

Evaluierung und modellhafte Praxiserprobung eines

UV-Strahlungsschutzes

für Kunstharze aus schädigenden Altrestaurierungen auf national wertvollen Glasmale-
reien des Naumburger Doms

AZ 34468/01



**VEREINIGTE
DOMSTIFTER** 
ZU MERSEBURG UND NAUMBURG
UND DES KOLLEGIATSTIFTS ZEITZ

GLASRESTAURIERUNG 
AM NAUMBURGER DOM

gefördert durch



Deutsche
Bundesstiftung Umwelt

www.dbu.de

Inhalt

<i>Dr. Holger Kunde, Stiftsdirektor</i>	3
Vorwort.....	3
<i>Dr. Ivo Rauch, Projektleiter</i>	3
1. Vorbemerkungen	3
1.1 Ausgangslage: Die gefährdeten mittelalterlichen Glasmalereien im Naumburger Dom	3
1.2 Problematische Restaurierungsmaterialien vergangener Restaurierungen	4
1.3 Zielsetzung des Vorhabens	6
2. Durchführung des Forschungsprojekts	8
2.1 Recherche.....	8
2.1.1 Prüfung der UV-Sensibilität der in Naumburger Altrestaurierungen verwendeten schädigenden Kunstharze	8
2.1.2 Marktrecherche: derzeit verfügbare UV-Filterssysteme	9
2.2 Evaluierung der verfügbaren UV-Filter am Objekt.....	9
2.2.1 Evaluierung der UV-Filterwirkung ohne Laborunterstützung (in der Restaurierungswerkstatt - ‚in-house‘)	9
2.2.2 Ästhetische Wirkung am Objekt	11
2.3 Laboruntersuchungen	14
3. Praktische Anwendung.....	17
3.1 Einbau der UV-Filtergläser in Fenster des Naumburger Westchors.	17
4. Veröffentlichung der Ergebnisse	19
4.1 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation	19
5. Zusammenfassung	20
Abbildungsverzeichnis	
 <i>Manfred Torge, Volker Wachtendorf (BAM, Berlin)</i>	
1. Evaluierung und modellhafte Praxiserprobung von UV-Schutzgläsern für historische Glasmalereien (Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung / BAM).....	21

Dr. Holger Kunde, Stiftsdirektor

Vorwort

Der seit 2018 in das UNESCO-Welterbe aufgenommene Naumburger Dom St. Peter und Paul besitzt mit den mittelalterlichen Glasmalereien einen ganz besonders kostbaren Schatz. Die Vereinigten Domstifter sind glücklich, dass es gelungen ist, den Gesamtbestand in den letzten drei Jahren wissenschaftlich aufzunehmen und konservatorisch für die nächsten Jahrzehnte zu sichern. Das begleitende DBU-Forschungsprojekt hat am Erfolg des Großvorhabens besonderen Anteil, insbesondere im Hinblick auf die Auswahl der Schutzverglasung. An dieser Stelle sei der DBU ein herzlicher Dank gesagt, ebenso möchte ich mich bei allen Projektbeteiligten auf das Herzlichste bedanken.

Dr. Ivo Rauch, Projektleiter

1. Vorbemerkungen

1.1 Ausgangslage: Die gefährdeten mittelalterlichen Glasmalereien im Naumburger Dom

Beide Chöre des Naumburger Doms besitzen heute noch außerordentlich qualitätvolle Glasmalereien aus ihrer Erbauungszeit um die Mitte des 13. Jahrhunderts. Die Verglasung des Westchores



Abb. 1 Naumburger Dom, Blick in den Westchor mit Glasmalereien und Stifterfiguren um 1250.



Abb. 2 Hl. Margaretha, Detail. Um 1250.



Abb. 3 Hl. Eleutherius, Detail im Auflicht. Zahlreiche Sicherungsmittel auf der Oberfläche. Um 1250.

wurde zeitgleich mit den weltberühmten Stifterfiguren des ‚Naumburger Meisters‘ in der Zeit bis 1250 geschaffen (Abb. 1). Diese Glasmalereien gehören zu den herausragenden Werken gotischer Glaskunst in Europa (Abb. 2/3) und bewegen sich auf dem künstlerischen Niveau beispielsweise der Glasfenster in der Kathedrale von Chartres oder in der Sainte-Chapelle in Paris. Diese national wertvollen Naumburger Fenster werden seit Ende 2017 restauriert und präventiv gesichert. Diese Arbeiten wurden durch das hier zu behandelnde Forschungsprojekt begleitet und sollen bis zum Januar 2021 abgeschlossen sein.

Die Fenster in beiden Chören sind aufgrund ihrer herausragenden Qualität integraler Bestandteil der Ernennung des Naumburger Doms zum UNESCO Welterbe, die im Sommer 2018 stattgefunden hat.

1.2 Problematische Restaurierungsmaterialien vergangener Restaurierungen

Im Vorlauf der laufenden Restaurierungsmaßnahme konnten mit Hilfe eines Forschungsprojekt der HfbK Dresden, geleitet von Herrn Prof. Christoph Herm und gefördert durch die Volkswagenstiftung, zahlreiche Kunstharze und organische Bindemittel identifiziert werden, die in mehreren großen Restaurierungskampagnen der letzten 150 Jahre auf die fragilen Oberflächen der mittelalterlichen Gläser aufgebracht worden waren. Zu nennen wären dabei u.a. pigmentierte proteingebundene Malschichten, die um/nach 1870 vermutlich als Retuschen auf vermeintlich ‚zu hell‘ erscheinende Bereiche appliziert wurden sowie vereinzelt natürliche Bindemittel wie Koniferenharz (als Sicherungsmittel?). Während der grundlegenden Überarbeitung der Fenster zwischen 1939-40 wurden zudem großflächige Versuche einer Laminierung der Scheiben mit einem

neuentwickelten Verbundglassystem (Vorstufen des sog. ‚Jacobi-Systems‘) unternommen. Hierzu wurden die Scheiben mit verschiedenen Acrylaten überzogen, die eine sehr niedrige Glasübergangstemperatur besitzen, bei Sonneneinstrahlung klebrig werden und Staub und Schadstoffe binden (Abb. 3, 8). Auch Epoxydharze wurden vielfach eingesetzt; diese weisen inzwischen Versprödungen und Vergilbungen auf. Während einer umfassenden Restaurierung in den 1970er Jahren wurden nach derzeitigem Kenntnisstand durch die ausführende Werkstatt schließlich Kunstharze sowohl aus ost- als auch westdeutscher Produktion verwendet (Acrylate: Piaflex F20, Polymethylmetacrylat und Paraloid; Epoxydharz: Araldit und lösliches Nylon).

Bei der im Jahr 2017 probeweisen Restaurierung von 9 Glasmalereifeldern aus dem Fenster nordwest III des Westchores hatte sich herausgestellt, dass es nicht gefahrlos möglich und wegen der nicht kontrollierbaren ästhetischen Veränderungen bei einer eventuellen Abnahme auch nicht wünschenswert ist, die zahlreichen historischen Restaurierungsmaterialien zu entfernen. Bei einem Verbleib dieser organischen Schichten besteht jedoch grundsätzlich die Gefahr, dass diese Applikationen aus früheren Altrestaurierungen ein signifikantes Schädigungspotential besitzen. Dies insbesondere, falls nicht die Umweltbedingungen am Einbauort der Glasmalereien verändert und in Zukunft kontrolliert werden können. Es wurde daher nicht nur beschlossen, das Klima im Bereich der historischen Glasmalereien durch eine innenbelüftete Schutzverglasung gemäß heutigem Stand der Technik zu verbessern und zu kontrollieren, sondern auch den Einfluss schädigender UV-Strahlung auf die zahlreichen organischen Restaurierungsmittel zu minimieren. Erst seit wenigen Jahren stehen auf dem Markt Filtergläser zur Verfügung, die die besonders schädigende UV-Strahlung bis 400 nm Wellenlänge ausfiltern können, ohne große optische Veränderungen an den zu schützenden Objekten hervorzurufen (Abb. 4). Diese Gläser können als Folienverbundgläser angefertigt oder auch als mundgeblasene Gläser hergestellt werden, bei denen der Filtereffekt bereits im Glasmaterial selbst besteht. Diese neuen Filtergläser wurden bislang kaum für den Schutz historischer Glasmalereien und noch gar nicht zur Minimierung von Schädigungen durch Altrestaurierungen eingesetzt (Verwendung bislang nur in der Stadtkirche Wittenberg zum Schutz von Tafelbildern und im Ostfenster von York Minster zum Schutz von neu angebrachten Sprungverklebungen). Im Rahmen dieses Projektes wurde daher modellhaft und erstmalig der UV-Schutz von historischen Restaurierungsmaterialien und flächigen Kunstharzbeschichtungen aus schädigenden Altrestaurierungen am Beispiel der Fenster des Naumburger Doms in seiner Wirksamkeit und Nachhaltigkeit getestet.

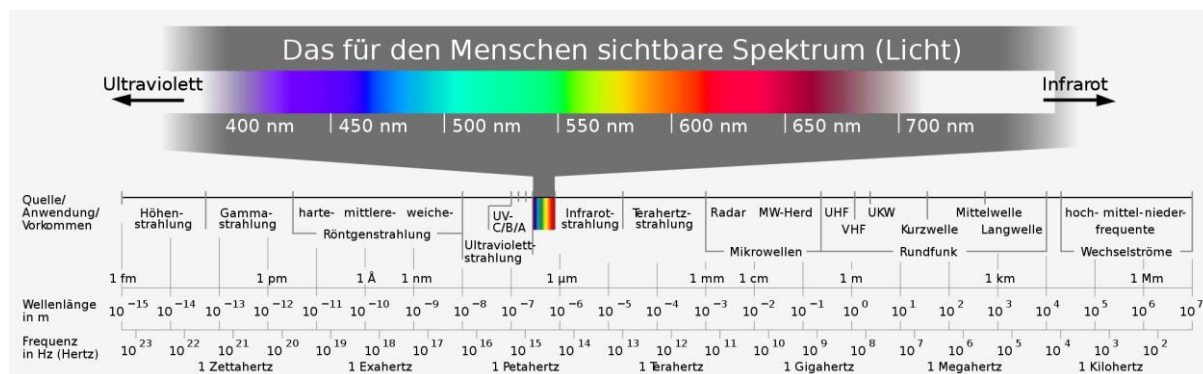


Abb. 4 Schema des Frequenzspektrums elektromagnetischer Wellen und des sichtbaren Lichtes. Die schädigende UV-Strahlung befindet sich nach derzeitigem Kenntnisstand vorwiegend im Bereich bis 400 nm. Quelle: Wikipedia.org (Zugriff am 30.10.2009).

1.3 Zielsetzung des Vorhabens

UV-Strahlung als elementarer Bestandteil schädigender Umwelteinflüsse ist seit langem bekannt für ihre hochgradig zerstörende Wirkung auf Kunstwerke aller Zeitstellungen und Materialien. Insbesondere organische Pigmente, wie sie in allen Wand-, Tafel- und Leinwandmalereien vorkommen und auch Restaurierungsmaterialien wie Kitt, Klebstoffe und Sicherungsmittel werden durch die Einwirkung von UV-Strahlung stark beeinträchtigt, in ihren Farbwerten, ihren chemischen Eigenschaften, ihrer Haltbarkeit verändert und schlussendlich zerstört. Es hat sich gezeigt, dass nicht nur die UV-Strahlung außerhalb des sichtbaren Lichtes (unterhalb von 380 nm Wellenlänge) schädigend wirkt, sondern auch der unmittelbar anschließende Wellenlängenbereich bis ca. 400 nm ein hohes Gefährdungspotential besitzt. Daher wurden in den vergangenen 5-8 Jahren zunehmend Filtergläser entwickelt, die gerade diesen schädlichen Wellenlängenbereich bis nahezu 100% ausfiltern können. Im Wesentlichen kommen dabei zwei unterschiedliche Verfahren zum Einsatz: zum einen die Laminierung von Glasscheiben mit dazwischenliegenden PVB- (Polyvinylbutyral-) Folien, von denen eine der Folien als UV-Filter ausgebildet ist, zum anderen mundgeblasene Fenstergläser, die den Filtereffekt in einer silikatischen Übergangsschicht, die auf ein Trägerglas aufgeschmolzen wurde, mit sich bringen.

Das durch die DBU geförderte Forschungsprojekt sollte modellhaft die Wirksamkeit der auf dem Markt verfügbaren UV-Filtergläser evaluieren und ihre praktische Anwendbarkeit zum Schutz national wertvoller Kulturdenkmäler erproben. Im konkreten Fall sollen auf der Basis der Ergebnisse die Kunstharze der schädigenden Altrestaurierungen auf den Glasmalereien des Westchors des Naumburger Doms vor weiterer Alterung und Zerstörung geschützt werden. Zudem wären mit einer Verminderung des UV-Strahlungslevels im Westchor auch die empfindlichen organischen

Pigmente der Farbfassungen der weltberühmten Stifterfiguren besser geschützt. Die im Abschlussbericht zu publizierenden Ergebnisse der Evaluierung und Erforschung der derzeit auf dem Markt verfügbaren Filtergläser sind beispielhaft und hochgradig relevant nicht nur für den Schutz von Glasmalereien, sondern könnten auch für die Erhaltung zahlreicher weiterer national wertvoller Kulturdenkmale wichtige Grundlagen schaffen. Sowohl Tafelmalereien als auch Wandmalereien, farbig gefasste Skulpturen und insbesondere Textilien sind in hohem Maße zerstörerischer UV-Strahlung ausgesetzt. Bisherige Ansätze zum Schutz dieser Materialien gehen davon aus, die Gesamtstrahlungsbelastung zu minimieren, was jedoch häufig bedeutet, die Kunstwerke dem öffentlichen Zugang zu entziehen und in strahlungsarmen (dunklen) Depots aufzubewahren. Gegebenenfalls kann hier durch diese neue Technologie die Möglichkeit gegeben werden, die Kunstwerke zumindest temporär wieder stärker sichtbar zu machen. Dies wäre dies (neben dem Schutz der Naumburger Fenster) ein Modell für den Schutz und ein großer Gewinn für die Präsentation und Wahrnehmung von national wertvollem Kunst- und Kulturgut in der Öffentlichkeit.

2. Durchführung des Forschungsprojekts

2.1 Recherche

2.1.1 Prüfung der UV-Sensibilität der in Naumburger Altrestaurierungen verwendeten schädigenden Kunstharze

Die im Rahmen eines bereits laufenden, durch die Stiftung Volkswagenwerk finanzierten Projektes der Hochschule für Bildende Künste Dresden (geleitet durch Hr. Prof. Herm) konnten zahlreiche frühere Restaurierungsmaterialien identifiziert werden. Diese organischen Sicherungsmittel sind zum größten Teil UV-sensitiv. Insbesondere die verschiedenen vorgefundenen Epoxidharze (wie

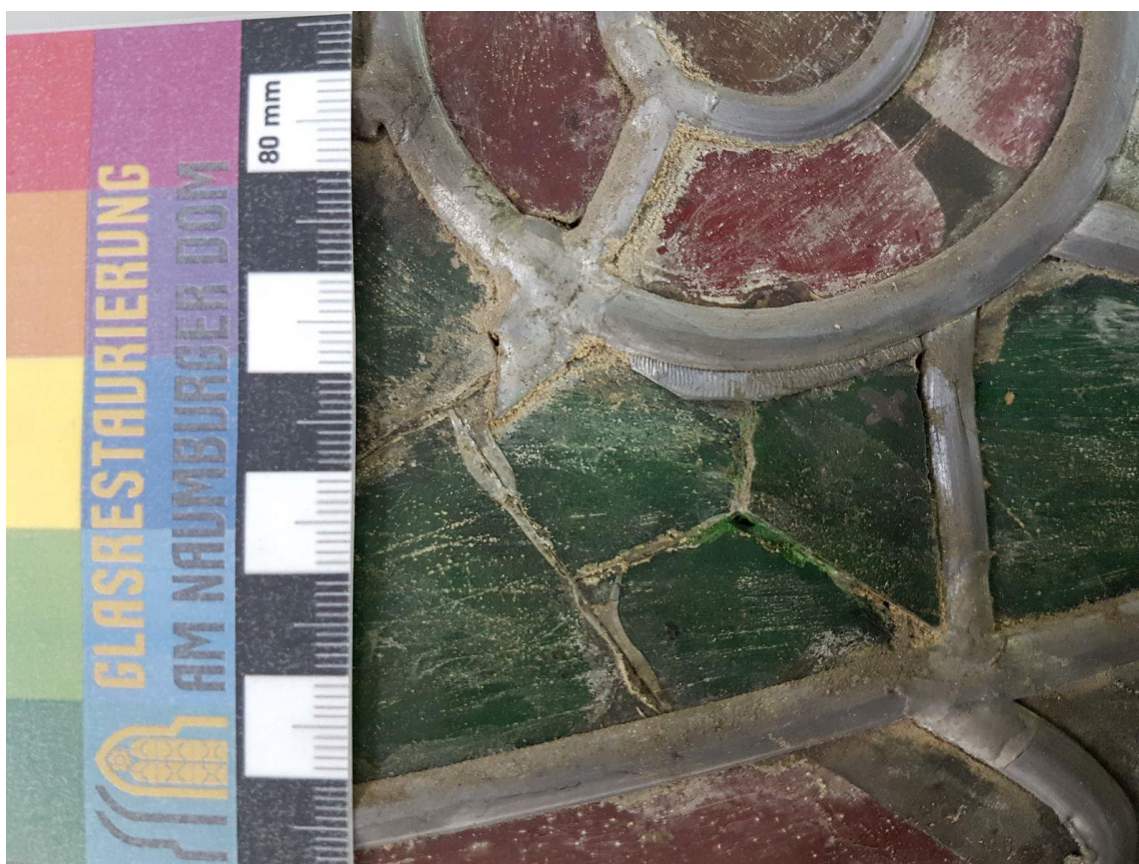


Abb. 5 Historische Sprungklebungen (um 1939) auf den Gläsern des 13. Jahrhunderts. Stark vergilbt und versprödet. Naumburg, Dom, Fenster nw III.

Araldit und Epilox) sowie Acrylate und Methacrylate (wie z. B. Piaflex) reagierten stark unter Licht- und UV-Einwirkung und sind sowohl versprödet wie auch vergilbt (Abb. 5). Mit der Befundung dieser Kunstharze wurde die Dringlichkeit des DBU-Forschungsprojekts zum UV-Strahlungsschutz bestätigt, da alle diese auf den Fenstern gefundene Materialien auf UV-Strahlung sensitiv reagieren. Am 17. Juli 2018 hat das Forscherteam um Prof. Herm in einem Abschlusscolloquium die Ergebnisse in den Räumen der Domstifter unter Beteiligung des Glasrestaurierungsteams der Domstifter vorgestellt¹. Gezeigt wurde u. a. die Instabilität der früher verwendeten

¹

Restaurierungsmaterialien und die Notwendigkeit, diese Kunstharze auch vor UV-Strahlung zu schützen. Im Rahmen des DBU-Projekts wurden daher verschiedene Filtergläser auf die Wirksamkeit ihres UV-Schutzes getestet.

2.1.2 Marktrecherche: derzeit verfügbare UV-Filterssysteme

Derzeit gibt es am Markt verfügbar zwei grundsätzlich technisch unterschiedliche Systeme zur Reduktion von UV-Strahlung mit Hilfe von Filtergläsern. Zum einen das Einlaminieren von PVB-Folien², die die gewünschten Filtereigenschaften besitzen in laminierte Glasscheibenpakete zum anderen die Verwendung von mundgeblasenem Überfangglas³, das aufgrund der Glasrezeptur und chemischen Zusammensetzung des Glases selbst UV-Strahlung ausfiltern kann.

Es wurde im Zuge der Marktrecherche daher Kontakt aufgenommen zu den Herstellern verschiedener UV-Filtergläser. Dies waren insbesondere die Glashütte Lamberts, Waldsassen, die Schott AG in Mainz/Grünenplan, Fa. Rothkegel Glas in Würzburg und die Glasstudios Derix, Taunustein. Alle diese Firmen stellen UV-Filtergläser mit verschiedenen technischen Eigenschaften her (Folienverbundsysteme und mundgeblasenen Gläser), die auf eine Verwendbarkeit innerhalb des Forschungsprojekts geprüft und bewertet wurden. Von den genannten Herstellern werden jeweils Musterscheiben zur Verfügung gestellt, die sowohl in den Labormessung wie auch am Gebäude selbst eingesetzt wurden.

2.2 Evaluierung der verfügbaren UV-Filter am Objekt

2.2.1 Evaluierung der UV-Filterwirkung ohne Laborunterstützung (in der Restaurierungswerkstatt - ,in-house')

In der Restaurierungspraxis ist es aus zeitlichen oder finanziellen Gründen nicht immer möglich, auf kostenintensive Laboruntersuchungen zurückzugreifen. Im Rahmen der modellhaften Untersuchung sollte daher auch eine näherungsweise Evaluierung von Filtergläsern getestet werden. Dazu wurde die Wirksamkeit der Filterscheiben unter UV-Lampen mit definierter Wellenlänge im Zusammenspiel mit UV sensitiven Farben und Materialien getestet. Dabei konnte Filterleistung der Gläser durch in Augenscheinnahme der fluoreszierenden Effekte näherungsweise bewertet werden. Alle für die späteren Labortests vorgesehenen Scheiben verringerten dabei

Die Ergebnisse liegen in einem separaten Forschungsbericht vor: C. Herm/E. Kanaki/J. Brandt, Erforschung historischer Konservierungsmethoden für Glasfenster. Ein Beitrag zu Erhaltung mittelalterlicher Glasmalerei einschließlich der Ergänzungen aus dem 19. Jahrhundert im Naumburger Dom (HfBK Dresden und IPF Dresden 2019 und K. Rafoth/N. Sterzing/I. Trappiel, Bericht zur Materialprobenentnahme für die wissenschaftlichen Untersuchungen an den originalen Glasmalereischeiben, Erfurt 2019.

² Unter anderen z. B. die Laminierfolie Saflex® UV von Eastman, Kingsport USA oder die Laminierfolie semaSORB® FC400 von Semasorb, Coswig.

³ Z. B. Restauvo UV® der Glashütte Lamberts, Waldsassen.

signifikant die fluoreszierende Wirkung verschiedener Materialien im Wellenlängenbereich von 320-400 nm Wellenlänge (Abb. 6, 7). Die Auswahl aller geplanten Materialien konnte bestätigt werden.

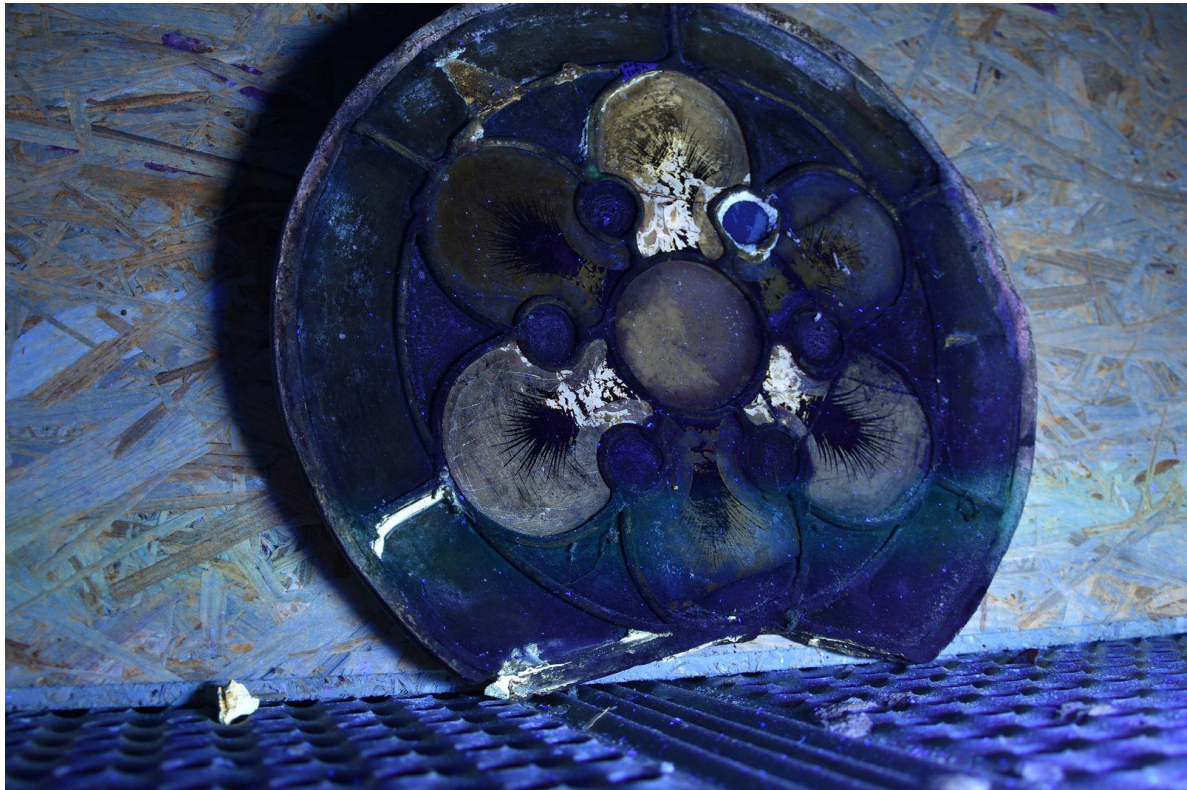


Abb. 6 UV-sensitive historische Beschichtungsmaterialien aus den Restaurierungen von 1939-41 und um 1970. Fluoreszierende Reaktion unter UV-Licht mit 380 nm Wellenlänge.

2.2.2 Ästhetische Wirkung am Objekt

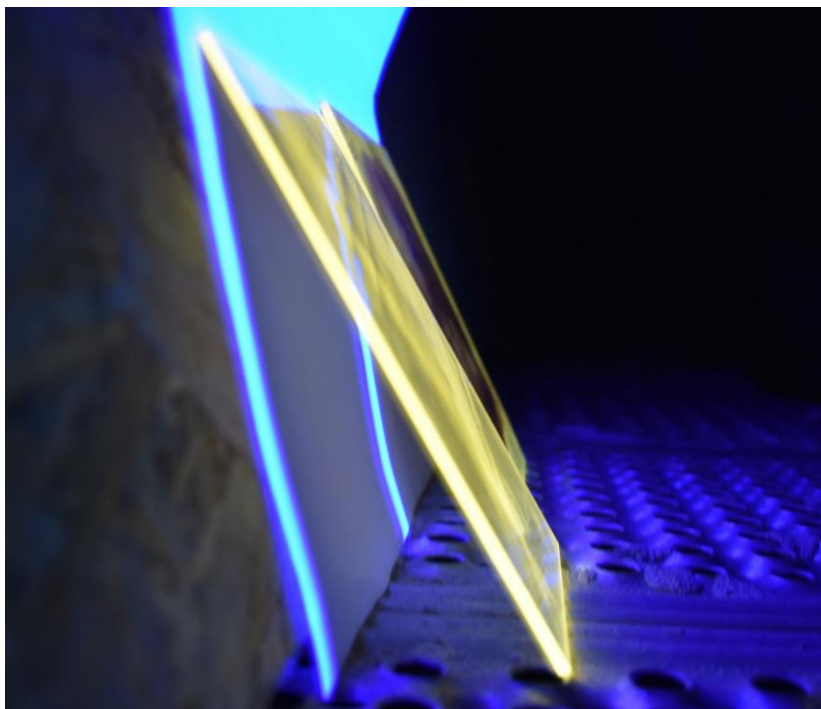


Abb. 7 Test der Filterwirkung von verschiedenen Filtergläsern. Teilweise mit Schwarzlot beschichtet und thermisch behandelt. Keine fluoreszierende Reaktion hinter den Filterscheiben bei UV-Licht mit 380 nm.

Die Glastypen wurden in Hinblick auf die Anbringung am Naumburger Dom und insbesondere in ihrer Farbwirkung auf die historischen Gläser (Innenansicht) und in ihren Effekten auf die Architektur (Außenansicht) geprüft (Abb. 8). Diese Tests wurden vom Team der Glasrestaurierung der Domstifter durchgeführt und durch den wissenschaftlichen Beirat des Restaurierungsprojekts diskutiert und bewertet⁴. Es zeigte sich, dass - strahlungsphysikalisch durch die Ausfilterung der Wellenlängen bis 400 nm bedingt – alle Gläser einen sehr leichten Gelbstich aufwiesen. Verursacht wird dies durch die Filterung eines kleinen Teils der blauen Anteile des sichtbaren Lichtes (zwischen ca. 380-400 nm Wellenlänge). Dadurch wird im Glas die entsprechende Komplementärfarbe (gelb) leicht sichtbar. Diese Tatsache könnte nur durch eine schmalbandigere Filterbegrenzung im nicht sichtbaren Wellenlängenbereich bis ca. 380 nm verhindert werden. Dann wäre aber die gewünschte Schutzwirkung zwischen 380 – 400 nm Wellenlänge nicht mehr gegeben. Diese leichte Verfärbung der Schutzgläser muss daher angesichts der gewünschten Schutzwirkung in diesem Wellenlängenbereich akzeptiert werden.

Die optische Wirkung der getesteten UV-Gläser ist wegen der unterschiedlichen Herstellungstechniken der Ausgangsgläser naturgemäß unterschiedlich. Während die industriell hergestellten Float- und Ziehgläser eine vergleichsweise glatte und unbewegte Oberfläche besitzen, weist das mundgeblasene UV-Filterglas deutliche Unebenheiten und vereinzelt kleiner Luft einschüsse auf. Es kommt damit in seiner optischen Wirkung einem historischen Fensterglas, wie sie vom Ausgang des Mittelalters bis zu Beginn des 20. Jahrhunderts verwendet wurden relativ nahe. Dies dürfte im Kontext eines denkmalgeschützten, historischen Gebäudes meist als Vorteil angesehen werden.

⁴ Mitglieder des ständigen wissenschaftlichen Beirats waren: Dr. Falko Bornschein, Erfurt; Dr. Ulrike Brinkmann, Köln; Prof. Sarah Brown, York (GB); Prof. Dr. Maria Deiters, Potsdam; Prof. Dr. Christoph Herm, Dresden; Dr. Claudine Loisel, Champs-sur-Marne (F); Prof. Dr. Sebastian Strobl, Erfurt; Dr. Stefan Trümpler, Romont (CH); Prof. Dr. Harald Wolter-von dem Knesebeck, Bonn; Dr. Ulrike Wendland, Halle; Dr. Holger Kunde, Naumburg; Dombaumeisterin Regine Hartkopf, Benningen; Dr. Ivo Rauch, Koblenz



Abb. 8 Testinstallation von verschiedenen Filtergläsern am Naumburger Dom zur visuellen Beurteilung.

2.3 Laboruntersuchungen

Die von der Werkstatt des Naumburger Domes beschafften UV-Schutzgläser wurden für den Einsatz präpariert. Die Probescheiben wurden zugeschnitten und in bestmöglicher Anpassung an eine übliche, reale Einbausituation vorbereitet. Die Probekörper wurden mit Randbleien eingefasst und verkittet. Neben den Proben für eine Bewitterung im Labor wurden auch Scheiben für die Strahlungsexposition auf der Südseite des Naumburger Doms vorbereitet. Diese Scheiben wurden ebenfalls verkittet und in einer Bleiverglasung zusammengefasst, die in eine Messbox eingebaut wurde.

Für die Laboruntersuchungen erfolgte die Auswahl von Gläsern verschiedener Hersteller (LambertsGlas *restauro*®-UV, VSG-UV-Schutz FC 400, Fa. Peters, Paderborn und UV++2012.11.20.001, Fa. Rothkegel, Würzburg). Ein Teil der Proben vom LambertsGlas *restauro*®-UV wurden zusätzlich auf einer Seite mit einer eingebrannten Schwarzlotlasur versehen. Die geplanten Untersuchungen zur künstlichen Bewitterung der Gläser erfolgten in zwei Abschnitten von jeweils 3 Monaten (1. Bewitterung 11.09.18-06.12.2018, 2. Bewitterung 02.05.19-01.08.2019) in einem Klimaschrank UV200 der Fa. Weiss-Umwelttechnik unter Variation von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Beregnung und Bestrahlung mit UV-Lampen (Abb. 9). UV-VIS-Spektren aller untersuchten Glasproben wurden im Wellenlängenbereich von 200nm bis 840nm im UV-VIS Zweikanal Spektrometer Cary 300 sowohl vor der Bewitterung als auch jeweils nach drei Monaten künstlicher Alterung aufgenommen. Die Absorption- bzw. Transmissionsspektren zeigen einerseits eindeutige Unterschiede zwischen den ausgewählten Glástypen, andererseits lässt sich auch auf Veränderungen des UV-Schutzes der Gläser nach der Bewitterung schließen.

Für das LambertsGlas *restauro*®-UV spielt es offensichtlich eine Rolle, welche Seite der UV-Strahlung ausgesetzt ist. Erste Untersuchungsergebnisse wurden mit Mitarbeitern der Naumburger Restaurierungswerkstatt besprochen und die Vorgehensweise für in situ-Messungen geplant. Dazu erfolgte der Bau einer Musterbox mit Glasproben des LambertsGlas *restauro*®-UV mit unterschiedlicher Vorbehandlung (mit und ohne Schwarzlotlasur) und unterschiedlicher Anordnung in der Messbox. Die Messbox befand sich auf dem Naumburger Dom, oberhalb des *Chorfensters s. III*. Durch die Ausrichtung nach Süd-West konnte eine maximale natürliche UV-Strahlung erreicht werden (Abb. 10). Die Exposition betrug 6 Monate (Mai bis November 2019), so dass auch Vergleiche mit den Ergebnissen der insgesamt 6-monatigen künstlichen Bewitterung möglich waren.

Mit Hilfe von UV-Sensoren (FLA 613, FLA 623) wurde die natürliche UV-A und UV-B-Strahlung vor dem Musterfenster (im Außenbereich) und hinter der Ausschutzverglasung im Abstand von 6

cm innerhalb eines abgeschlossenen Raumes gemessen. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit Hilfe eines Datenloggers alle 5 Minuten. Die Kontrolle der Messtechnik und der Datenabruf erfolgen von der BAM aus Berlin mit Hilfe einer Modemverbindung. Zusätzlich wurden die relative Luftfeuchtigkeit und die Temperatur außerhalb und innerhalb des Musterfensters registriert.

Über die genauen Versuchsanordnungen und über die Ergebnisse der naturwissenschaftlichen Messungen gibt die diesem Bericht angefügte separate Bewertung der BAM, Berlin, genauere Auskunft.



Abb. 9: Glasproben im Klimaschrank UV200; 1. Bewitterung 11.09.18- 06.12.2018

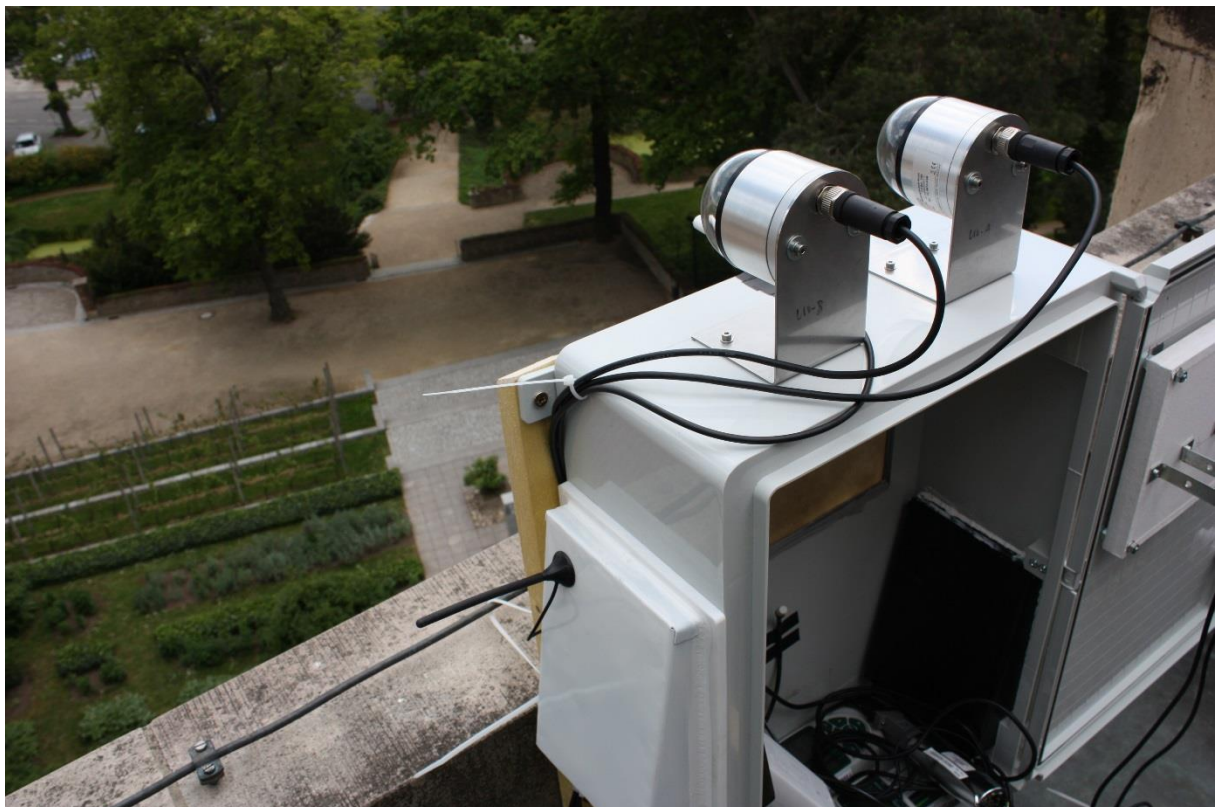


Abb. 10: Messbox mit UV-Messtechnik auf dem Naumburger Dom

3. Praktische Anwendung

3.1 Einbau der UV-Filtergläser in Fenster des Naumburger Westchors.

In einem Fenster des Naumburger Westchors war zunächst eine Testinstallation von drei Musterfeldern mit verschiedenen silikatischen Mustergläsern (mundgeblasenes Fensterglas, thermisch verformte Scheiben, mundgeblasenes UV-Filterglas) vorgenommen. Zusätzlich wurden in zwei Fenstern des Naumburger Doms bis zu Ende des Jahres 2018 UV-Filtergläser als Schutzverglasungen eingebaut. Die optische Beeinflussung der Architekturansicht und der Innenwirkung im Durchlicht wurde zunächst in den Testbereichen durchgeführt und mit dem wissenschaftlichen Beirat des Restaurierungsprojekts als Expertengremium diskutiert.

Angesichts der guten Erfahrungen mit der Testinstallation sowohl in ästhetischer wie auch technischer Hinsicht und auch in Anbetracht der ersten Ergebnisse des vorliegenden Forschungsprojekts entschloss man sich in Abstimmung mit dem wissenschaftlichen Beirat, alle Fenster des Westchors mit einer Schutzverglasung aus mundgeblasenem UV-Filterglas auszustatten, die die Hauptkonturen der mittelalterlichen Darstellung aufnimmt. Dadurch wurde es wieder möglich, die Strukturen und die Untergliederung der historischen Verglasungen von außen erfahrbar zu machen, was bei der vorherigen, aus der letzten Restaurierungskampagne stammende Schutzverglasung nicht möglich gewesen war. Ein Vergleich von historischen Aufnahmen mit der heutigen Situation zeigt, dass es so gelungen ist, das Erscheinungsbild wieder deutlich näher an die historische Situation anzunähern (Abb. 11). Durch den Einsatz der im Rahmen dieses DBU-Projekts evaluierten UV-Filtergläser konnten zudem nachhaltig die auf den originalen Glasmalereien befindlichen Kunstharze aus früheren Restaurierungen vor Alterung geschützt werden.



Abb. 11. Aussenansicht des Westchors von Südenwesten. Historisches Foto aus dem 19. Jh., Zustand 2017 mit der Schutzverglasung der 1970er Jahre, Zustand 2019 (v.l.n.r.)

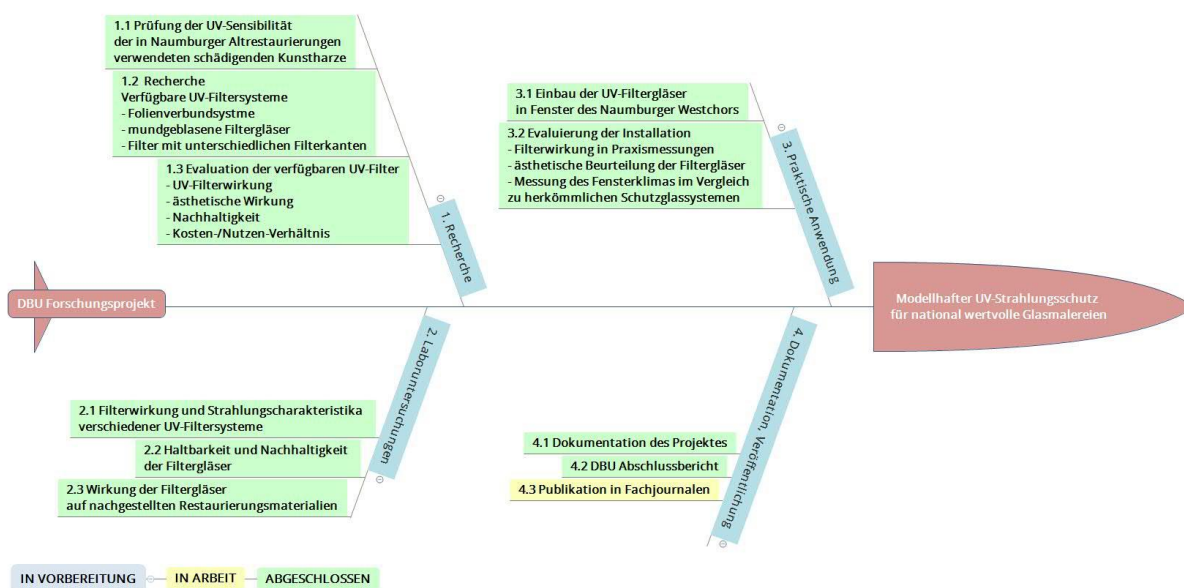


Abb. 12 Ablaufdiagramm des Forschungsprojekts mit Markierung der Projektfortschritte.

4. Veröffentlichung der Ergebnisse

4.1 Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

Angesichts der hohen Relevanz und des modellhaften Charakters des Forschungsthemas wurden die Ergebnisse zeitnah den zuständigen Denkmalpflegern (Direktion, Gebietsreferent und Amtr restaurator) des Landesamts für Denkmalpflege und Archäologie Sachsen-Anhalt sowie dem wissenschaftlichen Beirat des Restaurierungsprojekts unmittelbar zur Verfügung gestellt. Dieser wissenschaftliche Beirat war mit internationalen Multiplikatoren besetzt, so dass die Ergebnisse sehr schnell die Fachwelt erreichten⁵. Um die Ergebnisse des Forschungsprojekts möglichst weit publik zu machen und sowohl Entscheidungsträger als auch Multiplikatoren in größerer Zahl zu erreichen, wurde eine kostenneutrale Verlängerung des Projekts bis zum 31.07.2020 beantragt und bewilligt. Dies sollte dazu dienen, die Ergebnisse gemeinsam mit der BAM Berlin auf dem International Forum for the Conservation of Stained Glass des Corpus Vitrearum und der ICOMOS Stained Glass Group im Juli 2020 in Barcelona vorzustellen. Leider konnte – bedingt durch die Einschränkungen durch die Corona-Pandemie – dies noch nicht erfolgen. So wurde diese vorgesehene Präsentation der Ergebnisse auf dem ICOMOS Stained Glas Forum in Barcelona auf das Jahr 2022 verschoben. Die damit verbundene und bereits erstellte und redigierte Publikation der Ergebnisse wird ebenfalls in den gleichen Zeitraum verschoben. Auch ein für 2020 vorgesehener Studio-Workshop mit freiberuflichen Glasrestauratoren und Glasrestaurierungsfirmen musste wegen der pandemiebedingten Einschränkungen leider entfallen.

Bereits vorher konnten erste Ergebnisse der Restaurierungsmaßnahmen und auch die Bemusterungen der UV-Filtergläser im Rahmen eines großen Pressetermins am 12. Mai 2018 der Öffentlichkeit vorgestellt werden. Sowohl die regionale wie auch überregionale Presse, MDR und lokale Fernsehsender haben anschließend über das Projekt berichtet. Die Fachzeitschrift ‚Restauro‘ berichtete in einem separaten Beitrag (Restauro 07/2018) über die Restaurierung und die speziellen Fragestellungen der Fenster am Naumburger Dom. Geplant ist weiterhin die Veröffentlichung der Ergebnisse in der Publikation des CVMA/ICOMOS Stained Glass Colloquium (Barcelona) in 2022 und im Rahmen eines Berichtes für das Online-Fachjournal für historische Glasmalereien *Vidimus* (www.vidimus.org).

⁵ Im wissenschaftlichen Beirat wirkten mit: Dr. Ulrike Brinkmann, Dombauhütte Köln; Dr. Sarah Brown, The University of York, York (GB); Prof. Dr. Maria Deiters, Arbeitsstelle CVMA Potsdam; Dr. Claudine Loisel, Laboratoire de Recherche des Monuments Historiques, Champs-sur-Marne (F); Prof. Dr. Sebastian Strobl, Fachhochschule Erfurt; Dr. Stefan Trümpler, Centre Suisse de recherche et d'Information du Vitrail, Romont (CH)

5. Zusammenfassung

Historische Glasfenster wurden im Laufe ihrer langen Restaurierungsgeschichte häufig mit Materialien, wie z. B. natürlichen oder künstlichen Harzen beschichtet, die sich unter Einwirkung von Umwelteinflüssen und insbesondere durch die Exposition im Sonnenlicht mit starkem UV-Strahlungsanteil bekanntermaßen deutlich verändern und teilweise stark altern. Um diese Alterungsprozesse zu stoppen oder zumindest zu verlangsamen werden seit mehreren Jahren immer häufiger UV-Filtergläser als Schutzglasscheiben eingesetzt, die den UV-Anteil der natürlichen Sonneneinstrahlung begrenzen oder gänzlich eliminieren sollen. Dazu werden zwei grundsätzlich verschiedene technische Wege beschritten: Einmal der Einsatz von laminierten Gläsern, deren Laminierungsfolien eine UV-Filterwirkung besitzen (meist sog. ‚dotierte PVB-Folien‘), zum anderen Gläser, deren Filterwirkung auf den speziellen Eigenschaften des Glases selbst beruht, das mit einer speziellen Rezeptur und in speziellen Herstellungsprozessen solchermaßen ausgestattet wurde. Im Rahmen des Forschungsprogramms wurden die heute am Markt erhältlichen verschiedenen UV-Filtergläser mit einer Filterkante bei ca. 400 nm Wellenlänge einer Evaluierung in restaurierungspraktischer, ästhetischer und physikalischer Hinsicht unterzogen. Dabei zeigte sich, dass alle getesteten Gläser die geforderten Anforderungen in Hinblick auf die Filterung von UV-Strahlung erfüllen konnten⁶. Es ergaben sich allerdings leichte Unterschiede in der Haltbarkeit der Gläser, da die laminierten Gläser während der künstlichen Bewitterung erste Anzeichen von Delaminierung zeigten. Zudem konnten bei den Bewitterungsversuchen leichte Verschiebungen in der Wellenlänge der UV-Filterkante bei allen Glastypen beobachtet werden. Überraschend und bislang unbekannt war auch, dass die Einbaurichtung der mundgeblasenen UV-Filtergläser einen – zwar geringen, aber doch messbaren – Einfluss auf die Filterwirkung besitzt. Alle diese Erkenntnisse dürften zukünftig eine gute Grundlage bei der Wahl des dem Objekt angemessenen Schutzglassystems zur Erhaltung kostbarer historischer Glasmalereien bilden.

Abbildungsnachweis:

Abb. 9, 10: BAM, Berlin

Abb. 4: Wikipedia.org (Zugriff am 30.10.2009)

Alle übrigen Abbildungen: Glasrestaurierung am Naumburger Dom
(Vereinigte Domstifter zu Merseburg und Naumburg und des Kollegiatstifts Zeitz)

⁶ Alle Gläser waren in der Lage, nahezu 100% der UV-Strahlung bis 380 bzw. 400 nm Wellenlänge messbar auszufiltern. Zu erfassen, wie sich diese positive Strahlungsentlastung konkret auf verschiedene historische Materialien auswirkt, war nicht Ziel dieses Forschungsvorhabens. Hierzu wären weitere Untersuchungen notwendig, die die Strahlungsschädigung von neuen und auch vorgealterten Materialien aus dem Bereich von Kunst und Denkmalpflege genauer erforschen würden. Dies wäre in Anbetracht steigender natürlicher Strahlungsbelastung (durch UV- und IR-Strahlung, aber auch im Bereich des sichtbaren Lichts) dringend erforderlich.

Evaluierung und modellhafte Praxiserprobung von UV-Schutzgläsern für historische Glasmalereien

Manfred Torge, Volker Wachtendorf

Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM)

Zusammenfassung

Die Glasfenster des Naumburger Dom werden im Rahmen eines umfangreichen Restaurierungsvorhabens mit einer für UV-Strahlung undurchlässigen Verglasung geschützt. Veränderung an unterschiedlichen Arten von UV-Schutzgläsern nach künstlicher und natürlicher Bewitterung wurden untersucht. Mit Hilfe der UV-VIS-Spektroskopie in Transmission erfolgte die Dokumentation des Ausgangszustands sowie möglicher Veränderungen dieser Gläser nach der Bewitterung. Die künstliche Bewitterung erfolgte unter Einfluss von UV-Strahlung, Temperatur, Feuchte und Beregnung. Nach der Auswahl und Installation der UV-Schutzverglasung im Naumburger Dom wurden in situ-Messungen an einem Musterfenster durchgeführt, um die UV-Belastung im Außenbereich und hinter der Außenschutzverglasung in einen Zeitraum von 6 Monaten zu dokumentieren.

Experimentelle Untersuchungen

Im Rahmen eines Projektes wurden mögliche Veränderung durch künstliche- und natürliche Bewitterung an unterschiedlichen Arten von UV-Schutzgläsern untersucht. Mit Hilfe der UV-VIS-Spektroskopie in Transmission werden der Ausgangszustand sowie Veränderungen dieser Gläser nach 2000 h und 4000 h Bewitterung dokumentiert. Insbesondere soll der UV-Bereich der Globalstrahlung (290 nm bis 400 nm) möglichst scharf und vollständig absorbiert werden, während der sichtbare Bereich unverändert durchgelassen werden muss, um Farbechtheit zu gewährleisten. Diese Eigenschaften müssen auch langfristig unter den Einsatzbedingungen erhalten bleiben.

Durch künstliche Bewitterung im UV-Klimaprüfgerät unter Einfluss von UV-Strahlung, Temperatur, Luftfeuchte und Beregnung wurden die UV-Schutzgläser systematisch und reproduzierbar getestet. Die sich einstellende Veränderungen werden durch UV-VIS Spektroskopie in Transmission charakterisiert.

In einer zweiten Phase erfolgten nach der Auswahl und Installation der UV-Schutzverglasung im Naumburger Dom an einem Musterfenster in situ-Messungen. Die UV-Belastung im Außenbereich und hinter der Außenschutzverglasung wurde gemessen und dokumentiert. Durch den Vergleich der UV-VIS-Spektren zu Beginn und nach 6 Monaten Bewitterung auf dem Naumburger Dom, lassen sich auch Rückschlüsse auf Zusammenhänge zwischen künstlicher und natürlicher Bewitterung ziehen.

UV-Schutzgläser

Die UV-Schutzgläser wurden von der Werkstatt des Naumburger Domes ausgewählt und der BAM zur Charakterisierung übergeben. Die künstliche Bewitterung im UV-Klimagerät erfolgte an Gläsern mit unterschiedlichen UV-Schutzsystemen verschiedener Hersteller. Untersucht wurden jeweils mehrere Glasproben von zwei Verbundsicherheitsgläsern mit verschiedenartigen UV-Schutzfolien (P, R) und einem Überfangglas mit integriertem UV-Schutz (L). Ein Teil dieser Glasproben wurden zusätzlich auf einer Seite mit einer eingebrannten Schwarzlotlasur versehen (LS).

Die Charakterisierung der Gläser erfolgte sowohl durch die Bestimmung ihrer chemischen Zusammensetzung im Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM - FEI XL30) als auch durch die Messung der Glasstärke und der UV-absorbierenden Schichten. Dazu wurden

die Querschnitte der angeschliffenen, polierten und mit Kohlenstoff leitfähig beschichteten Gläser untersucht. Die Elementanalysen erfolgten im ESEM mit Hilfe eines EDX-Spektrometers der Firma EDAX. Die EDX-Untersuchungen wurden im Hochvakuum Modus vorgenommen. Die quantitative Analyse erfolgte standardfrei und die Ergebnisse sind auf 100 % normiert.

Tabelle: Dickenmessung und chemische Zusammensetzung der UV-Schutzgläser in Masse%

	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZnO	CdO	Foliendicke [µm]***	Glasstärke [mm]***
P	11,4	-	8,1	4,2	0,9	75,4	-	-	1400	2 x 3
R	12,5	-	8,1	3,9	1,2	74,3	-	-	1500	2 x 4
LdS*	14,8	0,8	7,8	-	1,5	75,1	-	-	-	0,4
LUV**	8,3	7,9	5,3	-	0,6	71,9	5,9	x	-	1,9
LSdS*	14,8	0,8	7,8	-	1,5	75,1	-	-	-	0,2
LSUV**	8,3	7,9	5,3	-	0,6	71,9	5,9	x	-	1,5

*dünne Glasschicht, **Glasschicht mit UV-Schutz, ***Messung im Keyence Mikroskop, x-detektiert mit XRF, Glasanalysen: Ines Feldmann, BAM

UV-Schutzanforderungen

Die ausgewählten UV-Schutzgläser sollen dazu verwendet werden, den Bereich der UV-A (315-380 nm) und UV-B-Strahlung (280-315 nm) möglichst mit einer scharfen Absorptionskante und vollständig zu absorbieren, weil besonders diese energiereiche UV-Strahlung durch Spaltung von Bindungen zur Degradation organischer Materialien führt. Häufig wird ein Schutz bis 400 nm oder darüber hinaus gefordert, da in diesem Energiebereich u.U. auch noch Schäden für spezielle Materialien zu erwarten sind. Der sichtbare Bereich des Lichtes (VIS: 400 -800 nm) hingegen sollte möglichst unverändert durchgelassen werden.

Es ergeben sich die folgenden Anforderungen an das UV-Schutzglas:

- möglichst vollständigen Abblocken des UV-Bereiches
- möglichst farbneutralen Durchlässigkeit für den VIS-Bereich
- scharfe Filterkante zwischen UV und VIS.

Diese drei Anforderungen müssen nicht nur im Ausgangszustand möglichst gut erfüllt werden, sondern diese Eigenschaften sollten auch unter den Einsatzbedingungen bei natürlicher Bewitterung erhalten bleiben. Die Witterungsverhältnisse sollen reproduzierbar, wiederholbar und systematisch variierbar durch künstliche Bewitterung realisiert werden.

Die sich einstellende Veränderungen können durch UV-VIS Spektroskopie in Transmission gemessen werden.

UV-VIS-Methodik und Spektrometer

Mit Hilfe von UV-VIS Spektroskopie wird das Transmissionsverhalten von Gläsern wellenlängenabhängig für den UV- und VIS-Bereich gemessen.

Wenn bei der Spektren-Aufnahme keine einfache Standard-Transmissionsanordnung, sondern eine Ulbrichtkugel benutzt wird, kann die gesamte Strahlung, die durch die Probe hindurchgegangen ist, richtungsunabhängig aufgefangen werden. Dies ist wichtig, um hinter der Probe gestreute Anteile nicht als von der Probe absorbierte Anteile zu detektieren. Eine solche Streuung kann sowohl durch heterogene Bereiche des Glases als auch durch eine in der Probe integrierte Polymerfolie (neu oder gealtert) verursacht werden.

Um im Bereich geringer Transmission kleine Unterschiede detektieren zu können, ist es erforderlich, einen Detektor hoher Empfindlichkeit, hoher Messbereichsdynamik und geringen Rauschens zu verwenden.

Das UV-VIS Zweikanal Spektrometer Cary 300 der Firma Varian (Mulgrave, Australien) /Agilent Technologies Sales & Services GmbH (Böblingen) erfüllt diese Anforderungen. Das Gerät arbeitet mit einem Czerny-Turner Monochromator plus Vor-Monochromator mit einem Gitter von 1200 Linien / mm, das eine Blaze-Wellenlänge von 240 nm hat. Der untersuchbare Wellenlängenbereich liegt zwischen 190 nm und 900 nm. Der photometrische Bereich des Detektors liegt bei 5 Absorptionseinheiten. In der Probenkammer wird eine interne 70 mm Spectralon-beschichtete Ulbrichtkugel DRA-CA-30I der Firma Labsphere (North Sutton, NH, USA) verwendet, die hinter der Probe austretende Strahlung unabhängig von Streu-Effekten vollständig sammelt und auf den Detektor führt. Es wurde eine Basislinienkorrektur für 100% Transmission durchgeführt.

Bei den dargestellten Diagrammen der Messungen wurde als Y-Achse die „Transmittanz“ zugunsten des Begriffes Transmission verwendet, da der dargestellte Wert noch unkorrigiert ist bezüglich Reflexion und Streuung vor bzw. in der Probe¹. In erster Näherung (unter Vernachlässigung von Reflexions- und Streuteilen vor der Probe) kann der Wert gleichgesetzt werden mit der Transmission durch die Probe und im Text wird daher vereinfachend der Begriff Transmission verwendet.

Künstliche Bewitterung

Die künstliche Bewitterung der Gläser erfolgte in zwei Abschnitten von jeweils 3 Monaten (1. Bewitterung 11.09.18 - 06.12.2018, 2. Bewitterung 02.05.19 - 01.08.2019) in einem UV-Klimaprüfgerät Global UV-Test 200 der Fa. Weiss-Umwelttechnik unter Variation von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Beregnung und Bestrahlung mit UV-Fluoreszenz-Lampen (UVA-340 gemäß DIN EN ISO 4892-3:2016, Tabelle 1, Typ 1A). Das Bewitterungsprogramm wurde so gewählt, dass sowohl die möglichen natürlichen Temperaturen als auch Maximalwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an Kirchenfenstern berücksichtigt werden. Die UV-Bestrahlungsstärke der Fluoreszenz-Lampen mit einer maximalen Wellenlänge von 340 nm beträgt etwa 50 W/m² und entspricht damit in ihrem zeitlichen Integral über 4000 h Beanspruchungsdauer einer UV-Bestrahlung von 720 MJ/m² und damit bezüglich der UV-Strahlung einer gemittelten maximalen Sonneneinstrahlung von etwa 4 Jahren im Freien in Mitteleuropa (ca. 180 MJ/m² pro Jahr für Potsdam), über die hinaus die verwendeten Temperatur- Feuchte- und Regenzyklen zu einer Verstärkung der Beschleunigung durch die künstliche Bewitterung führen müssten.

Die Versuchsbedingungen variieren innerhalb von 24 h (abwechselnd je 4 h Regen bei 25 °C mit anschließendem Trockenklima für 4 h bei 50 °C und 30 % r. F. bei konstanter UV-Bestrahlung). Der Tageszyklus wird mit einer Frostphase bei -15 °C ohne UV abgeschlossen. Somit kann man innerhalb von 24 h sowohl Tages- und Nacht- als auch Sommer und Winterzyklen simulieren.

Natürliche Bewitterung

Das für den UV-Schutz im Naumburger Dom gewählte Verglasungssystem wurde auch in einer 6-monatigen Versuchsphase in situ überprüft. Dazu erfolgte der Bau eines Musterfensters mit Glasproben des verwendeten UV-Schutzglases (LambertsGlas restauro®-UV mit und ohne Schwarzlotlasur, L, LS) vor einem abgeschlossenen Kunststoffkasten, in dem sich die UV-Messtechnik befand. Das Musterfenster wurde auf dem Naumburger Dom, oberhalb des Chorfensters sw II exponiert (Anhang 1a).

Durch die Ausrichtung nach Süd-West war im Versuchszeitraum eine maximale natürliche UV-Belastung zu erwarten. Die Exposition betrug 6 Monate (Mai bis November 2019), so dass auch

¹ IUPAC. Compendium of Chemical Terminology, 2. Ausgabe (the "Gold Book"). Zusammengestellt von A. D. McNaught und A. Wilkinson. Blackwell Scientific Publications, Oxford, 1997, S. 32.

Vergleiche mit den Ergebnissen der insgesamt 6-monatigen künstlichen Bewitterung möglich sind.

Mit Hilfe von UV-Sensoren der Fa. Ahlborn Messtechnik (FLA 613, FLA 623) wurden die natürliche UV-A und UV-B-Strahlung vor dem Musterfenster (im Außenbereich) und hinter der Ausschutzverglasung im Abstand von 6 cm innerhalb eines abgeschlossenen Raumes gemessen. Die Datenaufzeichnung erfolgte mit Hilfe eines Datenloggers alle 5 Minuten. Die Kontrolle der Messtechnik und der Datenabruf konnten von der BAM aus Berlin mit Hilfe einer Modemverbindung realisiert werden. Zusätzlich wurden relative Luftfeuchtigkeit und Temperatur außerhalb und innerhalb des Musterfensters registriert.

Untersuchungsergebnisse

Vergleich unterschiedlicher UV-Schutzsysteme

Es wurden von allen untersuchten Gläsern die Transmissionsspektren im Ausgangszustand (0 h), nach 3 Monaten (2000 h) und 6 Monaten (4000 h) künstlicher Bewitterung aufgenommen. Die UV-VIS-Spektren wurden sowohl an mehrere Probestellen als auch in Abhängigkeit von der Orientierung der UV-Schutzgläser (Vorder-/Rückseite) gemessen. Die Darstellung der Spektren erfolgte einerseits über den gesamten gemessenen Wellenlängenbereich zwischen 0 und 100% andererseits aber auch speziell im Bereich der UV-A und UV-B-Strahlung in hoch aufgelöster Transmission zwischen 0-2 %, so dass bereits auch kleine Unterschiede und Veränderungen deutlich sichtbar werden (s. Abb.1).

Die Ausgangsspektren aller Gläser zeigen zunächst eine scharfe Absorptionskante bei etwa 400 nm. Die Transmission im sichtbaren Bereich (400-800 nm) liegt bei den Proben der Gläser P, R bei etwa 70-90 %, bei den Gläsern L aufgrund der leichten Gelbfärbung bei etwa 80-90 % und bei den mit einer Schwarzlotlasur versehenen Proben LS bei etwa nur 30 %. Die Transmission im UV-Bereich beträgt bei allen UV-Schutzgläsern unter 1 %. Unterschiede im Bereich zwischen 0 und 1 % Transmission lassen sich dennoch feststellen. Die VSG-Proben P und R zeigen in diesem Bereich eine richtungsunabhängige Resttransmission von kleiner 0,1 %, während die Proben von Glas L in Abhängigkeit der Messung von Vorder- oder Rückseite bei einer Transmission zwischen 0,1 und 0,9 % liegen. Die Vorderseite des Glases L enthält den eingebauten UV-Schutz. Die Glasproben LS mit zusätzlich eingebrannten Schwarzlot auf der Rückseite haben eine Transmission im Ausgangszustand von 0,3 - 0,6 %, ebenfalls in Abhängigkeit von der Orientierung bei der Messung. Infolge der künstlichen Bewitterung verändern sich die Transmissionsspektren (Abb. 1). Bei den Proben P und R kommt es gleichermaßen zu einer Verschiebung der Absorptionskante von 400 nm nach 380 nm, d.h. im langwelligen UV-Bereich wird zwischen 380 und 400 nm mehr Strahlung durchgelassen, während die Transmission zwischen 290 und 380 nm weiterhin bei weniger als 0,1 % liegt. Die Proben der Serie L zeigen auch nach der künstlichen Bewitterung eine unveränderte Absorptionskante bei etwa 400 nm. Die Werte der Transmission im UV-A und UV-B-Bereich verringern sich leicht von etwa 0,9 auf 0,3 % mit längerer Bewitterungsdauer. Bei den Proben mit Schwarzlot (LS) ist diese Tendenz ebenfalls sichtbar.

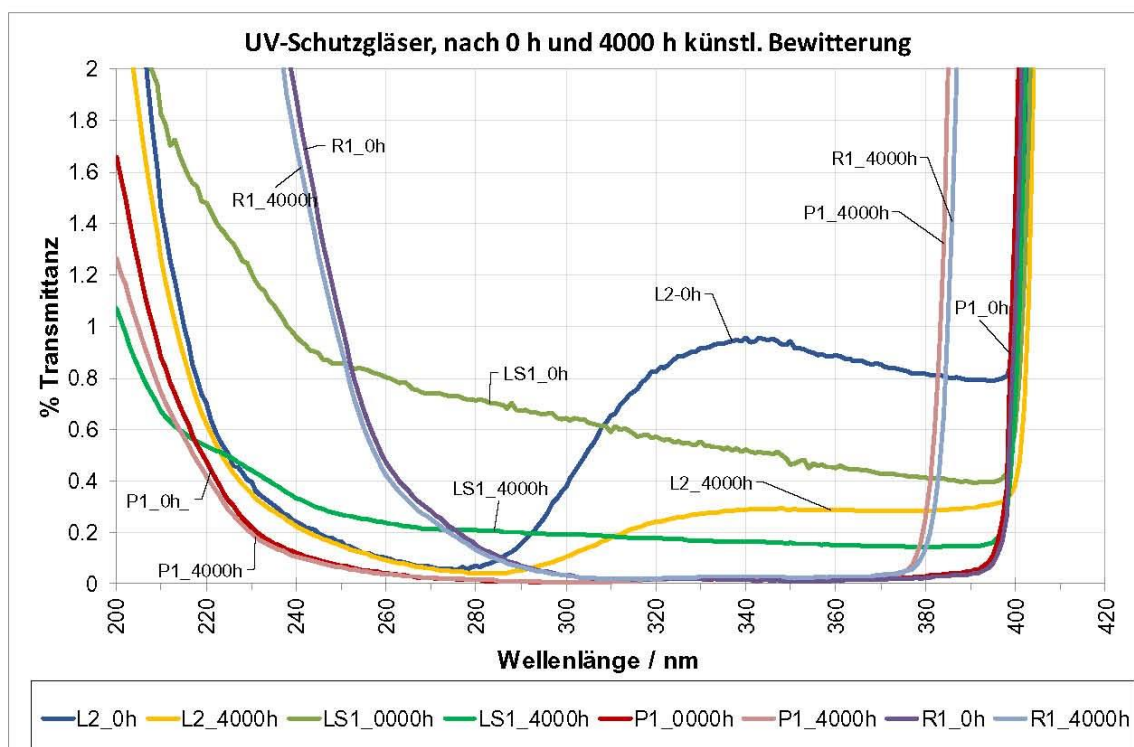


Abb.1: UV-VIS-Spektren der Gläser P, R, L, LS vor und nach der Bewitterung im UV-Klimaschrank. Die Messwerte für Wellenlängen unterhalb 290 nm sind für die natürliche Globalstrahlung nicht relevant. Weitere UV-VIS-Spektren im Anhang 2.

Die Transmission der Gläser L, LS und P im sichtbaren Bereich (400-800 nm) verändert sich mit steigender Bewitterungsdauer nur geringfügig (Anhang 2). Visuell sichtbare Eintrübungen der Glasproben R wirken sich in diesem Bereich jedoch aus. Offensichtlich ist bei dieser Probe entlang einer Kante Feuchtigkeit in das Verbundsicherheitsglas eingedrungen. Nach der Trocknung ist eine deutliche Delamination der Folie sichtbar. Mikroskopisch lassen sich Mikrorisse in den Folien nachweisen, die auf Alterungserscheinungen hindeuten und vermutlich der Grund für die Verschiebung der UV-Kante in Richtung niedriger Wellenlängen sind. Visuell sichtbare Veränderungen der Überfanggläser mit eingebautem UV-Schutz (L, LS) wurden während der Bewitterung nicht festgestellt. Allerdings unterscheiden sich einzelne Proben dieser Versuchsserie in ihrer Glasdicke und der Homogenität der Gelbfärbung voneinander, vermutlich bedingt durch den manuellen Herstellungsprozess. Mit Hilfe der Integration der Transmissionskurven im Bereich zwischen 290 nm und 400 nm zeigt sich, dass die Gläser mit eingebautem UV-Schutz im Vergleich zum VSG mit UV-Schutzfolien entgegengesetzte Tendenzen aufweisen. Während sich der UV-Schutz von VSG im untersuchten Bereich mit längerer Bewitterungsdauer durch die Verschiebung der Absorptionskante verschlechtert, wird er für die Gläser der Serie L/LS scheinbar besser (Abb. 2). Die Verschlechterung bei den VSG-Gläsern könnte durch chemische Veränderungen an der Polymerschutzfolie bedingt sein. Die Verbesserung des UV-Schutzes bei den Gläsern der L/LS-Serie könnte darin begründet sein, dass die thermische Aktivierung des UV-Schutzes durch den Temperprozess noch nicht ganz abgeschlossen war und im Lauf der Bewitterung weiterläuft. Die Integration im UV-Bereich zwischen 290 und 380 nm führt zu einem Ergebnis, bei dem die Gläser mit VSG-Folie den Glasproben mit eingebautem UV-Schutz überlegen sind. (Anhang 2-A18)

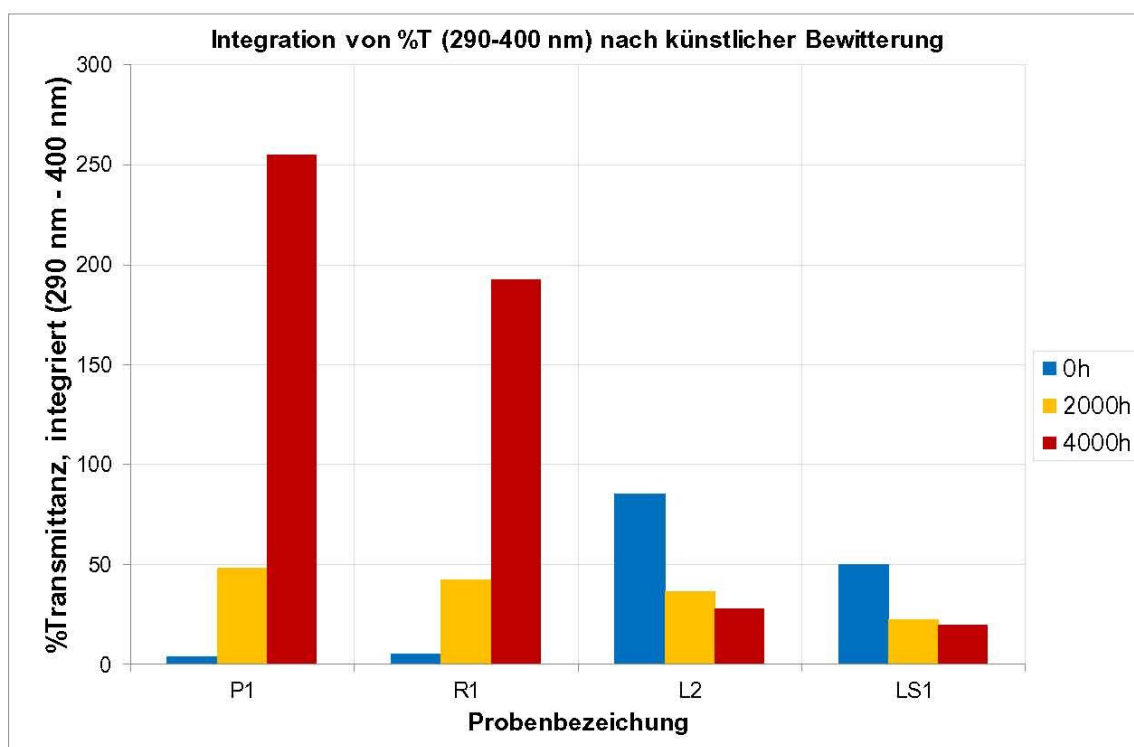


Abb. 2: Veränderung des für den UV-Bereich (290 nm bis 400 nm) integrierten Transmissionsgrades der Gläser P, R, L, LS nach Bewitterung im UV-Klimaschrank.

UV-Schutz im Musterfenster

Als Außenschutzverglasung für den Naumburger Dom wurde das Überfangglas mit integriertem UV-Schutz und einseitig eingebranntem Schwarzlotüberzug ausgewählt. Die Richtungsabhängigkeit (Vorder- oder Rückseite des Schutzglases in Richtung der einfallenden Strahlung) der UV-Transmission dieses Glases wurde dabei insofern berücksichtigt, dass im Musterfenster Gläser mit und ohne Schwarzlotüberzug in unterschiedlicher Orientierung eingebaut wurden (UV-Schutzseite nach Außen bzw. Innen, Abb. 3).

Parallel zur Exposition der Gläser im Musterfenster wurde je eine Vergleichsprobe im 2. Bewitterungszeitraum in der UV-Klimakammer unter künstlichen Bedingungen belastet.

Diese Proben zeigen ähnliche Veränderungen in den Transmissionspektren wie die der ersten Bewitterungsphase. Es war jedoch ein deutlicher Unterschied in der Absorptionskante sichtbar. Sowohl im Ausgangszustand als auch nach 2000 h Bewitterung lag diese nicht wie bei den Proben der ersten Charge bei 400 nm, sondern bei etwa 390 nm (s. Anhang 2-A13)

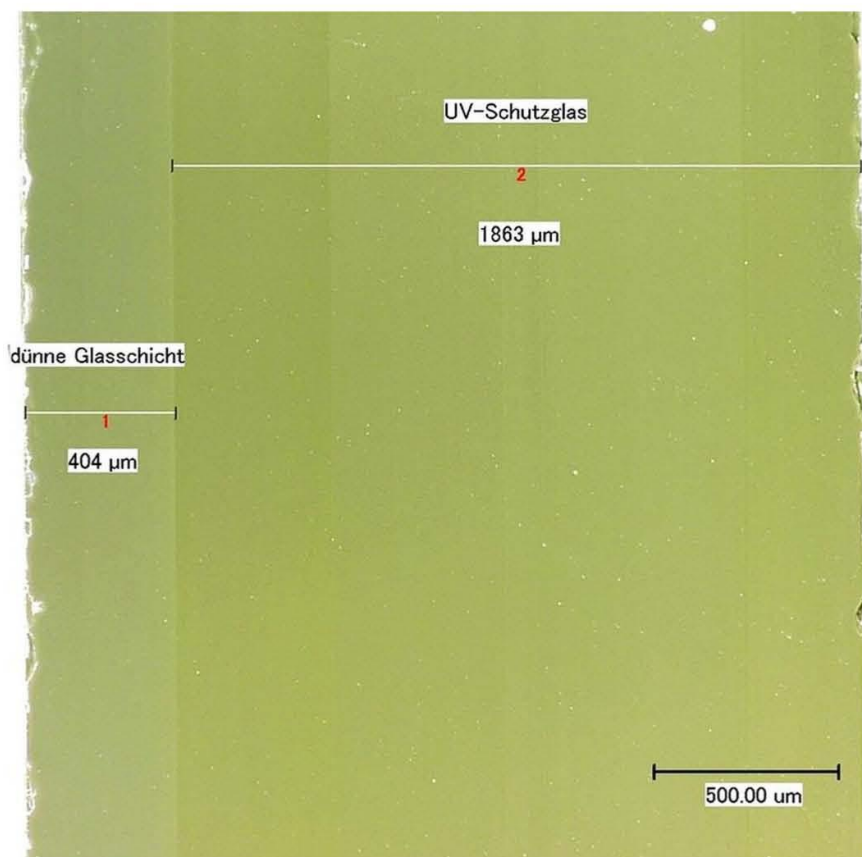


Abb. 3: Glas L; Glasseite mit UV-Schutz (rechts) soll in der Außenschutzverglasung der UV-Strahlung zugewandt sein.
Foto, BAM

Im Expositionszeitraum des Musterfensters von Mai bis November 2019 wurden eine auf das Fenster einwirkende natürliche Strahlung mit Maximalwerten von ca. 40 W/m^2 für UV-A und etwa $0,8 \text{ W/m}^2$ für UV-B gemessen (Anhang 1b). Die UV-Sensoren hinter der Schutzverglasung im Abstand von 6 cm in einem lichtdicht-abgeschlossenen Raum registrierten in den ersten drei Monaten (bis Ende Juli) weder UV-A noch UV-B-Strahlung. In den folgenden drei Monaten (August bis Oktober) stieg die UV-A-Strahlung hinter der Schutzverglasung von $0,01$ über $0,02$ bis $0,04 \text{ W/m}^2$ kontinuierlich an. Damit wurden $0,1 \%$ der einfallenden UV-A-Strahlung auch hinter der Schutzverglasung im Expositionsverlauf registriert (s. Anhang 1b). Eine Kontrolle des Versuchsaufbaus nach Abschluss der Exposition ergab, dass die Glassegmente im verbleiten Musterfenster nicht verkittet waren und die Silikonabdichtung im Randbereich des Fensters in einigen Bereichen lichtdurchlässig geworden ist. Die natürliche Alterung der Konstruktionsmaterialien ist ursächlich verantwortlich für die Messung von UV-A-Strahlung hinter der Schutzverglasung im Musterfenster. Die entsprechenden UV-B-Werte liegen während der gesamten Versuchsdauer unterhalb der Nachweisgrenze

Schlussfolgerungen:

- Die Laboruntersuchungen zeigen bei den Proben [L und LS] einen messbareren Unterschied der Transmission im UV-Bereich in Abhängigkeit von der Orientierung des Schutzglases zum einfallenden Licht, der auf Unterschiede im Brechungsindex beider Glasschichten und/oder der Rauigkeit von Ober- und Unterseite des Glases und damit unterschiedliche Reflexion bzw. Streuung daran herrühren muss.
- Beim Einbau dieser Gläser sollte die Seite mit eingebautem UV-Schutz stets der einwirkenden UV-Strahlung zugewandt sein, um einen optimalen Schutz zu gewährleisten.
- Aus Sicht der Anwender wäre es wünschenswert, wenn diese UV-Schutzglas-Chargen gleich nach der Herstellung in ihrem Transmissions-Ausgangswert überprüft und die Absorptionskante bestimmt würde, um die Effekte von Chargen-Schwankungen am zu schützenden Objekt zu minimieren.
- In den untersuchten Fällen bergen die polymere Schutzfolien im VSG die Gefahr, dass es zur Delamination und damit zu einer Verschlechterung des UV-Schutzes kommt, wenn Feuchtigkeit über die Schnittkanten in das Verbundsystem eindringt.
- Die beobachteten Veränderungen im Laufe der künstlichen Bewitterung zeigen, dass es notwendig ist, die Witterungsbeständigkeit der eingesetzten UV-Schutzsysteme zu überprüfen
- Die Untersuchungen am Musterfenster unter natürlicher Bewitterung zeigen, dass das ausgewählte UV-Schutzglas (LS) die UV-A- und UV-B-Anteile so weitgehend absorbiert, dass mit den verwendeten Sensoren keine UV-Strahlung hinter der Verglasung mehr registriert wird.
- Das Gesamtsystem muss so ausgelegt sein, dass die eingesetzten Materialien witterungs- und alterungsstabil sind, um Defekte in der Schutzverglasung zu verhindern, die einen messbaren UV-Anteil durchlassen können.
- Die Transmissionsspektren der Gläser bei natürlicher und künstlicher Bewitterung zeigen einen ähnlichen Verlauf. Die UV-Transmission der Gläser (L, LS) nimmt auch während der 6-monatigen Bewitterung im Musterfenster auf dem Dach des Naumburger Domes ab, d.h. der UV-Schutz verbessert sich sogar geringfügig im Laufe der Expositionsdauer.

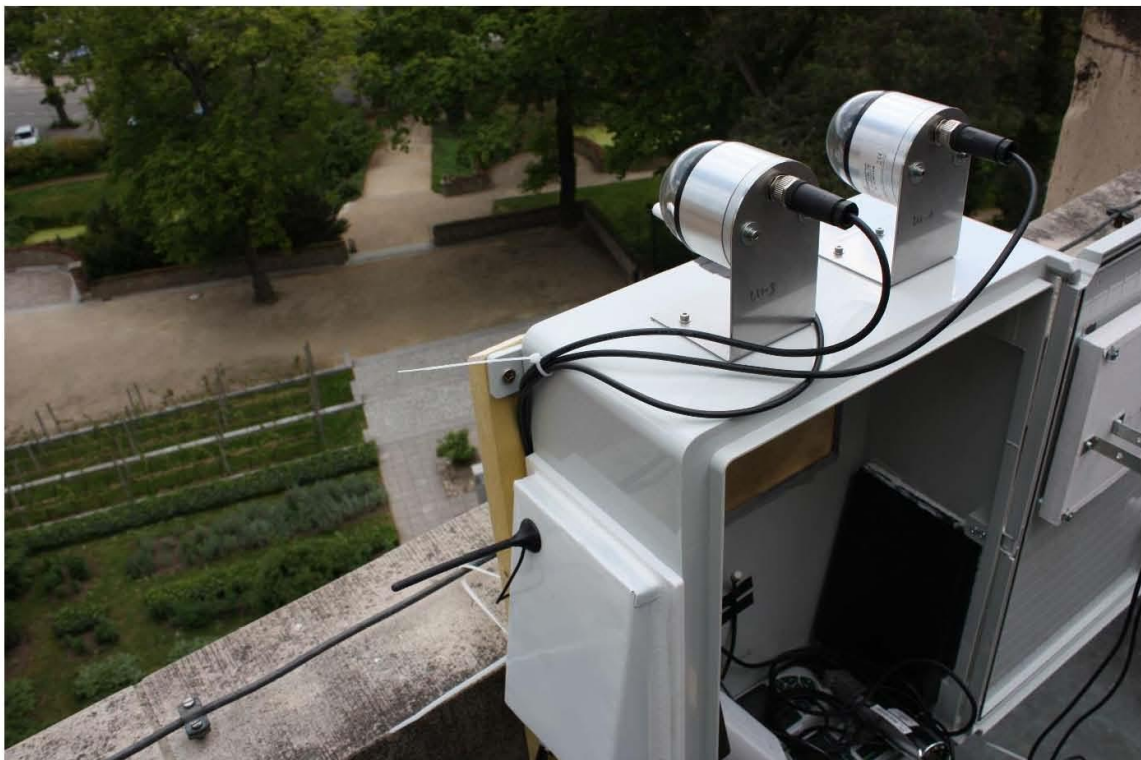
Anhang 1a:

Untersuchungen zur UV-Belastung an einen Musterfenster auf dem Naumburger Dom

Musterfenster mit UV-Sensoren innen und außen:



Messanordnung oberhalb von Fenster swlll



Anhang 1b: UV-A, UV-B Diagramme

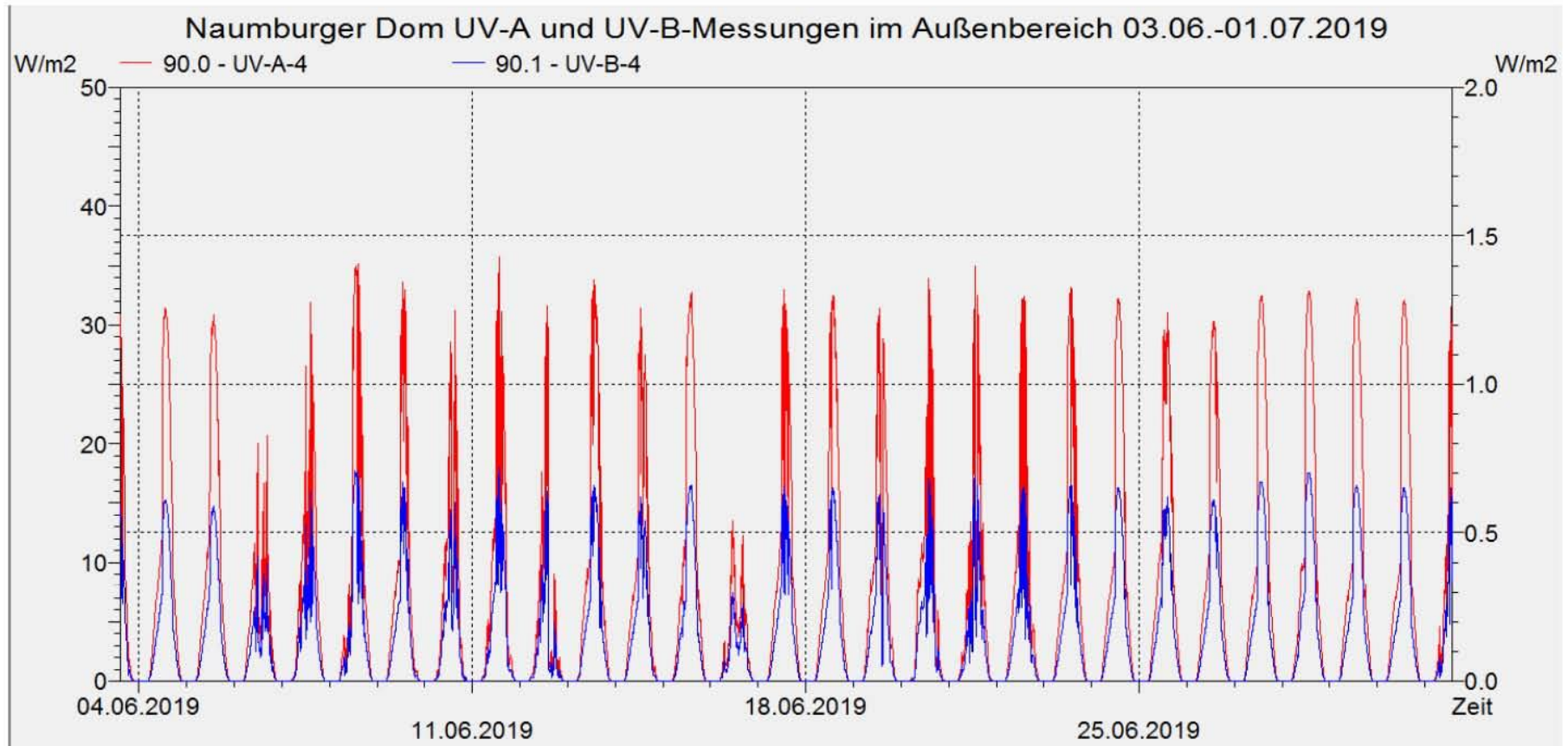


Abb. A1: Die UV-A und UV-B-Diagramme sind im Versuchszeitraum bezüglich des Verlaufs sehr ähnlich, wenn auch in der absoluten Größe um etwa Faktor 50 unterschiedlich. 2019 war ein sonnenreicher Sommer.

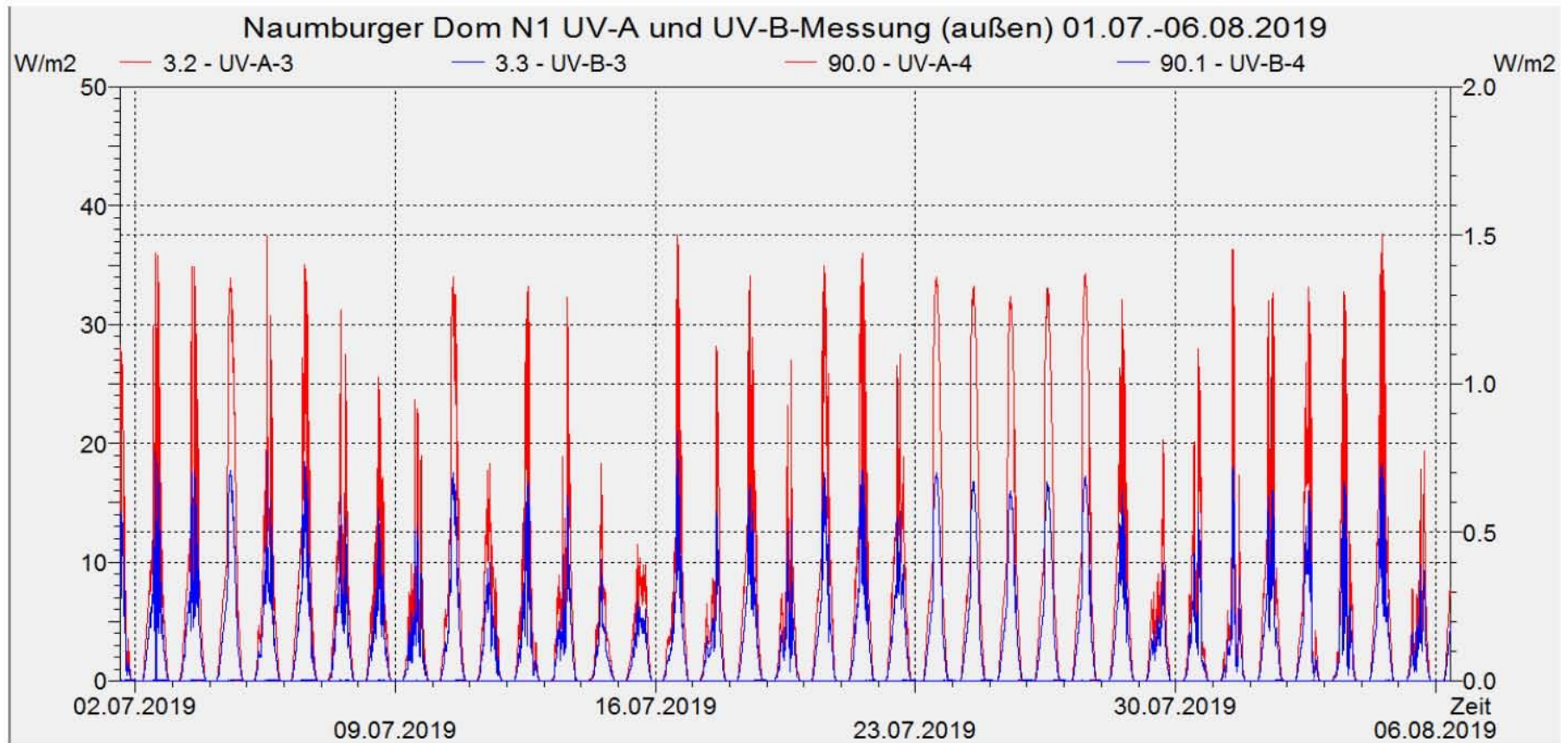


Abb. A2: Die UV-Bestrahlungsstärke im Außenbereich liegt maximal bei ca. 40 W/m² im Versuchszeitraum. Der UV-B-Bestrahlungsstärke-Anteil erreicht Werte von bis zu 0,8 W/m².

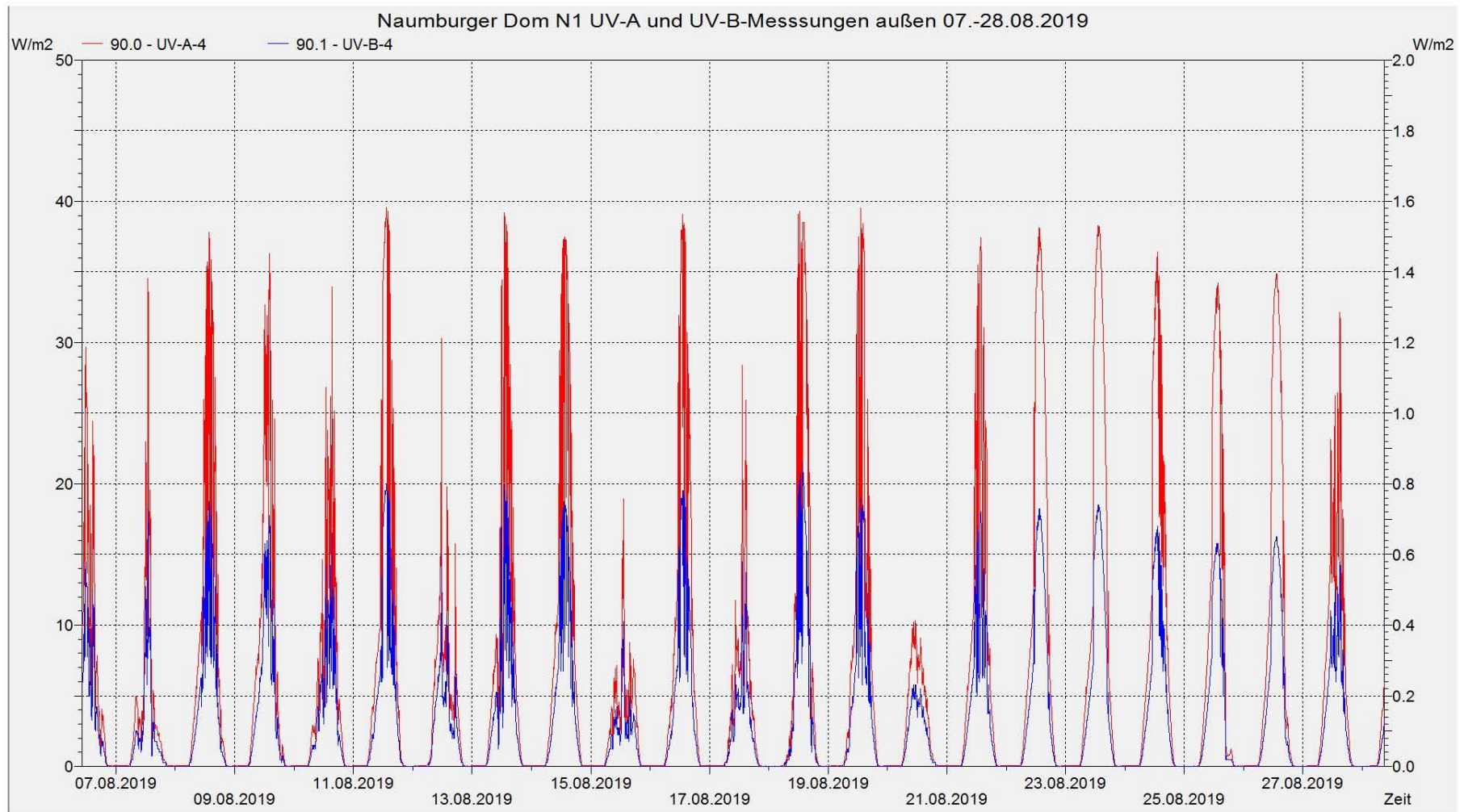


Abb. A3: UV-A und UV-B Spektrum Naumburger Dom, August 2019

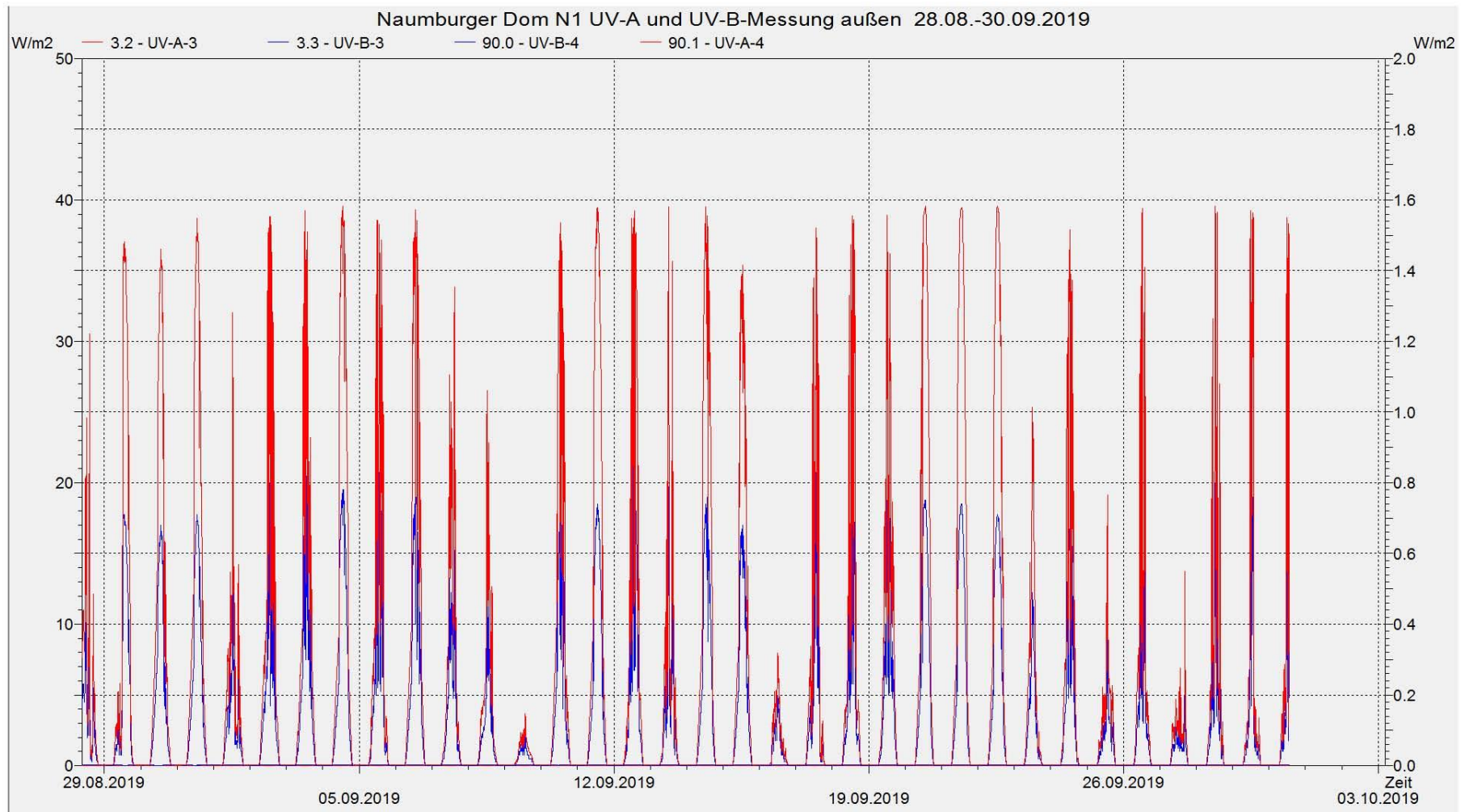


Abb. A4: UV-A und UV-B Spektrum Naumburger Dom, August/September 2019

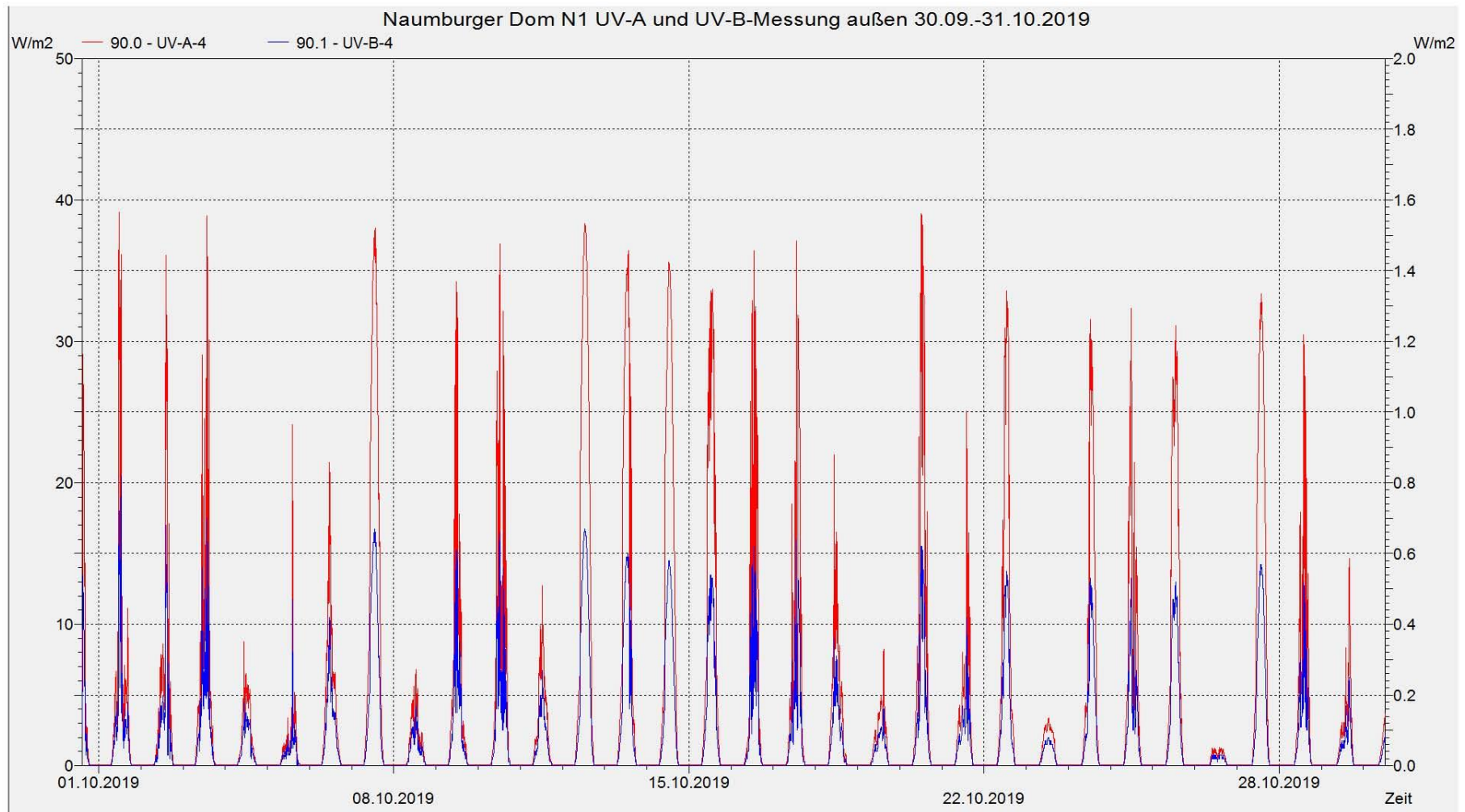


Abb. A5: UV-A und UV-B Spektrum Naumburger Dom, Oktober 2019

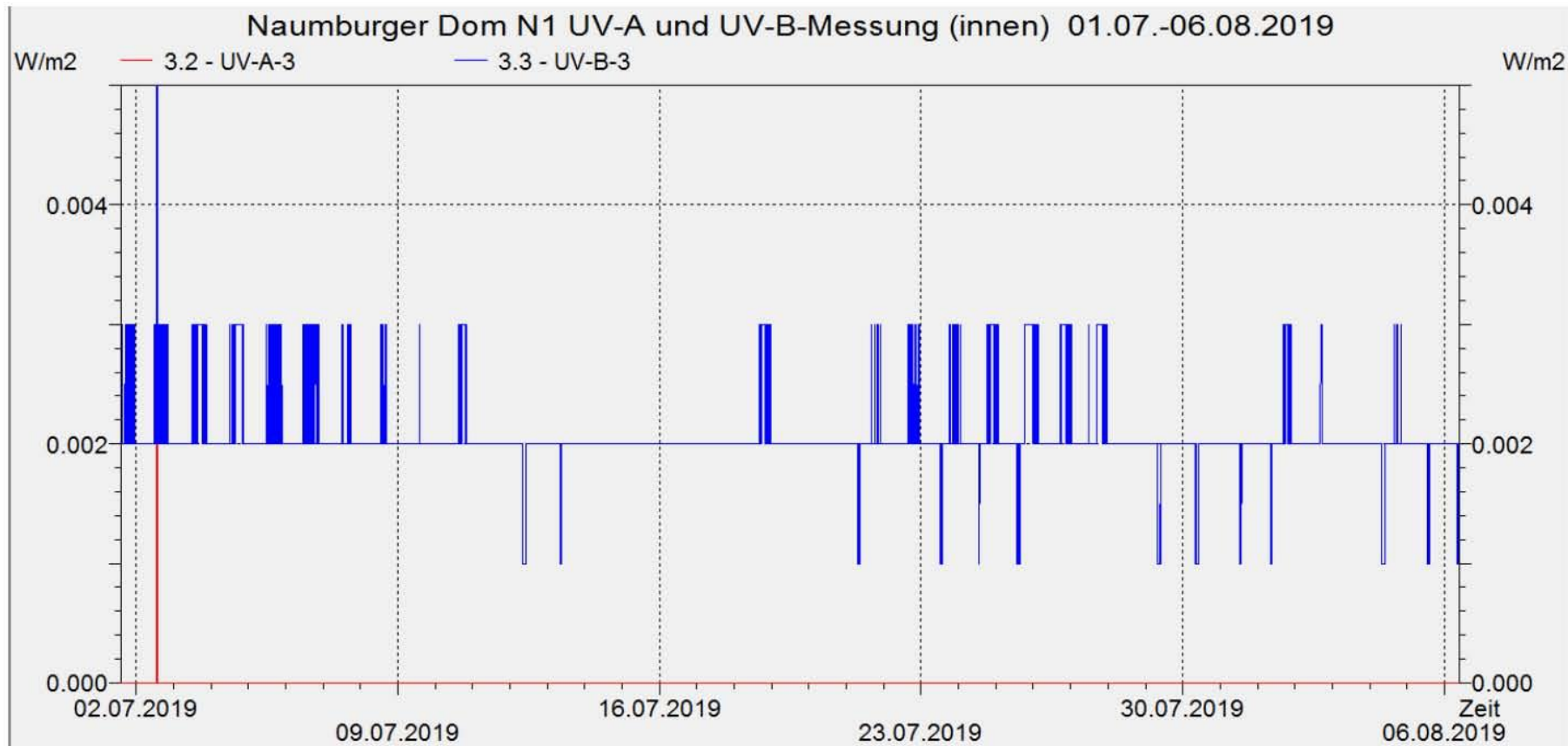
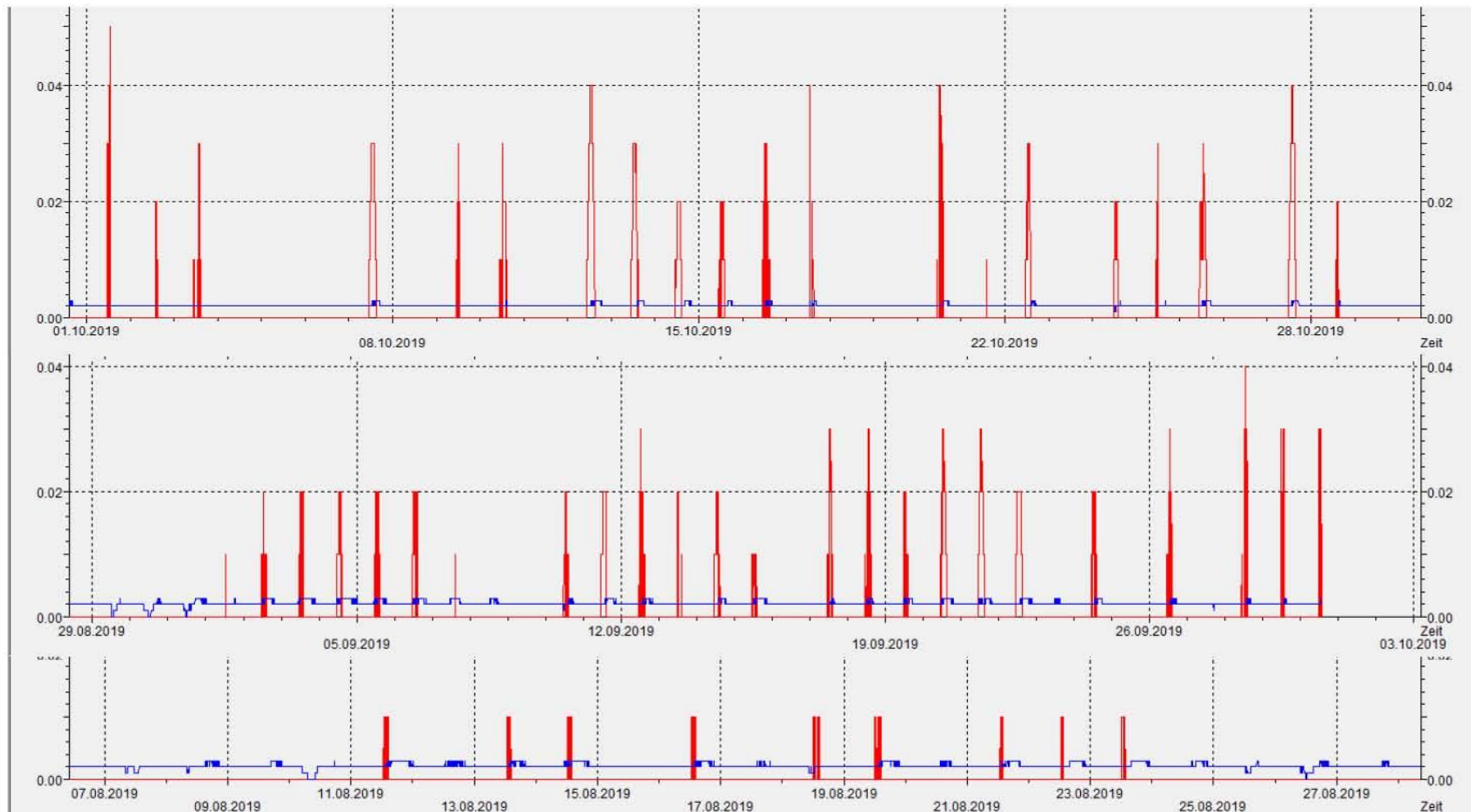


Abb. A6: Hinter der intakten Schutzverglasung wird in den Monaten Juni und Juli keine UV-A-Strahlung gemessen, der UV-B-Wert schwankt um 0,002 (kein echter Messwert – keine Veränderung in den folgenden Monaten). Am 02.07.2019 wurden die Innensensoren einem Funktionstest im Außenbereich unterzogen (Anstieg von UV-A und UV-B)

Abb. A7: Naumburger Dom N1 UV-A und UV-B Messungen im Innenbereich Pos. 3. In den Monaten August, September, Oktober wird ein zunehmender Anstieg der UV-Belastung hinter der Schutzverglasung aufgrund der Versprödung der Silikonabdichtung zur Scheibe und resultierendem Strahlungsdurchtritt an der Schutzverglasung vorbei registriert (rot UV-A, blau UV-B)



Anhang 2:

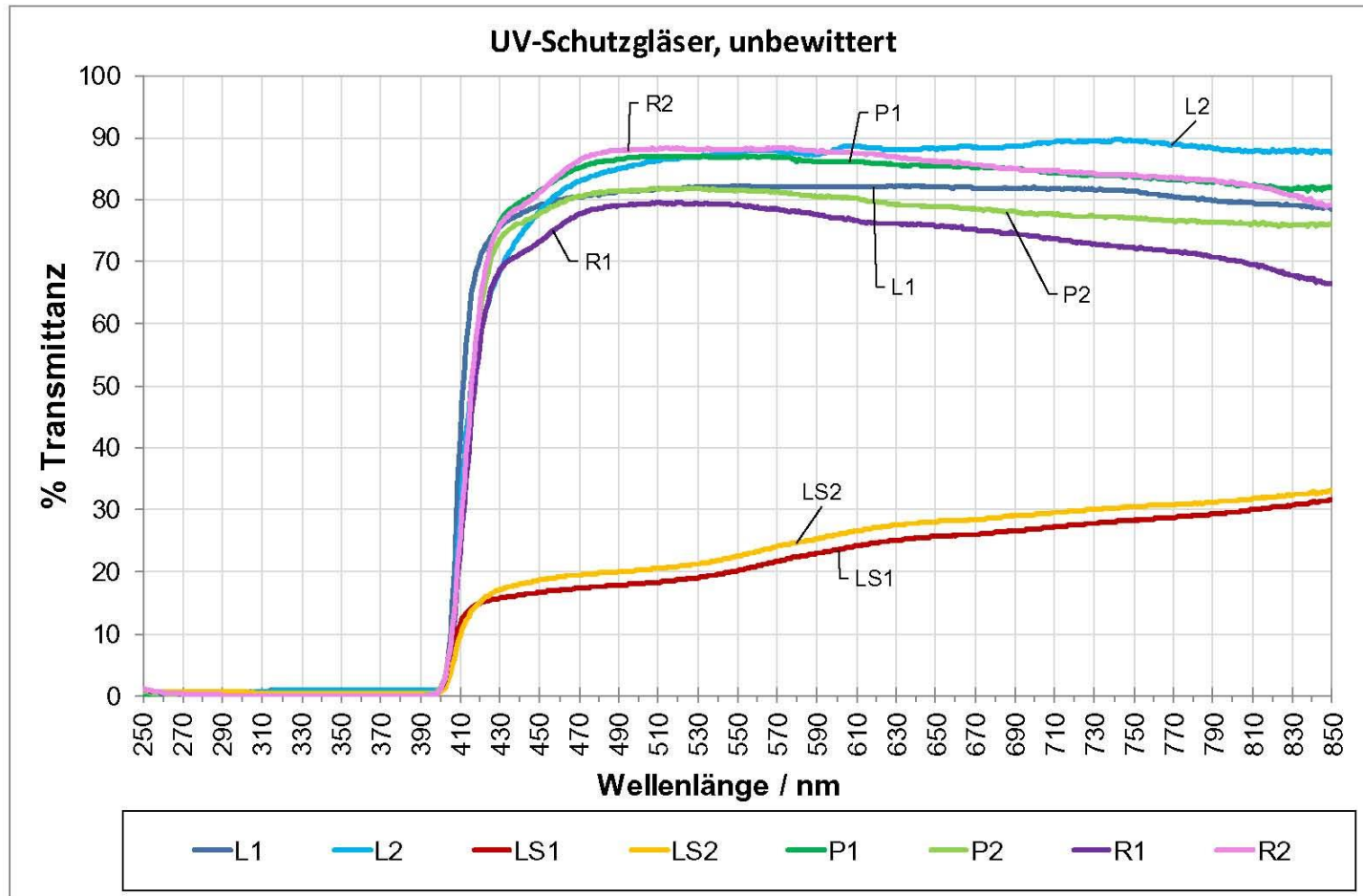


Abb. A8: Ausgangsspektren der UV-Schutzgläser für jeweils 2 Exemplare. Unterschiede der Exemplare durch leicht unterschiedliche Dicken von Glas und Schutzschicht.

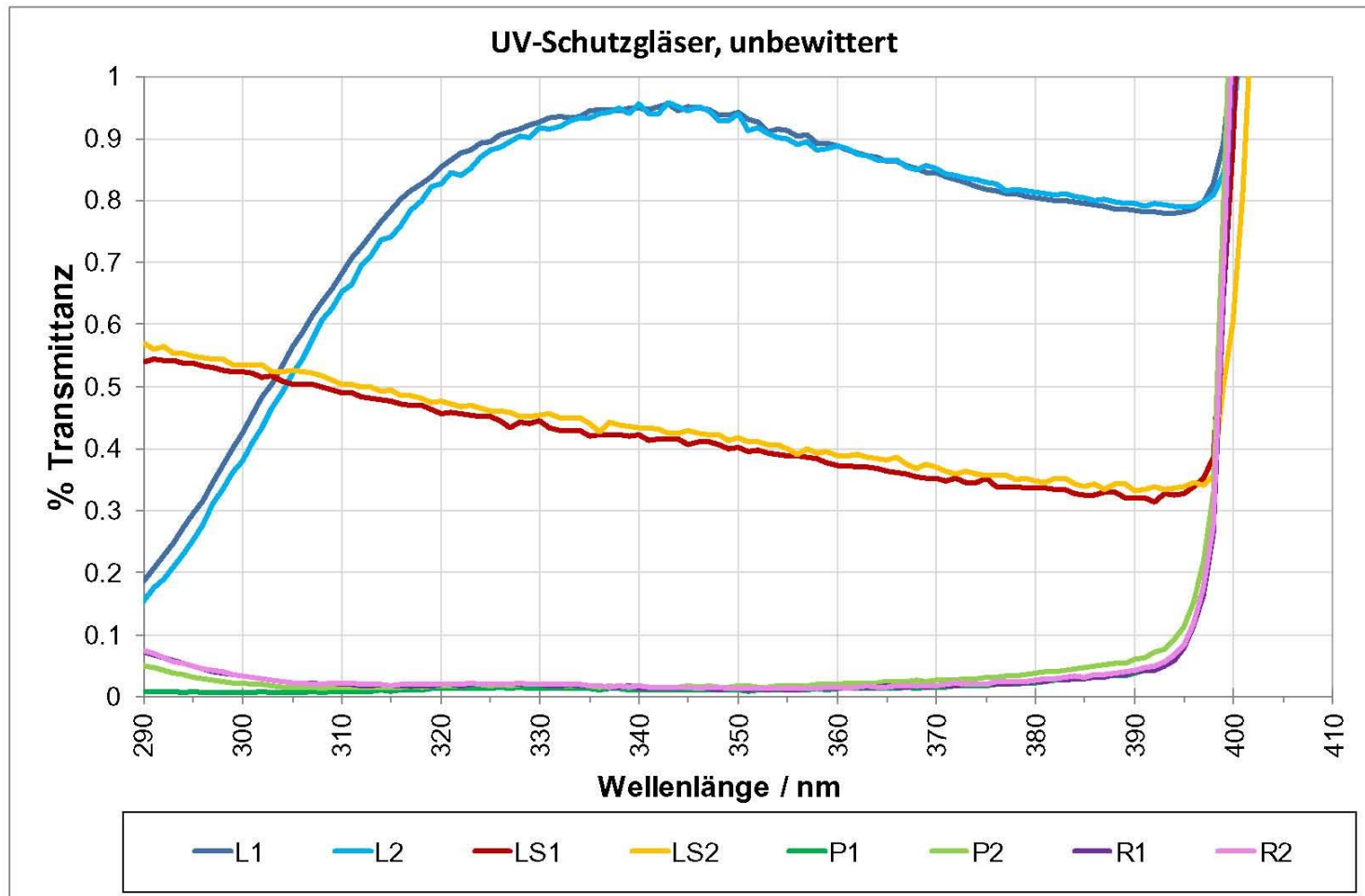


Abb. A9: Unterschiede zwischen den UV-Schutzgläsern im Bereich zwischen 0 und 1% Transmission

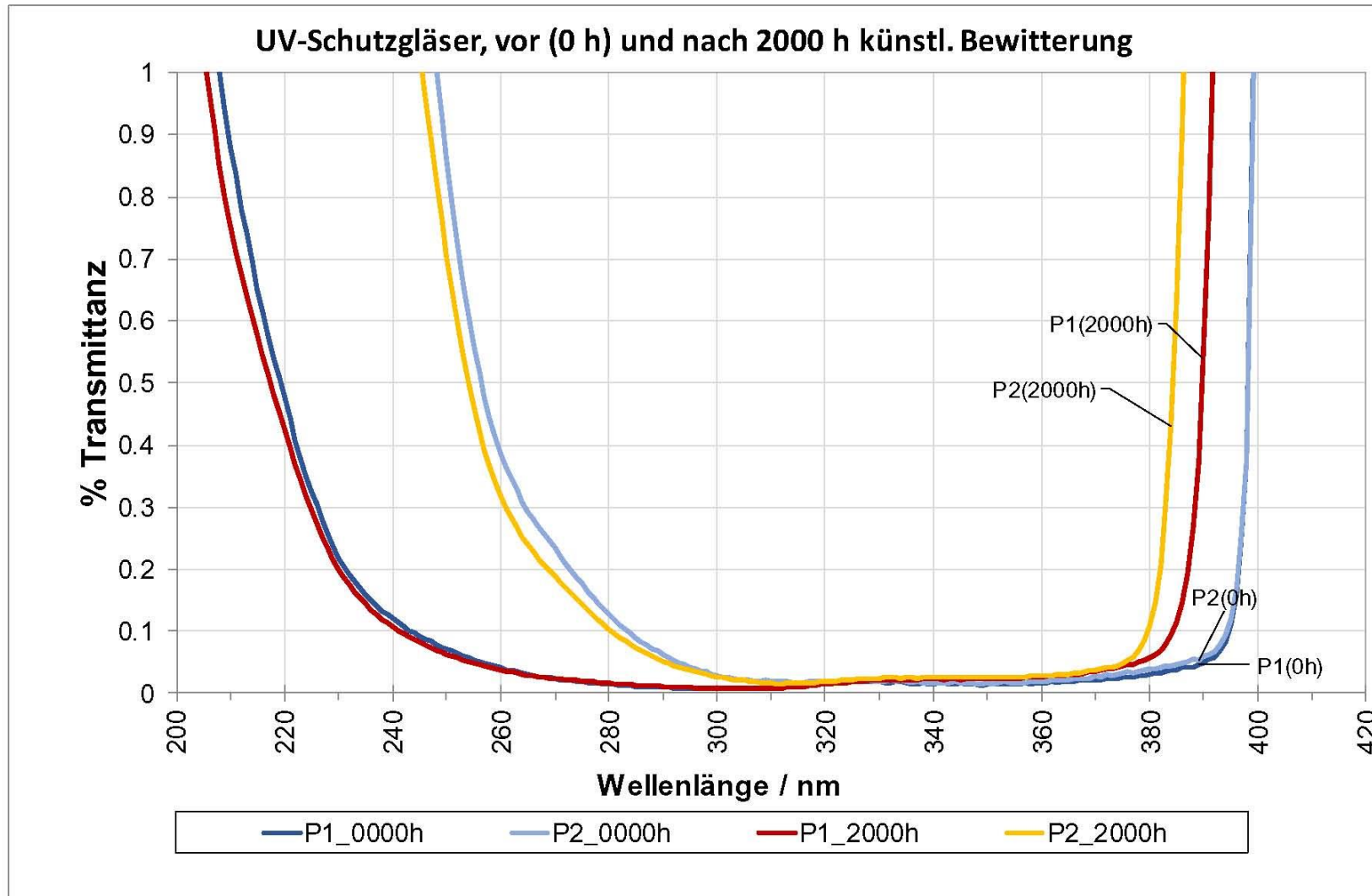


Abb. A10: Transmissionsspektren vor und nach künstlicher Bewitterung (Verschiebung der Absorptionskante von 400 nm nach 380 nm).

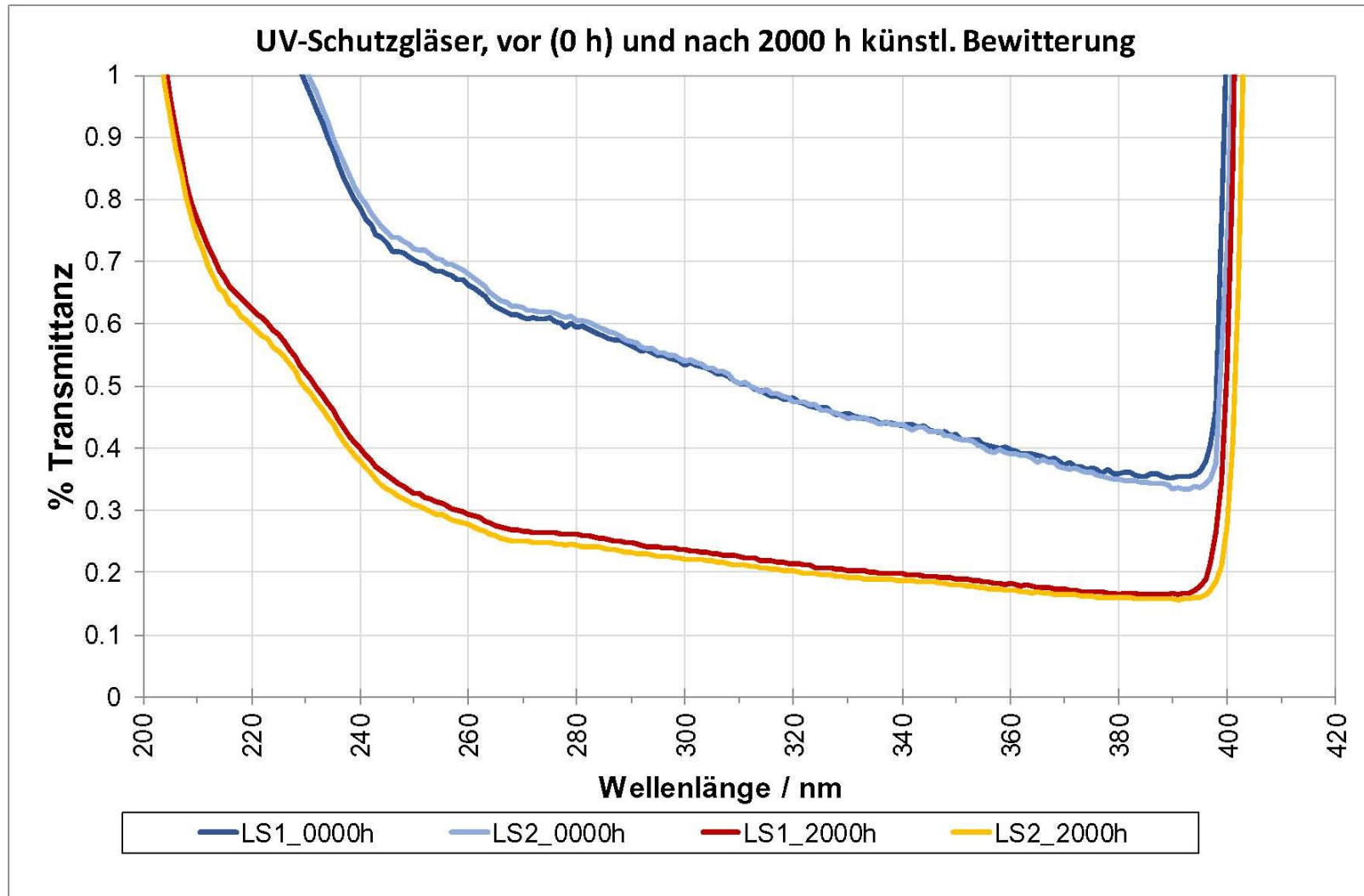


Abb. A11: Transmissionsspektren vor und nach künstlicher Bewitterung (Verringerung der Transmission von LS1, LS2)

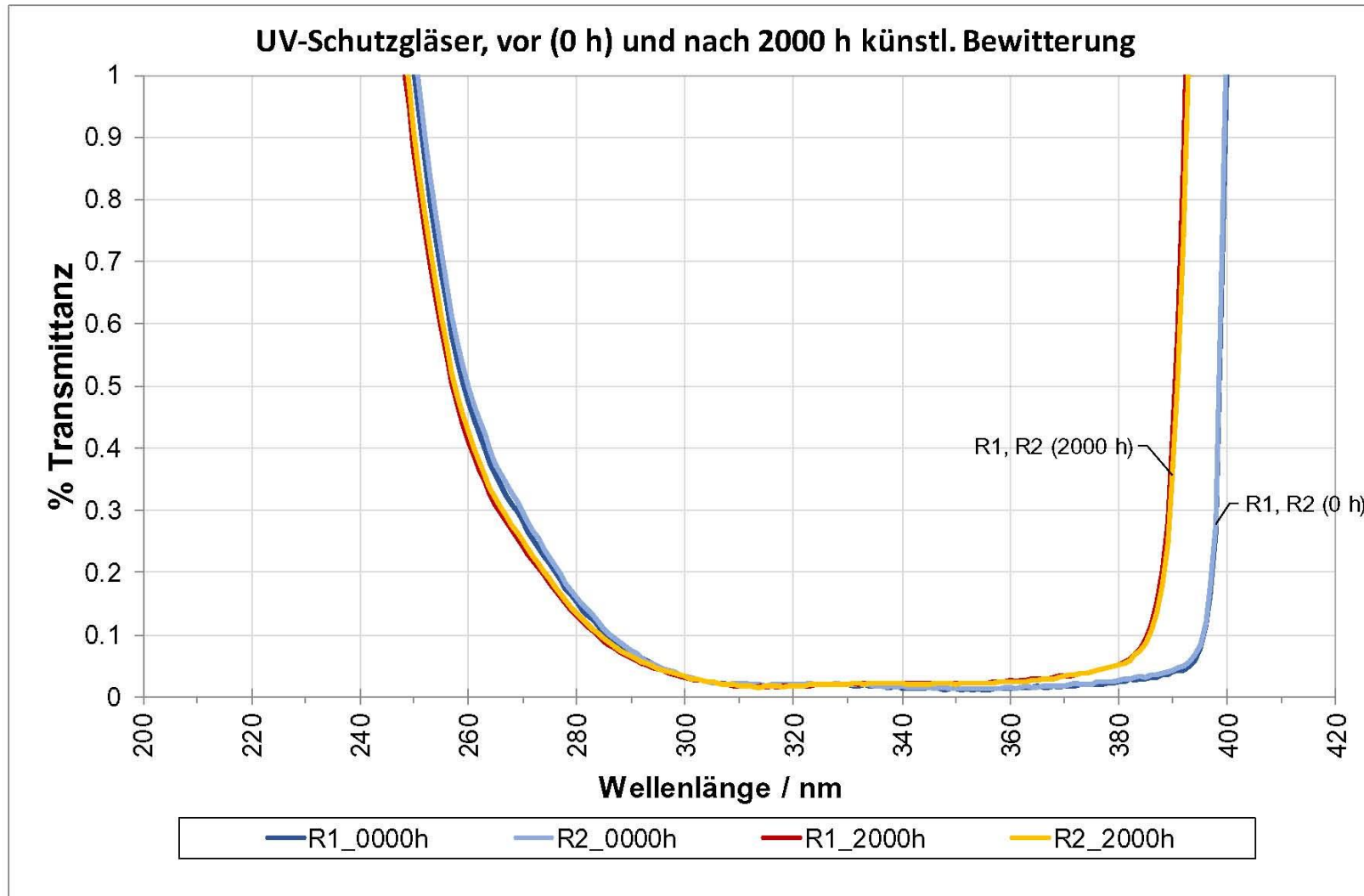


Abb. A12: Transmissionsspektren vor und nach künstlicher Bewitterung (Verschiebung der Absorptionskante von 400 nm nach 390 nm)

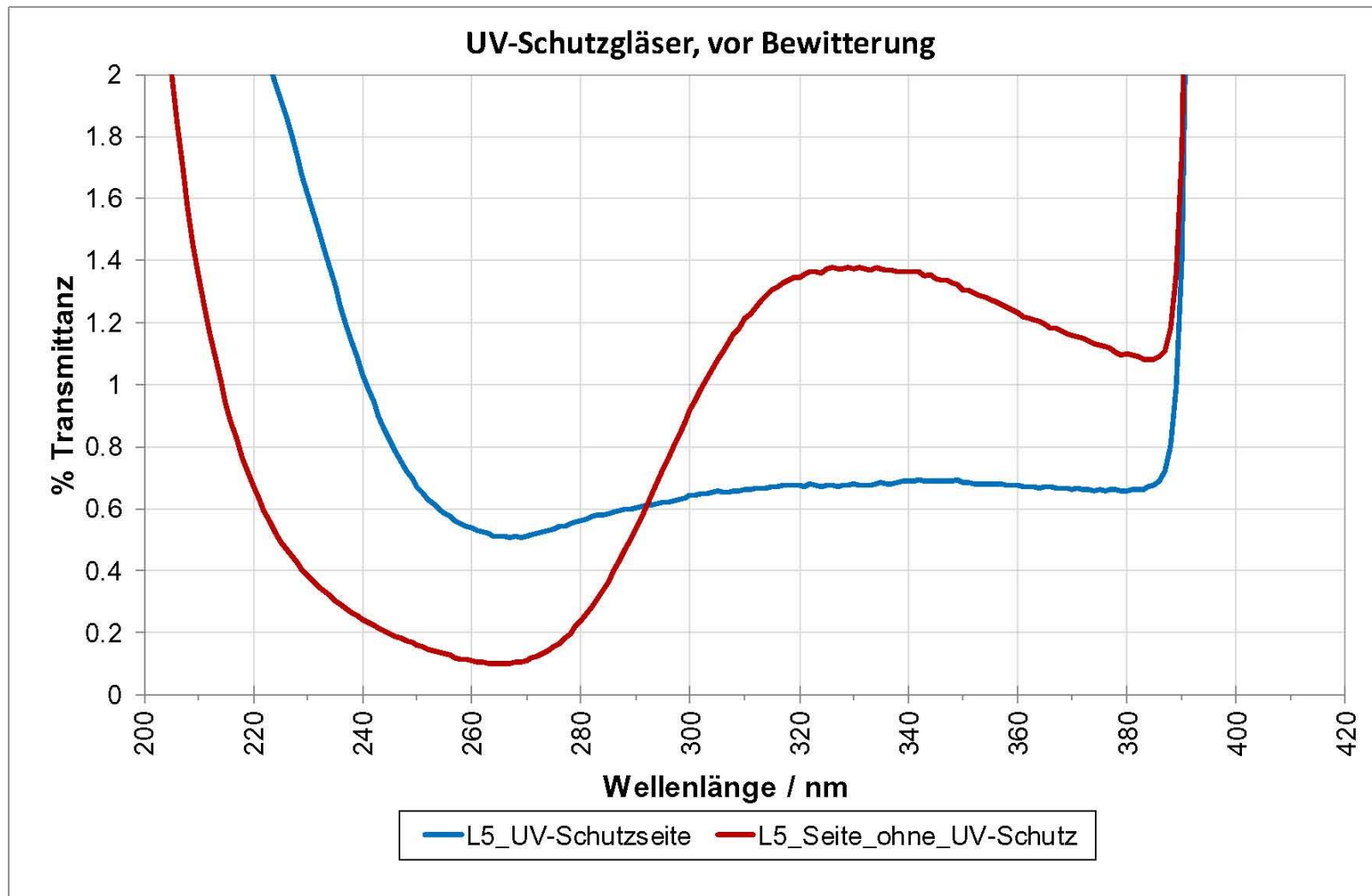


Abb. A13: Richtungsabhängigkeit der Transmission in Abhängigkeit von der Orientierung (UV-Schutzseite bzw. Seite ohne UV-Schutz) für die Gläser der L-Serie. Y-Achse auf Maximum 2 % skaliert. Andere Charge als L1, L2 mit Absorptionskante bei 390 nm im Ausgangszustand.

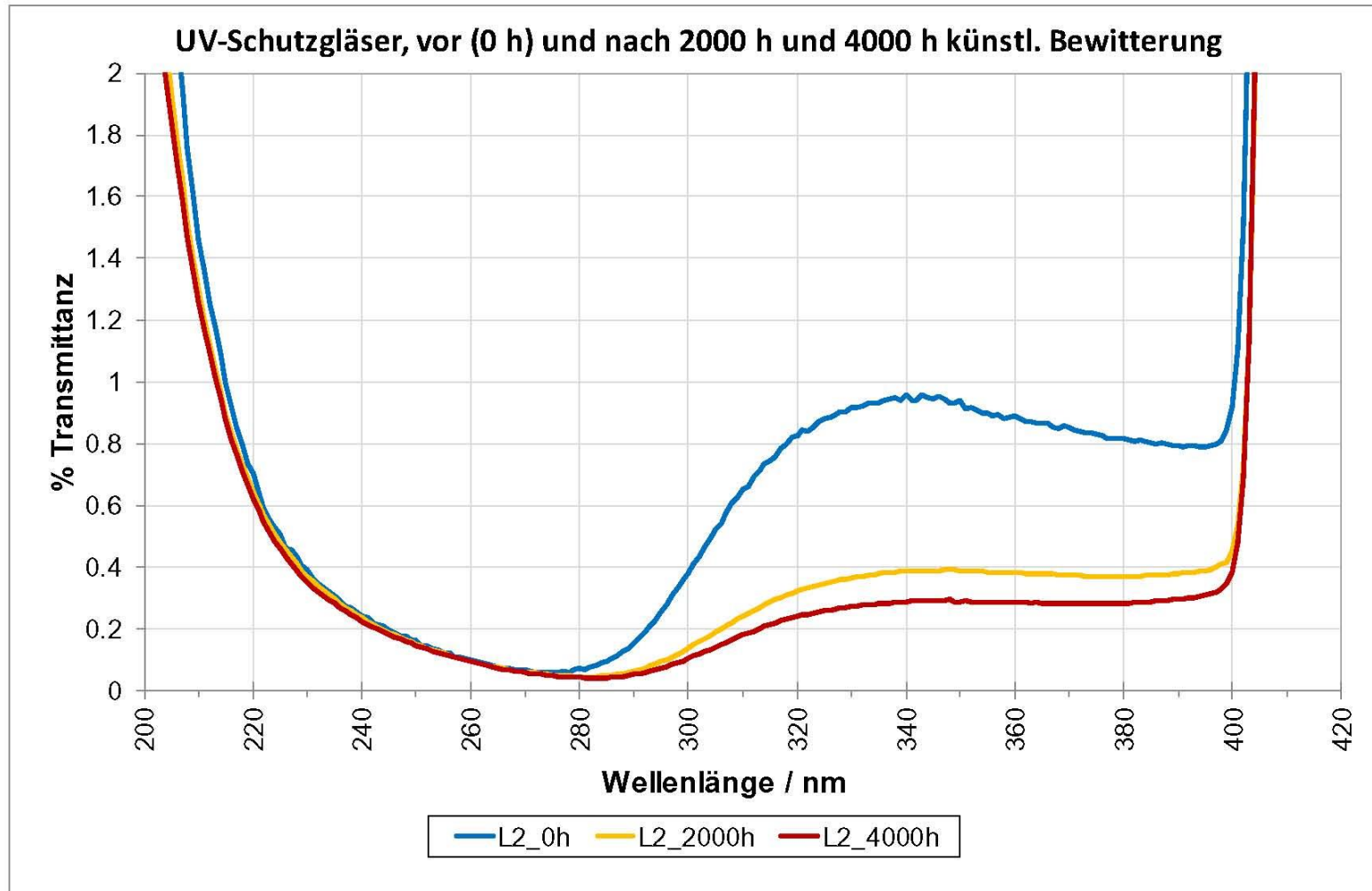


Abb. A14: Einfluss der Bewitterung für die Gläser der L-serie. Y-Achse auf Maximum 2 % skaliert (blau Seite ohne UV-Schutz)

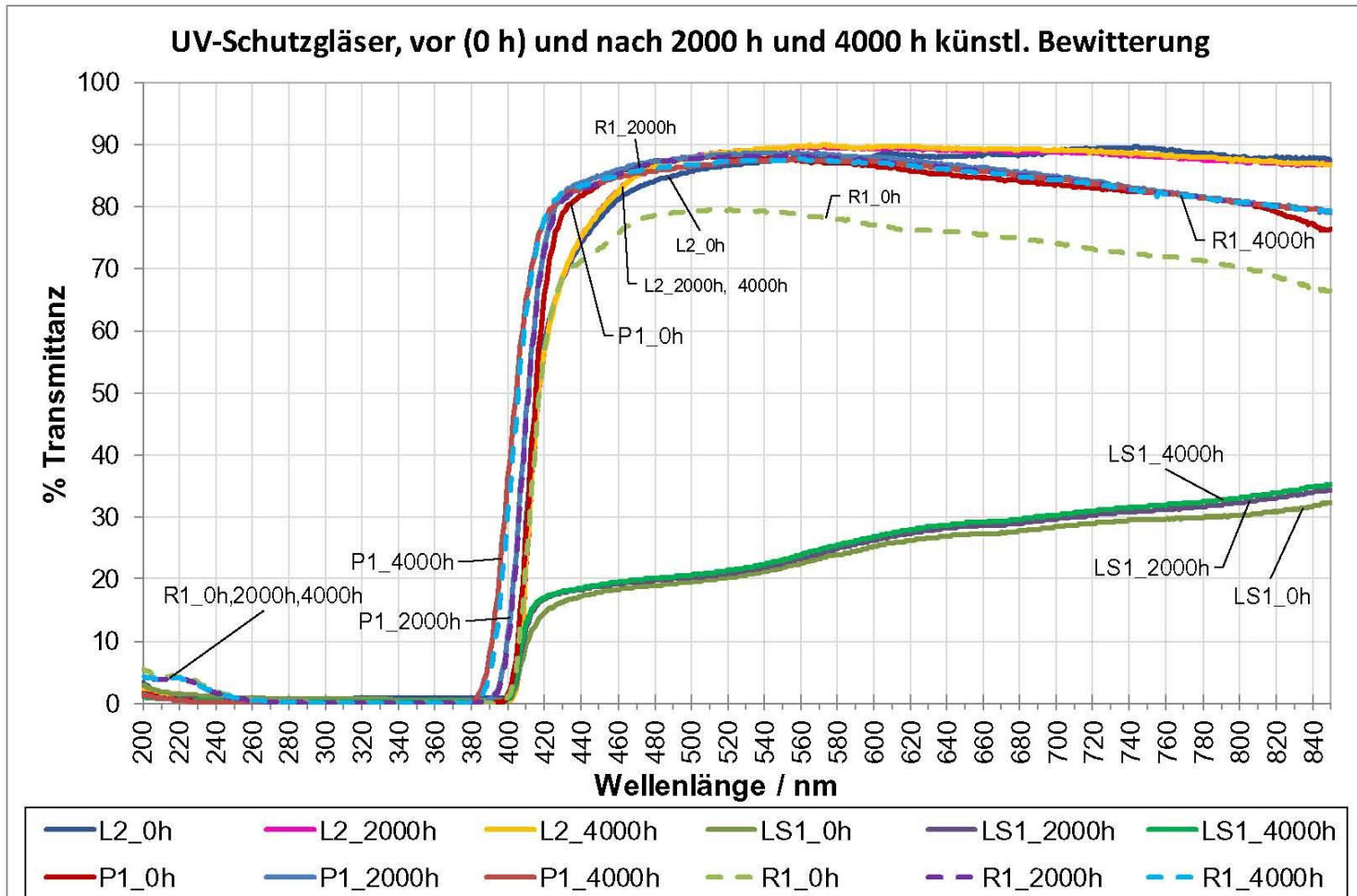


Abb. A15: Transmissionsspektren im Ausgangszustand, sowie nach 2000h und 4000h Bewitterung im Transmissionsbereich bis 100% für den UV-VIS Bereich.

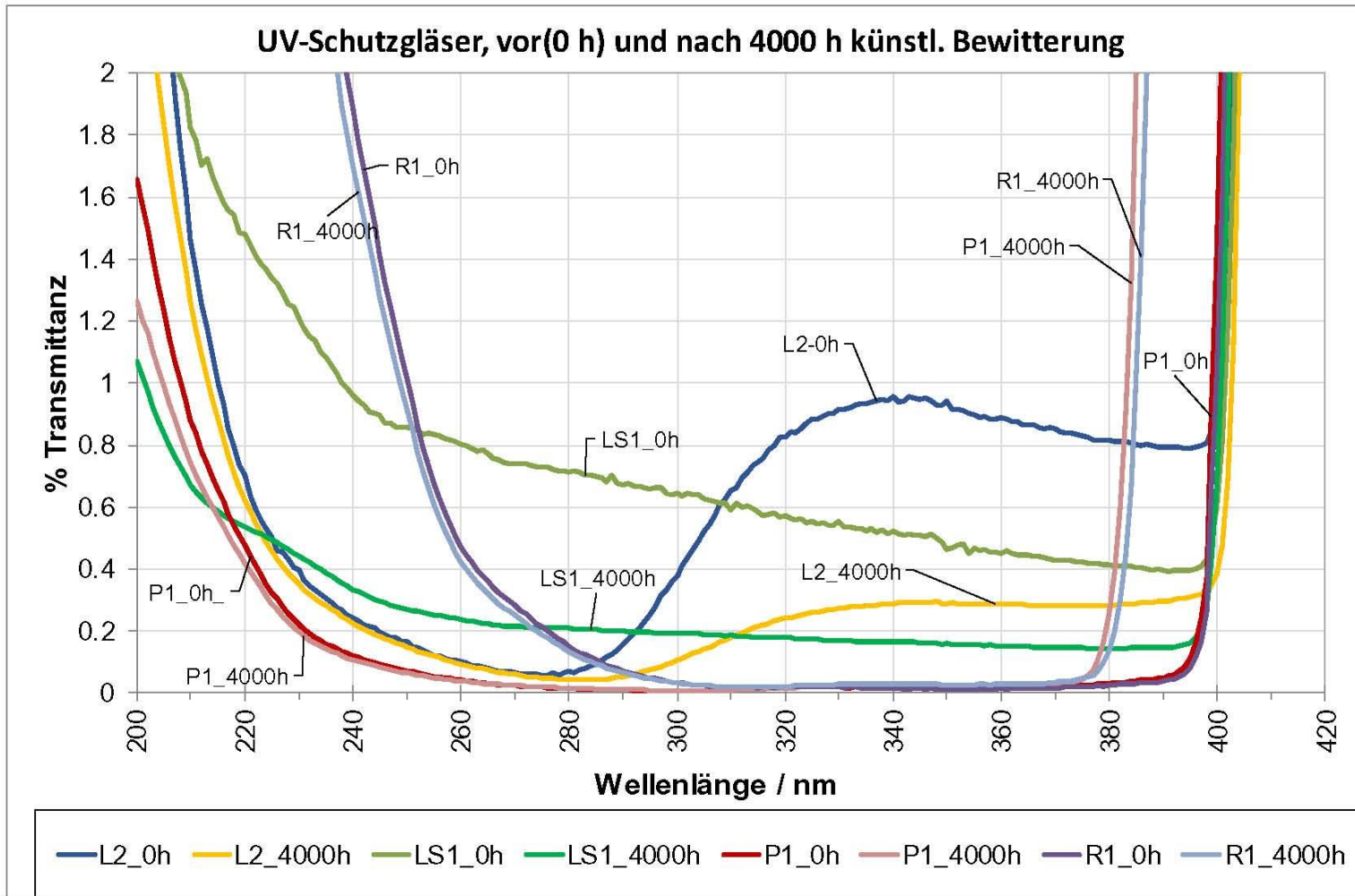


Abb. A16: Transmissionsspektren im Ausgangszustand und nach 4000h. Bewitterung im Transmissionsbereich bis 2%, sowie im UV-Bereich.

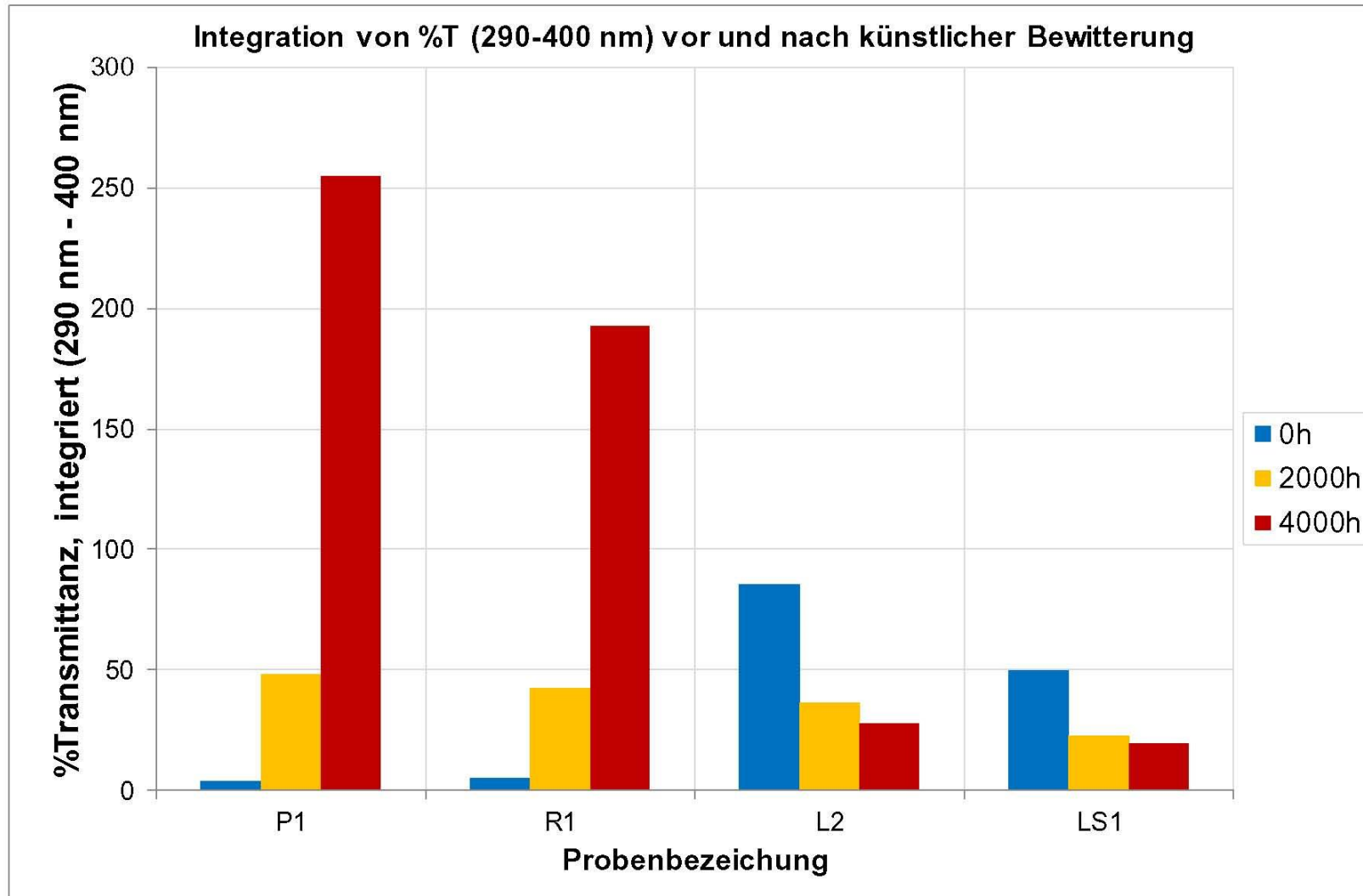


Abb. A17: Integrierte Transmittanz für den Wellenlängenbereich 290 nm bis 400 nm.

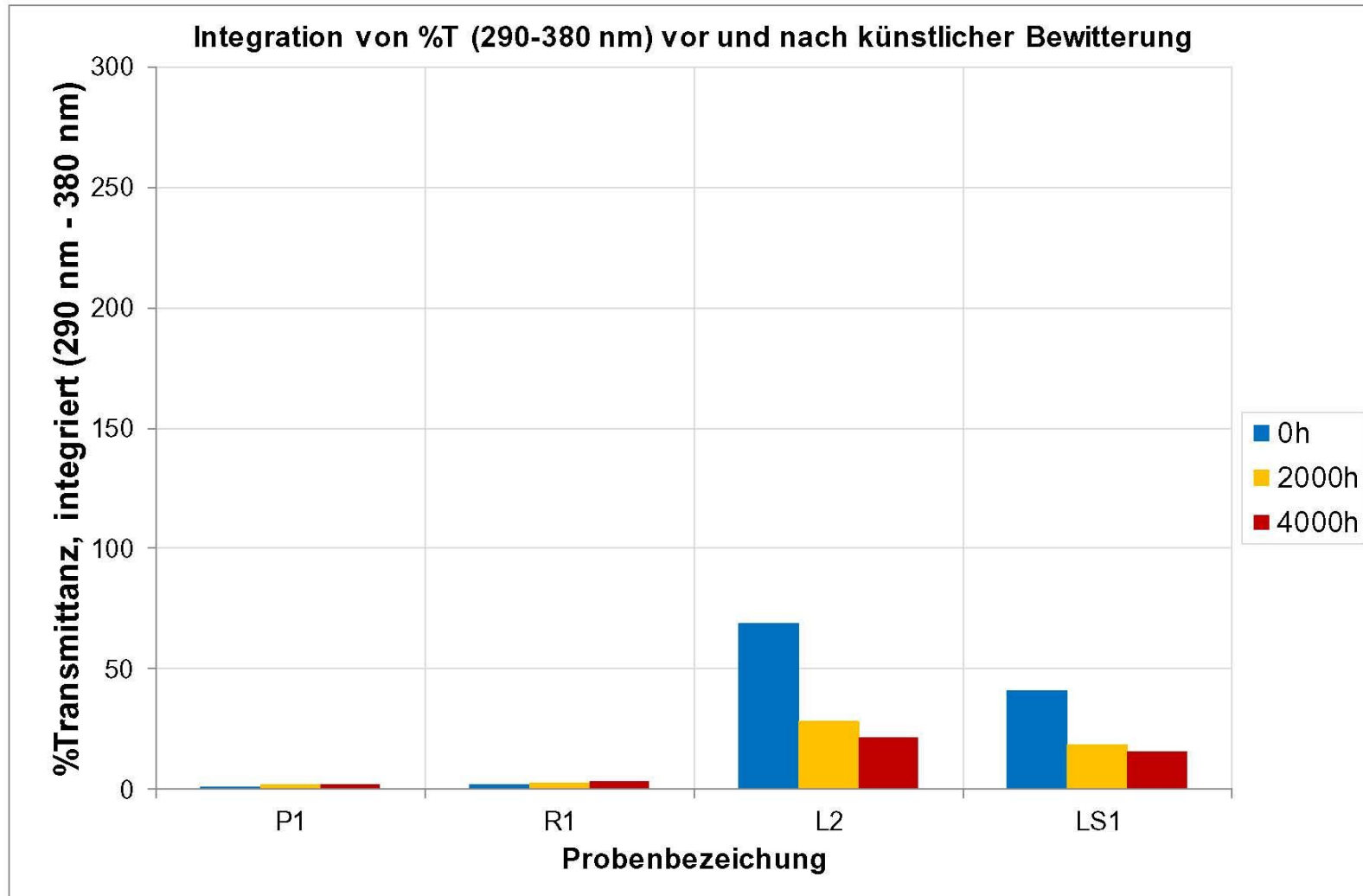


Abb. A18: Integrierte Transmittanz für den Wellenlängenbereich 290 nm bis 380 nm.