

**Umweltbedingte Degradation synthetischer Konservierungs- und
Restaurierungsmittel:
Erfassung, modellhafte Konservierung und Restaurierung an
ausgewählten Beispielen, digitale Wissensvermittlung**



**gefördert von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt
Aktenzeichen 36080/01, 36080/02
Abschlussbericht**

Verfasser:

Prof. Dr. Steffen Laue mit Textbeiträgen von Prof. Mechthild Noll-Minor, Sonia Cárdenas,
Anja Romanowski, Martin Lehmann, Lukas Böwe, Henryk Kazmierczak, Dirk Jakob,
Kathrin Rahfoth und Ben Heuwing

Fachhochschule Potsdam – FB Stadt | Bau | Kultur –
Studiengang Konservierung und Restaurierung



Kooperationspartner:

Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum (BLDAM)
Eigenbetrieb Kulturbetriebe der Stadt Frankfurt (Oder)
BTU Cottbus – Brandenburgischer Landesbetrieb für Liegenschaften und Bauen (BLB)

Projektbeginn: 01.02.2021

Laufzeit: 48 Monate

Potsdam – April 2025

Inhaltsverzeichnis

Abbildungs- und Tabellenverzeichnis

Abkürzungen

Zusammenfassung

	Seite
1. Anlass und Zielsetzung	7
2. Arbeitsschritte und Methoden	
2.1 Entwicklung einer systematischen Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten	9
2.2 Entwicklung von Handlungsstrategien und deren modellhafte Umsetzung an ausgewählten Objekten	9
2.3 Digitale Wissensverbreitung – Neuprogrammierung der Datenbank POLYKON ...	11
3. Ergebnisse	
3.1 Systematische Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten.....	13
3.2 Entwicklung von Handlungsstrategien und deren modellhafte Umsetzung an ausgewählten Objekten	
3.2.1 Barockes Erbbegräbnis in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder	15
3.2.2 Wandbild „Mensch und Bildung“ der BTU Cottbus	40
3.2.3 Analyse und Begutachtung weiterer Objekte	48
3.3 Digitale Wissensverbreitung – Neuprogrammierung der Datenbank POLYKON (https://polykon.fh-potsdam.de/)	54
4. Diskussion und Fazit.....	57
5. Öffentlichkeitsarbeit.....	59
6. Literatur und Quellen.....	61

Abbildungsverzeichnis

- Abb. 1: Untersuchungen und Maßnahmen an mit Kunststoffen behandelten Objekten – Grafik: Steffen Laue und Mechthild Noll-Minor 2025
- Abb. 2: Interdisziplinäre Diskussion der durchgeführten Tests zu möglichen Konservierungsmaßnahmen am Objekt (hier Frankfurt/Oder) – Bild: Steffen Laue 2024
- Abb. 3: Barockes Erbbegräbnis in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder vor Projektbeginn 2019 – Bild: Steffen Laue 2019
- Abb. 4: UV-induzierte VIS-Lumineszenz (UV-Fluoreszenz) im oberen Bereich des Epitaphs mit der Wandmalerei, Fluoreszenzen deuten auf den Einsatz von Polymeren hin, dunkle Stellen in der Wandmalerei zeigen Retuschen an – Bild: Steffen Laue 2022
- Abb. 5: Barockes Erbbegräbnis mit Darstellung der aktiven Salzschadenszone (gelb schraffiert) und den Probenahmestellen, links sind die Bohrmehlentnahmestellen für die quantitative Salzuntersuchung rot markiert – Bild: Nicole Köllner 2020, ergänzt von Steffen Laue 2023
- Abb. 6: Vier Abbildungen von Querschliffen von Malschichtproben; 6a und 6b: Querschliff Probe M3 in Dunkelfeld- (6a) und UV-Beleuchtung (6b); 6c: Querschliff Probe M3 im Detail (UV-Beleuchtung) mit Darstellung der Schichtenabfolge 1-6 (Erläuterungen siehe Text); 6d: Querschliff Probe M10 (UV-Beleuchtung), hier dünner Polymerfilm (3) an der Oberfläche – Bilder von Steffen Laue 2024
- Abb. 7: FTIR-Spektrum der Probe M12 nach Extraktion mit Chloroform im Vergleich zu einem Spektrum von Paraloid B-72 mit relativ guter Übereinstimmung, Bild: Steffen Laue 2023
- Abb. 8: Quantitative Salzionenverteilung im linken Pilaster im Höhen- und Tiefenprofil mit 1: 0-5 cm, 2: 5-15 cm, 3: 15-25 cm und 4: 25-40 cm, Erläuterung siehe Text – Graphik: Steffen Laue 2023
- Abb. 9: Tagesdurchschnittswerte der Lufttemperatur (T) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rH) vom 01.08.2021 bis 31.07.2022 in unmittelbarer Nähe des Erbbegräbnisses, gelbe Sterne stellen die Kristallisationszeiten von Nitrokalit dar, Klimadaten wurden von Ellen Egel vom BLDAM gemessen – Graphik: Steffen Laue 2023
- Abb. 10: Kristallisationsabfolge löslicher Salze an der unteren Stelle 1 beim linken Pilaster bei fallender relativer Luftfeuchte (von rechts nach links) berechnet mit ECOS/RUNSALT unter Verwendung der IC-Daten von Probe 1/1 – Graphik: Steffen Laue 2023
- Abb. 11: Weißer mineralischer Belag auf der Wandmalerei bestehend aus Gips und Bleiweiß – Bild: Martin Lehmann 2024
- Abb. 12: links: nach Abnahme des aufliegenden Kunststofffilms mit weißem mineralischem Belag auf der Maleroberfläche, rechts: grau-gelbliche Lumineszenz des noch nicht reduzierten aufliegenden Kunststofffilms, UV-Licht – Bild: Martin Lehmann 2024
- Abb. 13: Detail der Wandmalerei (Jesus mit den Aposteln) vor den Konservierungsarbeiten mit dunklen Retuschebereichen und Vergrauungen der Oberflächen durch Alterung des Kunststofffilms, Bildbreite entspricht ca. 25cm – Bild: Steffen Laue 2021
- Abb. 14: Detail der Wandmalerei (Jesus mit den Aposteln) nach den Konservierungsarbeiten, Bildbreite entspricht ca. 30cm – Bild: Martin Lehmann 2025
- Abb. 15: Stuckmaterialien, Schadensbild im nördlichen Sockelbereich mit Klimamessgeräten – Bild: Lukas Böwe, 2022
- Abb. 16: Epitaphnische nach Abschluss der Konservierung und Ergänzung der Kalkstuckarchitektur vor dem Einbau der Metallplatten – Bild: Anke Höchel-Pradel 2024

- Abb. 17: linke Hälfte der rechten Doppel-Tafel im Vergleich von links nach rechts: VIS-Fotografie nach Abbau, Röntgenaufnahme, Materialkartierung – Bild: Henryk Kazmierczak 2022
- Abb. 18: Die vier Tafel nach der Retusche – Bild: Henryk Kazmierczak 2023
- Abb. 19: Schrifttafeln nach dem Wiedereinbau beim Erbbegräbnis – Bild: Henryk Kazmierczak 2024
- Abb. 20: Gesamtaufnahme des Wandbildes „Mensch und Bildung“ an der BTU Cottbus, 2023 – Bild: Mechthild Noll-Minor 2023
- Abb. 21: Detail der Glaskröselschichten mit Schadensbild, hier Grenze von grau zu braun mit anhaftender Grundierung auf der Unterseite der braunen Glaskröselschicht – Bild: Steffen Laue 2023
- Abb. 22: Querschliffe unterschiedlicher Glaskröselproben und mit unten anhaftenden Resten der Untermalung, links oben hellbraun, rechts oben hellrot, links unten dunkelrot, rechts unten aus einem blauen Bereich – Bilder: Steffen Laue 2023
- Abb. 23: Schadensbilder an Beton und Beschichtung – Bilder: Sonia Cárdenas und Anja Romanowski
- Abb. 24: DSC-Diagramm mit Darstellung der gemittelten Glasübergangstemperaturen der Glaskröselschichten CB009, CB010 und CB021 im Vergleich zu einem Acrylat, Bild: Roland Wetzelsch – Fa. Netzsch
- Abb. 25: Teil der Musterachse, Gesicht vor der Maßnahme – Bild: Sonia Cárdenas und Anja Romanowski 2022
- Abb. 26: Teil der Musterachse nach den durchgeführten Maßnahmen – Bild: Sonia Cárdenas und Anja Romanowski 2023
- Abb. 27: Kruzifix an der Ostwand der Burgkapelle in Ziesar – Bild: Steffen Laue 2024
- Abb. 28: Schloss Branitz Glasgemälde Treppenhausfenster nach der Rekonstruktion, Zustand nach der Restaurierung 2023/24 – Bild: Kathrin Rahfoth 2024
- Abb. 29: Rundrelief „Geschichte der Stadt Schwedt“ – Bild Steffen Laue 2024
- Abb. 30: Datenstruktur der Polykon-Datenbank – Bild: Ben Heuwing 2023
- Abb. 31: vollständig überarbeitete Eingabemaske mit einfacher Möglichkeit zum Einfügen von Verweisen über Referenznummern (hier [123] und Verweise auf existierende Datensätze (hier: „Ort“) – Bild: Bernhard Pruin

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Proben, Analytik und Ergebnisse – St. Marienkirche, Erbbegräbnis

Tabelle 2: Evaluation weiterer mit Kunststoffen behandelten Objekte

Abkürzungen

BLDAM – Brandenburgisches Landesamt für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum

DSC – dynamische Differenzkalorimetrie

FHP – Fachhochschule Potsdam

FTIR – Fourier-Transformations-Infrarotspektroskopie

IC – Ionenchromatographie

PBMA - Polybutylmethacrylat

PEMA - Polyethylmethacrylat

PMA – Polymethacrylat

PMMA – Polymethylmethacrylat

PVAc – Polyvinylacetat

Py-GC/MS – Pyrolyse-Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie

pXRF – portable Röntgenfluoreszenzspektroskopie

REM/EDX – Rasterelektronenmikroskopie gekoppelt mit Elementanalyse

u.a. – unter anderem

XRD – Röntgendiffraktometrie

Zusammenfassung

Im Rahmen des Projekts „Umweltbedingte Degradation synthetischer Konservierungs- und Restaurierungsmittel“ sind folgende drei Ziele erreicht worden:

1. Es wurde eine systematische Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten entwickelt, die Objektverantwortlichen als Handlungsanleitung zur Untersuchung und Begutachtung von entsprechenden Objekten dient, bevor anschließend individuelle Entscheidungen für eine konservatorische bzw. restauratorische Maßnahme getroffen werden können.

2. An zwei Pilotprojekten wurde die Herangehensweise erprobt, evaluiert und modifiziert mit anschließenden individuellen innovativen Konservierungen bzw. Restaurierungen der Objekte.

Das eine Denkmal ist das barocke Erbbegräbnis in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder, an den Lösungen zur Behandlung von gealterten Polymeren an einer Wandmalerei, an Stuckmaterialien und an schmiedeeisernen Schrifttafeln entwickelt worden sind.

Das zweite Objekt ist die mit einer speziellen Glaskröselbeschichtungstechnik 1972 erstellte Fassade an der Brandenburgischen Technischen Universität in Cottbus. Hier wurde Polyvinylacetat als Bindemittel der Glaskrösel verwendet, das nach ca. 50 Jahren Bewitterung im Außenbereich gravierende Schäden aufweist. Es wurden konservatorische-restauratorische Maßnahmen entwickelt und an einer Musterachse ausgeführt, die ein Lösungsweg für die gesamte Fassade sein kann.

Darüber hinaus wurden weitere mit Polymeren behandelte Denkmale wie beispielsweise Objekte aus Holz und Glas im Land Brandenburg untersucht und evaluiert. Hierbei zeigt sich, dass nicht jede Behandlung mit Polymeren zwingend eine starke Schädigung der Objekte zur Folge hat. Die Evaluation der untersuchten Holzobjekte fiel positiv aus. Konsequenterweise ist vor jeder individuell zu erarbeitenden Maßnahme das Zusammenwirken von Material, Polymer und Umwelteinflüssen zu untersuchen und zu evaluieren, um nachhaltige Lösungen für das jeweilige Objekt finden zu können.

3. Die Datenbank POLYKON zur Recherche nach Polymeren, die als Konservierungs- und Restaurierungsmittel eingesetzt wurden und werden, ist im Rahmen des Projekts mit erweiterten Tools neu programmiert worden. Neben einer vereinfachten Dateneingabe und verbesserten Recherchemöglichkeiten ist nun neben Deutsch auch Englisch als Sprachoption zur Nutzung der Datenbank möglich: <http://www.polykon.fh-potsdam.de>.

1. Anlass und Zielsetzung

Der industrielle Aufschwung nach dem 2. Weltkrieg leitete in Mitteleuropa eine Phase ungebrochenen Fortschrittsglaubens an moderne synthetische Materialien ein, die in allen Lebensbereichen eingesetzt wurden, so auch in der Konservierung und Restaurierung. Insbesondere in den 1950er bis in die 1980er Jahre hinein wurden diese Materialien, die auch als Kunststoffe oder Kunstharze bezeichnet werden, häufig ohne langes Prüfen und Testen als Binde-, Klebe- und Festigungsmittel für die Konservierung und Restaurierung aller Materialrichtungen eingesetzt (u.a. Arnold & Arnold 2013). Details zur Entwicklung des Einsatzes von Polymeren in der DDR siehe Danzl (2008) oder Laue & Noll-Minor (2025). Synthetische Materialien an Kunst- und Kulturgütern sind insbesondere im Bereich der Baudenkmalpflege in vielen Fällen ungeeignet, weil sie – im Gegensatz zu den anorganischen Materialien am Gebäude – aus organischen Molekülen bestehen und aufgrund ihrer chemischen Zusammensetzung besonders stark von der Alterung durch Umwelteinflüsse wie Licht, Sauerstoff, Feuchtigkeits- und Temperaturschwankungen betroffen sind. Die hohe anthropogene Umweltbelastung durch Schadgase bis in die 1990er Jahre und ihr Eintrag als trockene und nasse Deposition mit entsprechenden Säurereaktionen führten zusätzlich zu beschleunigten Alterungsprozessen (u.a. McGlinchey 2018).

Es kam zu Verfärbungen, Schwund- und Rissbildungen, Abplatzungen und Auswitterungen bis hin zu mechanischem Versagen synthetischer Festigungsmittel, Beschichtungsmaterialien, Klebstoffe und Ergänzungsmaterialien. Die eingebrachten und nun gealterten Substanzen stehen in direktem Kontakt mit dem Originalmaterial und sind größtenteils in sie eingedrungen. So stehen die Verantwortlichen der damals behandelten Objekte heute häufig vor großen Problemen, wie sie mit den möglicherweise gefährdenden Materialien und Schichten unter Beibehaltung der Originalsubstanz umgehen sollen.

Beispielsweise stellen sich bei der Auseinandersetzung mit Kunststoffen in der Baudenkmalpflege folgende Fragen und erfordern Lösungen:

- Welche Kunststoffe wurden im Bereich der Baudenkmalpflege bevorzugt eingesetzt und haben sich im Laufe der Zeit bewährt?
- Wie tief sind polymere Konservierungsmittel in poröse Materialien eingedrungen? Welche Schäden haben sie in der Tiefe angerichtet? Welche Methoden sind geeignet, die Eindringtiefe und Schäden zu erfassen?
- Was muss an einem Objekt untersucht werden, um entscheiden zu können, ob eine „Altrestaurierung“ mit Kunststoffen als nachhaltige Maßnahme anzusehen ist?
- Wie gehen wir konkret mit Objekten um, die durch den Einsatz von Kunststoffen geschädigt wurden?
- Welche innovativen, aber schonenden Methoden können entwickelt werden, die eine Reduzierung von Polymeren (aus einer Altrestaurierung) ermöglichen?
- Wie können wir das Wissen über synthetische Materialien als Konservierungsmittel zusammenführen und möglichst online aufbereiten, damit es weit verbreitet, recherchiert und für die praktische Anwendung zur Verfügung steht?

Aus diesen Fragestellungen entstand das hier zusammengefasste DBU-Projekt *Umweltbedingte Degradation synthetischer Konservierungs- und Restaurierungsmittel*, das auf Vorarbeiten der Fachhochschule Potsdam aufbauen konnte (Laue 2013).

Im Detail wurden im Rahmen des Projekts drei Projektziele verfolgt:

Ziel 1: Entwicklung einer systematischen Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten.

Es sollte eine systematische Herangehensweise erarbeitet werden, welche die Alterung und Degradation von Oberflächen bei mit Kunststoffen behandelten Objekten untersucht, erfasst, kartiert und dokumentiert. Parallel sollten umweltrelevante Daten erhoben werden, die Hinweise auf mögliche Degradationsprozesse liefern können.

Die Herangehensweise sollte bei zwei Denkmälern auf ihre Tauglichkeit hin angewendet werden und anschließend evtl. modifiziert bzw. angepasst werden.

Ziel 2: Entwicklung von innovativen Handlungsstrategien und deren modellhafte Umsetzung an ausgewählten Objekten

Die Entwicklung von innovativen Handlungsstrategien an mit Kunststoffen behandelten Objekten und damit die Beantwortung der Frage, wie mit solchen Altrestaurierungen umzugehen ist, waren die Hauptbestandteile des Projekts.

Hierzu wurden im Vorfeld zwei Denkmäler ausgesucht, an denen an unterschiedlichen Materialien verschiedene synthetische Bindemittel eingesetzt worden sind und die heute sehr unterschiedliche Schäden zeigen. Es handelte sich dabei um das barocke Erbbegräbnis im Innenraum der Marienkirche in Frankfurt/Oder mit Kunststoff-Behandlungen von Wandmalereien, Stuck und Metall und um die Außenfassade an der BTU Cottbus, an der im Jahr 1972 eine spezielle Beschichtungsmethode mit synthetischen Bindemitteln ausgeführt wurde (Glaskröselbeschichtung auf Betonplatten), die unter den Umweltbedingungen nach ca. 50 Jahren starke Schäden aufweist (mehr Details zu den Objekten in Kapitel 3). Zusätzlich war es das Ziel, weitere Denkmalobjekte im Land Brandenburg hinsichtlich der Schäden nach einer konservatorischen und/oder restauratorischen Kunststoffbehandlung zu untersuchen, die synthetischen Stoffe zu analysieren und den Erhaltungszustand festzustellen.

Ziel 3: Digitale Wissensverbreitung zu synthetischen Bindemitteln in der Konservierung und Restaurierung

Die bereits seit 2013 existierende Datenbank POLYKON (Schorbach & Däßler 2013, Heuwing & Laue 2025) verbreitet das Wissen zu synthetischen Bindemitteln, die zu Konservierungs- und Restaurierungszwecken eingesetzt wurden.

Die Datenbank enthält Informationen über Polymere zur chemischen Klassifikation, zu Produktnamen, Eigenschaften und Anwendungsbeispiele zu einer Vielzahl von Objekten mit Untersuchungsergebnissen von Restaurator*innen und Naturwissenschaftler*innen. Aus Sicherheitsgründen musste die Datenbank 2021 abgeschaltet werden. Im Rahmen des Projekts wurde das Ziel verfolgt, die Neuprogrammierung auf den aktuellen Stand der Sicherheitsstandards zu bringen und zusätzliche Erweiterungen zu programmieren, die die Zweisprachigkeit Deutsch/Englisch und verbesserte Recherche- und Eingabefunktionen betreffen. Die Vorbereitung der professionellen Neuprogrammierung sollte zunächst einer Nutzeranalyse unterliegen.

2. Arbeitsschritte und Methoden

2.1 Entwicklung einer systematischen Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten

Aufbauend auf grundsätzliche Herangehensweisen bei Konservierungs- und Restaurierungsprojekten (z.B. VDI 3798, 2019) wurde zu Beginn des Projekts eine strukturierte Herangehensweise bei mit Polymeren behandelten Objekten entwickelt und anschließend bei den beiden Hauptobjekten in Frankfurt/Oder und in Cottbus angewendet, evaluiert, erweitert und optimiert. Die an den Praxisobjekten durchgeführten Herangehensweisen mündeten schließlich in einer Handlungs- und Untersuchungsempfehlung für mit Polymeren behandelten Objekten (siehe Kapitel 3.1).

2.2 Entwicklung von Handlungsstrategien und deren modellhafte Umsetzung an ausgewählten Objekten

Die Entwicklung der Handlungsstrategien bei den beiden Modellprojekten in Frankfurt/Oder und Cottbus erforderte zunächst eine systematische Untersuchung der Objekte zu Materialien, Schäden und deren Ursachen. Hierbei gelten die fachlich methodischen Grundlagen zur Erfassung, Untersuchung und Erhaltung auch unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse (z.B. VDI 3798, 2019).

Bestand- und Zustandserfassung

Nach einer intensiven Recherche in Archiven und existierenden Dokumentationen erfolgten an den Objekten eine möglichst präzise Kartierung des Bestandes und des Zustandes in Anlehnung an gängige Kartierungsvorgaben (z.B. Weyer et al. 2015, ICOMOS-ICS 2010). Eine gute Übersicht über Schäden an Kunststoffoberflächen, ihre Ansprache und Untersuchung liefert Schorbach (2013).

Zerstörungsfreie Analysen

Als nächster Schritt folgten zerstörungsfreie Analysen vor einer minimalinvasiven Probenahme. Hier bieten sich unterschiedliche Strahlungsarten je nach Verfügbarkeit an. Im Idealfall können je nach Kamera multi- oder hyperspektrale Aufnahmen Unterschiede in Struktur und Materialität aufzeigen. Insbesondere die Anregung durch UV-Bestrahlung bei mit Kunststoff behandelten Objekten ergibt nützliche Hinweise zur Verteilung der Kunststoffe am Objekt, da Kunststoffe in der Regel deutlich fluoreszieren und so ihre Verwendung am Objekt visualisiert werden kann. Unterschiedliche Kunststoffe fluoreszieren verschieden, was für eine differenzierte minimalinvasive Probenahme nützlich ist. In Frankfurt/Oder ergab sich die Möglichkeit in Kooperation mit dem Geo-Forschungszentrum Potsdam hyperspektrale Nahbereichsaufnahmen durchzuführen, die Materialunterschiede herausarbeiten konnten (Details zu Kameras, Detektoren und Ergebnissen siehe Köllner et al. 2021).

Als weitere zerstörungsfreie Analyse wurde die mobile bzw. portable Röntgenfluoreszenzanalyse (pXRF) eingesetzt, mit der alle Elemente des Periodensystems ab der Ordnungszahl 12 (Magnesium) qualitativ und semiquantitativ erfasst werden können und die Hinweise auf Pigmente und andere anorganischen Materialien liefern kann (Laue 2022). Es kam das Gerät Niton XL3t (Hersteller: Thermo Fischer) mit einer Silber-Anode in der Röntgenröhre und einer Anregungsenergie von 50kV zum Einsatz, der Messfleck hatte einen Durchmesser von 8 mm.

Eine weitere zerstörungsfreie Analyse am Objekt zur Bestimmung der kapillaren Offenheit einer Oberfläche war der Wassertropfentest. An mehreren cm²-großen kann die kapillare

Wasseraufnahmefähigkeit auch mit dem Karsten-Prüfrohr getestet werden (Auras et al. 2011); beide Methoden dienen dem Vergleich vom Zustand der Oberfläche vor und nach einer Maßnahme.

Die zerstörungsfreien Untersuchungen gaben wertvolle Hinweise auf die im Anschluss erfolgten minimalinvasiven Probenahmen an ausgewählten Stellen.

Die schmiedeeisernen Schrifttafeln am Erbbegräbnis mussten zur Erstellung einer modellhaften Konservierung vom Objekt abgenommen werden. Vor der weiteren Bearbeitung in den Werkstätten der FHP wurden sie zerstörungsfrei mittels Röntgenstrahlen von Stephan Brather im BLDAM zur Sichtbarkeit der originalen Metallplatten und Lokalisierung der ergänzten Bereiche analysiert.

Analysemethoden im Labor

Alle genommenen Proben wurden zunächst mit einem Auflichtmikroskop dokumentiert. Von mehrschichtigen Proben wurden Querschliffe in Epoxidharz erstellt und nach Schleifen und Polieren mit einem Olympus BX51-Auflichtmikroskop in Hellfeld-, Dunkelfeld und UV-Beleuchtung mikroskopiert.

Ausgewählte Querschliffpräparate wurden zur detaillierten Pigment- bzw.

Metallaufgabenbestimmung mittels Rasterelektronenmikroskopie in Kombination mit energiedispersiven Elementbestimmung (REM/EDX) untersucht. Es kam das Rasterelektronenmikroskop JEOL JSM-6510 gekoppelt mit einer Elementanalyse (EDX – Gerät: Oxford Instruments Xplore 3D, Software: AZtec 3D) an der Universität Potsdam im Institut für Geowissenschaften zum Einsatz.

Anorganische Materialien wie Stuck und Salze wurden ebenfalls an der Universität Potsdam mit dem Röntgendiffraktometer Empyrean der Firma PANalytical unter Verwendung von CuK α -Strahlung gemessen.

Zur Unterscheidung von Kunststoffen wurde stets als erstes die FTIR-Spektroskopie durchgeführt (Gerät: Spektrum 100, PerkinElmer). Sind größere Verunreinigungen in einer Probe durch beispielsweise anorganische Materialien vorhanden, erfolgte die vorherige Extraktion des Kunststoffs aus dem anorganischen Gefüge mit Chloroform. Mit Hilfe der FTIR lässt sich erfolgreich die Kunststoffgruppe klassifizieren, allerdings können detaillierte Inhaltsstoffe polymerer Bindemittel mit dieser Methode nicht präzise angegeben werden. So wurde nach der FTIR-Analyse eine Auswahl von Proben getroffen, die detailliert mittels Pyrolyse-Gaschromatographie gekoppelt mit Massenspektrometrie (Py-GC/MS) analysiert worden sind. Hierbei kamen die EGA-MS (Evolved Gas Analysis gekoppelt mit Massenspektrometrie), die Double-Shot Py-GC/MS (zweimalige Aufheizung der Probe mit Pyrolyse-GC/MS) und die THM-Py-GC/MS (Thermally assisted hydrolysis and methylation Py-GC/MS) zum Einsatz (weitere Details siehe Micheluz et al. 2025). Die Py-GC/MS-Analysen wurden freundlicherweise im Deutschen Museum München durch Anna Micheluz und Marisa Pamplona durchgeführt.

Schadensprozesse

Zur Untersuchung der Schadensprozesse durch Salzkristallisation in Frankfurt/Oder wurde ein Salzmonitoring in Kombination mit Klimamessungen (Laue 2005) ca. 2,5 Jahre lang durchgeführt. Hierzu wurden am Erbbegräbnis repräsentative Referenzflächen angelegt, an denen kristallisierte Salze entnommen und analysiert wurden und die im Anschluss regelmäßig bezüglich Neukristallisationen begutachtet wurden. Neukristallisationen wurden mittels Polarisationsmikroskopie und Röntgendiffraktometrie analysiert. Parallel

durchgeführte Klimamessungen (relative Luftfeuchte, Lufttemperatur und Oberflächentemperatur) erfolgten mit einem Almemo-Messgerät (Typ 2590, Fa. Ahlborn) von Februar 2021 bis August 2023 (Egel 2023).

Für quantitative Salzanalysen wurden am linken Pilaster des Begräbnisses in Frankfurt/Oder Bohrmehlproben erbohrt (siehe Abb.5), um die Verteilung der Salzionenkonzentrationen in einem vertikalen Profil in den Höhen 45, 114 und 155 cm und in jeweils vier Tiefen (0-5, 5-15, 15-25 und 25-40 cm) zu untersuchen. Im Labor wurde 1 g der Probe etwa 24 Stunden lang mit 50 ml destilliertem Wasser gemischt und anschließend filtriert, bevor die quantitativen Analysen von Na⁺, K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, Cl⁻, NO₃⁻ und SO₄²⁻ mittels Ionenchromatographie (IC90, Thermo Fischer, Dionex) ermittelt worden sind. Die Daten wurden in Einheiten äquivalenter Konzentrationen [mEq/kg] umgerechnet und ausgewertet.

Zur weiteren Auswertung der Salzdaten im Hinblick auf das Verhalten der Salze in Abhängigkeit zum Klima wurde das Computer-Programm ECOS/RUNSALT verwendet (Bionda, 2006; Steiger 2009).

Zur Untersuchung der Schadensprozesse beim Kunststoff in Cottbus wurde die Glasübergangstemperatur an mehreren Proben mit Hilfe einer Tieftemperatur DSC (dynamische Differenzkalorimetrie) bestimmt (Gerät: DSC 214 Polyma® - in Kooperation mit Roland Wetzel der Fa. Netzsch Gerätebau GmbH). Dabei wird bei konstanter Aufheizung die aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge einer Probe erfasst. Es erfolgten jeweils zwei Aufheizungen von -65 °C bis 100 °C bei 10 K/min.

Entwicklung von Handlungsstrategien

Die Handlungsstrategien wurden im Anschluss an die Untersuchungen zur Materialität und zum Verhalten der Oberflächen entwickelt und sind individuell hinsichtlich der konservatorisch-restauratorischen Fragestellungen an Testflächen in verschiedenen Varianten erprobt und evaluiert worden, bevor größere Bereiche behandelt worden sind (Ergebnisse der entwickelten Handlungsstrategien an den Objekten siehe Kapitel 3.2).

2.3 Digitale Wissensverbreitung – Neuprogrammierung der Datenbank POLYKON

Für die Neuprogrammierung der Datenbank POLYKON wurde zunächst ein Anforderungsprofil erstellt, das den aktuellen Zustand und die Erweiterungswünsche beschreibt. Folgende neue Funktionalitäten sollten in die Konzeption und Umsetzung einbezogen werden:

- Professionalisierung der Nutzeroberflächen für den Backendbereich.
- Modularisierung der gesamten Softwarelösung für einen späteren Austausch von Systemelementen.
- Ausführliche Dokumentation.
- Verwendung von gängigen Frameworks (Softwarebibliotheken) für die Systemarchitektur, Programmierung, Datenbankverwaltung und Gestaltung der Weboberflächen.

Zu den bereits bestehenden Funktionen sollten die Benutzbarkeit erhöht sowie Schnittstellen für den Datenexport und -import und die Option für die Zweisprachigkeit Deutsch-Englisch ergänzt werden.

Für den internen Bereich sollte die Möglichkeit der Eingabe von Daten durch externe Dritte, ein Rechtekonzept für die Verwaltung der Daten in der Datenbank und ein Konzept zur Verwaltung mehrsprachiger Daten erarbeitet werden.

Für die Erarbeitung des Lösungskonzeptes wurde ein interdisziplinärer Projektkurs an der Fachhochschule Potsdam mit Studierenden aus unterschiedlichen Studiengängen

(Restaurierung und Konservierung, Informations- und Datenmanagement, Interfacedesign, Soziale Arbeit) durchgeführt. In diesem Projektkurs dokumentierten die Teilnehmenden die Anforderungen unter Einbeziehung der wichtigsten Stakeholder und der Nutzenden. Daraus erarbeiteten sie in Gruppenarbeit Vorlagen für die Umsetzung in der Form von Rechte- und Rollenkonzepten, Daten- und Prozessmodellen sowie Entwürfen der zukünftigen Benutzeroberfläche. Die Anforderungen an das System wurden zusätzlich in der Form von User Storys mit Akzeptanzkriterien als Grundlage für die Programmierung dokumentiert, ein Format, welches jeweils die Motivation für eine Anforderung aus Sicht der Nutzer aufzeigt und gleichzeitig einen konkreten und nachvollziehbaren Lösungsvorschlag beinhaltet.

IST-Erhebung: Evaluierung durch Usability-Tests und Interviews

Als weitere Grundlage zur Weiterentwicklung des bestehenden Konzeptes wurde der aktuelle Stand der Fachdatenbank POLYKON aus Nutzerperspektive unter Einbeziehung bisheriger und potentieller Nutzer untersucht. Ein erster Schritt war die Durchführung von moderierten Usability-Tests (Richter und Flückiger 2013) für die 16 Teilnehmer rekrutiert werden konnten, mit dem Ziel zu beobachten, wie sie einfache Recherchetasks mit der bestehenden Plattform ausführen und welche Herausforderungen dabei für sie bei der Interaktion und Suche entstehen. Zunächst wurden für die Tests realistische Aufgabenstellungen erarbeitet, um das Verhalten der Testpersonen vergleichbar zu machen. Die Teilnehmer:innen waren repräsentative Vertreter:innen aus der Praxis (Denkmalbehörden, Stiftungen und Selbstständige) und der Forschung (Hochschulen, Forschungsinstitute).

Die Tests wurden online mit Software für Video-Konferenzen durchgeführt und moderiert. Die Protokolle wurden qualitativ hinsichtlich der Erwartungen, Herausforderungen und Verbesserungspotentiale ausgewertet.

Die Moderation und Auswertung der Usability-Tests führten bei den Beteiligten des Projektkurses zu einem höheren Verständnis für die Bedürfnisse der realen Nutzenden der Fachdatenbank mit ihrem im hohen Maße spezialisierten fachlichen Hintergrund. Die Erwartungen und alltäglichen Herausforderungen bei der Informationssuche wurden daher zusätzlich als Personas für die Weiterentwicklung dokumentiert. Personas sind Nutzerprofile mit einer zugehörigen fiktiven, aber realistischen Hintergrundgeschichte und individuellen, aber repräsentativen Herausforderungen und Erwartungen. Die Erarbeitung von Personas ist eine Methode aus der nutzerzentrierten Gestaltung, welche Software-Entwicklern einfache und nachvollziehbare Beispiele von prototypischen Nutzern (Richter und Flückiger 2013) zur Orientierung an die Hand gibt. Für POLYKON wurden drei Personas für die Inhaltsverwaltung (Hochschulprofessor an der FH Potsdam, Wissenschaftler an anderem Institut, studentische Hilfskraft) und zwei Personas für die mehrsprachige Recherche in der Datenbank (Chemiker, Muttersprache Englisch und Restauratorin, Muttersprache Französisch mit guten Englischkenntnissen) erarbeitet.

Zusätzlich zu den Usability-Tests wurde in Interviews gemeinsam mit den Verantwortlichen für die Datenerhebung der aktuelle IST-Prozess für die Datenerhebung nachvollzogen und zusammen mit Verbesserungsvorschlägen dokumentiert, die in eine einfachere Inhaltsverwaltung mündeten, die bei der Neuprogrammierung berücksichtigt wurde (siehe Kapitel 3.3).

3. Ergebnisse

3.1 Systematische Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten

Die an den beiden Praxisobjekten in Frankfurt/Oder und in Cottbus durchgeführten und nach Evaluation optimierten Herangehensweisen mündeten in eine Handlungs- und Untersuchungsempfehlung für mit Polymeren behandelten Objekten, die in Abb. 1 zusammengefasst ist (Laue und Noll-Minor 2025).

Startpunkt ist stets eine ausführliche Recherche zur Objekt- und Restaurierungsgeschichte in Publikationen, Archiven, Denkmalämter und bei den Eigentümern der Objekte. Ergänzend sollte eine digitale Recherche vorgenommen werden, hier bietet sich u.a. die Recherche in der Datenbank POLYKON zu synthetischen Bindemitteln, Produktnamen und restaurierten Objekten an (Heuwing & Laue 2025).

Anschließend erfolgt die Untersuchung des Bestandes und Zustandes der Objekte. Sie beginnt mit einer möglichst präzisen Kartierung des Bestandes und des Zustandes in Anlehnung an gängige Kartierungsvorgaben (z.B. Weyer et al. 2015, ICOMOS-ICS 2010). Eine gute Übersicht über Schäden an Kunststoffoberflächen, ihre Ansprache und Untersuchung liefert Schorbach (2013). Besondere Herausforderungen bei der Untersuchung und Bewertung von Bestand und Zustand sind die möglichen Wechselwirkungen und Änderungen der Eigenschaften der verschiedenen Bereiche des Objekts als Folge der Kunststoffbehandlung – neben der Alterung an den Polymeren selbst.

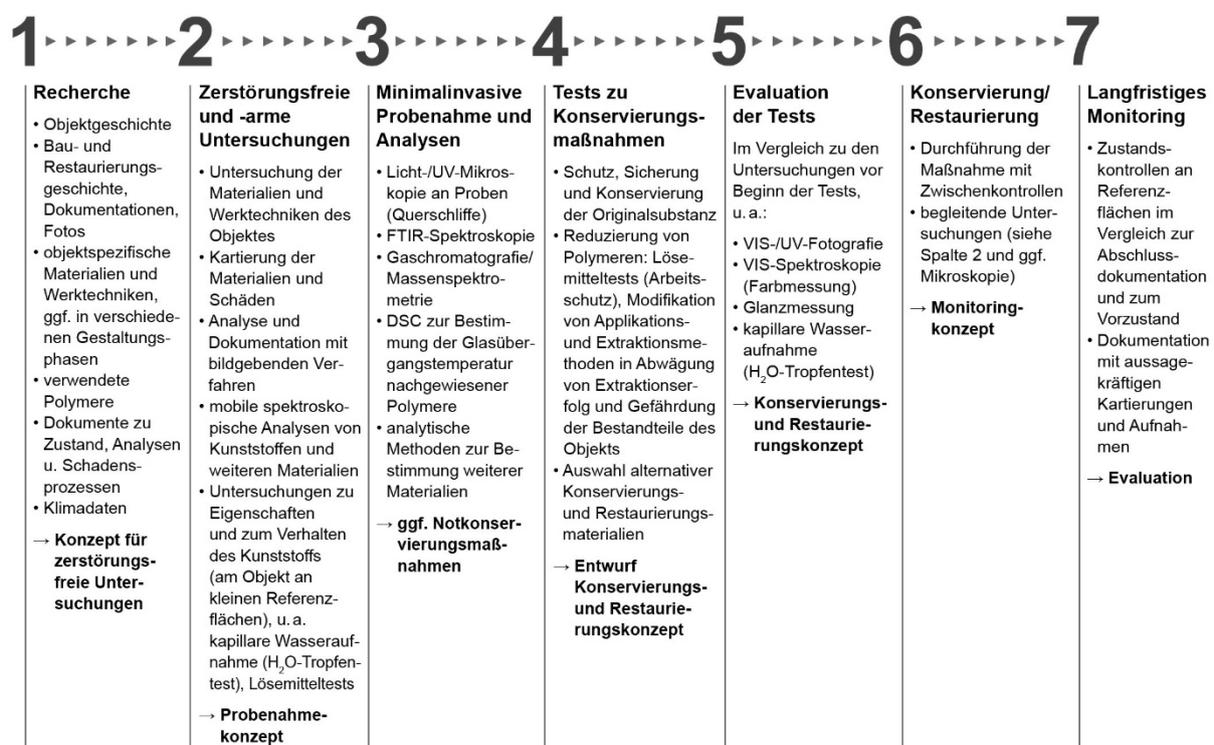


Abb. 1: Untersuchungen und Maßnahmen an mit Kunststoffen behandelten Objekten

Aus den Kartierungen ergibt sich ein Untersuchungskonzept. Vor einer eventuellen Probenahme sollten zerstörungsfreie Analysen erfolgen. Hierfür sind unterschiedliche

Strahlungsarten nützlich je nach Verfügbarkeit an. Im Idealfall können je nach Anregungs- und Kamerasystemen multi- oder hyperspektrale Aufnahmen deutliche Unterschiede in Struktur und Materialität aufzeigen. Durch die Kombination der Anregung mit definierten Wellenlängen und des Einsatzes von ausgewählten Filtersystemen in Kameras lassen sich vorher nicht sichtbare Strukturen und Materialien an Objekten untersuchen und nachvollziehbar dokumentieren (u.a. Lenz & Keller 2021). Unverzichtbar ist die Anregung durch UV-Bestrahlung bei mit Kunststoff behandelten Objekten, da Kunststoffe in der Regel deutlich fluoreszieren und so ihre Verwendung am Objekt visualisiert werden kann. Unterschiedliche Kunststoffe fluoreszieren verschieden, was für eine differenzierte Probenahme nützlich ist.

Weitere zerstörungsfreie Analysen am Objekt sind Glanzmessung-, Rauigkeits- und Farbmessungen (Auras et al. 2011), zum Vergleich der Ergebnisse vor und nach einer Maßnahme.

Zur Bestimmung der kapillaren Offenheit einer Oberfläche ist der Wassertropfentest oder die Bestimmung mit dem Karstensenen Prüfröhrchen geeignet (Auras et al. 2011). Dies ist ebenfalls zur Evaluation einer Maßnahme geeignet, wenn vor und nach einer Konservierung gemessen wird.

Weitere zerstörungsfreie Analysen wie die mobile Röntgenfluoreszenzspektroskopie oder mobile Ramanspektroskopie liefern wertvolle Hinweise zu anorganischen Materialien am Objekt und evtl. zu anorganischen Alterungsprodukten. Mittels mobiler FT-Infrarotspektroskopie (FTIR) lassen sich auch mobil Kunststoffklassen bei ausreichendem Kontakt zu einem Polymerfilm unterscheiden.

Alle zerstörungsfreien Analysen münden in ein Probenahmekonzept.

Probengrößen von ca. 1 mm² reichen aus, um eingesetzte Kunststoffe zu analysieren. Soll der Schichtenaufbau (Schliffmikroskopie) und anorganische Materialien zusätzlich analysiert werden, sind entsprechend größere Proben zu nehmen.

Zur Unterscheidung von Kunststoffen bietet sich als erste Methode die stationäre FTIR-Spektroskopie im Labor an. Sind größere Verunreinigungen der Probe durch beispielsweise anorganische Materialien gegeben, ist die vorherige Extraktion des Kunststoffs vor der Messung aus dem anorganischen Gefüge mit einem starken Lösemittel (z.B. Chloroform) sinnvoll. Für den Nachweis von Additiven im Kunststoff wie Weichmacher, Flammschutzmittel, etc. und ob und welche verschiedenen Polymerketten mit welchen Kettenlängen polymerisiert sind, ist die heute präziseste Methode die Gaschromatographie gekoppelt mit der Massenspektrometrie (Micheluz et al. 2025).

Für die Entwicklung des Konservierungs- bzw. Restaurierungskonzepts sind – ggf. nach Laborversuchen - an kleinen Probefeldern (Referenzflächen) am Objekt erste Tests erforderlich. Die Testflächen sollten nach ausreichend langer Standzeit evaluiert werden. Im Idealfall sollte das Umgebungsklima im Verlauf eines Jahres auf die Flächen einwirken können, mindestens ein halbes Jahr Standzeit wird empfohlen. Zur Evaluation sollten wieder die gleichen Messmethoden wie vor der Maßnahme verwendet werden, um die Veränderung der Flächen systematisch zu erfassen. Es ist sehr vorteilhaft, die Ergebnisse der Tests interdisziplinär am Objekt zu diskutieren (Abb. 2) und daraufhin das entsprechende Konservierungs- und Restaurierungskonzept festzulegen.



Abb. 2: Interdisziplinäre Diskussion der durchgeführten Tests zu möglichen Konservierungsmaßnahmen am Objekt (hier Frankfurt/Oder)

Es wird empfohlen, die anschließende Konservierung und Restaurierung mit Zwischenkontrollen und evtl. notwendigen Untersuchungen zu begleiten. Aus den Ergebnissen der Maßnahmen ergibt sich ein Monitoringkonzept, das langfristig mit Zustandskontrollen und entsprechenden Dokumentationen immer wieder evaluiert werden sollte.

3.2 Entwicklung von Handlungsstrategien und deren modellhafte Umsetzung an ausgewählten Objekten

Im Rahmen des Projektes wurden innovative Handlungsstrategien an den zwei Denkmälern in Frankfurt/Oder und Cottbus ausführlich mit Recherchen, Voruntersuchungen und Ausführungen entwickelt, ausprobiert und evaluiert, die im Folgenden vorgestellt werden, bevor in einem dritten Unterkapitel von weiteren im Rahmen des Projekts untersuchten Objekten berichtet wird.

3.2.1 Barockes Erbbegräbnis in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder Objekt und Restaurierungsgeschichte

Das barocke Epitaph in der spätgotischen St. Marienkirche (Abb. 3) befindet sich in einer ca. einen Meter tiefen und ca. vier Meter breiten und hohen rundbogigen Nische vor der Ostwand des Südturmes über einem 1737 angelegten, heute verschlossenen Gruftgewölbe. Beidseitig wird das Erbbegräbnis von kräftigen Pilastern aus Stuck begrenzt, auch die Kartuschen in der Nischenrücklage werden von insgesamt drei Stuckpilastern mit korinthischen Kapitellen flankiert. Mittig im Erbbegräbnis befinden sich zwei gedoppelte und mit feinem Stuckdekor gerahmte schmiedeeiserne Schrifttafeln mit zum Teil erhaltenen Schriftzügen. Es handelt sich vermutlich um eine größere Familienbestattung (u.a. von Friedrich Wilhelm Roloff, gestorben 1741, und seiner Gemahlin Margaretha geb. Schüler). In der Brüstungszone unter den Metalltafeln sind zwischen bandartigen Applikationen in Stuck geformte Vergänglichkeitsmotive wie Totenköpfe und Knochengebilde erkennbar. Über den Pilastern verläuft ein stark verkröpftes Architravgesims, in dessen Mitte eine stark

plastisch stuckierte Bekrönungsgruppe mit Engeln, Schlangen, Stundenglas und Totenkopf aufsitzt.

Darüber wölbt sich eine Apsis-artige Gewölbekalotte, die vollständig von einer weitgehend erhaltenen, aber geschädigten Wandmalerei ausgefüllt wird. Auf der linken Bildhälfte erkennt man die Darstellung Moses vor dem brennenden Dornbusch. Auf der rechten Seite befindet sich vor einem Tempel Jesus mit den Aposteln. Die zu beiden Seiten in der Malerei angeordneten Inschriftentafeln verweisen auf die entsprechenden Bibelstellen.

Die figürlichen Szenen sind durch Architektur und eine Landschaft aus Bäumen, Sträuchern und Felsen umrahmt. Die zugehörige Stuckrahmung, bzw. Bekrönung des Kalottenbogens hatte man schon um 1830 abgeschlagen, als im Zuge der von Karl Friedrich Schinkel geleiteten Umbau- und Regotisierungskampagne das barocke Erbbegräbnis zugemauert wurde.

Durch diese Vermauerung wurde das Epitaph effektiv geschützt, als die Marienkirche durch Kriegseinwirkungen im Jahre 1945 in Brand geriet und infolgedessen die Gewölbe des Langhauses einstürzten. Das Innere des Kirchenschiffes blieb lange Zeit im ruinösen Zustand mit entsprechenden Witterungseinflüssen.

Im Zuge des in der DDR-Zeit begonnenen Wiederaufbaus der Kirchenruine öffnete man 1982 die vermauerte Nische und fand die barocke Epitapharchitektur mit der anfangs erstaunlich gut erhaltenen Wandmalerei. Doch schon kurz nach der Freistellung des Erbbegräbnisses verschlechterte sich besonders der Zustand der Wandmalerei erheblich. Deshalb wurden vom Institut für Denkmalpflege der DDR noch 1982 erste Notsicherungen und ab 1983 weitere Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen an der Wandmalerei und die Sicherung der Fassungsreste auf der Stuckarchitektur beauftragt.



Abb. 3: Barockes Erbbegräbnis in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder vor Projektbeginn 2019

Restaurierung der Wandmalerei 1982-1988

Nach Öffnung der Nische 1982 kam es durch die veränderte klimatische Situation und die freie Bewitterung innerhalb kürzester Zeit zu gravierenden Schäden an der zuvor als weitestgehend intakt beschriebenen Malerei (Klemm 1988). Verluste der Malschicht, schollenartige Malschichtabhebungen und Eintrübung wurden als Schadensphänomene beschrieben. Die rasante Austrocknung führte wahrscheinlich zur Anreicherung und Kristallisation von Salzen unterhalb und auf der Malschicht, die Absprengungen von Malschichtschollen zur Folge hatten. Die fortschreitende Verschlechterung des Zustandes gab Anlass für wiederholte Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen durch eine Arbeitsgruppe des VEB Denkmalpflege unter Betreuung durch das Institut für Denkmalpflege in den Jahren von 1982 bis 1988. Dabei kamen verschiedene Kunststoffe als Festigungsmittel und als Firnis zum Einsatz. Aus der Dokumentation (Klemm 1988) geht hervor, dass zur Malschichtfestigung Paraloid® B72 (1,5 bis 5 % in Toluol) mit dem Pinsel appliziert wurde. Zusätzlich wurde die Acryl-Dispersion Skopacryl® D342 (bei Klemm 1988 als „PAC D342“ bezeichnet) mit einer Spritze hinter die Schollen injiziert. Die Hinterfüllung von Hohlstellen der zusammen mit der Grundierung in Blasen abstehenden Malschicht erfolgte mittels 5-10 %-igem Paraloid® B72 und Skopacryl® D342. Die Fehlstellen wurden durch einen Acrylkitt geschlossen (1T D342, 2T Wasser, 2T Kreide, 1T Quarzmehl), welcher mit einer 5 %-igen Paraloidlösung abgesperrt wurde. Vor der Retusche wurde ein Zwischenfirnis der Firma Schmincke aufgetragen (Mattfirnis von Schmincke 1:4 in Terpentinöl angesetzt). Die Retusche erfolgte mittels Acrylfarben von Schmincke und Rowney und abschließend erfolgte der Auftrag eines Schlussfirnis (Schmincke-Mattfirnis 1:2 in Terpentinöl). Die genaue Zusammensetzung der aufgetragenen Firnisse ist nicht bekannt.

Restaurierung der Stuckmaterialien 1982-1988

Die Konservierung der Fassungsreste beim Stuck wurden nach Angaben im Restaurierungsbericht der 1980er Jahre mit den gleichen Konservierungsmitteln wie bei der Wandmalerei ausgeführt, d.h. es wurde Paraloid® B72 und die Acryldispersion „PAC D342“ verwendet (Klemm 1988). Spätestens ab dem Jahr 1985 begannen die Arbeiten an der Stuckarchitektur – zuerst mit der Reapplizierung lokalisierbarer Stuckelemente. Im weiteren Verlauf wurden verbleibende große Fehlstellen und offensichtlich auch geschädigte Stuckbereiche im Analogieschluss handwerklich ergänzt. Der vordere, damals backsteinsichtige Kalottenbogen erhielt einen schlichten abgeriebenen Kalkputz, da keine Befunde auf die Gestaltung der Stuckrahmung und Bekrönung hinwiesen. Letzte Arbeiten an der Kalkstuckornamentik fanden nach Wiederanbringung der Schrifttafeln im Jahr 1988 statt (Klemm 1988).

Restaurierung der schmiedeeisernen Schrifttafeln 1982-1988

Durchkorrodierte Bereiche der Schrifttafeln wurden abgeschlagen bis die Grenze des Kernmaterials erreicht war. Die Rückseiten aller vier Tafeln wurden unter Zuhilfenahme von Glasfaser-Verbundstoff-Matten (GFK-Matte) doubliert. Die verlorenen Bereiche wurden auf den Vorderseiten zusätzlich mit einer Spachtelmasse aus Polyesterharz ergänzt. Darüber hinaus ist der Dokumentation (Klemm 1988) zu entnehmen, dass die rückseitig aufgetragenen Glasfasermatten mittels Polyesterharz (Hobbyplast UP) verklebt sowie alle „Ausbrüche, Fehlstellen an den Randbereichen und Löcher [...] mit dem gleichen Kleber verkittet bzw. ergänzt [wurden]. Dazu wurde [...] Talkum [...] zugegeben [...]. Während des Härtungsprozesses wurde[n] [...] Rostpartikel [auf]gesandelt.“ (Klemm 1988). Im Rahmen

eines Interviews gab Herr Klemm zu Protokoll, dass die Restaurierung der Tafeln nicht im ursprünglichen Konzept enthalten war und er diese „auf eigene Faust“ durchgeführt habe (Kazmierczak 2025). Ihren Abschluss fanden die Maßnahmen mit der Wiederanbringung der ergänzten Metallplatten im Jahr 1986.

Naturwissenschaftliche Analysen zum Bestand und Zustand des Erbbegräbnisses

Die Bestands- und Zustandsuntersuchungen dienten als Grundlage für die anschließende Konzeptfindung zum Umgang mit den gealterten Polymeren am Erbbegräbnis. Neben kunsttechnologischen Fragen zur Materialität und Ausführung während der Erschaffung des Erbbegräbnisses liegt der Schwerpunkt der Analysen auf die in den 1980er Jahren durchgeführten Arbeiten mit Polymeren zur Konservierung und Restaurierung des Objektes. Darüber hinaus soll geklärt werden, welche die aktiven Schadenmechanismen sind, die vor allem im unteren Bereich zu den Feuchte- und Salzsäden führen. So sollten folgende Fragestellungen zum Bestand und Zustand geklärt werden:

- Wandmalerei: Pigmente und Bindemittel der ursprünglichen Fassung und der Konservierungsmaterialien der 1980er Jahre.
- Stuckmaterialien: Zusammensetzung des barocken Stucks und der Ergänzungen aus den 1980er Jahren; wurden polymere Konservierungsmaterialien in den 1980er Jahren verwendet?
- Schrifttafeln: Welche Polymere wurden bei den Konservierungsarbeiten in den 1980er Jahren verwendet? Kann bei den Resten der originalen Inschriften Gold nachgewiesen werden?
- Welches sind die aktuellen Salzsadensprozesse und die sie steuernden Parameter? Wie hoch ist die quantitative Salzbelastung in der Tiefe? Welches Schadensszenario ist in der Zukunft zu erwarten?

Aufgrund der Dokumentation (Klemm 1988) war bekannt, dass zur Konservierung und Restaurierung beim Erbbegräbnis verschiedene polymere Bindemittel auf Basis von Acrylaten/Methacrylaten und bei den Metallplatten Polyesterharze eingesetzt worden sind. Wo sie mit welcher Menge verwendet worden sind, ging aus den Unterlagen nicht hervor. Für die Erstellung eines Konservierungs- bzw. Restaurierungskonzeptes ist allerdings das Vorkommen der Polymere und in welchen Tiefen sie eingedrungen sind relevant.

Nach Kartierungen und zerstörungsfreien Analyse mittels Bild-gegebenen Verfahren (siehe Kapitel 2.2) war es möglich, minimalinvasiv Proben zu entnehmen mit dem Ziel die oben gestellten Fragen zu beantworten. Ein Beispiel für eine zerstörungsfreie UV-Fluoreszenz-Fotografie bzw. für UV-induzierte VIS-Lumineszenz (Lenz und Keller 2021) ist in Abb. 4 dargestellt. Abb. 5 zeigt die Probenahmestellen am Erbbegräbnis.



Abb. 4: UV-induzierte VIS-Lumineszenz (UV-Fluoreszenz) im oberen Bereich des Epitaphs mit der Wandmalerei, Fluoreszenzen deuten auf den Einsatz von Polymeren hin, dunkle Stellen in der Wandmalerei zeigen Retuschen an



Abb. 5: Barockes Erbbegräbnis mit Darstellung der aktiven Salzsadenszone (gelb schraffiert) und den Probenahmestellen, links sind die Bohrmehlentnahmestellen für die quantitative Salzuntersuchung rot markiert, Bild: Nicole Köllner, ergänzt: Steffen Laue

Tabelle 1 gibt einen Überblick über die Proben, die jeweils genutzte Analytik und die erzielten Ergebnisse.

Tabelle 1: Proben, Analytik und Ergebnisse – St. Marienkirche, Erbbegräbnis, hinter dem Ergebnis steht die genutzte Analysemethode in Klammern, Abkürzungen: BM = Bindemittel, Mik = Auflichtmikroskopie, QS = Querschleiff; WM = aus der Wandmalerei

Probe	Herkunft	Beschreibung/Frage	Analytik	Ergebnis
M1	WM, Jesus, gelber Heiligenschein	gelb / Pigment	pXRF, REM/EDX	Bleiweißgrundierung (REM/EDX), Neapelgelb (pXRF, REM/EDX)
M3	WM, im linken Bereich	dunkler Hintergrund mit Retusche / Aufbau, BM, Polymer	QS, FTIR, Py-GC/MS	Bleiweißgrundierung, barocke Malschichten mit Firnis (Öl-haltig), PEMA/PMA + Weichmacher (Py-GC/MS)
M10	WM mittig	graue Architekturmalerei / Polymer	QS, FTIR, Py-GC/MS	Bleiweißgrundierung, eine barocke Malschicht ohne Firnis, PEMA/PMA + Weichmacher (Py-GC/MS)
M5	Stück unterhalb linker Metallplatte	gelbliche UV-Fluoreszenz / Polymer	FTIR, Py-GC/MS	PBMA/PMMA und Styrol (Py-GC/MS)
M12	Stückkapitel rechts oben	vergoldetes (?) gefasstes Stückkapitel / Aufbau, Pigmente, Metallauflage, BM, Polymer	QS, REM/EDX, FTIR, Py-GC/MS	Gipsstück mit Kreide- und Bleiweißgrundierung, Zinnober-haltiger Bolus unter Zwischgold (Mik, REM/EDX), PBMA/PMMA, PS und Öl (Py-GC/MS)
M13	Stückkapitel rechts oben	historischer Stück / Zusammensetzung	XRD	Gipsstück mit wenig Quarz
M16	Stückergänzung unten rechts	Stückergänzung 1985 / Zusammensetzung	XRD	Kalk-/Gipsstück mit ca. 60% Quarz
M19	graue Fassung auf Stück	auf historischem Stück	QS, pXRF, FTIR	Bleiweiß-Grundierung mit Kohlenstoffschwarz/Kreide, PEMA/PMA, PS (Py-GC/MS)
S1	Pilaster rechts in 110cm Höhe	weiße Salzausblühung	XRD	Nitrokalit [KNO ₃]
K1	rechte Metallplatte	Kunststoffergänzung der Metallplatte	FTIR, Py-GC/MS	ungesättigtes Polyesterharz (UP) mit Weichmachern DEP, DBP (Py-GC/MS)

Wandmalerei

Die Wandmalereien der rundbogigen Nische mit teilweise starkem Craquelée (Eggers 2022, Lehmann 2025) sind auf einen Kalkputz mit Bleiweißgrundierung aufgetragen. Zu den im Barock verwendeten Pigmenten gehören neben Bleiweiß Kreide (Calcit), gelber, roter und brauner Ocker, Mennige, Zinnober, Kupferblau (wahrscheinlich Azurit), Kupfergrün (wahrscheinlich Malachit), Neapelgelb und Kohlenstoff-haltige Schwarzpigmente. In den Retuschen und Ergänzungen der Malschichten in den 1980er Jahren wurden neben Kreide und Ockerfarben auch Chrom-haltige Grünpigmente, Zink-haltige Pigmente und Phtalocyaninblau in dunklen Retuschebereichen nachgewiesen (Laue 2025a).

Abb. 6 gibt einen Überblick über anzutreffende Schichtenabfolgen bei der Wandmalerei. Abb. 6a-c sind Querschlifffotos der Probe M3, die aus dem linken Bildfeld der Wandmalerei stammt und inhaltlich zur sehr dunklen, fast schwarzen Hintergrundmalerei gehört, die teilweise retuschiert ist. Abb. 6a und 6b zeigen Übersichtsdarstellung des Schliffs der Probe M3.

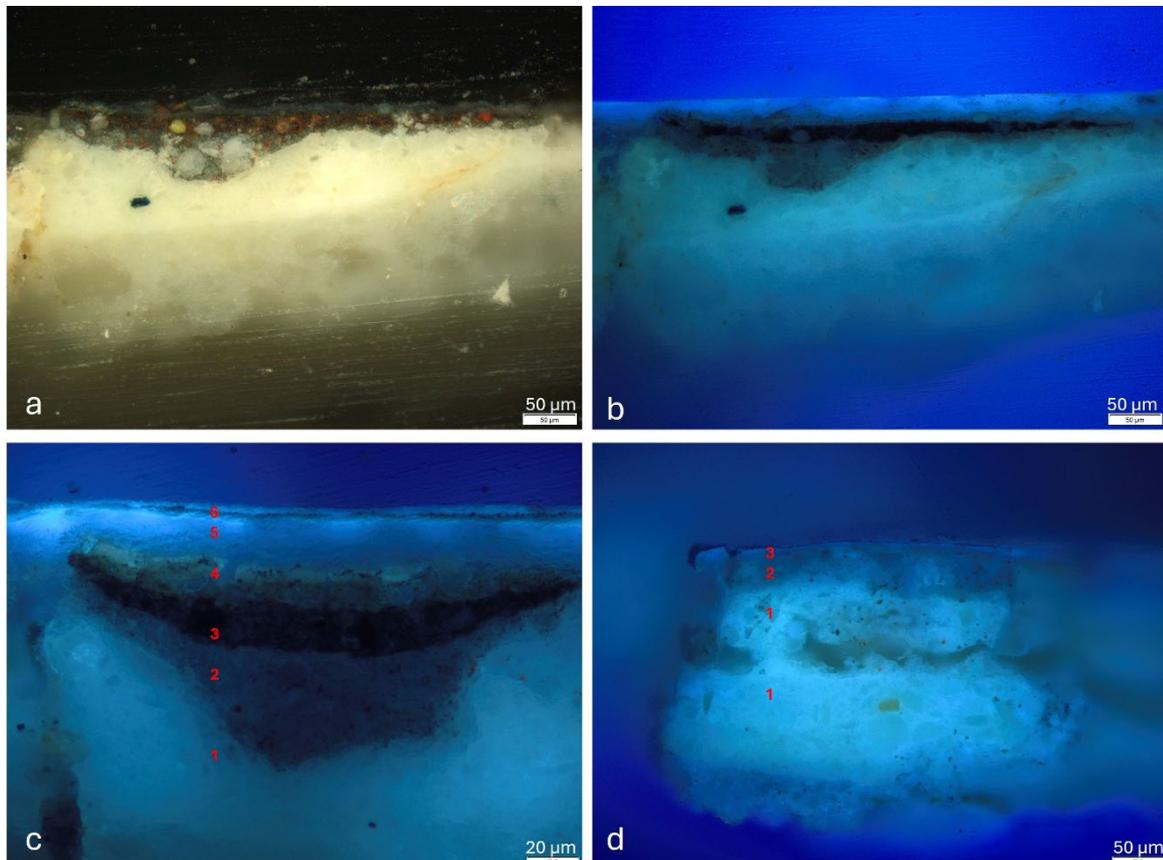


Abb. 6: vier Abbildungen von Querschliffen von Malschichtproben; 6a und 6b: Querschliff Probe M3 in Dunkelfeld- (6a) und UV-Beleuchtung (6b); 6c: Querschliff Probe M3 im Detail (UV-Beleuchtung) mit Darstellung der Schichtenabfolge 1-6 (Erläuterungen siehe Text); 6d: Querschliff Probe M10 (UV-Beleuchtung), hier dünner Polymerfilm (3) an der Oberfläche

In Abb. 6c ist der barocke Malschichtaufbau detailliert zu erkennen, hier sind auf der hellen Grundierung aus Bleiweiß (1) zwei Malschichten (2 und 3) sichtbar, wobei die hellere Schicht 2 nur bei Vertiefungen deutlich zu erkennen ist und als Ausgleichsschicht bzw. Untermalung anzusprechen ist. Auf der dunklen Schicht 3, folgt Schicht 4, die sich durch eine leicht

grünliche Fluoreszenz auszeichnet, wahrscheinlich überwiegend aus organischen Materialien besteht und als barocker Firnis interpretiert werden kann. Risse und Abhebungen deuten darauf hin, dass die Oberfläche im gealterten Zustand vorlag – wahrscheinlich mit Alterungsprodukten (u.a. Gips und Bleicarbonate) auf der Oberfläche, die an anderen Stellen auf gealterter Malschicht nachgewiesen werden konnten (Laue 2024a, Lehmann 2025). Schicht 5 ist das bläulich fluoreszierende polymere Bindemittel, das zur Festigung und Sicherung in den 1980er Jahren auf- und eingebracht worden ist. Beim genauen Betrachten des Schliffes ist erkennbar, dass die polymere Schicht 5 in Risse eingedrungen ist und die Fragmente der barocken Fassung zusammenhält (Abb. 6c). Der dunkle Strich oberhalb repräsentiert die Schicht 6, die als Retusche interpretiert werden kann. Ist der darauf liegende sehr dünne Film möglicherweise der in der Dokumentation (Klemm 1988) genannte „Schutzüberzug (Schmincke-Mattfirnis)“?

Dass nicht alle Schichtenaufbauten dem Schema der Probe M3 folgen, ist in Abb. 6d der Probe M10 zu erkennen. Hier stammt die Probe aus dem Bereich der grauen Architekturmalerei ungefähr in der Mitte des Bildes. Hier liegt über der hellen fluoreszierenden Bleiweißgrundierung (1 - schichtparallel gerissen) eine graue Schicht (Sichterfassung), bei der kein mehrschichtiger Aufbau und kein historischer Firnis erkennbar ist, sondern hier ist nur eine dünne hell fluoreszierende Polymerschicht (3) auf der grauen gealterten Fassung vorhanden.

Diese Unterschiede des Schichtenaufbaus sind ebenfalls bei weiteren Querschliffproben anzutreffen (Laue 2025). Es kann zusammengefasst werden kann, dass die heute auf der Wandmalerei sich befindenden Polymerschichten unterschiedlich dick (bis zu ca. 35µm) anzutreffen sind und sie unterschiedlich tief in die barocke Malschicht eingedrungen sind. Die organischen Materialien wurden mittels FTIR und ausgewählte Proben zusätzlich mit Hilfe der Py-GC/MS (siehe Kapitel 2.2) analysiert. Mittels FTIR konnten bei allen untersuchten Proben aus der Wandmalerei und auch beim Stuck Acrylate/Metacrylate nachgewiesen werden. Die Ergebnisse stehen im Einklang mit den in der Dokumentation erwähnten Festigungsmaterialien Polyacrylat-Dispersion D342 und Paraloid® B72 (Klemm 1988). Die Py-GC/MS-Analysen identifizierten neben Acrylaten/Metacrylaten zusätzlich Weichmacher wie Diethylphtalate (DEP), Dibuthylphtalate (DBP) und Diethylhexylphtalate (DEHP). Bei Probe M3 wurden mit der THM-Py-GC/MS zusätzlich verschiedene langkettige Fettsäuren nachgewiesen, die auf Öl-Bestandteile im Bindemittel der barocken Malschichten und/oder des Firnisses hinweisen (Micheluz et al. 2025).

Stuckmaterialien

Der historische Stuck weist gegenüber den Stuckergänzungen der 1980er Jahre bereits bei UV-induzierten VIS-Lumineszenzen ein unterschiedliches Erscheinungsbild auf. Während historische Stuckbereiche mit Polymeren behandelt worden sind und bläuliche und gelbliche Fluoreszenzen (VIS-Lumineszenzen) zeigen, bleiben die Stuckergänzungen bei UV-Bestrahlung dunkel (Laue 2025). XRD-Analysen konnten zeigen, dass der Originalstuck (Probe M13) lediglich aus Gips mit geringem Anteil (< 5%) an Quarz besteht, während Stuckergänzungen (Probe M16) aus einem Kalk-Gips-Gemisch und einem Zuschlaganteil von ca. 60% Quarz zusammengesetzt sind (Laue 2025).

Bei allen untersuchten Stuckproben konnte der Nachweis mittels FTIR und bei den ausgewählten Proben auch ergänzend mit Py-GC/MS erbracht werden, dass sie mit Acrylaten/Metacrylaten in den 1980er Jahren behandelt worden sind (Micheluz et al. 2025). Während der zerstörungsfreien Untersuchung des Erbbegräbnisses mit UV-Beleuchtung

fielen an einigen Stellen des Stucks gelbliche Fluoreszenzen auf (Probe M5), die offensichtlich eine andere Zusammensetzung eines Polymers erwarten ließen. In der Tat konnte die Py-GC/MS-Analyse bei der Probe M5 ein Gemisch aus Polybutylmetacrylat/Polymethylmetacrylat (PBMA/PMMA) mit etwas Styrol (PS) und somit ein anderes Polymergemisch aufdecken (Micheluz et al. 2025), welches die unterschiedliche Fluoreszenz erklärt.

Der Stuck am barocken Erbbegräbnis ist in den unteren und seitlichen Applikationen teilweise grau, die Kapitelle sogar goldfarben gefasst – heute sind nur noch stark gealterte Fragmente erhalten. Aus beiden Bereichen wurden Proben untersucht mit dem Ziel, den Aufbau der Schichten und deren Zusammensetzung zu erfahren. Während die grauen Fassungen lediglich aus einem Kohlenstoff-haltigen Schwarzpigment mit Kreide zur grauen Farbe gemischt worden sind (zum Beispiel bei M19), zeigt sich bei den goldfarbenen gefassten Kapitellen ein differenzierter Aufbau (Probe M12): Auf Gipsstuck liegt eine Kreide- und anschließend eine Bleiweißgrundierung, auf der ein roter Bolus bestehend aus Alumosilikaten, rotem Ocker und Zinnober die Grundlage für die folgende goldfarbene Schicht bildet, die aus Zwischgold besteht (Laue 2025).

Die einzelnen dünnen Schichten der Probe M12 konnten mechanisch nicht für separate Bindemittelmessungen getrennt werden, also wurde das gesamte Schichtenpaket mittels FTIR und Py-GC/MS analysiert. Die Bindemittelanalysen der Probe M12 mittels FTIR ergaben, dass auch das gefasste Kapitel mit Polyacrylaten und/oder Polymetacrylaten behandelt worden ist (Abb. 7).

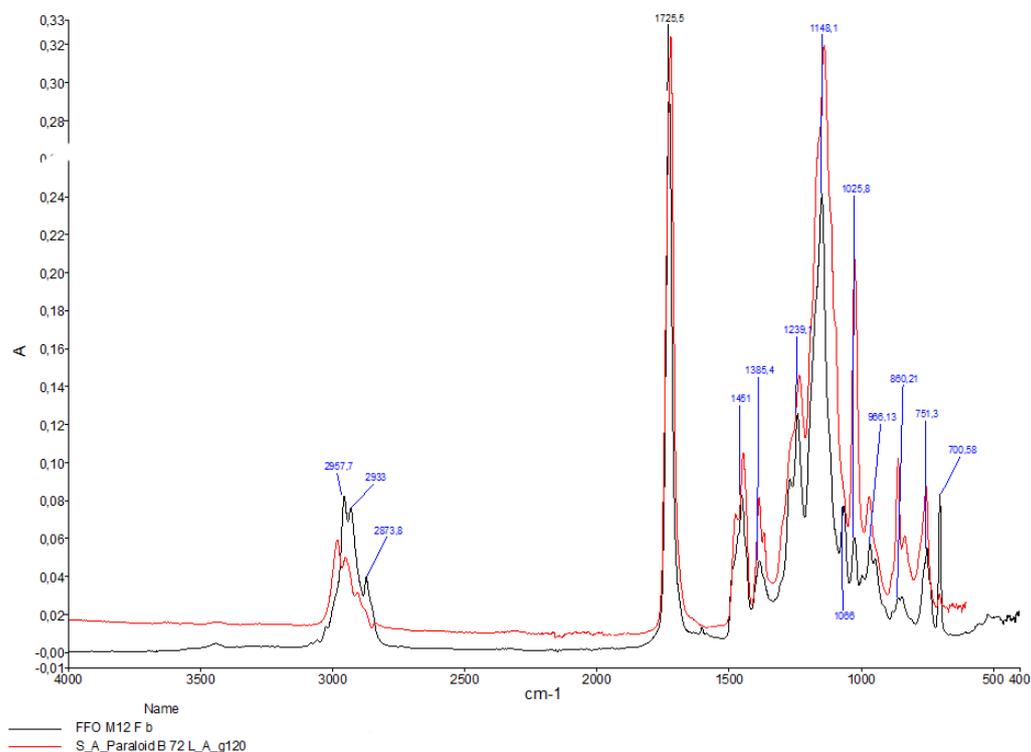


Abb. 7: FTIR-Spektrum der Probe M12 nach Extraktion mit Chloroform im Vergleich zu einem Spektrum von Paraloid B-72 mit relativ guter Übereinstimmung

Mit Hilfe der Py-GC/MS konnte die Verwendung eines PBMA/PMMA präziser angegeben werden. Zusätzlich sind langkettige Fettsäuren ermittelt worden, die die Verwendung von Öl bei den Farbfassungen mit Metallaufgabe anzeigen (Micheluz et al. 2025).

Schmiedeeiserne Schrifttafeln

Die Schrifttafeln wurden mit einem heute dunkelbraun aussehenden Polymer mit Zusatzstoffen ergänzt. Das Polymer wurde mittels FTIR und Py-GC/MS analysiert (Probe K1). Die Analyse konnte die Aussage in der Dokumentation der 1980er Jahre (Klemm 1988) bestätigen, dass ein Polyesterharz als Bindemittel verwendet worden ist (Hobbyplast UP). Die Py-GC/MS konnte das Ergebnis präzisieren: Es handelt sich um ein ungesättigtes Polyesterharz mit Diethyl- und Dibutylphthalaten (DEP und DBP) als Weichmacher und weiteren Additiven in geringen Konzentrationen (Micheluz et al. 2025).

Mit Hilfe der mobilen Röntgenfluoreszenzanalyse konnte bei den Inschriften zerstörungsfrei Gold nachgewiesen werden (Laue 2023a).

Salzschadensprozesse und Klimamonitoring

Die Schadensdokumentation und Analysen kristallisierter Salze belegten einen aktiven Schadensprozess durch überwiegend Nitrokalit [KNO_3] und weniger Gips [$\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$] bis zu einer Höhe von etwa 150 cm am Erbbegräbnis (siehe auch Abb. 5). Die meisten Schäden konnten in den Wintermonaten durch Nitrokalit festgestellt werden.

Die quantitativen Salzanalysen stellten die Verteilung der Salzionen in den Höhen von 45, 114 und 155 cm und in den jeweiligen Tiefen heraus (Abb. 8).

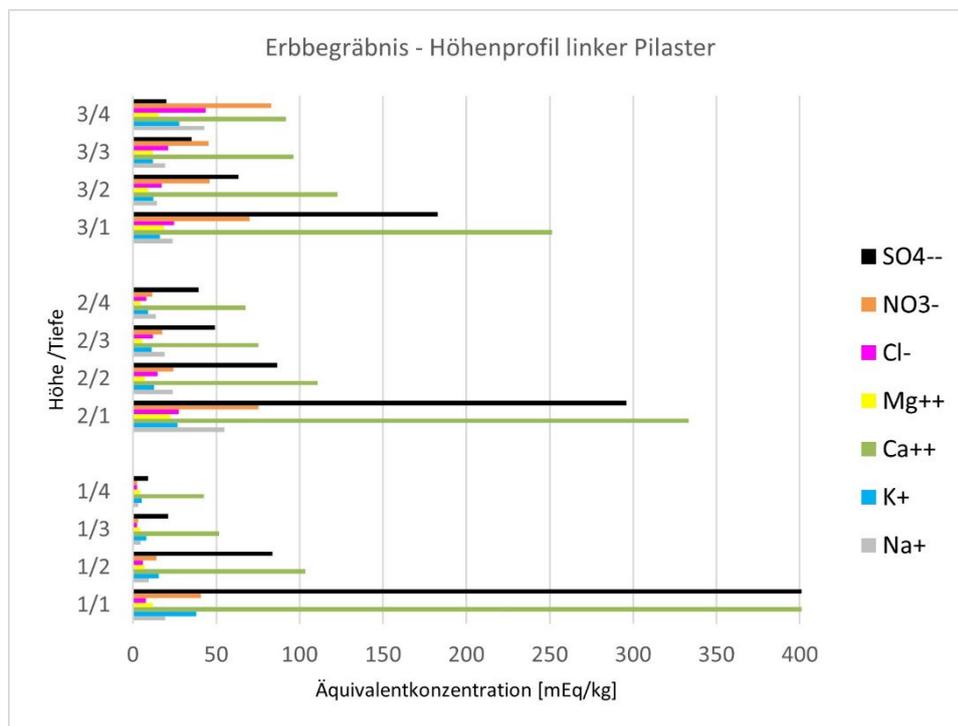


Abb. 8: Quantitative Salzionenverteilung im linken Pilaster im Höhen- und Tiefenprofil mit 1: 0-5 cm, 2: 5-15 cm, 3: 15-25 cm und 4: 25-40 cm – Erläuterung siehe Text

Die Analysen der Proben aus den oberflächennahen Bereichen der Wand enthalten viel Calcium und Sulfat, da auch Bestandteile aus dem Stuck herausgelöst wurden. In relativ

hohen Konzentrationen kommen zusätzlich Nitrat, Kalium und Natrium und in geringerem Maße Chlorid vor. Nitrate lassen sich aus Stoffwechselreaktionen organischer Materialien erklären und sind bei Kirchen mit Grablagen häufig anzutreffen. Kalium und Natrium stammen wahrscheinlich aus alkalischen Baumaterialien, die beim Wiederaufbau der Kirche verwendet worden sind. Da auch in den hinteren Bereichen insbesondere bei 155 cm Höhe ein Salzionenreservoir zu erkennen ist, wird noch länger mit Salzkristallisationen im Stuckbereich unter ähnlichen Klimakonditionen zu rechnen sein.

Die Ergebnisse der Erfassung der Klimadaten vom 23.02.2021 bis 30.08.2023 (Egel 2023) zeigten eine Bandbreite von Minusgraden in den Wintermonaten bis hin über 20°C in den Sommermonaten. Die relative Luftfeuchte schwankte zwischen 25% und 93% mit häufigen Oszillationen zwischen 40% und 85% (Abb. 9).

Die an den Oberflächen gemessenen Temperaturen unter dem Gefrierpunkt können Frost-Tau-Prozesse hervorrufen und Materialschäden verursachen. Die ermittelte Taupunkttemperatur ist stets kleiner als die Oberflächentemperatur, so dass Kondensationsereignisse nicht stattgefunden haben. Allerdings ist bei hoher Luftfeuchte am Erbbegräbnis mit hygroskopischer Feuchte (Feuchtaufnahme durch Salze bzw. durch Salzionengemische entsprechend ihrer Deliqueszenzfeuchten) zu rechnen (www.salzwiki.net).

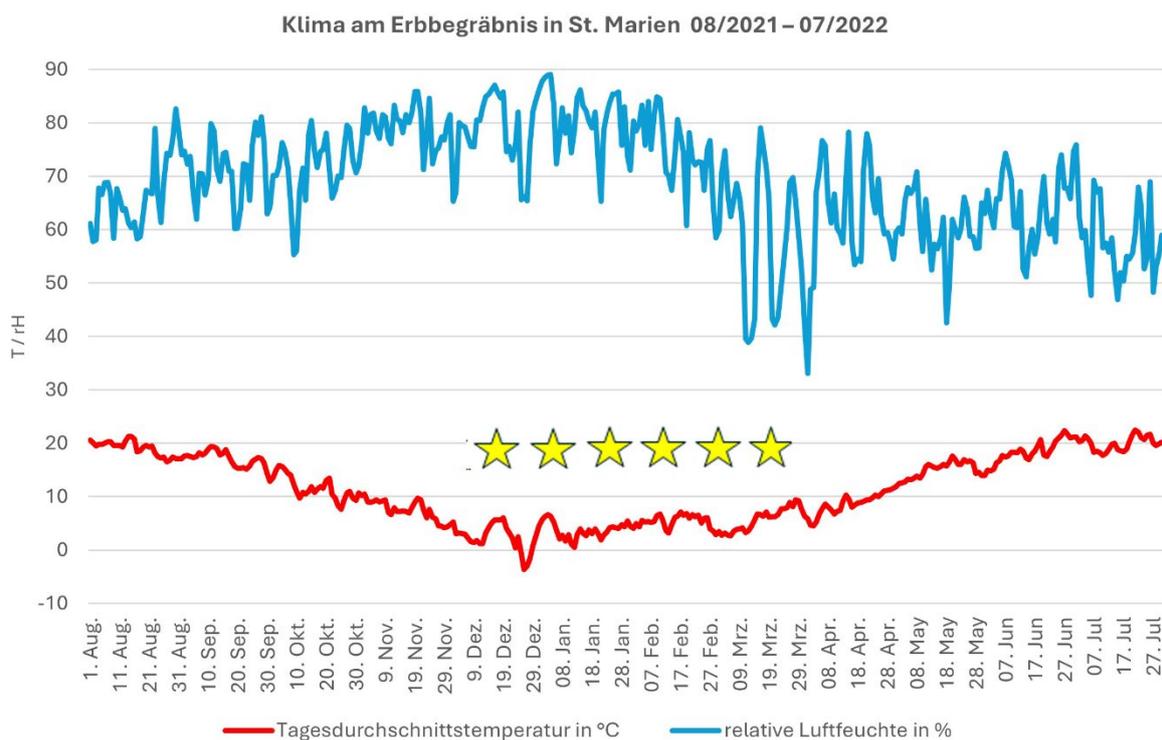


Abb. 9: Tagesdurchschnittswerte der Lufttemperatur (T) und der relativen Luftfeuchtigkeit (rH) vom 01.08.2021 bis 31.07.2022 in unmittelbarer Nähe des Erbbegräbnisses, gelbe Sterne stellen die Kristallisationszeiten von Nitrokalit dar, Darstellung: Steffen Laue, Klimadaten wurden von Ellen Egel vom BLDAM gemessen

Das Ergebnis des Monitorings der Salze in Bezug auf das Klima am Erbbegräbnis (Tagesmittelwerte der Lufttemperatur und relativen Luftfeuchte) ist in Abb. 9 für ein Jahr von August 2021 bis Juli 2022 dargestellt. Neue Ausblühungen von Nitrokalit (KNO_3) konnten nur in den Wintermonaten festgestellt werden, wenn die Temperatur unter 10°C liegt. In den

Sommermonaten bei höheren Temperaturen wurde keine Kristallisation registriert. Der Grund dafür ist wahrscheinlich die starke temperaturabhängige Löslichkeit von Nitrokalit (Stephen und Stephen 1963): Bei kalten Temperaturen unter 10°C ist die Löslichkeit von Nitrokalit nur halb so groß wie bei Temperaturen um 20°C. Folglich erreicht eine Mauerwerkslösung, die relativ viel Kalium- und Nitrationen enthält, bei niedrigen Temperaturen die Sättigung viel früher als bei höheren Celsiusgraden, was die Kristallisationen und Schäden in den Wintermonaten erklärt (Laue 2023b).

Abb. 10 zeigt die Kristallisationsabfolge der Salze entsprechend der quantitativen Salzanalyse vom vordersten Zentimeter der unteren Bohrung am linken Pilaster – berechnet mit dem Programm ECOS/RUNSALT (Bionda 2006, Steiger 2009).

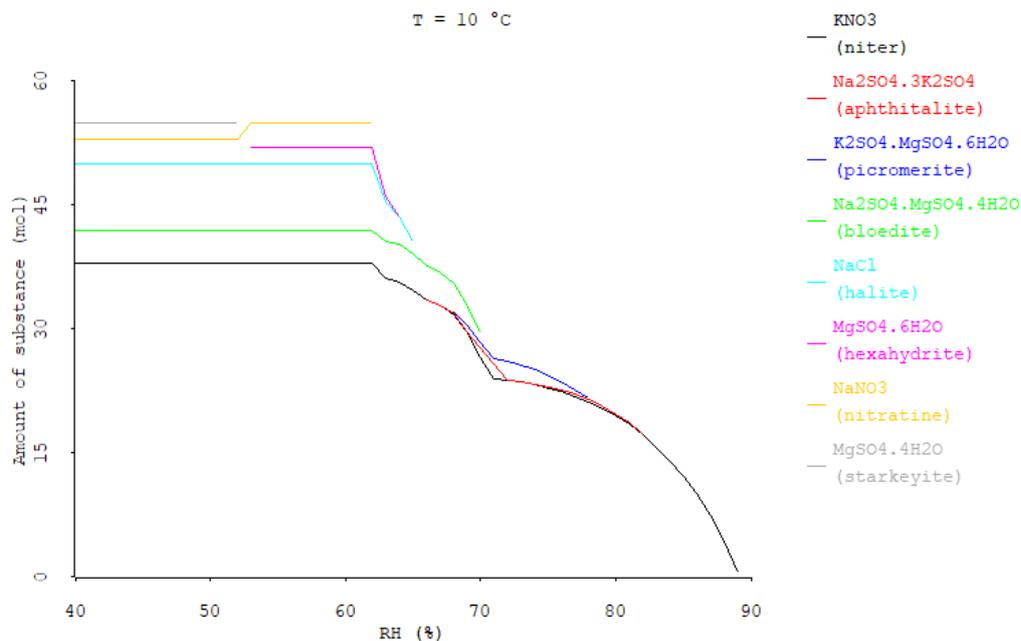


Abb. 10: Kristallisationsabfolge löslicher Salze an der unteren Stelle 1 beim linken Pilaster bei fallender relativer Luftfeuchte (von rechts nach links) berechnet mit ECOS/RUNSALT unter Verwendung der IC-Daten von Probe 1/1 (weitere Erläuterung siehe Text)

In Abb. 10 ist zu erkennen, dass bei 10°C in der Kirche unterhalb 90% relativer Luftfeuchtigkeit Nitrokalit (KNO_3) aus einer Mauerwerkslösung zu kristallisieren beginnt, unterhalb von ca. 82% relativer Luftfeuchtigkeit weitere Sulfatsalze und unterhalb ca. 66% sogar NaCl kristallisieren würden. Trotz der starken Vereinfachung des Datensatzes lässt sich aus den Berechnungen der Trend erkennen, der auch während des Monitorings gewonnen werden konnte: Nitrokalit ist das besonders schadensrelevante Salz am Erbbegräbnis, und es muss auch in Zukunft mit weiteren Nitrokalit-Ausblühungen bei den herrschenden Klimaverhältnissen in der Marienkirche gerechnet werden.

Zusammenfassung der naturwissenschaftlichen Ergebnisse

Die Analysen zum Bestand, Zustand und zu den ablaufenden Schadensprozessen am Erbbegräbnis lieferten eine gute Grundlage zur Entwicklung von geeigneten Konservierungsverfahren in den drei Materialbereichen Wandmalerei, Stuck und Metallplatten (siehe folgenden Abschnitt). Die in den 1980er Jahren eingebrachten polymeren Bindemittel zur Konservierung der Wandmalerei und der Farbfassungen auf der

Stuckgestaltung bestehen aus verschiedenen Acrylatgemischen mit unterschiedlichen Additiven (siehe Tabelle 1). Die Sicherung der Malschichten erzeugte einen Film aus Konservierungsmittel und Schlussfirnis von beträchtlicher Schichtstärke, der durch Alterung und Versprödung die bereits vorhandene Craquelé-Bildung in der Malschicht verstärkte und zur partiellen Ablösung großer Schollen führte.

Die Querschliffe konnten zudem zeigen, dass die Kunststoffbindemittel nicht nur aufliegen, sondern auch eingedrungen sind, was bedeutet, dass die Polymere aus den Oberflächen nicht zu entfernen sind, ohne auch die Originalsubstanz stark in Mitleidenschaft zu ziehen. Es wird also ein Weg gefunden werden müssen, wie man mit den im Gefüge vorhandenen polymeren Bindemitteln langfristig leben kann.

Vergleicht man die Salzscheidendynamik von heute mit der beschriebenen aus den 1980er Jahren (Klemm 1988), als kurz zuvor die Einmauerung entfernt wurde und das Erbbegräbnis wieder mit dem Raumklima interagieren konnte, sind starke Salzausblühungen in der Wandmalereische aktuell nicht mehr festzustellen. Lediglich sind vereinzelt Gipsneubildungen anzutreffen (Lehmann 2025). Starkes zyklisches Salzwachstum ist heute auf den unteren Bereich des Erbbegräbnisses bis in eine Höhe von ca. 150 cm beschränkt, wo allerdings bei den Stuckmaterialien starker Substanzverlust zu verzeichnen ist. Dieser Bereich wird auch in Zukunft durch zyklisches Kristallisieren insbesondere in Wintermonaten betroffen sein, da in tieferen Bereichen der Wand ein relativ hohes Potential an löslichen Salzionen nachgewiesen werden konnte.

Handlungsstrategien und modellhafte Umsetzung

Nach den erfolgten Recherchen und Untersuchungen haben verschieden spezialisierte Restaurator:innen in Kooperation mit dem BLDAM und der FHP individuelle Konservierungsstrategien für die unterschiedlichen Materialien am Erbbegräbnis entwickelt und modellhaft umgesetzt.

Wandmalerei – Entwicklung und Umsetzung der Strategie: Dipl.-Rest. Martin Lehmann

Das Erscheinungsbild der Wandmalerei war vor den Maßnahmen im Rahmen des Projekts stark beeinträchtigt. Die in den 1980er Jahren ausgeführten Strichretuschen mit Acrylfarben erscheinen nach ca. 40 Jahren Alterung zu dunkel. Im UV-Licht zeichnet sich die Retusche dunkel vom lumineszierenden barocken Bestand ab. Zusammen mit den Fehlstellen in den Randbereichen der Kalotte ist die barocke Malerei heute nur mehr zu ca. 60 Prozent erhalten geblieben. Zusätzlich aufliegende weiße Beläge verunklären den Bildgegenstand erheblich. Besonders in den dunklen Bildbereichen ist eine kompakte weiße Kruste auf der Maleroberfläche deutlich zu erkennen (Abb. 11). Dabei handelt es sich um mineralische Auflagen, die als Gips, Bleicarbonat und Bleihydrogencarbonat identifiziert wurden (Laue 2024). Eine zusätzliche Beeinträchtigung ergibt sich durch den eingetrübten, teilweise bräunlich, teilweise glänzend erscheinenden Firnis, der bis zu 35 Mikrometer dick ist (Laue 2025). Die Retuschen der 1980er Jahre erscheinen matt. Des Weiteren ist die Maleroberfläche von einem feingliedrigen Krakelee durchzogen, welches eine erhebliche visuelle Beeinträchtigung verursacht.

Verluste und Abhebungen der gesamten Malschicht samt ihrer Grundierung sind in vielen Bereichen festzustellen. Die deformierten Malschichtschollen haben sich vom Putzuntergrund gelöst und drohen abzufallen. Die Deformation der Malschicht an manchen Stellen verweist auf eine erhöhte Spannung an der Maleroberfläche. Durch die Alterung und Versprödung des aufliegenden Polymerfilms kommt es zur Ausbildung von Kontraktions-

und Scherspannungen, die ein Ablösen der Malschicht befördern (Lehmann 2025). Ergänzende Wasseraufnahmetests belegten, dass die Maleroberfläche stark hydrophob ist und keinerlei Wasseraufnahme ermöglicht. Zusätzlich können hygrische Quell- und Schrumpfungprozesse des aufliegenden Filmes zu Spannungen führen, die sich auf die Malschicht übertragen.

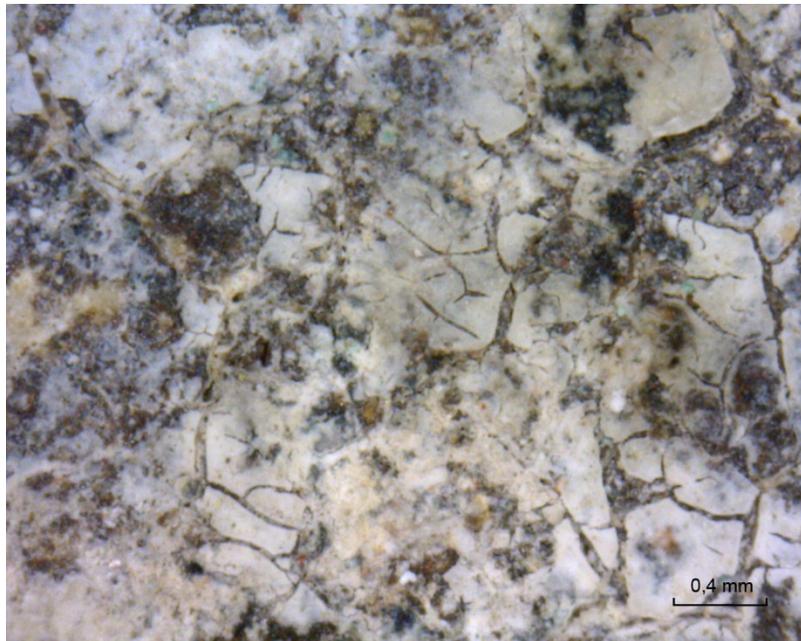


Abb. 11: Weißer mineralischer Belag auf der Wandmalerei bestehend aus Gips und Bleiweiß

Das Ziel der auszuführenden konservatorischen Maßnahmen war zunächst eine Stabilisierung des gefährdeten Malereibestandes durch eine strukturelle Konsolidierung des Malerträgers und eine Festigung und Wiederverklebung der abgehobenen Malschichtschollen mit dem Untergrund. Der am Schadensprozess beteiligte aufliegende Kunststofffilm sollte durch ein geeignetes Verfahren abgenommen bzw. reduziert werden. Weitere restauratorische Maßnahmen konzentrieren sich auf eine ästhetische Aufwertung der Malerei durch die Reduzierung störender aufliegender Beläge und eine Abnahme oder Verbesserung der verdunkelten Retuschen.

Für die Durchführung konservatorischer und restauratorischer Maßnahmen war es zunächst erforderlich, geeignete Materialeien in kleinen Testbereichen zu erproben und ihre Wirkungsweise zu evaluieren. Nach jedem Test erfolgte eine Untersuchung der Oberfläche mittels Mikroskops und verschiedenen Beleuchtungsarten (UV-Licht, Streiflicht etc.). In einer größeren Probefläche von ca. 30 mal 30 Zentimetern konnten anschließend die für die Anwendung empfohlenen Verfahren umgesetzt werden. Dies ermöglichte die Visualisierung des Bearbeitungsergebnisses in einem größeren Maßstab. Die vorgeschlagenen Maßnahmen wurden im Anschluss mit allen Projektbeteiligten diskutiert.

Folgende Verfahren wurden umgesetzt:

A) Malschichtfestigung

Die Festigung und Verklebung der spannungsreichen deformierten Malschichtschollen war nur mit Hilfe einer Kunststoffdispersion (Lascaux Medium für Konsolidierung) möglich. Alle anderen im Vorfeld erprobten Festigungs- und Klebemittel (Tylose, Funori, Hasenhautleim, Hausenblasenleim) erbrachten nicht die erforderliche Klebkraft für eine dauerhafte

Anbindung an den Untergrund. Bei der verwendeten Kunststoffdispersion handelt es sich um eine feindisperse reine Acryldispersion mit einem besonders gutem Penetrationsverhalten. Der transparente und elastische Film ist lichtecht und alterungsbeständig. Das Produkt wurde für die Malschichtfestigung an Holzobjekten entwickelt und ist seit ca. 20 Jahren im Einsatz (Hedlund et al. 2005). Das Festigungsmittel wurde zur Hälfte mit destilliertem Wasser verdünnt und mittels feiner Kanüle oder Pinsel hinter die Scholle verbracht. Die eingebrachte Feuchtigkeit bewirkte eine latente Verformbarkeit und Flexibilität der zuvor harten und spröden Schollen, sodass diese vorsichtig angedrückt werden konnten. Anschließend wurden Rückstände des Festigungsmittels mit einem nebelfeuchten Schwämmchen von der Oberfläche entfernt. Die Festigung der Malschicht erfolgte im gesamten Bildfeld.

B) Kunststoffreduzierung

Bisherige Erfahrungen im Umgang mit Kunststoffreduzierungen konzentrierten sich auf den Einsatz organischer Lösemittel in unterschiedlichen Modifikationen. Gealterte Kunstharzfilme weisen ein vermindertes Löseverhalten auf und sind aufgrund ihrer makromolekularen Struktur schlecht zu mobilisieren. Das während der konservatorischen Bearbeitung an den romanischen Gewölbemalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg entwickelte Niederdruckverfahren ermöglichte eine effektive und homogene Reduzierung (Lehmann 2013). Andere Verfahren beinhalten die Anwendung von Mikroemulsionen (Dei et al. 2000; Carretti et al. 2003) oder Enzymen (Bellucci et al. 1999).

Die im Vorfeld durchgeführten Lösemitteltests hatten gezeigt, dass insbesondere Ketone und Ester gut befähigt waren, den aufliegenden Acrylharzfilm zu lösen. Das zur Anwendung kommende Verfahren sollte mit einer möglichst geringen mechanischen Beanspruchung der Oberfläche realisiert werden.

Die Reduzierung des aufliegenden Films untergliedert sich in zwei aufeinander folgende Schritte: 1. Lösung des Kunststofffilms und 2. Abtransport der Lösung. Dabei unterliegen die großen Moleküle des künstlichen Polymers einem eher trägen Löseprozess und sind schwer mobilisierbar. Für den Transport der Lösung bedarf es einer zusätzlichen (mechanischen) Kraft. Neben Reiben oder Tupfen kann der Abtransport auch durch die Sogwirkung absorbierender Substrate (Kapillarsog) realisiert werden, die an die Oberfläche angedrückt werden und im Vergleich zu herkömmlichen Verfahren kaum mechanischen Stress ausüben. Das Lösemittel Aceton wurde mittels Pinsel auf ein stark saugendes Zellstoffpapier aufgetragen. Drei Blätter desselben Papiers wurden im direkten Anschluss mit einer kleinen Malerrolle an das befeuchtete Papier angedrückt. Der so realisierte Kapillarsog ermöglichte einen Transport der Kunststofflösung in die trockenen Papiere. Die Anwendung führte zu einer leichten Gelbfärbung der Zellstoffpapiere und einer Eintrübung der behandelten Oberfläche. Für ein homogenes Ergebnis erfolgte eine wiederholte Anwendung mit versetztem Auftrag (Lehmann 2025).

Eine mikroskopische Untersuchung im UV-Licht bestätigte eine effektive Abnahme des aufliegenden Filmes (Abb. 12). Bei der Eintrübung der Oberfläche handelte es sich um den aufliegenden weißen mineralischen Belag, der durch die Abnahme des Filmes und die Reduzierung der oberflächennahen Lichtbrechung deutlicher zu erkennen war.

Die in den 1980er Jahren mittels Acrylfarbe ausgeführte Strichretusche blieb bei der Kunststoffreduzierung größtenteils unbeschädigt. Durch die Abnahme des aufliegenden Filmes kam es zu einer zusätzlichen Differenzierung von Retusche und Original durch die allgemeine Aufhellung der barocken Maleroberfläche.

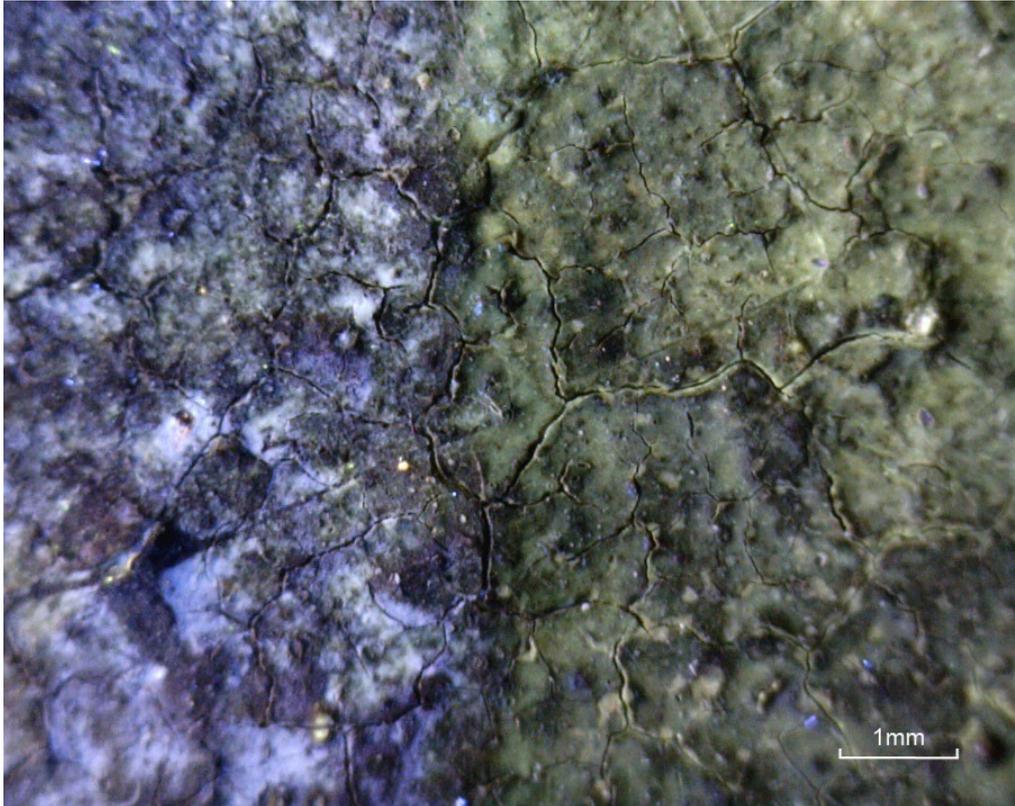


Abb. 12: links: nach Abnahme des aufliegenden Kunststofffilms mit weißem mineralischem Belag auf der Maleroberfläche; rechts: grau-gelbliche Lumineszenz des noch nicht reduzierten aufliegenden Kunststofffilms, UV-Licht

C) Abnahme des aufliegenden mineralischen Belags

Für die Abnahme der gipshaltigen Bleiweißkruste wurden zunächst verschiedene Materialien in Erwägung gezogen, die theoretisch ein Lösen des Belags ermöglichten. Zur Auswahl standen Komplexbildner, Ionenaustauschharze und schwache Säuren. Alle diese Substanzen sind mehr oder weniger auch befähigt die Malerei mit ihrem ölhaltigen Bindemittel und den enthaltenen Pigmenten (z.B. Kupfer- und Bleipigmente) zu beschädigen. Eine Diffusion dieser Substanzen in die Malschicht und insbesondere in die bleiweißhaltige Grundierung musste insofern auf ein absolutes Minimum reduziert werden. Eine Anwendung war nur mit Hilfe geeigneter Trägersubstanzen mit ausreichendem Rückhaltevermögen vorstellbar, so z.B. stark viskose Gele oder Hydrogele. Zudem waren Konzentration und Einwirkzeit zu erproben. In einer aufwendigen Testreihe wurden in kleinen Testfeldern von 2x2cm Größe verschiedene Rezepturen und Trägersubstanzen erprobt und im Anschluss einer visuellen Beurteilung mittels Mikroskops unterzogen.

Das beste Ergebnis wurde mit einer neutralen 1,8%igen EDTA-Lösung erzielt, welche mittels Hydrogel zweimal 15 Minuten appliziert wurde. Im braunen Farbbereich der kleinen Testflächen zeigte sich die Malerei ausreichend stabil. Der aufliegende weiße Belag wurde weitestgehend entfernt. Bei Anwendung in der größeren Probefläche (ca. 30x30cm) zeigten jedoch rote und grüne Partien der Malerei wenige kleinteilige Verluste. Für eine sichere Anwendung sind in Zukunft weitere Tests erforderlich.

D) Auftrag eines neuen Firnisses

Zur Verminderung der visuellen Störfaktoren, die sich aus den Resten der weißen mineralischen Beläge und der mit einem feinen Krakelee durchzogenen Malschicht ergaben, wurde ein Firnis in niedriger Konzentration (3%ige Lösung von Paraloid® B72 in Ethylacetat) im Sprühverfahren appliziert.

Der Auftrag bewirkte eine leichte Farbvertiefung und Verbesserung der Lesbarkeit der Malerei. Die geringe Konzentration verhinderte die Ausbildung eines kompakten aufliegenden Filmes, der sich etwa durch Glanz und Reflexion auszeichnet. Eine Veränderung physikalischer Austauschprozesse war nicht zu befürchten. Einerseits sind durch die technologischen Merkmale einer ölgebundenen Malerei wässrige Austauschprozesse ohnehin kaum möglich und nur entlang der feinen Risse in der Malschicht (Krakelee) vorstellbar. Andererseits verändert ein in geringer Konzentration und im Sprühverfahren aufgetragener Kunststoffilm die relevanten Kenngrößen, wie Wasserpermeabilität und Wasserdampfdiffusionswiderstand auf einer ohnehin dichten Oberfläche nur unwesentlich (Lehmann 2003).

E) Überarbeitung alter Retuschen

Die in vielen Bereichen zu dunkel erscheinenden Acrylretuschen der 1980er Jahre wurden entfernt und mittels Gouachefarbe ergänzt. Dabei erfolgte eine Anpassung in Farbigkeit, Helligkeit und Textur an die Umgebung der Fehlstelle.

Fazit

Mit den durchgeführten konservatorischen Verfahren konnten eine Stabilisierung des Malereibestandes erreicht werden. Der aus heutiger Sicht in den 1980er Jahren erfolgte massive Eintrag synthetischer Polymere als Festigungs- und Beschichtungsmittel wurde durch die Reduzierung des aufliegenden gealterten Kunststoffilmes korrigiert. Trotzdem war es bei der Malschichtkonsolidierung und beim Auftrag eines Firnisses erforderlich auf bewährte Kunststoffprodukte zurückzugreifen, die jedoch in geringen Konzentrationen oder lokal begrenzt Anwendung fanden. Die sich aus Alterung und Filmbildung ergebenden Risiken konnten somit auf ein Minimum reduziert werden.

Die erprobten restauratorischen Maßnahmen erbachten eine Verbesserung der visuellen Erscheinung (vergleiche Abb. 13 mit Abb. 14). Die durch Glanz, weiße Beläge und verdunkelte Retuschen stark beeinträchtigte Malerei ist wieder gut erkennbar – weitere Details zur Konservierung und Abbildungen siehe Lehmann (2025).



Abb. 13: Detail der Wandmalerei (Jesus mit den Aposteln) vor den Konservierungsarbeiten mit dunklen Retuschebereichen und Vergrauungen der Oberflächen durch Alterung des Kunststofffilms, Bildbreite entspricht ca. 25cm, Bild von Steffen Laue 2021



Abb. 14: Detail der Wandmalerei (Jesus mit den Aposteln) nach den Konservierungsarbeiten, Bildbreite entspricht ca. 30cm, Bild von Martin Lehmann 2025

Stuckmaterialien – Entwicklung und Umsetzung der Strategie: Dipl.-Rest. Lukas Böwe und Dipl.-Rest. Anke Höchel-Pradel

Das Erscheinungsbild der Stuckmaterialien im unteren Bereich des Epitaphs hat sich seit den 1980er Jahren dramatisch verändert. Bei Begutachtung 2018 waren massive Schäden bei der Stuckarchitektur durch Salzkristallisationen festzustellen (Böwe 2019). Weitere Verluste seitdem (Abb. 15) deuten auf aktuelle Salzsprengeneffekte hin, dessen Ursache im Rahmen des Projekts untersucht worden sind (siehe Naturwissenschaftliche Untersuchungen). So zeigte der mehrlagig aufgebaute barocke Grundputz verbreitet Schichtentrennungen und mitunter beträchtliche Ausbeulungen.



Abb. 15: Stuckmaterialien, Schadensbild im nördlichen Sockelbereich mit Klimamessgeräten

Die wenigen vorhandenen Abschlussfotografien der Restaurierungskampagne von 1983-88 zeigen die damals offenbar großzügig ergänzte Sockelzone weitgehend geschlossen und intakt (Klemm 1988). Inzwischen sind besonders die damals überarbeiteten oder rekonstruierten Bereiche wieder schadhafte geworden oder fehlen völlig. In den oberen Bereichen des Stucks ist der Erhaltungszustand dagegen deutlich besser, wenngleich auch hier einige Schäden vorhanden sind.

Zusammenfassend konnten folgende typische Schadensbilder in den Kartierungen differenziert werden: Schalenbildung (z.B. Abhebungen der dünnen Gipsglätte der 1980er Jahre), Versinterungen, Salzkrusten und -ausblühungen, Fehlstellen, Rissbildungen, Hohllagen (partiell beweglich), unsachgemäße Kittungen oder Ergänzungen, Verunreinigungen und biogene Auflagen.

Die Bestandsaufnahme von 2018 beinhaltete auch eine sondierende Fassungsuntersuchung (Böwe 2019). Die 2022 weitgehend weiß erscheinende Kalkstuckornamentik und die Putzflächen muss man sich historisch in einer kräftig farbigen Marmorierungsfassung vorstellen. Auch in den schadhafte Kartuschen der Brüstungszone konnten Reste einer kräftigen Farbfassung nachgewiesen werden, ohne dass die Gestaltungsentention hier noch klar nachvollziehbar wäre. Die Befunde am Todesengelmotiv der Bekrönung des Hauptgesimses erlauben die Schlussfolgerung, dass offenbar auch die frei angetragene

Stuckornamentik ursprünglich polychrom gefasst war (Details siehe Böwe und Höchel-Pradel 2025).

Notsicherungs- und Konservierungsmaßnahmen

Es bestand die dringende Notwendigkeit in den besonders stark geschädigten Sockelbereichen den Stuck durch geeignete Maßnahmen wie Anböschungen und Hinterfüllungen von Hohllagen primär zu sichern. Die meist fragilen Oberflächen der Sockelzone wurden zuerst mit einer Japanpapierkaschierung (Klebstoff Tylose® MH 300) gegen Verlust gesichert. Danach erfolgte eine Stabilisierung von losen und aufklaffenden Putzkanten mittels eines speziell eingestellten Sumpfkalkmörtels (Mischungsverhältnis 1 T Sumpfkalk : 3,5 T Sand). Besonders im Mittelbereich des südlichen Brüstungsfeldes hatte sich im verbliebenen dickschichtigen Flächenputz eine massive Ausbeulung ausgebildet. Der Abstand des offenbar spannungsreicheren Glättputzes vom Träger betrug bis zu 5cm. Eine Rückformung bzw. Anlegung dieser Beule kam nicht in Frage, da die Putzschale durch Versinterungsprozesse ihre Flexibilität weitgehend verloren hatte. Nach der Oberflächen-sicherung mit Japanpapier und notwendigen Anböschungen gelang es, den Hohlraum mittels feiner Langspachtel und Staubsauger von dahinter liegenden Schmutz- und Putzresten zu befreien. Daraufhin war es möglich, entsprechend pastoses Mörtelmaterial recht weit in den Hohlraum einzubringen. Darüber hinaus erfolgte die Einbringung eines speziellen Injektagemörtels (Ledan® D1) zur Auffüllung und Verklebung feiner Hohllagen und Rissbereiche. Dieser sehr fließfreudige Hinterfüllmörtel wurde mittels Spritzen und Kanülen über kleine Zugänge eingebracht. Versinterungskrusten ließen sich während der Notsicherung nur bedingt konsolidieren, daher erfolgte nur eine erste reversible Fixierung mittels Japanpapierkaschierung. Aufgrund der hohen Eigenspannung dieser Krusten war ein verlustfreies Anlegen der abgelösten Bereiche im Rahmen dieser Arbeiten jedoch nicht möglich.

Salzreduzierung

Direkt im Anschluss der Notsicherung wurde eine erste Salzreduzierung durch das Aufbringen eines geeigneten Opferputzes in exponierten Sockelzonen durchgeführt. Als erster Schritt erfolgte im Sockelbereich eine vorsichtige manuelle Abnahme der erkennbaren auskristallisierten Salzauflagen, bevor der Opferputz appliziert wurde. Hierfür wurde ein mager eingestellter Reinkalkmörtel (1 Teil Sumpfkalk : 4,5 Teile mittelfeiner Sand) in einer Schichtstärke von 20-25mm aufgezogen. Zum Schutz des partiell fragilen Bestandes und um eine möglichst schadensfreie spätere Abnahme des Opferputzes zu gewährleisten, wurde die Japanpapierkaschierung der Notsicherung gleich als Trennschicht belassen. Parallel dazu erhielten einige ausgewählte flächige Sockelbereiche Arbocel®-Kompressen, um eine alternative Entsalzungsmethode zu testen. An einigen plastischen Kalkstuckbereichen wurden außerdem Bentonitkompressen aufgelegt, denen Arbocel® BC 200 und Thixotropiermittel beigemischt wurde.

Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen im Jahr 2024

Die weiterführenden Konservierungs- und Restaurierungsmaßnahmen erfolgten 2024 zeitgleich mit den Leistungen an der Wandmalerei. Ziel der Arbeiten war zunächst eine weitere Stabilisierung des reduzierten Putz- und Stuckbestandes. Weiterhin sollte aber auch eine Beruhigung und annähernde Wiederherstellung des Gesamterscheinungsbildes durch Ergänzung wichtiger Putzbereiche und gliedernder Stuckarchitektur sein. Auf stark hypothetische Ergänzungen verlorener Ornamentik sollte dabei verzichtet werden.

Zu Beginn der Arbeiten erfolgten die Abnahme des Opferputzes zur Salzreduzierung und die Entfernung der aufgetragenen Oberflächensicherungen durch Japanpapier. Die Bentonithaltigen Kompressen zeigten eine deutlich stärkere Untergrundhaftung als der im ersten Durchgang 2022 aufgetragene magere Reinkalk-Opferputz, welcher, nach entsprechender Standzeit, sehr leicht von der Oberfläche entfernt werden konnte.

Anschließend erfolgte eine großflächige systematische vorsichtige Reinigung aller Putz- und Stuckoberflächen.

Bei der Überprüfung der Nachhaltigkeit der bisher erfolgten Konsolidierungsmaßnahmen (z.B. Anböschungen, Hohlstelleninjektage) zeigte sich eine anhaltende Wirksamkeit und insgesamt guter Festigungserfolg. Daher wurde nun eine erweiterte systematische Hohlstelleninjektage vorgenommen, auch in den oberen Bereichen der Stuckaturen.

Parallel dazu erfolgte eine Festigung der noch erhaltenen barocken Fassungsgebiete mit Hilfe von Japanpapier (überwiegend Reste der Marmorierung und Schlagmetallaufgaben).

Bei den vorab ausgeführten Proben erwies sich ein Festigungsmittel aus Tylose® MH 300, unter 3%igen Zusatz eines Acryl-Konsolidierungsmediums (Lascaux®), am effektivsten. Die Zugabe dieses geringen Kunststoffanteils ist den klimatischen Bedingungen in der Kirche geschuldet.

Vor der geplanten Kittung bzw. Ergänzung von Fehlstellen erfolgte die Entfernung kleinerer frei liegender korrodierter Eisenteile. Einige der größeren bauzeitlichen Putz- und Stuckarmierungen waren nur partiell sichtbar, ihre Entfernung hätte zu großen Verlusten an Barocksubstanz geführt. Hier wurden nur die erreichbaren Teile entrostet und mit einem Korrosionsschutz (Ovatrol®) versehen.

Insgesamt erwiesen sich die barocken Stuckoberflächen als meist noch recht stabil und kaum entfestigt, so dass eine oberflächliche Strukturfestigung nicht notwendig war. Der Materialzustand der Ergänzungen der 1980er Jahre war dagegen wesentlich schlechter. Hier wurde jedoch, nach Absprache mit dem BLDAM, auf eine aufwendige Festigung verzichtet. Einige wenige sehr stark erodierte Alterergänzungen mussten, vor Beginn der neuerlichen Kittungen, aus technologischen Gründen zurückgearbeitet werden.

Anschließend erfolgte eine materialgerechte Ergänzung im Bereich der Fehlstellen besonders in der rahmenden Stuckarchitektur (z.B. Profilrahmen- und Basen der Pilaster, südliches Brüstungsgesims). Dabei wurden die wichtigen Seitenpilaster ergänzt, wobei die vertikalen Profildüge mit Profilschlitten in Kalkmörtel nachgezogen wurden (Abb. 16).

Bei größeren Materialstärken wurde eine rostfreie Drahtarmierung für den Putzaufbau verwendet. Für Kittungen bzw. vereinzelt nötigen Ergänzungen in der Stuckornamentik kam eine Kalkstuckmischung mit einem Anteil von Hochbrandgips zur Anwendung.

Abschließend erfolgte eine farbliche Angleichung der ergänzten Stuckbereiche an den Farbton der gealterten Putze und Stuckaturen mittels einer lasierenden Retusche Technik mit Silikatkreiden ohne den Zusatz von Bindemittel (Aqua Sporca- Technik).



Abb.16: Epitaphnische nach Abschluss der Konservierung und Ergänzung der Kalkstuckarchitektur vor dem Einbau der Metallplatten, Foto: Anke Höchel-Pradel 2024

Schmiedeeiserne Schrifttafeln – Entwicklung und Umsetzung der Strategie: Henryk Kazmierczak M.A.

Nach Abnahme der vier Schrifttafeln und vor der weiteren Bearbeitung in den Werkstätten der FHP lieferten die Röntgenuntersuchungen im BLDAM wertvolle Erkenntnisse über den Herstellungsprozess und die älteren Restaurierungsmaßnahmen. Auf den Röntgenbildern zeichneten sich klar die Kanten der Metalltafeln ab, sodass es möglich war im Vergleich mit der optischen Untersuchung der Oberfläche im Normallicht die Ergänzungen sowie ihre großflächige Ausdehnung auf die metallenen Bereiche zu kartieren (Abb. 17). Zusätzlich wurden die Vernietungen und Überlappungen der Bleche (Herstellung) sowie die Schichtung der Glasfasermatten (GFK-Matten) auf den Rückseiten der Tafeln (Altrestaurierung) sichtbar. Zur Konzeptfindung für den Umgang mit den Kunststoffergänzungen gab es nach Absprache mit dem BLDAM drei wesentliche Kriterien, die einbezogen werden sollten:

1. Die Bewahrung der Altrestaurierungen als Teil der Objektgeschichte
2. Die mögliche Auswirkung des Kunststoffs auf den Zustand der eisernen Originalsubstanz
3. Die eingeschränkte Lesbarkeit und das verfälschte Erscheinungsbild durch die großflächigen, teils auf die Oberfläche ragenden Ergänzungen.

Eine Bewahrung der Altrestaurierungen ist nur ratsam, wenn sichergestellt werden kann, dass schädigende Auswirkungen ausgeschlossen oder zumindest reduziert werden können. Die Meinungen über das Alterungsverhalten von ungesättigten Polyesterharzen, die in diesem Fall verwendet worden sind, werden in der Literatur diskutiert und sind nicht einheitlich (Waentig 2004 oder Horie 2010). Aus diesem Grund war die genauere Betrachtung des Zustands und der Materialität der Kunststoffergänzungen notwendig. Die wesentliche Befürchtung basierte auf der Annahme, dass der weitere Abbau der Kunststoffe

sowie mögliche Feuchtigkeit an den Grenzflächen zwischen der GFK-Doublierung und den eisernen Oberflächen korrosiv auf die Tafeln einwirken könnten. Jedoch konnte an mehreren abgeplatzten Bereichen sowie einer später erfolgten Probefläche festgestellt werden, dass sich der Zustand des Metalls unterhalb der Ergänzungsmasse nicht sichtbar verändert hatte, eventuell sogar durch diese geschützt wurde. Dennoch ist zu berücksichtigen, dass die physikalischen Eigenschaften der Kunststoffergänzungen stark von denen der Eisenplatten abweichen. So zeigten sich beispielsweise Risse und Delaminationen im Kunststoff wahrscheinlich als Folge von Dehnungs- und Schrumpfungsprozessen. Aus der Röntgenuntersuchung ging hervor, dass große Bereiche der Tafeln stark korrodiert sind und teilweise keinen festen metallischen Kern mehr besitzen. Bei einer Abnahme der Ergänzungen wäre die Stabilität und der Zusammenhalt der Tafeln nicht länger gewährleistet. Bereits Klemm (1988) erwähnte aufgehende Nietverbindungen. Zudem wäre die Wiederanbringung der Metalltafeln am Erbbegräbnis ohne die zusätzlichen Montagelöcher in den GFK-Matten nicht möglich.

Dennoch zeigten die Röntgenaufnahmen auch die großflächig mit Kunststoff überdeckten Bereiche der Tafeloberflächen und es bestand ein großer optischer Unterschied zwischen dem Originalmaterial und den Ergänzungen. Diese wurden in den 1980er Jahren farblich an den damaligen Zustand der Platten angepasst. Nach der Alterung von Platten und Ergänzungen ist diese Farbgebung allerdings nicht mehr gegeben.

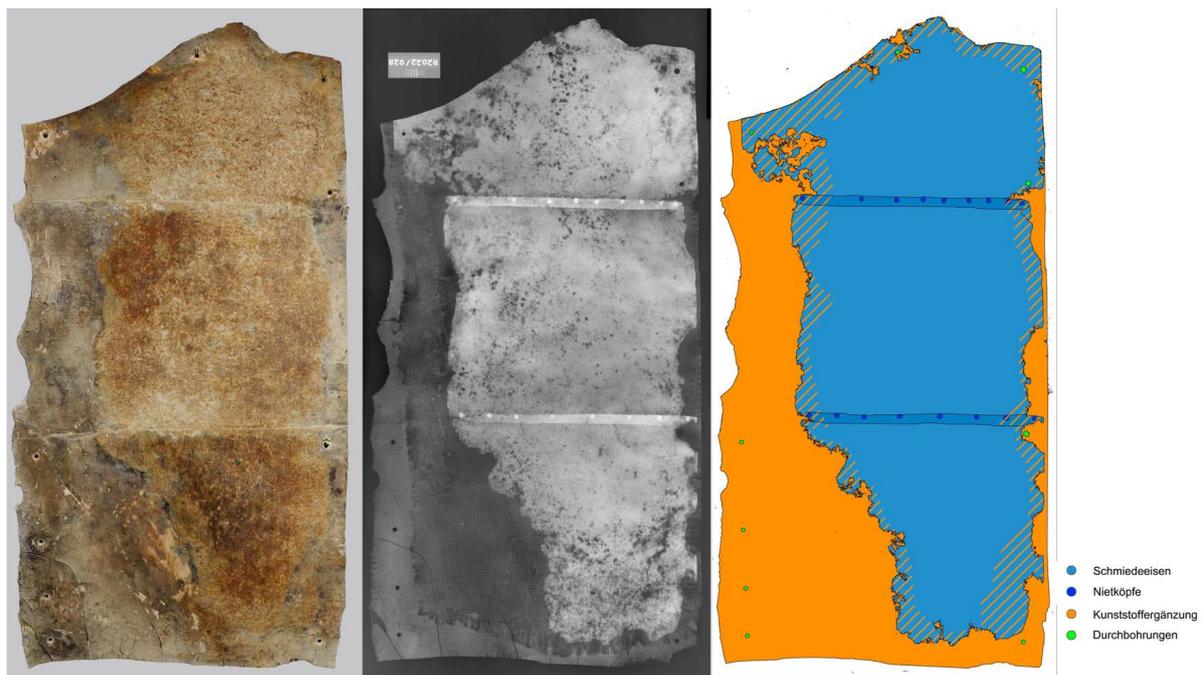


Abb. 17: linke Hälfte der rechten Doppel-Tafel im Vergleich von links nach rechts: VIS-Fotografie nach Abbau, Röntgenaufnahme, Materialkartierung, Bild: Henryk Kazmierczak 2022

Nach Abwägung aller Vor- und Nachteile bezüglich der Abnahme der Kunststoffergänzungen wurde folgender Kompromiss gefunden und anschließend ausgeführt: Die Ergänzungen sollen ausgedünnt werden, sodass sie zum einen die Originaloberfläche nicht mehr bedecken, dabei aber gleichzeitig weiterhin die Stabilität der Platten gewährleisten. Zum anderen wird eine visuell klar abzeichnende Grenze zwischen Tafeln und Ergänzung und

eine neutrale Retusche angestrebt, damit sich die Tafeln harmonisch in das restliche Begräbnis eingliedern, jedoch gleichzeitig die Restaurierungsmaßnahmen verortbar bleiben.

Reduzierung der Kunststoffergänzungen

Für die Entfernung der Kunststoffergänzungen von den Originaloberflächen sowie eine Ausdünnung in den Randbereichen wurden bei Voruntersuchungen verschiedene Möglichkeiten der Kunststoffabnahme evaluiert. Eine rein mechanische Abnahme mittels Skalpell wurde aufgrund der Härte des Polyesters ausgeschlossen. Jedoch sind Polyesterharze, obwohl sie in ihrer ausgetrockneten Form überwiegend beständig gegenüber verschiedenen Säuren, Alkalien und den meisten organischen Lösemitteln sind, aufgrund ihrer chemischen Eigenschaften in Estern oder Ketonen quellbar.

Diese Eigenschaft wurde für eine Testreihe aufgegriffen und eine Auswahl von Estern und Ketonen getestet. Des Weiteren wurden auf Basis positiver Erfahrungswerte bei der Entfernung von gealterten Kunststoffen chlorierte Kohlenwasserstoffe hinzugefügt. Für die Probereihe wurden kleinere, im Randbereich ausgebrochene Teile des Polyesterharzes entnommen, welche noch durch die GFK-Matte am Objekt hafteten. Sie wurden in gleich große Probekörper mit einer Kantenlänge von 3 mm gesägt. In der Folge wurden die Probekörper für einen Zeitraum von 12 Stunden in elf verschiedenen Lösemitteln gequollen. Die Auswertung erfolgte durch eine haptische Begutachtung der Proben unter einem Mikroskop mit einer Nadel zur Feststellung ihrer Reaktivität. Die Auswertung ergab, dass drei Lösemittel am besten abschnitten: Aceton, Methylethylketon und Dichlormethan (weitere Details siehe Kazmierczak 2022). Da beim Umgang mit Dichlormethan erhöhte Schutzmaßnahmen erforderlich sind und um die Flüchtigkeit des Acetons auszugleichen, wurde ein Lösemittelgemisch aus 50% Aceton und 50% Methylethylketon (weniger flüchtig) ausgewählt. Mit der Beimischung von Hydroxypropylcellulose (Klucel©) wurde dieses Lösemittelgemisch als Gelkompressen auf den Kunststoff aufgebracht und zur Verhinderung des schnellen Abdampfens mit Hostaphanfolie abgedeckt. Der gequollene Kunststoff ließ sich einfach und ohne viel Druck mittels Skalpell mechanisch abnehmen. Jedoch musste dieser Vorgang mehrmals wiederholt werden. Nach Abnahme der Polyesterharze von den eisernen Oberflächen entstand eine klare Grenze zwischen Originalsubstanz und Ergänzung.

Egalisierung und Schließung der Oberfläche

Die ausgedünnte Ergänzung zeigte im Anschluss eine strukturell unregelmäßige, fleckige Oberfläche mit teilweise freiliegenden Hohlräumen. Damit diese Bereiche eine einheitliche und glatte Erscheinung erhalten, wurde die Oberfläche des Kunststoffs im Anschluss mit einem groben Schleifpapier zügig und effizient egalisiert, während die anschließende Glättung mit einem feineren Schleifpapier ein optimales Ergebnis erzielte. Im Zuge dessen wurden kleine Blasen und strukturelle Risse in darunterliegenden Schichten offengelegt. Die Größeren wurden mit PE-Schaum (Etafoam®) ausgefüllt und mit einem Polyestervlies und 10 % Paraloid® B72 in Ethylacetat, die Kleineren mit einer Zwei-Komponenten-Polyesterspachtelmasse (Prestolith®) geschlossen. Die nach 24 Stunden gut ausgehärtete Kunststoffoberfläche wurde anschließend erneut leicht angeschliffen, um eine ebene Fläche zu erhalten.

Retusche

Nach der Egalisierung der Polyesterharzoberfläche und dem Schließen der Fehlstellen im Kunststoff zeigte sich ein fleckiges Erscheinungsbild. Die übereinander aufgetragenen Polyesterharzschichten zeigten eine Differenzierung in Grautönen und die

Egalisierungsmaßnahme mittels Polyesterspachtelmasse führte zu weiteren hellen Flecken. Diese helle, heterogene Farbgebung stand in hohem Kontrast zu der korrodierten Eisenoberfläche. Ziel war es zwar, die Ergänzungen weiterhin als solche sichtbar zu zeigen und nicht die Korrosionsflächen der Metalltafeln zu imitieren, dennoch war es notwendig die Ergänzungen optisch in den Hintergrund treten zu lassen und so das Erscheinungsbild der Tafeln zu schließen. Aus diesem Grund wurden die Kunststoffergänzungen mit einem warmen Mittelton aller vorhandenen Grautöne des Kunststoffs retuschiert, indem zuerst ein heller grau-brauner Farbton flächig aufgetragen und anschließend in einer zweiten Schicht eine leicht dunklere Farbe aufgetupft wurde. Verwendet wurden hier für Retuschierfarben auf einer Ketonharz-Basis. Im Ergebnis zeigen sich die Tafeln nun in einem einheitlichen Bild, anhand dessen sich dennoch die schmiedeeisernen Oberflächen sowie die Kunststoffergänzungen klar ablesen lassen (Abb. 18).



Abb. 18: Die vier Tafel nach der Retusche

Im Ergebnis konnten alle konzipierten restauratorischen Maßnahmen erfolgreich umgesetzt werden. Die schmiedeeiserne Oberfläche der Tafeln wurden gereinigt und gefestigt. Die Kunststoffergänzungen wurden reduziert, egalisiert, ausgebessert und optisch durch eine Retusche in das Gesamtbild integriert.

Dank der Restaurierung konnte die Verständlichkeit der noch erhaltenen Substanz der Tafeln deutlich hervorgehoben werden. Die Altrestaurierungen wurden an den aktuellen Zustand angepasst und lassen sich weiterhin als Teil der Objektgeschichte erleben. Im Oktober 2024 konnten die Tafel erneut erfolgreich am Erbgrabnis montiert werden (Abb. 19).

Durch die schwankenden klimatischen Bedingungen in der St. Marienkirche müssen mit weiteren Alterungsprozessen gerechnet werden. Regelmäßige Zustandskontrollen in allen Oberflächen des Erbgrabnisses werden empfohlen.



Abb. 19: Schrifttafeln nach dem Wiedereinbau beim Erbbegräbnis 2024

3.2.2 Wandbild „Mensch und Bildung“ der BTU Cottbus

Objekt und Restaurierungsgeschichte

Das monumentale Wandbild mit dem Titel "Mensch und Bildung" (Abb. 20), im Jahr 1972 nach Entwürfen des Malers Gerhard Krüger geschaffen, ist ein wesentlicher Bestandteil des umfassenden Gestaltungsprogramms des zu dieser Zeit entstandenen Bildungszentrums in Cottbus. Neben freistehenden Figuren und Brunnen im Außenraum wurden im Kontext des Programms "Kunst am Bau" monumentale Wandbilder an den Außenfassaden des Bildungszentrums geschaffen. Dabei war die Wahl der verwendeten Materialien vielfältig. Neben Putz und keramischen Materialien, wie Kacheln und Mosaiken, die in traditionellen Techniken verwendet wurden, kamen auch Kunststoffe und sogenannte Glaskrösel in neu entwickelten Beschichtungsverfahren für die Gestaltung dieser Wandbilder zum Einsatz. Das Wandbild ist ein seltenes Beispiel für die innovative Anwendung künstlerischer Techniken in der DDR und galt bereits zu seiner Entstehungszeit als eine werktechnische Herausforderung. Die speziell für das serielle Bauen in der DDR entwickelte Gestaltungstechnologie der elektrostatischen Beschichtung von Betonplatten mit Glaskröseln, die an der Hochschule für Bildende Künste (HfBK) Dresden für künstlerische Zwecke weiterentwickelt wurde, fand hier in modifizierter Form seine Anwendung. Es ist das dritte künstlerische Werk dieser Art nach dem bekannten Monumentalbild „Weg der roten Fahne“ am Kulturpalast in Dresden (1969) und den zwei Wandbildern an Schulhausgiebeln in Boxberg (1970). Alle drei Wandbilder wurden durch die HfBK Dresden realisiert. Das Dresdner Werk gilt als erstes Experiment in der Nutzung des elektrostatischen Beschichtungsverfahrens mit Glaskröseln für die künstlerische Gestaltung an Fassaden.



Abb. 20: Gesamtaufnahme des Wandbildes „Mensch und Bildung“ an der BTU Cottbus 2023

Technologischer Aufbau des Wandbildes „Mensch und Bildung“

Die monumentale Wandgestaltung befindet sich auf der Vorhangfassade des von Pfeilern getragenen Baus. Der Träger besteht aus 22 großformatigen Betonplatten (3,30 x 2,40 m) mit 4 schmalen querrchteckigen Platten unterhalb der Traufe. Die Betonplatten bestehen aus zwei klar differenzierten Schichten: einem Unterbeton und einem Oberbeton. Die Unterschicht ist eine Leichtbetonplatte, deren Gesteinskörnung aus Blähton, Schiefer und Schlacke besteht und die durch einen Zementleim gebunden ist. Auf Bewehrungen wurde bewusst verzichtet, um die spezifischen Materialeigenschaften zu bewahren. Über dieser Leichtbetonschicht wurde eine ca. 40 mm dicke Deckschicht aus dichtem, hellfarbigem Vorsatzbeton aufgebracht. Diese Deckschicht (Oberbeton) enthält einen Quarzsandzuschlag mit einer Korngröße von 0/8 und maximalen Überkörnern bis etwa 10 mm. Sie ist in eine Zementsteinmatrix eingebettet, die aus hochhydraulischem Mörtel mit sehr geringem Sulfatgehalt besteht. Das Bindemittel-Zuschlagsverhältnis beträgt 1:3 (Volumenteile). Der Oberbeton dient als Trägerschicht für das aufgebrachte Wandbild und bildet damit die gestalterische Oberfläche der Konstruktion. Die Fugenflanken zwischen den Betonplatten sind gerade, während die Kanten der Betonplatten abgefast sind. Der Fugenmörtel wurde nur bis knapp unterhalb der Abfasung aufgetragen, wodurch die Fugen durch die entstehende Vertiefung sichtbar bleiben. Als Fugenverschluss wurde „Morinol Fugenkitt“ verwendet - ein asbesthaltiger Fugendichtstoff auf der Basis von Polyvinylacetat mit Zusatz von Füllstoffen und Weichmachern. Der Asbestgehalt variiert zwischen 10 % und 40 %, wobei die Asbestfasern in der polymergebundenen Kunststoffmatrix aus Polyvinylacetat, die den Hauptbestandteil des Fugendichtstoffes Morinol bildet, fest eingeschlossen sind. Die Übertragung der Bildkomposition von dem Karton, im Maßstab 1:1 angefertigt, erfolgte vermutlich als Pause über eine Durchzeichnung auf Gaze, die auf Rahmen von 2,5 x 1,2 m Größe gespannt war. Anschließend erfolgte die Unterzeichnung mit einem rotbraunen Pigment, vermutlich in Polyvinylacetat (PVAc) gebunden, das auf die gesamte Fläche aufgetragen ist. In einigen Fehlstellen bleibt diese Unterzeichnung noch sichtbar.

Im nächsten Schritt überdeckte die Untermauerung als farbliche Anlage des Bildes die Unterzeichnung. Sie dient sowohl als Grundierung für die nachfolgenden Schichten als auch zur farblichen Orientierung während der Umsetzung der Beschichtung. Trotz ihrer geringen Schichtstärke liegt die Untermauerung deckend auf der Betonschicht. Sie setzt sich aus synthetischen Pigmenten zusammen, ebenfalls in Polyvinylacetat (PVAc) gebunden mit Zusätzen von Polyvinylalkohol (PVA) und Weichmachern (Laue 2025b, Micheluz et al. 2025). Der eigentliche Vorgang der elektrostatischen Beschichtung mit Glaskröseln begann mit dem Auftragen des Klebemittels auf die Untermauerung. Laut Quellenangaben muss dies unmittelbar vor der Beschichtung in handhabbaren Abschnitten durchgeführt worden sein, damit die Glaskrösel in der noch klebrigen Schicht stecken blieben. Der sogenannte Haftkleber besteht aus PVAc (Laue 2025b) mit Zusätzen von PVA und Weichmachern (Micheluz et al. 2025).

Das Beschichtungsmaterial der farbigen Glaskrösel variiert in der Größe zwischen 0,5 mm und 1 mm, wobei vereinzelt Bruchstücke bis zu 2 mm vorkommen (Abb. 21 und 22). Es handelt sich überwiegend um opakes Farbglass, wenige Farbglasskrösel sind transparent. Die farbigen Flächen bestehen aus präzisen Mischungen unterschiedlich farbiger Glaskrösel. Insgesamt lassen sich 22 wiederkehrende Farbmischungen im Bild feststellen. Diese Mischungen sind nach bestimmten prozentualen Anteilen der jeweiligen Farbglasskrösel vorbereitet und vermutlich von Krüger und seinen Helfern vor Ort gemischt (weitere Details bei Cárdenas und Romanowski 2025).



Abb. 21: Detail der Glaskröseln mit Schadensbild, hier Grenze von grau zu braun mit anhaftender Grundierung auf der Unterseite der braunen Glaskröseln

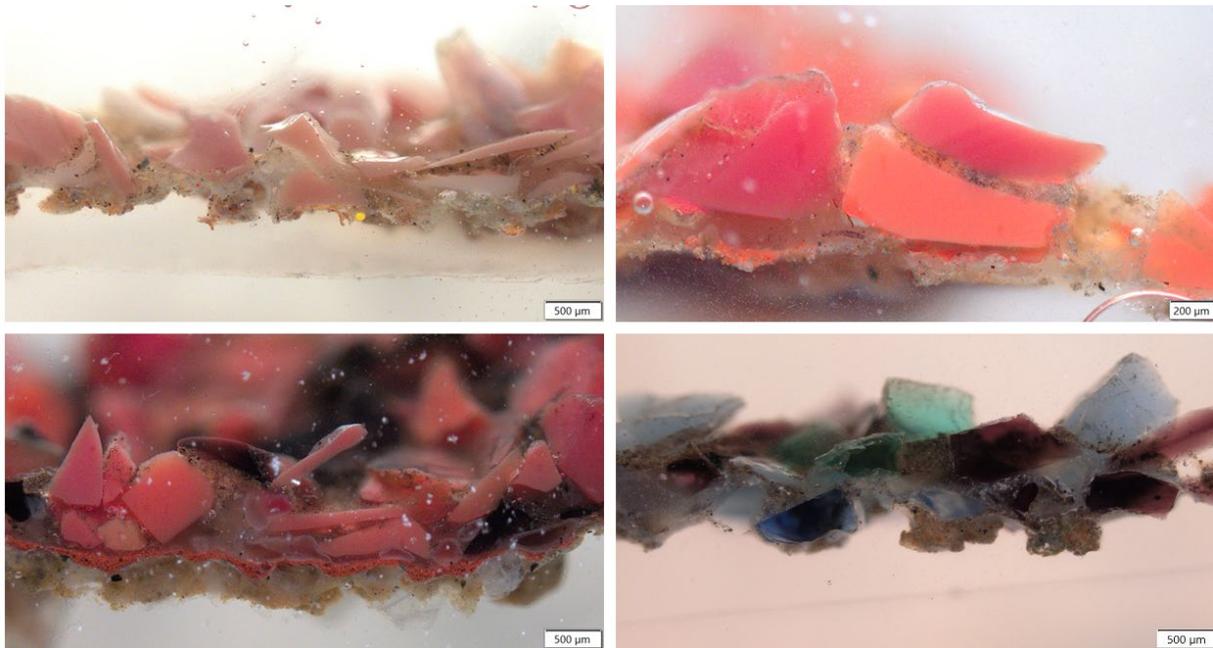


Abb. 22: Querschliffe unterschiedlicher Glaskröselproben und mit unten anhaftenden Resten der Untermalung, links oben hellbraun, rechts oben hellrot, links unten dunkelrot, rechts unten aus einem blauen Bereich

Erhaltungszustand und Schadensursachen

Das Erscheinungsbild des Wandbildes "Mensch und Bildung" ist geprägt von zahlreichen mitunter großflächigen Fehlstellen und Ablösungen der Glaskröselbeschichtung sowie von farblich vom Bestand abweichenden Ergänzungen (Abb. 23). Die im Sommer 2022 durchgeführte detaillierte Zustandserfassung ergab, dass auf allen 26 Fassadensegmenten sich sowohl Schäden am Beton als auch in der Glaskröselbeschichtung in unterschiedlichem Ausmaß entwickelt hatten. Die Untersuchung des Wandbildes begann im September 2020 mit der Erstellung von Messbildern und endete im Frühjahr 2024 mit der Evaluierung der durchgeführten Konservierungs- und Restaurierungstests. Über diesen gesamten Zeitraum hinweg war eine kontinuierliche Verschlechterung des Erhaltungszustandes zu verzeichnen. Wesentliche Faktoren für die zunehmende Schadensdynamik sind die klimatischen Verhältnisse durch die Exposition des Wandbildes nach Süden sowie die Zunahme der durchschnittlichen Temperaturen in den Sommermonaten. Messungen der Oberflächentemperatur des Wandbildes in den Sommermonaten ergaben Temperaturspitzen von über 50°C. Das Zusammenwirken von Materialeigenschaften und Umwelteinflüssen sind dabei von entscheidender Bedeutung. Dies betrifft sowohl die Betonplatten der Fassade als auch die kunststoffgebundene Untermalung und Glaskröselbeschichtung.



Scholle, konkav



Scholle, konkav mit Untermauerung an der Rückseite



Scholle, konkav mit Betonresten an der Rückseite



Abgewitterte Betonoberfläche



Blasenbildung



Punktuelle Verlust



Rissbildung



Rissbildung

Abb. 23: Schadensbilder an Beton und Beschichtung

Wesentliche Faktoren für die zunehmende Schadensdynamik sind die klimatischen Verhältnisse durch die Exposition des Wandbildes nach Süden sowie die Zunahme der durchschnittlichen Temperaturen in den Sommermonaten. Messungen der Oberflächentemperatur des Wandbildes in den Sommermonaten ergaben Temperaturspitzen von über 50°C. Das Zusammenwirken von Materialeigenschaften und Umwelteinflüssen sind dabei von entscheidender Bedeutung. Dies betrifft sowohl die Betonplatten der Fassade als auch die kunststoffgebundene Untermalung und Glaskröselschicht.

Die für die Untermalung und Beschichtung eingesetzte Kunststoffmischung, bestehend überwiegend aus Polyvinylacetat (PVAc) weist auch nach einem Zeitraum von 50 Jahren thermoplastische Eigenschaften auf. Die vor Ort beobachteten Eigenschaften konnten durch thermische Untersuchungen bestätigt werden (Laue 2025b). Hierzu wurden mehrere Proben von der Fassade in Cottbus mittels dynamischer Differenzkalorimetrie (DSC) analysiert, mit der bei konstanter Aufheizung die aufgenommene oder abgegebene Wärmemenge einer Probe erfasst wird und so der Temperaturbereich bestimmt werden kann, bei dem ein Kunststoff vom festen in den Erweichungszustand übergeht (Bestimmung der Glasübergangstemperatur). In Abb. 24 sind die DSC-Kurven von drei Oberflächenproben (CB009, CB010 und CB021) im Vergleich zu einer Acrylatprobe dargestellt. Bei Glasübergangstemperaturen der drei Proben mit Werten von ca. 37 °C, 30 °C und 39 °C liegen die Glasübergangstemperaturen des polymeren Bindemittels an der Fassade unterhalb von 40 °C, die in heißen Sommermonaten an der Fassade in Cottbus häufiger überschritten werden. Dies hat zur Folge, dass bei hohen Temperaturen oberhalb von 40 °C mit einer Erweichung und der Bewegung der Polymere zu rechnen ist, was einen Beitrag zum heute sichtbaren Schadensbild leistet.

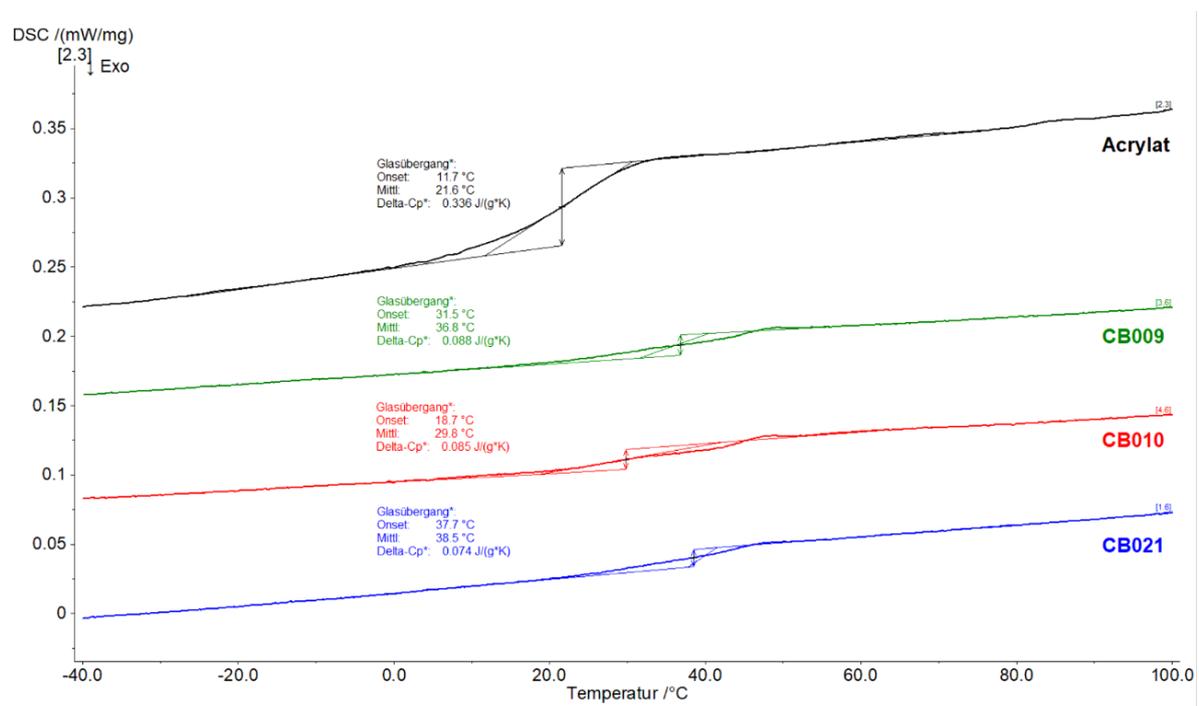


Abb. 24: DSC-Diagramm mit Darstellung der gemittelten Glasübergangstemperaturen der Glaskröselschichten CB009, CB010 und CB021 im Vergleich zu einem Acrylat

Der unmittelbare Einfluss des Zustandes der Betonplatten auf die Glaskröselbeschichtung zeigt sich im erfassten Rissbild mit unterschiedlich stark ausgeprägten Rissweiten: Sie reichen von feinen Haarrissen bis deutliche Risse bis zu einem Millimeter Breite in den Betonplatten und der Glaskröselbeschichtung (Cárdenas und Romanowski 2025). Die Ursache ist in der ermittelten starken thermischen Dehnung des Oberbetons zu finden. Der hohe Längenausdehnungskoeffizient des Oberbetons steht im Kontrast zu dem geringeren Koeffizienten der Längenausdehnung des Unterbetons. Die zyklisch durch starke Temperaturschwankungen auftretenden hohen Spannungen führen zu Ermüdungsrissen, die sich in der Glaskröselbeschichtung fortsetzen. Dieselben Schadensmechanismen sind verantwortlich für teilweise großflächige Ablösungen des asbesthaltigen Fugenmaterials. Der hohe Längenausdehnungskoeffizient des Oberbetons steht im Kontrast zu dem geringeren Koeffizienten des Fugenmörtels. Auch die geringe Tiefe des Fugenmaterials begünstigt die Ablösung. Die signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Schädigungsgrades der einzelnen Platten lassen sich anhand der Untersuchungsergebnisse nicht erklären. Technologisch besitzen sie den gleichen Aufbau. Die gesamte Fassade ist im gleichen Maße der Witterung ausgesetzt. Es kann daher nur Unterschiede im Herstellungsprozess, unterschiedliche Witterungsverhältnisse bzw. unterschiedliche Materialqualitäten während des Herstellungsprozesses angenommen werden. Da auf eine Probenentnahme in weitgehend intakten Bereichen verzichtet wurde, kann an dieser Stelle nur spekuliert werden. Weiterer Forschungsbedarf besteht ebenfalls bei der Frage, welchen Einfluss die eingebetteten Glaskrösel sowie die Schichtstärke des Klebemittelfilms auf die UV-Degradation der eingesetzten Kunststoffe besitzen.

Entwicklung und modellhafte Umsetzung einer Musterkonservierung

Als Konsequenz aus den Untersuchungen (Cárdenas und Romanowski 2025, Laue 2025b) haben die Restauratorinnen Sonia Cárdenas und Anja Romanowski in Diskussion mit dem BLDAM und der FHP eine Konservierungsstrategie für die Glaskrösel-schichten entwickelt und modellhaft in einem Bereich an der Fassade umgesetzt.



Da die verwendeten Kunststoffe ein integraler Bestandteil des Kunstwerks sind, lag der Fokus der Konservierung und Restaurierung diesmal nicht auf der Reduktion des Kunststoffes, wie es häufig in der Wandmalereikonservierung der Fall ist. Vielmehr steht im Zentrum des Erhaltungskonzeptes die Konservierung der kunststoffhaltigen Beschichtung. Bei der Entwicklung des Konservierungs- und Restaurierungskonzeptes mussten sowohl die Wechselwirkungen zwischen Träger und Beschichtung als auch die klimatischen Bedingungen berücksichtigt werden. Im Rahmen der Musterachse (Abb. 25) wurden dementsprechend neben den Tests zur Konservierung und Restaurierung der Glaskröselbeschichtung auch Maßnahmen zur Konservierung des Bildträgers und zur Sanierung der Fugen durchgeführt.

Entscheidend für die Wahl der Konservierungs- und Betonergänzungsmaterialien waren die ermittelten E-Modulwerte und das thermische Dehnungsverhalten der Betonplatten und des Fugenmörtels (Zötzl und Kersten 2022).

Zur Untersuchung der Konservierungs- und Restaurierungsoptionen wurden Tests mit verschiedenen Kunststoffen mit unterschiedlichen physikalischen und chemischen Eigenschaften durchgeführt. Ein besonderer Schwerpunkt lag auf der Rückformung der teilweise handtellergrößen Schollen und Blasen, um deren Wiederanbindung an den Untergrund zu gewährleisten. Zusätzlich erfolgten Tests zur Betonsanierung sowie zur Rekonstruktion der Beschichtung, wobei die Farbmischungen und deren Applikation im Detail untersucht wurden. Untersucht wurde auch, welche Kunststoffe in welchen Auftragsmethoden und mit welcher Standzeit in der Lage sind, die mit Druckluft aufgespritzten Glaskrösel stabil zu halten und zu binden. Das Konzept der Fehlstellenergänzung zielte darauf ab, durch Nachstellung der Verwendung von Glaskrösel als Farbmittel auch die typischen Lichtreflexionen der Glasbruchstücke als Gestaltungsmittel einzusetzen, durch die insbesondere im Streiflicht bei Sonneneinstrahlung ein für diese Technik charakteristischer Glitzereffekt entsteht.

Die Ergebnisse der durchgeführten Maßnahmen (Abb. 26) wurden nach einem definierten Zeitraum, insbesondere nach einer Sommer- und Winterperiode überprüft, um deren langfristige Stabilität und Effektivität zu bewerten.



Abb. 26: Teil der Musterachse nach den durchgeführten Maßnahmen

Evaluierung der Maßnahmen zur Konservierung und Restaurierung

Ein zentraler Bestandteil des Konservierungs- und Restaurierungsprozesses war die systematische Evaluierung der Konservierungsmaßnahmen, um die Wirksamkeit der verwendeten Materialien und Methoden zur dauerhaften Erhaltung der Glaskröselbeschichtung zu beurteilen.

Das Acrylat Paraloid® B72, welches eine höhere Glasübergangstemperatur als die getesteten Varianten der Polyvinylacetate (PVAc) aufweist, wird auch als alterungsstabiler beschrieben. In den Testflächen, in denen Paraloid® B72 zur Festigung eingesetzt wurde, zeigte die gefestigte Glaskröselbeschichtung einen signifikant besseren Zustand. Im Vergleich dazu traten in den mit PVAc gefestigten Bereichen bereits nach einem halben Jahr erneute Ablösungen auf.

Die weiterhin anhaltenden hohen Temperaturen über den Sommer führten jedoch in den gefestigten Bereichen zu Verformungen, insbesondere in Form von Runzelbildungen in den ergänzten Glaskröselbeschichtungen. Gleichzeitig wurde ein noch nicht vollständig interpretiertes Phänomen beobachtet: die Bildung von Blasen im Kunststofffilm der Neubeschichtung auf die direkte Betonoberfläche. Um dieses Problem zu beheben, ist es erforderlich, die Betonoberfläche im Bereich der Fehlstellen mit einem Sanierputz zu beschichten, da dies die Bildung von Blasen verhindert bzw. unterdrückt.

Eine große Herausforderung bedeutet auch der Umgang mit den asbestbelasteten Fugen und Ergänzungsmörteln (1980er) im Wandbild: Eine Sanierung erfordert hier die Entnahme der als krebserregend eingeschätzten Asbestfasern und dies bedeutet umfangreiche Arbeitsschutzmaßnahmen und Vorsorge zur Vermeidung von Sekundärkontamination, insbesondere auf der zerklüfteten Oberfläche der Glaskröselbeschichtung.

Fazit

Die fortschreitenden klimatischen Veränderungen, insbesondere die immer heißeren Sommer, stellen einen erheblichen Stressfaktor für das Wandbild und damit eine Herausforderung für dessen Erhalt dar. Die durchgeführten Versuche zeigten, dass mit den getesteten Konservierungsmitteln eine Rückformung, Festigung und Rekonstruktion der beschädigten Bereiche mit den getesteten Konservierungsmitteln kurzfristig möglich ist. Besonders Paraloid® B72 hat sich als das effektivste Material erwiesen, um eine stabile Festigung zu erreichen. Eine farbliche Integration kann durch eine Neubeschichtung mit Glaskröseln in Kombination mit Farblasuren an den Randbereichen erfolgreich umgesetzt werden.

Dennoch bleibt die größte Herausforderung der Umgang mit den asbestbelasteten Fugen, insbesondere in Verbindung mit der stark zerklüfteten Oberfläche der Glaskröselbeschichtung. Langfristig wird eine nachhaltige Konservierung jedoch nur durch eine architektonische Lösung, wie beispielsweise eine Verschattung, möglich sein, um das Wandbild vor weiteren klimabedingten Schäden zu schützen.

3.2.3 Analyse und Begutachtung weiterer Objekte

Es wurden weitere Denkmalobjekte im Land Brandenburg hinsichtlich ihrer Schäden nach einer konservatorischen und/oder restauratorischen Kunststoffbehandlung untersucht und der Erhaltungszustand evaluiert. In Tabelle 2 sind die untersuchten Objekte und erzielten Ergebnisse zusammengefasst. Drei Beispiele werden im Anschluss detaillierter beschrieben.

Tabelle 2: Evaluation weiterer mit Kunststoffen behandelten Objekte, ¹Angabe aus Quelle, ²Analyse mittels FTIR

Objekt / Ort	Material / Behandlung	Kunststoff	Evaluation	Quellen
Epitaph Merten Pruchmann (1540) / Gertraudenkirche, Frankfurt/Oder	Holztafelbild / „Einlassung“ = Festigung (1985)	Piaflex® LT 30 in Toluol ¹	keine Schäden festgestellt	Busch 2025
Maria mit dem Kind (um1340) / Gertrauden-kirche, Frankfurt/Oder	Holztafelbild / „Einlassung“ = Festigung (1979/80)	Piaflex® LT 30 in Toluol ¹	keine Schäden festgestellt	Busch 2025
Kruzifix / Burgkapelle Ziesar	Holzskulptur / Festigung und Klebung (1992)	PMMA (strahleninduzierte Polymerisation), Paraloid® B72 in Toluol für kleinere Teile, Piaflex® LT 30 in Toluol zum Kleben ¹	keine Schäden festgestellt	Jakob 2025
Taufengel (1752), Dorfkirche Dyrotz	Holzskulptur / Festigung (2004)	Piaflex® LT 30 in Toluol ¹	keine Schäden festgestellt	Jakob 2025
Taufengel (frühes 18. Jh.), Dorf-kirche Niebendorf	Holzskulptur / Festigung (2012)	Piaflex® LT 30 in Toluol ¹	keine Schäden festgestellt	Jakob 2025
Taufengel-fragmente (frühes 18. Jh.), Dorf-kirche Heinsdorf	Holzskulptur / Festigung (2011)	Plexigum® PQ 611 in Shellsol D40 / Aceton 1:1 ¹	keine Schäden festgestellt	Grajcarek 2025
Treppenhausfenster (15.-19.Jh), Schloss Branitz	Glas / Klebung (1968)	Polyacrylat / Polymethacrylat ²	keine Haftung mehr zum Untergrund, Craquelée-Rissnetz	Rahfoth 2025, Laue 2022
Portal St. Jakobikirche / Perleberg	Glasierte Baukeramik / Glasurergänzung (2006)	ORMOCER® ¹	keine Schäden festgestellt	Bulian 2025
Glockenturm Heilandkirche / Sacrow	Glasierte Baukeramik / Glasurergänzung (2012)	ORMOCER® ¹	keine Schäden festgestellt	Bulian 2025
Triptychon / St. Marien, Ostfassade, Frankfurt/Oder	Wandmalerei / Festigung der Malschichten	Polyacrylat / Polymethacrylat ²	Malschicht-Schäden	Laue 2025c
„Geschichte der Stadt Schwedt“ / Baubezogene Kunst in Schwedt	Rundrelief aus modifiziertem hydraulischem Putz (1970er J.)	Polyesterharz ²	Risse, Ablösungen, Korrosion beim Metallgerüst	Laue 2024

Beispiel 1: Kruzifix in der Burgkapelle Ziesar

Im Rahmen einer Diplomarbeit 1992 (Jakob 1992) an der Hochschule für Bildende Künste Dresden wurde das durch Anobien zerstörte Kruzifix aus Ziesar gefestigt. Nach einer Restaurierung wurde es in den 1950er Jahren mit einem neuen Kreuz an der Ostwand angebracht (Abb. 27).



Abb. 27: Kruzifix an der Ostwand der Burgkapelle in Ziesar

Die unterschiedlich großen Fragmente des Kruzifixes wurden 1992 mit Monomethylmethacrylat (MMA), eine farblose niedrigviskose Flüssigkeit, behandelt, die im Laufe der verschiedenen Verfahren zu Polymethacrylsäuremethylester (PMMA) polymerisiert (weitere Details zur Festigung siehe Jakob 2025). Es wurde bei den Fragmenten eine Gewichtszunahme zwischen 42 - 112 % erreicht.

Alle Oberflächen des Korpus konnten nach der erfolgten Konservierung durch Kompressen mit Essigsäureethylester von den Resten des Festigungsmittels oder von Verdunkelungen befreit werden, so dass eine natürlich aussehende Holzoberfläche erreicht werden konnte. Der Zusammenbau erfolgte unter Verwendung des Klebemittels Piaflex® LT 30 gelöst in Toluol, die notwendigen kleinen Ergänzungen erfolgten mit einem Kitt aus Holzmehl, Kreide und Korkmehl mit dem Bindemittel Paraloid® B72 40%ig gelöst in Toluol 40 %. Alle Bruchstücke oder Fehlstellen wurden mit Lindenholz in Stäbchenverleimung verstärkt oder ergänzt. Im Jahr 2000 wurde das Kruzifix wieder aufgehängt (Jakob 2025).

Im Frühjahr 2024 wurde das hoch an der Ostwand der Kapelle hängende Kruzifix erstmals untersucht. Zu überprüfen war der Zustand des Korpus, die Verbindung zum Kreuz und die Verbindungen innerhalb des Korpus. Es sollte festgestellt werden, ob sich die Piaflex-Klebeverbindungen zwischen den gefestigten Teilen gelöst oder geöffnet haben, ob die Kittungen noch immer gut in den Fehlstellen liegen und ob sich Risse oder Spannungen bemerkbar machen. Zudem sollte ermittelt werden, wie sich die Oberfläche des

Holzes, der Kittungen und der Retuschen verändert haben, ob also ein restauratorischer oder konservatorischer Handlungsbedarf vorliegt. Zugleich sollte durch Versuche festgestellt werden, ob nach mehr als dreißig Jahren die Kittungen noch durch Lösemittel erreichbar sind und damit bei Bedarf herausgenommen werden können.

Das Kruzifix befindet sich dreißig Jahre nach der Restaurierung und dem Zusammenbau noch immer in einem sehr guten Zustand. Alle Kittungen fügen sich gut in die Form ein, es haben sich keine Risse oder Schichtentrennungen gebildet, auch ist die Oberfläche nicht gedunkelt. Alle Retuschen haben sich in ihrer Farbigkeit erhalten und binden sich gut in die Gesamterscheinung ein. Es konnte kein erneuter Befall von Anobien festgestellt werden (Jakob 2025).

Beispiel 2: Treppenhausfenster im Schloss Branitz

Hermann Ludwig Heinrich von Pückler-Muskau (1785–1871) zog 1845 in das Schloss Branitz. Eine der wichtigsten Veränderungen im Inneren war der Einbau einer neuen Treppenanlage zwischen Haupt- und Obergeschoss mit einer horizontal geteilten Fensterfront im Treppenhaus, in deren obere Fensteröffnungen Glasmalereien eingesetzt werden sollten. 1851 wählte Pückler aus seiner beim Umzug in Kisten verpackten Sammlung Glasgemälde aus, die er zur Einfügung vor die zwei oberen Fenster des Treppenhauses geeignet fand. 1856 waren 45 historische Glasmalereien unterschiedlicher Herkunft und Datierung zwischen dem 15. bis 19. Jahrhundert einschließlich neuer rahmender Einfassungsgläser in die Treppenhausfenster eingebaut (Abb. 28).



Abb. 28: Schloss Branitz Glasmalerei Treppenhausfenster nach der Rekonstruktion, Zustand nach der Restaurierung 2023/24

Anhand der in historischen Fotografien aus der Zeit um 1890 überlieferten Gesamtansichten der Fenster konnten die bis dahin an einigen Glasfeldern erfolgten Restaurierungs- bzw. Reparaturmaßnahmen, wie der Einbau von helltonigen Ergänzungsgläsern mit Kaltbemalungen, von bemalten und gebrannten historischen Flickstücken, das Sichern von

Glassprüngen mit Kitt, das komplette Neuverbleien von Glasfeldern und ein Beschneiden der Felder in der Höhe und Breite belegt werden. Die Glasmalereien wurden teilweise nach dem Ankauf durch Pückler und vor dem Einbau in das Treppenhaus 1851–1856 restauriert (Rahfoth 2025).

Die beiden Treppenhausfenster wurden 1961 ausgebaut und im Depot eingelagert. Von November 1965 bis März 1966 erfolgte in der Görlitzer Werkstatt für Glasgestaltung von Johannes Walter Deckwarth (1899–1967) der Ausbau der historischen Wappenscheiben aus den Glasfeldern sowie an mindestens 24 Glasfeldern eine sehr zurückhaltende Sicherung des historischen Scheibenbestandes. Wie Farb- und Schwarzweißaufnahmen von den Innenseiten im Durchlicht im Nachzustand von 1967 belegen, wurden einige Glasfelder mit Blei neu gerahmt und vereinzelt Sprungbleie zur Sicherung eingezogen und punktuell gelötet. Außer Blei und Zinn wurden keine Restaurierungsmaterialien dem Scheibenbestand in dieser Restaurierungsphase hinzugefügt.

1968 erfolgte eine weitere Restaurierungsmaßnahme, die im Vergleich zu den unmittelbar vorangegangenen wesentlich umfassender war (Rahfoth 2025). Viele der dabei als Sprungsicherungen aufgebrauchten Sprung- und Deckbleie wurden 1968 abgenommen. Es erfolgte eine neue Sicherung der Glassprünge mit Bleiplomben und an 16 Glasfeldern zahlreiche Sprungklebungen mit einem transparenten farblosen, stark glänzenden Kleber aus Polyacrylat/Polymethacrylat (Laue 2022). Größere Glasfehlstellen wurden imitierend mit bemalten Gläsern geschlossen, die Anbindung von historischen Flickstücken oder neuen Ergänzungen von 1968 an originale Glasstücke erfolgte ebenfalls mit dem Polyacrylat-/Polymethacrylatkleber. Teilweise wurden die Klebenähte retuschiert, Glasfehlstellen wurden mit dem Polyacrylat-/Polymethacrylatkleber aufgefüllt. Zusätzlich wurde mehrfach gesprungenes Glas mit einem 1,5 mm starken weißen Glas partiell rückseitig dubliert. Als Kleber wurde ebenfalls der Polyacrylat/Polymethacrylatkleber verwendet. Das Klebematerial drang in den Zwischenraum ein, und das überschüssige Material verblieb als breite, erhaben aufliegende Naht auf der bemalten gealterten Glasoberfläche (Details siehe Rahfoth 2025).

Das Klebematerial zeigte 2021 sehr häufig keine Haftung mehr zum Spalt und der Glasoberfläche und wies ein ausgeprägtes Craquelée-Rissnetz bis zum Glasträger auf. Der Kleber war schon in Schollen mit scharfen Abrisskanten abgeplatzt oder ausgebrochen. Die Glassprünge sind wieder geöffnet und die Anbindung zu den Ergänzungsgläsern ist nicht stabil. Der Abriss der Klebnaht führte an den mittelalterlichen korrodierten Gläsern mit empfindlichen hauchdünn aufgetragenen und eingebrannten Rückseitenbmalungen, auch zum Abriss der darunterliegenden hauchdünnen eingebrannten Lasuren. Sehr problematisch sind auch die Klebungen an drei der vier sogenannten „Sprüngli“-scheiben mit sehr differenzierter Rückseitengestaltung durch aufgeschmolzene Emailfarben und hauchdünne farbgebende Lasuren. Hier liegt der Kleber auf einem Oberflächen-Craquelée des Glases auf, welches durch das Abplatzen der Emailsicht freiliegt (Rahfoth 2025).

Im Rahmen der 2023/24 abgeschlossenen Restaurierung wurde bei den geöffneten Sprüngen das Klebematerial Polyacrylat/Polymethacrylat mit Ethanol abgenommen und die Sprünge mit dem Zweikomponentenepoxidharzkleber Araldit® 2020 A/B geklebt. Der neue Kleber wurde in den Sprung eingeführt und liegt nicht auf den angrenzenden Glasoberflächen auf. Die instabilen Anbindungen mit Klebenähten an die Glasergänzungen von 1968 oder bei historischen Flickstücken wurden abgenommen und reversibel mit dünnen Sprungbleien ausgeführt. Die wenigen stabilen Klebenähte bei Ergänzungen vor 1968

wurden belassen und werden im Rahmen eines Monitorings auf Festigkeit kontrolliert (Rahfoth 2025).

Beispiel 3: Objekt „Geschichte der Stadt Schwedt“ - baubezogene Kunst in Schwedt

Es handelt sich um ein Rundrelief mit Bezug zur Geschichte der Stadt von 1958 bis 1971, das Szenen aus der Tätigkeit der Bau- und Montagearbeiter, Anlagen des Erdölverarbeitungs-werkes, junge Paare und eine Kindergärtnerin mit ihrer Kindergruppe zeigt. Das Objekt steht in einer Wohnbausiedlung und besteht aus zwei Elementen: dem 360°-Relief und der innerhalb liegenden Edelstahl-Haltekonstruktion.

Das kreisförmige Relief ist auf mehrere Stahlarmierungen aufgebracht. Die Konstruktion besteht aus drei horizontal-durchgängigen, nicht rostfreien Stahlstangen und mehreren vertikalen Verbindungsstangen. Die Kontaktpunkte sind mit nicht rost-freien Stahlplatten versehen. Über die Armierungen wurde ein Kunststofftextil gelegt. Partiiell sind die überlappend angebrachten Enden dieses engmaschigen Textils zu erkennen. Darauf und auch eventuell zwischen die Lagen des Textils wurde eine grau-bräunliche Mörtelmasse in verschiedenen Lagen aufgetragen. Teilweise ist ein bräunlicher Anstrich zu erkennen.



Abb. 29: Rundrelief „Geschichte der Stadt Schwedt“

Im Rahmen des Projekts wurden mehrere Proben von der Mörtelmischung und des Anstrichs analysiert. Sowohl in den hydraulischen Mörteln als auch in dem bräunlichen Anstrich konnte Polyesterharz bzw. Alkydharz als Polymerkomponente nachgewiesen werden (Laue 2024b). Bei den Mörtelproben sind die Polyester wahrscheinlich als Zusatz zum hydraulischen Bindemittel, bei den Anstrichen als primäres Bindemittel verwendet worden. In einem hellen Anstrich in einer Vertiefung des Reliefs konnte zusätzlich Polyvinylacetat als Bindemittel und Pigmentierung mit Calcit (Kreide), Zinkweiß und Schwerspat nachgewiesen werden. Die Analysen lieferten wertvolle Hinweise für die in den kommenden Jahren anstehenden Konservierungsarbeiten.

3.3 Digitale Wissensverbreitung – Neuprogrammierung der Datenbank POLYKON (<https://polykon.fh-potsdam.de/>)

Aufbauend auf das interdisziplinär erstellte Lösungskonzept (siehe 2.3) erfolgte die Ausschreibung mit der Formulierung der Ziele und Anforderungen, welche neben einer Neuprogrammierung von POLYKON mit aktuellen Web-Technologien die beschriebenen Erweiterungen und Verbesserungen umfasst.

Für POLYKON ist erneut ein relationales Datenbanksystem verwendet worden, mit dem die Verwaltung der Datenbestände und das flexible Nutzen mit webbasierten Nutzeroberflächen möglich ist. Die Grundlage der Datenverwaltung bildet das nutzerspezifische Datenmodell (Abb. 30). Dabei werden die Daten strukturiert in Tabellen verwaltet, die alle relevanten Informationen für ein spezifisches Datenobjekt enthalten. Stellt der Nutzer eine Datenbankabfrage, wird die angeforderte Information aus vielen Einzeldaten zusammengesetzt.

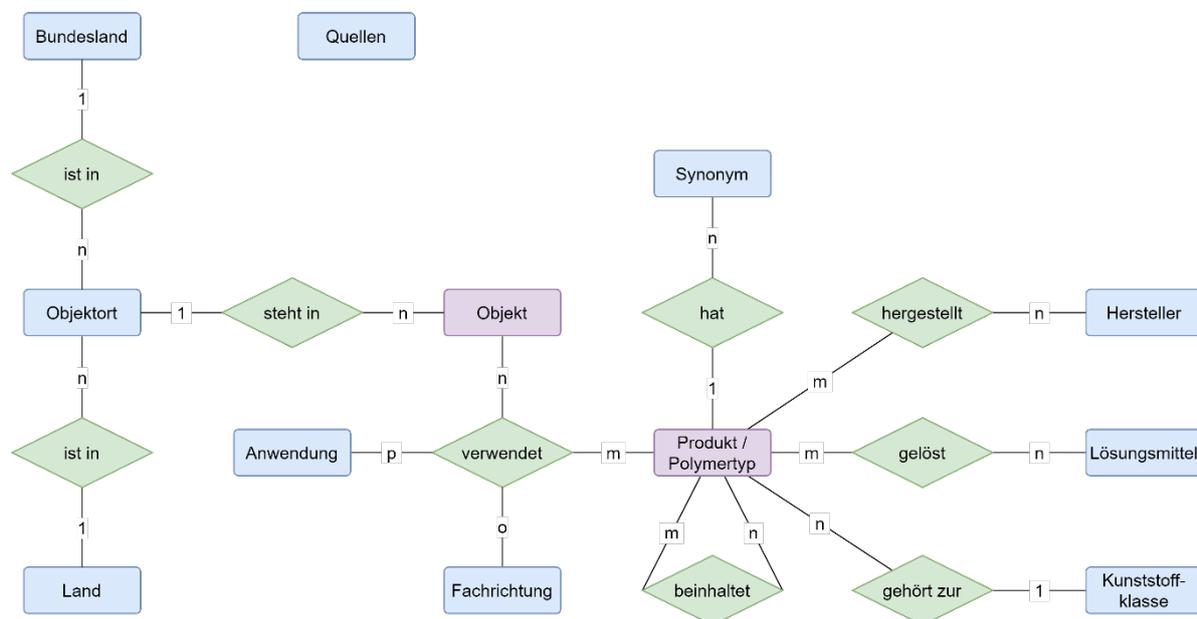


Abb. 30: Datenstruktur der POLYKON-Datenbank, Bild: B. Heuwing

Das POLYKON-Datenmodell enthält als Hauptbeziehungen Daten über Kunststoffe und deren Bezug zu den untersuchten Objekten. Zusätzliche Daten können darüber hinaus zur

Klassifikation (Klasse), zum Hersteller und zum verwendeten Lösungsmittel erfasst werden. Ein weiterer Schwerpunkt des Datenmodells sind die Literaturquellen. Es ist erforderlich, zu jedem Produkt oder spezifischen Eigenschaft eines Kunststoffes den entsprechenden Quellenverweis anzugeben und damit dem Nutzer zur Verfügung zu stellen. Die Objektangaben umfassen neben einer Beschreibung vor allem geografische Daten zu Ort und Land. Wie man dem Datenmodell entnehmen kann, wurden ausgehend von den fachlichen Anforderungen Kunststoff, Fachrichtung, Anwendung und restauriertes Objekt in Beziehung gesetzt.

Die POLYKON-Programmanwendung besteht aus zwei Bereichen: einem nicht-öffentlichen Bereich für die Verwaltung und Bereitstellung der Daten und einem öffentlich zugänglichen Bereich für die Recherche der Forschungsdaten.

Ein Beispiel für den nicht-öffentlichen Bereich ist die vollständig überarbeitete Eingabemaske mit einfacher Möglichkeit zum Einfügen von Verweisen über Referenznummern (Abb. 31).

The screenshot shows the POLYKON web application interface. At the top, there is a navigation bar with the POLYKON logo, the text 'Datenbank für Polymere als Konservierungs- und Restaurierungsmittel', and 'Fachhochschule Potsdam Studiengang Konservierung und Restaurierung'. A search bar contains 'Schnellsuche Polymere'. Below this, the page title is 'Objekt editieren' with a 'Zurück zur Liste' button.

The 'Quellen' section shows a list of sources. One source is visible: '[123] Freitag, Jörg (1999): Restaurierung einer verkupferten Zinkgußplastik vom Schloß Babelsberg. In: Zinkguss - Arbeitsheft des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege, Nr 98, S. 169-178'. There are 'Editieren' and 'Entfernen' buttons next to it. Below the list is a dropdown menu 'Wählen Sie eine bestehende Quelle aus.' and buttons 'Hinzufügen' and 'Neue Quelle anlegen'.

The 'Objekt editieren' form has several sections:

- Name:** A text input field containing 'Baumeister'.
- Bemerkung:** A text area with 'Verkupferte Zinkgußplastik, Schloss Babelsberg' and a reference number '[123]' in the top right corner. Below it is a yellowed-out area, also with a '[123]' reference number.
- Bild:** A section with the text 'Kein Bild hinzugefügt.' and a 'Bild' input field with a 'Browse...' button and 'No file selected.' text.
- Bemerkung:** Two additional text areas, one with a '[123]' reference number and another with an 'EN' label.
- Ort:** A section with a dropdown menu showing 'Potsdam' and a 'neu' button. Below it is a text area with the address: 'Park Babelsberg 10, 14482 Potsdam, Brandenburg, Deutschland'. A note states: 'Dieser Ort ist bereits freigegeben und eventuell mit weiteren Einträgen verknüpft. Änderungen an diesem Eintrag können nur über die Objektort Verwaltungssicht durchgeführt werden.' To the right is a map showing the location of Potsdam and Babelsberg.

Abb. 31: vollständig überarbeitete Eingabemaske mit einfacher Möglichkeit zum Einfügen von Verweisen über Referenznummern (hier [123]) und Verweise auf existierende Datensätze (hier: „Ort“) – Bild: Bernhard Pruin

Für die Umsetzung wurden moderne, zukunftssichere Web-Technologien verwendet, um eine weitestgehende Modularisierung und Entkoppelung der Darstellung, der Anwendungslogik und der Datenstruktur zu ermöglichen. Insbesondere die Rechercheoberfläche ist so gestaltet worden, dass sie sich gut auch an die eingeschränkten Darstellungsmöglichkeiten auf mobilen Endgeräten (Smartphones, Tablets) anpasst, um die Datenbank in einem mobilen Kontext nutzen zu können.

Die Struktur der Datenbank selbst wurde nicht verändert, sondern nur erweitert, sodass die vorhandenen Inhalte einfach migriert werden können. Als Datenbankmanagementsystem dient mit PostgreSQL eine performante Open-Source-Lösung, die auch gut auf geodatenbasierte Abfragen vorbereitet ist. Die Verwendung einer modernen Standardlösung für Nutzerverwaltung und Nutzerauthentifizierung (Keycloak) ermöglicht es, auf die Entwicklung eigener Komponenten zu verzichten und gleichzeitig hohe Anforderungen an die Sicherheit zu erfüllen.

Durch die Usability-Tests (Kapitel 2.3) wurden nur wenige Probleme bei der Interaktion mit der Anwendung festgestellt. Konkreter Verbesserungsbedarf ergab sich aus der Gestaltung der Ergebnisliste (Sortierung teilweise unklar, Anpassung einer Suchanfrage umständlich) und der Darstellung der komplex strukturierten Informationen zu einzelnen Polymertypen und Produkten (Zuordnung von verknüpften Objekten, Literaturquellen und Kommentaren). Daraus wurden unter anderem Vorschläge zur Verbesserung der Navigationsmenüs, für die Vorschläge während der Eingabe eines Suchbegriffs und für die einfachere Überarbeitung einer Suchanfrage erarbeitet. Die umfangreichen im Fließtext vorliegenden Informationen werden in Zukunft mit einfachen Textformatierungen besser strukturiert sein. Zentral ist außerdem die Optimierung der Darstellung auf Smartphones und anderen mobilen Endgeräten. Das Feedback der Teilnehmer, dass eine Erweiterung der Informationsabdeckung durch die Datenbank die wichtigste Verbesserung darstellt, bestätigten die zentralen Ziele der Neuprogrammierung, die umgesetzt wurde.

Einfache Inhaltsverwaltung durch Anwender auch aus anderen Forschungseinrichtungen

Die bisherige Verwaltung der Inhalte der Datenbank erforderte spezielle Kenntnisse über die relationale Struktur der Datenbank und die zugrundeliegenden Verknüpfungen.

Zur Vereinfachung der Erfassung werden die Daten nach der Neuprogrammierung nun in zusammenhängenden Ansichten für die fachlichen Datenobjekte Quelle, Produkt / Polymertyp und Objekt erfasst (Abb. 31). Damit konnte die Komplexität der Erfassung von 17 einzelnen Ansichten für die einzelnen Datenbanktabellen auf drei fachlich zusammenhängende Ansichten reduziert werden. Zusätzlich wurden in den Textfeldern für die Eingabe von längeren Texten das einfache Anlegen von Verweisen auf Literaturquellen ermöglicht.

Um weitere Forschungseinrichtungen zu beteiligen, wurde ein Freigabeprozess umgesetzt. Dafür musste gleichzeitig das Rechte-Rollenkonzept und die Nutzerverwaltung erweitert werden:

1. Mitarbeiter in den Forschungseinrichtungen erfassen neue Quellen und die darin beschriebenen Polymere bzw. Produkte sowie die Objekte, auf die sie angewendet worden sind. Diese Daten werden aber zunächst nicht öffentlich innerhalb von POLYKON angezeigt.
2. Ein Experte prüft die Plausibilität und formale Korrektheit der neu eingegebenen Datensätze von Mitarbeitern aus der eigenen Forschungseinrichtung und veröffentlicht diese oder gibt sie zur Überarbeitung an den jeweiligen Mitarbeiter zurück. Um die Integrität der Daten zu bewahren, müssen alle mit einem freizugebenden Datenobjekt verknüpften, neu

erfassten Inhalte, z.B. mehrere Objekte, auf die ein bestimmtes Produkt angewendet wurde, gleichzeitig freigegeben werden. Als Institutsadministratoren verwalten die Experten zusätzlich auch die Nutzerkonten der Mitarbeiter in der eigenen Einrichtung.

3. Verantwortliche für die POLYKON-Datenbank an der FH Potsdam können als Administratoren zusätzlich alle Daten bearbeiten und Nutzerkonten verwalten. Ihnen ist auch die Pflege zentraler Referenzdaten (Fachrichtung, Anwendung, Kunststoffklasse) vorbehalten.

Ergänzung von Englisch als Sprachoption

Als Anforderungen an die Datenbank konnte festgehalten werden, dass sowohl die Zweisprachigkeit (Deutsch / Englisch) der Beschriftungen in der Benutzeroberfläche, als auch der Inhalte der Datenbank ermöglicht werden soll. Bei der Internationalisierung der Benutzeroberfläche musste insbesondere auf Länge und Umbrüche der Beschriftungen geachtet werden, was exemplarisch für zentrale Ansichten geprüft wurde. Zusätzlich ist der Sprachwechsel nun einfach zugänglich und kann bereits beim ersten Aufruf die im Browser des Nutzers hinterlegte Sprachpräferenz berücksichtigen.

Bei der Konzeption der zusätzlichen Verfügbarmachung der Inhalte stellte sich neben den Anforderungen an die Abbildung in der Struktur der Datenbank die Frage nach einer einfachen Darstellung im Erfassungs- und Bearbeitungsprozess: Hier sollten Inhalte für ein Datenobjekt einfach in den Sprachen erfasst werden können, ohne die Eingabe in beiden Sprachen dafür verpflichtend zu machen. Einzelne Eigenschaften, z.B. Produktnamen oder Gebäudenamen, benötigen zudem keine Übersetzung.

Für die Informationssuche in beiden Sprachen stellte sich zusätzlich die Frage, welche Inhalte ausgegeben werden sollen, wenn Suchtreffer nicht in der aktuell aktiven Sprache in der Datenbank vorliegen: Ausgehend von der Vermutung, dass die erfassten Inhalte auch dann nützlich sein können, wenn sie nicht in der durch den Nutzer ausgewählten Sprache vorliegen, wurde die Entscheidung getroffen, in diesem Fall auch Treffer in der anderen Sprache anzuzeigen. Von einer vollständig automatisierten Übersetzung wurde abgesehen, da diese vermutlich nicht die notwendige fachliche Qualität liefern würde. Insbesondere für bestehende Inhalte wird jedoch eine einfache Möglichkeit angeboten, im Zuge der Inhaltsverwaltung eine automatisierte Übersetzung als Vorschlag prüfen und übernehmen zu können (weitere Details siehe Heuwing und Laue 2025).

4. Diskussion und Fazit

Das Projekt begann während der Pandemiephase 2021 und führte im ersten Jahr zu Verzögerungen der Arbeiten an den Objekten. Dennoch wurden alle Projektziele Dank einer einjährigen Projektverlängerung erreicht.

Die entwickelten Maßnahmen zur Konservierung und Restaurierung an mit Polymeren behandelten Objekten wurden jeweils nach den Untersuchungen der Objekte im Kapitel 3.2 detailliert diskutiert. Hierbei wurden insbesondere die zum Teil sehr komplexen Schadensprozesse und die Interaktion zwischen Bestandsschichten und eingebrachten Polymere untersucht, bewertet und Tests zur Prüfung der Eigenschaften nach Konservierung und Ergänzung durchgeführt. Bei einigen untersuchten Objekten zeigte es sich, dass nicht zwingend ein Polymereinsatz in der Konservierung und Restaurierung schädlich für ein Objekt sein muss (siehe Beispiel im Bereich der Holzkonservierung (Kapitel 3.2.3)).

Für jedes Objekt sollte nach Voruntersuchungen individuell eine Lösung zur Erhaltung erarbeitet werden. Hierfür bietet die vorgestellte systematische Herangehensweise für die Evaluation von mit Kunststoffen behandelten Objekten (Kapitel 3.2.1) eine Richtlinie, aus der sich nach Umsetzung konsequenterweise mögliche Handlungsstrategien aufzeigen. Für die Untersuchungsphase im Vorfeld einer Maßnahme sind mindestens ein oder zwei Jahre zu empfehlen, um eine entwickelte Umsetzung an Testflächen mit anschließenden mehrmonatigen Standzeiten beurteilen zu können, bevor größere Bereiche eines Objektes bearbeitet werden.

Der heutige Einsatz von synthetischen Polymeren – vor allem auch an Objekten, die bisher noch nicht mit ähnlichen Materialien konserviert wurden – erfordert ein reflektiertes Vorgehen durch Untersuchung des Objektes und Abwägung der Entscheidung für oder gegen bestimmte Konservierungsmittel.

Ein ergänzendes Hilfsmittel zur Entscheidungsfindung kann die neu programmierte Datenbank POLYKON sein, die maßgeschneidert weiterentwickelt worden ist und die auf die speziellen Belange und Suchanforderungen von Restaurator*innen und anderen Praktiker*innen im Bereich Kunst- und Kulturgut und der Baudenkmalpflege abgestimmt ist – die inhaltliche Diskussion zur Datenbank siehe Kapitel 3.3.

Mit der Datenbank wurde die strukturierte Erfassung von Informationen zu Kunststoffen als Konservierungsmittel, bzw. Reparaturmaterial erweitert und optimiert, zu der viele Wissenschaftler und Praktiker beigetragen haben. Aufgrund des riesigen Informationsumfangs und der Schnellebigkeit des Marktes in diesem Bereich erhebt die Datenbank nicht den Anspruch auf Vollständigkeit. Vielmehr wurde mit POLYKON eine Basis geschaffen und mit der Neuprogrammierung die Rahmenbedingungen verbessert, langfristig den Datenzuwachs und die Recherche auch international zu dem praxisrelevanten Thema Einsatz von polymeren Kunststoffen in der Konservierung, Restaurierung, Reparatur und zum Erhalt von Kunst- und Kulturgut sowie im Bereich der Baudenkmalpflege zu gewährleisten. Der neue Freigabeprozess ermöglicht auch anderen Institutionen die Dateneingabe. Zusätzlich zu dem geschilderten Freigabeprozess für neue Inhalte (siehe Kapitel 3.3) könnte eine Versionierung von überarbeiteten Datenobjekten die Nachvollziehbarkeit, und damit potenziell die Qualität der Daten insgesamt, verbessern.

Die Kooperation mit allen Projektpartner:innen hat sehr gut funktioniert, was zu dem Erfolg des Projekts mit dem Erreichen aller Ziele entscheidend beigetragen hat. Der Autor dieses Berichts dankt sehr allen Restaurator:innen und den Kolleginnen der Projektpartner, die hier noch einmal namentlich genannt werden sollen: Prof. Mechthild Noll-Minor vom BLDAM, Henriette Brendler und Sabine Wenzke vom Eigenbetrieb Kulturbetriebe der Stadt Frankfurt (Oder) sowie Franziska Palm-Richter und Katrin Wenzel von der BTU Cottbus – Brandenburgischer Landesbetrieb für Liegenschaften und Bauen (BLB).

5. Öffentlichkeitsarbeit

Das Projekt wurde während der gesamten Laufzeit auf der Homepage der Fachhochschule Potsdam beworben.

Am 14.03.2025 widmete sich das 17. Konservierungswissenschaftliche Kolloquium in Berlin/Brandenburg mit dem Titel *Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien* dem Thema des Projekts. Es wurden in 9 Vorträgen erzielte Ergebnisse des Projekts vorgetragen. Ergänzend wurden die Projektergebnisse detailliert in dem 68. Arbeitsheft des BLDAM mit dem gleichen oben genannten Titel publiziert, das im Michael Imhof-Verlag erschienen ist. Folgende Artikel sind in dem Band erschienen (Reihenfolge der Artikel wie im Arbeitsheft):

- Laue, S. und Noll-Minor, M. (2025): Die Problematik degradierter synthetischer Polymere in der Kunst- und Baudenkmalpflege, denkmalpflegerischer Ansatz und Vorschlag für ein geeignetes Untersuchungsprogramm.- In: Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum Nr. 68, Petersberg, Michael Imhof Verlag, S. 8-19.
- Micheluz, A., Pamplona, M. und Laue, S. (2025): Application of analytical pyrolysis techniques for the identification of synthetic conservation products and binding media on built heritage.- In: Arbeitsheft des BLDAM Nr. 68, Petersberg: M. Imhof Verlag, S. 20-31.
- Laue, S. (2025a): Bestands- und Zustandsanalysen – Barockes Erbbegräbnis in St. Marien in Frankfurt/Oder. In: Arbeitsheft des BLDAM Nr. 68, Petersberg, Imhof Verlag, S. 32-44.
- Böwe, L. und Höchel-Pradel, A. (2025): 40 Jahre nach der Entdeckung – Die erneute Rettung der hochbarocken Stuckarchitektur des Epitaphs in der Westwand der Marienkirche Frankfurt (Oder).- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg, Michael Imhof Verlag, S. 45-55.
- Lehmann, M. (2025): Kunststoffe als Konservierungs- und Restaurierungsmittel – Fluch oder Segen? Betrachtung am Beispiel der Lünettenmalerei des barocken Epitaphs in der Westwand der Marienkirche Frankfurt (Oder). In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg, Michael Imhof Verlag, S. 56-66.
- Kazmierczak, H. (2025): Vier barocke schmiedeeiserne Schrifttafeln der St. Marienkirche Frankfurt (Oder) – Umgang mit großflächigen Kunststoffergänzungen der 1980er Jahre.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg, Michael Imhof Verlag, S. 67-74.
- Laue, S. (2025b): Wandbild „Mensch und Bildung“ der BTU Cottbus – Bestandsanalysen zu den Glaskröseln und Reparaturmaterialien. In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 75-84.
- Cárdenas, S. und Romanowski, A. (2025): Das Wandbild Mensch und Bildung – Konservierung elektrostatischer Beschichtungen mit Glaskröseln. In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 85-97.
- Busch, D. (2025): Die Praxis der Holzverfestigung an Tafelbildern im Restaurierungsatelier des früheren Instituts für Denkmalpflege, Arbeitsstelle Berlin 100.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 98-103.
- Jakob, D. (2025): Alles wieder gut?! – Polymer-basierte Konservierung von Holzskulpturen aus dem Brandenburger Raum anhand von Beispielen der letzten 30 Jahre.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 104-113.
- Grajcarek, G. (2025): Konsolidierung einer durch Anobienfrass stark geschädigten Taufengelskulptur – Evaluation einer Holzverfestigung im Niederdruckverfahren.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 114-125.

Rahfoth, K. (2025): Die Verwendung von Polymeren in der Restaurierung von historischen Glasmalereien – Beispiele, Erhaltungszustände und der restauratorische Umgang bei kürzlich abgeschlossenen Restaurierungsmaßnahmen.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 137-148.

Bulian, L. (2025): ORMOCER® Glas als Glasur-Ergänzungstoff in der Konservierung und Restaurierung von Baukeramik des 19. und 20. Jahrhunderts im Außenbereich - Anwendungsbezogene Evaluation anhand von Testreihen.- In: Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S.149-156.

Die Untersuchungsergebnisse zu den Polymeren werden zusätzlich in der im Rahmen des Projekts neu programmierten Datenbank POLYKON eingepflegt (<https://polykon.fh-potsdam.de/>), zu denen recherchiert werden kann und die auf diese Art und Weise der Öffentlichkeit langfristig zur Verfügung stehen.

Darüber hinaus ist im Sommer/Herbst 2025 eine öffentliche Veranstaltung in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder zu der Konservierung und Restaurierung des Erbbegräbnisses geplant, die die Gemeinde und die interessierte Öffentlichkeit über die Komplexität der durchgeführten Maßnahmen informiert.

Teile der Projektergebnisse wurden zusätzlich in folgenden Fachpublikationen publiziert:

Laue, S. (2023): Monitoring as a Basic Tool for Understanding Salt Crystallization Processes on Monuments – Case Study of the Baroque Tomb in St. Marien in Frankfurt/Oder.-

In: Abuku, M. & Takatori, N. (ed.): Saltweathering on Buildings and Stone Sculptures, SWBSS ASIA 2023, September 20-22, 2023, Nara, Japan, 75-84.

Laue, S., Micheluz, A. und Pamplona, M. (2025): Zusammensetzung gealterter synthetischer Polymere mit Konsequenzen für die Konservierung – zwei Beispiele aus Frankfurt/Oder und Cottbus.- Tagung Archäometrie und Denkmalpflege, Dresden, 18.-22.03. 2025, Metalla Sonderheft, im Druck.

Laue, S. & Heuwing, B. (2025): POLYKON 2025 – Neuprogrammierung der Fachdatenbank Polykon.- Tagung Archäometrie und Denkmalpflege, Dresden, 18.-22.03.2025, Metalla Sonderheft, im Druck.

Laue, S. (2025): Durability and Degradation of Synthetic Polymers on Architectural Monuments – Examples from Brandenburg / Germany.- Proceedings of the RILEM Conference on durability of building materials, Mendrisio, 25.-27.03.2025, im Druck.

Laue, S., Noll-Minor, M., Cárdenas, S., Romanowski, A., Micheluz, A. and Pamplona, M. (2025): Degradation and Conservation of a Unique Modern Facade made of Glass-Fractions in Polymers on Concrete Panels in Cottbus.- Proceedings of the 15th International Congress on the Deterioration and Conservation of Stone, Paris, 8-12 September 2025, im Druck.

6. Literatur und Quellen

- Arnold, D. und Arnold, T. (2013): Der Einsatz von Kunststoffen als Restaurierungsmaterial in der DDR.- In: Laue, S. (Hg.): Kunststoffe als Konservierungs- und Restaurierungsmaterial? Potsdamer Beiträge zur Konservierung und Restaurierung, Band 3, Fachhochschule Potsdam, 32-45.
- Auras, M., Meinhardt, J. & Snethlage, R. (2011): Leitfaden Naturstein-Monitoring.- Fraunhofer IRB Verlag.
- Bellucci, R., Cremonesi, P. and Pignagnoli, G. (1999): A Preliminary Note on the Use of Enzymes in Conservation: The Removal of Aged Acrylic Resin Coating with Lipase.- In: Studies in Conservation, Vol. 44, London 1999, 278-281.
- Bionda, D. (2006): Modelling indoor climate and salt behaviour in historical buildings: A case study.- PhD thesis, Diss. Nr. 16567, ETH Zürich.
- Böwe, L. (2019): Barockes Erbbegräbnis, St. Marienkirche, Frankfurt/Oder - Restauratorische Erstbegutachtung.- Untersuchungsbericht, 40 S.
- Böwe, L. und Höchel-Pradel, A. (2025): Die erneute Rettung der hochbarocken Stuckarchitektur des Epitaphs in der Westwand der Marienkirche Frankfurt (Oder).- In: Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 45-55.
- Bulian, L. (2025): ORMOCER® Glas als Glasur-Ergänzungstoff in der Konservierung und Restaurierung von Baukeramik des 19. und 20. Jahrhunderts im Außenbereich - Anwendungsbezogene Evaluation anhand von Testreihen.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 149-156.
- Cárdenas, S. und Romanowski, A. (2025): Das Wandbild Mensch und Bildung – Konservierung elektrostatischer Beschichtungen mit Glaskröseln.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 85-97.
- Carretti, E., Dei, L. and Baglioni, P. (2003): Solubilization of Acrylic and Vinyl Polymers in Nanocontainer Solutions. Applikation of Microemulsions and Micelles to Cultural Heritage Conservation.- Published on Web, American Chemical Society, No. 19, Langmuir.
- Danzl, T. (2008): Konrad Riemann (1920 – 2004) und die Rezeption internationaler Standards in der praktischen Denkmalpflege Sachsen-Anhalts der sechziger und siebziger Jahre. In: Basile, G. (Hg.): Il pensiero di Cesare Brandi dalla teoria nella pratica, Roma/Lurano, S. 56-62.
- Dei, L., Carretti, E. and Baglioni, P. (2000): Microemulsions in Cultural Heritage Conservation to Solubilise Hydrophobic Materials. In: Proceedings of the 5th World Surfactants Congress, Cesio, 517-524.
- Egel, E. (2023): Barockes Erbbegräbnis, St.-Marienkirche, Frankfurt (Oder), Klimamessungen im Rahmen des DBU-Projektes „Umweltbedingte Degradation synthetischer Konservierungs- und Restaurierungsmittel“, Untersuchungsbericht, Zossen, 22.02.2023.
- Eggers, L.M. (2022): Acrylharze in der Wandmalereikonservierung - Auswirkungen degradierter Konservierungsmittel und Möglichkeiten des restauratorischen Umgangs.- B.A.-Thesis, Fachhochschule Potsdam.

- Hedlund, H.P. and Johannson, M. (2005): Prototypes of Lascaux's Medium for Consolidation, Development of a new Custom-made Polymer Dispersion for use in Conservation.- In: *Restauro* 6/2005, S. 432-438.
- Heuwing, B. und Laue, S. (2025): POLYKON 2025 - Nutzerzentrierte Weiterentwicklung der Fachdatenbank Polykon.- In: *Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien*, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 195-202.
- Horie, C.V. (2010): *Materials for Conservation - Organic Consolidants, adhesives and coatings*.- 2. Auflage, Butterworths, London.
- ICOMOS-ISCS (2011): *Illustrated Glossary on Stone Deterioration Patterns*.- Monuments and Sites XV, Michael Imhof Verlag, Petersberg.
- Jakob, D. (1992): *Die Holzkonservierung und Rekonstruktion eines stark anobienzerstörten Kruzifixes aus Ziesar*.- Diplomarbeit, Hochschule für Bildende Künste Dresden.
- Jakob, D. (2025): Alles wieder gut?! – Polymer-basierte Konservierung von Holzskulpturen aus dem Brandenburger Raum anhand von Beispielen der letzten 30 Jahre.- In: *Arbeitshefte des BLDAM Nr. 68*, Petersberg: Michael Imhof Verlag, S. 104-113.
- Kazmierczak, H. (2022): *Schrifttafeln St. Marienkirche – Projektdokumentation im Modul M5.- B.A.-Studiengang*, Fachhochschule Potsdam.
- Kazmierczak, H. (2025): Vier barocke schmiedeeiserne Schrifttafeln der St. Marienkirche Frankfurt (Oder) – Umgang mit großflächigen Kunststoffergänzungen der 1980er Jahre. In: *Arbeitshefte des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien*, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 67-74.
- Klemm, B. (1988): *Dokumentation, Konservierung und Restaurierung einer barocken Epitaphanlage an der östlichen Stirnwand des Südturmes in der St. Marienkirche in Frankfurt/Oder (heute Kulturforum)*, Frankfurt (Oder).
- Köllner, N., Mielke, C., Körting, F., Laue, S., Hildebrand, C., Kästner, F. & Altenberger, U. (2021): *Abbildende Spektroskopie im Nahbereich – innovative Methoden im Bereich der Denkmalpflege am Beispiel des „barocken Erbbegräbnisses“ in der St.-Marienkirche, Frankfurt (Oder)*.- In: *Bildgebende Verfahren – Trends und Fallbeispiele zur zerstörungsfreien Untersuchung und Erhaltung von Kulturerbe*, Arbeitsheft des Brandenburgischen Landesamtes für Denkmalpflege und Archäologisches Landesmuseum Nr. 61, Bäßler Verlag, Berlin, 22-36.
- Laue, S. (2005): *Salt Weathering of Porous Structures Related to Climate Changes*.- *Restoration of Buildings and Monuments*, vol. 11, No. 6, 381-390.
- Laue, S. (2013): *Kunststoffe als Konservierungs- und Restaurierungsmaterial? Potsdamer Beiträge zur Konservierung und Restaurierung*, Band 3, Potsdam.
- Laue, S. (2022): *Bindemittelanaysen Glasmalereien – Schloss Branitz*.- *Untersuchungsbericht*, Fachhochschule Potsdam, 21.02.2022.
- Laue, S. (2023): *Monitoring as a Basic Tool for Understanding Salt Crystallization Processes on Monuments – Case Study of the Baroque Tomb in St. Marien in Frankfurt/Oder*.- In: M., Abuku and N., Takatori, (ed.). *Salt Weathering on Buildings and Stone Sculptures*, Nara: SWBSS ASIA, 75-84.
- Laue, S. (2023a): *Barockes Erbbegräbnis – Metallplatten, ergänzende pXRF-Analysen*.- *Untersuchungsbericht*, Fachhochschule Potsdam, 25.02.2023.
- Laue, S. (2024a): *Materialanalysen begleitend zu den Konservierungsarbeiten am barocken Erbbegräbnis in Frankfurt / O in der St. Marienkirche*.- *Untersuchungsbericht*, Fachhochschule Potsdam, 17.06.2024.

- Laue, S. (2024b): Objekt „Geschichte der Stadt Schwedt“ – Naturwissenschaftliche Untersuchungen zum Bestand.- Untersuchungsbericht, Fachhochschule Potsdam, 06.12.2024.
- Laue, S. (2025a): Bestands- und Zustandsanalysen – Barockes Erbbegräbnis in St. Marien in Frankfurt/Oder.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 32-44.
- Laue, S., 2025b. Wandbild „Mensch und Bildung“ der BTU Cottbus – Bestandsanalysen zu den Glaskröselschichten und Reparaturmaterialien.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 75-84.
- Laue, S. (2025c): – Naturwissenschaftliche Analyse einer Malschichtprobe – Triptychon, St. Marien, Ostfassade, Frankfurt/Oder.- Untersuchungsbericht, Fachhochschule Potsdam, 15.02.2025.
- Laue, S. & Noll-Minor, M. (2025): Die Problematik degradierter synthetischer Polymere in der Kunst- und Baudenkmalpflege.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 8-19.
- Lehmann, M. (2003): Kunststoffe in der Konservierung von Wandmalerei, Die Gewölbemalereien in der Krypta der Stiftskirche St. Servatius in Quedlinburg, Untersuchungen zum Einfluss eingebrachter Kunststoffe der Konservierung in den 1960er Jahren.- Seminararbeit HfBK Dresden.
- Lehmann, M. (2025): Kunststoffe als Konservierungs- und Restaurierungsmittel – Fluch oder Segen? Betrachtung am Beispiel der Lünettenmalerei des barocken Epitaphs in der Westwand der Marienkirche Frankfurt (Oder).- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, Michael Imhof Verlag, Petersberg, 56-66.
- McGlinchey, C. (2018): Polymers in Conservation.- John Wiley & Sons, Inc., <https://doi.org/10.1002/9781119188230.saseas0469>.
- Micheluz, A., Pamplona, M. und Laue, S. (2025): Application of analytical pyrolysis techniques for the identification of synthetic conservation products and binding media on built heritage.- In: Arbeitshefte des BLDAM: Kunststoffe als Bindemittel – Analytik und Konservierungsstrategien, 68, M. Imhof Verlag, Petersberg, S. 20-31.
- POLYKON homepage, <http://www.polykon.fh-potsdam.de>, letzter Zugriff 26.04.2025.
- Richter, M. und Flückiger, M. D. (2013): Usability Engineering Kompakt: Benutzbare Produkte gezielt Entwickeln.- Springer Berlin / Heidelberg.
- Schorbach, S. (2013): Evaluation gealterter synthetischer Konservierungsmittel.- M.A.-Thesis im Studiengang „Master of Science/Bauforschung“, Fachhochschule Potsdam.
- Schorbach, S. und Däßler, R. (2013): POLYKON – Die Datenbank für Polymere als Konservierungs- und Restaurierungsmittel.- In: Kunststoffe als Konservierungs- und Restaurierungsmaterial? - Potsdamer Beiträge zur Konservierung und Restaurierung, Band 3, 22-31.
- Steiger, M. (2009): Mechanismus der Schädigung durch Salzkristallisation.- In: Schwarz, Hans-Jürgen; Steiger, Michael (Hrsg.): Salzsäden an Kulturgütern: Stand des Wissens und Forschungsdefizite, Hannover, 66-80.
- Stephen, H. and Stephen, T. (1963): Solubilities of inorganic and organic compounds.- Pergamon Press, Oxford, 116, 180.

VDI 3798 (2019): Materielles Kulturerbe. Erfassung, Untersuchung und Erhaltung unter Berücksichtigung der Umwelteinflüsse.- Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI), Düsseldorf.

Waentig, F. (2004): Kunststoffe in der Kunst: Eine Studie unter konservatorischen Gesichtspunkten.- Petersberg: Michael Imhof Verlag.

Weyer A., Picazo, P.R., Pop D., Cassar J.A., Özköse A., Vallet J.M., Srša I. (2015): EwaGlos European Illustrated Glossary of Conservation terms for Wall painting and Architectural Surfaces. Michael Imhof, Petersberg.

Zötzl, M. und Kersten, H. (2022): Cottbus, BTU, Wandbild „Mensch und Bildung“, Naturwissenschaftliche Voruntersuchungen.- IDK - Institut für Diagnostik und Konservierung an Denkmälern in Sachsen und Sachsen-Anhalt e.V., Bericht HAL 74/2022.

www.salzwiki.net, letzter Zugriff 19.04.2025.