fehlstellen auf DM5

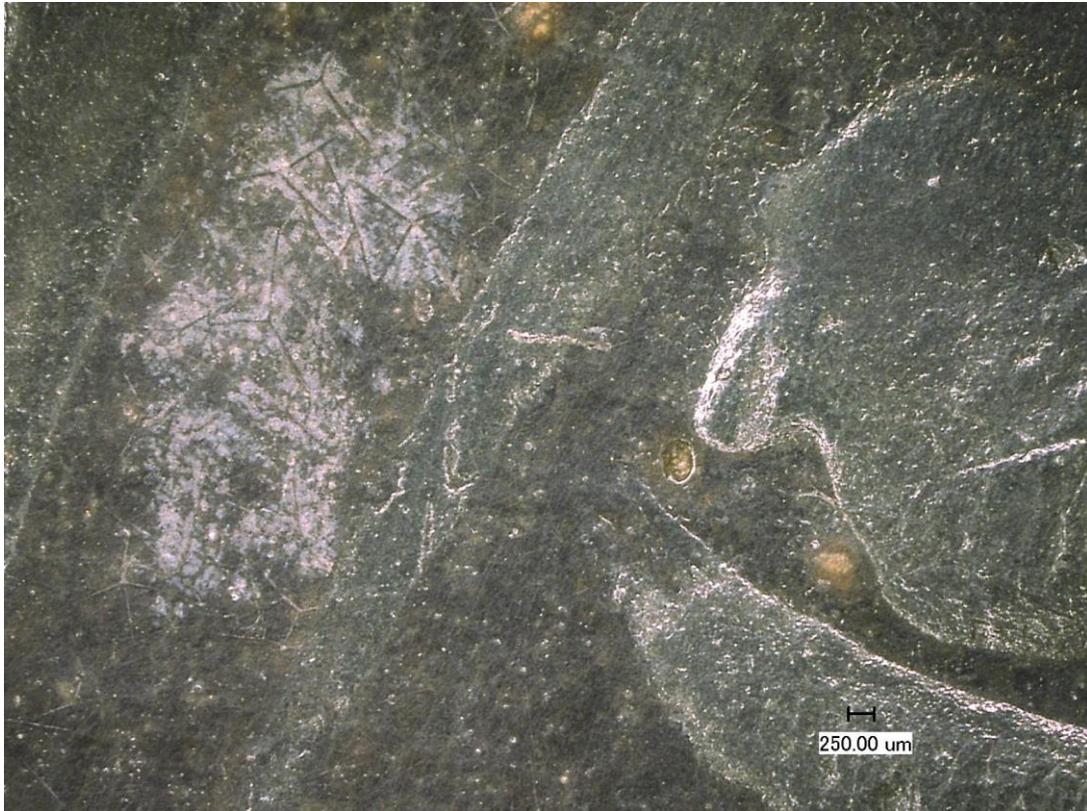


Bild 83: Innenseite, Beschichtungsmaterial mit Rissen und Neukorrosion? auf DM5



Bild 84: Innenseite, Flächenimprägnierung im Bereich des Inkarnatglases auf DM6



Bild 85: Innenseite, Detail - Flächenimprägnierung im Bereich des Inkarnatglases auf DM6



Bild 86: Innenseite, intakte Flächenimprägung auf DM7



Bild 87: Innenseite, Rissklebung auf DM7

5.4.2 Dokumentation der Dominikaner Scheibe (Ad1363) im Stadtmuseum Thorn



Bild 88: Außenseite, eingefärbte Klebung und Flächenimprägnierung auf DM1, Probe Mikrobiologie



Bild 89: Außenseite, Beschichtungsmaterial und Flächenimprägnierung auf DM1



Bild 90: Außenseite, intakte Oberflächenbeschichtung auf DM1

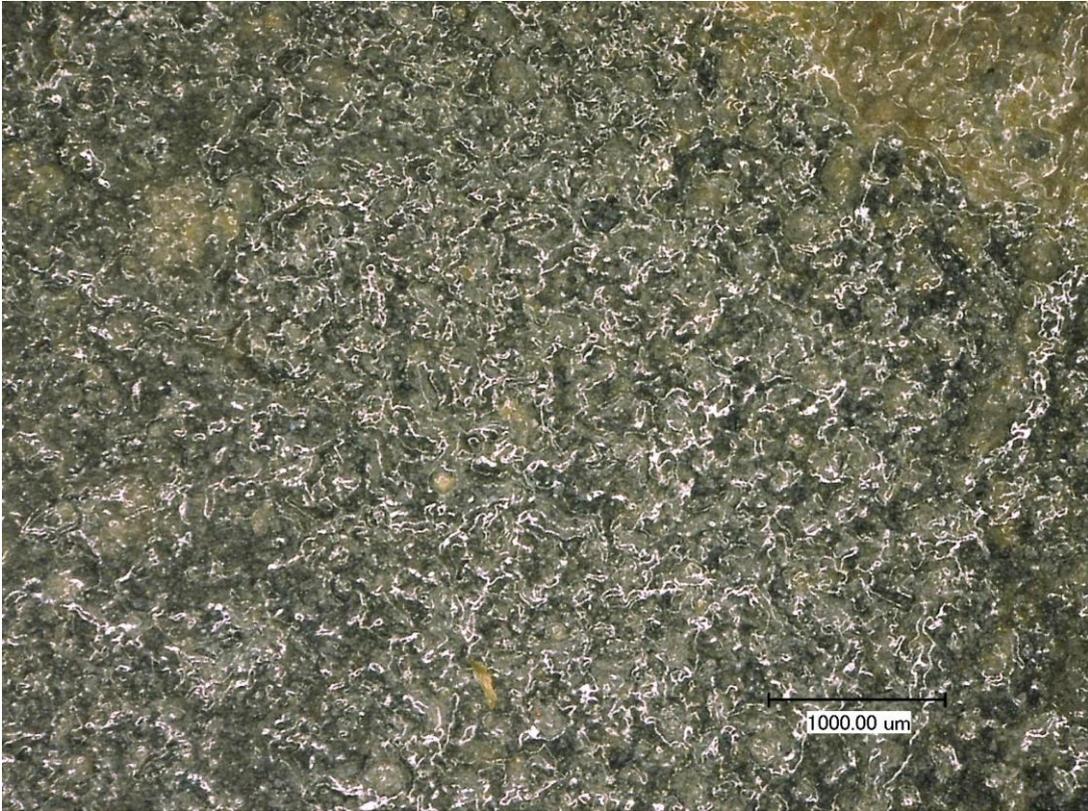


Bild 91: Außenseite, intakte Flächenimprägnierung-Detail auf DM1

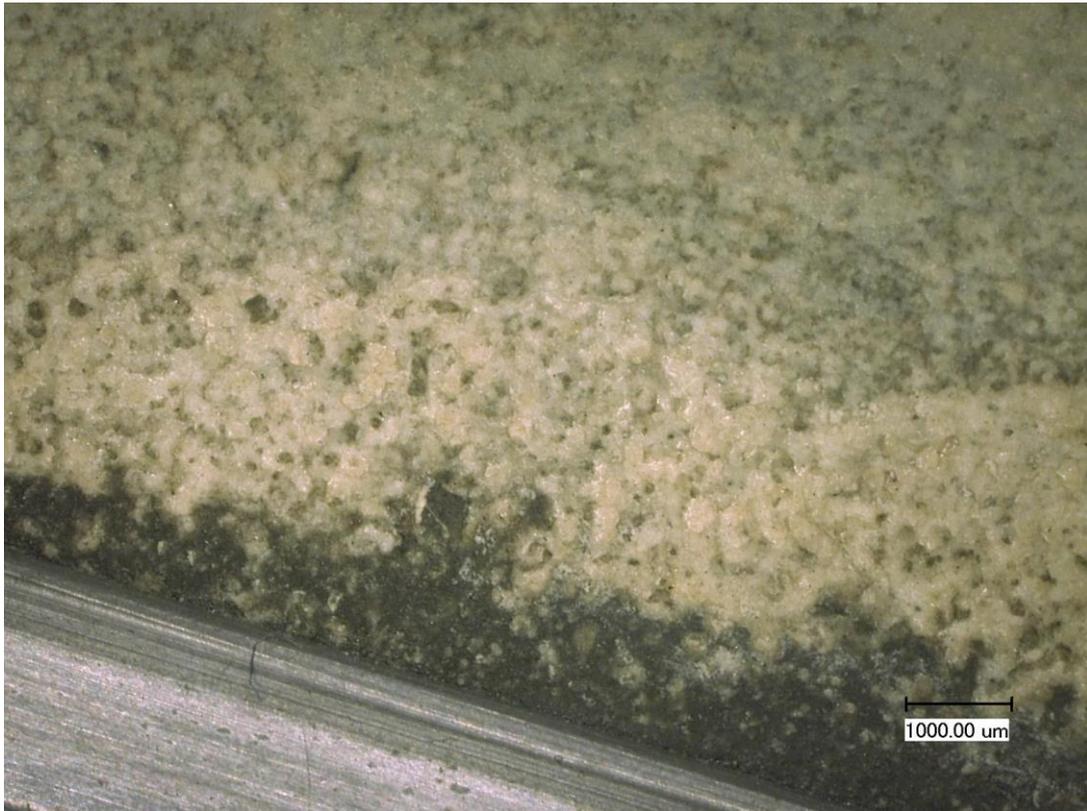


Bild 92: Außenseite, gefestigte Korrosionsprodukte auf DM2

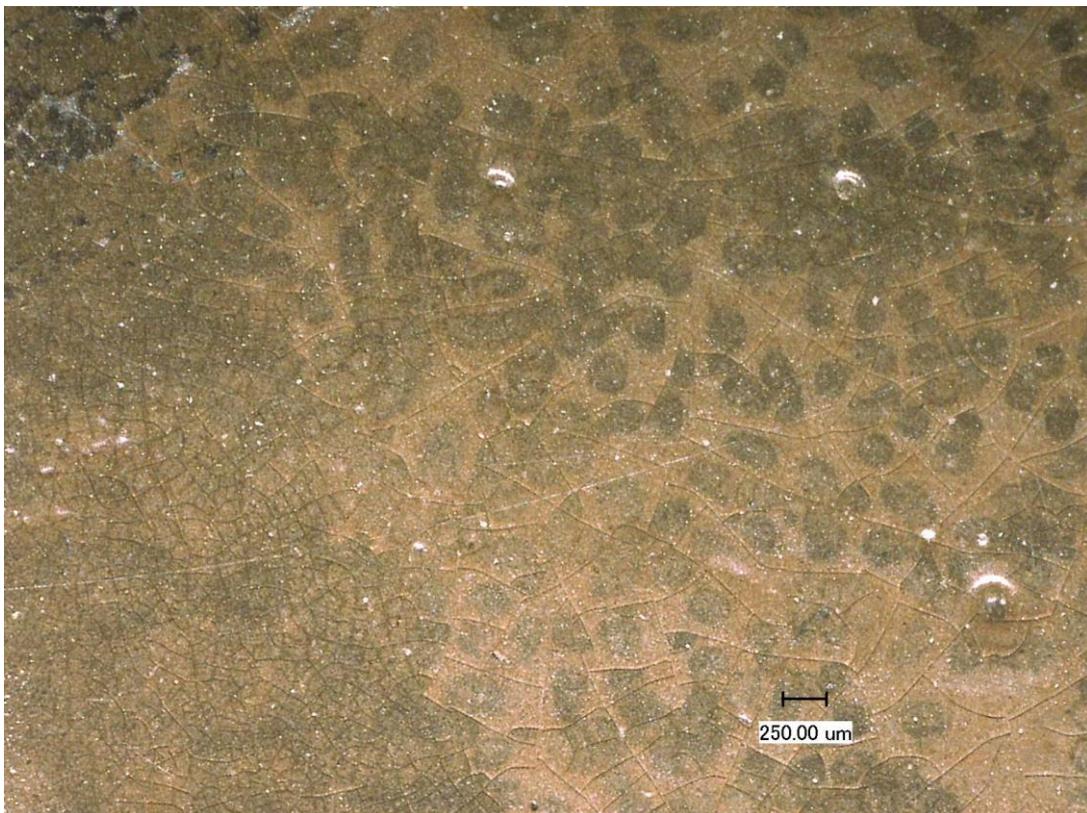


Bild 93: Außenseite, Beschichtungsmaterial mit Rissen auf DM3

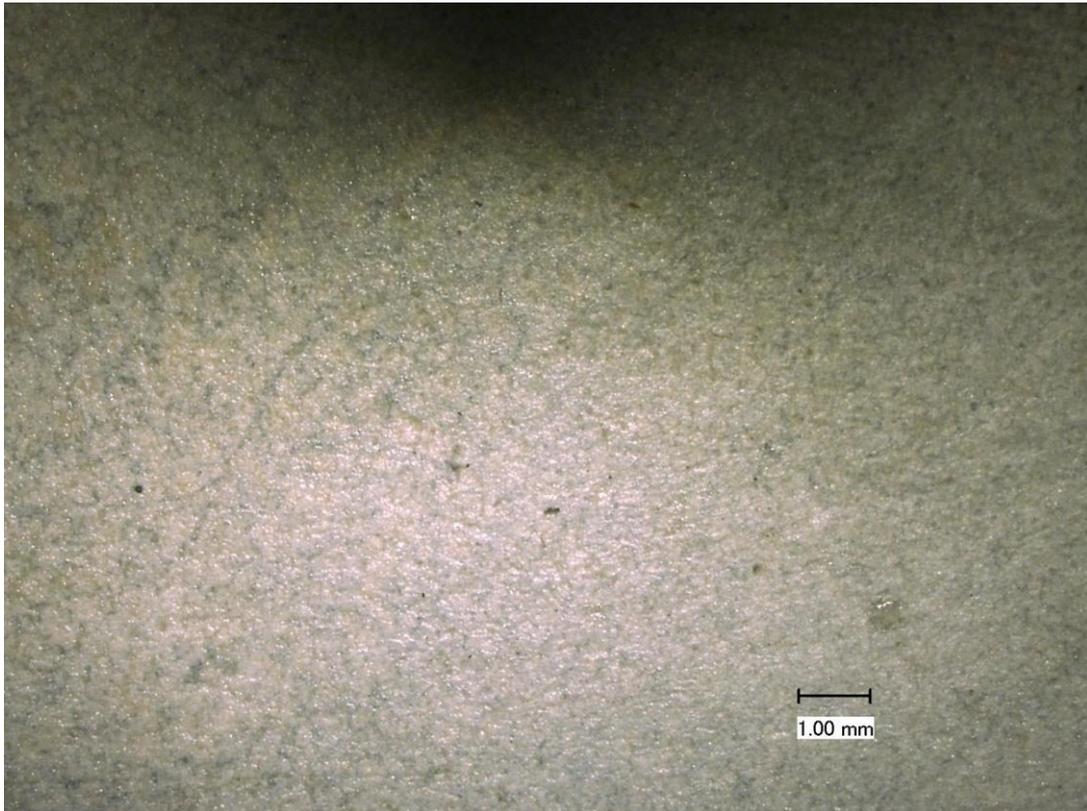


Bild 94: Außenseite, intakte Flächenimprägierung auf rauher Oberfläche auf DM4

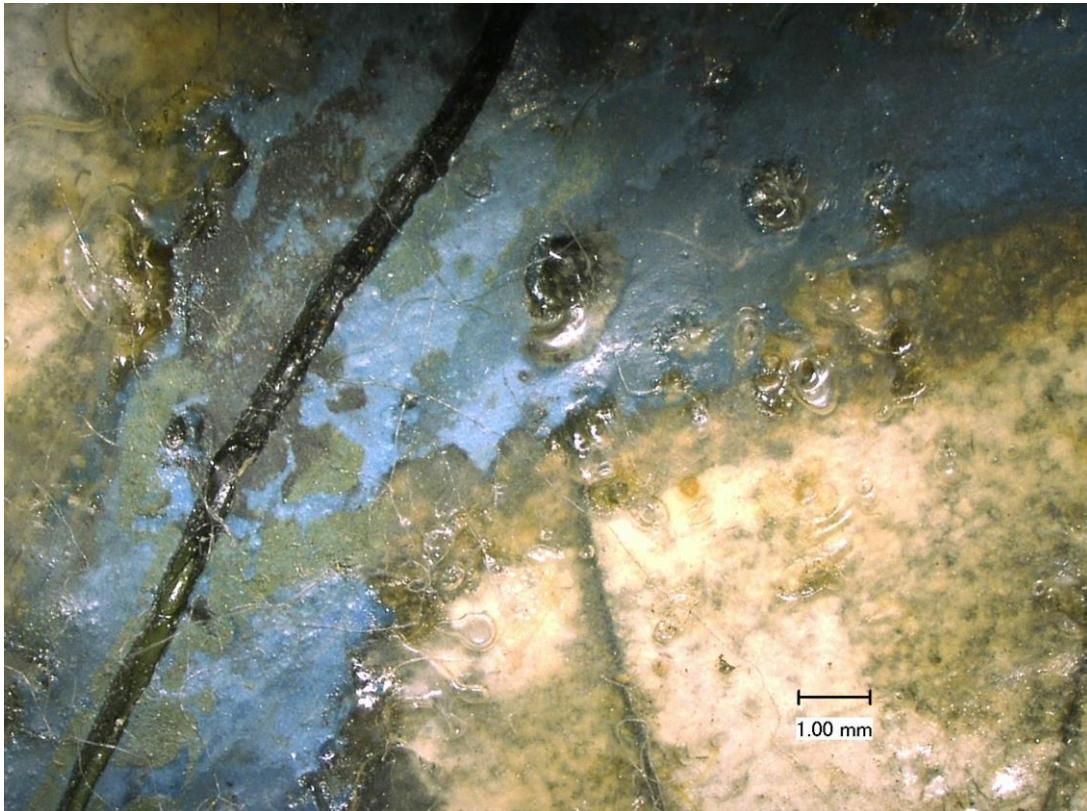


Bild 95: Außenseite, eingefärbte Klebung auf DM4

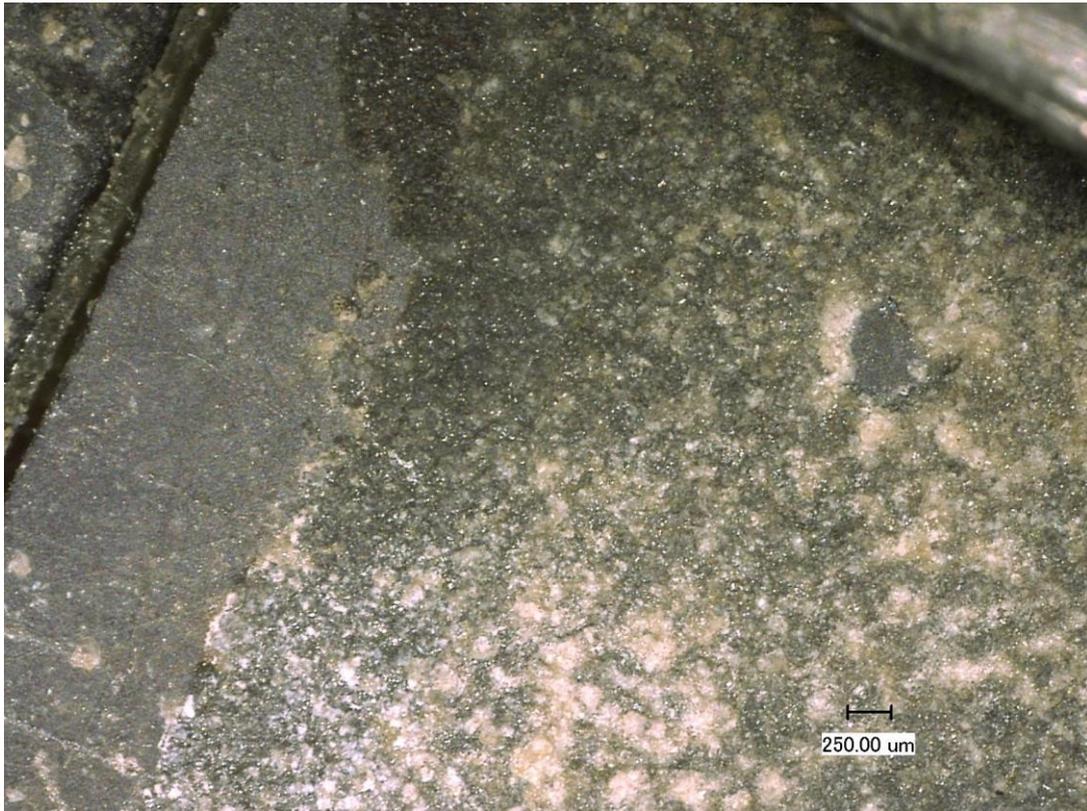


Bild 96: Außenseite, Übergangsbereich intakte Flächenimprägnierung - nicht beschichtete Oberfläche auf DM5

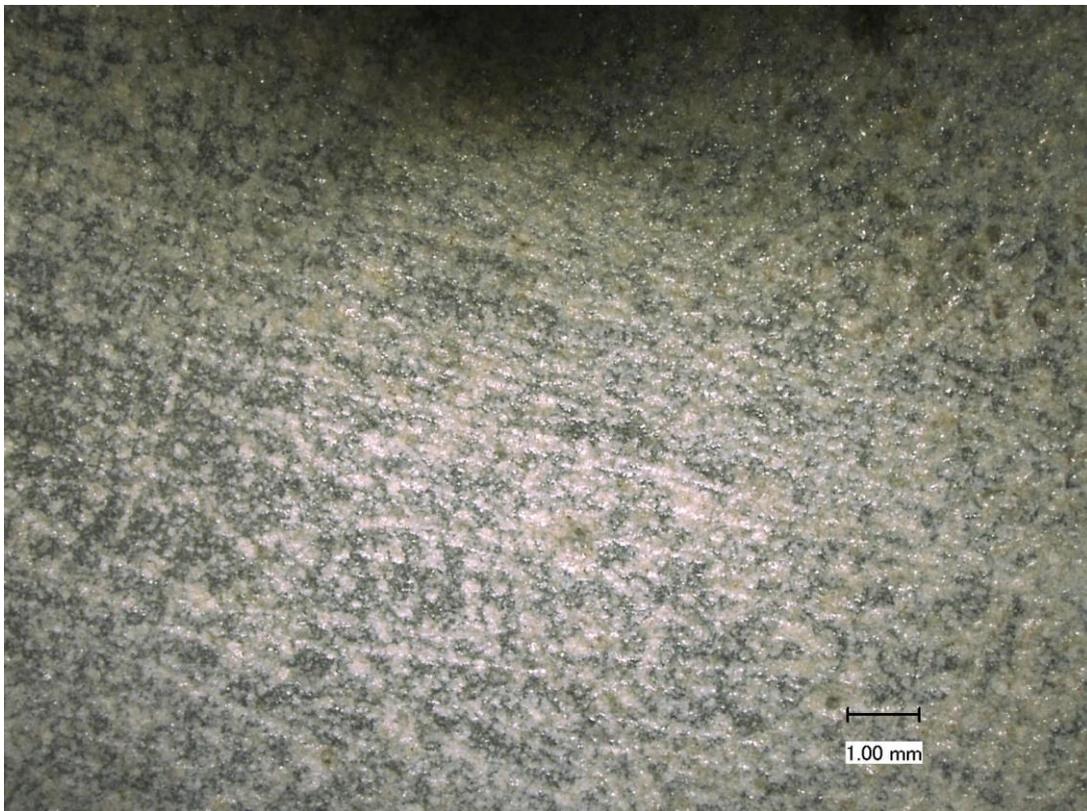


Bild 97: Außenseite, intakte Flächenimprägnierung auf DM5

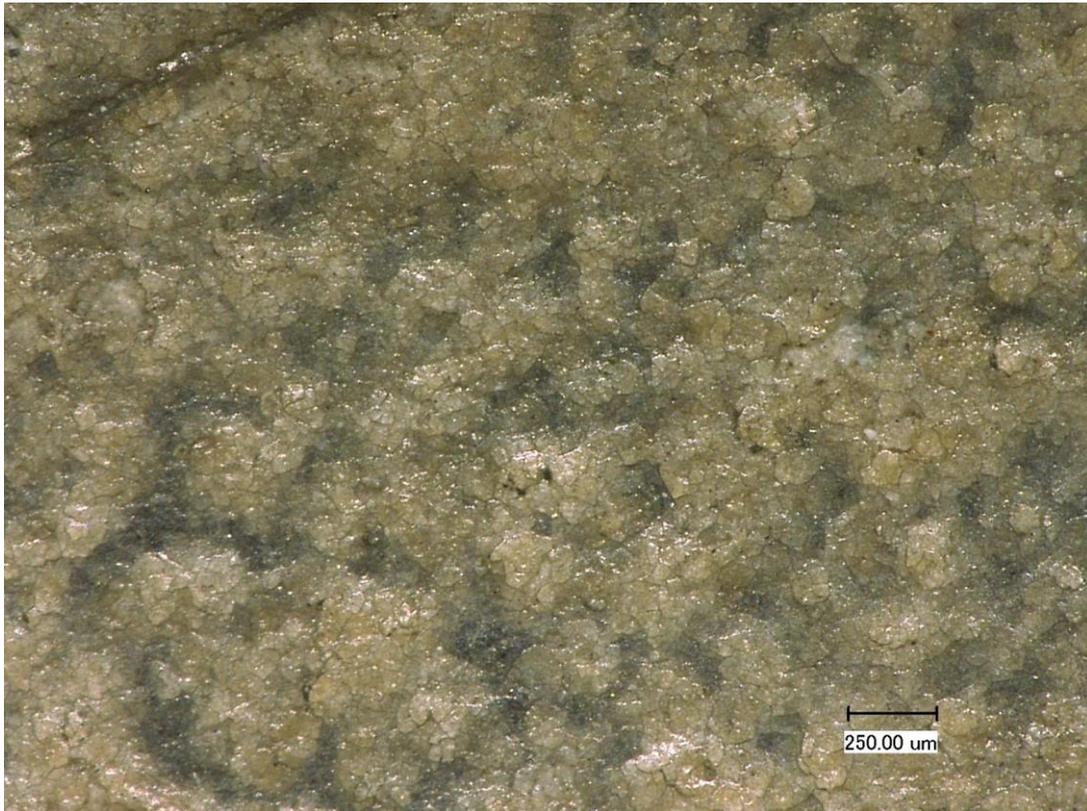


Bild 98: Außenseite, Detail- Flächenimprägnierung mit Festigung von Korrosionsprodukten auf DM6



Bild 99: Außenseite, eingefärbte Klebung auf DM7, Probenahme FTIR

6. Analytische Untersuchungen an Glasproben und Beschichtungsmaterialien

Die REM-Untersuchungen an Glasproben wurden mit einem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) durchgeführt. Für die Glasanalyse steht an diesem Rasterelektronenmikroskop ein energiedispersives Röntgenspektrometer (EDX) der Firma EDAX zur Verfügung. Die Quantifizierung der Analyseergebnisse erfolgt standardfrei. Die EDX- und Oberflächenuntersuchungen wurden im Elektronenmikroskop (XL 30) im Hochvakuum vorgenommen. Oberflächenuntersuchungen können auch im „Low-Vacuum“-Modus erfolgen.

In Kooperation mit der Universität Thorn (Frau Prof. Lukaszewicz, Prof. Targowski) erfolgten Makro-XRF-Untersuchungen am Feld 15B aus Thorn zur Zustandsdokumentation. Diese Röntgenfluoreszenzmethode ist eine nicht invasive Untersuchungsmethode und ermöglicht eine elementspezifische Materialanalyse ohne Probenahme. Damit kann die Charakterisierung eines gesamten Feldes vorgenommen werden, ohne vorher einzelne Glassegmente aus zu bleien. Eine Unterscheidung zwischen originaler Substanz und Ergänzungen aus späteren Restaurierungen sind z.B. ebenso möglich wie die Identifizierung von färbenden Komponenten im Glas und in Malschichten aber auch die Unterscheidung von verwendeten Materialien für die Rahmung der Glasmalereien. Die Röntgenfluoreszenzuntersuchungen erfolgten mit einem Makro-Scanner M6 Jetstream der Fa. Bruker. Mit diesem Gerät ist es möglich, große Oberflächenbereiche bis zu 80 x 60 cm zu scannen.

Die Analyse der Materialproben von Glasoberflächen zum Nachweis der Beschichtungsmaterialien erfolgte am FTIR-Spektrometer PU 9800 (Phillips) in Zusammenarbeit mit der Hochschule für Wirtschaft und Technik, Berlin, Fachbereich Restaurierung und Konservierung. Die dort vorhandenen Datenbanken zu historischen Beschichtungs- und Restaurierungsmaterialien ermöglichten die Identifizierung von organischen Materialproben,

Die Bestimmung der Zusammensetzung von anorganischen Materialproben erfolgte sowohl durch die EDX-Analyse im ESEM als auch mit Hilfe der Röntgendiffraktometrie. Diese Messungen wurden an einem D8 DISCOVER Diffraktometer (Bruker AXS, Karlsruhe) durchgeführt (Transmissionsgeometrie, $\text{CuK}\alpha_1$ -Strahlung, Johannson-Monochromator). Für die Messung wurden folgende Messbedingungen gewählt: $5-95^\circ 2\theta$, 0.0094° Schrittweite, 3 s/Schritt, 8 h pro Messung.

6.1 Johanniskirche Thorn

Beim Ausbau des Fensters I wurden in der Nähe von Feld 15B im Maßwerk 3 Glasproben (P1, P2, P3) gefunden. Es handelt sich um 3 blaue Gläser, die mittelalterlichen Ursprungs sind und eine identische Zusammensetzung aufweisen. Sie stammen aus dem 14. Jh. (vermutlich 1330-40). Die Probe P4, Teil eines gebrochenen Glasstückes, wurde aus dem Randbereich von Feld 15B entnommen und nach der Analyse wieder eingebaut. Es handelt sich dabei um eine Ergänzung, vermutlich aus den 50er Jahren des 20. Jahrhunderts.



Bild 100: Glasproben für analytische Untersuchungen P1, P2, P3, P4 (von links nach rechts)

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der untersuchten Glasproben (in Masse %)

Probe	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	MnO	SO ₃	Cl
P1*	0,7	15,9	22,1	50,1	4,7	2,0	2,9	0,8	0,7	0,2	-
P2	0,7	15,5	22,1	50,2	4,9	2,1	2,7	0,9	0,8	-	-
P3*	0,6	15,8	22,3	49,7	4,8	1,8	2,6	0,9	0,9	0,1	-
P4	14,5	-	9,4	74,6	-	0,6	-	-	-	-	0,8

*enthält zusätzlich BaO

Die mittelalterlichen Gläser sind von ihrer chemischen Zusammensetzung her vergleichbar und weisen ein CaO/K₂O-Verhältnis von größer 1 auf. Sie gehören damit zur Gruppe der etwas korrosionsstabileren mittelalterlichen Gläser. Dennoch zeigen sie deutliche Verwitterungsschichten, sowohl auf der Innen- als auch auf der Außenseite (Torge 1997). Die elektronenmikroskopischen Abbildungen zeigen Geschichtszonen mit einer Breite zwischen 20 und 60 µm, die darauf hindeuten, dass die Gläser über lange Zeit ungünstigen Bedingungen ausgesetzt waren. In den Rissen der Gelschicht, senkrecht zur Oberfläche, wurde Barium nachgewiesen, das sich infolge der Korrosionsprozesse durch Diffusion aus dem Glas dort angereichert hat. Als Korrosionsprodukt auf der Außenseite der Glasoberfläche wurden sowohl Syngenit als auch Gips identifiziert (Bild 111).

Die Glasprobe aus dem 20. Jh. ist ein reines Soda-Kalk-Glas, ohne messbare Anteile von Kaliumoxid und mit einem sehr geringen Aluminiumoxidanteil. Solche Glaszusammensetzungen sind auch aus der Pfarrkirche in Waldenburg bekannt (Torge 2015). Das Glas ist verwitterungsstabil und zeigt keinerlei Korrosionsschäden. In den elektronenmikroskopischen Abbildungen dieser Glasprobe sind Oberflächenbeläge sichtbar, die anhand der EDX-Spektren als Malschicht identifiziert und vermutlich als dünne Lasur aufgetragen wurden (Bild 119).

Die Kenntnis der genauen Zusammensetzung dieser Ergänzungen aus dem 20. Jh. ist hilfreich bei der Interpretation der Makro-XRF Untersuchungen. Die Elementverteilungsbilder insbesondere für Kalium (K) und Calcium (Ca) ermöglichen so die Unterscheidung zwischen originaler mittelalterlicher Glassubstanz und neuen Gläsern im Feld 15B (s. Anhang). Kalium ist Bestandteil aller mittelalterlichen Gläser. Das Fehlen von Kalium in den Verteilungsbildern lässt auf Glassegmente schließen, die als spätere Ergänzungen in den Bestand gelangt sind.

Darüber hinaus werden mit der Makro-XRF Elemente analysiert, die unter der Nachweisgrenze der EDX-Methode liegen (< 0,5%). Während Eisen und Mangananteile mit beiden Methoden in den mittelalterlichen Gläsern identifiziert wurden, findet die XRF-Analyse neben den färbenden Komponenten Chrom (Cr), Kupfer (Cu) und Kobalt (Co), auch Barium (Ba). Mit der Ausnahme von Chrom sind diese Elemente sowohl Bestandteil der mittelalterlichen Originale als auch der Ergänzungsgläser, Chrom hingegen findet man ausschließlich in den Ergänzungen des 20. Jh.

Die Analyse leichter Elemente wie z.B. Natrium ist mit der Makro-XRF nicht möglich. Organische Beschichtungen auf der Glasoberfläche lassen sich ebenso nicht mit dieser Methode nachweisen. Das Vorhandensein von Korrosionsprodukten auf der Glasoberfläche und die damit einhergehenden Auslaugungsprozesse, insbesondere von Kalium Ionen aus mittelalterlichen Gläsern können die Interpretation der Ergebnisse erschweren.

Zum Nachweis von Beschichtungsmaterialien erfolgten FTIR-Untersuchungen an weiteren Materialproben (T6, T7, T13, T17) von der Oberfläche ausgewählter Gläser der Felder 15B und 1c (s. Abschnitt 5.1). Die Spektren zeigten jedoch keine Übereinstimmungen mit den in der Datenbank vorhandenen organischen Materialien. Sie deuten vielmehr darauf hin, dass es sich um rein anorganische Materialproben handelt. Die Röntgenanalyse der Probe T6 bestätigt diese Annahme. Hauptbestandteil dieser Probe sind Picomerite $-K_2Mg(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ und Syngenite $K_2Ca(SO_4)_2 \cdot H_2O$.

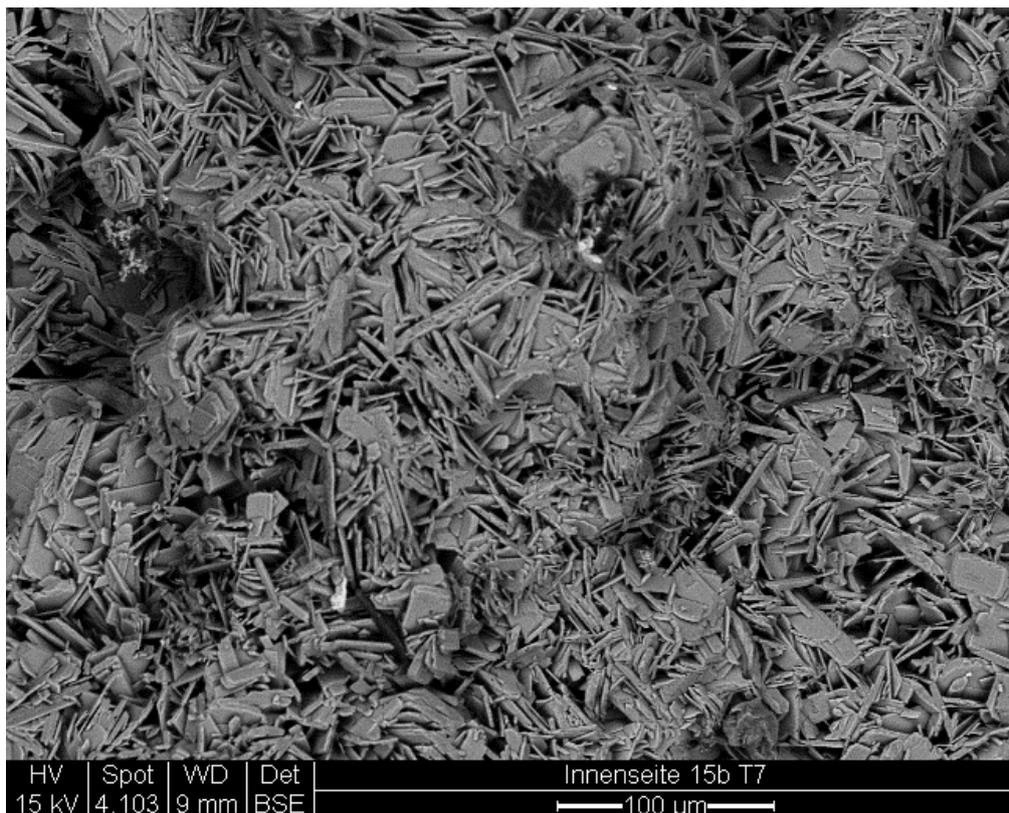


Bild 101: Elektronenmikroskopische Abbildung mit typischen Verwitterungsprodukten in der Materialprobe T7

Insbesondere Syngenit auf der Innenseite der Glasmalereien deutet darauf hin, dass die Bedingungen im Innenraum der Kirche an den ungeschützten mittelalterlichen Gläsern zu korrosiven Belastungen führen.

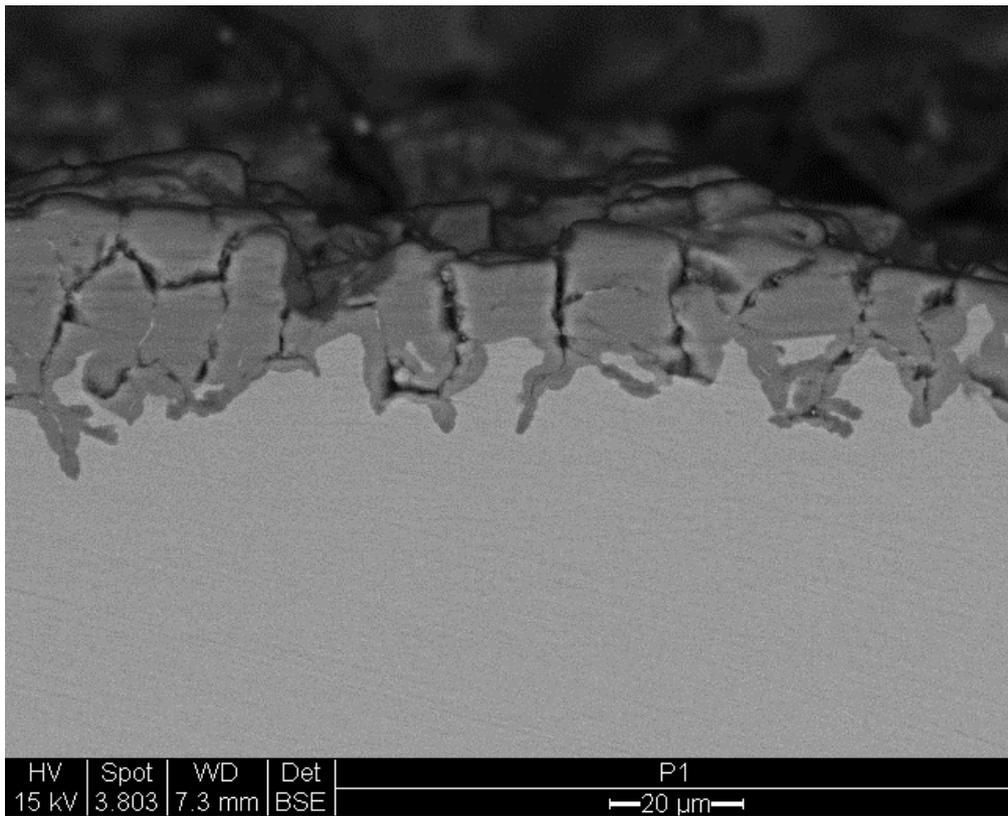


Bild 102: P1: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt - Innenseite

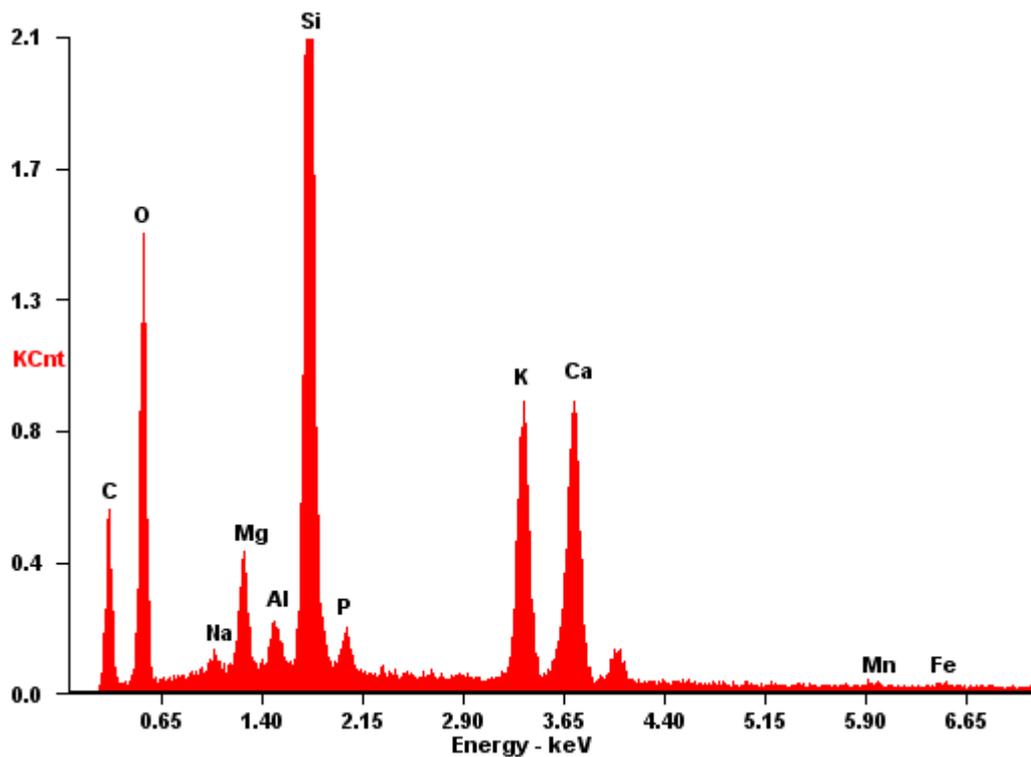


Bild 103: P1: Elementspektrum im Bereich des unverwitterten Kernglases

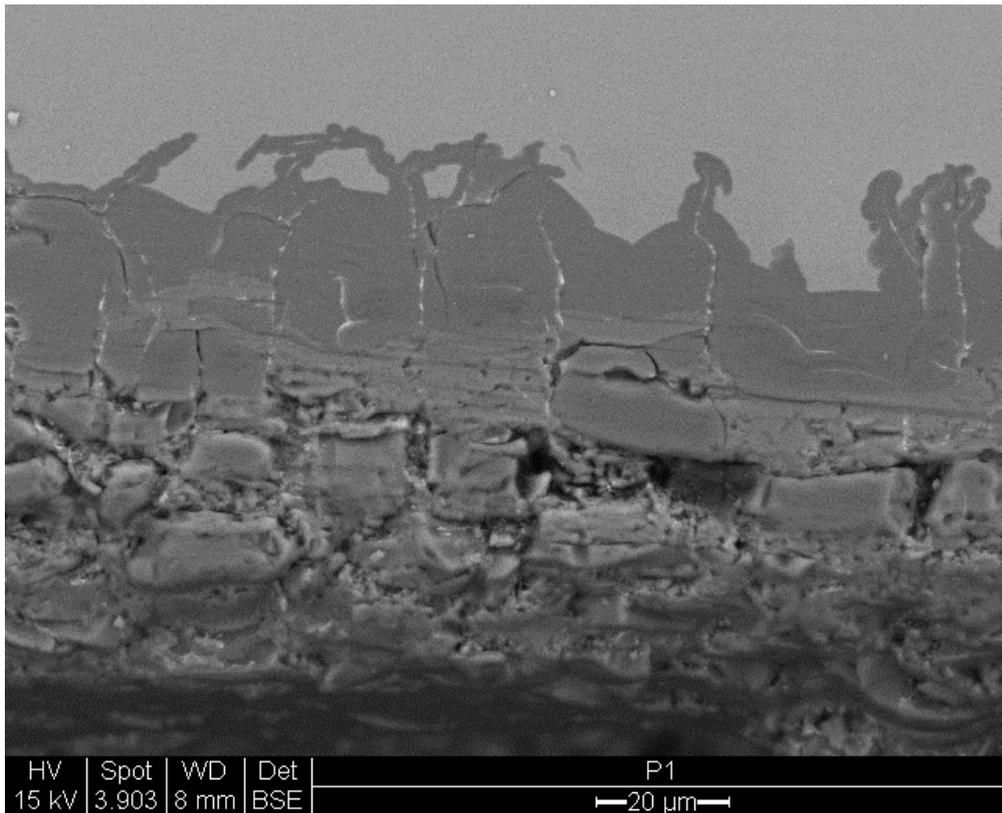


Bild 104: P1: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt – Außenseite

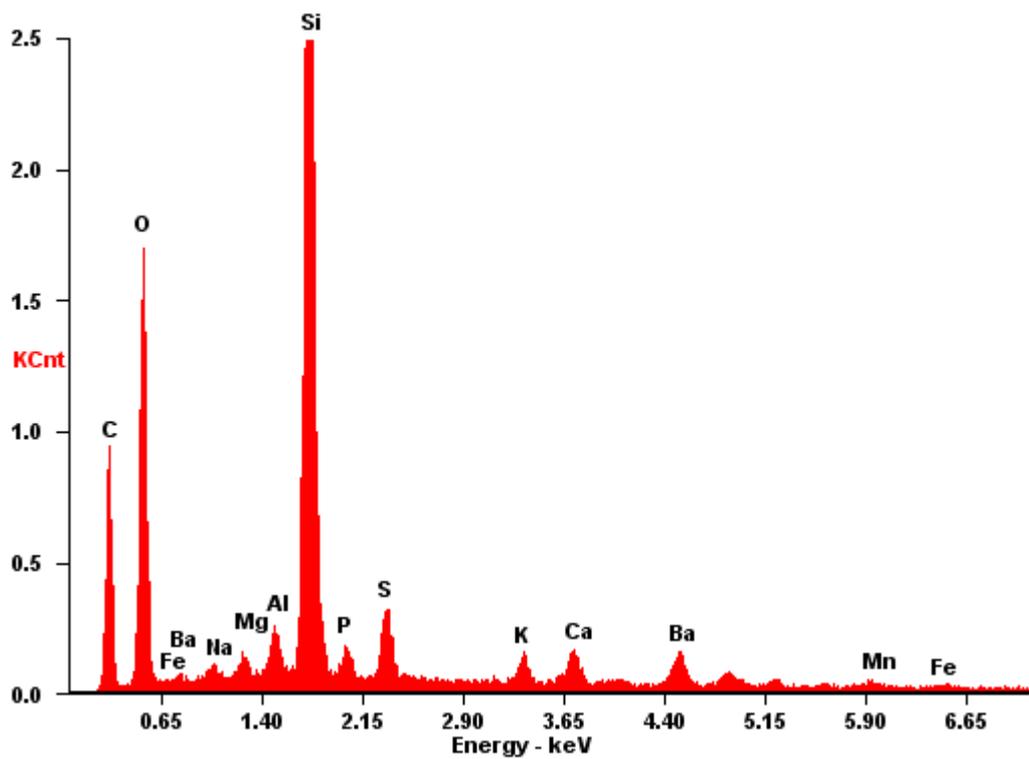


Bild 105: P1: Elementspektrum im Bereich der Gelschichttrisse mit Anreicherungen an Barium (Ba)

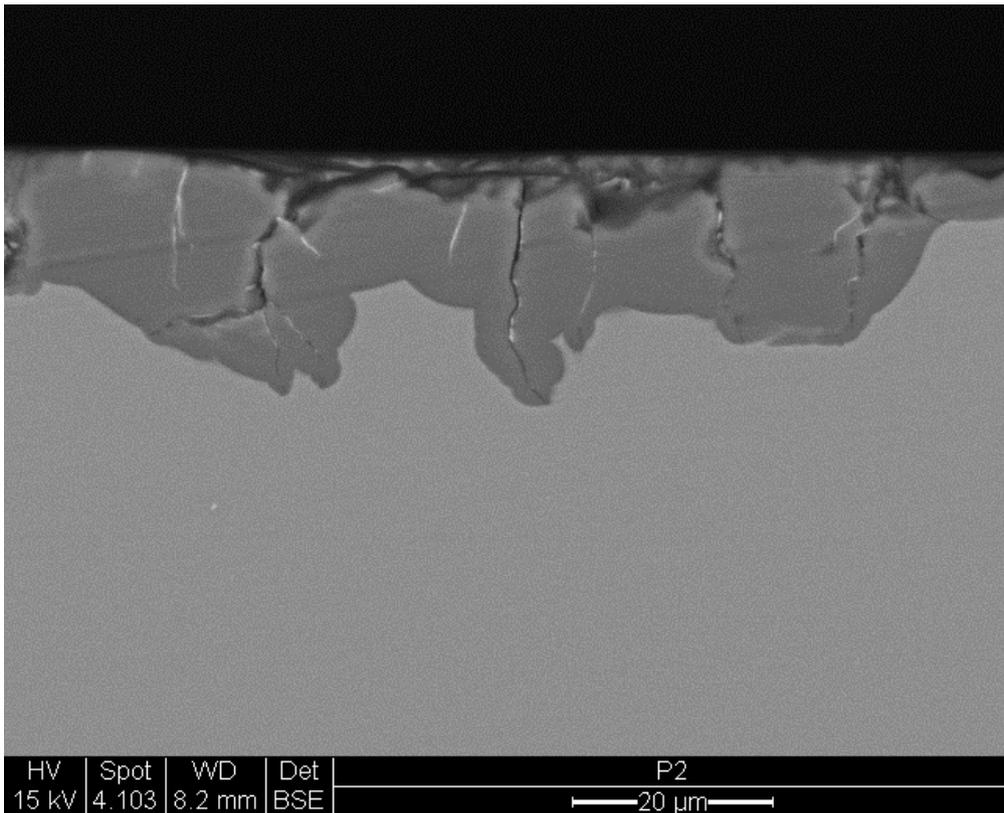


Bild 106: P2: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt - Innenseite

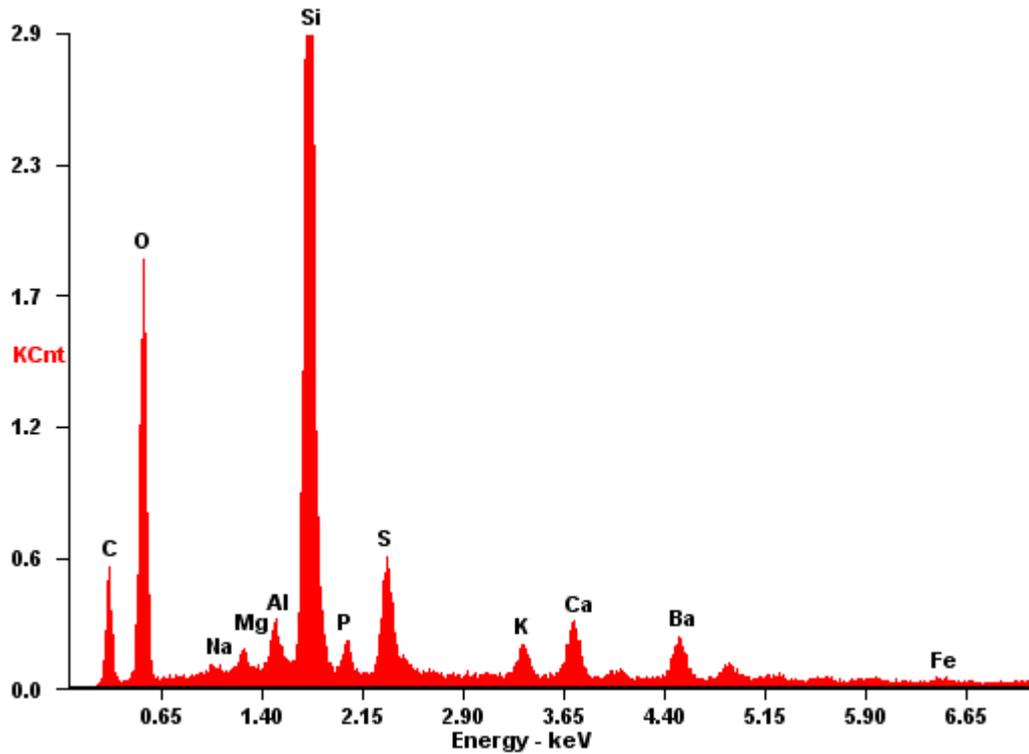


Bild 107: P2: Elementspektrum im Bereich der Gelschichttrisse mit Anreicherungen an Barium (Ba)

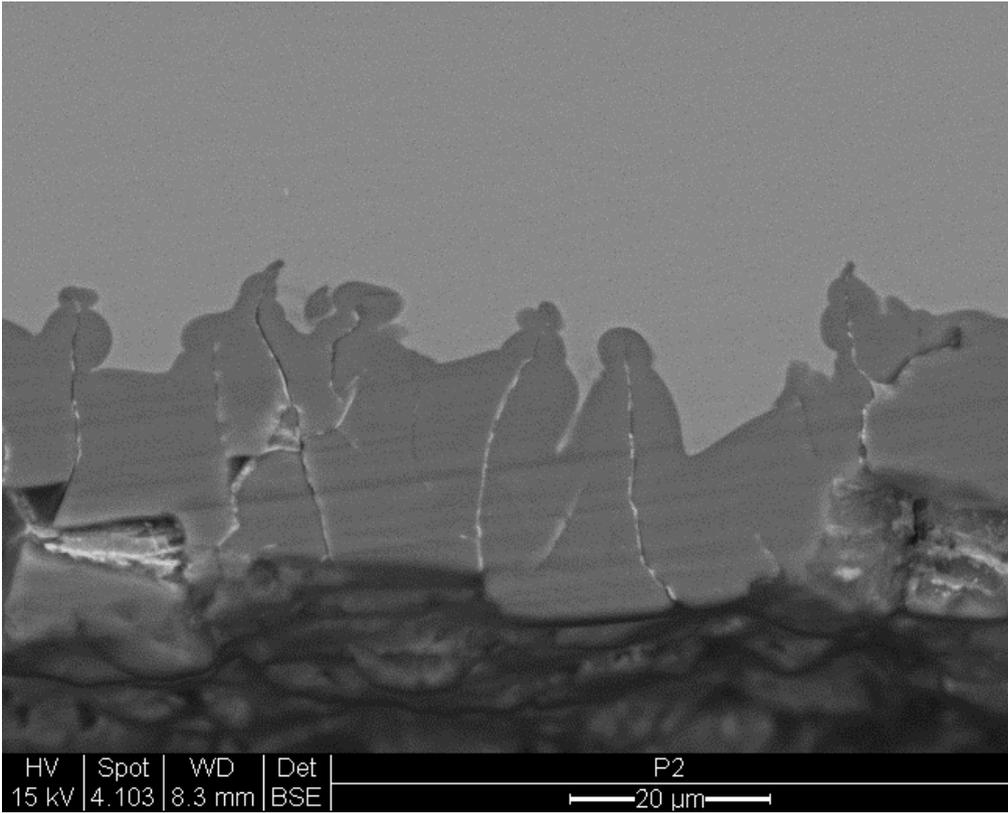


Bild 108: P2: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt – Außenseite

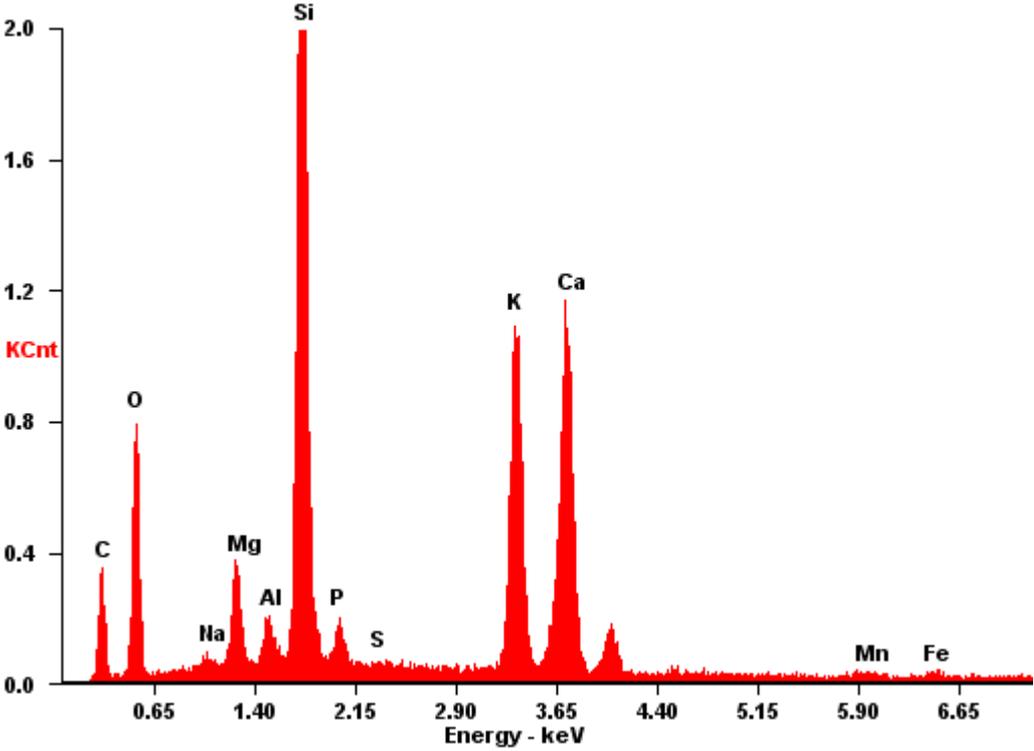


Bild 109: P2: Elementspektrum im unverwitterten Kernglas

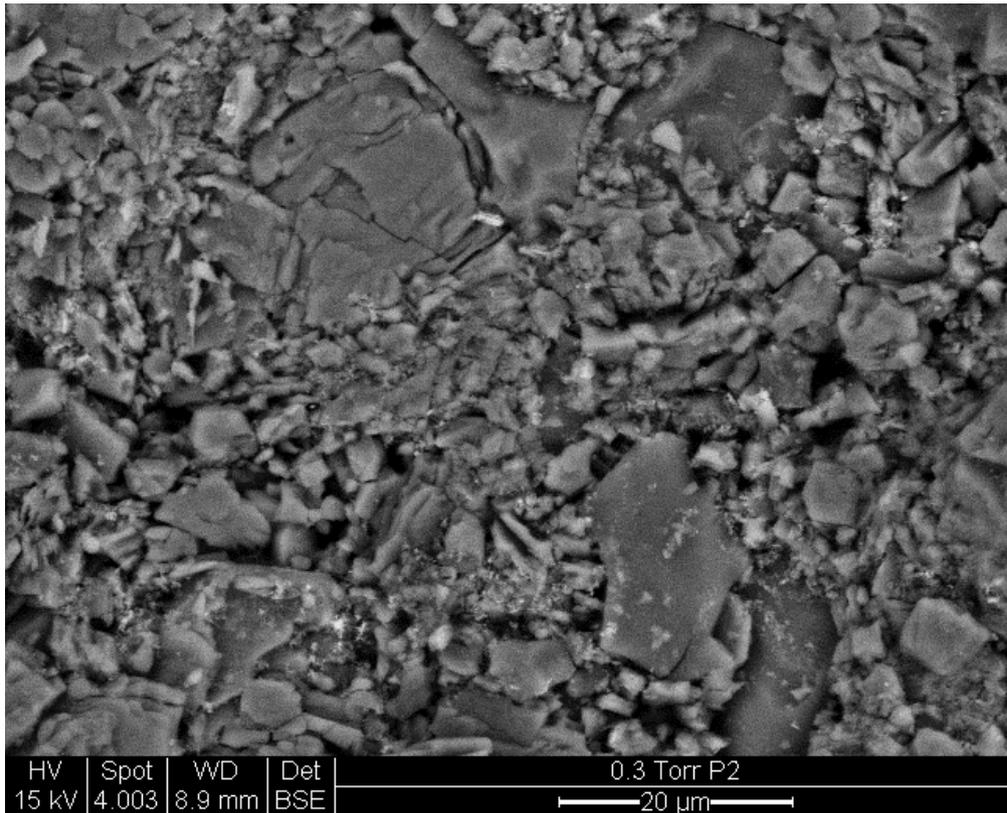


Bild 110: P2: Elektronenmikroskopische Abbildungen der Probenoberfläche – Außenseite mit Korrosionsprodukten

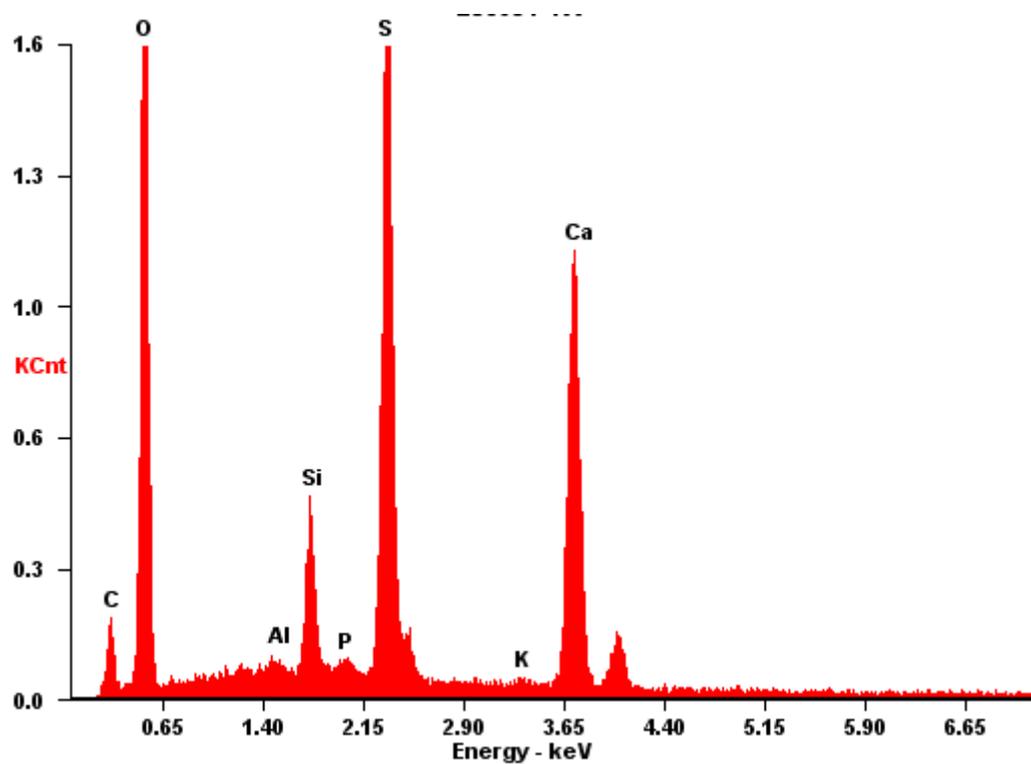


Bild 111: P2: Elementspektrum im Bereich der Korrosionsprodukte (Hauptkomponenten Ca, S, - Gips)

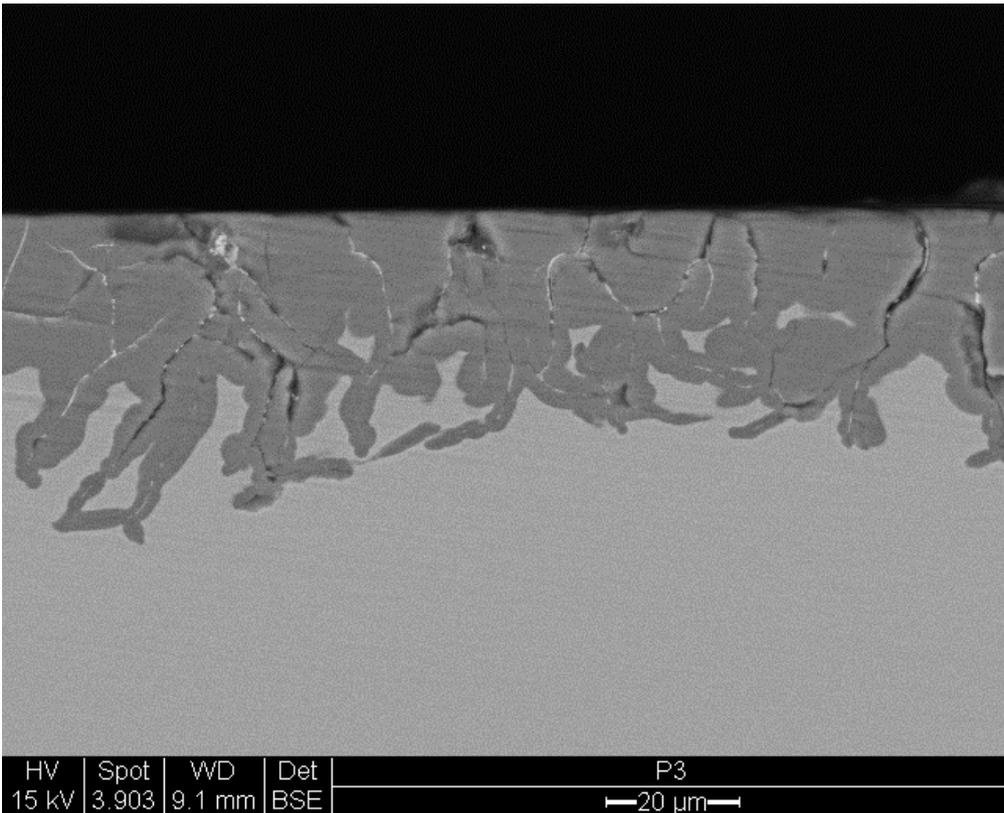


Bild 112: P3: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt - Innenseite

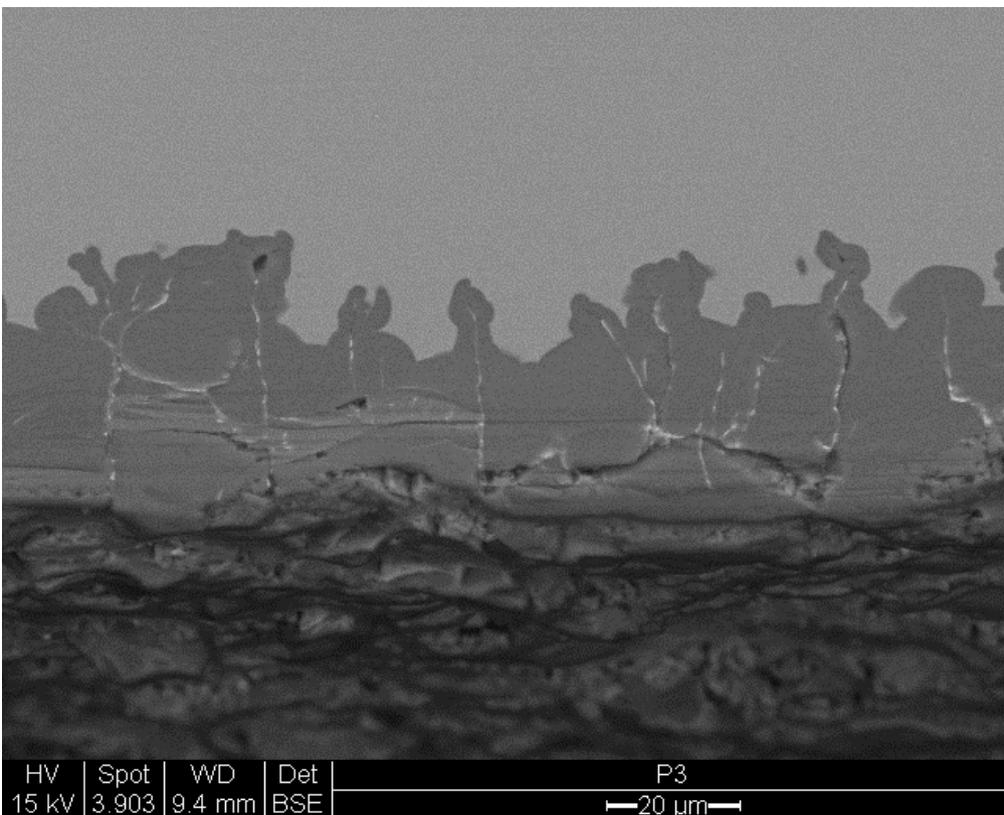


Bild 113: P3: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt - Außenseite

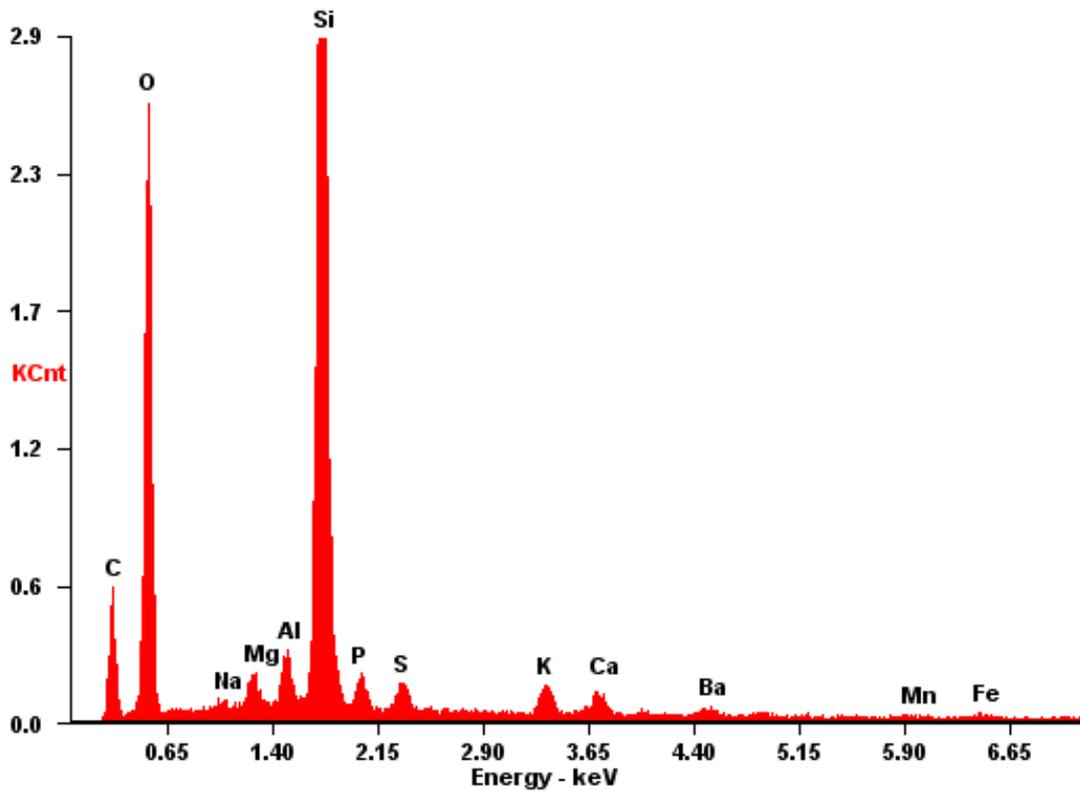


Bild 114: P3: Elementspektrum im Bereich der Gelschichttrisse mit Anreicherungen an Barium (Ba) Innen- und Außenseite

Label A: Gelschicht

Label B: Glas

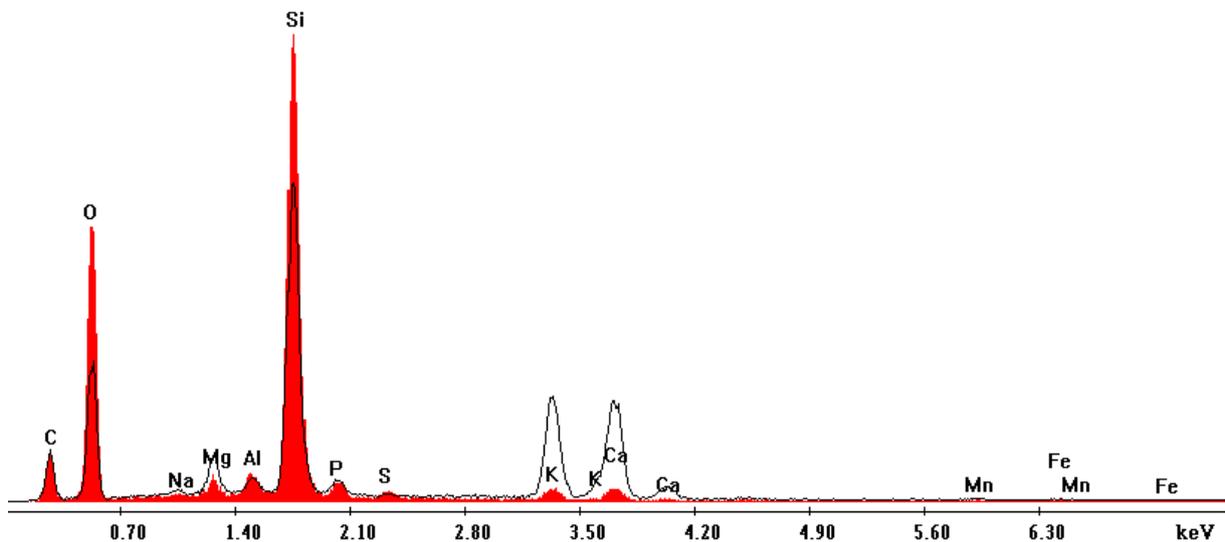


Bild 115: P3: Elementspektren innerhalb der Gelschicht (rot) und im unverwitterten Kernglas (schwarz), Auslaugung von Kalium Ionen aus dem Glas

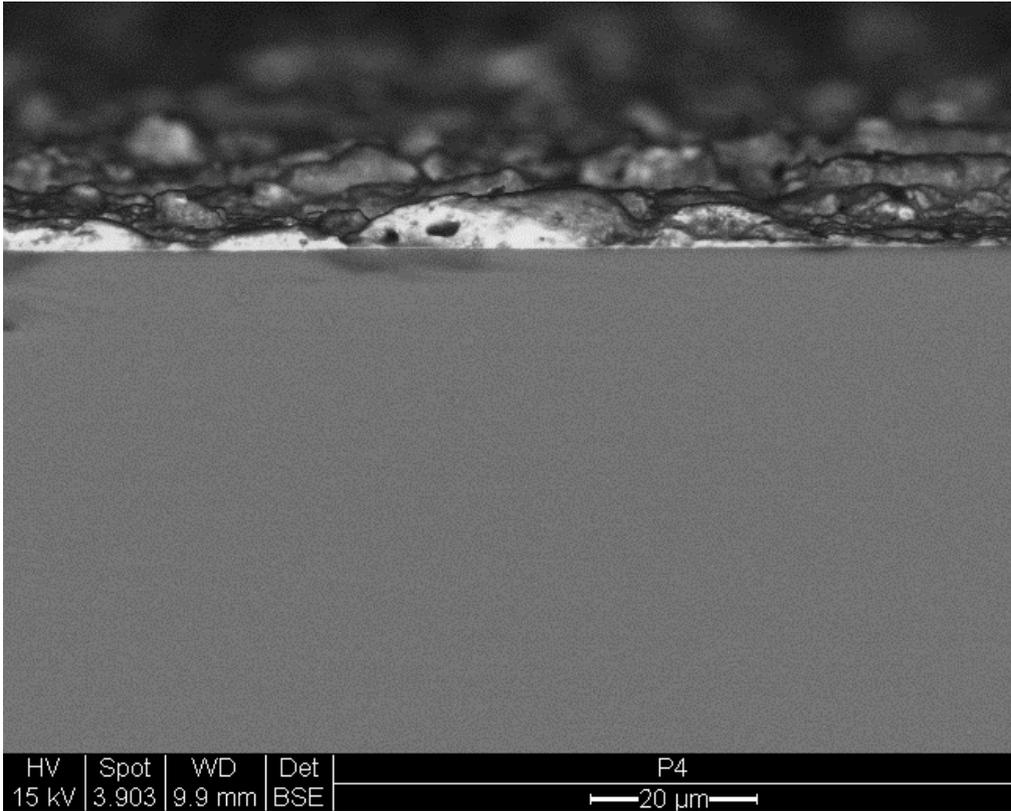


Bild 116: P4: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt – Innenseite mit Lasur auf der Oberfläche

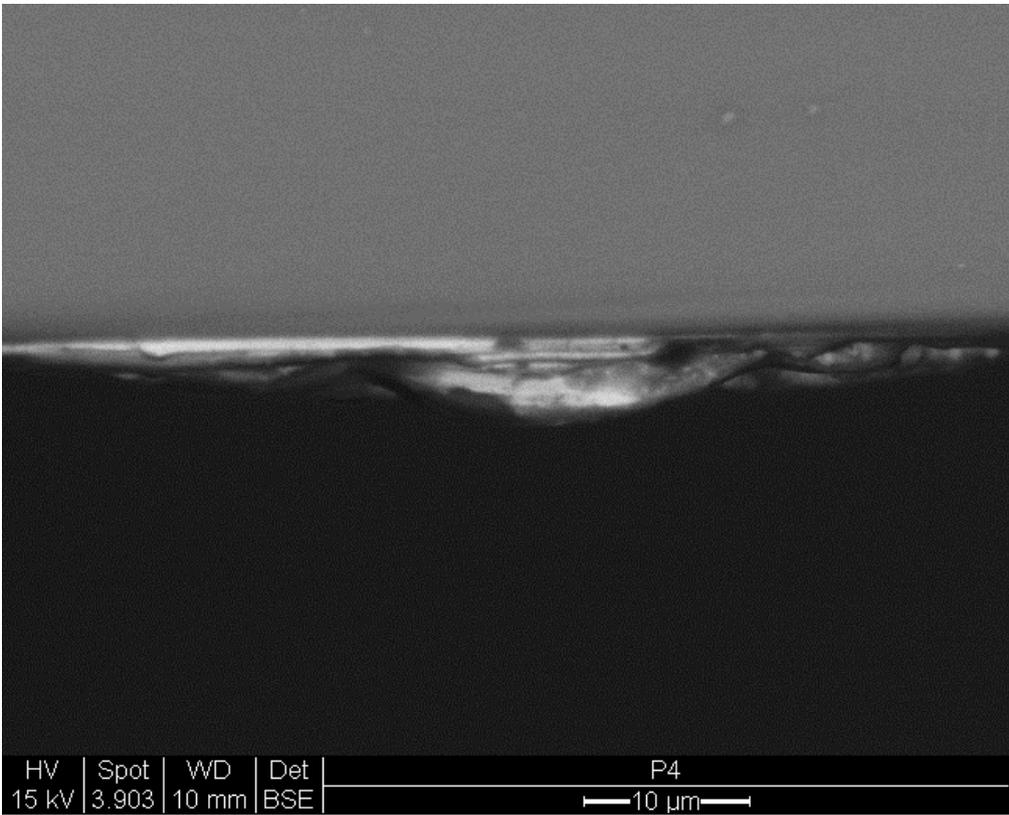


Bild 117: P4: Elektronenmikroskopische Abbildungen am Probenquerschnitt – Außenseite mit Lasur

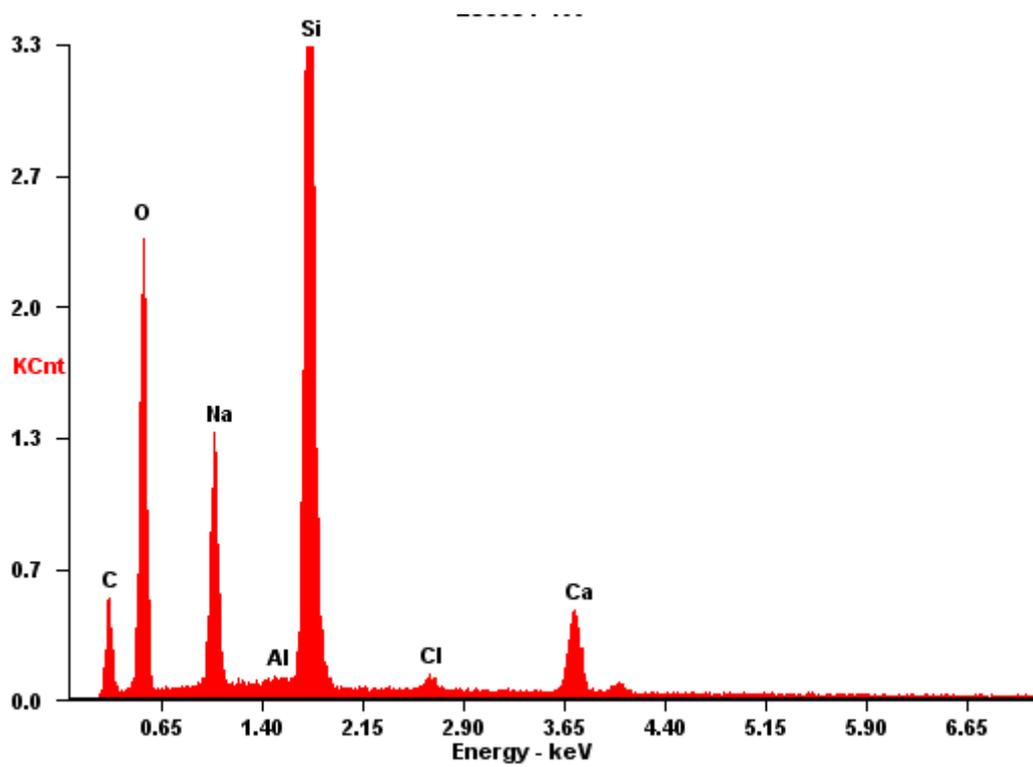


Bild 118: P4: Elementspektrum im Bereich des Kernglases

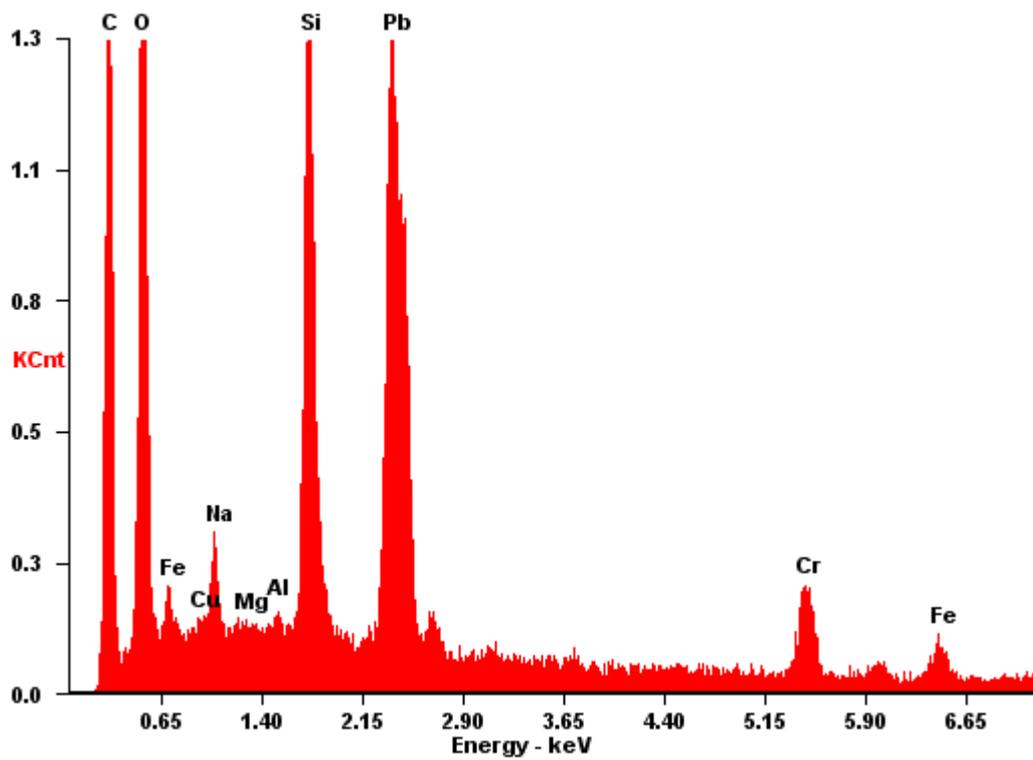


Bild 119: P4: Elementspektrum im Bereich der Oberflächenlasur

6.2 Dom zu Leslau

Fünf für den Bestand typische, mittelalterliche Glasproben wurden in der Restaurierungswerkstatt aus unterschiedlichen Feldern (1a, 3b, 4c, 8b) des Fensters nIX entnommen und im Anschluss an die naturwissenschaftlichen Untersuchungen wiedereingesetzt. Es handelt sich dabei um Gläser unterschiedlicher Farbe, auf denen entweder organische Beschichtungen auf der Oberfläche mikroskopisch identifiziert worden sind oder um Glasproben, die relativ dicke Oberflächenbeschichtungen aufweisen, die zum Kleben von Glasbrüchen aufgebracht wurden (s. Abb. Abschnitt 5.2.2.) Die Entnahme weiterer Materialproben für analytische und mikrobiologische Untersuchungen erfolgte mit einem sterilen Skalpell sowohl von der Vorder- als auch von der Rückseite der Felder 1b, 3b, 3c und 6b des Fensters nIX (s. Abb. Abschnitt 5.2.1).

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung von Glasproben aus dem Dom in Leslau, Fenster nIX (in Masse %)

Nr.	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	PbO	CuO	SO ₃	Cl
PG1 - rot Überfang	48,6	0,4	13,6	21,0	3,6	1,0	1,6	-	10,3	-	-	-
PG1 - weiß Grundglas	48,7	0,1	12,6	28,5	4,4	1,1	-	-	-	-	-	-
PG2 - grün	44,0	-	13,7	13,2	2,8	0,9	0,8	0,6	20,9	3,0	-	-
PG3 - gelb	49,6	-	15,5	26,1	4,7	1,0	2,8	-	-	-	0,2	0,1
PG4 - weiß	51,0	0,6	15,5	23,4	4,0	2,4	3,2	-	-	-	-	-
PG5 - blau	50,1	0,5	13,9	27,5	4,1	1,1	2,5	0,4	-	-	-	-

Die chemische Zusammensetzung der Gläser zeigt starke Ähnlichkeiten mit den analysierten mittelalterlichen Glasproben aus Thorn. Es handelt sich dabei um einen Glastyp mit einem CaO/K₂O-Verhältnis von größer 1. Gläser dieser Zusammensetzung findet man auch in Kirchen in Deutschland (z.B. Kölner Dom, Katharinenkirche Oppenheim, St. Marienkirche Salzwedel u.a.), allerdings weniger häufig als die sehr korrosionsempfindlichen Gläser mit einem CaO/K₂O-Verhältnis von kleiner 1 (Müller 1997). Die färbenden Komponenten in den Proben PG1 und PG5 (vermutliche CuO bzw. CoO) liegen unterhalb der Nachweisgrenze der analytischen Methode. Alle Gläser weisen einen sehr geringen SiO₂-Gehalt auf und zeigen daher auch die typischen Verwitterungserscheinungen, wie Korrosionsprodukte auf der Glasoberfläche sowohl Innen als auch Außen und Gelschichten im Übergangsbereich zum unverwitterten Kernglas (Bilder 120- 131). Die Gelschichten sind für Gläser dieser Zusammensetzung allerdings außerordentlich breit. Sie sind von Längs- und Querrissen durchzogen und daher auch äußerst fragil. Auf der Innenseite sind sie häufig bis zu 200 µm stark. Auf der Außenseite mindestens ebenso dick und erreichen in Probe 1 eine Breite von ca. 600 µm. Einige Proben zeigen jedoch auch eine stark veränderte Gelschicht im Vergleich zu den übrigen Proben, z.B. auf den Innenseiten von Probe 2 und auch auf der Außenseite von Probe 5 sind sie fast nicht mehr vorhanden. Eine zu starke mechanische Reinigung der Oberflächen dieser Gläser vor der Beschichtung könnte eine Ursache dafür sein. Ob die breiten Gelschichten auf den übrigen Gläsern allein den natürlichen Verwitterungsprozessen über Jahrhunderte hinweg geschuldet sind oder aber auch Folge der Behandlungsbedingungen in den 50er Jahren, lässt sich im Labor an Glasproben ähnlicher

Zusammensetzung überprüfen (Kap. 6.4). Die folgenden rasterelektronenmikroskopischen Aufnahmen der untersuchten Glasproben zeigen die Verwitterungszonen im angeschliffenen Querschnitt der Gläser senkrecht zur Oberfläche sowie Elementspektren der Zusammensetzung.

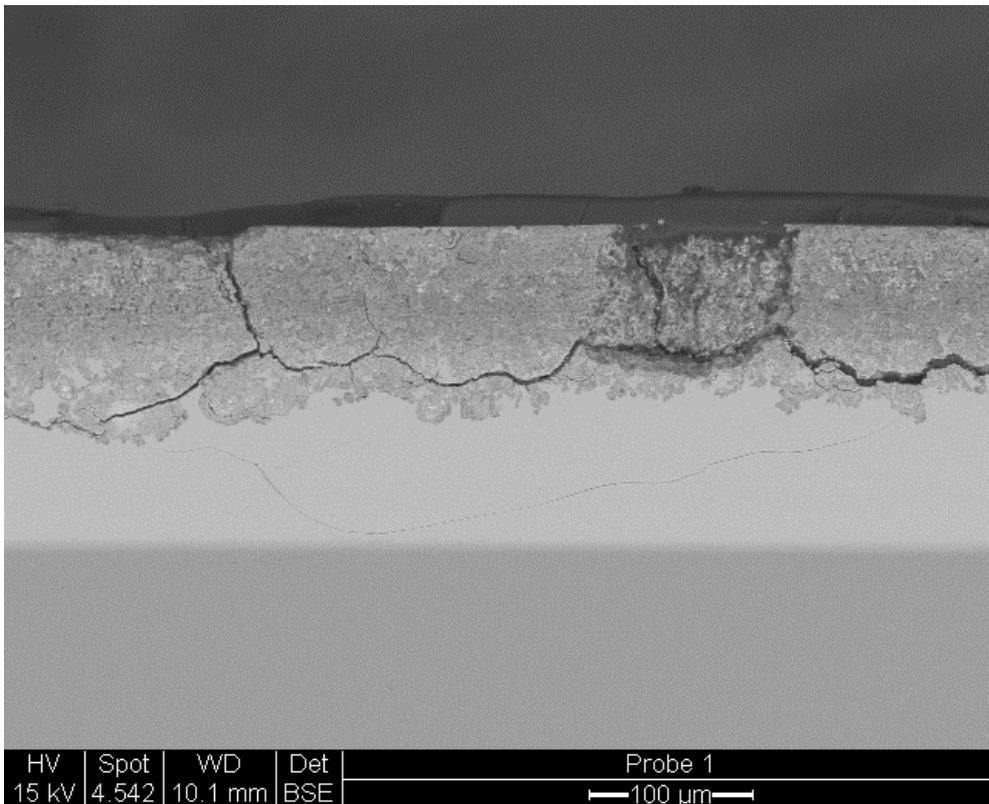


Bild 120: Probe 1: Detail, verwitterter Überfang mit Beschichtung

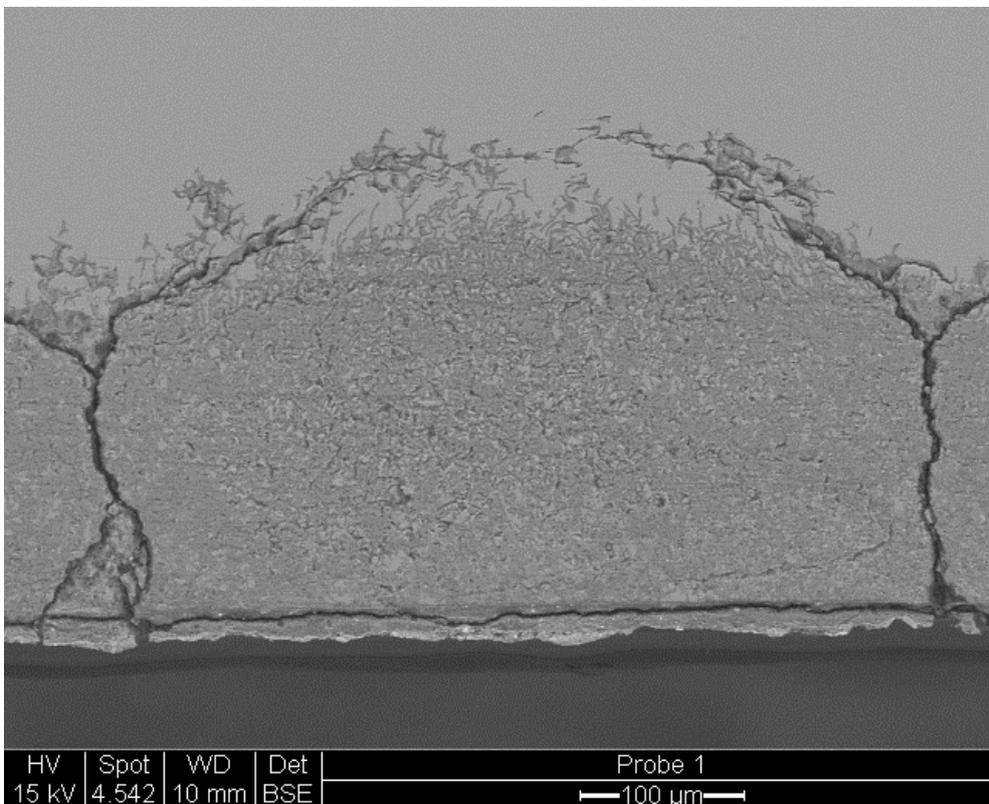


Bild 121: Probe 1: Verwitterungszone der Außenseite

Label A:

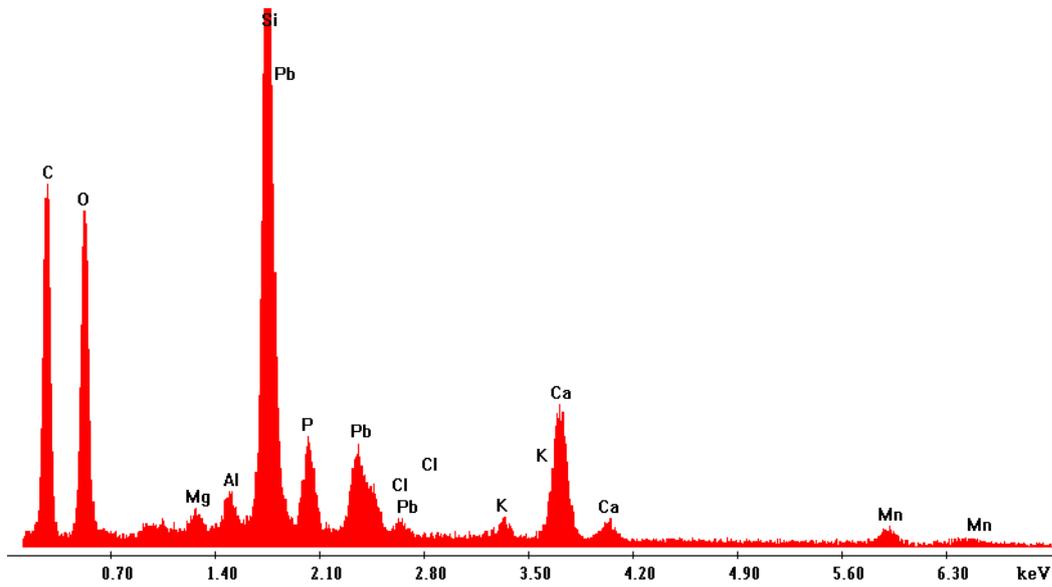


Bild 122: Probe 1: Spektrum Überfangglas

Label A:

Label B:

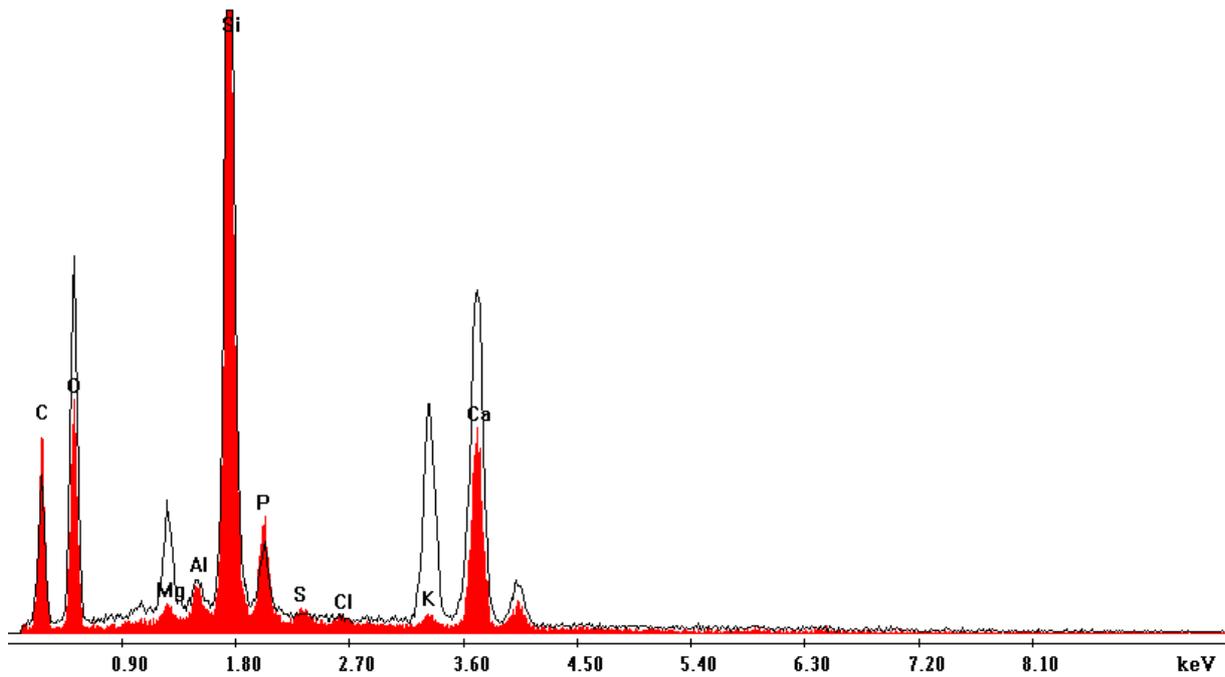


Bild 123: Probe 1: Elementspektrum Grundglas (B), Verwitterungszone-Gelschicht (A)

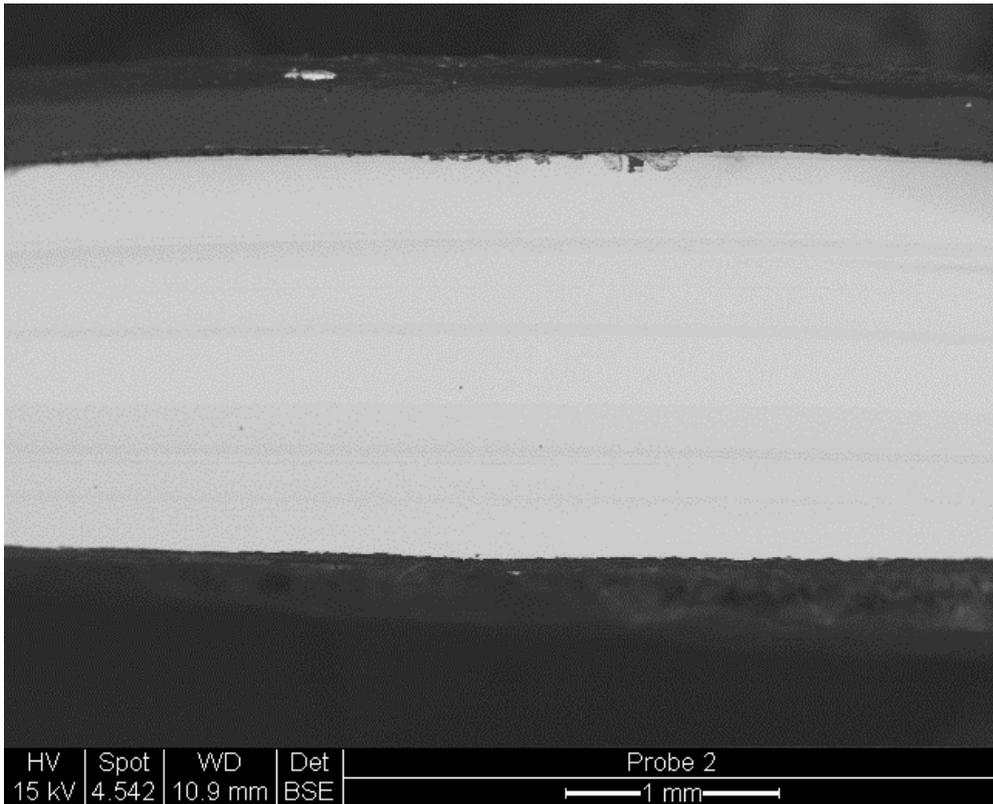


Bild 124: Probe 2: Übersichtsaufnahme

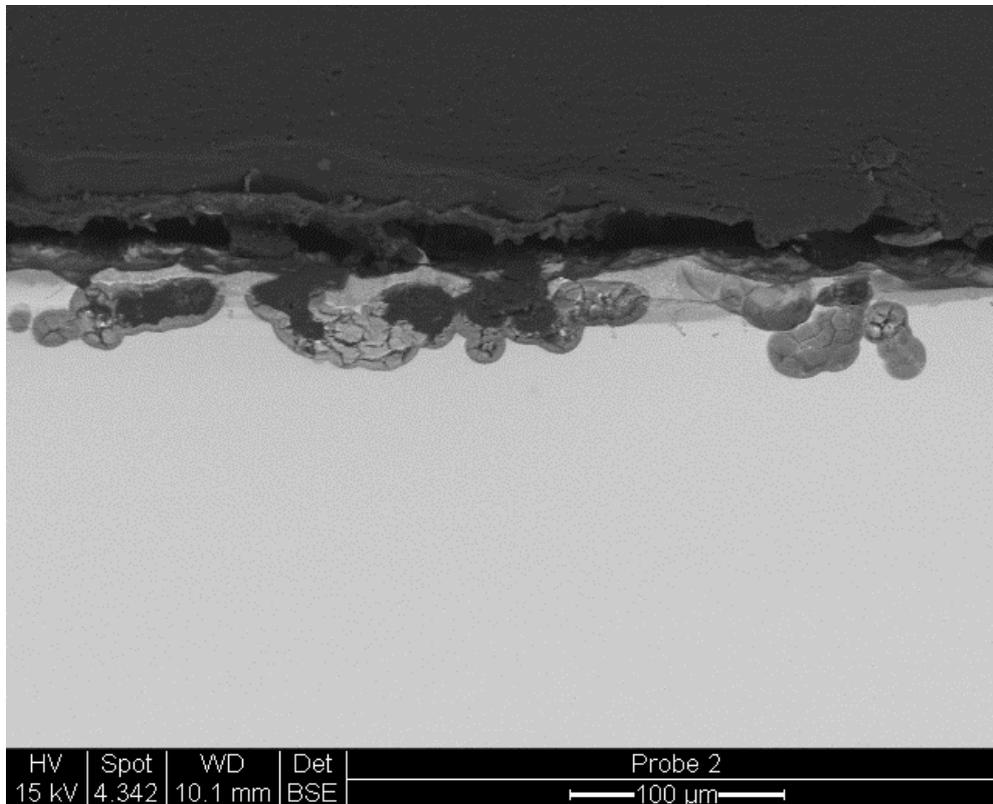


Bild 125: Probe 2: Verwitterungszone mit Beschichtungsmaterial

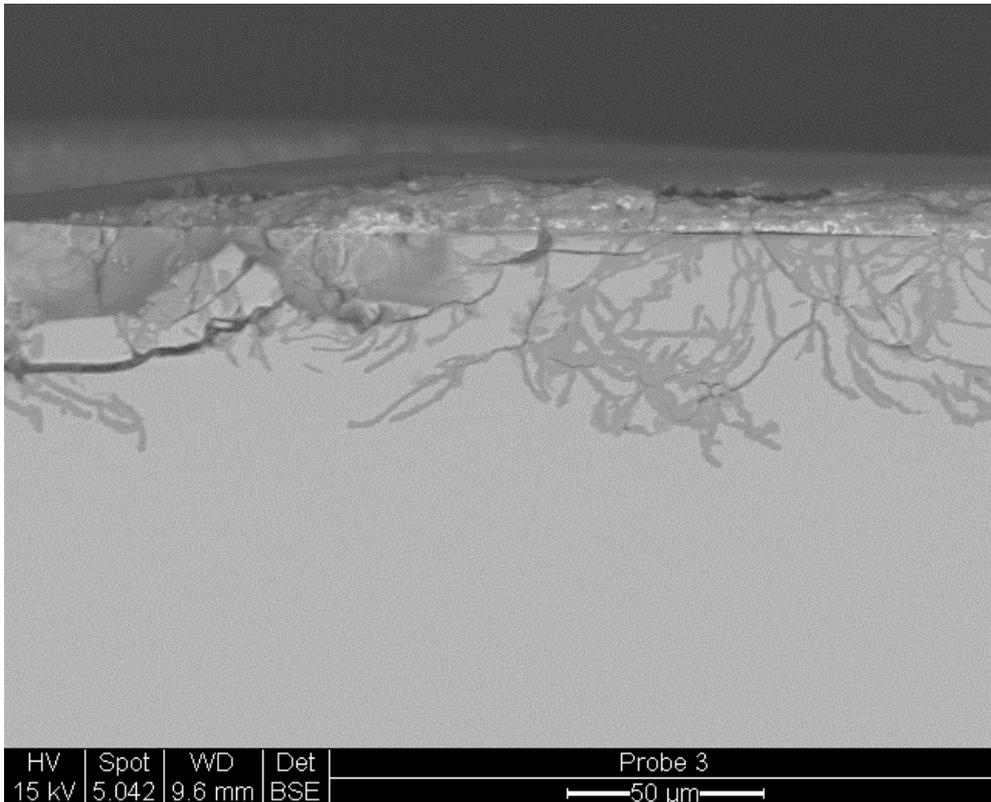


Bild 126: Probe 3: Verwitterungszone – Innenseite

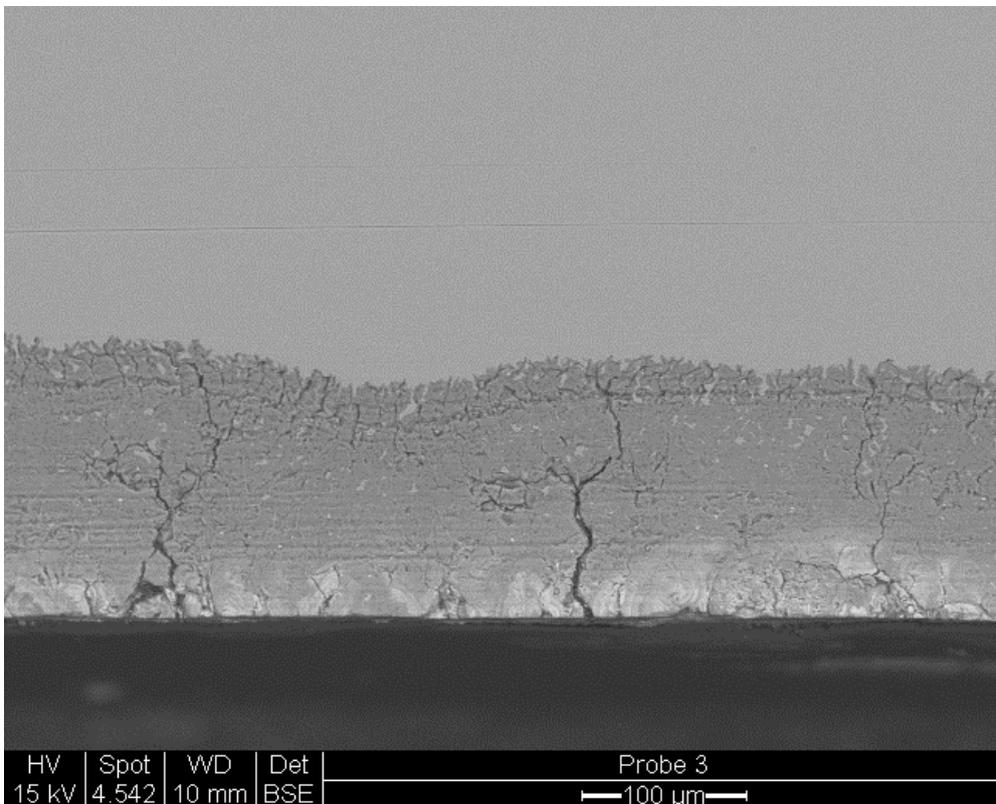


Bild 127: Probe 3: Verwitterungszonen – Außenseite

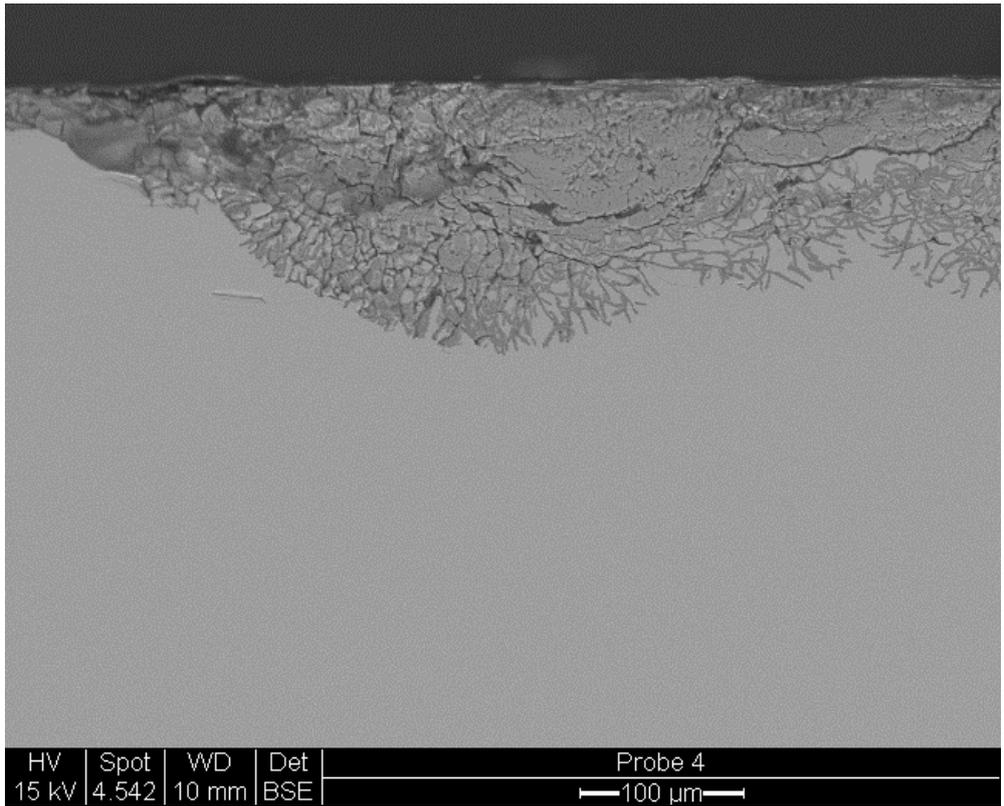


Bild 128: Probe 4: Verwitterungsbereiche - Innenseite

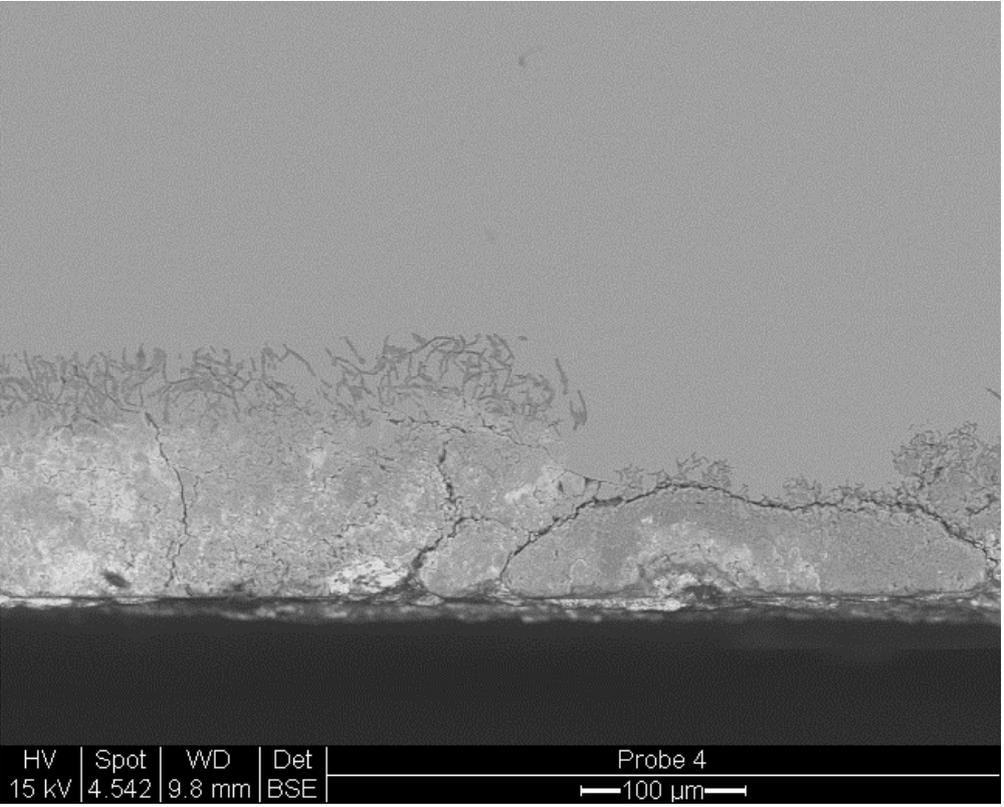


Bild 129: Probe 4: Verwitterungsbereiche - Außenseite

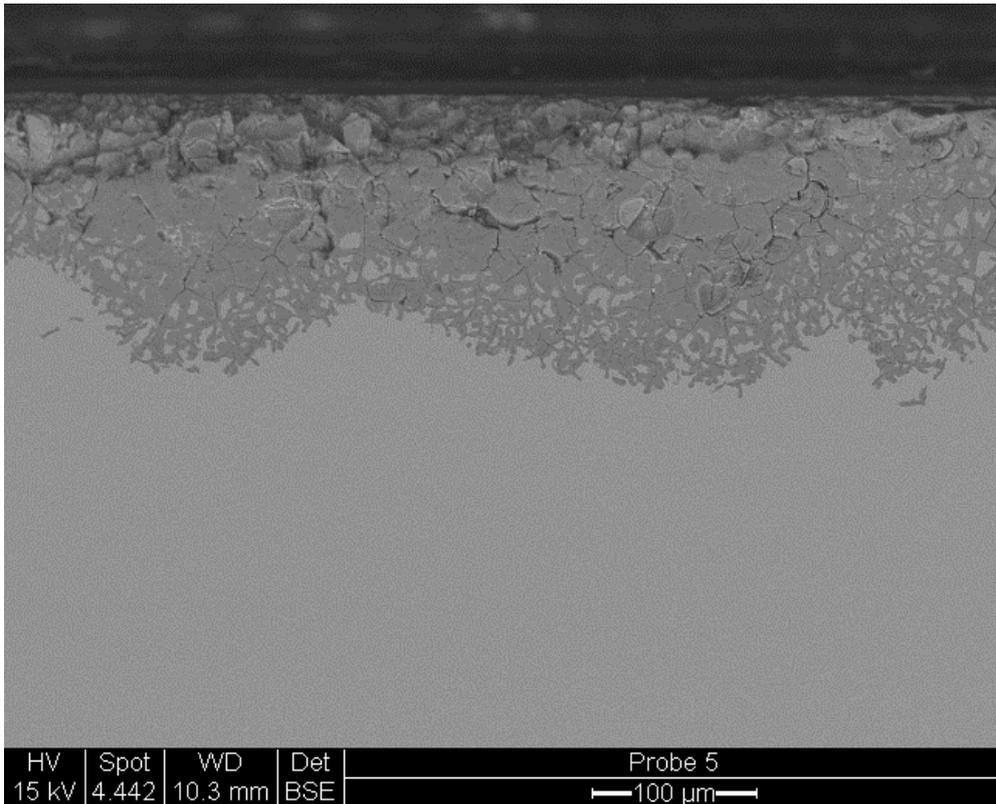


Bild 130: Probe 5: Verwitterungsbereiche - Innenseite

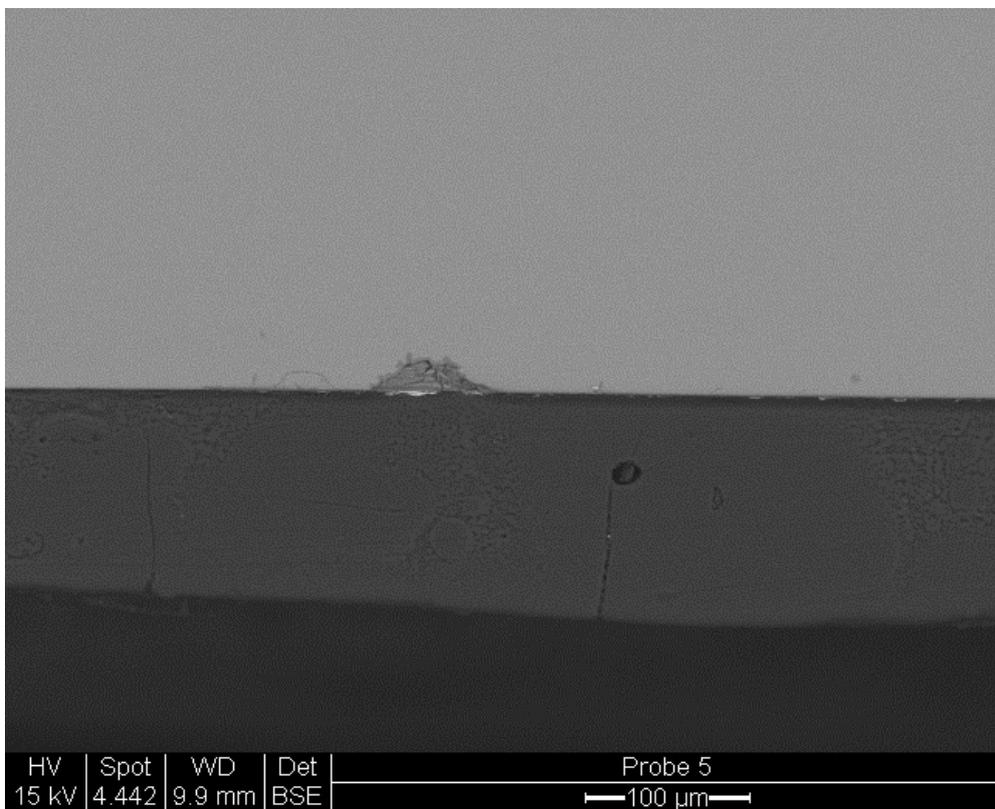


Bild 131: Probe 5: Verwitterungsbereiche - Außenseite mit Beschichtung

Auf den Proben 2 und 5 sind auch Beschichtungen der Oberfläche im Anschliffbereich sichtbar. Sie haben eine Stärke von 150-300 µm. Weitere Materialproben von Beschichtungen und Oberflächenablagerungen wurden von Gläsern des Feldes nIX entnommen und im Rasterelektronenmikroskop untersucht. Eine Unterscheidung zwischen Korrosionsprodukten und Beschichtungsmaterial ist anhand der elektronenmikroskopischen Abbildungen und der Auswertung von Elementspektren möglich.

Tabelle 4: Materialproben vom Fenster nIX

Probe-Nr.	Feld	Bemerkung	Abbildungen
PM1	6b, Außenseite	grauer Oberflächenbelag	s. Abschnitt 5.2.1
PM2	6b, Außenseite	grauer Belag	
PM3	6b, Außenseite	glänzende Beschichtung	
PM4	6b, Außenseite	Klebung/Beschichtungsmaterial abstehend	
PM5	3b, Innenseite	flächige Klebung, beidseitig	
PM6	3c, Innenseite	gefestigte Schwarzlotkontur (vermutet)	
PM 7	1b, Innenseite	gefestigte Schwarzlotkontur	
PM8	6b, Innenseite	Festigungs-/Beschichtungsmaterial	
PM9	6b, Innenseite	Festigungs-/Beschichtungsmaterial	
PM10	6b, Außenseite	Beschichtungsmaterial	

Bei der Probe PM1 handelt es sich um Ablagerungen von Verwitterungsprodukten auf der Glasoberfläche. Das Elementspektrum deutet auf ein Gemisch aus Gips, Syngenit und Gelschichtresten hin (Bild 133). Die Materialprobe PM3 wurde von beiden Seiten im Elektronenmikroskop abgebildet. Während im oberen Bild die Oberfläche des Beschichtungsmaterials sichtbar ist, zeigt die untere Abbildung die Kontaktseite der Beschichtung zur Glasoberfläche. Das Elementspektrum zeigt, dass Reste der Glasoberfläche an der Beschichtung haften und eine mechanische Abnahme somit nicht ohne Risiko möglich ist. Detailaufnahmen der Oberfläche des Beschichtungsmaterials lassen auf eine mikrobielle Besiedlung schließen (Bilder 134-139). Organische Materialien können bei entsprechenden Umweltbedingungen (hohe Umgebungsfeuchte) die mikrobielle Besiedelung ermöglichen und fördern (Wolf 2000). Ähnliche Strukturen sind u.a. auch auf der Materialprobe PM8 sichtbar (Bilder 140-142). Helle Bereiche in der elektronenmikroskopischen Abbildung wurden als Bleichlorid identifiziert - eine Verbindung, die früher auch zur Herstellung von Pigmenten genutzt wurde (Pattison's-Bleiweiß) und möglicherweise durch Anstricharbeiten in der Kirche in Spuren auf die Glasoberfläche gelangt ist. Um den Umfang einer mikrobiologischen Kontamination festzustellen, wurden Proben von Beschichtungsmaterialien weiteren Tests unterzogen (s. Abschnitt 6.3).

Die folgenden Abbildungen zeigen elektronenmikroskopische Abbildungen und Elementspektren von Materialproben der Glasoberfläche.

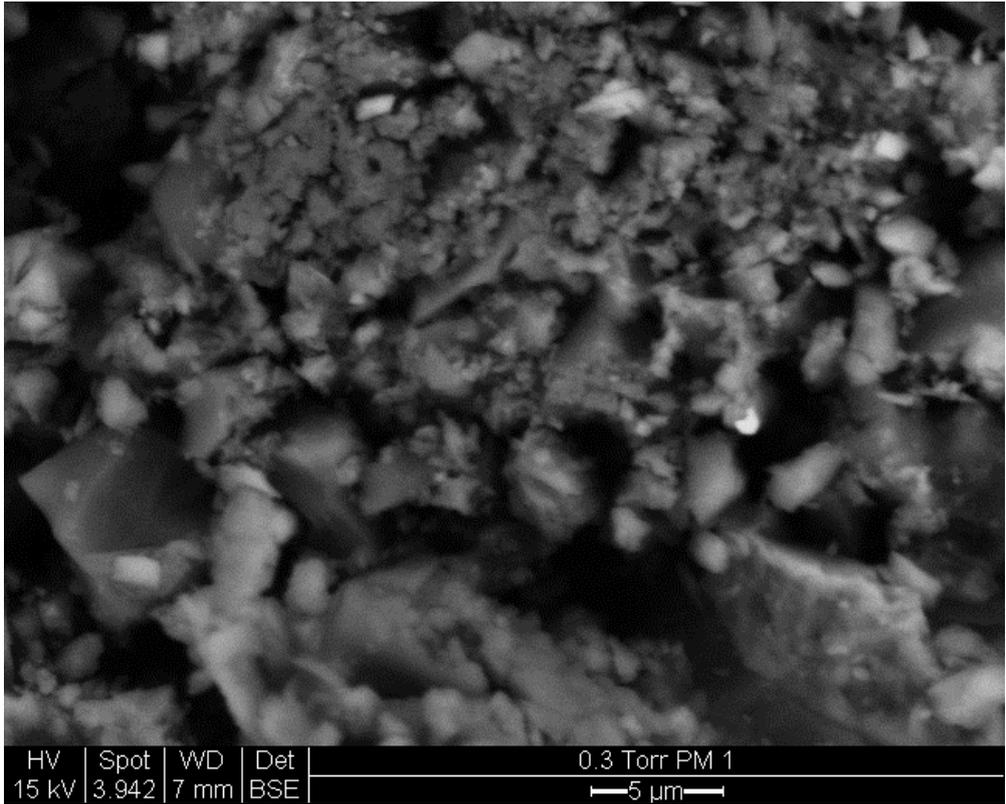


Bild 132: Probe PM1: Korrosionsprodukte, kein Beschichtungsmaterial

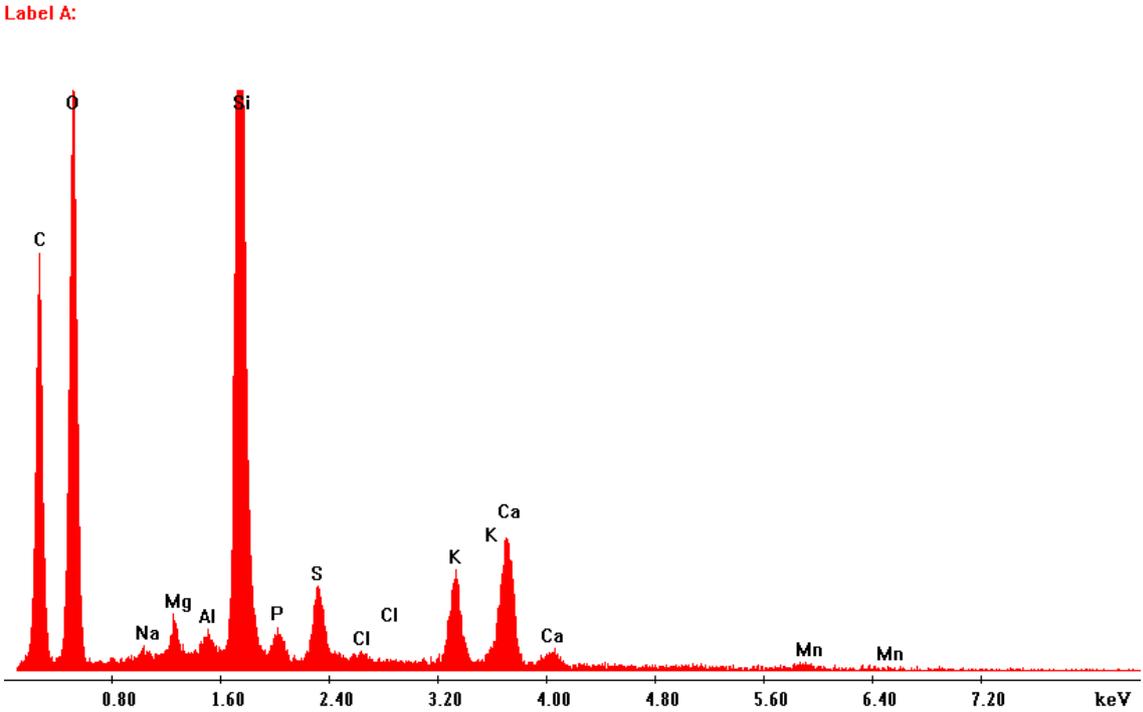


Bild 133: Probe PM1: Elementspektrum, Gips, Syngenit und Glasreste (Gelschicht)

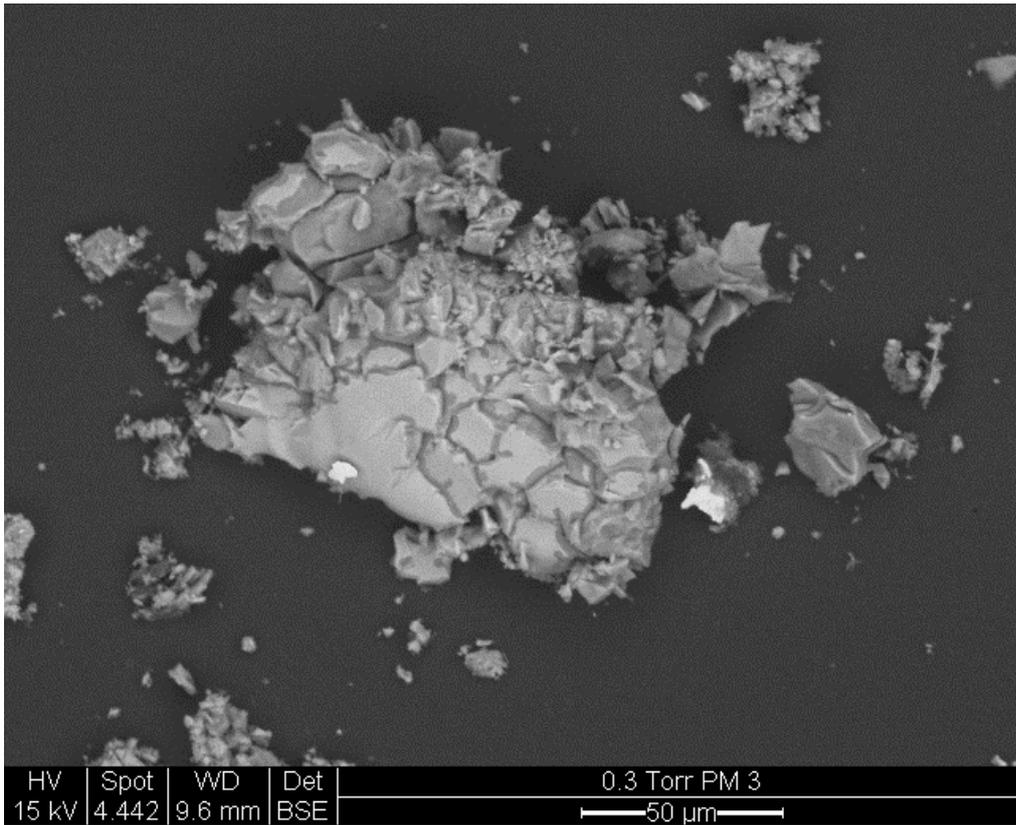


Bild 134: Probe PM3: Beschichtungsmaterial

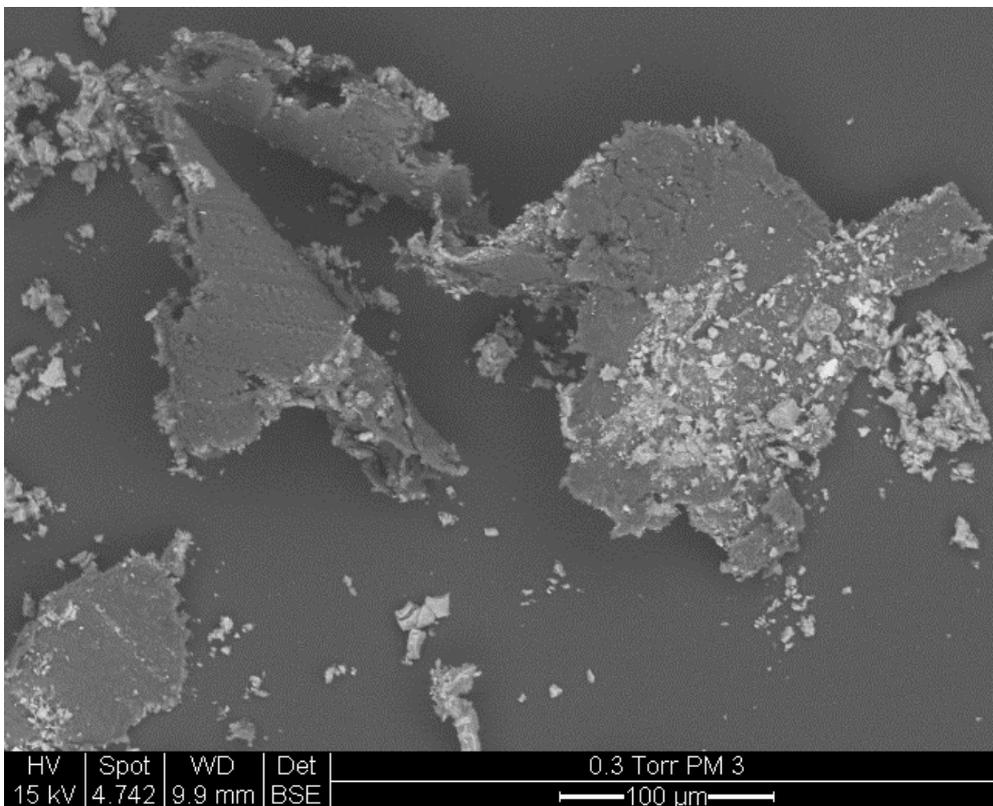


Bild 135: Probe PM3: Beschichtungsmaterial und Glasreste

Label A:

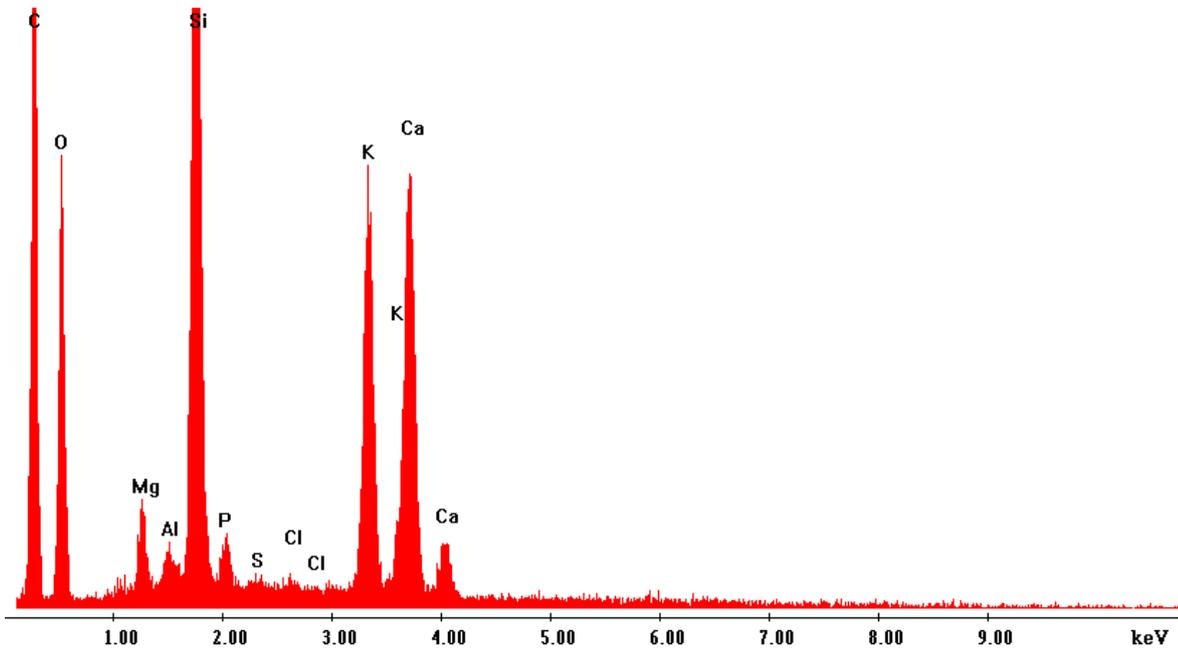


Bild 136: Probe PM3: Elementspektrum - Reste von Glas

Label A:

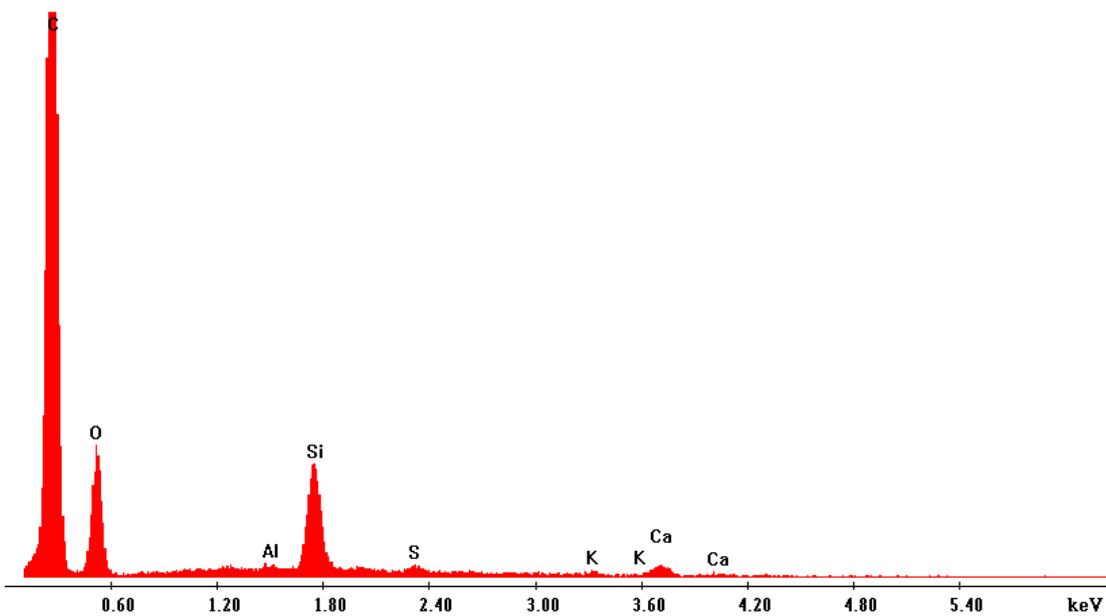


Bild 137: Probe PM3: Elementspektrum - Beschichtungsmaterial

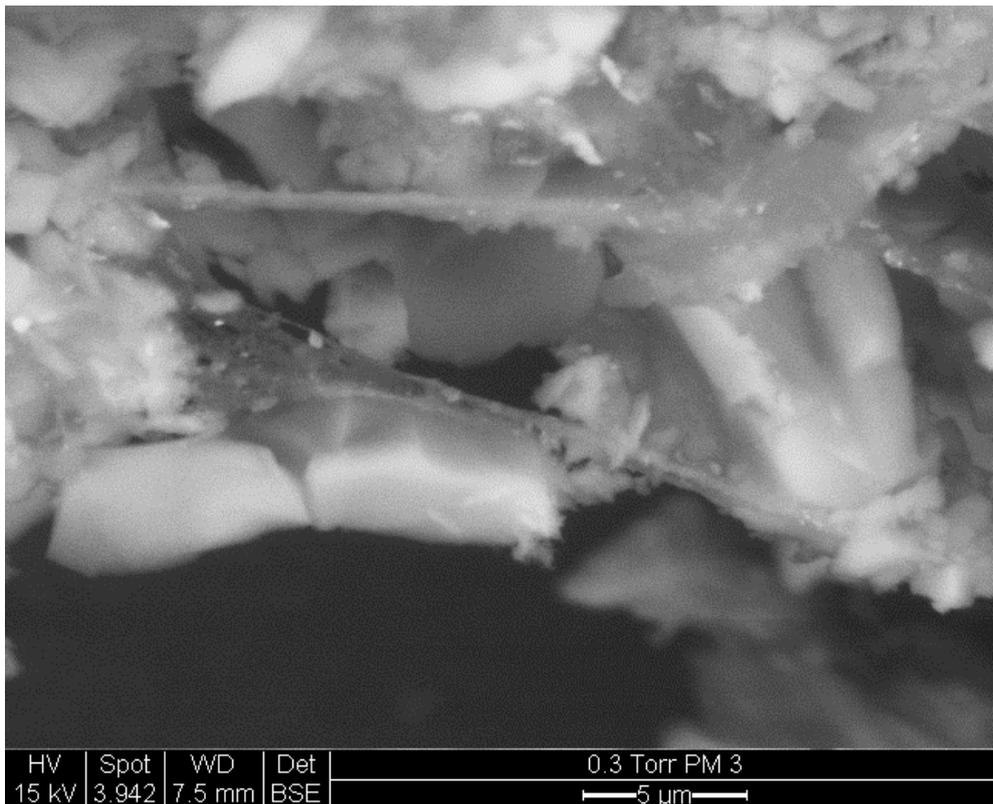


Bild 138: Probe PM3: Beschichtungsmaterial und mikrobielle Besiedlung

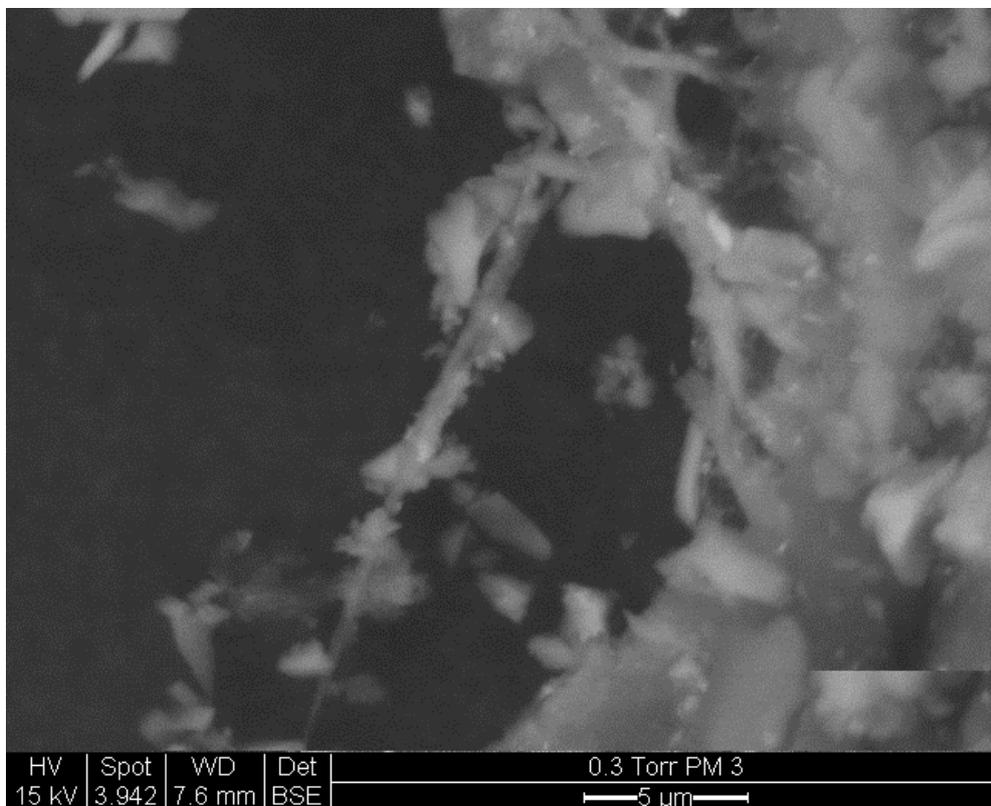


Bild 139: Probe PM3: Beschichtungsmaterial und mikrobielle Besiedlung

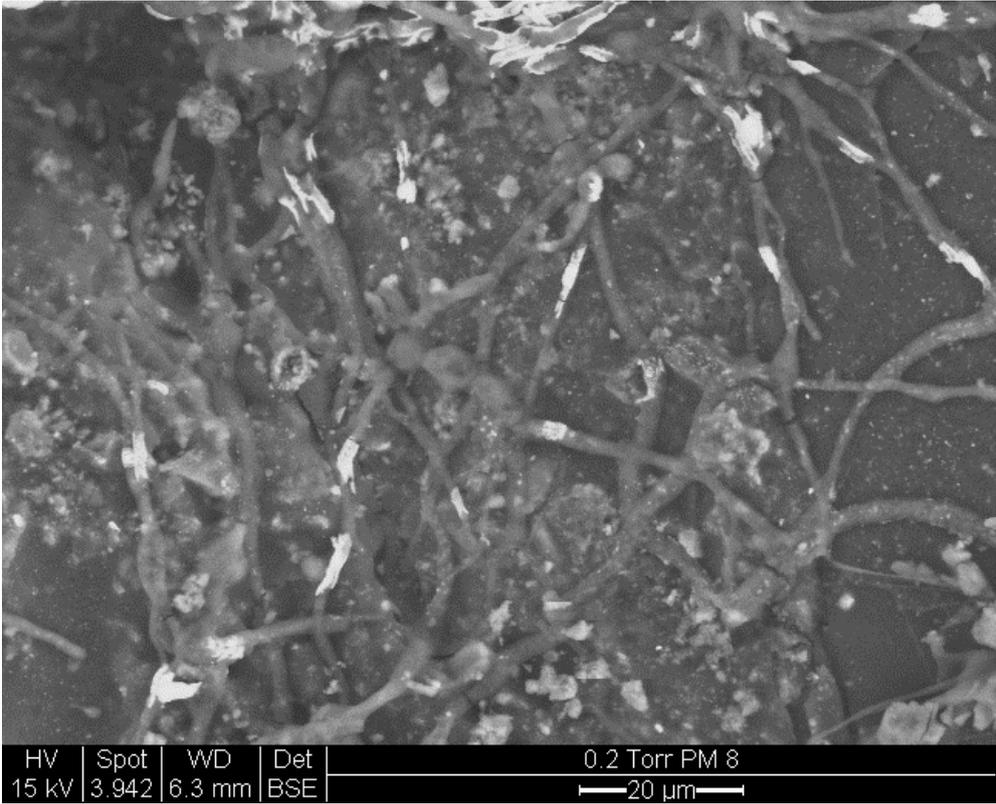


Bild 140: Probe PM8: Mikroorganismen auf der Oberfläche von Beschichtungsmaterialien

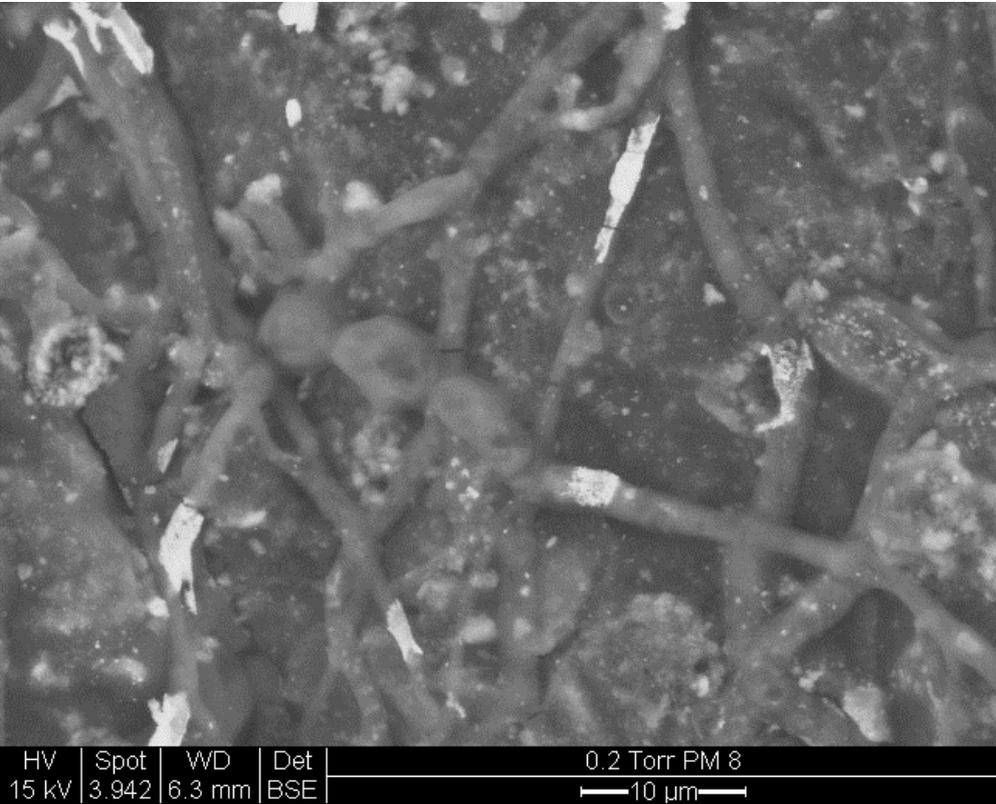


Bild 141: Probe PM8: Detail - Mikroorganismen auf der Oberfläche von Beschichtungsmaterialien

FTIR-Untersuchungen an Materialproben, die von der Oberfläche der Glasproben PG1, PG2 und PG4 abgenommen wurden, weisen eindeutig auf Polymethacrylatverbindungen hin. Diese Stoffklasse wurde von Kwiatkowski sowohl für das Imprägnieren der Glasoberfläche als auch für das Kleben von zerbrochenen Scheiben und für Ergänzungen eingesetzt. In den meisten Fällen haften diese Materialien noch sehr fest auf der Oberfläche. Als Flächenimprägnierung sind sie kaum sichtbar und unverändert. Als Verklebung sind sie teilweise eingefärbt, allerdings partiell auch stark vergilbt und versprödet (z.B. in Thorn: PM5, Leslau: PG2, PG5; Kulm: K2, K3 s. Abschnitt 5.2.1-5.3.1).

Die Identifizierung des Beschichtungsmaterials war mit Hilfe einer Spektren Bibliothek der Hochschule für Wirtschaft und Technik, Fachbereich Restaurierung und Konservierung (Prof. Stadelmann) möglich.

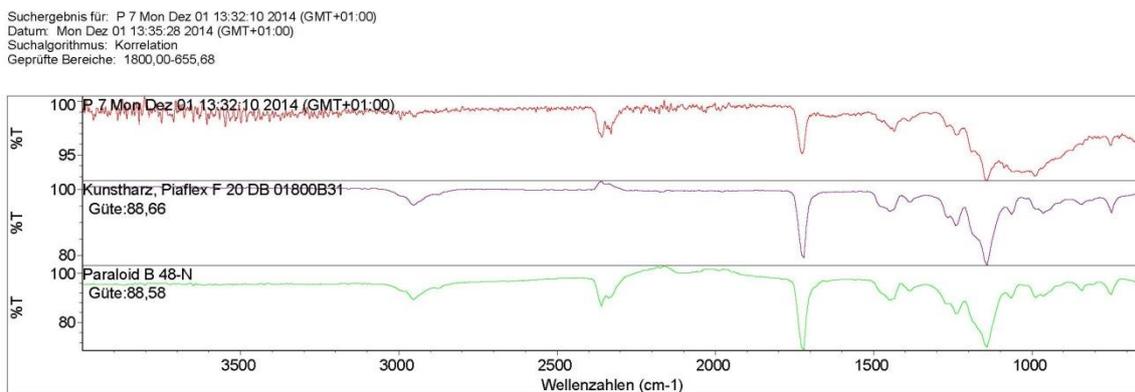


Bild 144: FTIR-Spektrum einer Materialprobe von Glas PG1 (rot) und Vergleichsspektren PiaflexF20 (violett) und Paraloid B48-N (grün)

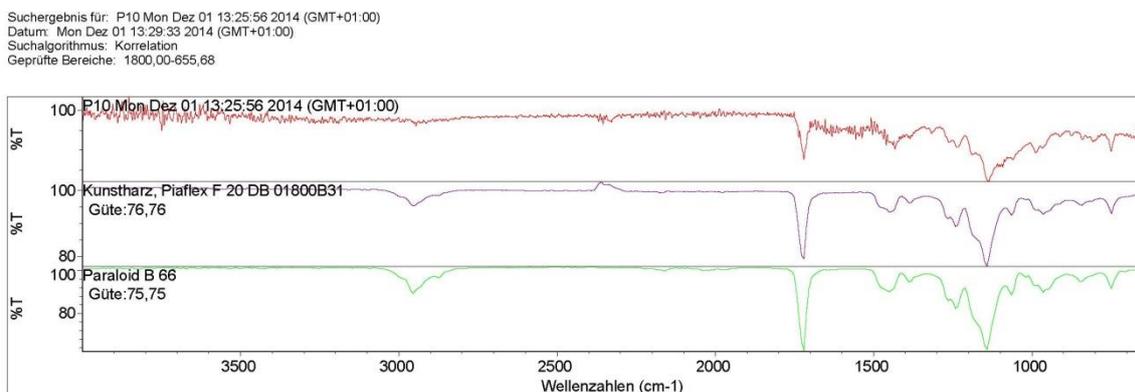


Bild 145: FTIR-Spektrum einer Materialprobe von Glas PG4 (rot) und Vergleichsspektren PiaflexF20 (violett) und Paraloid B48-N (grün)

Bei den Vergleichsspektren mit der größten Übereinstimmung handelt es sich um Verbindungen von Methyl-Metacrylat-Copolymeren (Paraloid B48N) bzw. der thermoplastischen Verbindung Piaflex und damit um vergleichbare Materialien (Stoffklassen) wie von Kwiatkowski verwendet. Beide Polymere werden auch in der Glas- und Steinrestaurierung als Beschichtungs- und Festigungsmaterialien verwendet /Datenbank für Polymere, Fachhochschule Potsdam <http://polykon.fh-potsdam.de/index.php/>.

6.3 Charakterisierung der mikrobiellen Kontamination von Glasproben aus Thorn und Leslau

Die Bestimmung der mikrobiellen Belastung von Glasoberflächen erfolgte an Proben von Glasmalereifeldern mit sehr unterschiedlichen Expositionsbedingungen. Einerseits sind es Glasfenster, die den Umgebungsbedingungen ungeschützt ausgesetzt waren (wie z.B. in Thorn), andererseits befanden sich die Gläser hinter einer Außenschutzverglasung (Leslau) bzw. werden seit Jahrzehnten schon im Museum aufbewahrt. Infolge der restauratorischen Behandlung durch Kwiatkowski in den 50er Jahren sind die Glasmalereifelder mit organischen Materialien beschichtet worden. Inwiefern die Beschichtungsmaterialien auch zu einer mikrobiellen Belastung der Glasoberfläche führen können, wurde an Materialproben untersucht. Die Probenahme wurde mit sterilen Werkzeugen (Skalpelle, Nadel) durchgeführt. Transport und Aufbewahrung der Materialproben erfolgte in dafür geeigneten Behältnissen, um jegliche zusätzliche Kontamination zu vermeiden.

Tabelle 5: Glasproben für mikrobiologische Untersuchungen (Bilder siehe Abschnitt 5.1-5.4.1)

Herkunft.	Materialprobe	Aufbewahrungs- /Umgebungsbedingungen
Dom Leslau Fenster nIX	PM2: Verwitterungsprodukte (Gips, Syngenit) PM4: Flächenklebung, hell PM5: Flächenklebung vergilbt PM6: Material von gefestigter Schwarzlotkontur PM9: Beschichtungsmaterial vergilbt	hinter Außenschutzverglasung unter Umgebungsbedingungen (r. F. < 80%, T -10...40 °C)
Johanniskirche Thorn Fenster I	T4: braune Schicht, Feld 15B, Innenseite T5: lockeres Material Feld 15B, Innenseite T9: braune Beschichtung mit Korrosion von Windeisen? , Außenseite Feld 1b T13: rel. dicker, lockerer Belag, Innenseite Feld 1b	ohne Außenschutzverglasung unter Umgebungsbedingungen (r. F. > 90% / T-10...40°C)
Marienkirche Kulm, jetzt im städtisches Museum Thorn KM Feld Ad1339	KM1: Beschichtungsmaterial	Aufbewahrung im Museum bei ca. 50 +/- 5 % r. F. und 20 +/- 2 °C
Dominikaner Kirche Thorn, jetzt städtisches Museum Thorn DM Feld Ad1363	DM1: Material von Flächenklebung /Oberflächenbeschichtung-Innen? / Außenseite?	Aufbewahrung im Museum bei ca. 50 +/- 5 % r. F. und 20 +/- 2 °C

Die Materialproben wurden mit Hilfe von mikrobiologischen Nachweismethoden in der BAM analysiert. Zur Untersuchung der biologischen Kontamination, die eine Biodeterioration der Glasproben bewirken könnte, wurden zwei Strategien in Anlehnung an (Otlewska et al., 2014) angewandt. Erstens durch direkte DNA Extraktion von den Proben und zweitens durch Kultivierung

der Materialproben auf verschiedenen Nährmedien (spezifisch für verschiedene Pilze und Bakterien), um die wachsenden Mikroorganismen zu isolieren und zu charakterisieren.

Bei der DNA Extraktion wurde eine klassische Phenol-Chloroform-Methode gewählt, da diese Methode für eine hohe Anzahl an unterschiedlichen Mikroorganismen genutzt werden kann. Die extrahierte DNA Konzentration wurde bestimmt (die DNA Menge kann mit der in der Probe vorhandenen Biomasse korreliert werden) und anschließend wurde eine qPCR (Amplifikation der IST Region von Pilzen oder der 16s RNA von Bakterien) durchgeführt, um die DNA Pilzen bzw. Bakterien zuordnen zu können. Die DNA Extraktion ergab nur sehr geringe DNA Konzentrationen, die nicht durch die qPCR amplifiziert werden konnten. Aufgrund dieser Ergebnisse kann man davon ausgehen, dass in keiner der Proben eine großflächige Kontamination mit Bakterien und Pilzen vorlag.

Durch die Kultivierung mit den verschiedenen Nährmedien konnten aus den Proben PM6, PM9, T5, T9 und KM1 mehrere Pilzstämme angezogen werden. Von diesen Pilzstämmen wurde dann DNA extrahiert und eine PCR der 18S RNA Region und der ITS Region durchgeführt. Die erhaltenen DNA Fragmente wurden anschließend sequenziert und mit verschiedenen Datenbanken verglichen. Aufgrund der Sequenzen kann man auf eine *Aspergillus* Art schließen. Die genaue Art ließ sich nicht ermitteln, da keine identische Referenzsequenz in den Datenbanken vorliegt. Die in den Proben PM 6, PM9 und KM1 nachgewiesene Art gehört zur Pilzgattung *Aspergillus* (Ascomycota) mit 95-99% Ähnlichkeit zu trockenliebenden Arten. Zum Beispiel sind *A. fumigatus*, *A. restrictus* und *A. tamarii* osmophil und xerophil, das heißt, dass sie in Gebieten mit hoher Salzkonzentration und/oder niedriger Wasseraktivität eine ökologische Nische finden und vor allem dort wachsen können. Bei *Aspergillus tamarii* wird angenommen, dass diese Art bei der Glasbiodeterioration beteiligt ist. Weitere Arten, die eine hohe Verwandtschaft zu der von diesen Proben isolierten aufweisen, sind z.B. *Aspergillus vitricola* oder *Aspergillus penicillioides*, die auch xerophilic sind und bereits von diversen Standorten isoliert wurden (z.B. Glasproben, Filmrollen, Papier in Museen etc.). Für diese Pilzgattungen günstige Bedingungen finden sich offenbar auch hinter der Außenschutzverglasung in Leslau (Proben PM6, PM) mit einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 80 % und im Museum in Thorn mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von 50 +/-5 % (Probe KM1). Die Untersuchung der Probe DM1 weist auf das Bakterium *Micrococcus luteus* hin, von dem keine Untersuchungen hinsichtlich des Angriffs auf Glas vorliegen. Das Bakterium wurde aber auch schon aus Proben von Kulturgütern isoliert (Biswas et al., 2013; Rajkowska et al., 2014).

Weitere Materialproben, die der direkten Witterung ausgesetzt waren, wurden von den Glasmalereifeldern in Thorn entnommen. Beschichtungsmaterialien wurden auf diesen Gläsern nicht mehr nachgewiesen. Durch die Kultivierung in Nährmedien konnten in den Proben T5 und T9 ebenfalls unterschiedliche Pilze wie *Aspergillus* spp. (*A. glaucus* oder *A. pseudoglaucus*), *Cladosporium ramotenellu* und *Cladosporium ramotenellum* identifiziert werden. Auch diese Pilzarten kommen ubiquitär in verschiedenen Habitaten vor. Es handelt sich nicht um typische Glasbesiedler.

Die Untersuchungen zeigen, dass in allen Materialproben, die noch Glasbeschichtungen durch Kwiatkowski mit organischen Materialien aufweisen aber auch auf den Proben, wo diese Beschichtungen bereits abgewittert waren (Proben T5, T9) eine mikrobielle Aktivität nachgewiesen werden konnte, die jedoch unabhängig von der Exposition der Glasmalereien nicht signifikant erhöht ist. Nachgewiesen wurden unterschiedliche Pilzspezies, die auch zu Glasschäden führen können.

Biodeterioration von Glas (speziell historische Gläser) wurde u.a. von (Carmona et al., 2006; Krumbein et al., 1991; Pinar et al., 2013) untersucht. Verschiedene Biodeteriorationseffekte können durch

Mikroorganismen hervorgerufen werden, bekannt sind z.B. das Besiedeln von Glasoberflächen, Pitting oder Lochfraß sowie Einätzungen und Rissbildung.

Auch (Schabereiter-Gurtner et al., 2001) fanden die Anwesenheit von *Aspergillus spp.* als Haupt-Kolonisierung-Pilzgattung auf historischem Glas. Allerdings ist einzuschränken, dass die Besiedelung auf reinem Glas relativ gering ist, oft sind Beschichtungen Auslöser der Deterioration (Bartosik et al., 2010). Einige Arbeiten über die Besiedelung und Zerstörung historischer Gläser durch Mikroorganismen liegen u. a. von (Carmona et al., 2006; Pinar et al., 2013; Rodrigues et al., 2014) vor, systematische Untersuchungen fehlen bislang jedoch. Die Besiedelung von Epoxid-Harzen, oft eingesetzt in der Restaurierung zur Glasklebung, wurde von (Cappitelli et al., 2004; Pangallo et al., 2015) dokumentiert.

Tabelle 6: Mikrobielle Kontamination auf Materialproben

Probe	Organismus	Spezifikation
PM6	Pilz	<i>Aspergillus</i> (Ascomycota)
PM9	Pilz	<i>Aspergillus</i> (Ascomycota)
T5	Pilz	<i>Aspergillus spp.</i> (<i>A. glaucus</i> oder <i>A. pseudoglaucus</i>)
T9	Pilz	<i>Cladosporium ramotenellum</i> , <i>Aureobasidium pullulans</i> , <i>Cladosporium ramotenellum</i>
KM1	Pilz	<i>Aspergillus</i> (Ascomycota)
DM1	Bakterium	<i>Micrococcus luteus</i>

6.4 Laboruntersuchungen zur Simulation der Restaurierung nach Kwiatkowski

Die Simulation der Restaurierung nach Kwiatkowski erfolgte an mittelalterlichen Glasproben aus dem Bestand von Restaurierungswerkstätten, um abzuschätzen ob die originalen Gläser infolge der Behandlungsbedingungen geschädigt worden sind. Die Proben P1, P4 und P5 wurden anhand ihrer chemischen Zusammensetzung ausgewählt. Sie waren infolge ihrer ursprünglichen Exposition den natürlichen Umgebungsbedingungen über Jahrhunderte ausgesetzt und zeigen daher die typischen Verwitterungserscheinungen wie Korrosionsbeläge und Gelschichten und entsprechen somit den Gläsern aus Thorn und Leslau.



Bild 146: Mittelalterliche Glasproben P1, P4, P5

Tabelle 7: Chemische Zusammensetzung der mittelalterlichen Glasproben P1, P4, P5 (14./15.Jh.)

Nr.	SiO ₂	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Fe ₂ O ₃	SO ₃	Cl	MnO
P1	59,8	2,6	4,7	20,6	3,5	1,1	2,7	3,2	-	0,4	1,4
P4	50,0	0,4	22,2	20,4	3,8	1,4	0,7	-	-	-	1,2
P5	53,0	-	25,8	16,9	3,4	1,0	-	-	-	-	-

Die Probe P1 ist ein mittelalterliches Glas mit einem CaO/K₂O Verhältnis >1 und somit im Gegensatz zu Probe 5 mit einem CaO/K₂O-Verhältnis von <1 korrosionsstabiler. Die Probe 4 hat ein in etwa ausgeglichenes CaO/K₂O-Verhältnis und ist hinsichtlich des SiO₂-Gehaltes mit den untersuchten Gläsern aus Leslau und Thorn vergleichbar. Die Probe 5 ist aufgrund des hohen K₂O-Gehaltes und des geringen SiO₂-Anteils das gegenüber äußeren Einflüssen empfindlichste Glas. Die Verwitterungszonen der Proben 1, 4 und 5 wurden im Rasterelektronenmikroskop (ESEM) an einer angeschliffenen und polierten Probenkante dokumentiert. Es erfolgte so eine Auswahl von typischen Gelschichtbereichen auf der Vorder- und Rückseite der Glasproben, die im Ausgangszustand und nach den jeweiligen Behandlungsschritten (Tabelle 8) an exakt der gleichen Probenstelle im Rasterelektronenmikroskop untersucht wurden, um Aussagen zum Einfluss der Behandlungsbedingungen auf den Zustand der Glassubstanz abzuleiten. Die Arbeitsschritte der Reinigung und Konservierung der Gläser sind in der folgenden Tabelle zusammengestellt.

Tabelle 8: Behandlungsbedingungen zur Simulation der Restaurierungsbedingungen nach Kwiatkowski

Proben	Reinigung	Nachbehandlung
P1, P4, P5	5h Wasserlagerung (fließendes Leitungswasser), Oberfläche mit Pinsel reinigen	bei Zimmertemperatur trocknen
P1, P4, P5	Oberfläche mit organischem Lösungsmittel mit Pinsel reinigen (Aceton)	mit Wasser und dest. Wasser spülen; 1-2 Tage bei Zimmertemperatur trocknen; anschließend ca. 2 h bei 75 mm Hg und 100 °C trocknen
P1, P4, P5		partielle Beschichtung mit Paraloid B72. Trocknung im Vakuum 75 mm Hg ca. 1h, Beschichtung, 2 Tage an Luft trocknen, anschließend in Trockenschrank bis 230°C erhitzen, für 25 Minuten halten und langsam abkühlen (1,5 h Aufheizen, 25 min halten, über Nacht abkühlen)

Analysen an Beschichtungen auf Gläsern aus Leslau weisen bei allen untersuchten Proben auf Polymethacrylsäureester hin. Für die Simulationsversuche wurde als Beschichtungsmaterial Paraloid B72 gelöst in Ethylacetat (10%-ige Lösung) verwendet.

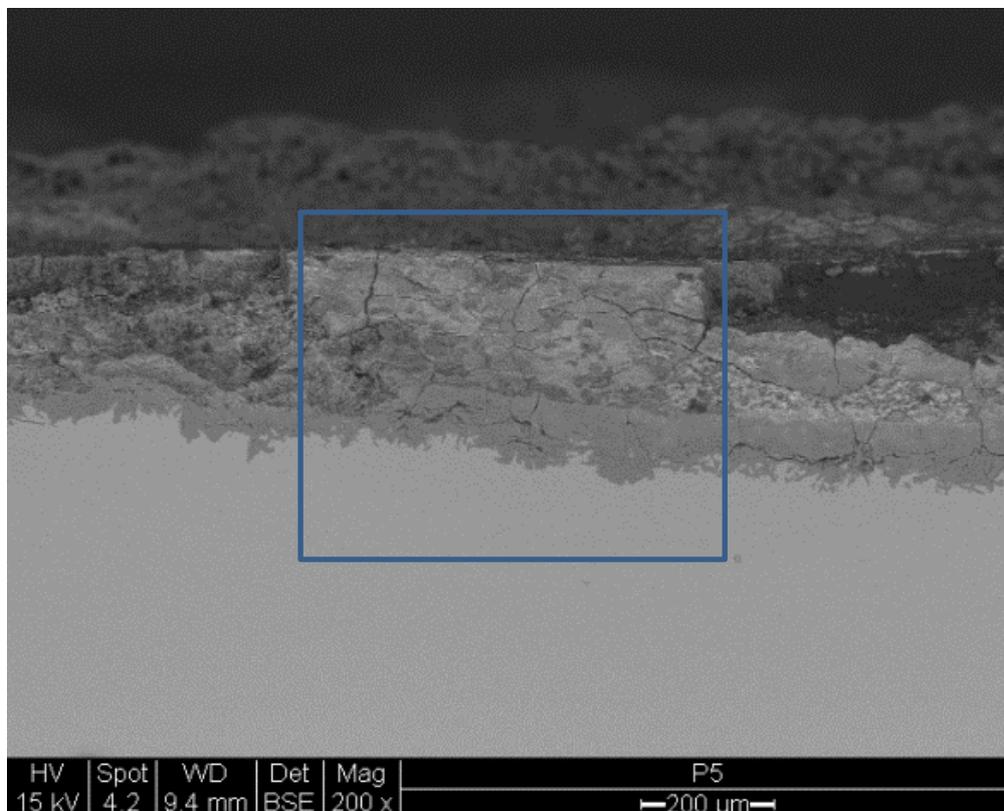


Bild 147: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P5 im Ausgangszustand (Rahmen entspricht Detailaufnahme im Bild 149)



Bild 148: Gelschichtbereiche an der Innenseite von Glas P5 im Ausgangszustand

Die kompakte Wettersteinschicht bleibt auch nach der Lagerung in fließendem Wasser nahezu vollständig erhalten.

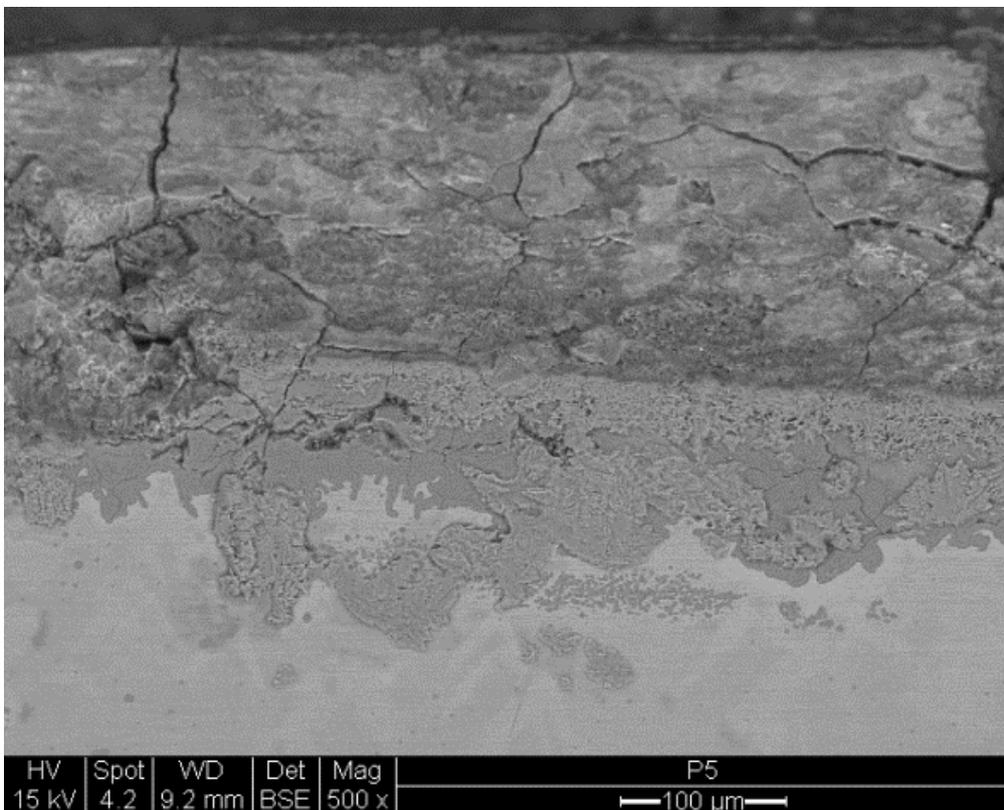


Bild 149: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P5 nach der Reinigung mit Wasser

Der Vergleich der Verwitterungszonen anhand der dokumentierten Gelschichtbereiche im Vorzustand und nach der Reinigung mit Wasser zeigt am Beispiel der korrosionsempfindlichsten Glasprobe P5 nur sehr geringe Unterschiede (Bilder 147-150).

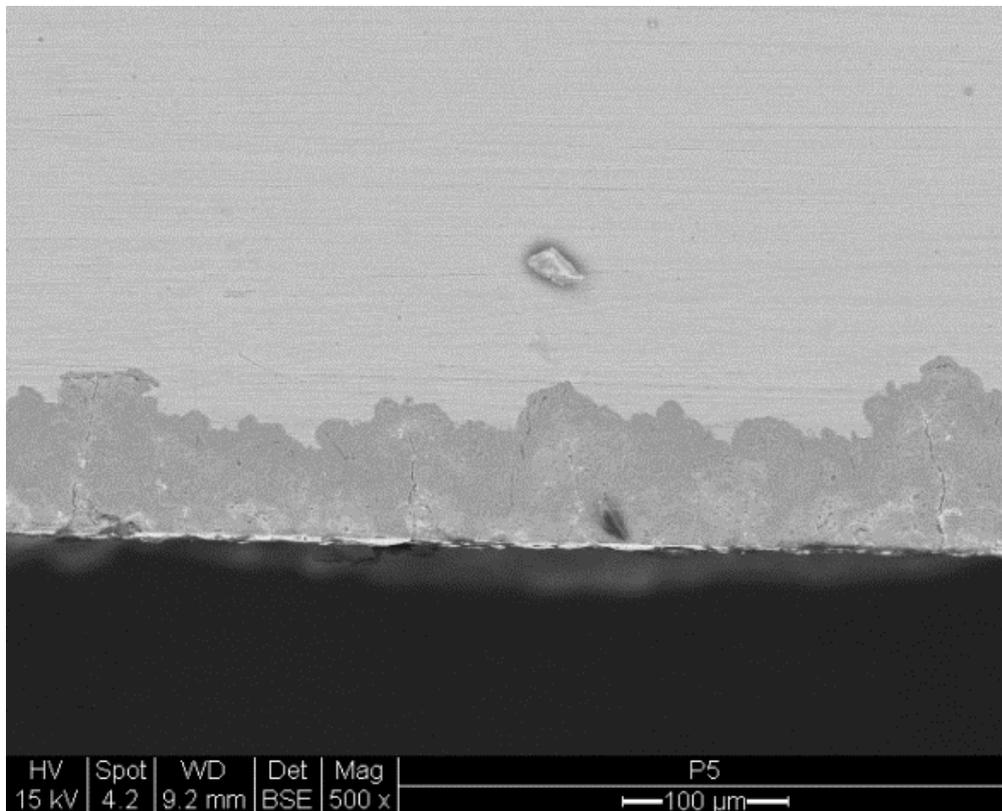


Bild 150: Gelschichtbereiche an der Innenseite von Glas P5 nach der Reinigung mit Wasser

Der Verlauf der Gelschicht ist auch nach der Wasserlagerung der Glasproben sowohl auf der Außen- als auch auf der Innenseite unverändert. Im Bereich der angeschliffenen Kante werden Gelschichtbereiche jedoch partiell von Korrosionsprodukten der Außenseite überlagert, die vermutlich aus gelöstem und wieder auskristallisiertem Wetterstein entstanden sind. Auslaugungsprozesse infolge der Wasserlagerung und eine damit verbundene Verbreiterung der Gelschichten konnten nicht festgestellt werden.

Eine weitere Dokumentation der Gelschichtbereiche im ESEM erfolgte anhand der Probe 5 nach Reinigung der Proben mit Aceton und anschließender zweistündiger Trocknung im Vakuumtrockenschrank bei 75 mm Hg und 100°C (Bilder 151, 152). Die Bilder zeigen, dass auch nach dieser Behandlung einzelne Gelschichtstrukturen sowohl auf der Außen- als auch auf der Innenseite nahezu unverändert im Vergleich zum Ausgangszustand erhalten sind. Vorhandene Gelschichttrisse auf der Glasinnenseite sind vermutlich durch die kombinierte Aceton-, Wasser-, Vakuum-/Temperaturbehandlung leicht aufgeweitet.

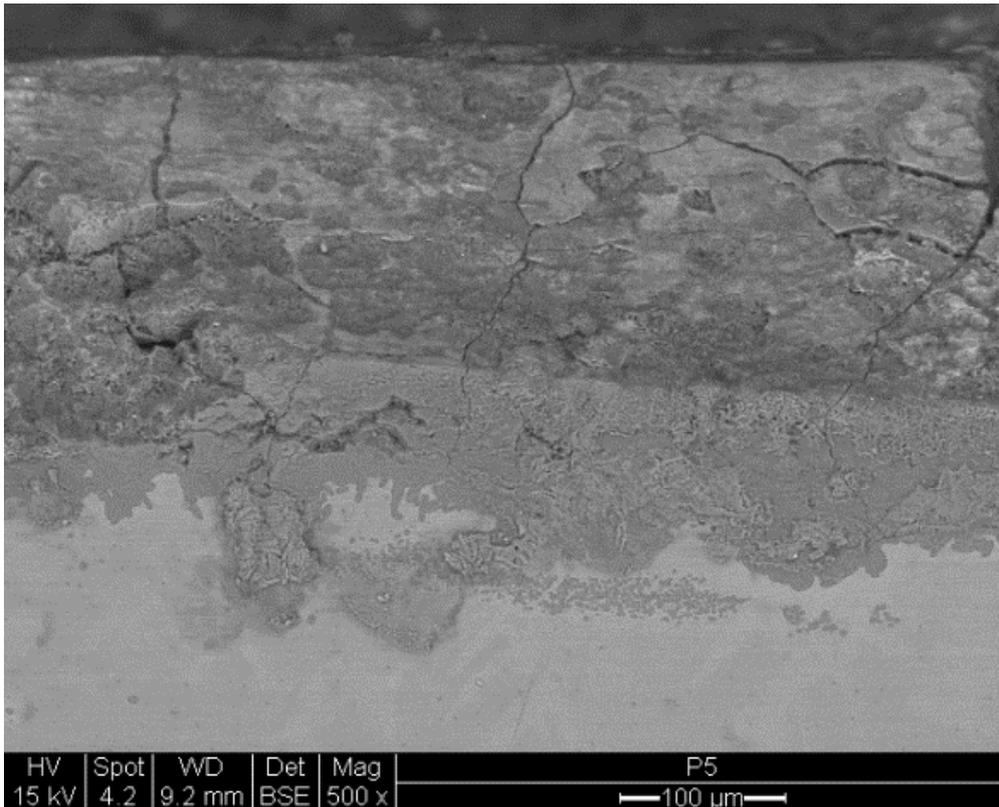


Bild 151: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P5 nach der Reinigung mit Aceton und anschließender Vakuumtrocknung

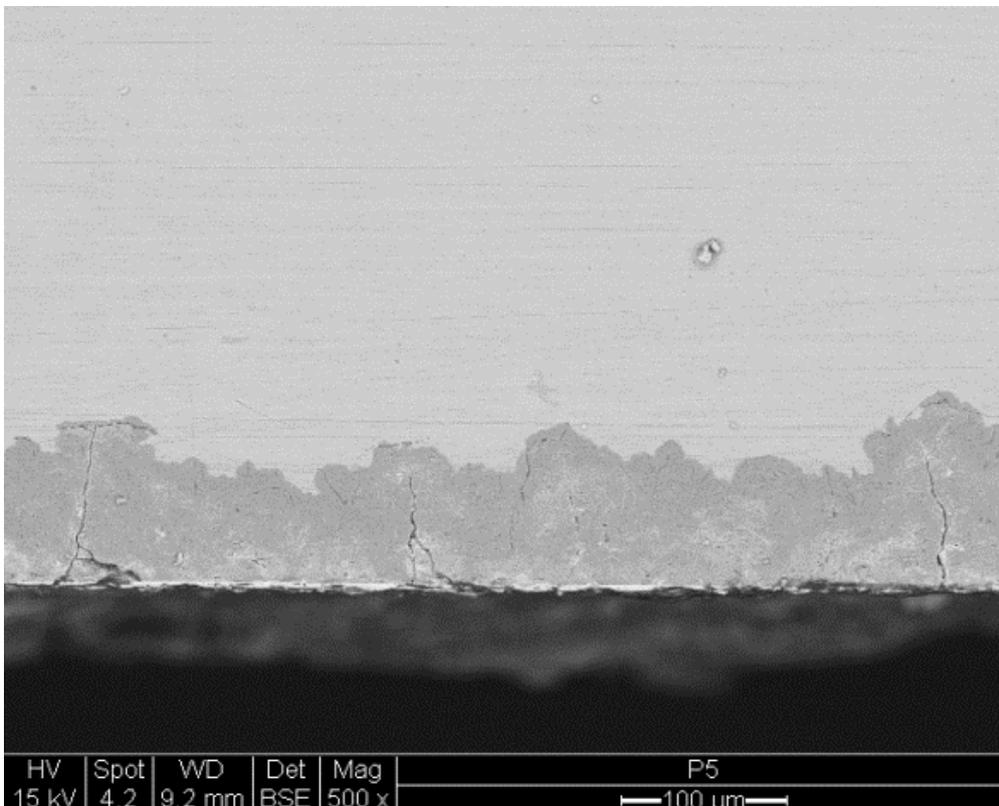
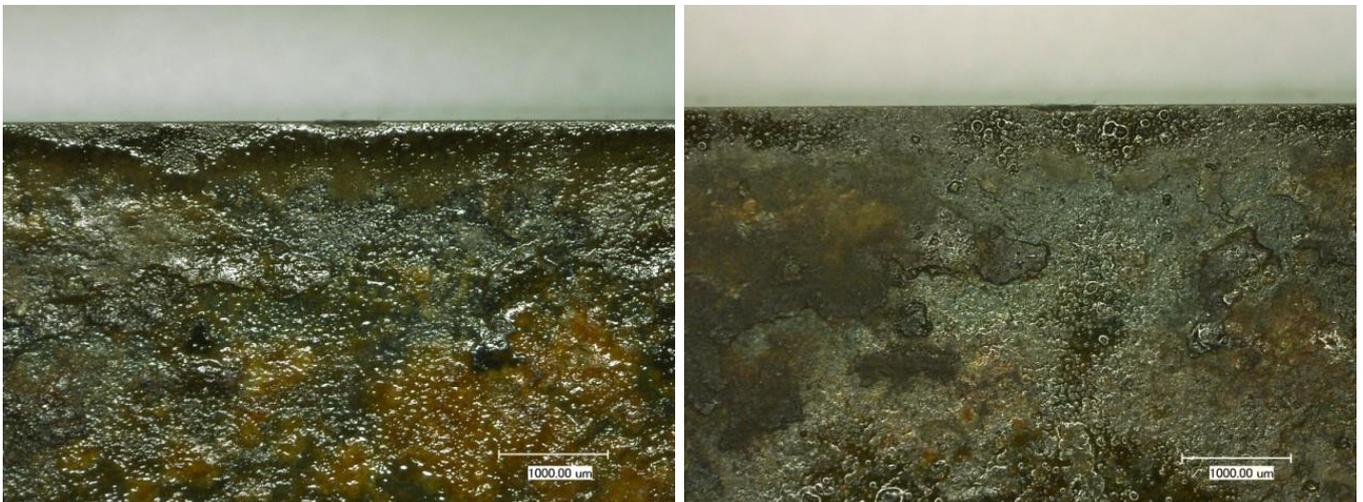


Bild 152: Gelschichtbereiche an der Innenseite von Glas P5 nach der Reinigung mit Aceton und anschließender Vakuumtrocknung

Die Beschichtung der Glasoberflächen erfolgte mit einer 10% -igen Lösung aus Paraloid B72 in Ethylacetat mittels Pinsel und anschließender Trocknung im Vakuum (75 mm Hg) für eine Stunde. Anschließend wurden die Beschichtungen für zwei Tage an Luft getrocknet und schließlich im Trockenschrank bis auf 230°C erhitzt und 25 Minuten bei dieser Temperatur gehalten. Die Abkühlung der Proben bis Raumtemperatur erfolgte durch das Abschalten des Trockenschrankes. Nach Kwiatkowski soll durch die Temperaturbehandlung eine vollständige Polymerisation des zur Flächenimprägnierung und Beschichtung eingesetzten Polymethylmetacrylat erreicht werden. Für Paraloid B72 wäre diese Behandlung nicht notwendig, da Paraloid B-72 bereits ein Acrylatpolymerisat mit hoher Molmasse ist. Es hat daher keinen scharf definierten Schmelzpunkt. Die ersten Anzeichen des Schmelzens werden bei 70-75° C sichtbar. Ein wirkliches Fließen entsteht bei 145-150° C. Die Transformationstemperatur TG liegt bei ca. 40° C. Somit führt die Temperaturbehandlung bis 230°C zu einer deutlichen Verringerung der Beschichtungsdicke auf der Glasoberfläche (Bilder)



Bilder 153, 154: Probe P5 nach der Beschichtung mit Paraloid B72 (links) und nach Trocknung bei 230°C im Trockenschrank (rechts)

Die Beschichtung der Gläser erfolgte bis an die Anschliffkante, so dass die Einwirkungen des Beschichtungsmaterials und der Behandlungsbedingungen auf die mittelalterliche Glassubstanz anhand der dokumentierten Gelschichtbereiche deutlich werden sollten (Bilder 155-160).

Auch nach dieser Behandlung der Gläser konnten keine Veränderungen in Form und Struktur der Gelschicht festgestellt werden. Rissstrukturen in der Gelschicht haben sich jedoch deutlich verstärkt bis hin zum Entstehen von neuen Rissen parallel zur Oberfläche. Eine Verbreiterung der Verwitterungszone (Gelschicht) hingegen konnte nicht festgestellt werden.

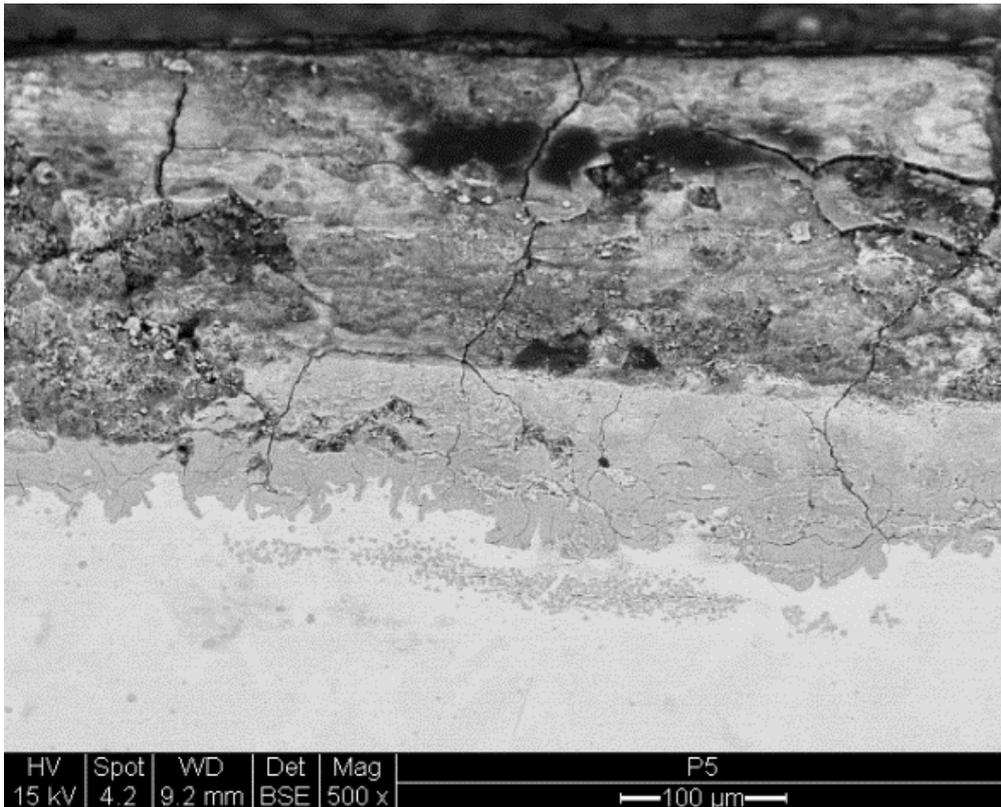


Bild 155: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P5 nach der Beschichtung der Glasoberfläche mit Paraloid B72 und anschließender Trocknung bei 230°C

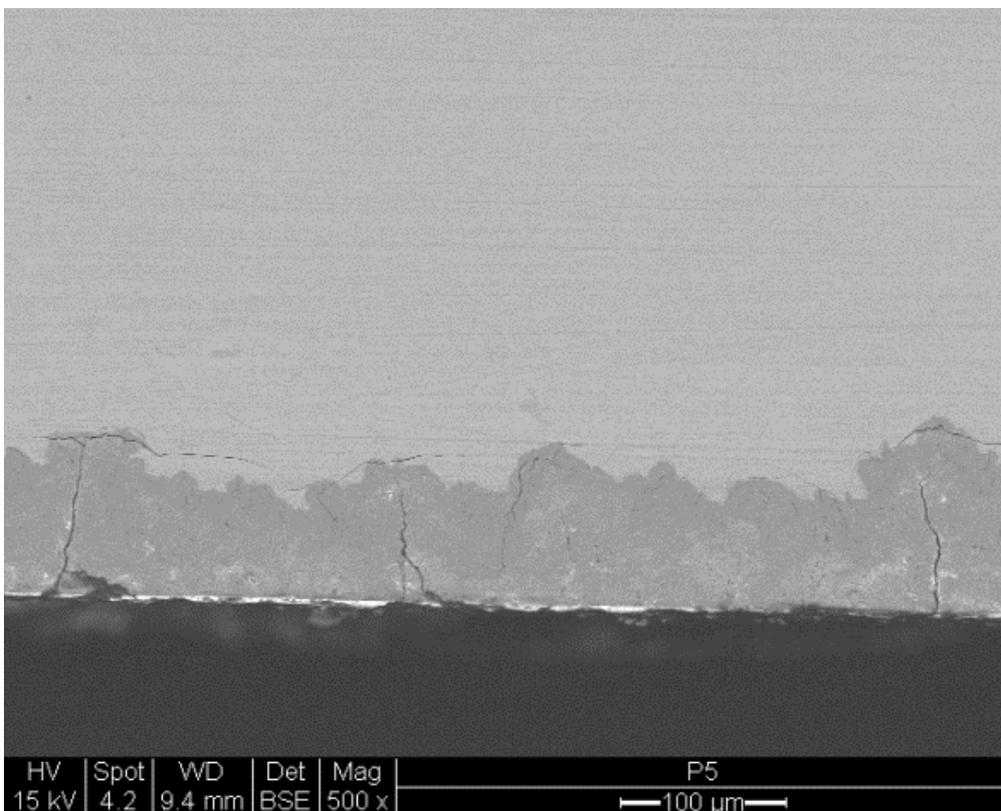


Bild 156: Gelschichtbereiche an der Innenseite von Glas P5 nach der Beschichtung der Glasoberfläche mit Paraloid B72 und anschließender Trocknung bei 230°C

Die Untersuchungsergebnisse an den mittelalterlichen Glasproben P1 und P4 führen zu ähnlichen Ergebnissen wie die folgenden Bilder zeigen.

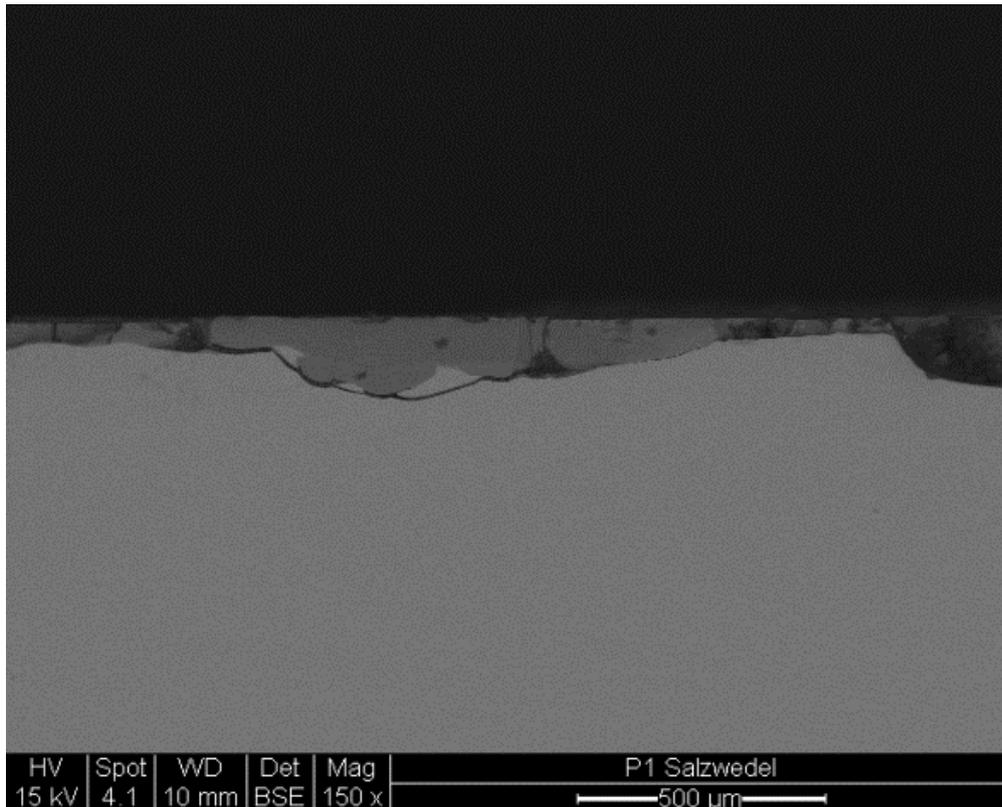


Bild 157: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P1 im Ausgangszustand

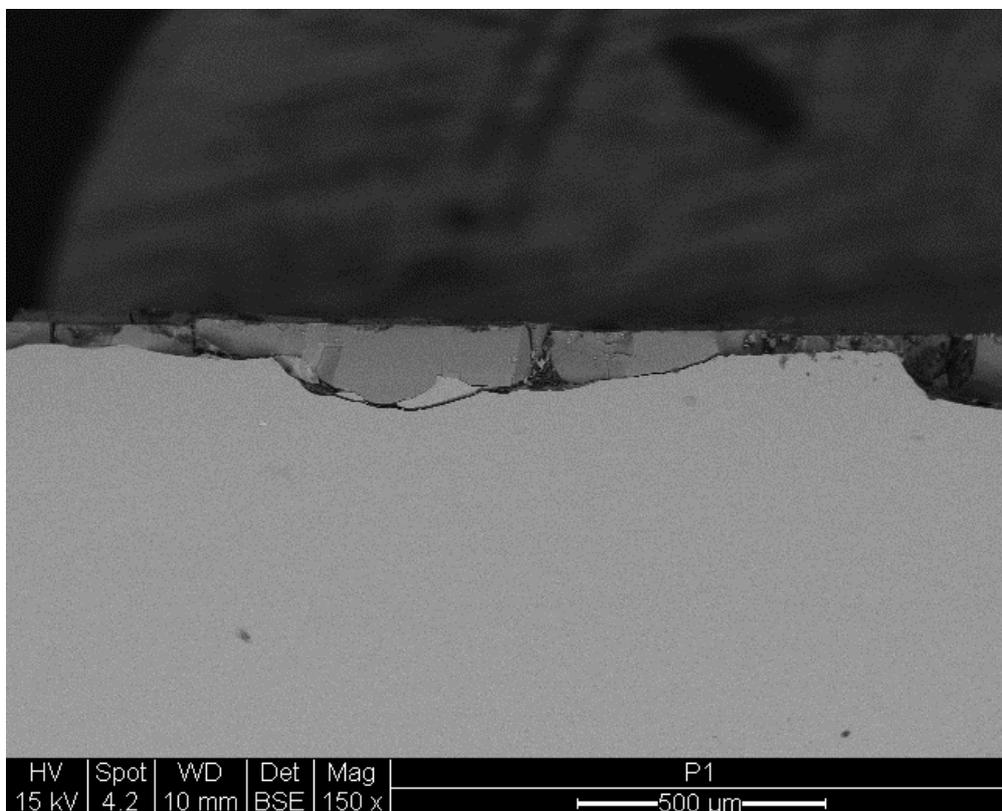


Bild 158: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P1 und nach der Beschichtung der Glasoberfläche mit Paraloid B72 und anschließender Trocknung bei 230°C

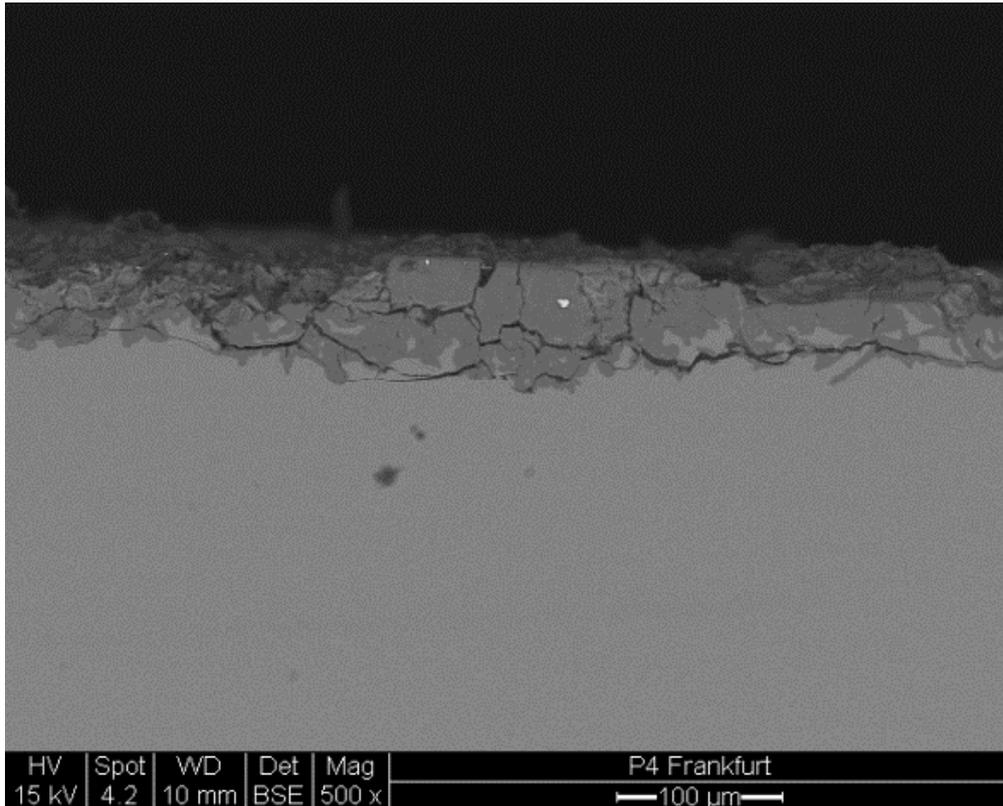


Bild 159: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P4 im Ausgangszustand

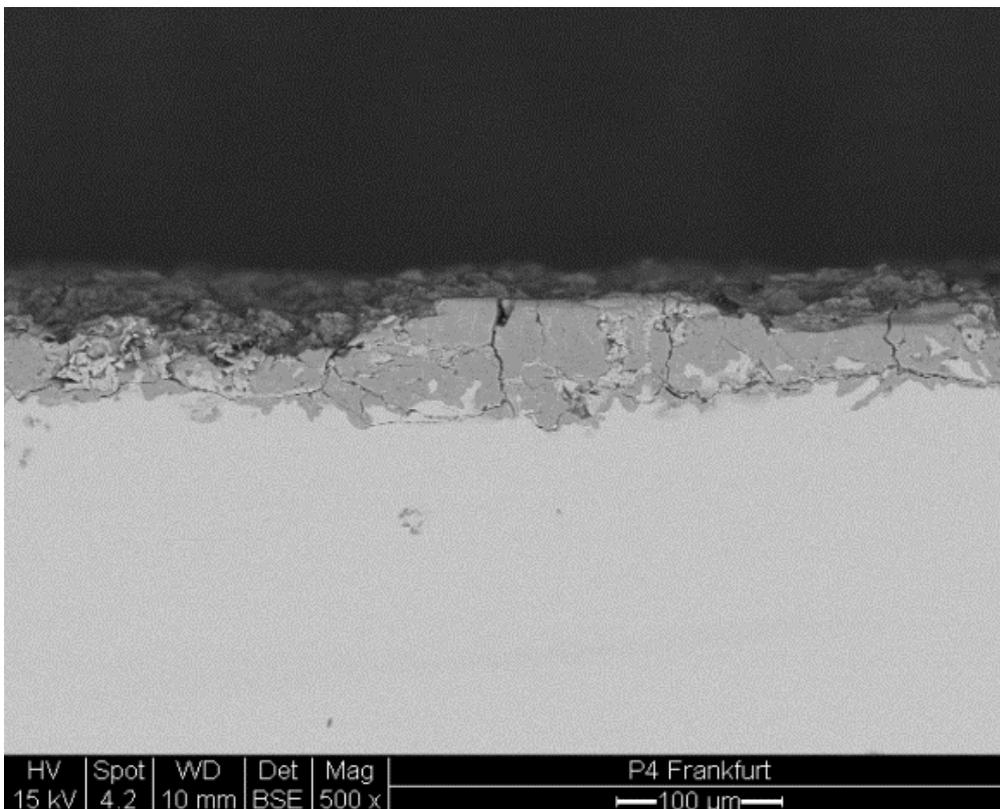


Bild 160: Gelschichtbereiche an der Außenseite von Glas P4 nach der Beschichtung der Glasoberfläche mit Paraloid B72 und anschließender Trocknung bei 230°C

Während bei Probe 1, dem korrosionsstabilsten Glas, nur einige wenige Gelschichtverluste nach Reinigung und Beschichtung festgestellt wurden, weist die Probe 4 im Vorzustand viele Risse in der Gelschicht auf, die nach allen Behandlungsschritten teilweise geschlossen wurden bzw. schmaler geworden sind. Bei dieser Probe führte die Behandlung offensichtlich zu einer minimalen Ausheilung vorhandener Schäden (Bilder 159,160)

Mit den durchgeführten Untersuchungen lässt sich kein allgemeiner Trend des Schädigungspotentials infolge der Behandlungsbedingungen feststellen. Deutlich wurde jedoch, dass in keinem Fall eine signifikante Verbreiterung der Gelschichtbereiche erfolgte, die immer mit einem Verlust an originaler Glassubstanz verbunden ist.

6.5 Untersuchungen zur Reversibilität von Beschichtungsmaterialien und Klebungen

Flächenimprägnierungen und Beschichtungen, teilweise auch als Flächenklebung ausgeführt, wurden insbesondere auf den Gläsern in Leslau und auf den untersuchten Feldern im Stadtmuseum in Thorn festgestellt (s. 5.2.1-5.4.2). Die Reversibilität der Beschichtungsmaterialien und Klebungen wurde im Labor an der Probe PG2 aus Leslau in mehreren Schritten untersucht.

- a. Eine kleine Materialprobe der Beschichtung wurde in eine mit Aceton gefüllte Schale gelegt. Bereits nach einer Stunde hatte sich das Beschichtungsmaterial vollständig aufgelöst.
- b. Beschichtungsmaterial auf der Probenoberfläche wurde mit einem mit Aceton getränkten Wattestäbchen behandelt. Schon nach wenigen Wischvorgängen sind Spuren der Materialauflösung auf der Oberfläche sichtbar.
- c. Die Ablösung von kompakten Klebungen erfolgte durch Tränkung der gesamten Probe in Aceton. Bereits nach 2 h Behandlungsdauer ließ sich das Beschichtungsmaterial von der Oberfläche abziehen. Nach einer weiteren Stunde zerfällt die Glasprobe in ihre Bruchstücke. Nach insgesamt 4 Stunden hatte sich das Beschichtungsmaterial vollständig aufgelöst.

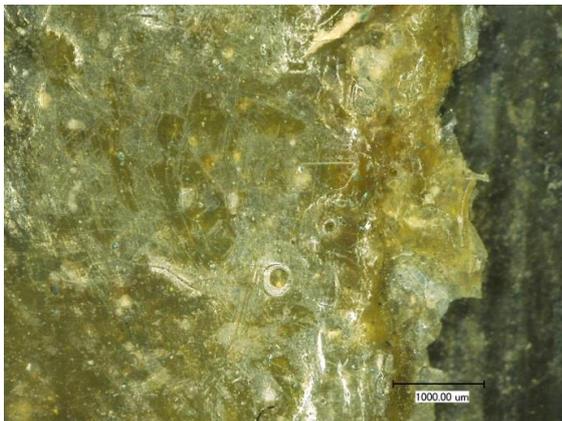


Bild 161: Probe PG2-Beschichtungsmaterial

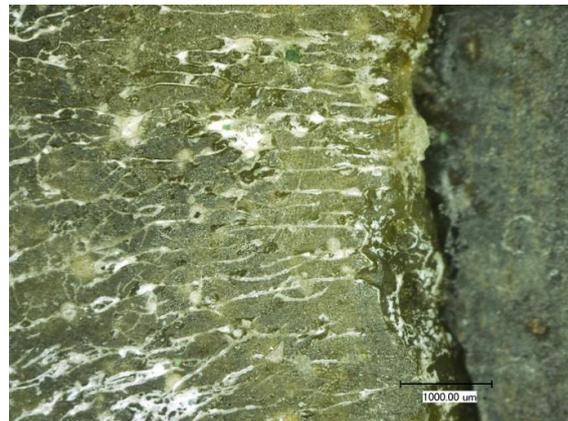


Bild 162: Probe PG2-Materialauflösung nach Wischen mit Aceton



Bild 163: Probe PG2 im Ausgangszustand



Bild 164: Probe PG2 nach 4h im Acetonbad

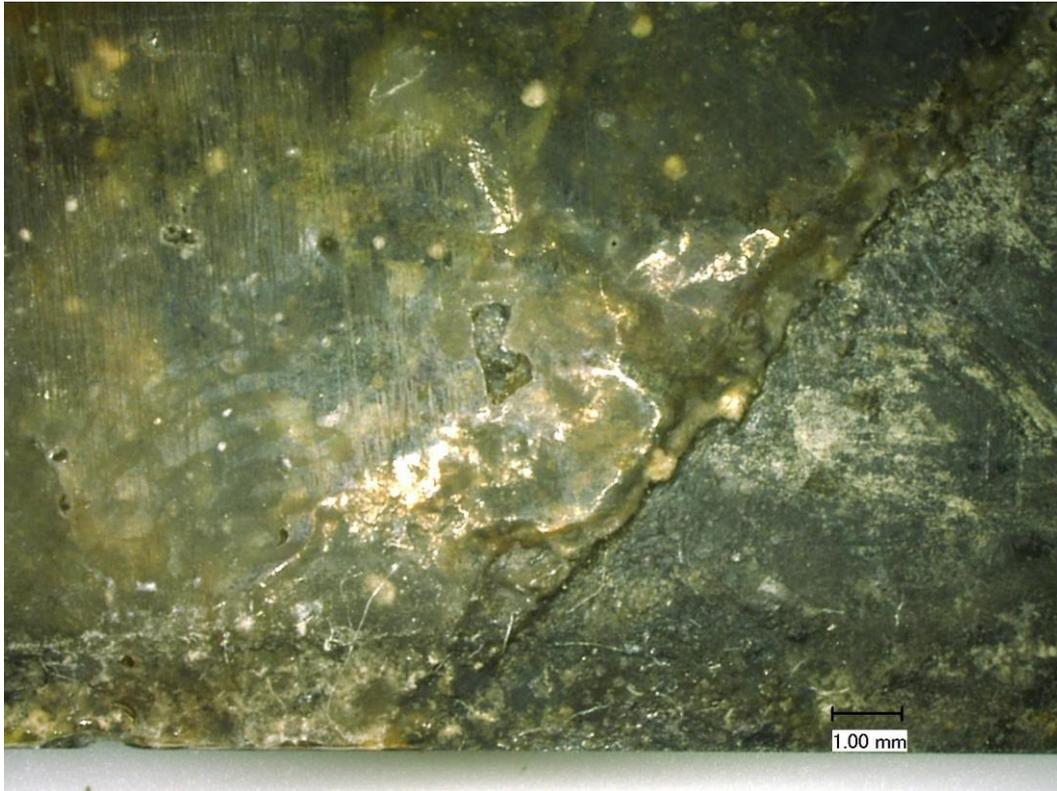


Bild 165: Probe PG2-Rückseite mit gealterter Beschichtung

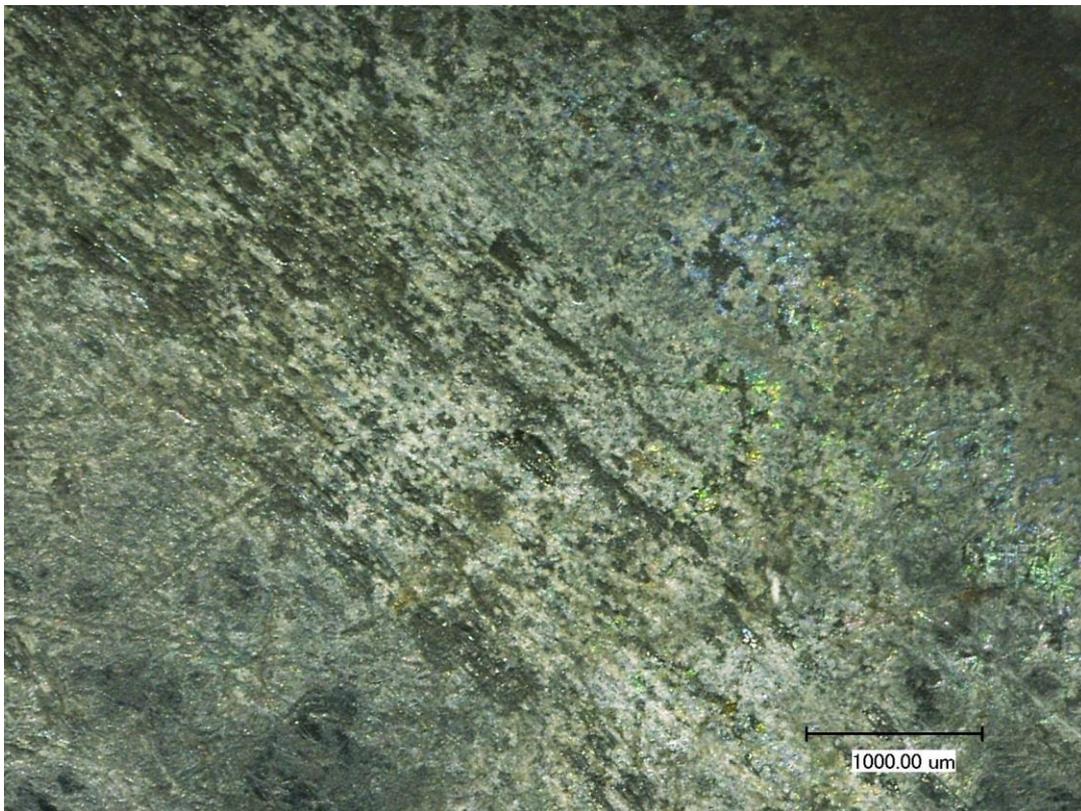


Bild 166: Probe PG2-Glasoberfläche nach Acetonbehandlung mit Resten von Beschichtungsmaterial

Die Untersuchungen zeigen, dass das Beschichtungsmaterial auch noch nach mehr als 60 Jahren Expositionsdauer reversibel ist. Eine Abnahme von Beschichtungen und das Lösen von Klebungen wären somit prinzipiell möglich.

7. Schlussfolgerungen für das Restaurierungskonzept

Beschichtungsmaterialien sind als Imprägnierung auf den Glasmalereien in Leslau und im Stadtmuseum noch vorhanden und als solche intakt. Sie stellen keine Gefährdung für das Glas dar, weder konnte eine erhöhte mikrobielle Aktivität nachgewiesen werden, noch sind Materialverluste infolge von Alterungs- und Versprödungsprozessen zu befürchten. Eine mechanische Abnahme der Beschichtung ist nicht möglich, da sie fest auf dem Glas haftet und daher zu Glasschäden führen würde. Eine Abnahme durch Anlösen mit chemischen Mitteln (z.B. Aceton) ist zwar möglich, jedoch nicht notwendig, da von der Imprägnierung keine Gefährdung für das Glas ausgeht.

Bei Glasbereichen, die deutlich sichtbare Beschichtungen aufweisen, handelt es sich häufig um Klebungen von Glasbrüchen. Diese Glasstücke wurden von Kwiatkowski zusammengefügt und gefestigt, ohne die Glassegmente auszubleien. Optisch können diese Bereiche als störend empfunden werden. Auf eine Entfernung der Klebungen und ein erneutes Zusammenfügen der einzelnen Segmente wurde dennoch verzichtet, weil dieser Eingriff in die Verbleiung, häufig nicht am Rand, sondern in der Mitte der Glasmalereifelder, nicht vertretbar war.

Im Ergebnis der Begutachtung aller Felder und der naturwissenschaftlichen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Imprägnierung nach der Methode von Kwiatkowski keine Nachbehandlung erforderlich macht (Festigung, Ablösung o.ä.). Bei der Restaurierung ist deshalb neben der trockenen Reinigung von Staub und lockeren Korrosionsprodukten mit einem weichen Borstenpinsel nur die Klebung einiger noch nicht behandelter Bruchstellen erforderlich. Ferner sind Kaltretuschen bei einigen hell heraus leuchtenden Schwarzlotverlusten vorzunehmen. Die leider recht großflächigen Klebungen zahlreicher Sprünge aus den 50-er Jahren müssen belassen werden, da ansonsten weiterer Verlust an Schwarzlot und Originalglassubstanz unvermeidlich wäre. Alle getroffenen Festlegungen für Klebung und Retuschen wurden für jedes Feld bei der Betrachtung am Leuchtgestell auf Umriss- und Dokumentationsbögen festgehalten.

Auf den Glasproben von Thorn, wo Beschichtungen offensichtlich nicht mehr vorhanden waren und sich Korrosionsprodukte auf der Glasoberfläche befanden, erfolgte eine sorgfältige Abnahme der lockeren Oberflächenbeläge mit mechanischen Mitteln.

8. Außenschutzverglasungen

Einerseits hat die Methode von Kwiatkowski an allen drei Objekten keine dramatischen Schädigungen bewirkt – der Fortschritt der Materialkorrosion hat ein normales Ausmaß – andererseits reicht sie nicht als Schutzmaßnahme gegen künftige Klima- und Umweltbelastungen aus, so dass in beiden Objekten eine moderne Außenschutzverglasung nach den Richtlinien des CVMA eingebaut wurde. Durch den Einbau von Außenschutzverglasungen wurden die farbigen Glasmalereifenster in der Johanniskirche in Thorn und im Dom zu Leslau modellhaft und nachhaltig vor der Einwirkung von Umwelteinflüssen geschützt. Die Restaurierung der Glasmalereifenster, sowie der Entwurf und Einbau der Schutzverglasung erfolgten durch die Restaurierungswerkstatt Creo Beata Oleszczuk in Breslau in enger Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Gutachtern und den zuständigen Denkmalbehörden. Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen wurde durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Hilfe von naturwissenschaftlichen Untersuchungen wie Klimamessungen, Schadstoffmessungen und der Bewertung des Schädigungspotentials der Umgebungsbedingungen mit Hilfe von Glasdosimetern nachgewiesen.

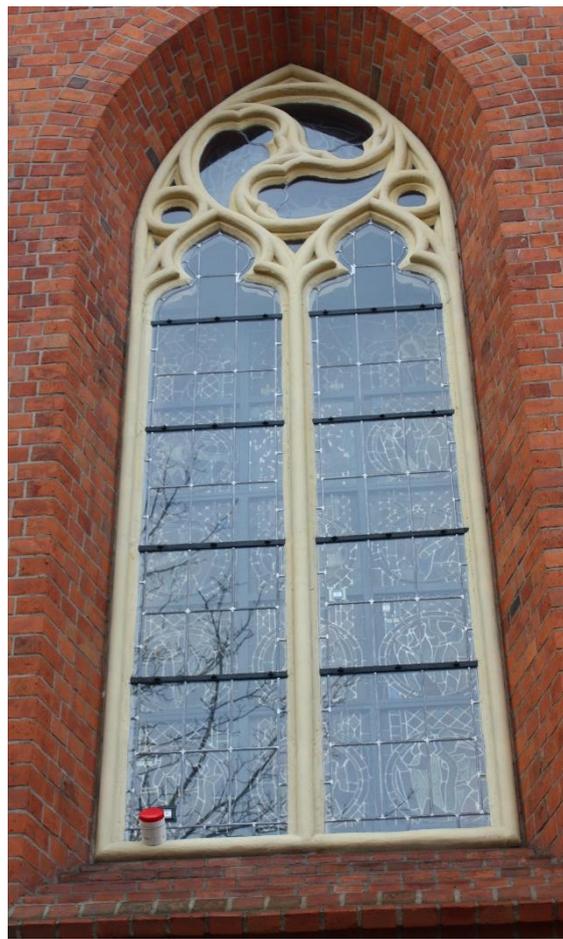
8.1 Restaurierung und Einbau der Außenschutzverglasung im Dom zu Leslau

Das zu restaurierende Fenster nIX wurde im September 2014 ausgebaut. Bei mehreren Werkstattterminen des Projektteams erfolgte die Festlegung der Restaurierungsmaßnahmen, ihre fachgerechte Ausführung wurde abgenommen und Musterfelder der Schutzverglasung begutachtet. Für die Schutzverglasung wurde eine Rechteckverglasung aus Verbundsicherheitsglas empfohlen. Alle getroffenen Festlegungen für Klebung und Retuschen wurden für jedes Feld bei der Betrachtung am Leuchtgestell auf Umriss-Dokumentationsbögen festgehalten und die durchgeführten Maßnahmen begutachtet. Die Felder erhielten Kupferprofilrahmen und wurden aufgrund baulicher Gegebenheiten in einem größeren Abstand von der Schutzverglasung nach innen versetzt. Die bauliche Situation im Dom zu Leslau ließ die dabei üblichen Abstände zwischen Original und Außenschutzverglasung leider nicht zu. Während die Spaltöffnungen unten und oben jeweils nur etwa 1 bis 1,5 cm betragen, liegen die Abstände zwischen der Außenschutzverglasung und dem Original im oberen Bereich mit 35 cm und zwischen Außenmauer und Original im Bereich der unteren drei Zeilen mit 25 cm erheblich über den im allgemeinen bewährten Abmaßen. Eine weitere Besonderheit sind Leuchtstoffröhren im Zwischenraum von Original und Außenschutzverglasung im Bereich der unteren drei Zeilen jeweils unten, seitlich und am mittleren Pfosten, die erst das Betrachten dieser Felder im Durchlicht ermöglichen (Bild 169) und bei Bedarf eingeschaltet werden können.

Das Restaurierungskonzept wurde mit polnischen Experten (Dr. Karaszkiwicz, Krakau und Frau Gajewska-Prorok, Kuratorin und fachliche Spezialistin für Glasmalerei am Nationalmuseum Breslau) während eines Werkstatttermins diskutiert und abgestimmt. Als Außenschutzverglasung wurde ein Verbundsicherheitsglas (VSG, 6.2 mm) in Rechteckverbleiung eingesetzt. Die Abnahme der Schutzverglasung erfolgte am 20.11.2014. Der Einbau und die Abnahme der restaurierten Glasmalereien in Leslau erfolgten in der 3. KW 2015. Zeitgleich wurden die für die Evaluierung der Außenschutzverglasung notwendige Klimamess-technik installiert sowie Glasdosimeter und Passivsammler exponiert. Die klimatischen Verhältnisse und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft im Spalt sind für diesen speziellen Fall von besonderem Interesse. Den Klimamessungen, die anschließend ein Jahr lang durchgeführt wurden, kam deshalb eine besondere Bedeutung zu (siehe Kap. 9 und 10).

Der fachgerechte Wiedereinbau der Glasmalerei erfolgte ohne Beanstandungen. An den Rändern der Originalverglasung sind jeweils Bleilappen angebracht, um seitlichen Lichteinfall zu verhindern. Durch die lokale Denkmalbehörde wurde ein offizielles Abnahmeprotokoll in polnischer Sprache aufgesetzt und von den für die Restaurierungsmaßnahmen Verantwortlichen unterzeichnet. Die lokalen Medien (TV und Presse)

haben über die Restaurierungsmaßnahme berichtet. Eine ausführliche Dokumentation zur Restaurierung liegt den zuständigen Behörden sowie der Deutsch-Polnischen Stiftung Denkmalpflege vor (Oleszczuk 2015).



Bilder 167, 168: Einbau von Originalverglasung und Messtechnik; links: noch nicht eingesetzte Felder im Bereich der Außenmauer mit Beleuchtung; rechts: Außenansicht der Schutzverglasung



Bild 169: Blick in den Spalt zwischen Original und Außenmauer mit Leuchtstoffröhren

8.2 Restaurierung und Einbau der Außenschutzverglasung in der Johanniskirche in Thorn

Nach organisatorischen und fachlichen Vorgesprächen zu Form und Art der Schutzverglasung erfolgte die Abnahme der Außenschutzverglasung für das Chorthauptfenster I in der Werkstatt in Breslau an Hand der angefertigten Probefelder 1a, 1b, 1c, 1d, 11b und 12a. Der Abstand zur Originalverglasung sollte nach dem Einbau mindestens 7 cm betragen. Neue Windeisen wurden in Anbetracht der guten Stabilität der Felder nicht benötigt. Der Einbau der Außenschutzverglasung erfolgte Anfang September 2015 gleichzeitig mit dem Ausbau der Originalverglasung. Die Festlegung des Restaurierungsprogramms erfolgte vor Ort nach detaillierter Begutachtung aller Glasmalereifelder auf dem Leuchttisch und wurde auf den Umrisszeichnungen der Felder dokumentiert. Als Schlussfolgerung aus den naturwissenschaftlichen Untersuchungen ergab sich für das Restaurierungskonzept, dass festaufliegende Beschichtungsmaterialien auf den Glasmalereien nicht entfernt wurden, die lockeren Auflagerungen und Verwitterungsprodukte auf der Oberfläche der mittelalterlichen Glasmalereien der Johanniskirche Thorn jedoch abgenommen werden sollten.



Bild 170, 171: Fenster I Johanniskirche Thorn vor (links) und nach Einbau der Außenschutzverglasung (rechts)

Die Außenschutzverglasung besteht aus 6,2 mm Verbundsicherheitsglas. Die Hauptlinien des Bleigerüsts der Originalfelder wurden von der Schutzverglasung übernommen (Bilder 170, 171). Die allgemeinen, an allen Feldern des Fensters durchzuführenden Arbeiten (Reinigung, Sprungklebungen, Einfassen in Kupferprofilrahmen, Korrosionsschutzbehandlung der Armierungen, Anlöten versilberter Kupferdrähte für das Feströdeln der Armierungen) wurden grundsätzlich zufriedenstellend ausgeführt.

Adam Kaczmierzczak (Student der Universität Thorn) erhielt die Möglichkeit, im Rahmen einer Weiterbildungsmaßnahme in der Werkstatt Oleszczuk eine Dokumentation des Fensters I anzufertigen. Auf Grundlage einer detaillierten Betrachtung der Einzelfelder aus der Nähe wurden die Bestandteile an

mittelalterlichen Originalen und Ergänzungen aus den 50er Jahren erfasst. Die wissenschaftliche Dokumentation aller Felder des Fensters einschließlich ihrer fotografischen Abbildungen ist umfassend und in guter Qualität erstellt worden. Kleine Korrekturen zur Darstellung sollten noch nachgetragen werden. Am 11.02.2016 erfolgte die Abnahme des Einbaus und Übergabe des restaurierten Fensters ohne Beanstandungen. Vertreter der örtlichen Denkmalpflege konnten sich vor dem noch eingerüsteten Fenster eingehend informieren. Zahlreiche Vertreter örtlicher Medien (Funk, Fernsehen, Presse) haben diese Gelegenheit ebenfalls genutzt und ausführlich über das Projekt berichtet (Pressemittelungen bzw. Links liegen vor).

Eine Informationstafel mit den Angaben zu den im Projekt tätigen Institutionen und Förderern wurde in der Kirche angebracht. Sowohl die Dokumentation zur Restaurierung als auch die des Studenten liegen der Deutsch-Polnischen Stiftung vor (Oleszczuk 2016).



Bild 172: Dr. Peter Schabe (DPS) informiert die polnischen Pressevertreter über die Restaurierungsmaßnahmen

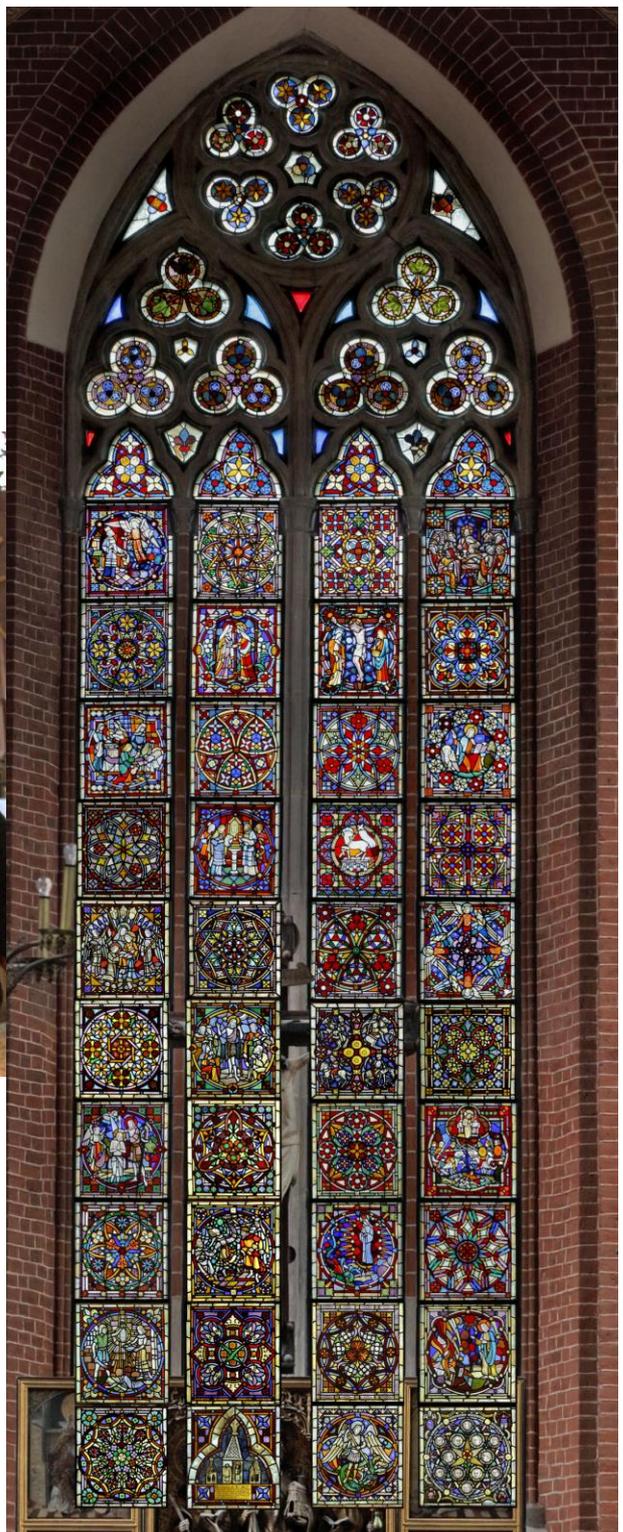


Bild 173: Fenster I Johanniskirche Thorn nach der Restaurierung

9. Klima- und Schadstoffmessungen

9.1 Messkonzept und -zeitraum

Die Erfassung der Klimadaten wie Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit erfolgte nach dem Einbau der Außenschutzverglasung an Fenster nIX in Leslau und Fenster I in der Johanneskirche in Thorn. Die Fenster an denen die Messtechnik installiert wurde, unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Lage (Nord- und Ostfenster) als auch in ihrer Größe. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 12 Monaten durchgeführt und erfolgten in Abhängigkeit vom Stand der Sanierungsarbeiten in Leslau im Zeitraum von Februar 2015 – Januar 2016 und in Thorn von Februar 2016 – Januar 2017. Die Messstellen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit befanden sich in der Regel an 4 Positionen - auf der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1), auf der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2), auf der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 3) und auf der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4-vgl. Bild 174). Im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung wurden zusätzlich die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gemessen. Je nach Erfordernissen und Zugänglichkeit an den Objekten wurde das Messprogramm durch weitere Temperaturmessungen bzw. Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit an unterschiedlichen Positionen und in unterschiedlichen Höhen erweitert. Zusätzlich zu den Klimamessungen an den Fenstern erfolgte die Bestimmung der Luftschadstoffe NO_x und SO_2 mit Hilfe von Kurzzeitmessungen mit Passivsammlern im Außenbereich, im Spalt zwischen Außenschutzverglasung und Original und im Inneren der Kirche. Sowohl in Leslau als auch in Thorn wurden das Schädigungspotential der komplexen Umwelteinwirkungen und die Schutzwirkung der Außenschutzverglasung auch mit Hilfe von Glasdosimetern bewertet, die 12 Monate an unterschiedlichen Positionen (Pos. 1, Pos. 2, Pos. 3, Pos. 4) der Fenster exponiert waren und vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg - Außenstelle Bronnbach ausgewertet wurden.

9.2 Messgeräte und Messfühler

Für die Registrierung und Speicherung der Klimadaten wurde ein ALMEMO[®]-Messsystem verwendet. Die eingesetzten Messfühler besitzen einen speziell entwickelten intelligenten ALMEMO[®]-Stecker mit programmierbarem Datenträger (EEPROM), in dem die Parameter der angeschlossenen Fühler und Geräte gespeichert werden. Dadurch werden alle angesteckten Einheiten automatisch erkannt und die Funktionen entsprechend angepasst. Alle Fühler sind vom Hersteller programmiert und kalibriert. Beim Anstecken werden alle Parameter (wie z.B. Messbereich, Messwertkorrekturen, Skalierungen, Fühlerbezeichnung) automatisch an das Messgerät übertragen, so dass Fehlmessungen durch falsche Programmierung und Fühlerverwechslungen ausgeschlossen sind. Die Datenspeicherung erfolgt auf serienmäßigen Datenloggern mit 520 kB oder auf externen Smart-Media-Cards (MMC) mit 512 MB. Die Messdateien werden auf der MMC-Card als ASCII-Textdateien im Tabellenmode im Standard-FAT16-Format gespeichert. Die Datenübertragung von der MMC Speicherkarte erfolgt mittels eines angeschlossenen GSM-Mobilfunkmodems. Alternativ wurde in Leslau ein GPRS-Modem eingesetzt und die Daten auf einem WEB-server gespeichert. Damit war auch eine kontinuierliche Fern-Kontrolle

der Messwerterfassung und der Messtechnik möglich, so dass sich die Notwendigkeit von vor-Ort-Besuchen auf ein Minimum reduzierte.

Mit Hilfe der Software Wincontrol wurden die Messwerte automatisch ausgelesen und in Tabellenform oder als Grafik dargestellt. Ein integriertes Konvertierungsprogramm ermöglichte die Umwandlung der Messdateien in Excel-Dateien für weitere Auswertungen.

Das verwendete Messsystem besteht aus dem ALMEMO®-2590-4S Messgerät, NTC-Doppelsensoren zur Temperaturmessung, Thermoanemometer und Temperatur/Feuchtefühler. Der Temperaturfühler (NTC-Element) ist im Temperaturbereich von -20 bis 125 °C einsetzbar. Die Genauigkeitsangaben bei den normierten NTC-Sensoren beziehen sich auf Lieferantenangaben. Für ein NTC-Element (10 K Ω bei 25 °C betragen die maximalen Abweichungen +/-0,4°C im Bereich zwischen -20 bis 0°C und +/- 0,1°C im Bereich zwischen 0 bis 70 °C. NTC-Fühler sind schnell, genau und mit ihrem Messbereich für den vorliegenden Anwendungsfall ideal geeignet. Der NTC-Sensor lässt sich direkt auf dem Glas fixieren, so dass die Oberflächentemperatur unmittelbar gemessen werden kann.

Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit wird ein kapazitiver Sensor verwendet. Er besteht aus einem Glassubstrat, auf dem eine feuchteempfindliche Polymerschicht zwischen zwei Metallschichten aufgebracht ist. Durch Wasseraufnahme entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit ändern sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist direkt proportional zur relativen Feuchte und unabhängig vom Umgebungsdruck. Mit diesem Sensor ist eine Messung über längere Zeiträume auch bei Minustemperaturen möglich. Allerdings hat er nur eine begrenzte Langzeitstabilität und ist empfindlich gegenüber Betauung und bestimmten aggressiven Medien. Zum Einsatz kamen daher unterschiedliche ALMEMO®-Messmodule für Feuchte und Temperatur FHAD 460 (freiliegendes ungeschütztes Sensorelement), FHAD 462 (Sensorelement mit geschlitzter Fühlerkappe) und FHAD 36Rx (Präzisionsfühler mit geschlossener Schutzkappe), auch um Unterschiede festzustellen. Bei diesen Messsystemen werden 4 Klimagrößen angezeigt: Temperatur, relative Feuchte, Taupunkttemperatur und Mischungsverhältnis. Der Einsatzbereich (FHAD 462) liegt zwischen -20 und 60 °C im Feuchtebereich zwischen 5 bis 98 % r. F. Die Genauigkeit der Feuchtemessung beträgt 1,8 % r. F. im Bereich zwischen 20...80 % r. F. (bei Nenntemperatur). Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt +/- 1K im Bereich von -20...60 °C. Die Messmodule mit Schutzkappe sind gegen mechanische Beschädigung und gegen Schmutz und Staub geschützt und können somit auch im Außenbereich verbaut werden. Aufgrund dieser konstruktiven Maßnahme befindet sich die Temperatur-/Feuchtemessstelle jedoch nicht direkt auf der Glasoberfläche, sondern ca. 5 mm davon entfernt. Der digitale Feuchte-Temperatursensor FHAD620 ohne Schutzkappe wird direkt auf die Glasoberfläche im Innenbereich aufgebracht.

Die Luftgeschwindigkeit wurde mit Hilfe eines Thermoanemometers gemessen. Sehr geringe, richtungsunabhängige Luftströmungen sind mit diesem System messbar. Verwendet wurde ein Thermoanemometer FVA935TH4K1. Der Messbereich liegt zwischen 0...2 m/s im Temperaturbereich zwischen -20 bis 70 °C mit einer Auflösung von 0,001 m/s. Die Genauigkeit beträgt +/- (0,04 m/s + v 1% MW). Die Luftgeschwindigkeitssensoren enthalten keine beweglichen Teile und sind daher verschleißfrei. Sie sind weitgehend unempfindlich gegen Schmutz und Staub, sodass bei Normalbedingungen keine Wartung erforderlich ist.

9.3 Anordnung der Messtechnik

Die Anordnung der Temperatur- und Feuchtefühler erfolgte in allen Objekten auf der Innen- und Außenseite der Originale (Pos. 1, 2) und auf der Innen- und Außenseite der Schutzverglasung (Pos. 3, 4). Schadstoffmessungen mit Hilfe von Passivsammlern wurden im Innenraum, im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung und im Außenbereich durchgeführt. Die Exposition von Glasdosimetern erfolgte an den Positionen 1, 2, 3 und 4 jeweils in Leslau und Thorn (Bild 174).

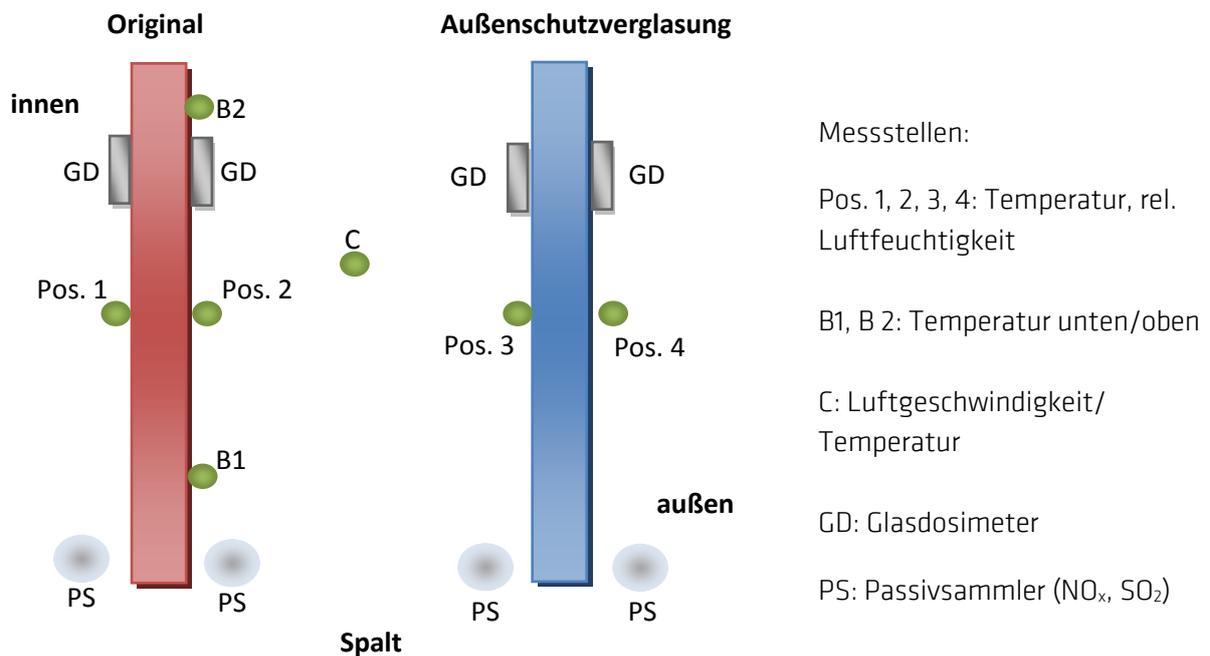
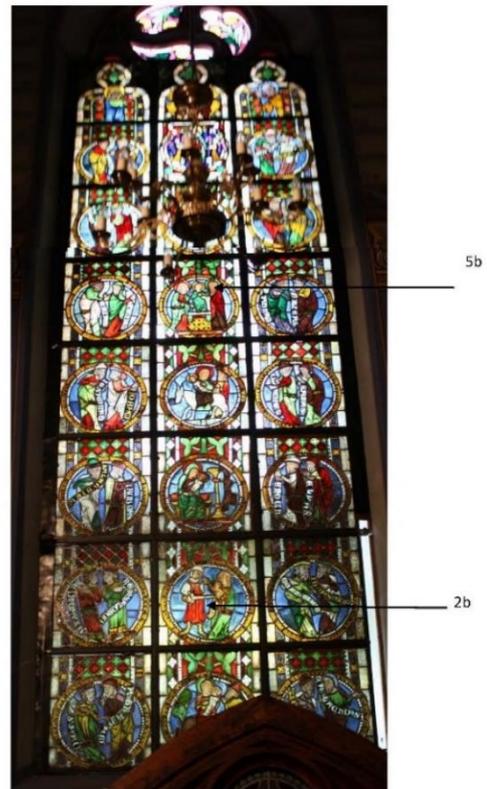
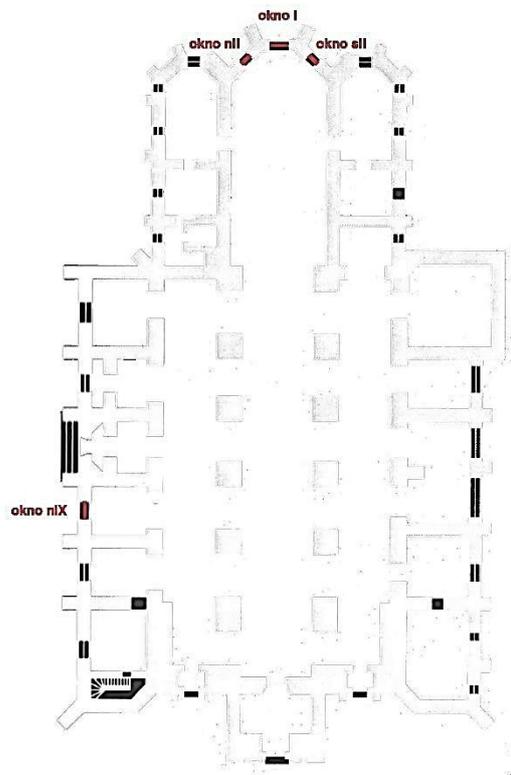


Bild 174: Schematische Übersicht zu den der Messstellen

Die Fixierung der Messfühler und Glasdosimeter an den Messstellen erfolgte mit Thesa „extra power“ Gewebeband. Die Passivsammler wurden für die Expositionsdauer von 4 Wochen mit Draht in Fensternähe befestigt. Das Thermoanemometer zur Messung der Luftgeschwindigkeit im Spalt wurde mittig zwischen Original- und Außenschutzverglasung so angeordnet, dass vertikale Luftbewegungen registriert werden. Zur Installation und Deinstallation der Messtechnik waren Gerüste an den jeweiligen Fenstern notwendig. Für den Ein- und Ausbau mussten einzelne Glasfelder von Mitarbeitern der Restaurierungswerkstatt herausgenommen und wiedereingesetzt werden.

9.3.1 Dom zu Leslau



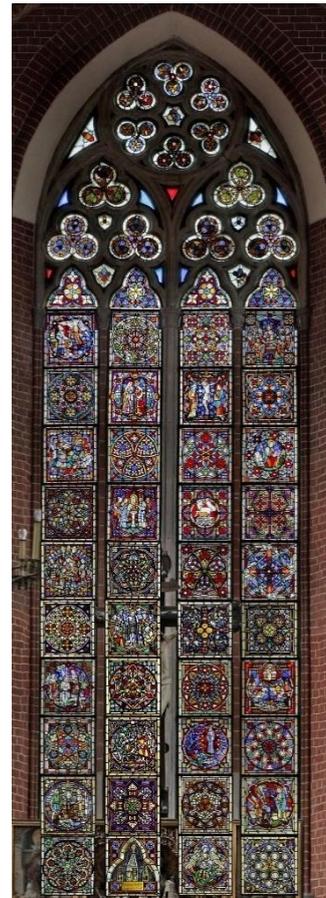
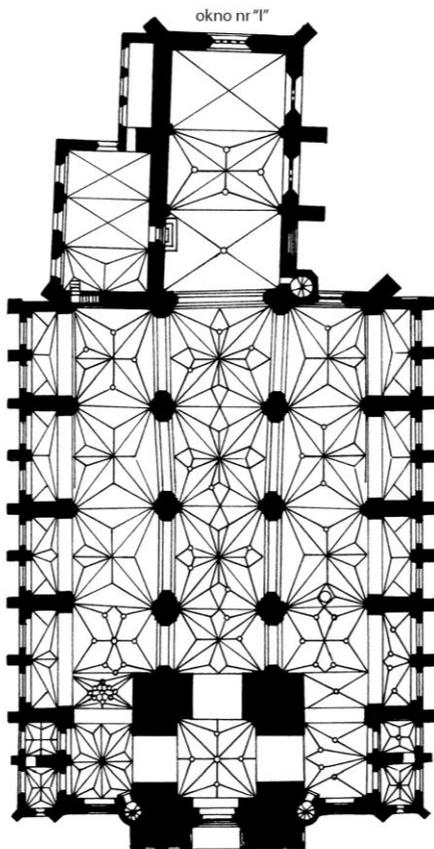
Bilder 175, 176: Grundriss Dom zu Leslau, rechts Fenster nIX

Tabelle 9: Anordnung der Messtechnik in Leslau am Fenster nIX

Messstelle	L1 Fenster nIX	L 2 Fenster nIX
x0	Feld 2b, Pos. 1 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	Feld 2/Feld 5b, Pos. 2 Temperatur B1/B2
x1	Feld 2b, Pos.2 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	im Spalt zwischen Feld 1b und 2b, Temperatur/Luftgeschwindigkeit
x2	Feld 3b, Pos. 3 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	im Spalt zwischen Feld 5b und 6b Temperatur/Luftgeschwindigkeit
x3	Feld 3b, Pos. 4 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	Feld 6, Pos. 3 Temperatur, rel. Luftfeuchte

GD...Glasdosimeter, **PS**...Passivsammler

9.3.2 Johanniskirche Thorn



Bilder 177, 178: Grundriss Johanniskirche Thorn, rechts Fenster I 1a 1b 1c 1d

Die Klimamessungen wurden am Fenster I bis zu dessen Ausbau und nach dem Einbau der Außenschutzverglasung über einen Zeitraum von 12 Monaten durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 10: Anordnung der Messtechnik in Thorn am Fenster I

Messstelle	T 1 Fenster I	T 2 Fenster I
x0	Feld 1b, Pos. 1 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	Feld 1b, Pos. 3 Temperatur, rel. Luftfeuchte; geschlitzte FK*
x1	Feld 1b, Pos. 2 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD	im Spalt zwischen Feld 1b/Feld 2b Temperatur/Luftgeschwindigkeit
x2	Feld 1b, Pos. 3 Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit GD	Feld 1b, Pos. 3 Temperatur, rel. Luftfeuchte, ohne SK**
x3	Feld 1a, Pos. 4 Temperatur, rel. Luftfeuchte GD, PS	Feld 1a, Pos. 4 Temperatur, rel. Luftfeuchte, geschlossene SK

*FK...Fühlerkappe, **SK...Schutzkappe

9.4 Messergebnisse

9.4.1 Dom zu Leslau, Fenster nIX

Die Klimamessungen im Dom zu Leslau erfolgten am Fenster nIX im Zeitraum vom 25.02.2015-10.02.2016. Das dreibahnige Fenster hat eine Höhe von 5,16 m und eine Breite von 1,71 m mit 7 Zeilen und einem Maßwerkfeld als Abschluss. Der Abstand zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt aufgrund von baulichen Gegebenheiten im oberen Bereich ca. 35 cm und im Bereich der drei unteren Zeilen zwischen Außenmauer und Original ca. 25 cm. Die Lufteintrittsöffnungen oben und unten betragen jeweils ca. 1 bis 1,5 cm. Der seitliche Anschluss an das Gewände wurde mit Bleilappen abgedichtet. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas.

Die Klimadaten wurden per GPRS-Modem über eine Internetverbindung übertragen. Diese Verbindung funktionierte über den Zeitraum der Evaluierung relativ stabil, Verbindungsprobleme (wie z.B. nicht Erreichbarkeit des Modems) traten jedoch auch zeitweise auf. Eine kontinuierliche Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Messgeräte bzw. Datenübertragung war grundsätzlich möglich. Ausfälle von Messgeräten aufgrund von Stromausfällen bzw. der Korrosion von Messfühlern konnten so zeitnah erkannt und vor Ort behoben werden. Die Kosten für die Nutzung des GPRS Modems für den Messzeitraum von 12 Monaten überstiegen jedoch deutlich die Kosten für die Datenübertragung mittels GSM-Modem im gleichen Zeitraum. Trotz kontinuierlicher Überwachung sind Messwertverluste in den Monaten April, Juli und Januar zu verzeichnen. Ein Ausfall des Temperatur-Feuchtefühlers an Pos. 4 wurde im Oktober festgestellt und zeitnah behoben. Die Auswertung der vorhandenen Messwerte erfolgte in Tabellen- und Diagrammform. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte und ist in den nachfolgenden Grafiken dargestellt.

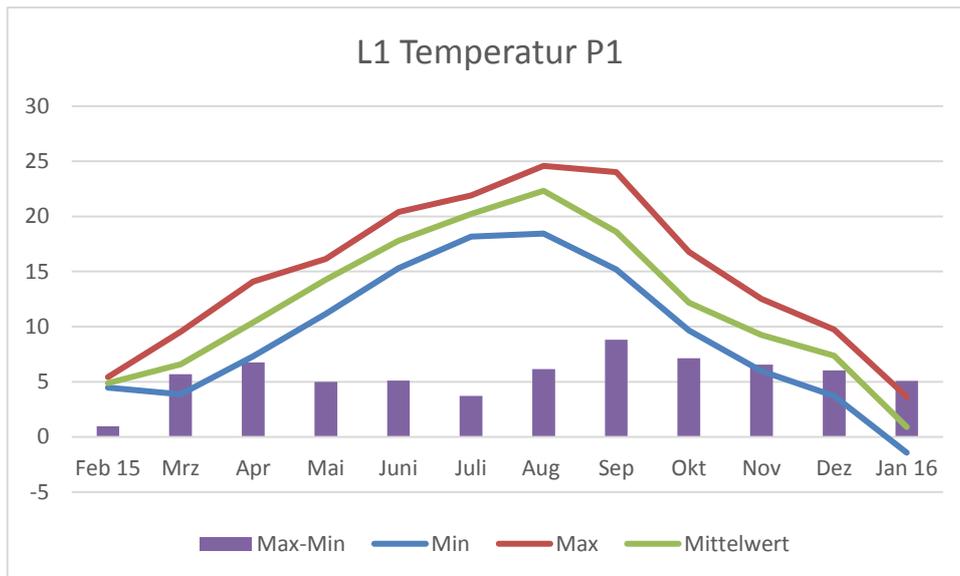


Bild 179: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld 2b betrug im August 24,6 °C, die minimale Temperatur lag im Februar an derselben Messstelle bei -1,4 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat September 8,8 K.

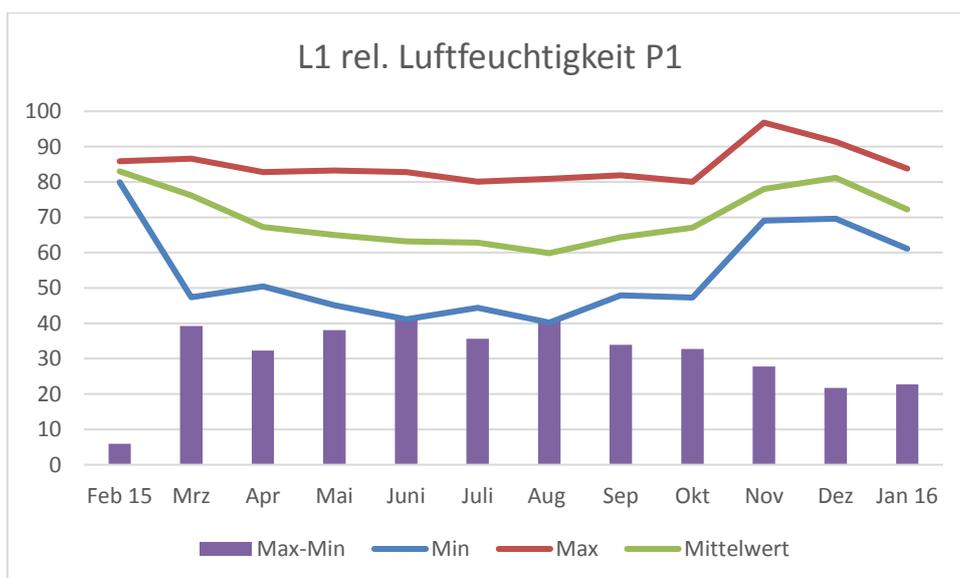


Bild 180: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an Pos. 1 schwanken in den Monaten Februar bis Oktober um 80 %. Allerdings lag die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld 2b im November bei 96,8 %. Die minimale Feuchtigkeit lag im August bei 40,2 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juni mit Δ r. F. = 41,6 % festgestellt.

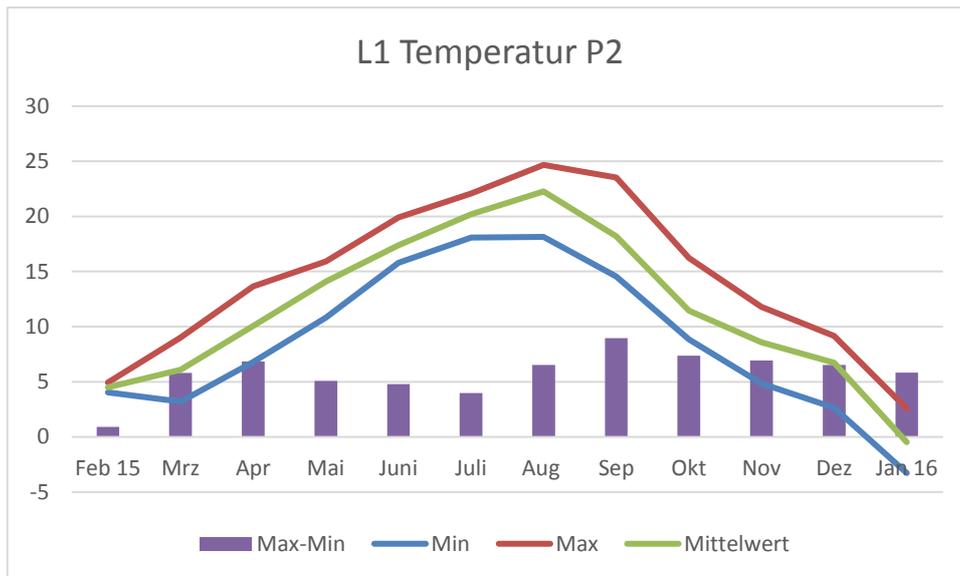


Bild 181: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld 2b betrug im August 24,7°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -3,3 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat September bei 8,9 K.

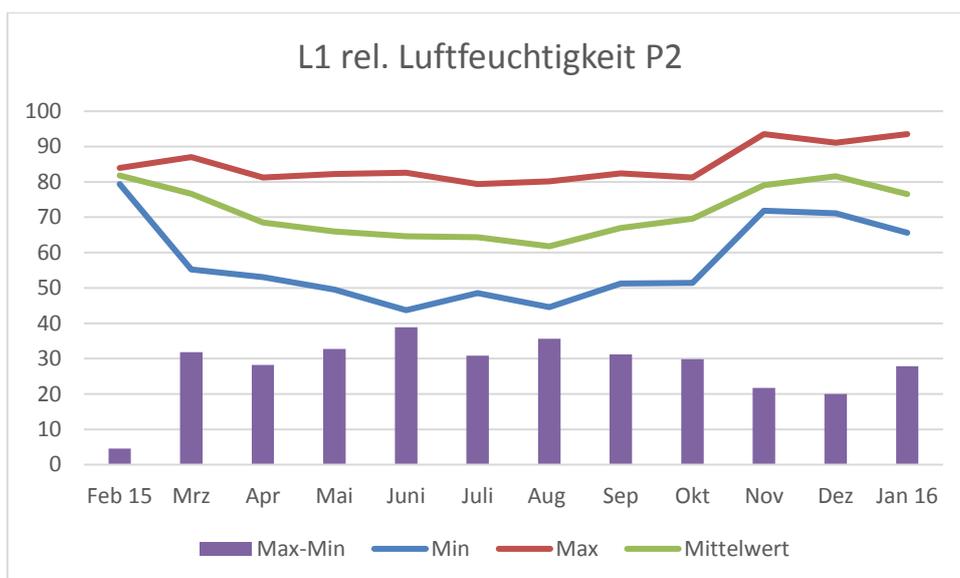


Bild 182: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen an Pos. 2 in den Monaten April bis Oktober stets um 80 %. Im November bis Januar wurden 90 % r. F. überschritten. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld 2b betrug im November 93,5 %. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im Juni bei 43,7 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im Juni mit Δ r. F. = 38,9 % festgestellt.

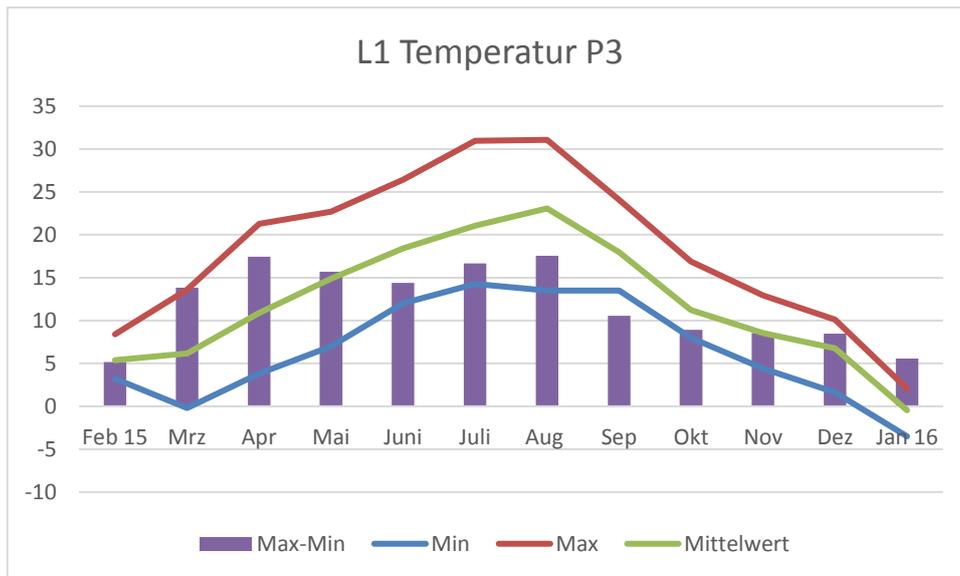


Bild 183: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximal gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld 3b betrug im August 31,1 °C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei - 3,5 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat August bei 17,6 K.

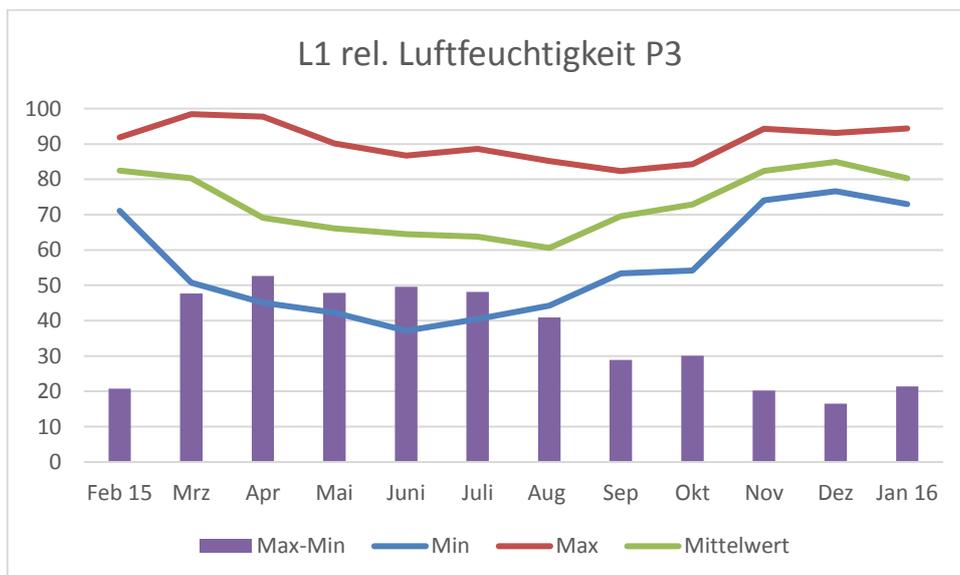


Bild 184: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit überschreiten in den Monaten Februar bis Mai und November bis Januar 90 % r. F. Der Maximalwert an Pos. 3 beträgt im März 98,4 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 37,2 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im April mit Δ r. F. = 52,7 % berechnet.

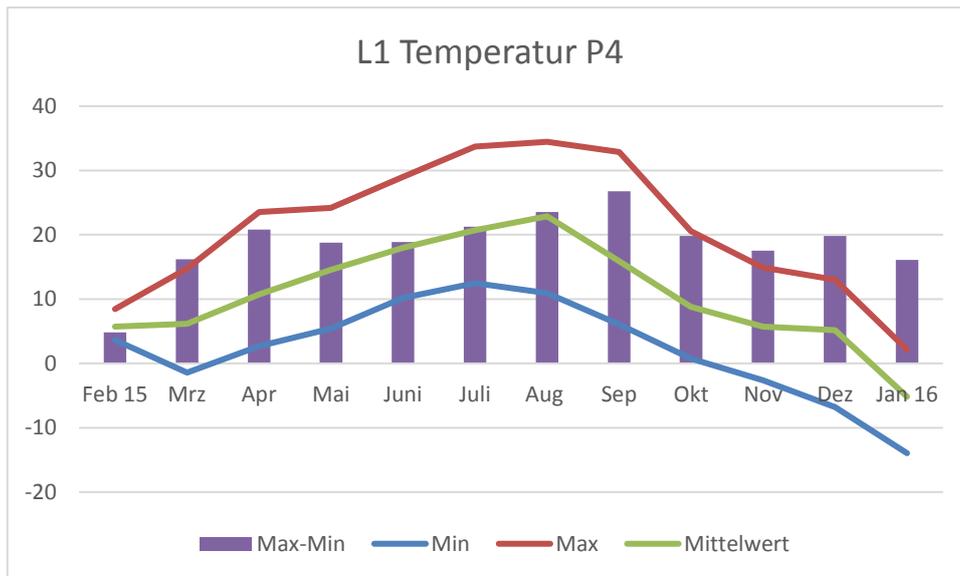


Bild 185: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Feld 3b betrug im August 34,5 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei - 14 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat September bei 26,8 K.

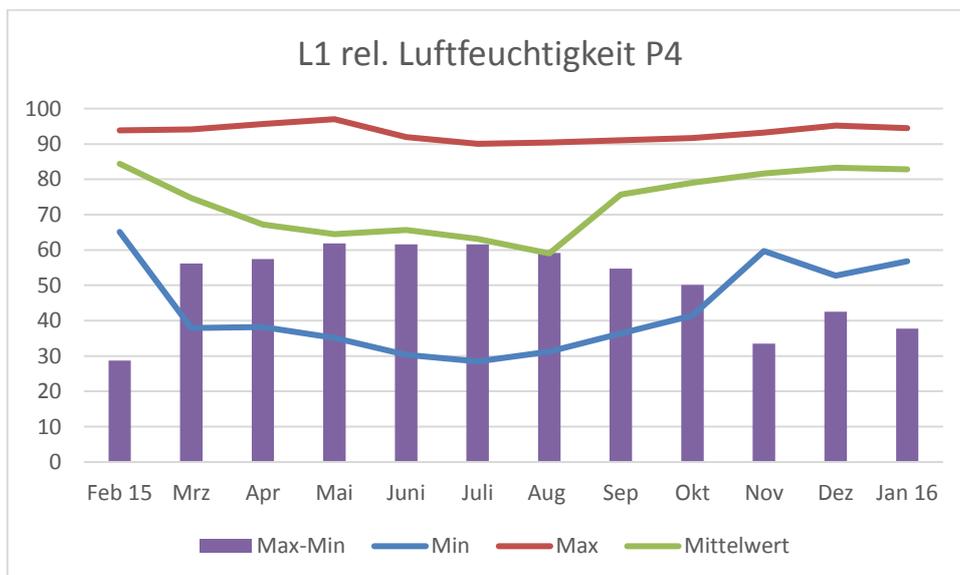


Bild 186: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die relative Feuchtigkeit liegt in allen Monaten des Messzeitraumes deutlich über 90 %. Maximalwerte werden im Mai und Dezember mit 97 % r. F. bzw. 95,2 % r. F. gemessen. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 28,5 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Mai mit Δ r. F. = 61,9 % festgestellt.

Die Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Außenwand und Originalverglasung (unten zwischen Feld1b/2b) bzw. Außenschutzverglasung und Original (oben zwischen Feld 5b/6b) wurde an unterschiedlichen Positionen des Fensters gemessen. Obwohl der Abstand zwischen Original und Außenschutzverglasung aufgrund der baulichen Gegebenheiten ungewöhnlich breit war (35 bzw. 25 cm), konnte eine Luftbewegung über den gesamten Messzeitraum registriert werden

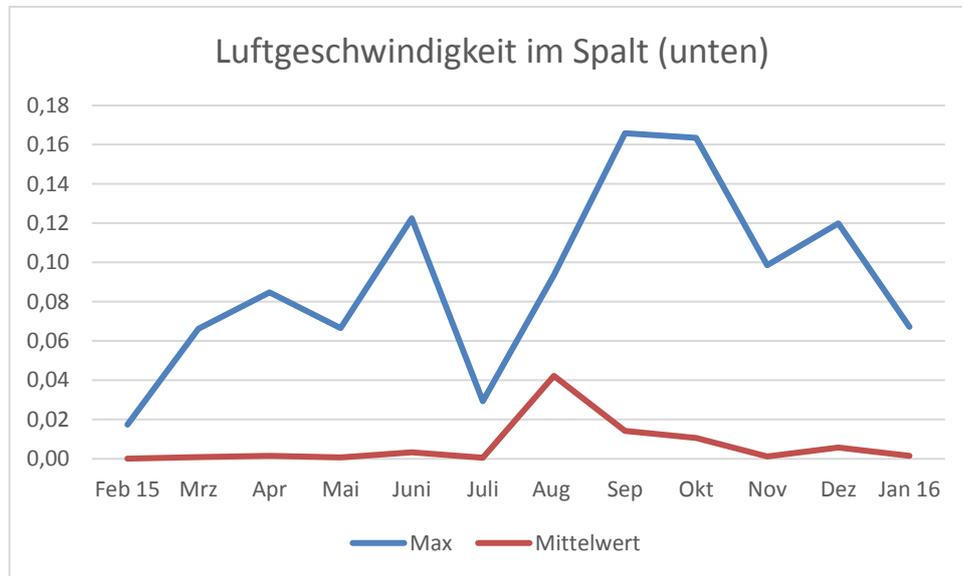


Bild 187: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster nIX, 1b/2b

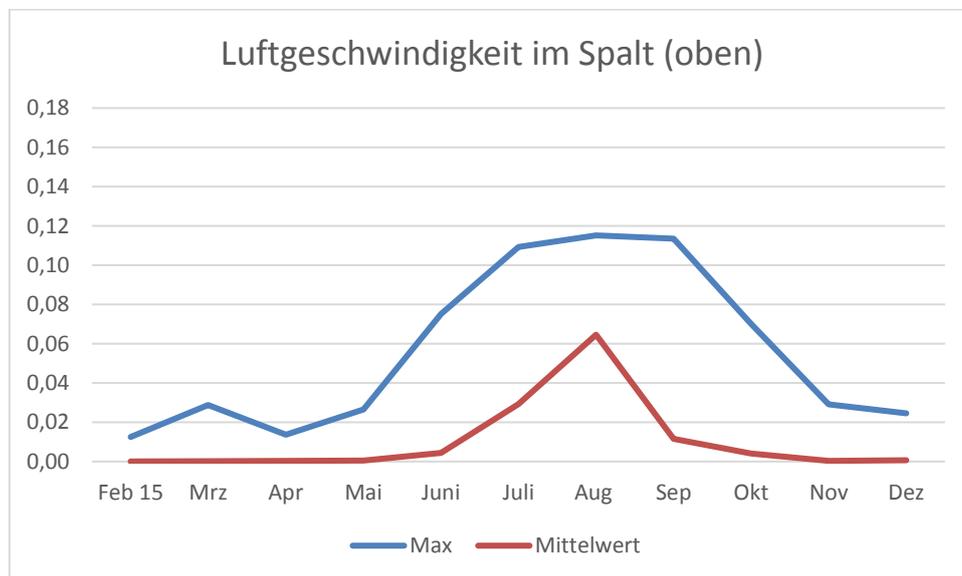


Bild 188: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster nIX, 5b/6b

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im unteren Bereich liegt mit 0,17 m/s etwas höher als im oberen Bereich mit 0,12 m/s. Möglicherweise beeinflussen die in diesem Bereich angebrachten

Leuchtstoffröhren auch die Luftzirkulation stärker, wenn sie eingeschaltet sind, als oben. Die Luftströmung kommt in allen Monaten zeitweise völlig zum Erliegen. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen. Im Vergleich zu Messungen an Fenstern mit üblichen Spaltbreiten zwischen 7-8 cm ist die Strömungsgeschwindigkeit der Luft in Leslau deutlich geringer (Torge 2015). Aus den Monatsdiagrammen (s. Anhang) ist aber zu erkennen, dass eine kontinuierliche Luftströmung im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung vorherrscht, um einen Feuchte- und Temperatureausgleich zu ermöglichen.

Die folgenden Darstellungen zeigen detailliert die Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen und Bereichen der relativen Luftfeuchte an Pos. 2, der Außenseite der Originalverglasung. Sie können herangezogen werden, um aktiv die Verbesserung der Umgebungsbedingungen für die Glasmalereien zu beeinflussen, z.B. durch eine Beheizung der Kirche in den Monaten November bis März, um die Temperatur etwas anzuheben und gleichzeitig die relative Luftfeuchtigkeit auf Werte um 80 % r. F. zu senken. Die Extremwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf der Innenseite der Glasmalereien an Pos. 1 unterscheiden sich im Messzeitraum kaum von den Werten von Pos. 2, weshalb auf ihre detaillierte Darstellung verzichtet wurde.

Aus den Häufigkeitsverteilungen der Monatsdarstellung lässt sich die Gesamtdauer von Temperatur- und Feuchtebereichen berechnen, die auf die Glasmalereien einwirken. Diese Grafiken sind in den Bildern 191-193 dargestellt.

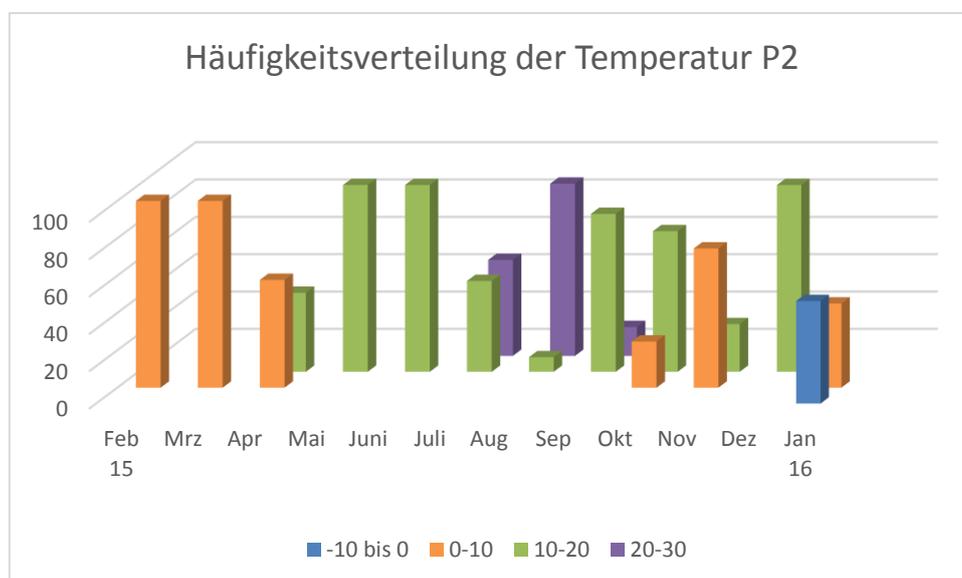


Bild 189: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Außenseite der Originalverglasung im Messzeitraum Februar 2015 bis Januar 2016

Die Maximalwerte der Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung von Feld 2b liegen im Bereich zwischen 20 und 30 °C zu 92,2 % der Messzeit im August. In den Monaten Mai bis Juli sowie September, Oktober und Dezember liegen die häufigsten Temperaturbereiche zwischen 10 und 20 °C. Der Temperaturabfall in November zwischen 0-10 °C lässt die Luftfeuchtigkeit am Fenster kurzfristig über 90 % r. F. ansteigen. Tauwasserbildung wurde jedoch nicht beobachtet.

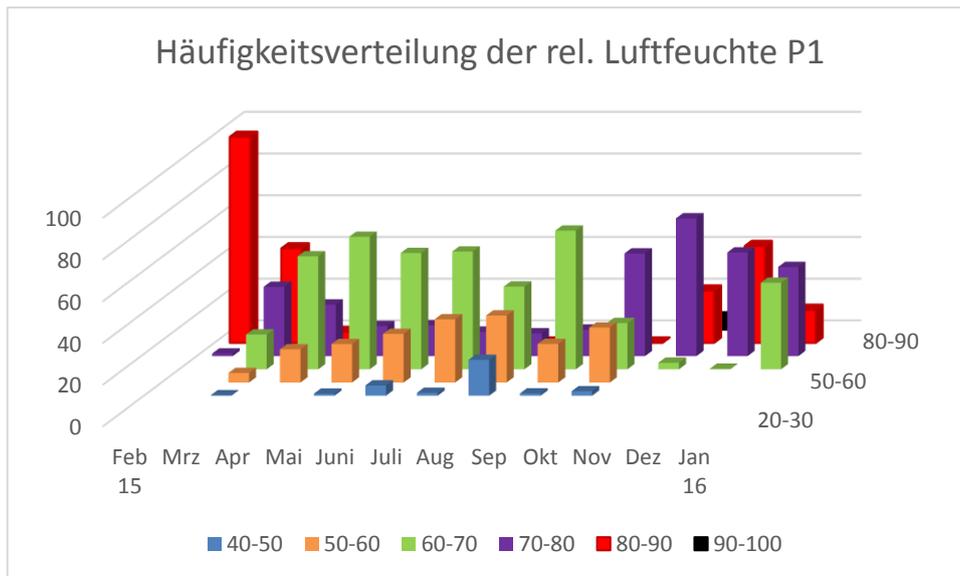


Bild 190: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) im Messzeitraum Februar 2015 bis Januar 2016

Werte der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90 % an der Innenseite der Originalverglasung wurden in den Monaten November bis März gemessen – am Häufigsten im Monat Februar mit knapp 99 % der Messzeit. Ansonsten liegen die häufigsten Feuchtwerte zwischen 70 und 80 % r. F bzw. darunter und sind für den Erhaltungszustand der Glasmalereien unbedenklich.

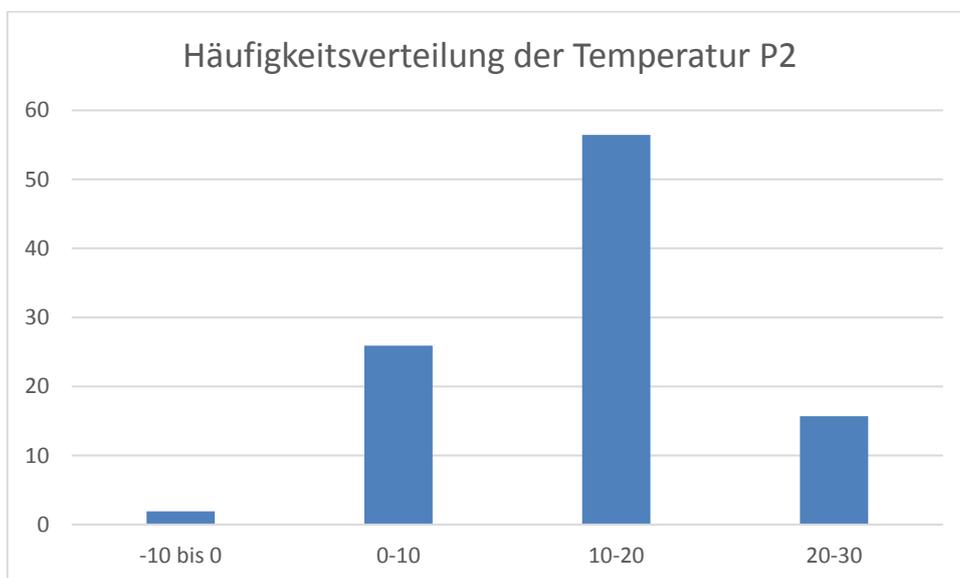


Bild 191: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Außenseite der Originalverglasung liegen im Bereich zwischen 10-20°C. In den Wintermonaten wurden Werte zwischen 0 bis -10°C erreicht. Die höchsten Temperaturen lagen im Bereich zwischen 20 und 30 °C und wurden etwa zu 15% der gesamten Messzeit registriert.

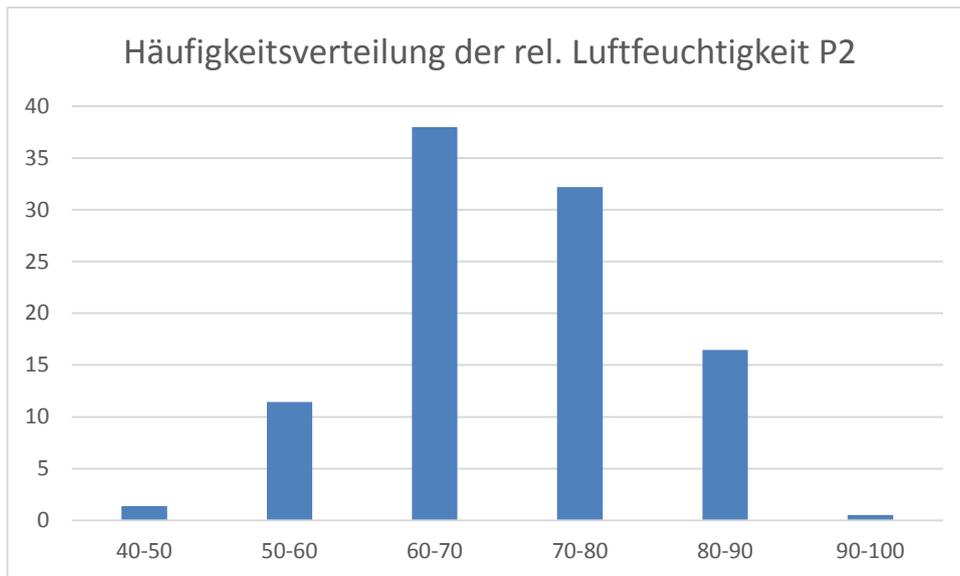


Bild 192: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der rel. Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

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

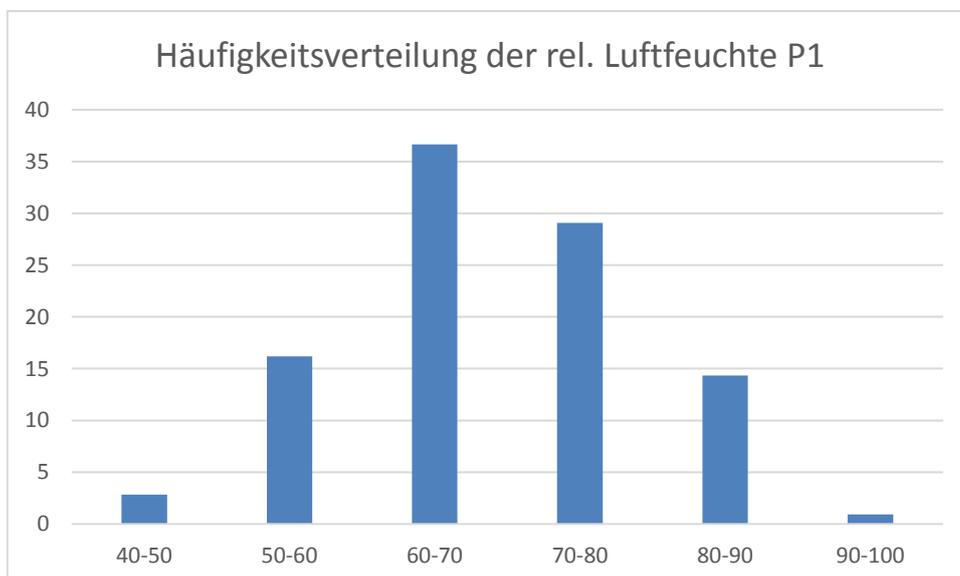


Bild 193: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 1) in % der gesamten Messdauer

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit und ihre Häufigkeit an der Außenseite der Originalverglasung sind nur geringfügig höher als an der Innenseite. Eine relative Luftfeuchtigkeit über 90 % wurde auch dort zu knapp einem Prozent der Messdauer gemessen, da der Maximalwert bei 93,5 % r. F. lag ist eine Tauwasserbildung auf der Originalverglasung auszuschließen.

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung entspricht in etwa dem Verlauf der Werte auf der Außenseite der Originalverglasung. Die häufigsten Werte liegen zwischen 60 – 80 % r. F. Werte zwischen 80 und 90 % r. F. wurden zu knapp 15 % der gesamten Messdauer registriert. Mit 93,5 % auf der Innenseite und 96,8 % r. F. auf der Außenseite der Glasmalereien als Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit, zwar nur über einen geringen Zeitraum, sind durchaus Schäden an mittelalterlichen Gläsern nicht auszuschließen. Diese hohen Werte der relativen Luftfeuchtigkeit sind nicht der Außenschutzverglasung geschuldet, sondern haben bauphysikalische Ursachen im Gebäude als Ganzem im Zusammenhang mit klimatischen Änderungen in der Übergangszeit vom Sommer zum Winter. Der Innenraum der Kirche ist dann noch recht warm und die Luft kann viel Feuchtigkeit aufnehmen. Wenn es im Außenbereich stark abkühlt macht sich diese Temperaturänderung zunächst in Fensternähe bemerkbar und geht mit einem deutlichen Anstieg der Luftfeuchtigkeit einher. Diese Beobachtung wurde auch bei einem vor Ortbesuch am 10.11.2016 gemacht, als sogar Tauwasserbildung auf dem Steinfußboden sichtbar war. Um Tauwasserbildung auf den Glasmalereien in solch einem Fall zu verhindern, wäre es möglich die Beleuchtung hinter den Glasmalereien einzuschalten und somit die Luft in unmittelbarer Fensternähe wieder etwas zu erwärmen.

Tabelle 11: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 02/15-01/16 am Fenster nIX

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
02/15	5,4	5,4	80	85,8	4,1	5	79,4	84	3,2	8,4	71,1	91,8	3,6	8,5	65,1	93,8	0,02
03	3,9	9,6	47,4	86,6	3,2	9,0	55,3	87,1	-02	13,2	50,8	98,4	-1,4	14,7	37,9	94,1	0,07
04	7,32	14,1	50,5	82,8	6,8	13,6	53,0	81,2	3,8	21,3	45,0	97,7	2,7	23,5	38,2	95,6	0,08
05	11,2	16,2	45,2	83,3	10,8	15,9	49,6	82,3	7,0	22,7	42,3	90,1	5,4	21,2	35,1	97,0	0,07
06	15,3	20,4	41,1	82,8	15,1	19,9	43,7	82,6	12	26,4	37,2	86,7	12,5	33,4	30,3	91,9	0,12
07	18,2	21,9	44,4	80,1	18,1	22,1	48,5	79,4	14,3	30,9	40,8	88,6	10,2	29	28,5	90,0	0,03
08	18,5	24,6	40,2	80,9	18,1	24,7	44,6	80,2	13,5	31,1	44,2	85,2	10,9	34,5	31,2	90,4	0,09
09	15,2	24,1	48	81,9	14,6	23,5	51,3	82,4	13,5	24,1	53,4	82,3	6,1	32,9	36,4	91,1	0,17
10	9,7	16,8	47,3	80,1	8,9	16,2	51,4	81,3	8	16,9	54,2	84,3	0,8	20,6	415	91,6	0,16
11	6	12,5	69,0	96,8	4,8	11,8	71,8	93,5	4,4	12,9	74,1	94,3	-2,6	14,9	59,7	93,2	0,1
12	3,7	9,8	69,6	91,4	2,6	9,2	71,1	91,1	1,6	11,1	76,6	93,2	-6,8	13,0	52,7	95,2	0,12
01/16	-1,4	3,6	61,1	83,8	-3,3	2,6	65,6	93,5	-3,5	2,0	73	94,4	-14	2,2	56,8	94,5	0,07

9.4.2 Johanniskirche Thorn Fenster I

Die Klimamessungen in der Johanniskirche Thorn erfolgten am Fenster I im Zeitraum vom 20.04.2015-10.02.2017. Die Evaluierung der Außenschutzverglasung wurde vom 12.02.2016 - 10.02.2017 durchgeführt. Das vierbahnige Fenster hat eine Höhe von ca. 11 m und eine Breite von 3,40 m mit 10 Zeilen und einem Maßwerk als Abschluss. Der Abstand zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt 7-8 cm. Am unteren Fenstersims befindet sich eine Lufteintrittsöffnung von ca. 1-2 cm über die gesamte Breite der Glasmalereifelder. Die Luftaustrittsöffnung an den oberen Feldern hat eine Breite von ca. 1 cm. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas.

Die Klimadaten wurden monatlich per Modem ausgelesen. Die GSM-Verbindung ließ sich über den Zeitraum der Evaluierung relativ stabil aufbauen und ermöglichte so eine kontinuierliche Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Messgeräte bzw. Datenübertragung. Ausfälle von Messgeräten aufgrund von Stromausfällen bzw. der Korrosion von Messfühlern konnten so zeitnah erkannt und vor Ort behoben werden. Dennoch sind Messwertverluste in den Monaten August/September 2016, Oktober/November und Dezember/Januar 2017 zu verzeichnen. Ein Ausfall des Temperatur-Feuchtefühlers an Pos. 4 wurde im Juni festgestellt und zeitnah behoben. Eine fehlerhafte Messwertregistrierung erfolgte für die Temperatur an Pos. 1 in den Monaten November 2016 bis Januar 2017. Die entsprechenden Feuchtwerte hingegen wurden fehlerfrei registriert. Die Auswertung der vorhandenen Messwerte erfolgte in Tabellen- und Diagrammform. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in Tabelle 12 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte und ist in den nachfolgenden Grafiken dargestellt.

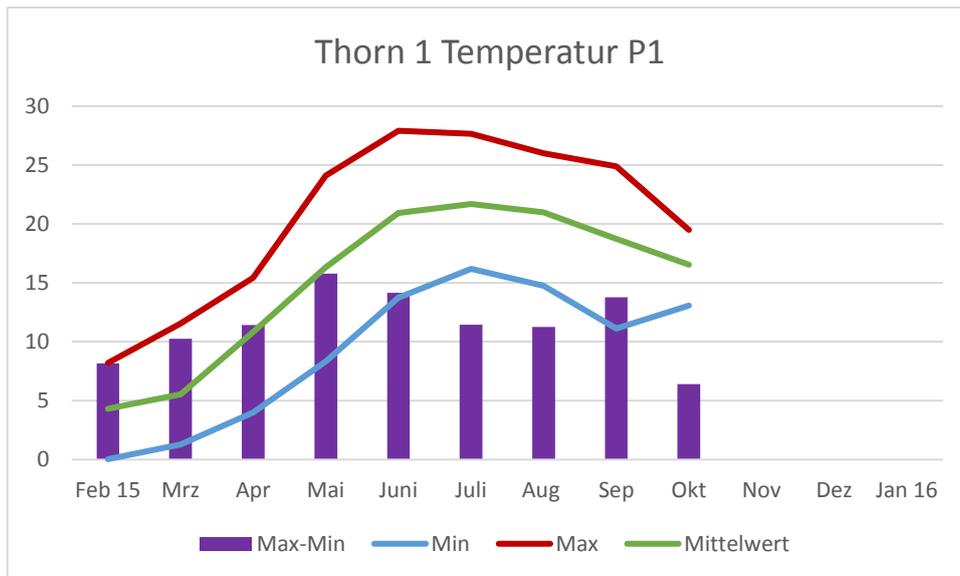


Bild 194: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld 1b betrug im Juni 27,9 °C, die minimale Temperatur lag im Februar an derselben Messstelle bei 0 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat Mai 15,8 K.

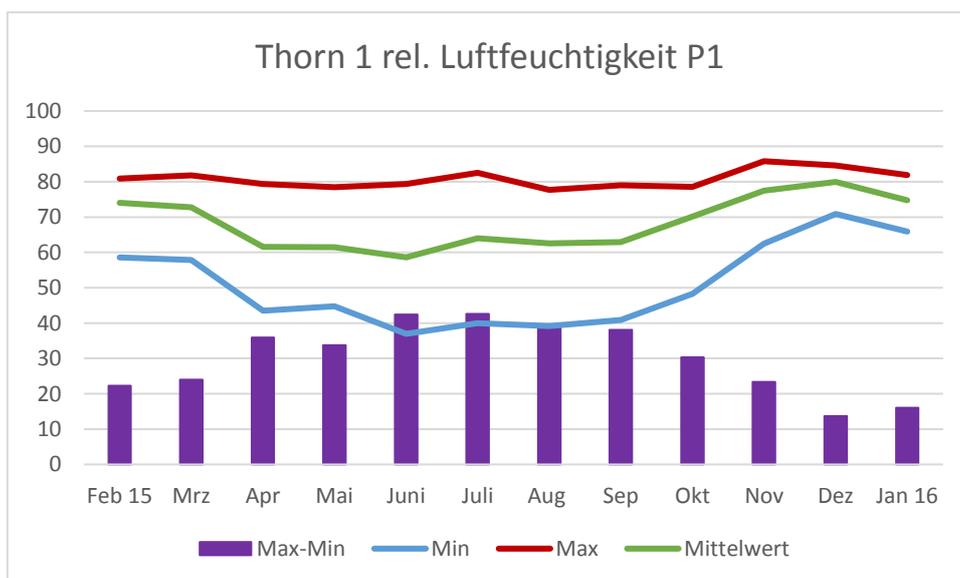


Bild 195: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit an Pos. 1 schwanken um 80 %. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld 1b betrug im November 85,8 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juni bei 36,9 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juli mit Δ r. F. = 42,6 % festgestellt.

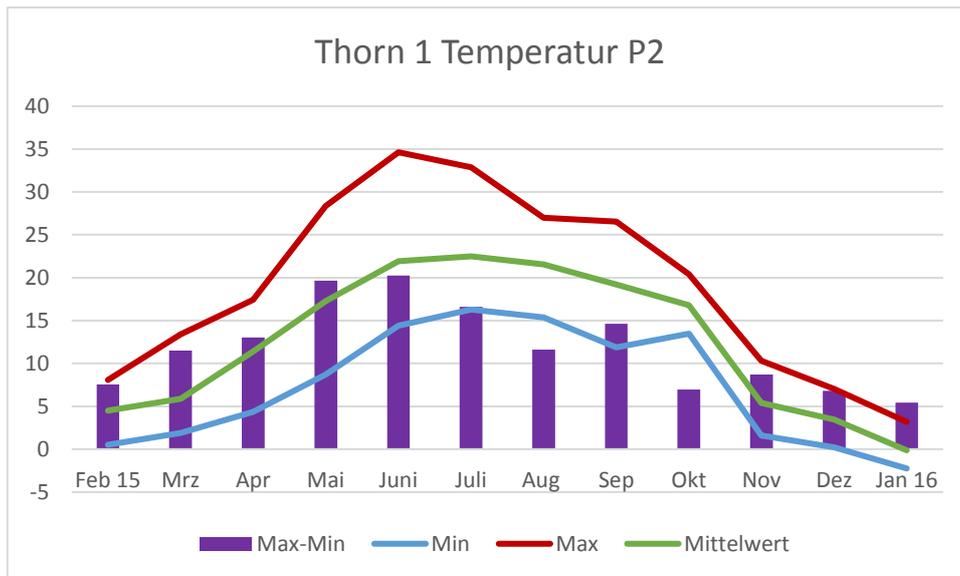


Bild 196: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld 1b betrug im Juni 34,6°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -2,3 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Juni bei 20,2 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe Temperaturen häufig kurzzeitige Spitzenwerte sind.

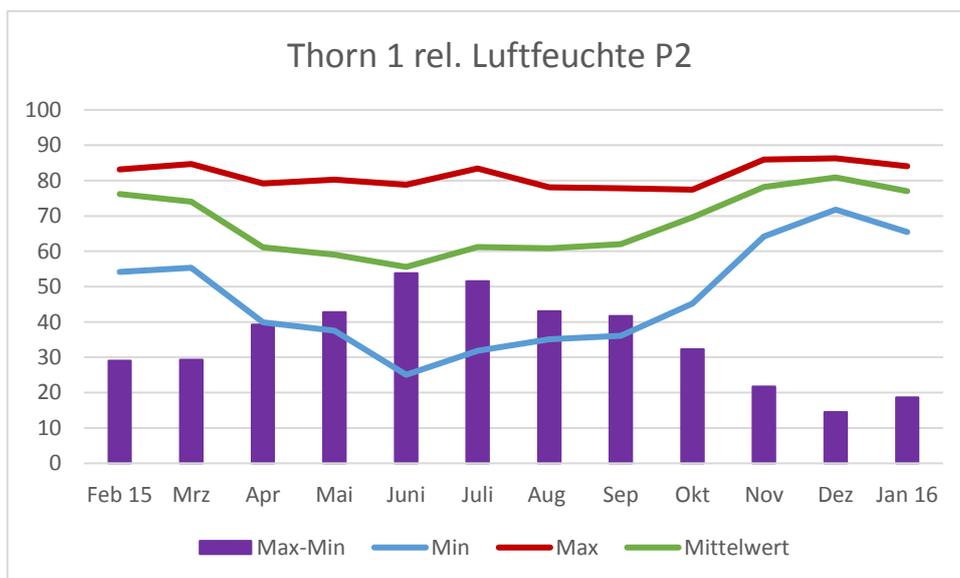


Bild 197: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos.2)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen an Pos. 2 in keinem Monat des Messzeitraumes über 90 % r. F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld 1b betrug im Dezember 86,3 %. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im Juni bei 25,1 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im Juni mit Δ r. F. = 53,8 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger in den Monaten Oktober bis März auftreten.

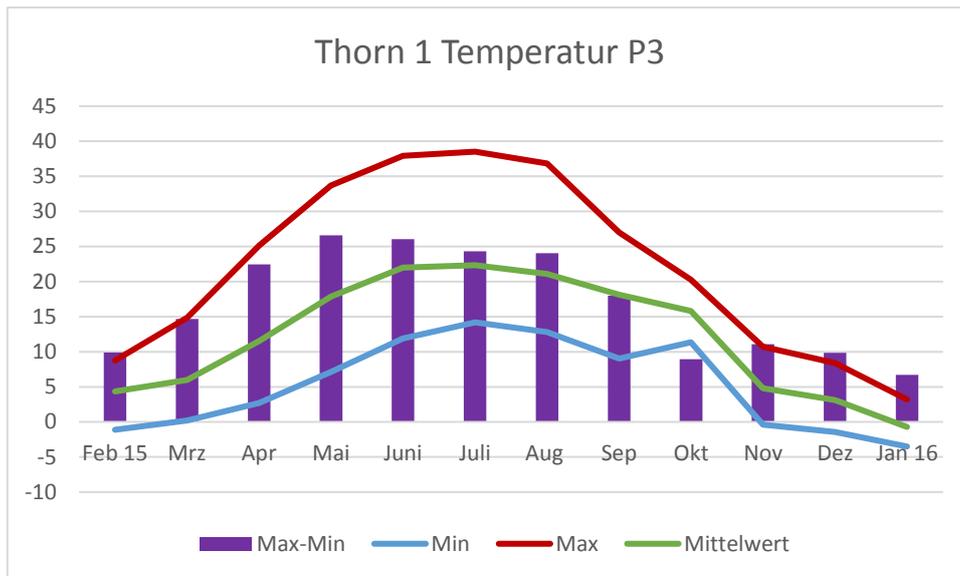


Bild 198: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximal gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld 1b betrug im Juli 38,5°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei - 3,5°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Mai bei 26,6 K.

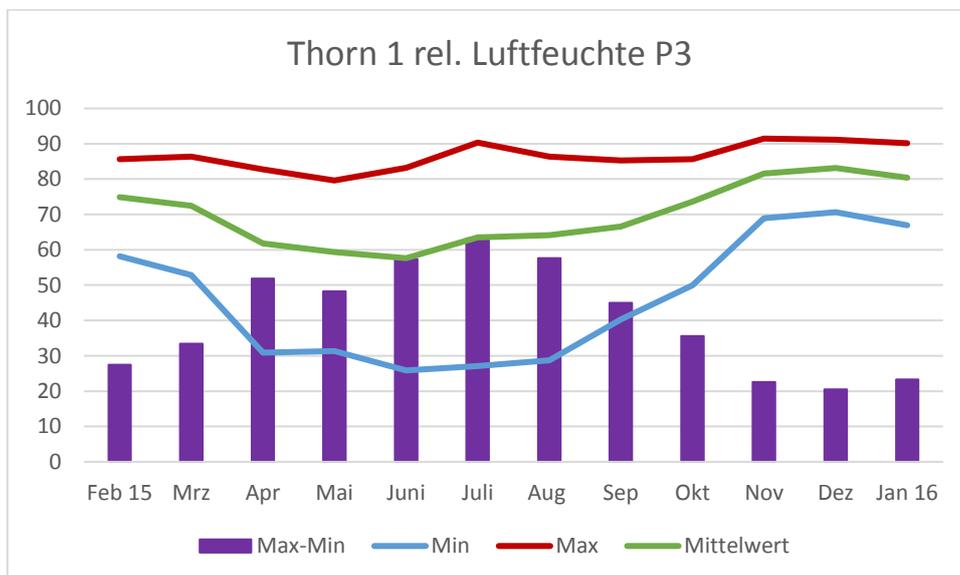


Bild 199: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit überschreiten in den Monaten Juli und November bis Januar 90 % r.F. Der Maximalwert an Pos. 3 beträgt im November 91,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juni bei 25,9 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juli mit Δ r. F. = 63,2 % berechnet.

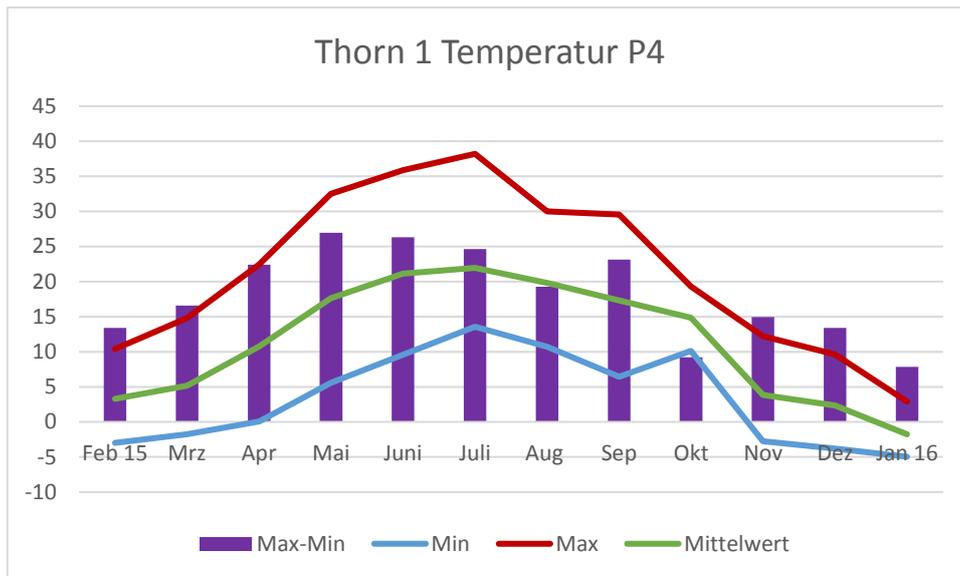


Bild 200: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Feld 1b betrug im Juli 38,2 °C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei - 5 °C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Mai bei 27 K.

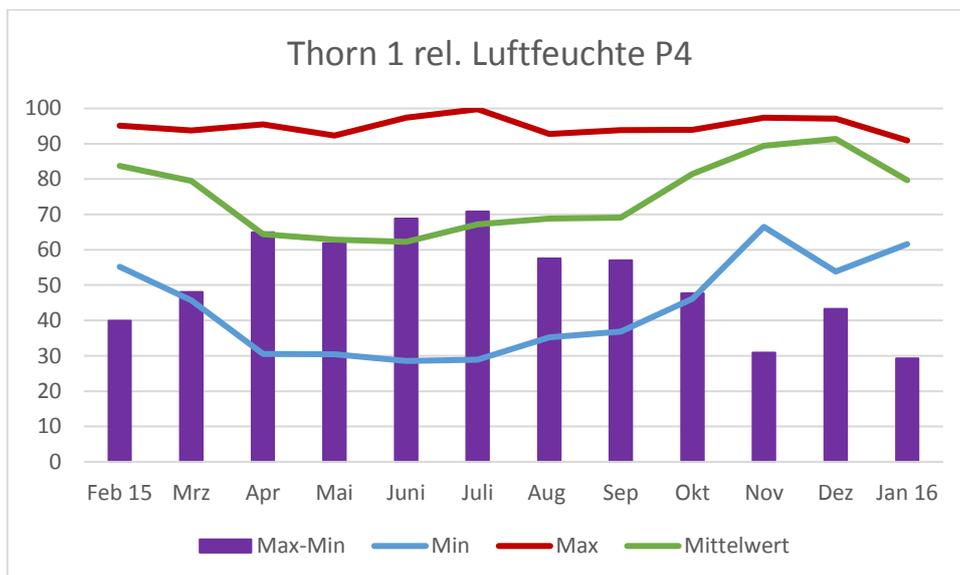


Bild 201: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die relative Feuchtigkeit liegt in allen Monaten des Messzeitraumes deutlich über 90 %. Maximalwerte werden im Juli und Dezember mit 99,8 % r. F. bzw. 97,1 % r. F. gemessen. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juni bei 28,5 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Juli mit Δ r. F. = 70,8 % festgestellt.

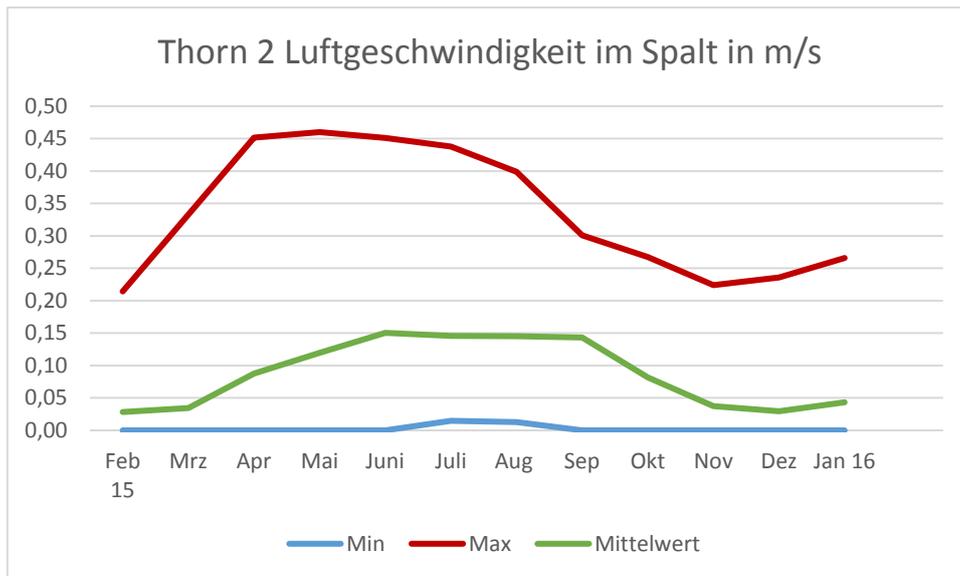


Bild 202: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster I

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung am Feld 1b betrug in den Monaten April bis Juli 0,44 bis 0,46 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, mit Ausnahme von Juli und August mit 0,01 m/s, das bedeutet, dass die Luftströmung in den übrigen Monaten zeitweise völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen. Aus den Monatsdiagrammen ist zu erkennen, dass eine ausreichende Luftströmung im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung vorherrscht, um einen Feuchte- und Temperatenausgleich zu garantieren.

Die folgenden Darstellungen zeigen detailliert die Häufigkeitsverteilung von Temperatur und Bereichen der relativen Luftfeuchte an Pos. 2, der Außenseite der Originalverglasung. Sie können herangezogen werden, um aktiv die Verbesserung der Umgebungsbedingungen für die Glasmalereien zu beeinflussen, z.B. durch eine Beheizung der Kirche in den Monaten November bis März, um die Temperatur etwas anzuheben und gleichzeitig die relative Luftfeuchtigkeit auf Werte um 80 % r. F. zu senken. Die Extremwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte auf der Innenseite der Glasmalereien an Pos. 1, liegen im gesamtem Messzeitraum deutlich unterhalb der Werte von Pos. 2, weshalb auf ihre detaillierte Darstellung verzichtet wurde.

Aus den Häufigkeitsverteilungen der Monatsdarstellung lässt sich die Gesamtdauer von Temperatur- und Feuchtebereichen berechnen, die auf die Glasmalereien einwirken. Diese Grafiken sind in den Bildern 205-207 dargestellt.

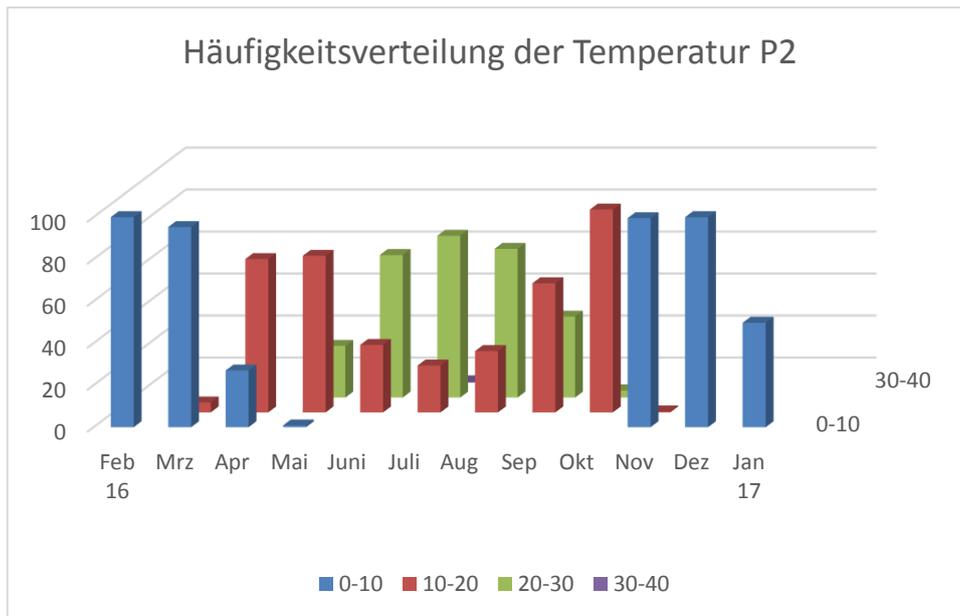


Bild 203: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Außenseite der Originalverglasung im Messzeitraum Februar 2016 bis Januar 2017

Maximalwerte der Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung von Feld 1b liegen im Bereich zwischen 30 und 40 °C, allerdings nur zu 0,7 % Messzeit im Juli. In den Monaten Juni bis September liegen die häufigsten Temperaturbereiche zwischen 20 und 30 °C. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten April, Mai, September und Oktober liegen zwischen 10 und 20°C. In den Monaten November, Dezember, Februar und März lagen die Temperaturen zu 95 bis 100 % der Messzeit zwischen 0 und 10°C.

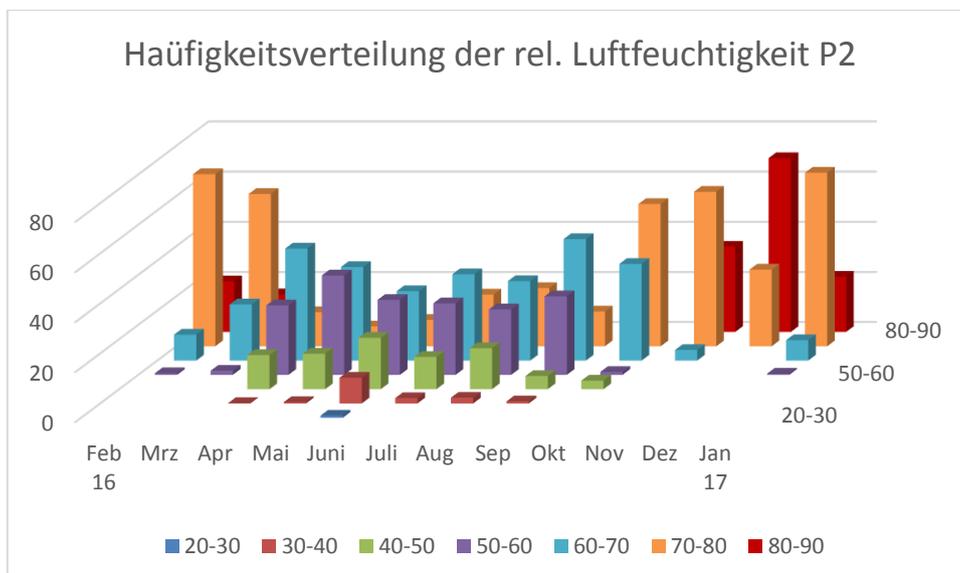


Bild 204: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) im Messzeitraum Februar 2016 bis Januar 2017

Werte der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 80 und 90 % an der Innenseite der Originalverglasung wurden in den Monaten Dezember bis März gemessen – am Häufigsten im Monat Dezember mit knapp 70 % der Messzeit. Ansonsten liegen die häufigsten Feuchtwerte zwischen 70 und 80 % r. F bzw. darunter und sind für den Erhaltungszustand der Glasmalereien unbedenklich.

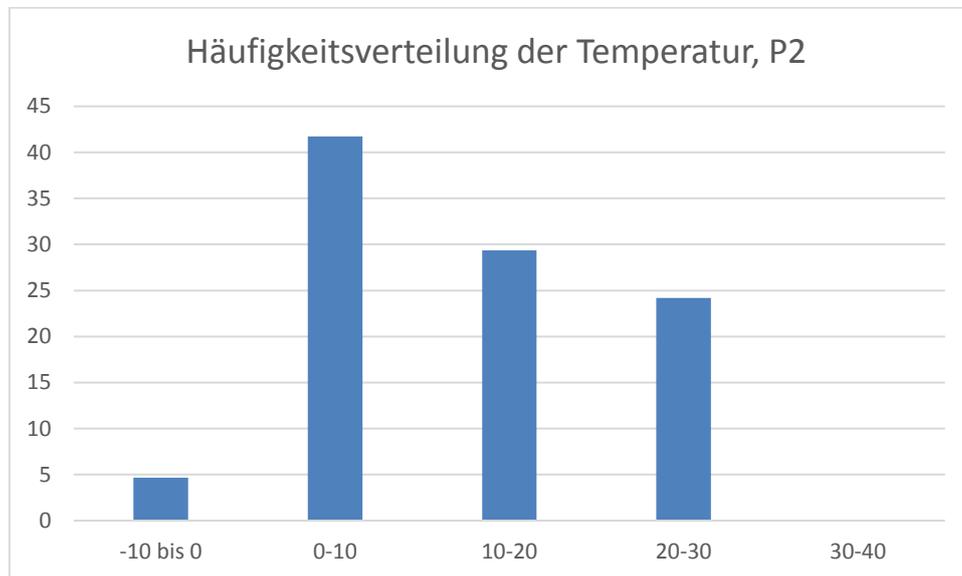


Bild 205: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Außenseite der Originalverglasung liegen im Bereich zwischen 0-10°C. In den Wintermonaten wurden Werte zwischen 0 bis -10 °C erreicht. Die höchsten Temperaturen lagen im Bereich zwischen 30 und 40 °C und wurden nur zu weniger als 0,1 % der gesamten Messzeit registriert.

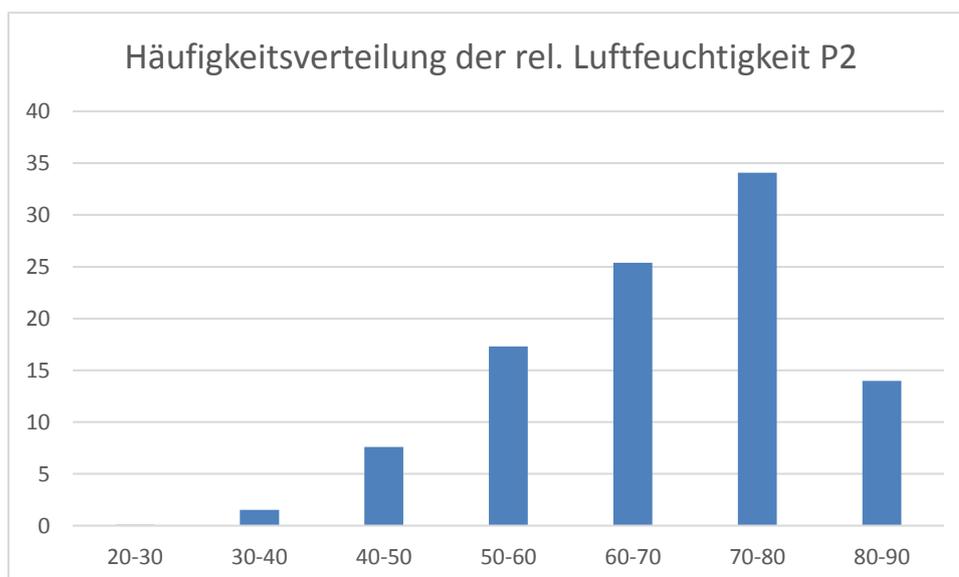


Bild 206: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der rel. Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

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

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit und ihre Häufigkeit an der Außenseite der Originalverglasung sind nur geringfügig höher als an der Innenseite. Eine relative Luftfeuchtigkeit über 90 % wurde zu keinem Zeitpunkt gemessen, daher ist eine Tauwasserbildung auf der Originalverglasung auch auszuschließen.

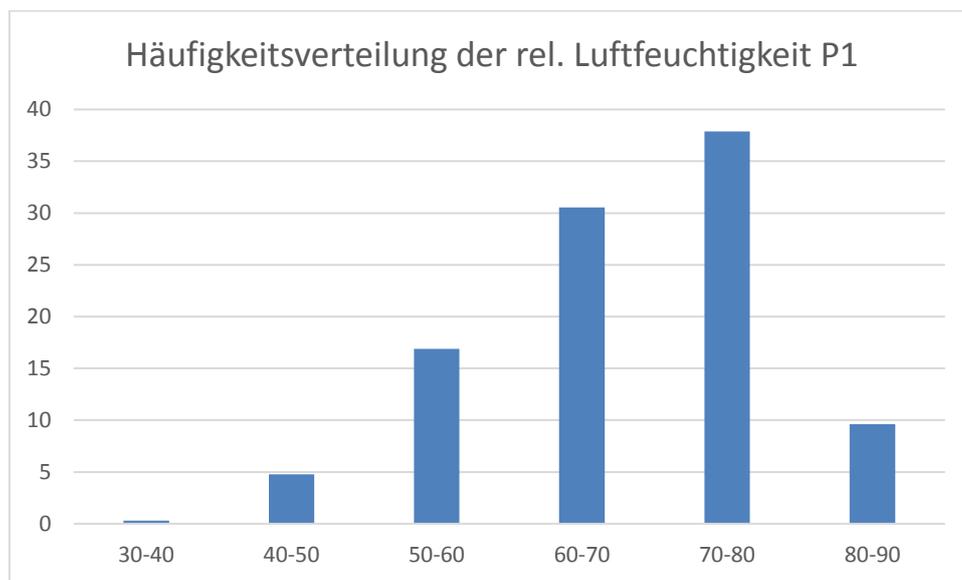


Bild 207: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 1) in den Monaten Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung entspricht in etwa dem Verlauf der Werte auf der Außenseite der Originalverglasung. Die häufigsten Werte liegen zwischen 60 – 80 % r. F. Werte zwischen 80 und 90 % r. F. wurden zu knapp 10 % der gesamten Messdauer registriert. Mit 85,8 % auf der Innenseite und 86,3 % r. F. auf der Außenseite der Glasmalereien als Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit über nur einen geringen Zeitraum sind durch die Außenschutzverglasung relativ gute Umgebungsbedingungen zu ihrem Schutz erreicht worden.

Tabelle 12: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 02/16-01/17 am Fenster I

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
02/15	0	8,21	58,6	80,9	0,5	8,1	54,2	83,2	-1,1	8,7	58,2	85,7	-3	10,4	55,2	95,1	0,21
03	1,3	11,6	57,9	81,8	1,9	13,4	55,4	84,7	0,2	14,9	52,9	86,3	-1,8	14,8	45,7	93,8	0,33
04	4	15,4	43,4	79,4	4,4	17,4	39,8	79,1	2,7	25,2	30,3	82,8	0,1	22,5	30,6	95,5	0,45
05	8,3	24,1	44,8	78,5	8,7	28,4	37,5	80,3	7,1	33,7	31,4	79,6	5,6	32,5	30,5	92,4	0,46
06	13,8	27,9	37	79,3	14,4	34,6	25,1	78,9	11,9	37,9	25,9	83,2	9,6	35,6	28,5	97,4	0,45
07	16,2	27,6	40	82,5	16,3	32,9	31,8	83,4	14,2	38,5	27,1	90,3	13,6	38,2	28,9	99,8	0,44
08	14,8	26,0	39,2	77,7	15,4	27,0	35,1	78,1	12,8	36,8	28,8	86,4	10,7	30	35,2	92,8	0,4
09	11,1	24,9	40,9	79,0	11,9	26,5	36,1	77,8	9,0	27,0	40,3	85,3	6,5	29,6	36,9	93,9	0,3
10	13,1	19,5	48,3	78,6	13,5	20,4	45,2	77,4	11,3	20,3	50	85,6	10,1	19,3	46,2	93,9	0,27
11	-	-	62,5	85,8	1,6	10,3	64,2	85,9	-0,4	10,7	68,9	91,5	-2,8	12,2	66,5	97,4	0,22
12	-	-	70,9	84,6	0,2	7,0	71,8	86,3	-1,5	8,4	70,4	91,3	-3,8	9,6	53,9	97,1	0,24
01/16	-	-	65,9	81,9	-2,2	3,2	65,4	84,1	-3,5	3,2	66,9	90,1	-5	2,9	61,2	90,9	0,27

10. Vergleich und Bewertung der Messergebnisse

Die Wirksamkeit der Außenschutzverglasungen wurde durch Klima- und Schadstoffmessungen sowie mit Hilfe von Glasdosimetern (VDI 1993) an ausgewählten Fenstern über einen Zeitraum von 12 Monaten überprüft. Innerhalb des Projektzeitraumes erfolgten Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an der Innen- und Außenseite der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) und an der Innen- und Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 3, Pos. 4). Schadstoffmessungen mit Hilfe von Passivsammlern erfolgten sowohl an Pos. 1 und 4 als auch im Zwischenraum über einen Zeitraum von 4 Wochen.

10.1 Temperatur und relative Luftfeuchte

Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind entscheidende Einflussfaktoren für den Erhaltungszustand von historischen Glasmalereien, denn bei vielen chemischen Reaktionen führt eine Erhöhung der Temperatur um 10 K schon zu einer Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit. Zudem können rasche Temperaturänderungen Spannungen in Materialkombinationen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten hervorrufen, die zu Materialverlusten führen. Hinter einer Außenschutzverglasung sind schnelle Temperaturänderungen am Original jedoch nahezu ausgeschlossen, da die direkte Einwirkung von plötzlich einsetzenden Wetteränderungen (wie z. B. Schlagregen) verhindert wird. Die Temperaturänderungen am Original verlaufen daher langsamer als unmittelbar an der Außenschutzverglasung.

Die Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit hat einen Einfluss auf die Entstehung von Feuchtigkeitsfilmen auf Materialoberflächen und damit einhergehenden Diffusionsprozessen, die einen Ionenaustausch in oberflächennahen Bereichen bewirken und als Beginn einer Korrosion auch bei Gläsern beobachtet werden. Daher sollte die relative Luftfeuchtigkeit an den Originalen 80 % nicht überschreiten.

Die Wirksamkeit der Außenschutzverglasung liegt eindeutig darin, dass Bereiche hoher relativer Luftfeuchtigkeit (90-100 %) an der originalen Verglasung (Pos. 2) nicht mehr erreicht werden bzw. deutlich kürzer sind als ohne Schutzverglasung (Pos. 4) und damit eine Kondenswasserbildung auf den Originalen nahezu ausgeschlossen ist. Dieser Effekt konnte eindeutig mit Hilfe der durchgeführten Klimamessungen sowohl in Leslau als auch in Thorn nachgewiesen werden (Bilder 208, 209)

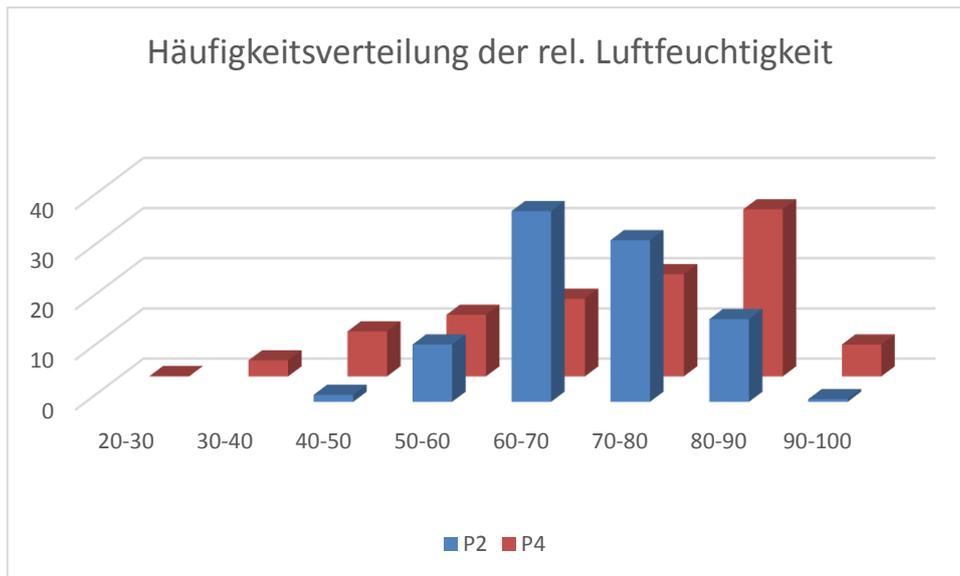


Bild 208: Dom zu Leslau, Häufigkeit von Bereichen der relativen Luftfeuchte am Fenster nIX in % der Messzeit

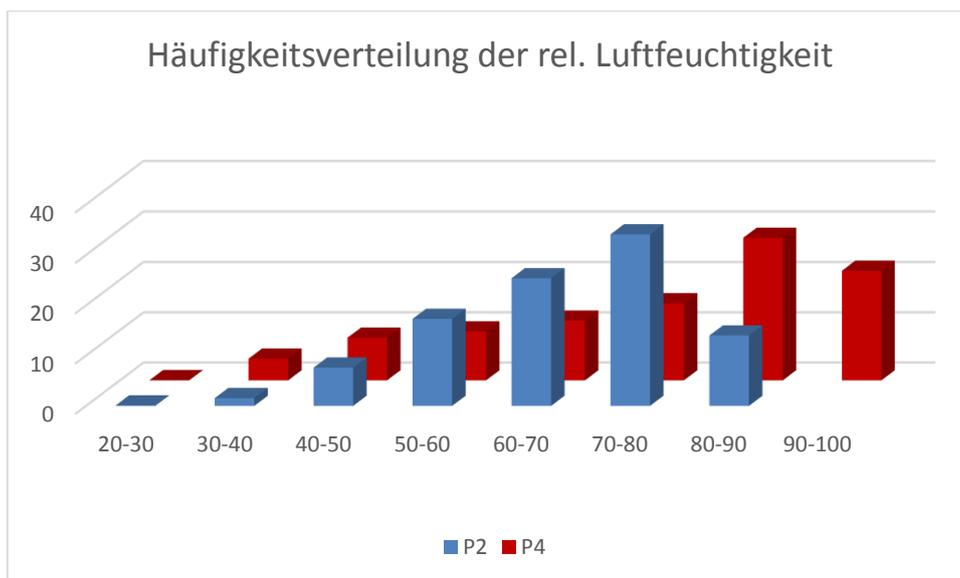


Bild 209: Johanniskirche Thorn, Häufigkeit von Bereichen der relativen Luftfeuchte am Fenster I in % der Messzeit

10.2. Luftschadstoffe

Schadstoffmessungen mit Hilfe von Passivsammlern zeigen, dass eine gut funktionierende Außenschutzverglasung in der Lage ist, Umweltbelastungen durch Luftschadstoffe (SO_2 , NO_x) an den Glasmalereien deutlich zu reduzieren. Die hohen Schadstoffkonzentrationen im Außenbereich lassen sich innen nicht mehr nachweisen (Bilder 210, 211). In der Kombination mit einer geringeren

Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum Außenbereich ist das Schädigungspotential der Umgebungsbedingungen als deutlich geringer einzuschätzen als ohne Schutzverglasung.

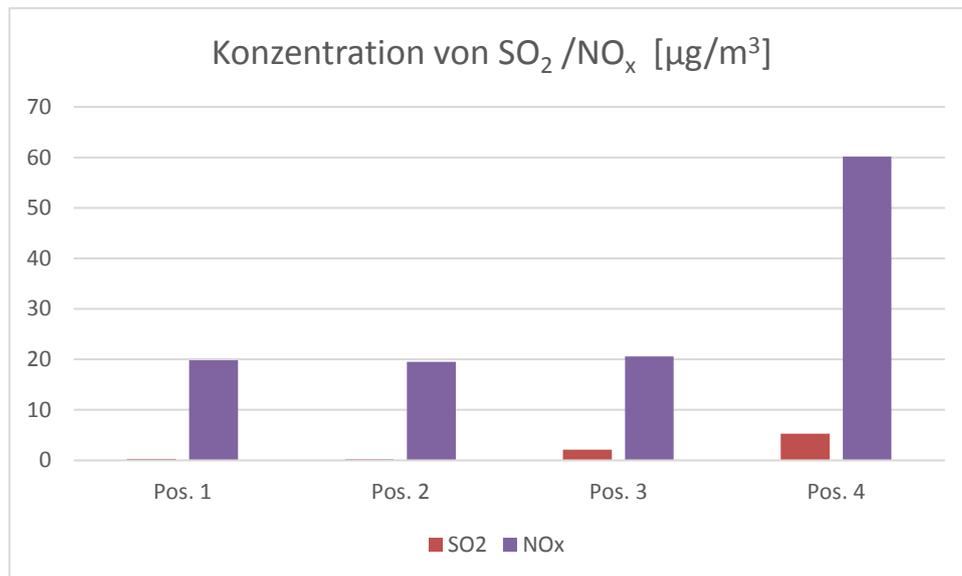


Bild 210: Messung mit Passivsammlern im Zeitraum von 28.01.-02.03.2015 in Leslau, Fenster nIX (Pos. 1, 2, 3, 4)

Die hohen NO_x-Werte im Außenbereich (Pos. 4) sind durch die Lage des Doms an einer verkehrsreichen Straße mit einer Ampel direkt vor dem Fenster nIX begründet, an der es immer wieder zu Staus kommt. Durch die Außenschutzverglasung wird die NO_x-Konzentration jedoch um 66 % im Innenraum reduziert. Die SO₂-Konzentrationen liegen an der Originalverglasung unterhalb der Nachweisgrenze.

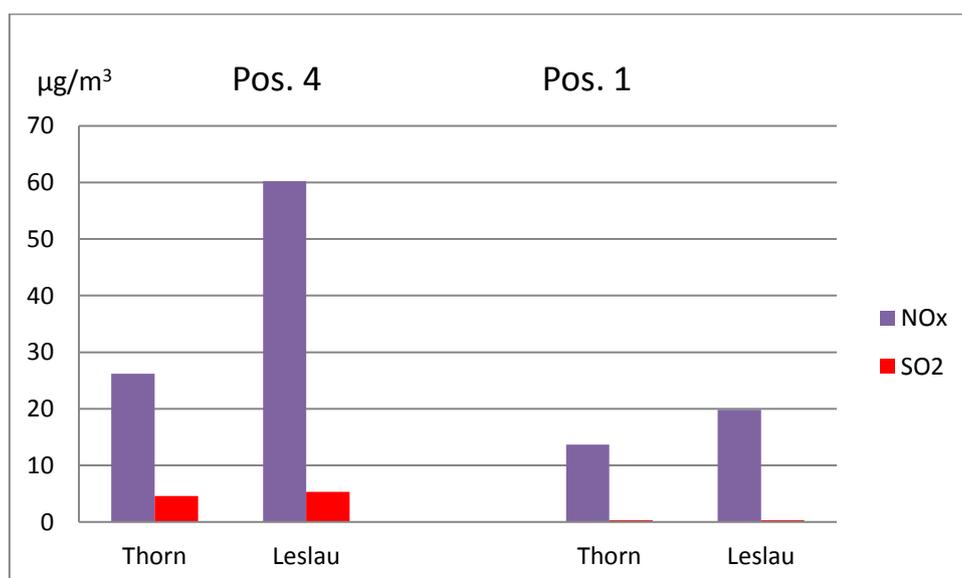


Bild 211: Vergleich der Konzentration an NO_x und SO₂ am Fenster I in Thorn und dem Fenster nIX in Leslau

Die Schadstoffbelastung durch NO_x im Außenbereich war in Leslau signifikant höher als in Thorn. Die Innenraumbelastung an Pos. 1 ist in beiden Kirchen deutlich geringer.

10.3 Glasdosimeterstudie

Durch den Einsatz von Glasdosimetern können komplexe korrosive Belastungen an Baudenkmalern bzw. Objektteilen ortsspezifisch und quantitativ erfasst werden. Glasdosimeter sind seit Jahrzehnten in der Denkmalpflege etabliert und können dort eingesetzt werden, wo eine vergleichende Bewertung komplexer Umgebungsbelastungen im Hinblick auf die Verwitterung von Gläsern gefragt ist, so dass frühzeitig auch Maßnahmen zu ihrer Erhaltung ergriffen werden können. Das Wirkprinzip beruht darauf, dass Veränderungen an empfindlichen Glasoberflächen infolge ihrer Exposition mit Hilfe der IR-Spektroskopie qualitativ und quantitativ erfasst werden können. Durch die Messung vor und nach der Exposition wird im Bereich der Bande bei 3350 cm⁻¹ die Extinktionsdifferenz (ΔE -Wert) bestimmt, die ein Maß für das zu erwartende Schädigungspotential der komplexen Umgebungsbedingungen darstellt. Je größer der ΔE -Wert ist, umso höher ist das Schädigungspotential zu bewerten (Bild 212). Die Glasdosimeter wurden vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung Würzburg, Außenstelle Bronnbach hergestellt und ausgewertet (Mass-Diegeler 2016/17). Ihre Exposition erfolgte von Februar 2015 bis Februar 2016 in Leslau am Fenster nIX und von Februar 2016 bis Februar 2017 in Thorn am Fenster I.

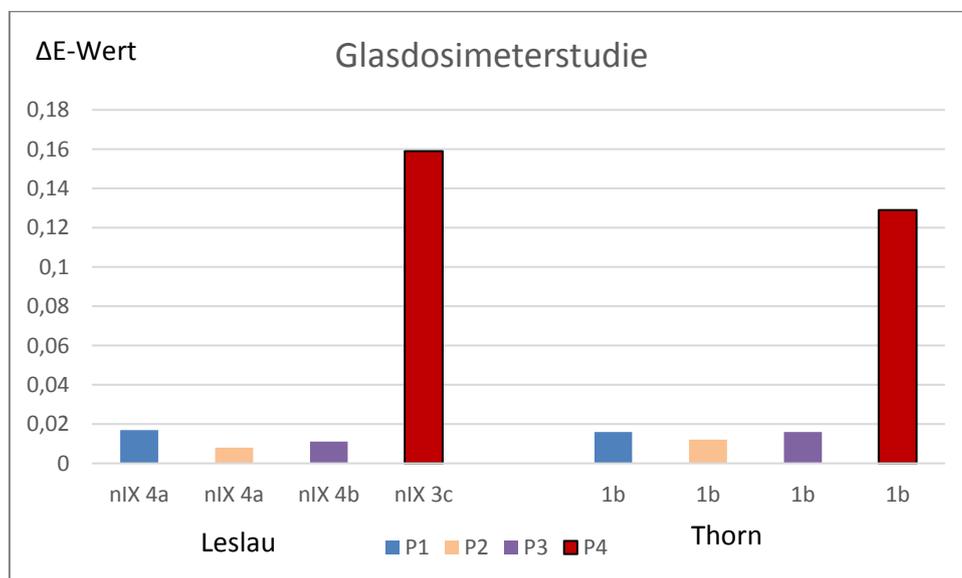


Bild 212: Ergebnisse der Glasdosimeterstudie an der Außenschutzverglasung in Leslau und Thorn

Die Untersuchungen zeigen, dass die Glasdosimeter sehr sensitiv auf Umwelteinflüsse reagieren und signifikante Daten zur Bewertung des Schädigungspotentials liefern. Die fachgerechte Installation

einer Außenschutzverglasung führt in allen untersuchten Fällen zu besseren Umgebungsbedingungen für die Glasmalereifenster.

Das Schädigungspotential der Umgebungsbedingungen in Leslau fällt aufgrund der höheren NO_x-Konzentration im Außenbereich ebenfalls höher aus. Es ist eindeutig zu erkennen, dass jeweils für die Außenseite (Pos. 4, direkte Bewitterung) ein hoher ΔE -Wert ermittelt wurde und die Belastung der Glasoberfläche durch Korrosion erheblich ist. Das Dosimeter an der Innenseite des Originals (Position 1) zeigt sowohl IR-spektroskopisch als auch mikroskopisch nur Anzeichen einer sehr geringen Belastung, der ermittelte ΔE -Wert liegt unter 0,02. Die oftmals kritischen Positionen 2 (Original-Außenseite) sind mit einem ΔE -Wert um 0,01 bei den 12-Monats-Messungen als nahezu ideal zu betrachten. Die Reaktion des Dosimeters auf der Position 3 (Innenseite-Schutzverglasung) ist mit der von Position 1 vergleichbar und stellt kein Risiko dar.

10.4 Schlussfolgerungen

Systematische Untersuchungen zur Effektivität von Außenschutzverglasungen sind an vielen Orten in Europa durchgeführt worden (Bernadi 2013, Torge 2016) und haben schon in den neunziger Jahren des zwanzigsten Jahrhunderts eine befriedigende Auskunft über die grundlegenden technischen und konstruktiven Erfordernisse gegeben (wie z.B. Innenbelüftung, Spaltöffnungsbreiten, Dichtheit) (Oidtmann 1995). Die anfangs gern behauptete „quasi museale“ Schutzwirkung hat sich dabei bis heute nicht realisieren lassen. Klimamessungen, die in der Nähe der Glasmalereien, vor allem im Raum zwischen Außenschutzverglasung und Originalfenster durchgeführt wurden, ergaben ferner sehr starke Einflüsse bauphysikalischer Bedingungen, wärmetechnischer Maßnahmen, der Ausrichtung des Fensters und des Außenklimas. Eine verallgemeinernde Vorhersage der Konservierungswirkung ist deshalb für ein konkretes Objekt praktisch nicht möglich und eine Überprüfung der Außenschutzverglasung in jedem Objekt sinnvoll. So konnte für den Fall der Außenschutzverglasung in Leslau nachgewiesen werden, dass selbst bei einer konstruktionsbedingten Spaltbreite zwischen 25 bis 35 cm, anstelle der sonst üblichen 7-8 cm, die Luftzirkulation zwischen Original und Außenschutzverglasung funktioniert. Eine zeitweilig hohe relative Luftfeuchtigkeit (r. F. max =93,5 %) an den Originalen, die bautechnische Ursachen hat, wurde festgestellt. Anhand der Messwerte können Maßnahmen in bestimmten Zeitfenstern erfolgen, um die Bedingungen weiter zu verbessern, wie z.B. die Erwärmung der Luft im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung durch Einschalten der vorhandenen Beleuchtung. Insgesamt haben sich deutliche Verbesserungen des Innenraumklimas sowohl in Leslau als auch in Thorn durch den Einbau der Außenschutzverglasung ergeben. Die Feuchtwerte lagen zu 83% bzw. 86% der Messzeit unterhalb von 80,1 %. Die Schadstoffkonzentration ist in beiden Objekten im Innenbereich ebenfalls signifikant geringer als außen, so dass sich das Schädigungspotential der Umgebungsbedingungen nachgewiesener Maßen auch deutlich verringert hat. Somit haben sich auch die Expositionsbedingungen für die Glasmalereien in Leslau und Thorn nachhaltig verbessert.

11. Zusammenfassung

Im Rahmen des Projektes wurden Glasproben aus dem Dom zu Leslau und der Johanniskirche in Thorn analysiert und ihre chemische Zusammensetzung bestimmt. Die Analysen tragen zur Bestandscharakterisierung bei.

Restaurierungsmaterialien aus den 1950er Jahren und Beschichtungen auf den Gläsern wurden dokumentiert und Materialproben analysiert.

Mikrobiologische Untersuchungen zeigen, dass in allen Materialproben, die noch Glasbeschichtungen mit organischen Materialien aufweisen aber auch auf den Proben, wo diese Beschichtungen bereits abgewittert waren eine mikrobielle Aktivität nachgewiesen werden konnte, die jedoch unabhängig von der Exposition der Glasmalereien nicht signifikant erhöht ist.

Untersuchungen zur Reversibilität des Beschichtungsmaterials zeigen, dass auch noch nach mehr als 60 Jahren Expositionsdauer eine Abnahme der Beschichtungen und das Lösen von Klebungen prinzipiell möglich wäre.

Beschichtungsmaterialien sind als Imprägnierung auf den Glasmalereien in Leslau und den Glasmalefeldern im Stadtmuseum Thorn noch vorhanden und als solche intakt. Sie stellen keine Gefährdung für das Glas dar. In der Johanniskirche in Thorn konnten sie nicht mehr nachgewiesen werden. Im Ergebnis der Begutachtung aller Felder und der naturwissenschaftlichen Untersuchungen kann festgestellt werden, dass die Imprägnierung nach der Methode von Kwiatkowski keine Nachbehandlung erforderlich macht (Festigung, Ablösung o.ä.).

Die fachgerechte Restaurierung der Glasmalereifenster, sowie der Entwurf und Einbau der Schutzverglasung erfolgten durch die Restaurierungswerkstatt Creo Beata Oleszczuk in Breslau in enger Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Gutachtern und den zuständigen Denkmalbehörden.

Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen wurde durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) mit Hilfe von naturwissenschaftlichen Untersuchungen wie Klimamessungen, Schadstoffmessungen und der Bewertung des Schädigungspotentials der Umgebungsbedingungen mit Hilfe von Glasdosimetern nachgewiesen.

Die Expositionsbedingungen für die Glasmalereien in Leslau und Thorn sind durch den Einbau von Außenschutzverglasungen nachhaltig verbessert worden.

Anhang

- XRF-Untersuchungen am Feld 15B der Johanniskirche Thorn (Bericht Nikolaus-Kopernikus-Universität Torun)
- Klimadiagramme
 - Leslau 1 Juli 2015
 - Leslau 2 Juli 2015
 - Leslau 1 Dezember 2015
 - Leslau 2 Dezember 2015

 - Thorn 1 Juli 2016
 - Thorn 2 Juli 2016
 - Thorn 1 Dezember 2016
 - Thorn 2 Dezember 2016

**BADANIA KONSERWATORSKIE ROZETKI WITRAŻOWEJ Z OKNA
WSCHODNIEGO KATEDRY ŚW. JANA CHRZCICIELA I ŚW. JANA
EWANGELISTY W TORUNIU**



TORUŃ 2015



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

SPIS TREŚCI

- I. INFORMACJE WSTĘPNE**
- II. STAN ZACHOWANIA**
- III. BADANIA BUDOWY WARSTW POWIERZCHNIOWYCH Z ZASTOSOWANIEM METODY MAKRO-XRF**
- IV. BUDOWA FRAGMENTU SZKŁA I NAWARSTWIEŃ METODĄ SEM-EDS**
- V. WNIOSKI**



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

I. INFORMACJE WSTĘPNE

- 1. RODZAJ OBIEKTU:** Fragment witraża (15b) z okna wschodniego katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu
- 2. LOKALIZACJA:** 87-100 Toruń, ul. Żeglarska
- 3. NUMER REJESTRU ZABYTKÓW:** nr A/405 z dnia 24.10.1929 r.
- 4. INFORMACJE DOTYCZĄCE OPRACOWANIA:**
 - 1.1. PODSTAWA OPRACOWANIA**
 - opis makroskopowy,
 - dokumentacja fotograficzna,
 - badania instrumentalne.
 - 1.2. PRZEDMIOT OPRACOWANIA**

Przedmiotem opracowania jest fragment średniowiecznego witraża.
 - 1.3. ZAKRES OPRACOWANIA**

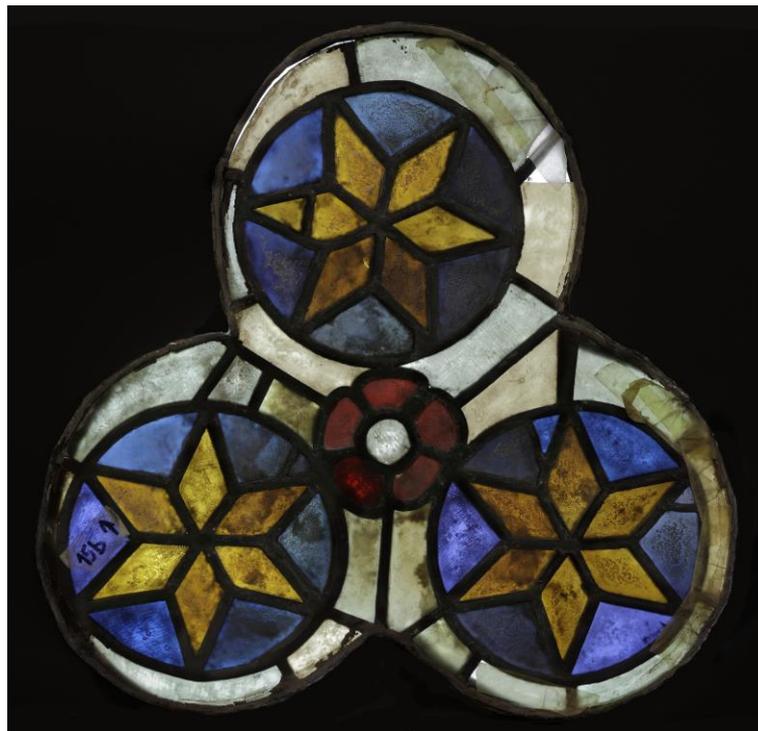
Opracowanie obejmuje podsumowanie badań celem określenia budowy szkieł oraz nawarstwień, jak również udokumentowanie stanu przed i po pracach konserwatorskich.
- 2. AUTOR OPRACOWANIA:** Prof. dr hab. Jadwiga W. Łukaszewicz
Prof. dr hab. Piotr Targowski
- 3. AUTORZY BADAŃ:** Prof. dr hab. Jadwiga W. Łukaszewicz
Prof. dr hab. Piotr Targowski
Dr Grzegorz Trykowski
Mgr Marta Chylińska



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

II. STAN ZACHOWANIA

Analizowany fragment witraża z katedry św. Janów w Toruniu przedstawia ryc. nr 1.



Ryc. 1. Fragment (15b) witraża wschodniego z katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu w świetle przechodzącym

Rycina nr 2 przedstawia fotografie strony wewnętrznej oraz zewnętrznej, które zostały poddane analizie makroXRF, z wykorzystaniem aparatury M6 JetStream (Bruker-Nano GmbH, Berlin, Niemcy).



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Analizując stan zachowania fragmentu poddawanego analizie można stwierdzić, że:

- listwa zewnętrzna ołowiu od wnętrza kościoła pokryta jest białą warstwą -reszta zaprawy, kitu lub farby na granicy witraż laskowania maswerku,
- w szklach białych występują liczne pęknięcia,
- od strony wewnętrznej część szkieł pokrywają warstwy korozyjne (te szkła można przyjąć za oryginalne),
- pozostałe szkła od strony wewnętrznej pozbawione są nawarstwień, co prawdopodobnie jest wynikiem późniejszego ich wmontowania (w czasie prac konserwatorskich).
- Od strony zewnętrznej również występują nawarstwienia korozyjne, ich grubość jest bardziej zróżnicowana niż od wnętrza, co jest wynikiem działania opadów atmosferycznych.



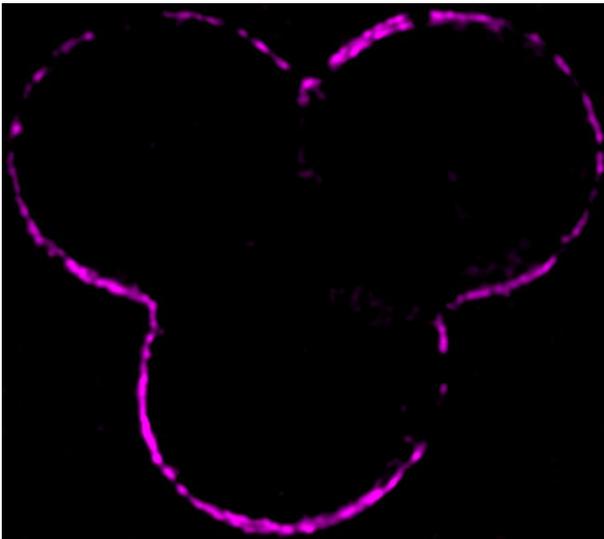
J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

III. BADANIA BUDOWY WARSTW POWIERZCHNIOWYCH Z ZASTOSOWANIEM METODY MAKRO-XRF¹

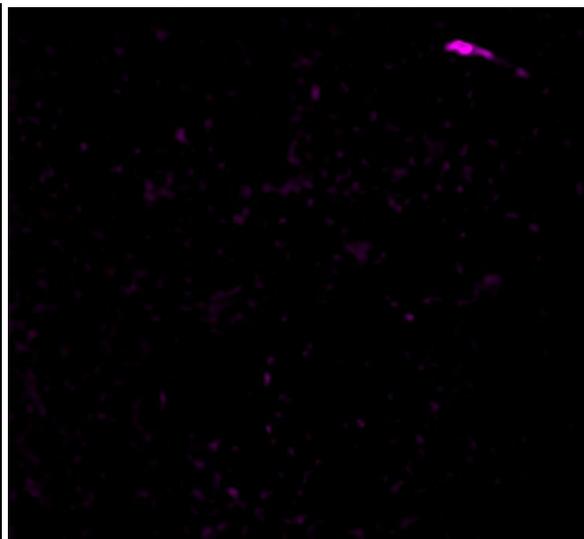
Zastosowana metoda wykorzystująca fluorescencję promieniowania rentgenowskiego (XRF) pozwala na zobrazowanie występowania poszczególnych pierwiastków w warstwach powierzchniowych analizowanych zabytków.

Poniżej przedstawiono mapy występowania związków ołowiu, cyny, wapnia, żelaza, potasu, baru, manganu, miedzi, chromu i tytanu na części wewnętrznej oraz zewnętrznej fragmentu witraża z katedry św. Janów w Toruniu.

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Ti-Ka - Ba-LB1

Tytan występuje tylko na obrzeżu rozetki, świadczy o obecności bieli tytanowej w kicie, zaprawie, szczelninie lub farbie, użytych w czasie prac konserwatorskich w katedrze.

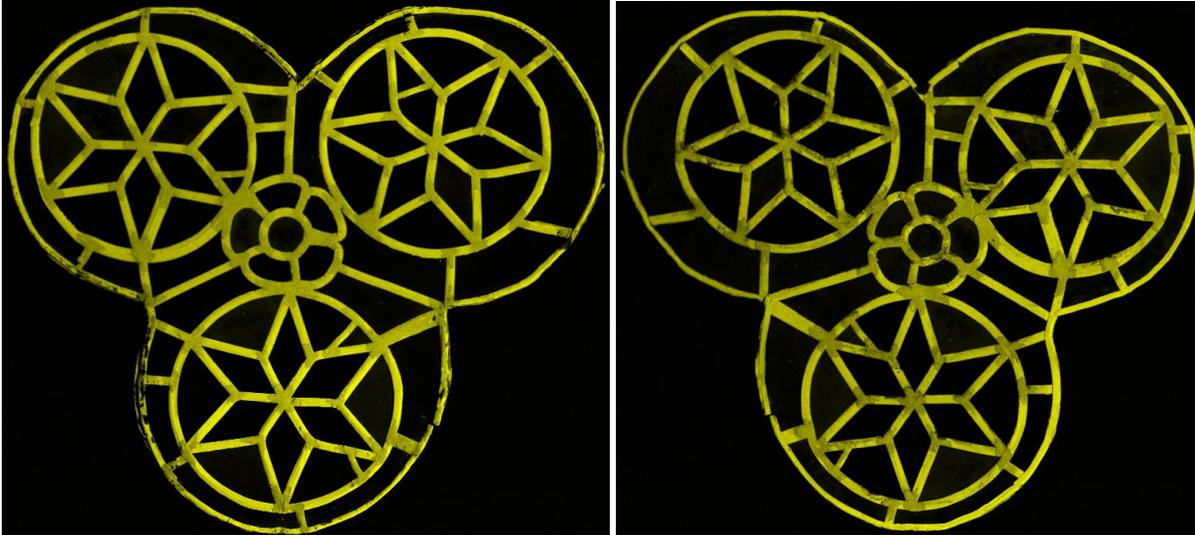
strona wewnętrzna

strona zewnętrzna

¹ Analizę wykonał prof. dr hab. Piotr Targowski w Interdyscyplinarnym Centrum Nowych Technologii UMK



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

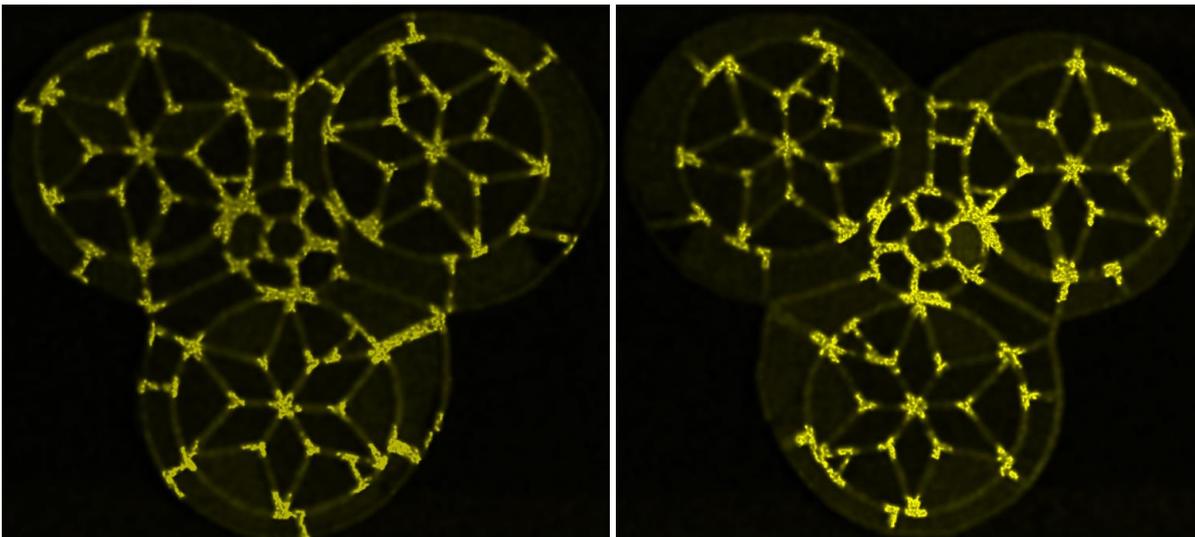


Pb-LA

Występowanie ołowiu pokrywa się dokładnie z obecnymi w obiekcie listwami ołowianymi. Występuje on również w szklach jednakże ze względu na duże różnice w stężeniu utrudniona jest jego obserwacja. Ponadto należy zaznaczyć, że wyraźnie niższe stężenie ołowiu występuje w miejscach, gdzie na szklach obecne są nawarstwienia.

strona wewnętrzna

strona zewnętrzna



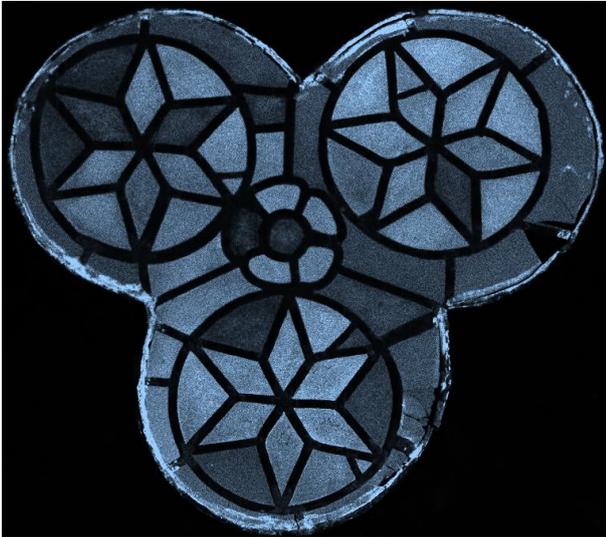
Sn-KA

Mapa cyny przedstawia dokładnie położenie oraz zakres występowania lutów.

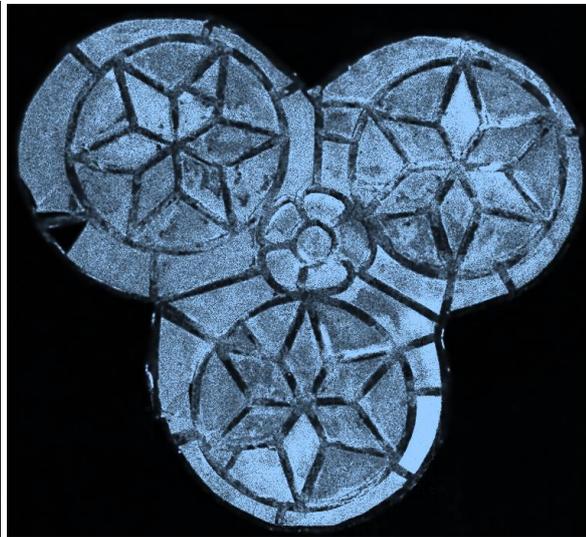


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Ca-KA

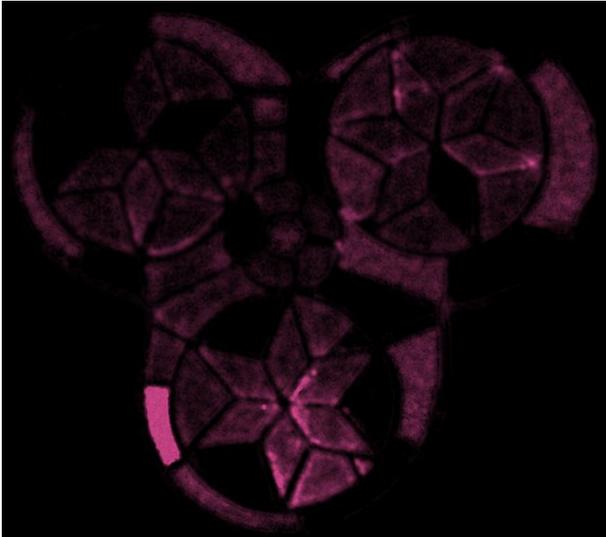
Wapń występuje na obrzeżach rozety, co potwierdza wcześniej (przy omawianiu występowania tytanu) postawioną hipotezę o występowaniu na granicy witraż maswerk zaprawy lub farby.

Ponadto wapń występuje we wszystkich szklach, ale jego stężenie w warstwach powierzchniowych jest zróżnicowane. Od strony wewnętrznej szkła, na których (ryc. 2) występują wyraźne korozyjne nawarstwienia wykazują zdecydowanie wyższe stężenie tego pierwiastka. Od strony zewnętrznej obserwujemy wyraźnie wyższe stężenie wapnia na wszystkich szybkach.

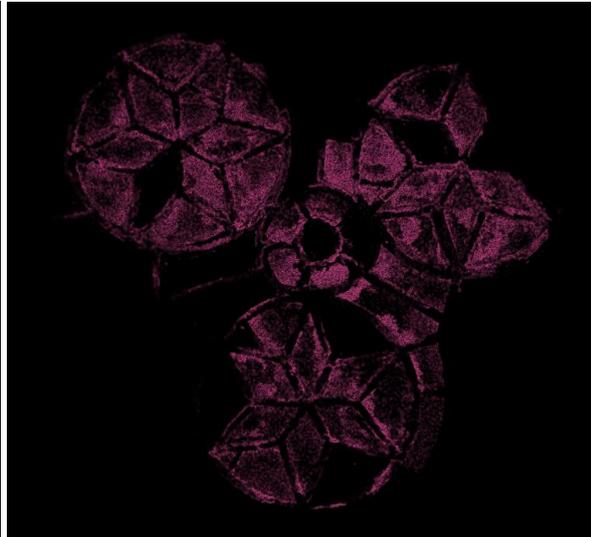


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



K-Ka – Rh-KA

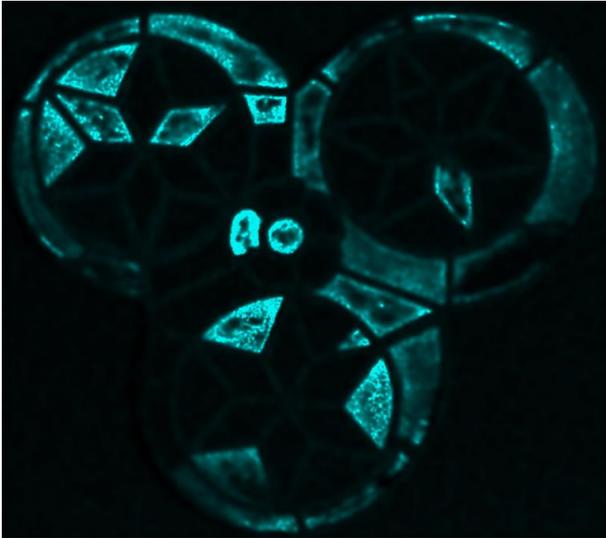
Potas obecny jest w szklach i częściowo w nawarstwieniach. Zaznacza się wyraźnie mniejsze jego stężenie po stronie zewnętrznej witraża, co jest związane z mechanizmem korozji i większą rozpuszczalnością związków potasu powstałych w wyniku korozji szkła pod wpływem opadów atmosferycznych, co prowadzi do ich częściowego wyługowywania od tej strony.

Potas występuje zarówno w szklach oryginalnych jak i wtórnych. Jego obecność stwierdzono w oryginalnych szklach: żółtych, niebieskich i białych w odcieniu zielonkawym oraz wtórnych białych w odcieniu zielonkawym. Nie stwierdza się potasu we wtórnych szklach: białych w odcieniu żółtym oraz żółtych i niebieskich.

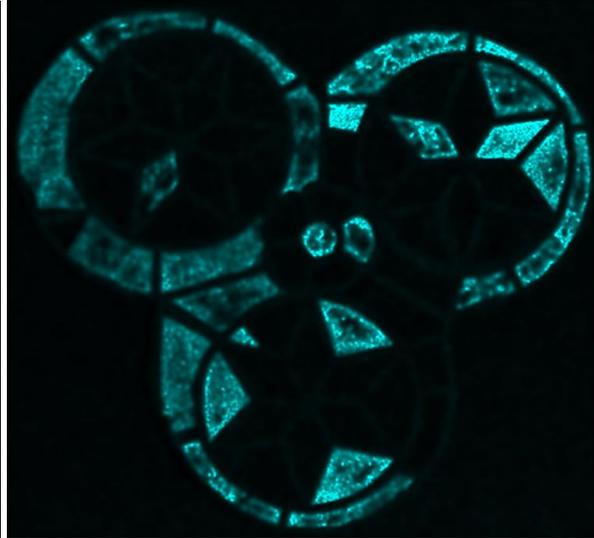


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



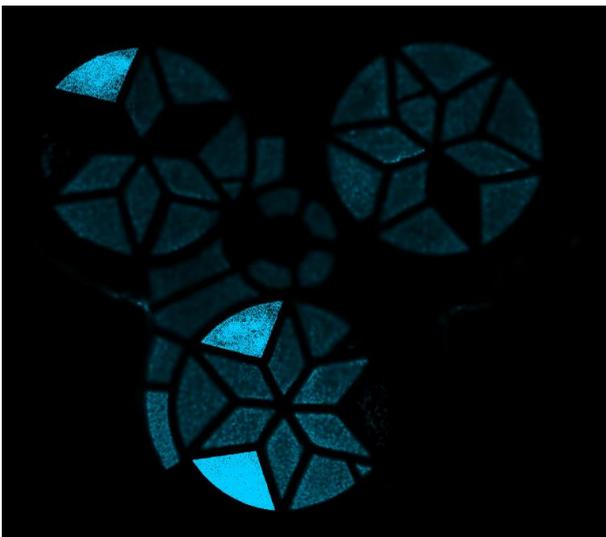
strona zewnętrzna



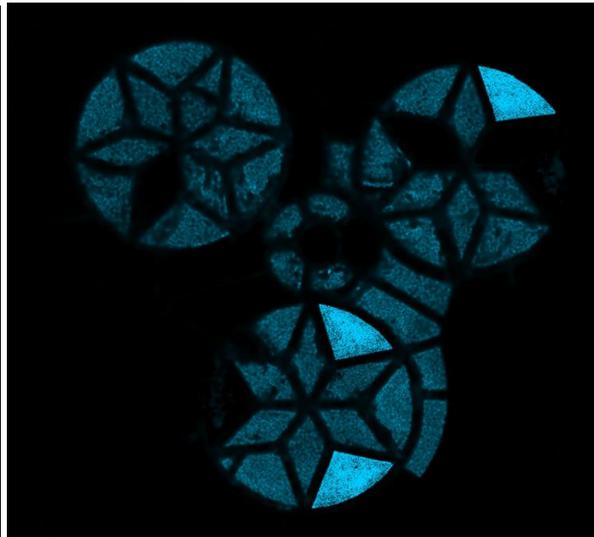
Cr-KA

Zauważalna jest pełna zgodność występowania chromu po obu stronach witraża, występuje we wszystkich szklach (białych w odcieniu żółtym i zielonkawym, żółtych, niebieskich i czerwonym), które nie są pokryte grubymi warstwami korozyjnymi, czyli tych które możemy zaliczyć do wtórnych.

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Mn-Ka – Cr-KA

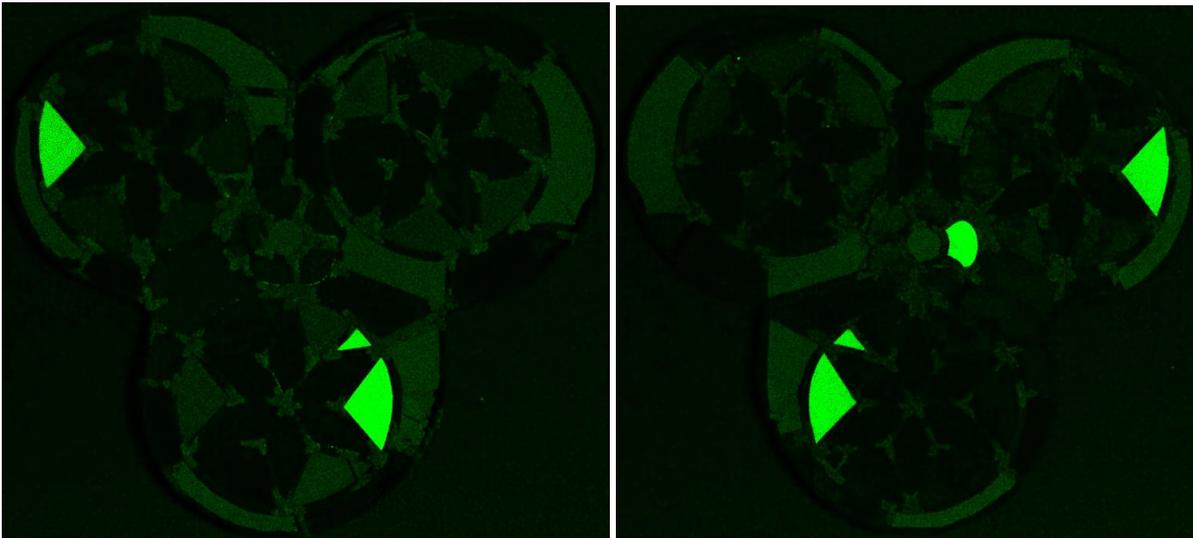


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

Porównując występowanie chromu i manganu zaznacza się wyraźna tendencja, że w szklach (wórných) w których występuje chrom nie występuje mangan. Występuje on natomiast we wszystkich szklach oryginalnych. Wyjątek stanowią trzy wtórne szkła niebieskie, w których występuje zarówno chrom jak i mangan (jedno w górnym lewym kole i dwa w dolnym).

strona wewnętrzna

strona zewnętrzna



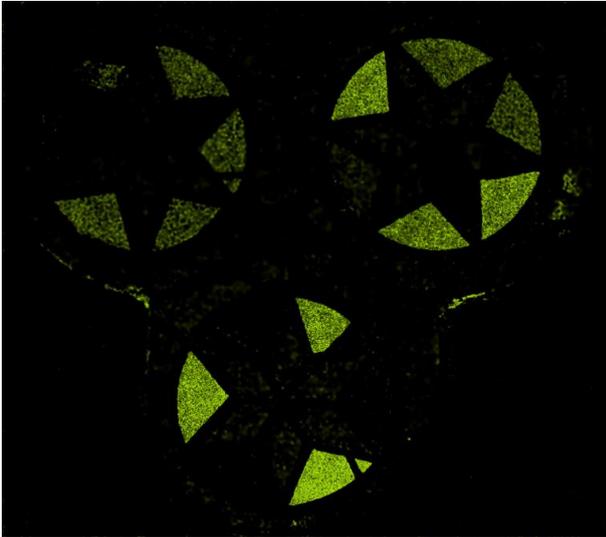
Cu-KA

Miedź występuje w niewielkim stężeniu w większości szkieł niebieskich oraz białych w tonacji zielonkawej. Natomiast dominujące jej ilości stwierdzono w czterech, wtórnych szklach: trzech niebieskich (w lewym górnym kole oraz w dolnym) i po zewnętrznej stronie czerwonego (wtórnego) szkła, co świadczy o powłokowym charakterze barwienia tego szkła. W szklach o najwyższych stężeniach miedzi nie występuje mangan.

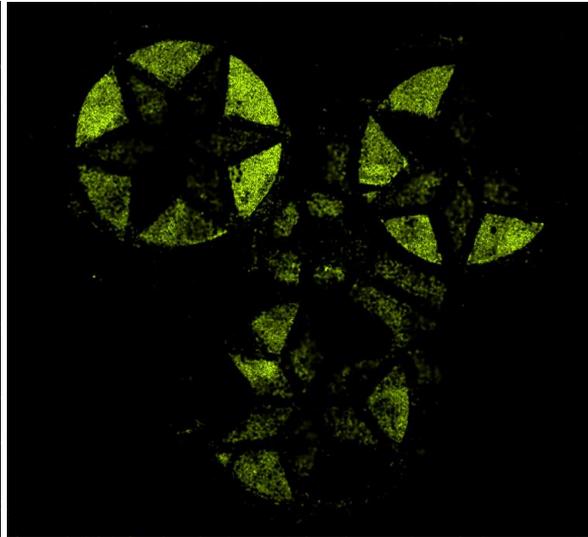


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



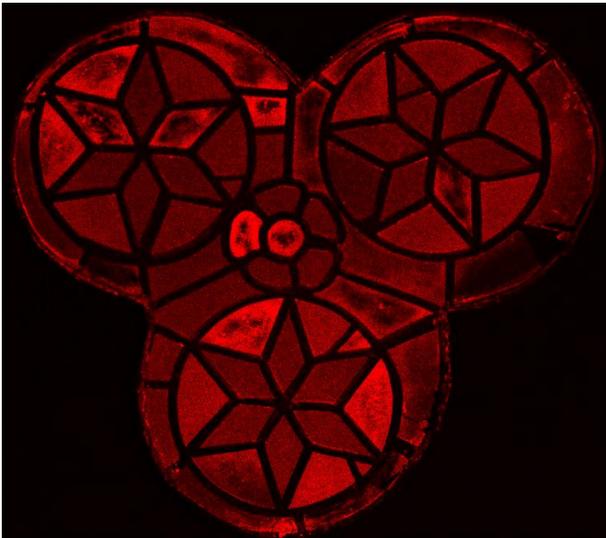
strona zewnętrzna



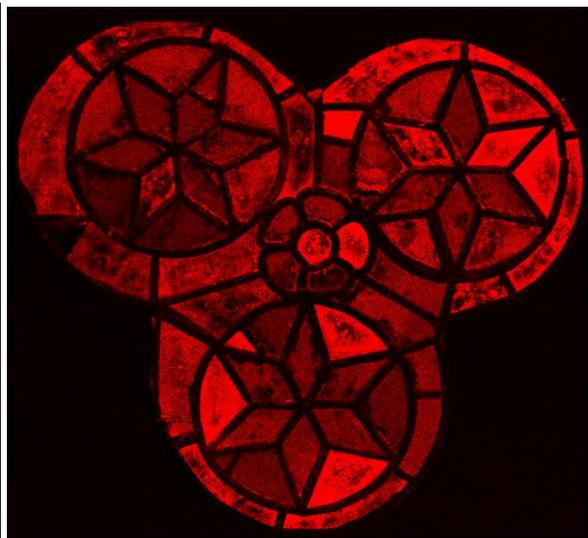
Zn-KA – bcgr(F3)

Cynk występuje tylko w niektórych szklach niebieskich, aczkolwiek w zewnętrznych warstwach korozyjnych jest jego nieco więcej. W miejscach występowania cynku w największym stężeniu brak jest związków chromu, a miedź występuje w śladowych ilościach.

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Fe-KA

Żelazo występuje na powierzchni wszystkich szkieł, jednakże w różnym stężeniu. Najwyższe stężenie żelaza stwierdzono we wtórnych szklach żółtych i niebieskich, co można

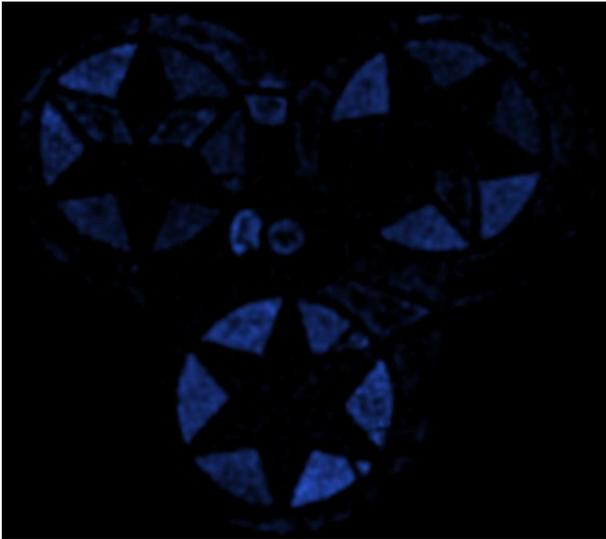


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

powiązać zarówno z budową szkła jak i obecnością powierzchniowej patyny, nałożonej celem scalenia kolorystycznego kwatery.

strona wewnętrzna

strona zewnętrzna



Co-KA – F3

Oprócz występowania kobaltu we wszystkich oryginalnych i wtórnych szklach niebieskich stwierdzono jego obecność we wtórnych szklach białych i czerwonym oraz trzech żółtych.

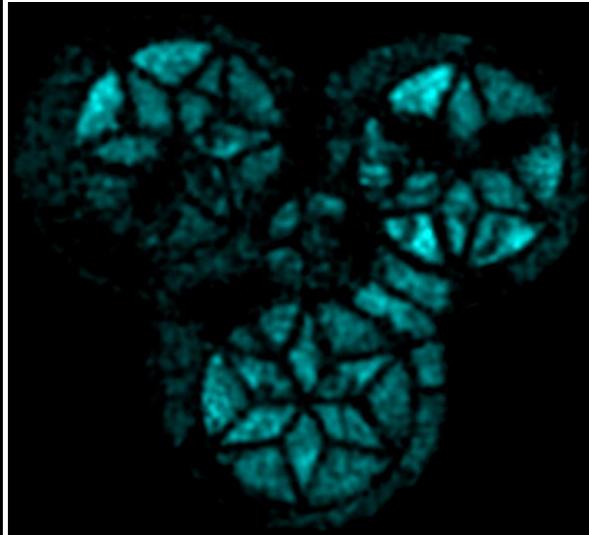


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

strona wewnętrzna



strona zewnętrzna



Ba-LB1 – bcgr (F3)

Bar rozłożony jest dość równomiernie na wszystkich oryginalnych i wtórnych szklach z wyjątkiem, trzech wtórnych żółtych, wtórnym czerwonych oraz białych w odcieniu żółtawym. Występowanie baru musi zostać potwierdzone w wyniku dalszych badań, gdyż pobrane próbki do analizy w mikroobszarach z zastosowaniem SEM-EDS nie potwierdziły obecności baru.

Reasumując, na podstawie wykonanej analizy makroXRF, możemy wysunąć wnioski zarówno dotyczące budowy poszczególnych szkiełek witrażowych jak również budowy warstw korozyjnych, uwzględniając, że metoda umożliwia analizę rozłożenia pierwiastków o masie atomowej poczynając od potasu, stąd nie było możliwości wykonania analizy m.in. na obecność sodu czy krzemu. Tak więc:

- stwierdzono bardzo dużą różnorodność w budowie zarówno szkieł oryginalnych jak i wtórnych,
- podstawą do podziału szkieł na oryginalne i wtórne może być występowanie korozyjnych nawarstwień szczególnie na części wewnętrznej witrażu, część zewnętrzna wykazuje większy stopień korozji, występuje ona również na nowych szklach,
- na podstawie powyższego kryterium można wytypować jako szkła wtórne (późniejsze): wszystkie białe zarówno o odcieniu żółtawym jak i zielonkawym z



wyjątkiem czterech, wśród żółtych gwiazdek trzy, niebieskich pięć i fragment szóstego i dwa szkiełka w czerwone i białe w środkowym kwiatku,

- analizując budowę poszczególnych szkieł stwierdzono obecność następujących pierwiastków:

- szkła białe w odcieniu żółtym (wtórne): Cr, Co, Ca, Fe,

- szkła białe w odcieniu zielonkawym (oryginalne): K, Mn, Ca,

 - (wtórne): Ba, Cu/Mn, Cr, Co,

- czerwone płatki w kwiatku (oryginalne): K, Ba, Mn

 - (wtórne): Cu (od zewnątrz), Cr, Co,

- biały środek (wtórny): K (od wnętrza), Ba, Cu, Cr, Co,

- żółte gwiazdki (oryginalne): K, Mn,

 - (wtórne): Cr, Fe,

- niebieskie tło (oryginalne): K, Ba, Cu, Mn, Zn, Co,

 - (wtórne): I: Ba, Cu, Cr, Co,

 - II: Ba, Mn, Cr, Co.

Wśród szkieł niebieskich występuje największa różnorodność co do ich składu. Można wyróżnić minimum trzy rodzaje (oryginalne i dwa rodzaje wtórnego), chociaż jeszcze jedno szkło budzi wątpliwości co do jego klasyfikacji (oryginalne czy późniejsze).

Wapń i żelazo występują we wszystkich szkiełach, Ca w większym stężeniu w oryginalnych, Fe w większym stężeniu w szkiełach wtórnych.

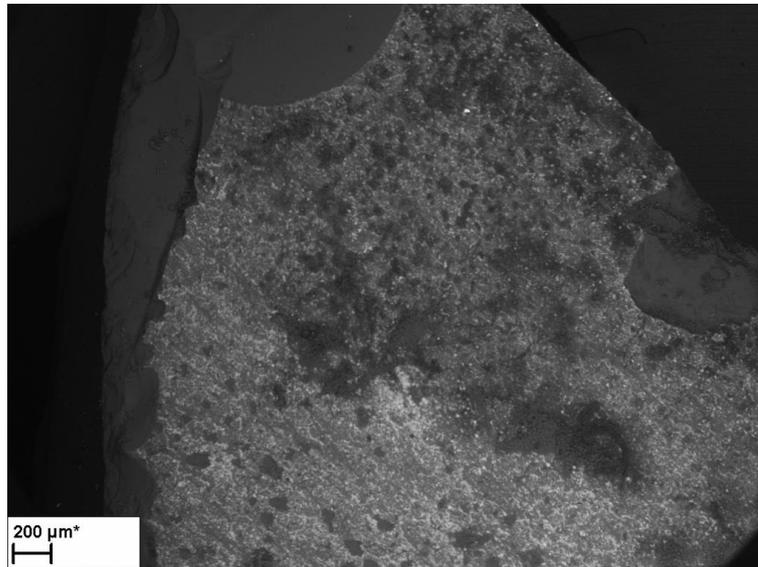


J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

IV. BUDOWA FRAGMENTU SZKŁA I NAWARSTWIENI METODĄ SEM-EDS

W trakcie demontażu witraża, wykonawcy odnaleźli fragment szkła średniowiecznego, które poddano badaniom.

Jest to fragment szkła białego w tonacji zielonkawej, z grubymi białoszarymi nawarstwieniami (ryc. 3).

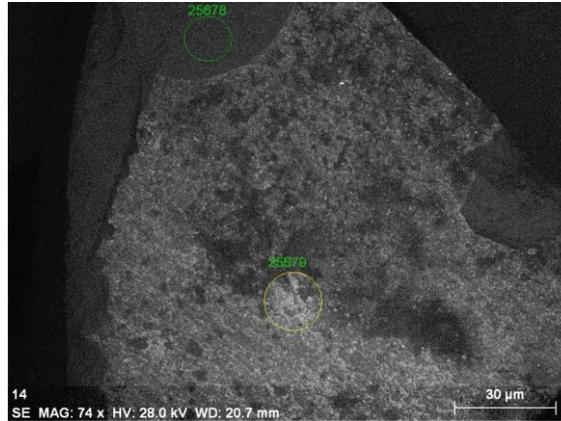


Ryc. 3. Tekstura szkła średniowiecznego wraz z nawarstwieniami poddanego analizie SEM-EDS

Analizę składu pierwiastkowego przeprowadzono metodą nieinwazyjną SEM-EDS (w mikroskopie ułożono cały fragment, który po analizie w niezmiennym składzie odzyskano). Badanie przeprowadzono w dwóch punktach: w obszarze przełamu celem określenia budowy szkła oraz w warstwie powierzchniowej pokrytej nawarstwieniami. Miejsca i zakres analizy zaznaczono na poniższej rycinie (ryc. 4).



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu



Ryc. 4. Miejsca przeprowadzanej analizy szkła (25678) i warstwy powierzchniowej (25679)

Tabela 1. Skład pierwiastkowy szkła i nawarstwienia

Spectrum	C	O	Na	Mg	Si	P	S	K	Ca	Ti	Mn	Fe	Cu	Pb
25678	0.12	43.53	8.48	0.60	30.99	-	0.34	3.21	9.84	-	-	0.44	0.39	2.07
25679	5.79	53.25	1.38	0.20	10.49	0.02	1.88	0.97	7.67	0.14	0.51	4.91	0.50	12.29

Z przedstawionych danych wynika, że analizowane szkło należy zaliczyć do szkieł sodowo-potasowo-wapniowych-krzemianowe z dodatkiem ołowiu, a żelazo i miedź decydują o tonacji zielonkawej.

W nawarstwieniu (na powierzchni) stwierdzono obniżoną zawartość sodu, potasu, oraz nieco wapna, wzrosłą ilość ołowiu, siarki i węgla, obecna jest też krzemionka, co jest typowe biorąc pod uwagę mechanizm korozji przebiegu korozji.

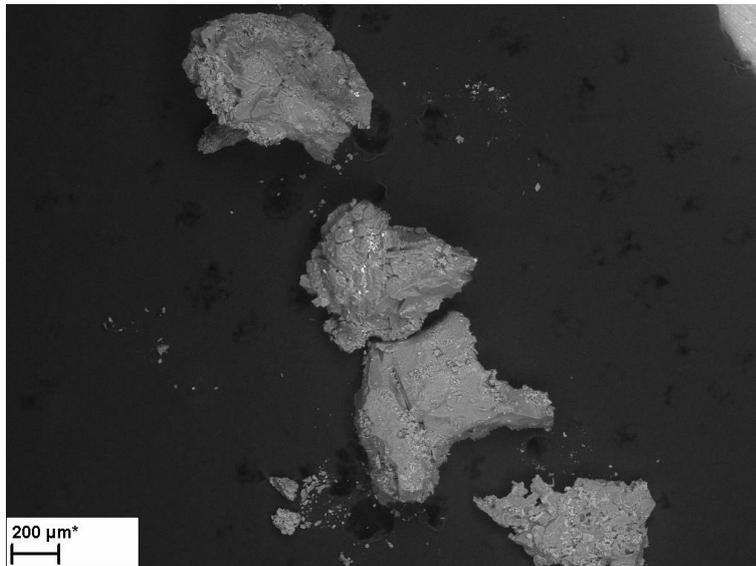
Z rozetki witrażowej pobrano próbkę nawarstwienia. Było to nawarstwienie, powstałe na szkiełku o barwie niebieskiej od strony zewnętrznej witraż (nr 10 – ryc. 5 i 6). Jego skład analizowano metodą SEM-EDS. Charakteryzuje się ono białą szarą barwą, zbitą nieporowatą teksturą, poprzetastaną drobnymi kryształami.



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu



Ryc. 5. Miejsce pobrania próbki nr 10

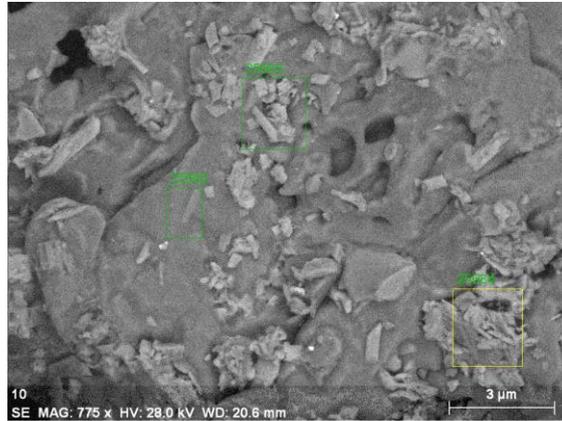


Ryc. 6. Próbkę nr 10 – nawarstwienie ze szkła niebieskiego (fot. dr G. Trykowski)

Kolejna rycina przedstawia miejsca wykonanej analizy (ryc. 7).



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu



Ryc. 7. Tekstura nawarstwienia i miejsca wykonania analizy SEM-EDS (fot. dr G.Trykowski)

Tabela 2.

Skład pierwiastkowy nawarstwienia w % masowych

Spectrum	C	O	Mg	Si	P	S	K	Ca	Mn
25682	6.59	57.76	4.27	0.43	-	13.12	17.83	-	-
25683	7.50	62.44	1.97	0.61	0.17	10.29	13.63	2.83	0.57
25684	5.84	56.07	0.96	0.62	0.37	13.01	15.77	6.73	0.63

Na podstawie tej analizy stwierdzono zróżnicowanie w budowie nawarstwień, w których dominującą rolę pełnią siarka potas i magnez, przypuszczalnie są to głównie siarczany i w mniejszym stopniu węglany potasu i magnezu oraz wapnia, w analizowanej próbce zaznacza się również obecność żeluz krzemionkowego.

Obecność siarczanów w tym nawarstwieniu stwierdzono metodą FT-IR.



J. W. Łukaszewicz, Badania konserwatorskie rozetki witrażowej ze wschodniego okna katedry św. Jana Chrzciciela i św. Jana Ewangelisty w Toruniu

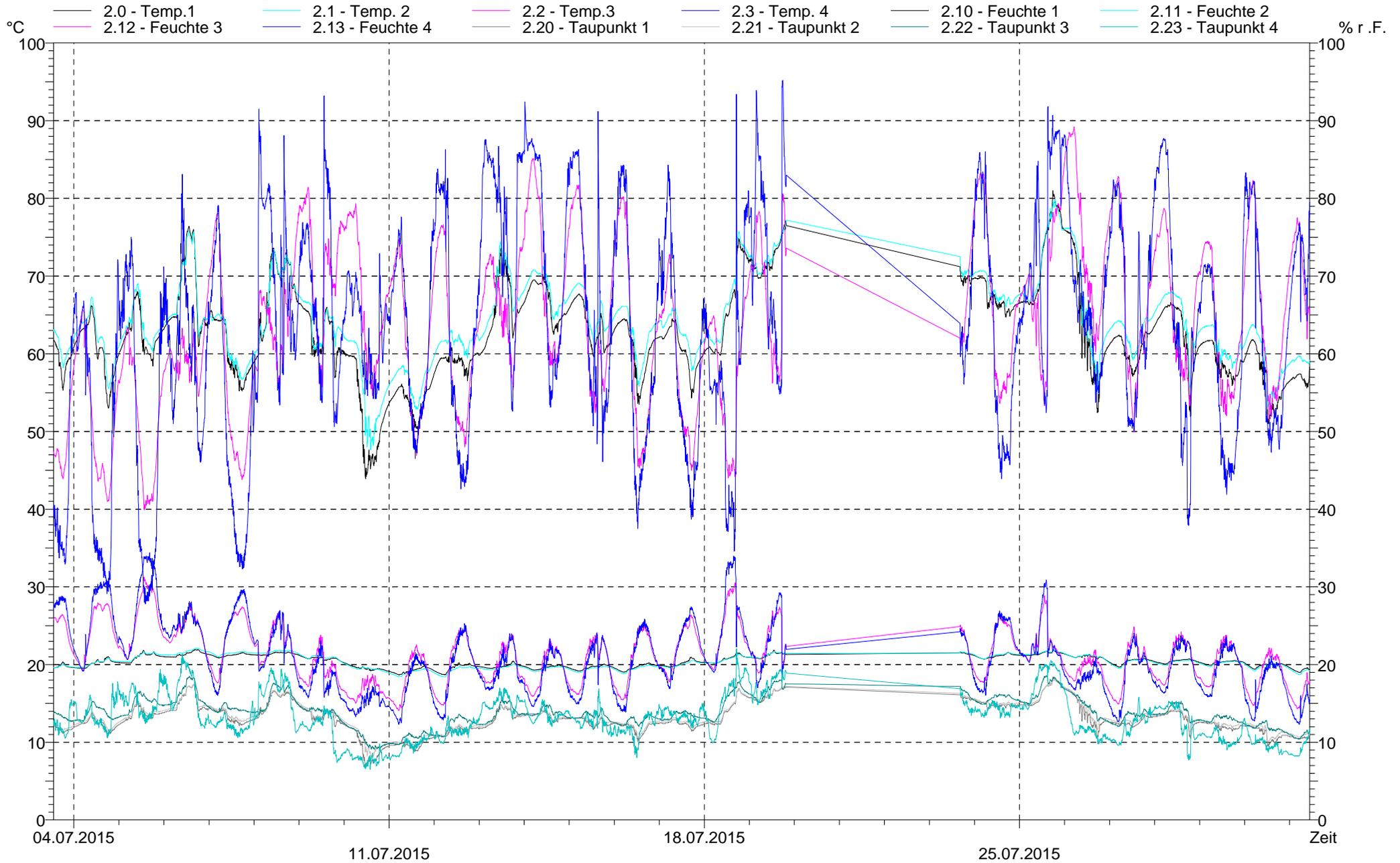
V. WNIOSKI

Zastosowana metoda makroXRF do analizy szkielek witrażowych pozwoliła na:

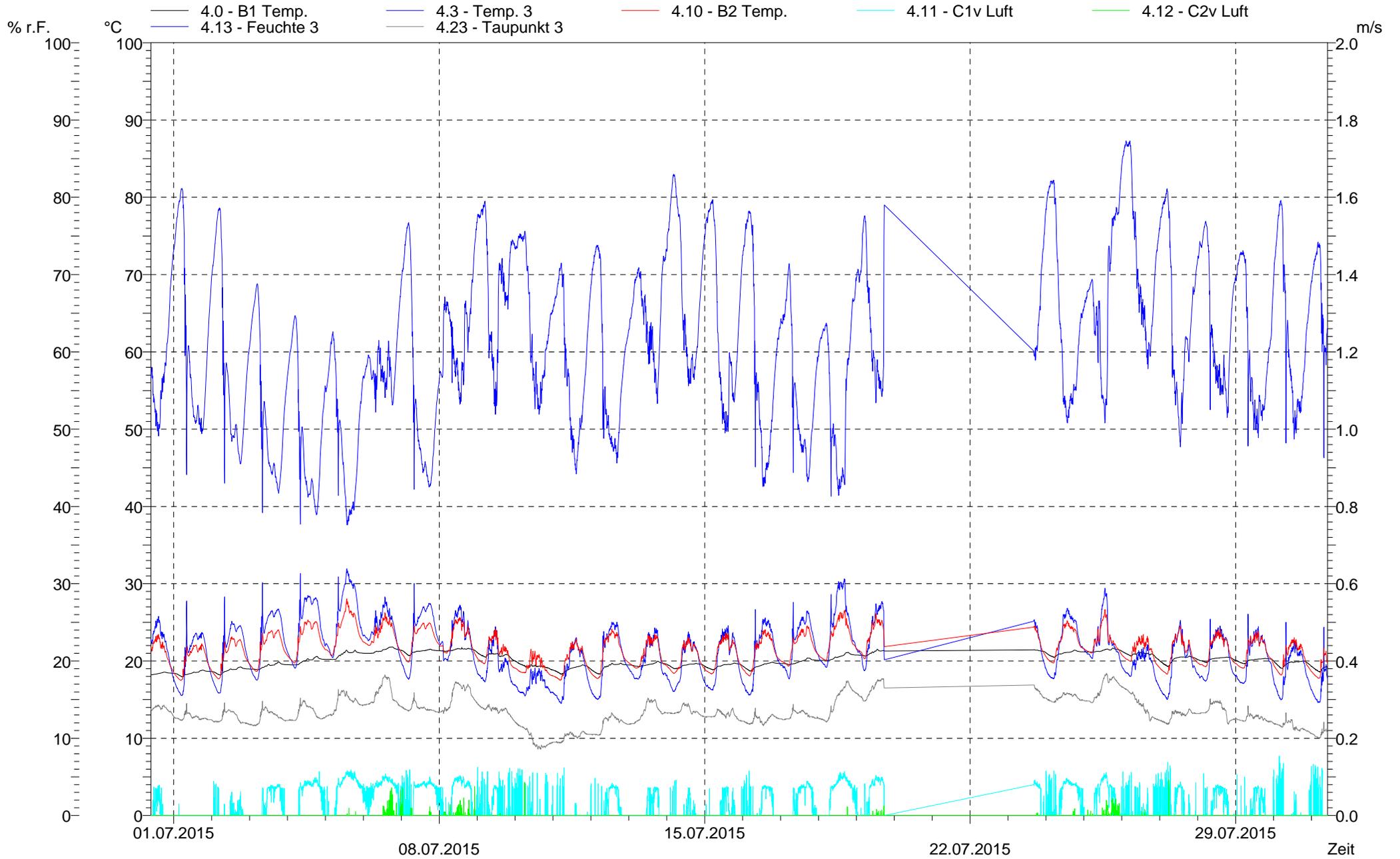
- Zdeterminowanie jakościowej budowy szkielek i warstw powierzchniowych analizowanego witraża.
- Jednocześnie uzyskane wyniki analizy jakościowej w postaci map występowania poszczególnych pierwiastków pozwalają na ograniczenie zakresu badań inwazyjnych i dokonania precyzyjnego wyboru miejsc pobierania próbek do badań ilościowych.
- Jest to jedna z metod, która musi być połączona z innymi metodami analitycznymi celem pełnego wyjaśnienia budowy szkielek i nawarstwień oraz wyjaśnienia mechanizmu korozji.

2015-07-31-L1.amr

Klimamessungen Leslau 1 03.-31.07.2015

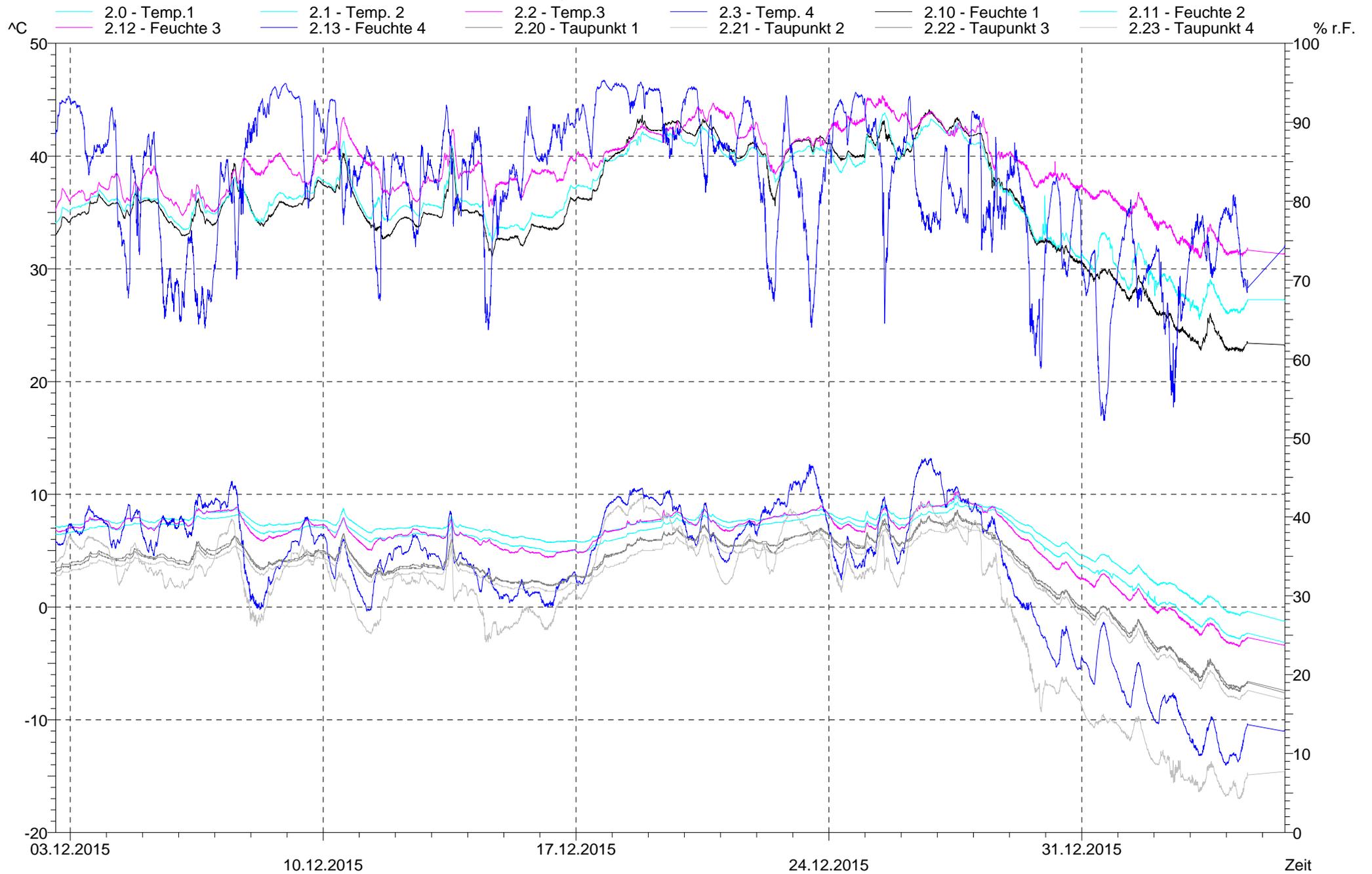


Klimamessungen Leslau L2 01.07.-31.07.2015

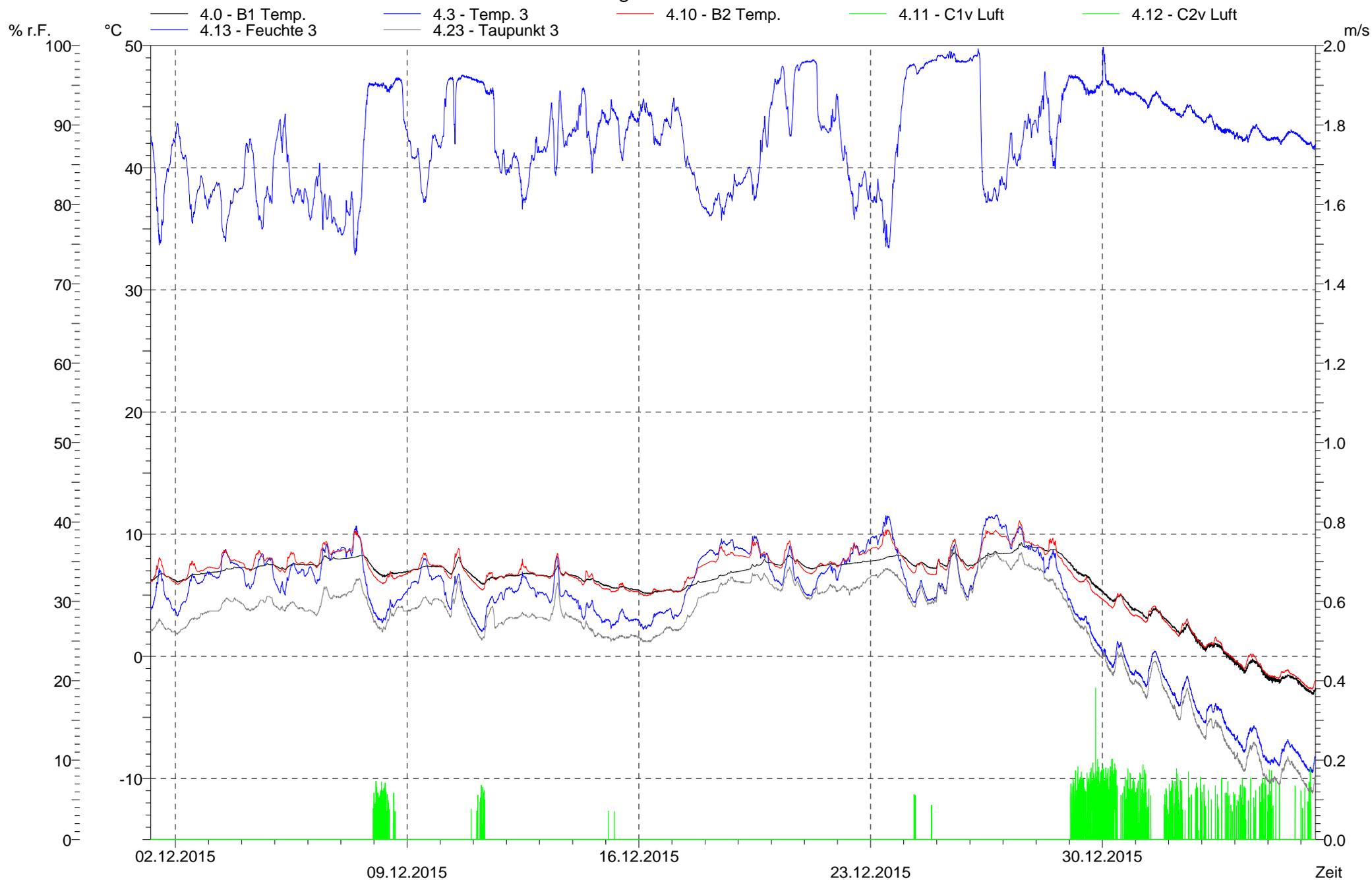


2016-01-05-L1.amr

Klimamessungen Leslau L1 03.12.2015-05.01.2016

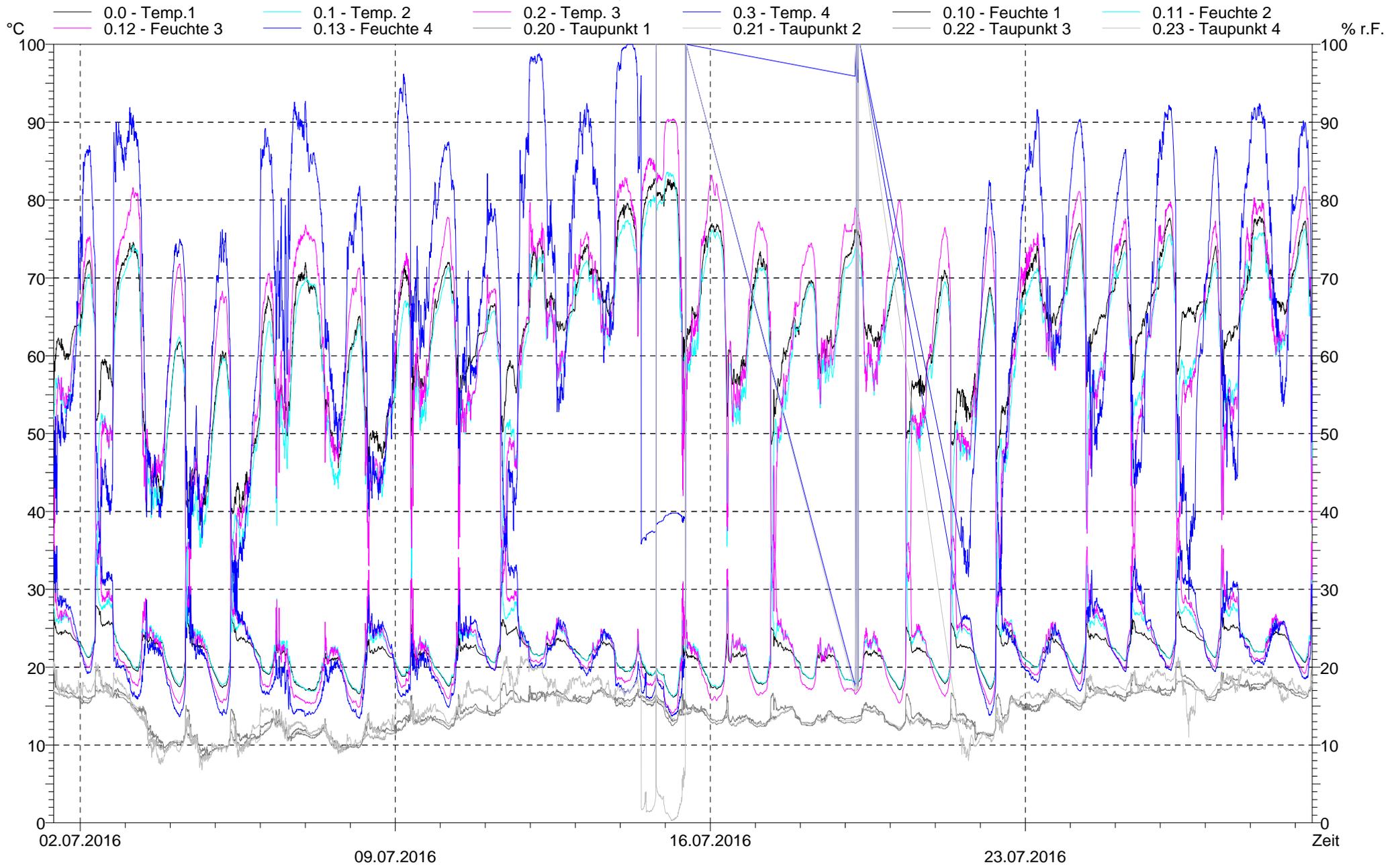


Klimamessungen Leslau L2 02.12.2015-05.01.2016



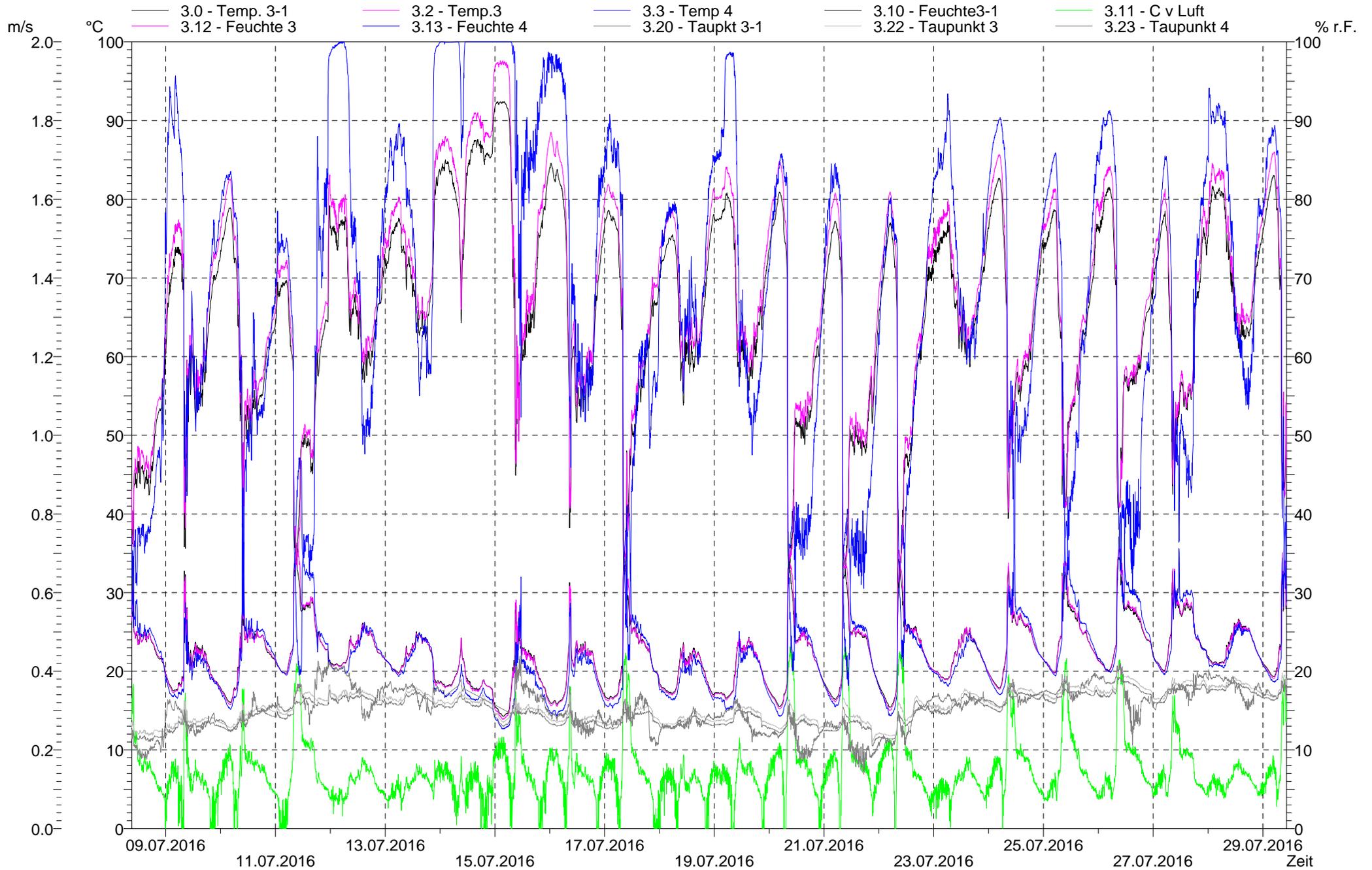
2016-07-29- thorn 1.amr

Klimamessungen Thorn 1 01.-29.07.2016

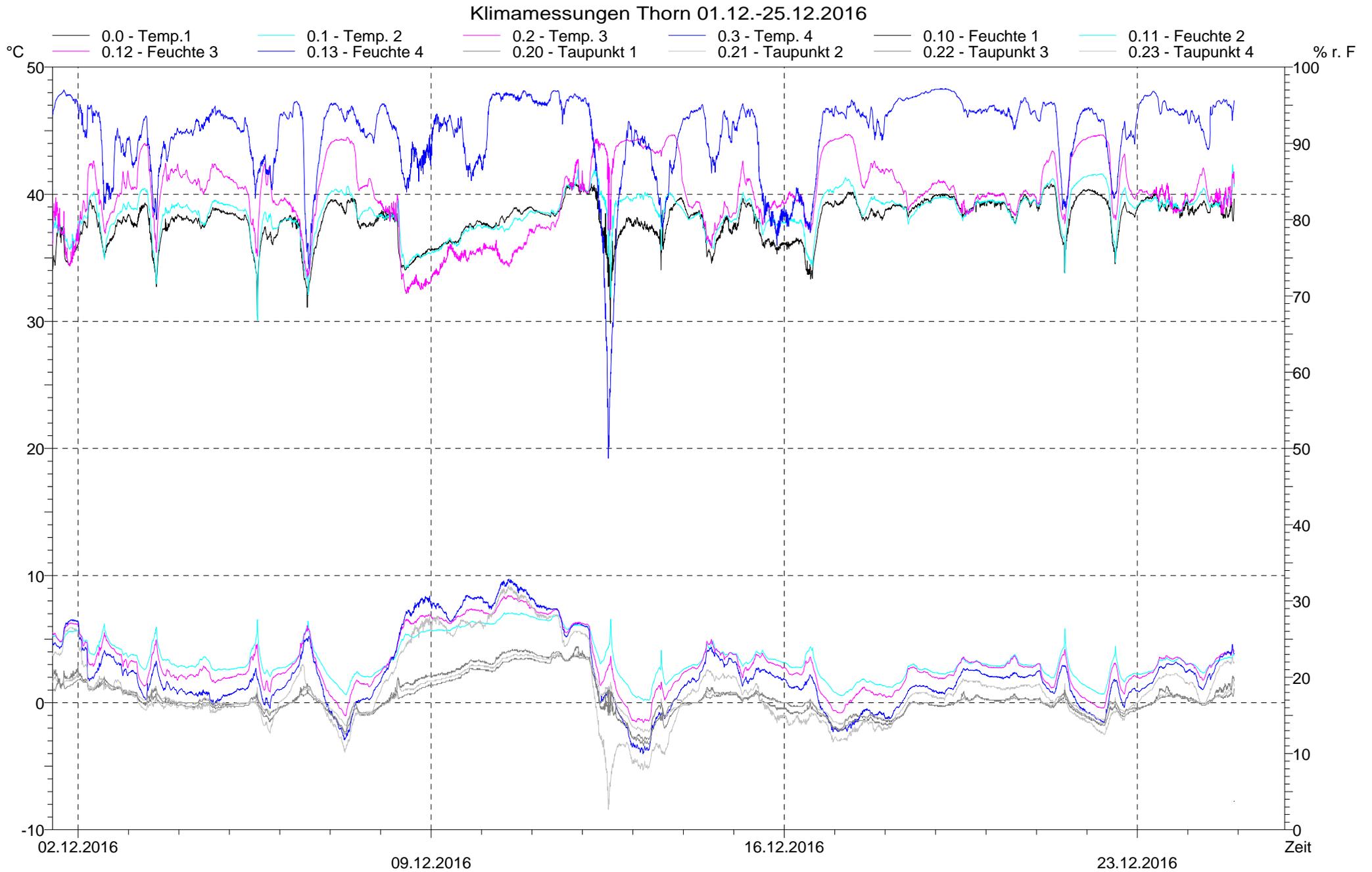


2016-07-27- thorn 2.amr

Klimamessungen Thorn 2 08.-29.07.2016

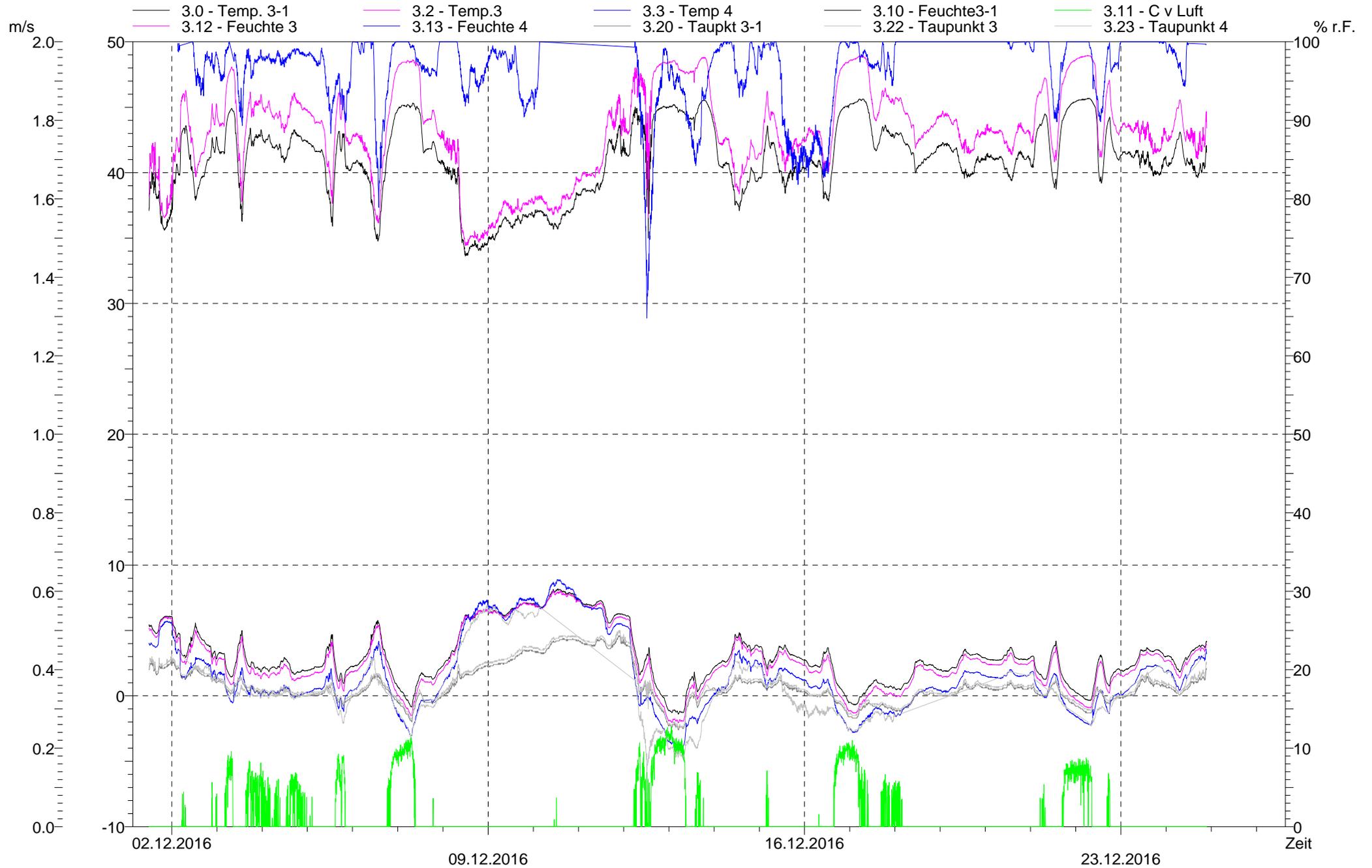


2016-12-24- thorn 1.amr



Geräteausfall 26.12.-05.01.2017

Klimamessungen Thorn 2 01.-25.12.2016



Literatur: Restaurierung/Konservierung

- Bernardi, A. et al.; "Conservation of Stained Glass Windows with Protective Glazing: Main Results from the European VIDRIO Research Programme," *Journal of Cultural Heritage*, 14 (2013) 527-536
- Domaslowski, W., Kwiatowski, E.; *Annales du 2^d Congrès des Journées Internationales du Verre*, Leyde 30 juin-4 juillet 1962, S. 137-151
- Maas-Diegeler, G.; Glasdosimeter-Studie zur Bewertung der Außenschutzverglasungen an Kirchen der Standorte Leslau und Thorn, Fraunhofer ISC, Fachbereich Kulturgüterschutz, Bronnbach
- Müller, W. et al.; Forschungsbericht: „Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien“; Kennzeichen 515-7291 Bau 5026 G5; BAM-Forschungsbericht 217, 1997
- Oidtman, S.; „Die Schutzverglasung eine wirksame Schutzmaßnahme gegen die Korrosion an wertvollen Glasmalereien“ Verlag M. Brimberg, Aachen, 1994, ISBN 90-386-0344-4
- Oleszczuk, S.; Dokumentation zur Restaurierung der Glasmalereien im Dom zu Leslau, 2015
- Oleszczuk, S.; Dokumentation zur Restaurierung der Glasmalereien in der Johanniskirche Thorn, 2016
- Torge, M. et al.; „Schadensbilder und Glaszusammensetzungen - Phänomene und Ursachen“ (Vortrag zum Friedrichsfelder Kolloquium 04.03.96) In: das 19. und 20. Friedrichsfelder Kolloquium, Vorträge zur Sicherung und Wiederherstellung historischer Glasmalerei: Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Arbeitsstelle für Glasmalereiforschung des CVMA und der BAM, Berlin, Verlag für neue Wissenschaft GmbH,
- Torge, M. et al.; DBU-Abschlussbericht „Modellhafte Restaurierung und Schutz von schwer geschädigten Glasmalereien und Ornamentbleiverglasungen an bedeutenden sakralen Bauten in einer durch Umweltschadstoffe hoch belasteten Landschaftsregion Niederschlesiens“ Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2015
- Torge, M. et al. "Protection of Stained-Glass-Window -Case Studies in Poland", In Recent Advances in Glass and Ceramics Conservation 2016, ICOM-CC Working Group "Glass and Ceramics" Interim Meeting, The Eugeniusz Geppert Academy of Art and Design, Wrocław, Poland, ed. H. Roemich and L. Fair, 53-62. Paris: International Council of Museums - Committee for Conservation (ICOM-CC), 2016
- Wolf, A.; Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien, Mainz, von Zabern 2000, S. 77-97
- VDI 3955 Blatt 2 „Exposition von Glassensoren“, 1993

Literatur zu mikrobiologischen Untersuchungen

- Bartosik, M., Zakowska, Z., Cedzinska, K. and Rozniakowski, K. (2010) Biodeterioration of Optical Glass Induced by Lubricants Used in Optical Instruments Technology. *Pol J Microbiol* **59**, 295-300.
- Biswas, J., Sharma, K., Harris, K.K. and Rajput, Y. (2013) Biodeterioration agents: Bacterial and fungal diversity dwelling in or on the pre-historic rock-paints of Kabra-pahad, India. *Iranian journal of microbiology* **5**, 309-314.
- Cappitelli, F., Zanardini, E. and Sorlini, C. (2004) The biodeterioration of synthetic resins used in conservation. *Macromol Biosci* **4**, 399-406.
- Carmona, N., Laiz, L., Gonzalez, J.M., Garcia-Heras, M., Villegas, M.A. and Saiz-Jimenez, C. (2006) Biodeterioration of historic stained glasses from the Cartuja de Miraflores (Spain). *Int Biodeter Biodegr* **58**, 155-161.
- Krumbein, W.E., Urzi, C.E. and Gehrman, C. (1991) Biocorrosion and Biodeterioration of Antique and Medieval Glass. *Geomicrobiol J* **9**, 139-160.
- Otlewska, A., Adamiak, J. and Gutarowska, B. (2014) Application of molecular techniques for the assessment of microorganism diversity on cultural heritage objects. *Acta Biochim Pol* **61**, 217-225.
- Pangallo, D., Buckova, M., Krakova, L., Puskarova, A., Sakova, N., Grivalsky, T., Chovanova, K. and Zemankova, M. (2015) Biodeterioration of epoxy resin: a microbial survey through culture-independent and culture-dependent approaches. *Environ Microbiol* **17**, 462-479.
- Pinar, G., Garcia-Valles, M., Gimeno-Torrente, D., Fernandez-Turiel, J.L., Ettenauer, J. and Sterflinger, K. (2013) Microscopic, chemical, and molecular-biological investigation of the decayed medieval stained window glasses of two Catalan churches. *Int Biodeter Biodegr* **84**, 388-400.
- Rajkowska, K., Otlewska, A., Kozirog, A., Piotrowska, M., Nowicka-Krawczyk, P., Hachulka, M., Wolski, G.J., Kunicka-Styczynska, A., Gutarowska, B. and Zydziak-Bialek, A. (2014) Assessment of biological colonization of historic buildings in the former Auschwitz II-Birkenau concentration camp. *Ann Microbiol* **64**, 799-808.
- Rodrigues, A., Gutierrez-Patricio, S., Miller, A.Z., Saiz-Jimenez, C., Wiley, R., Nunes, D., Vilarigues, M. and Macedo, M.F. (2014) Fungal biodeterioration of stained-glass windows. *Int Biodeter Biodegr* **90**, 152-160.
- Schabereiter-Gurtner, C., Pinar, G., Lubitz, W. and Rolleke, S. (2001) Analysis of fungal communities on historical church window glass by denaturing gradient gel electrophoresis and phylogenetic 18S rDNA sequence analysis. *J Microbiol Meth* **47**, 345-354.

Projektteam:

An der Bearbeitung des Projektes (BAM-Vorhaben 4146) waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

Projektleiter, BAM 4.2	Dr.-Ing. Manfred Torge
Projektkoordinator (extern)	PD Dr. Erhard Drachenberg
wissenschaftlicher Gutachter (extern)	Dr. rer. nat. habil. Wolfgang Müller
wissenschaftlicher Gutachter (extern)	Dr.-Ing. U. Schaaf
BAM 4.2	Dr.-Ing. Michael Bücken
ESEM/EDX	Dipl.-Ing. (FH) Ines Feldmann
BAM 4.	Dr. rer.nat. Jörg Toepel,
Mikrobiologische Untersuchungen	Dr. rer. nat. Nicole Knabe

Externe Prüfinstitute und wissenschaftliche Einrichtungen:

Passivsammler:	passam ag, Labor für Umweltanalytik, CH-8708 Männedorf
Glasdosimeter-Studie:	Gabriele Maas-Diegeler; Fraunhofer ISC, Fachbereich Kulturgüterschutz, Bronnbach
Universität Torun	Prof. Jadwiga W. Lukaszewicz
XRF-Untersuchungen	Prof. Piotr Targowski
Hochschule für Wirtschaft und Technik	Prof. Christian Stadelmann
FTIR-Spektroskopie	

Das Gesamtprojekt wurde gefördert durch die „Deutsch-Polnische Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz“ (DPS) in Görlitz mit Mitteln der „Deutschen Bundesstiftung Umwelt“ in Osnabrück (DBU) und der „Beauftragten für Kultur und Medien“ der Bundesrepublik Deutschland (BKM)

