

# Abschlussbericht

des Forschungsvorhabens

**„Modellhafte Restaurierung und Schutz von  
schwer geschädigten Glasmalereien und  
Ornamentbleiverglasungen an bedeutenden  
sakralen Bauten in einer durch  
Umweltschadstoffe hoch belasteten  
Landschaftsregion Niederschlesiens“**

**Az. 30204 - 45**

September 2014



**BAM**

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

**Abschlussbericht**  
des Forschungsvorhabens

**„Modellhafte Restaurierung und Schutz von schwer geschädigten  
Glasmalereien und Ornamentbleiverglasungen an bedeutenden  
sakralen Bauten in einer durch Umweltschadstoffe hoch belasteten  
Landschaftsregion Niederschlesiens“**

Projektlaufzeit: 16.04.2012 – 31.08.2014

BAM-Vorhaben: 4210

Projektleiter (BAM): Dr.-Ing. Manfred Torge

Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurden gefördert von der  
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück  
Az. 30204 - 45



Inhaltsverzeichnis:	Seite
1. Konzept und Ziele des Projektes	1
2. Umweltfaktoren und Materialien	3
2.1. Schadstoffmessungen SO <sub>2</sub> /NO <sub>x</sub>	4
2.2. Glaszusammensetzungen	5
3. Einbau von Außenschutzverglasungen – Vergleich vorher/nachher	
3.1. Katholische Pfarrkirche Niedersteine	7
3.2. Katholische Pfarrkirche Waldenburg	14
3.3. Friedenskirche Jauer	21
4. Klimamessungen	
4.1. Messkonzept und –zeitraum	28
4.2. Messgeräte und Messfühler	28
4.3. Anordnung der Messtechnik	31
4.3.1. Niedersteine	32
4.3.2. Waldenburg	33
4.3.3. Jauer	35
4.4. Messergebnisse	
4.4.1. Niedersteine	37
4.4.1.1. Südseite (N1, N2) Fenster sV	37
4.4.1.2. Nordseite (N3), Fenster nV	50
4.4.2. Waldenburg	55
4.4.2.1. Fenster nXI, (W3)	55
4.4.2.2. Fenster nXII (W1, W2)	62
4.4.3. Jauer	
4.4.3.1. Fenster sII (J2)	71
4.4.3.2. Dachgeschoss und Holzbalken (J1)	78
5. Vergleich und Bewertung der Klimamessungen	
5.1. Klima und Außenschutzverglasung	83
5.2. Ergebnisse der Passivsammler	85
5.3. Ergebnisse der Glasdosimeterstudie	87
5.4. Klimatische Einflüsse auf Konstruktionshölzer im Dachgeschoss	89
5.5. Klimatische Einflüsse auf bemalte Holzvertäfelungen	90
6. Analytische Untersuchungen	
6.1. Untersuchungen zur Mazeration von Holzproben	92

6.2. Untersuchungen zur Staubbelastung im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung	93
7. Zusammenfassung	97
8. Anhang	
- Klimamonatsdiagramme	
- Programm Abschlusskolloquium Waldenburg	
9. Literaturverzeichnis	
10. Projektteam	

## 1. Konzept und Ziele des Projektes

Deutschland und Polen haben ein gemeinsames Kulturerbe zu bewahren. Es zu erhalten ist eine große Aufgabe. Dies gilt auch für die niederschlesische Region mit ihren bedeutenden, aber gleichzeitig durch Umweltschadstoffe stark gefährdeten Kunstdenkmälern. Die in der Region Waldenburg (Wałbrzych) mit dem nahen Niedersteine (Ścinawka Dolna) und in Jauer (Jawor) durch Schadstoffe besonders schwer belastete Umwelt hat über Jahrhunderte Bauwerke mit ihren wertvollen Ausstattungen geschädigt. Vor allem haben dort die gerade noch erhaltenen letzten Zeugnisse vollständiger Glasmalereizyklen aus der Tätigkeit bekannter deutscher Glasmalereiwerkstätten sehr ernst zu nehmende und ständig fortschreitende Schäden erlitten. Um solche unersetzlichen Verluste an wertvollem Kulturgut zu vermeiden, mussten Wege gefunden werden, sie nachhaltig für die Zukunft zu sanieren. Dazu gehören gezielt erstellte Modellprogramme, die durch sachgemäße naturwissenschaftliche Untersuchungen und beispielgebende praktische Ausführungen einen Anreiz zur Fortführung der begonnenen Sanierungsmaßnahmen geben. Das Projekt nimmt sich späthistorischen Glasmalereien in der Kath. Pfarrkirche des Hl. Jakobus d. Ä. in Niedersteine (Ścinawka Dolna), der Kath. Pfarrkirche zu den Schutzengeln im Stadtzentrum von Waldenburg (Wałbrzych) und der Friedenskirche in Jauer (Jawor) an. Die evangelische Friedenskirche in Jauer befindet sich seit 2001 auf der Welterbeliste der UNESCO und ist ein Beispiel des hoch entwickelten schlesischen Fachwerk- und Holzbaues aus dem 17. Jahrhundert. Während Außenschutzverglasungen zum Schutz von Glasmalereien in Fensteröffnungen aus Stein seit vielen Jahren Stand der Technik sind /1/, waren solche Konstruktionen in Holzkirchen bisher unbekannt. Sie stellen deshalb eine besondere Herausforderung dar. Eine Außenschutzverglasung wurde auch hier als zwingend notwendig angesehen, um die drei farbigen Ornamentfenster im Chorbereich vor Umwelteinflüssen und mechanischer Beschädigung zu schützen. Damit wird sowohl das empfindliche Schwarzlot vor Verlust geschützt als auch modellhaft zum ersten Mal eine Außenschutzverglasung an einer Holzkirche realisiert und mit Hilfe von Klimamessungen überprüft. Weitere Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit erfolgten im Dachgeschoss und an ausgewählten Holzbalken. In Jauer zeigen sich vereinzelt noch Schäden an Balken der Dachkonstruktion (Mazeration), die auf die Verwendung von Flammschutzmitteln in den 40-er Jahren des letzten Jahrhunderts zurückzuführen sind. Als Mazeration oder Holzkorrosion werden Auffaserungserscheinungen im oberflächennahen Bereich der Hölzer bezeichnet. Dieses Schadensbild ist vor allem an Konstruktionen zu beobachten, die intensiv oder mehrfach mit Feuerschutzmitteln behandelt wurden. Prognosen zum weiteren Schadensverlauf lassen sich aus dem Phosphat- und Sulfatgehalt des Holzes sowie aus vorherrschenden klimatischen Bedingungen insbesondere aus der

wechselnden Holzfeuchte ziehen. Daher sollte überprüft werden, ob eine Korrelation zwischen Umgebungs- und Holzfeuchte aus den Messungen abgeleitet werden kann.

Bereits in den Jahren 1996-1999 entwickelte sich eine Zusammenarbeit zwischen deutschen und polnischen Fachleuten, die sich in einem gemeinsamen Modellprojekt zur Restaurierung der historischen Farbfenster in der Waldenburger Kirche niederschlug. Innerhalb eines Verbundprojektes der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) wurden so elf figürlich gestaltete Fenster restauriert und mit Außenschutzverglasungen nach aktuellem Stand der Technik versehen /2/. Weitere Außenschutzverglasungen auf der Nord- und Südseite des Langhauses konnten im Verlauf der folgenden Jahre so fachgerecht unter Nutzung der Erfahrungen aus dem Modellprojekt installiert werden. Die beiden letzten noch nicht restaurierten Fenster nX und n XI des Langhauses boten somit innerhalb dieses Projektes die Möglichkeit von Schadstoff und Klimamessungen für die Evaluierung der modernen Außenschutzverglasung. Der direkte Vergleich der Schadstoff- und Klimasituation an den bereits geschützten und den noch ungeschützten Fenstern war eins der beiden Hauptziele. Das zweite bestand in der Vervollständigung des Schutzes und der Restaurierung der beiden noch ausstehenden Langhausfenster.

In der Pfarrkirche Niedersteine sind 26 große Fenster mit Glasmalereien in reicher farbiger Gestaltung durch figürliche und ornamentale Darstellungen gefüllt. Der einheitlich konzipierte Zyklus wurde von der „Königlich Bayerischen Hofglasmalerei Franz Xaver Zettler“ (1841-1916) hergestellt. Die Werkstatt zählt zu den bedeutendsten Anstalten im 19. und zu Beginn des 20. Jahrhunderts. Ihre Arbeiten stehen unter Denkmalschutz und zeichnen sich durch eine hohe Qualität aus. Das bis heute – wenn auch mit gravierenden Umweltschäden – noch vorhandene originale Gesamtensemble zählt zu den seltenen Fällen, in denen die ursprüngliche Bausubstanz und die herausragende Ausstattung aus der Zeit um 1900 noch nahezu vollständig bewahrt werden konnten. Ein solches Kleinod nachhaltig zu sanieren, ist eine wichtige Aufgabe. So sollten auch modellhaft ausgewählte Teile der Farbverglasung wiederhergestellt und durch eine isothermisch wirkende Schutzverglasung dauerhaft geschützt werden. Die materialtechnischen Gegebenheiten an den sehr wertvollen Fenstern der Niedersteiner Pfarrkirche sind für Glasmalereien dieser Entstehungsperiode eher ungewöhnlich. Sowohl im figürlichen Bereich als auch insbesondere an einzelnen ornamentalen Stellen vor allem der großen Querhausfenster hat sich noch eine reichhaltige Bemalung der Außenseite erhalten, die gegenwärtig durch ihre Exposition stark gefährdet ist. Ferner ist ein sich generell über alle malschichtfreien Flächen erstreckendes Irisieren der Gläser ein Beweis für die korrosive Umwandlung einer dünnen Oberflächenschicht des Glases. Mit Sicherheit ist auch hier die starke Umweltbelastung als Ursache der Schäden verantwortlich. Die deshalb vorgeschlagene modellhafte Installation einer Schutzverglasung sollte die sechs Fenster des Querhauses umfassen. Für die Verglasung ist dringend die

Verwendung von VSG zu empfehlen, um die Fenster gegen mechanische Beschädigungen zu schützen. Einzelne vorhandene Fehlstellen deuten bereits auf entsprechende Unfälle infolge leichter Zugänglichkeit hin.

Naturwissenschaftliche Untersuchungen als unmittelbare Begleitung der von der polnischen Fachwerkstatt Witraxe-Beata Oleszczuk aus Breslau auszuführenden Restaurierung sind in allen drei durch Umwelteinflüsse geschädigten Objekten notwendig. Sie betreffen sowohl die Auswahl unbedenklicher und langzeitbeständiger Restaurierungsmaterialien als auch die Auswahl von geeigneten Schutzsystemen zur langfristigen Vermeidung von Korrosionsschäden insbesondere an den empfindlichen Glasmalereien unter der immer noch sehr starken Umweltbelastung anthropogenen Ursprungs in der unmittelbaren Umgebung der Objekte in Niederschlesien. Die fachgerechte Restaurierung der historistischen Glasmalereien und der Einbau einer Außenschutzverglasung erfolgte mit dem Ziel, eine Abdichtung des Kirchenraumes gegen eine zeitweilig zu feuchte und mit Schadstoffen angereicherte Außenluft zu erreichen. Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen wurde anhand von Schadstoff- und Klimamessungen im Verlauf des Projektes durch die Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung untersucht. Das Projekt begann mit der Bewilligung durch die DBU am 16.04.2012 nach einer über mehrere Monate andauernden Vorbereitungsphase mit fachlichen Vorgesprächen zwischen Deutsch-Polnischer Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz, der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung und den externen Gutachtern. Bei gemeinsamen Vorortterminen in Niedersteine, Waldenburg und Jauer konnten die zu restaurierenden Glasmalereien vor dem Ausbau vom Gerüst aus in Augenschein genommen und die Möglichkeiten für die neu zu installierenden Außenschutzverglasung geprüft werden. Technische Fragen zur Installation der Messtechnik wurden geklärt und die Genehmigung der Eigentümer und der zuständigen Denkmalbehörden zu den Maßnahmen eingeholt.

## **2. Umweltfaktoren und Materialien**

Aus dem Langzeitkorrosionsverlauf an historischen Glasmalereien lassen sich grundlegende Schlüsse zu den Ursachen und Wirkungsmechanismen ziehen /3, 4/. Bei mittelalterlichen Glasmalereien ist die sensible Glassubstanz selbst betroffen, bei den stabileren Gläsern des 19. Jahrhunderts verlieren vor allem die Malschichten die Haftung auf der Glasoberfläche. Beide Korrosionsvorgänge sind Zerfallsprozesse der Kunstwerke.

Seit Jahrzehnten werden die Zusammenhänge erforscht. Aus der Tatsache, dass vor Beginn des Industriezeitalters selbst an mittelalterlichen Fenstern vergleichsweise wenig Veränderungen auftraten und seit den letzten Jahrzehnten des 19. Jahrhunderts eine

dramatische Zunahme des Zerfalls zu verzeichnen war, ließ sich schließen und später wissenschaftlich nachweisen, dass ein Zusammenwirken hoher Luftfeuchte bzw. auf der Oberfläche kondensierten Wassers mit emittierten Schadstoffen aus den Industrieschornsteinen für die Schäden verantwortlich ist. Seit Jahren gelten als entscheidende Wirkungskomponenten vor allem gasförmige Emissionen wie  $\text{SO}_2$  und  $\text{NO}_x$ .

## 2.1. Schadstoffmessungen $\text{SO}_2/\text{NO}_x$

Die Schadstoffbelastung wurde an allen drei Kirchen mit Hilfe von Passivsammlern der Firma passam ag, Schweiz bestimmt /5/. Die Passivsammler wurden im Zeitraum von Dezember 2012 bis Januar 2013 für vier Wochen im unmittelbaren Außenbereich (P4) der zu restaurierenden Fenster exponiert. Die Messung ist repräsentativ nur für den unmittelbaren Messort.

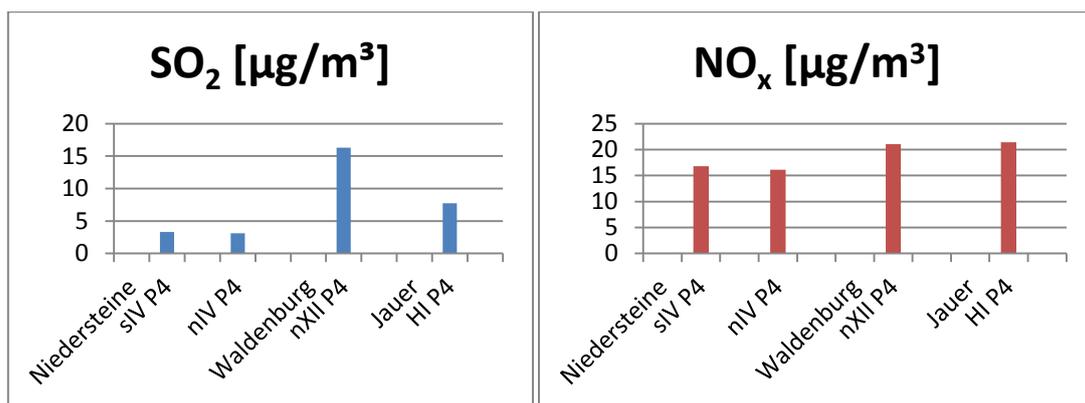


Bild 1, 2: Schadstoffbelastung im Messzeitraum vom 11.12.201-10.01.2013, Mittelwert aus 2 Passivsammlern je Messort.

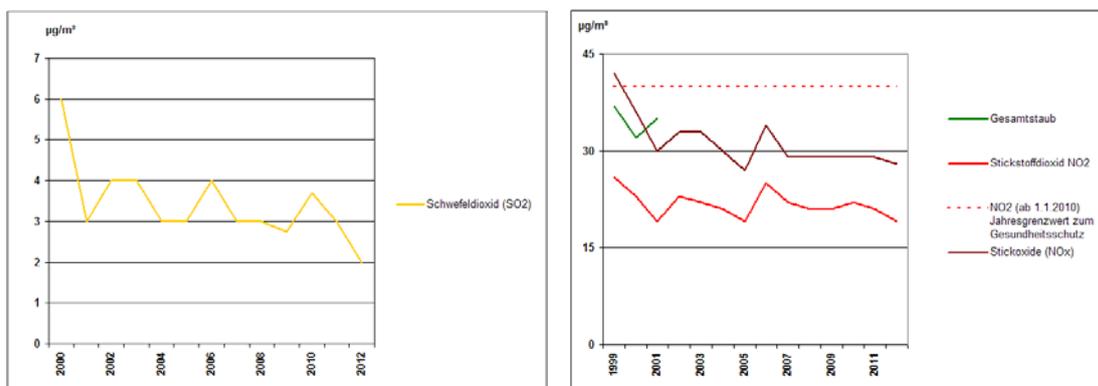


Bild 3, 4: Messdaten für Berlin Lichtenberg, städtisches Wohngebiet (BLUME-Messnetz, Messkontainer 282 /6/

Die Messwerte zeigen deutliche Unterschiede in der SO<sub>2</sub>-Belastung zwischen der Industriestadt Waldenburg und einer eher ländlich geprägten Gegend in Niedersteine und Jauer. In den Werten der NO<sub>x</sub>-Belastung sind diese Unterschiede weniger stark ausgeprägt. Im Vergleich dazu sind die Verläufe der SO<sub>2</sub>- und NO<sub>x</sub>-Konzentration der letzten Jahre für eine Messstelle in Berlin Lichtenberg grafisch dargestellt (Bild 3, 4).

Die höhere SO<sub>2</sub>-Belastung im städtischen Bereich in Polen führt insbesondere in Kombination mit Niederschlägen zu saurem Regen, der ungeschützte Glasmalereien schädigen kann.

## 2.2. Glaszusammensetzungen

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Gläser erfolgte in einem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM). Dazu mussten die Glasproben an einer Kante angeschliffenen, poliert und mit Kohlenstoff leitfähig beschichtet werden. Zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung steht an dem Gerät ein EDX-Spektrometer der Firma EDAX zur Verfügung. Die EDX-Untersuchungen wurden im Hochvakuum Modus des Mikroskops (FEI XL 30) vorgenommen. Die quantitative Analyse erfolgte standardfrei und die Ergebnisse sind auf 100% normiert.

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung von Glasproben aus Niedersteine, Waldenburg und Jauer

Nr.	Herkunft	Farbe	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SO <sub>3</sub>	CuO	MnO	Cl
N1	K-glas*	farblos	75,9	15,0	3,8	5,3		-	-	-	-	-
N2	sV 1	gelb	74,9	17,6	-	7,5	-	-	-	-	-	-
N3	nV 1	gelb	75,5	16,7	-	7,8	-	-	-	-	-	-
W1	nX1a	gelb	72,2	17,6	-	10,2	-	-	-	-	-	-
W2	nX7a	rot	74,5	12,0	-	12,5	-	1,0	-	-	-	-
W3	nX10b	gelb	72,7	16,0	-	11,2	-	-	-	-	-	-
W4	nX13a	blau	71,8	17,2	-	7,2	-	-	1,1	2,7	-	-
W5	nX12b	farblos	72,2	16,0	-	8,4	-	0,8	0,9	-	1,7	-
W6	nX6a	braun	73,0	16,3	-	10,7	-	-	-	-	-	-
J1	l1b	gelb	73,4	16,5	2,3	5,6	-	1,3	-	-	-	0,8
J2	sll5c	gelb	71,8	10,7	0,8	10,6	0,3	3,3	0,9	-	1,6	-
J3	nll3c	farblos Butze	74,7	15,3	-	10,0	-	-	-	-	-	-

\*neues Kathedralglas

Alle analysierten Gläser aus den drei Kirchen Niedersteine, Waldenburg und Jauer zeigen eine für die Herstellungsepoche typische chemische Zusammensetzung und lassen sich dem Soda-Kalk-Glas -Typ zuordnen. Die Hauptkomponenten sind Natriumoxid, Calciumoxid und Siliziumdioxid. Die Farbkomponente im blauen Glas W4 ist Kupferoxid. Manganoxid wurde vermutlich zur Entfärbung („Glasmacherseife“) eingesetzt. Geringe Gehalte an Aluminiumoxid können die chemische Beständigkeit der Gläser erhöhen, während Anteile an Kaliumoxid die Beständigkeit verringern. Bei einem Gehalt an Calciumoxid um 5 % (N1, J1) bzw. darunter, besteht die Gefahr, dass diese Gläser bei ungünstigen Umweltbedingungen auch Craqueléerscheinungen, d.h. ein Netzwerk von feinen Rissen, ausbilden können /3/.

Der Vergleich dieser Analysenergebnisse mit denen einer eignen Datenbank, die Analysen von mehr als 200 Gläsern von Ende des 19. bis Anfang des 20. Jahrhunderts enthält, lässt auf Ähnlichkeiten in der chemischen Zusammensetzung mit Gläsern aus der Nikolaikirche in Quedlinburg, dem Havelberger Dom, der Marienkirche in Rostock, der St. Gotthardt Kirche in Brandenburg u.a. schließen.

In all diesen Objekten sind auch Glasmalereien des 19. Jahrhunderts mit Außenschutzverglasungen vor schädlichen Umwelteinwirkungen geschützt worden /7, 8, 9/.

Obwohl ihre Glaszusammensetzung als relativ stabil zumindest im Vergleich zu mittelalterlichen Gläsern angesehen werden kann, ist ein Irisieren von malschichtfreien Glasoberflächen, wie sie in Niedersteine beobachtet wurde, bereits ein Anzeichen für die korrosive Umwandlung einer dünnen Oberflächenschicht. Glasmalereien des 20. Jahrhunderts sind durch anthropogene Umwelteinflüsse ebenso gefährdet wie mittelalterliche Glasmalereien. Zwar sind moderne Gläser aufgrund ihrer Zusammensetzung längst nicht mehr so empfindlich wie die mittelalterlichen, dennoch zeigen Glasgemälde, die noch nicht einmal 80 Jahre alt sind, häufig Schäden an der Bemalung, die bis hin zum Verlust der Malschichten führen können /10/. Daher müssen auch die Umgebungsbedingungen für diese Glasmalereien so gestaltet werden, dass ein bestmöglicher Schutz über eine lange Zeit gewährleistet ist.

### 3. Einbau von Außenschutzverglasungen – Vergleich vorher/nachher

#### 3.1. Katholische Pfarrkirche Niedersteine

Die Katholische Pfarrkirche in Niedersteine wurde in den Jahren 1900-1903 errichtet. Die Glasmalereien stammen ebenfalls aus dieser Zeit und wurden von der „Königlich Bayerischen Hofglasmalerei Franz Xaver Zettler“ hergestellt.



Bild 1: Katholische Pfarrkirche des Hl. Jacobus d. Ä. in Niedersteine

In der Pfarrkirche Niedersteine sollten jeweils drei Querhausfenster auf der Nord- und der Südseite ausgebaut, in der polnischen Glaswerkstatt Beata Oleszczuk - Breslau restauriert werden und eine Schutzverglasung erhalten. Auf Grund der geringen Höhe der Fenster und der damit gegebenen Gefährdung gegen mechanische Beschädigung wurde als Material für die Schutzverglasung Verbundsicherheitsglas (VSG) verwendet.

Als Form für die Schutzverglasung in den ornamentalen Bereichen der Fenster war eine Rechteck- und in den figürlichen eine grobe Umrissverbleiung vorgesehen. Wegen der ungewöhnlichen Größe der Glasmalereifelder wurde die Konstruktion der Schutzverglasung und der Aufhängung der Originale dahingehend abgewandelt, dass statt der üblichen zwei Schekelhalterungen pro Feldbreite vier vorgesehen wurden. Alle Entscheidungen über die Restaurierungsmaßnahmen einschließlich der Einzelheiten zur Schutzverglasung wurden

vom Projektteam in mehreren Arbeitstreffen in der Werkstatt Oleszczuk diskutiert, festgelegt, in Protokollen dokumentiert und sind Bestandteil der Restaurierungsdokumentation /11/.



Bild 2: Eigentümer, Restaurator und Projektteam bei Maßnahmebesprechung vor Ort

Das Projekt in Niedersteine begann mit dem Ausbau der Glasmalereien am 13.08.2012. Die Abnahme der eingebauten Schutzverglasung erfolgte am 29.11.2012. Die Konservierung der Glasmalereien und deren Einbau einschließlich der Schutzverglasung in die Fenster des Querhauses der Kirche (im Norden: nIV, nV, nVI; im Süden: sIV, sV, sVI) wurde entsprechend der denkmalbehördlichen Genehmigung ausgeführt und von den Gutachtern und Vertretern des Amtes für Denkmalschutz und Denkmalerhaltung der Woiwodschaft Niederschlesien am 12.12.2012 abgenommen /12/. Der Abstand zwischen Außenschutzverglasung und Original beträgt 7 cm. An den Rändern der Originalverglasung sind Bleilappen angebracht, um seitlichen Lichteinfall zu verhindern. Der Spalt zwischen Bleilappen und Fensteröffnung (oben) hat eine Breite von ca. 1 cm. Die Bleilappen wurden nach außen gebogen, so dass sie an der Außenwand anliegen und die Seitengewände somit in ihrer ganzen Tiefe sichtbar bleiben.

Aufgrund von ablaufendem Kondenswasser auf der Innenseite der Außenschutzverglasung wurde der Einbau von Kondenswasserauffangrinnen beschlossen. Die Kondenswasserrinnen wurden aus Kupferblech mit einer Breite von ca. 6 cm und eine Höhe von ca. 4 cm hergestellt. Zum Einbau der Kondenswasserrinnen mussten die untersten Bleilappen aufgebogen werden. Die Kondenswasserrinnen wurden auf die vier am Gesims befestigten Halterungen aufgesetzt und mit Silikon an der Außenschutzverglasung

abgedichtet. Auf einen Ablauf nach außen sollte zunächst verzichtet werden, da davon auszugehen ist, dass das Kondenswasser verdunstet. Die Lufteintrittsöffnung an der Außenschutzverglasung unten beträgt ca. 1-2 cm. Details zur Konstruktion und zum Halterungssystem der Außenschutzverglasung befinden sich in der Restaurierungsdokumentation /11/.

Die nachfolgenden Bilder zeigen den Zustand beispielhaft ausgewählter Glassegmente und Fenster vor und nach der Restaurierung sowie die installierte Schutzverglasung.



Bild 2: Außenansicht mit Drahtgitter als Schutz an den Fenstern nIV, nV und nVI



Bilder 4, 5: Schäden an Gläsern - irisierende Oberflächen außen



Bild 6: Malschichtverluste innen (rechts)



Bild 7: Glasbrüche



Bild 8: Glasschäden infolge äußerer Einflüsse (Durchschuss)



Bild 9: Verluste im Bereich des roten Übergangsglases



Bild 10: Fenster sIV, sV und sVI nach der Restaurierung



Bild 11: Außenschutzverglasung an den Fenstern sIV, sV und sVI



Bild 12: Fenster nIV, nV und nVI nach der Restaurierung



Bild 13: Außenschutzverglasung an den Fenstern nIV, nV und nVI

### 3.2. Katholische Pfarrkirche Waldenburg

Die katholische Pfarrkirche zu den Schutzengeln in Waldenburg wurde nach Plänen des Architekten Alexis Langner von 1900-1904 errichtet. Die Glasmalereien wurden vermutlich um 1910 von der „Königlichen Glasmalereianstalt Franz Mayer“ in München hergestellt.



Bild 14: Katholische Pfarrkirche zu den Schutzengeln in Waldenburg

Von den insgesamt 31 Fenstern sind bereits 23 im Verlauf der letzten 2 Jahrzehnte restauriert und mit Schutzverglasungen versehen worden. Auf der Nordseite des Langhauses unterbrachen zwei große, ca. 11,50 m hohe, 2-bahnige, bisher noch nicht restaurierte Fenster das ansonsten harmonische Erscheinungsbild des Kirchenraumes. Innerhalb des Projektes konnten auch diese beiden Fenster ausgebaut, restauriert und mit einer Außenschutzverglasung nach dem Stand der Technik versehen werden. Die noch vorhandene Schutzverglasung mit Außenbelüftung, die den Kontakt der Glasmalereien mit Umweltbelastungen durch Schadstoffe, Feuchtigkeit und Staub nicht verringert, wurde durch ein modernes System mit Innenbelüftung ersetzt.

Die Restaurierungsarbeiten und die Konstruktion sowie Installation der Außenschutzverglasung wurden von der Restaurierungswerkstatt Beata Oleszczuk in Breslau ausgeführt. Am 26./27.02.2013 wurden die beiden zu restaurierenden Fenster nX und nXI ausgebaut. Bei mehreren Werkstattterminen des Projektteams erfolgte die

Festlegung der Restaurierungsmaßnahmen, ihre fachgerechte Ausführung wurde abgenommen und Musterfelder der Schutzverglasung begutachtet. Für die Schutzverglasung wurde eine Rechteckverglasung aus Verbundsicherheitsglas empfohlen. Die Abnahme der neuen Schutzverglasung im eingebauten Zustand erfolgte am 28.06.2013. Die eingebauten Originale in den Fenstern nX und nXI einschließlich der Schutzverglasung wurden ohne Beanstandungen am 22.08.2013 von den Gutachtern und Vertretern des Amtes für Denkmalschutz und Denkmalerhaltung der Woiwodschaft Niederschlesien, Abt. Walbrzych abgenommen /13/. Aus der Konstruktion der Halterungssysteme ergibt sich ein Abstand zwischen Schutz- und Originalverglasung von 7- 8 cm /14/. An den Rändern der Originalverglasung sind jeweils Bleilappen angebracht, um seitlichen Lichteinfall zu verhindern. Die Lufteintrittsöffnungen unten betragen ca. 3-4 cm, die Austrittsöffnungen oben ca. 1-2 cm. Auf den Einbau von Kondenswasserrinnen konnte verzichtet werden, da selbst in den Wintermonaten keine sichtbare Kondensatbildung an der Innenseite der Außenschutzverglasung festgestellt wurde.

Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft den Zustand der Originalverglasung und der Außenschutzverglasung vor und nach der Restaurierung.



Bild 15: Schutzverglasung mit Außenbelüftung und Drahtgittern (links), intakte Außenschutzverglasung (rechts)

Die ersten Schutzverglasungen an drei Fenstern im Presbyterium der Kirche wurden bereits 1932 eingebaut. Nach dem 2. Weltkrieg wurden die restlichen Fenster mit außenbelüfteten Schutzverglasungen versehen /14/. Hierzu wurde Drahtglas in der Stärke von 6 mm verwendet. Die Maßwerke blieben ungeschützt. Der Abstand zwischen Glasmalereien und Schutzverglasung betrug nur zwischen 2-3 cm. Die gesamte Konstruktion war so undicht, dass Staub, Nässe und Luftschadstoffe zwischen Glasmalereien und Schutzverglasung eindringen konnten, was zu starken Verschmutzungen der Glasmalereien geführt hat.



Bild 16: Transparenzverlust der Glasmalereien im Fenster nX und nXI infolge einer nicht intakten Außenschutzverglasung

Auch die Verschmutzungen auf den Innenseiten der Glasmalereien sind erheblich. Vereinzelt wurden in den Ornamentverglasungen auch Malschichtverluste festgestellt. Einzelne Glassegmente weisen Sprünge auf. Vor allem im Randbereich, vermutlich ausbaubedingt und auch bei den Inschriften sind Verluste zu verzeichnen, die durch neue Glassegmente ergänzt werden müssen.



Bild 17: Verschmutzungen und Malschichtverluste auf der Ornamentverglasung



Bild 18: Glasbrüche und Verluste im Randstreifen



Bild 19: Fehlstellen vor allem bei Inschriften

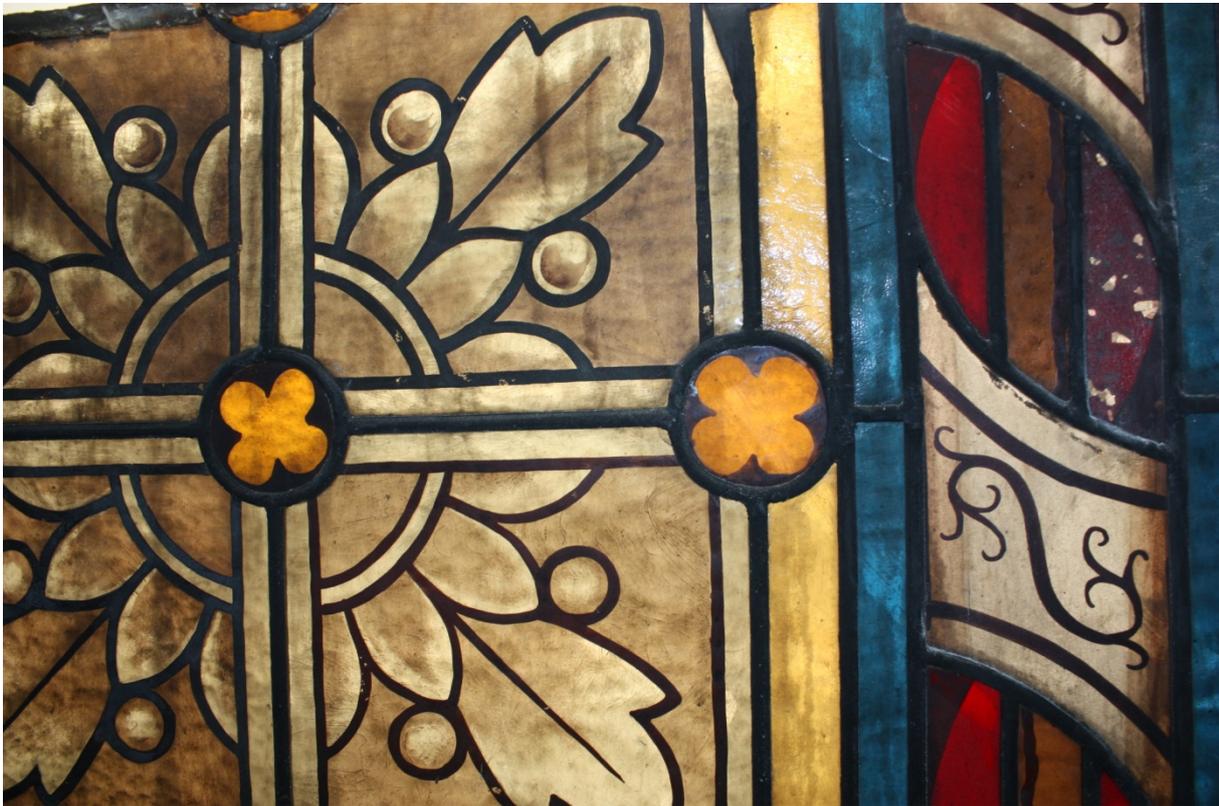


Bild 20: Ausflinsungen im roten Überfangglas (rechts oben)



Bild 21: Glasmalereifeld nach der Restaurierung, gereinigt und mit Ergänzungen



Bild 22: Maßwerkfeld nach der Restaurierung



Bild 23: Wiedereinbau und Abnahme der restaurierten Glasmalereien



Bild 24: Außenansicht der neuen Schutzverglasung

### 3.3. Friedenskirche Jauer

Die evangelische Friedenskirche in Jauer entstand als Fachwerkbau in den Jahren 1654-1655. Den Entwurf einer dreischiffigen basilikalischen Anlage mit in die Seitenschiffe integrierten Emporen lieferte der Breslauer Festungs- und Ingenieurbaumeisters Albrecht von Säbisch.



Bild 25: Evangelische Friedenskirche Jauer , 1654-55, UNESCO-Weltkulturerbe seit 2001

Eine Besonderheit sind die drei farbigen Fenster im Chorbereich, die bereits deutliche Schwarzlot Schäden erkennen lassen und zum Ende des 19. Jahrhunderts entstanden sind /2/. Sie bestehen aus sechseckigen Butzenscheiben mit gemalter Bordüre und bildhaften Darstellungen im oberen Bereich. Eine Außenschutzverglasung wird als dringend notwendig angesehen, um die drei farbigen Ornamentfenster vor Umwelteinflüssen und mechanischer Beschädigung zu schützen. Damit wird sowohl die Schwarzlotbemalung geschützt als auch erstmals eine Außenschutzverglasung in einer Holzkirche realisiert. Der Ausbau der Glasmalereien der Fenster I, nI und sI erfolgte am 16./17.04.2013. Alle Maßnahmen ihrer Restaurierung wurden von den Gutachtern festgelegt und die fachgerechte Ausführung in Werkstattterminen abgenommen. Die statischen Voraussetzungen und technischen Details für die Installation der Außenschutzverglasung wurden vor Ort gemeinsam begutachtet und festgelegt. Berechnungen eines hinzugezogenen Statikers ergaben, dass die Belastung der Holzständer durch die Außenschutzverglasung nur um etwa 2% erhöht wird, so dass die aus Sicherheitsgründen bevorzugte Variante der Bleiverglasung mit Verbundsicherheitsglas

realisiert werden konnte /15/. Unterschiedliche Varianten der Schutzverglasung wurden anhand von Musterfeldern diskutiert. Die Anordnung der Schutzverglasung, Einzelheiten ihrer Konstruktion und die Struktur der Bleiverglasung mit sparsamer Linienführung wurden von allen Beteiligten vor Ort festgelegt. Die Befestigung der Schutzverglasung aus VS-Glas erfolgte mit speziellen metallischen Halterungen an den Quereisen. Die über die gesamte Fensterbreite reichenden originalen Deckschienen wurden in drei Teile getrennt und mit den Schrauben der Halterungsvorrichtung befestigt. In die originalen Halteschrauben wurden Schlitzte eingefräst, so dass sie erhalten werden konnten und außerdem zur Stabilisierung beitragen. Die Originalfelder sind auf den Halterungsvorrichtungen im Abstand von etwa 5-6 cm zur Schutzverglasung befestigt. Anhand eines eingesetzten Modellfeldes der Schutzverglasung erwies sich diese Konstruktion als praktikabel und für alle drei Fenster geeignet, so dass dieses Modell übernommen werden konnte. Als zusätzliche Maßnahmen wurden festgelegt, dass jeweils an der Basis von Zeile 1 eine Kondenswasser-Auffangrinne aus Zink/Titan-Blech anzubringen ist, die an der Schutzverglasung mit Silikon abgedichtet wird. Zwischen Original und Oberkante der Auffangrinne blieb ein Luftspalt von etwa 2cm frei. Die feierliche Übergabe der eingebauten und restaurierten Glasmalereien einschließlich der Schutzverglasung erfolgte am 17.09.2013. Die fachgerechte Ausführung der Restaurierungsarbeiten wurde entsprechend der denkmalbehördlichen Genehmigung von den Gutachtern und Vertretern des Amtes für Denkmalschutz und Denkmalerhaltung der Woiwodschaft Niederschlesien, Abteilung Legnica abgenommen /16, 17/.

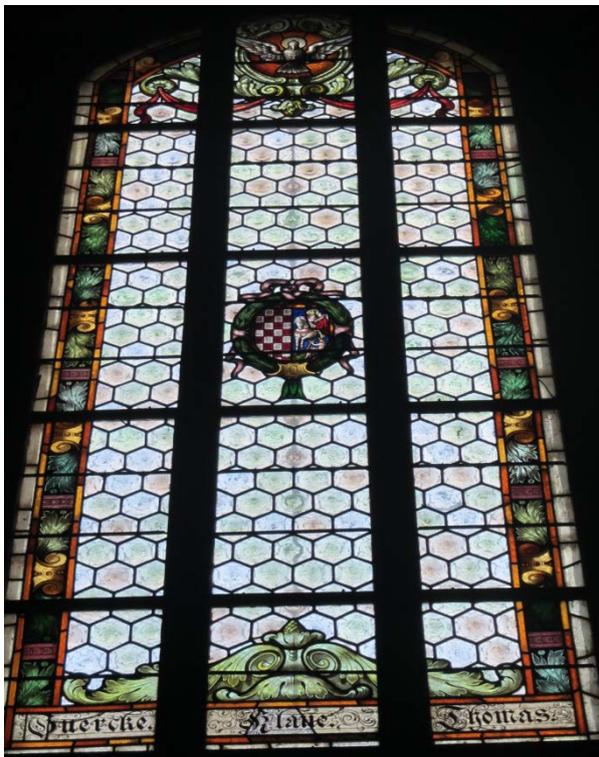


Bild 26: Friedenskirche Jauer mit Farbverglasungen im Chorbereich, Fenster nI, sl

Die folgenden Bilder zeigen beispielhaft den Zustand der Originalverglasung vor und nach der Restaurierung sowie die neuinstallierte Außenschutzverglasung.



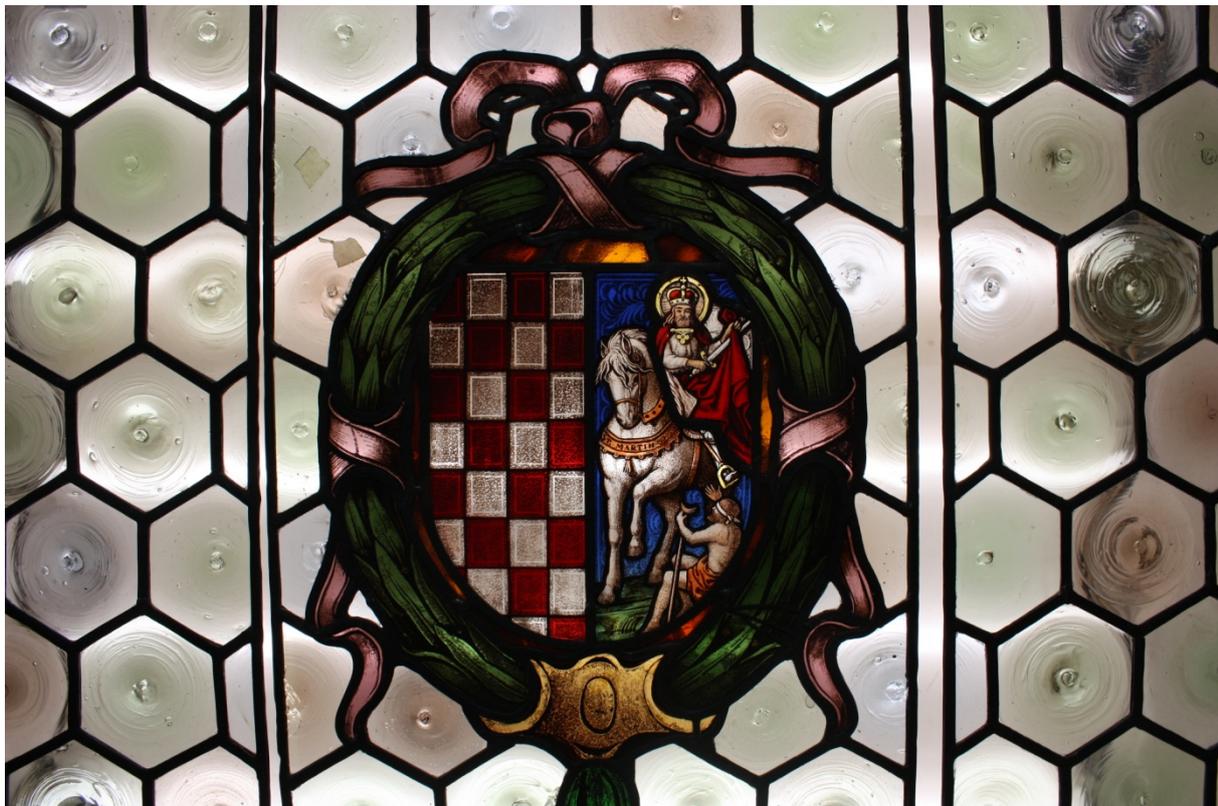
Bild 27: Fenster I mit Drahtgitter als Schutz



Bilder 28, 29: Fenster I (links), Fenster II mit defekten Glassegmenten (rechts)



Bild 30: Detail Fenster sII mit defekten Glassegmenten



Bilder 31: Detail Fenster I nach der Restaurierung



Bilder 31: Detail Fenster sII nach der Restaurierung



Bild 32: Fenster I mit neuer Außenschutzverglasung

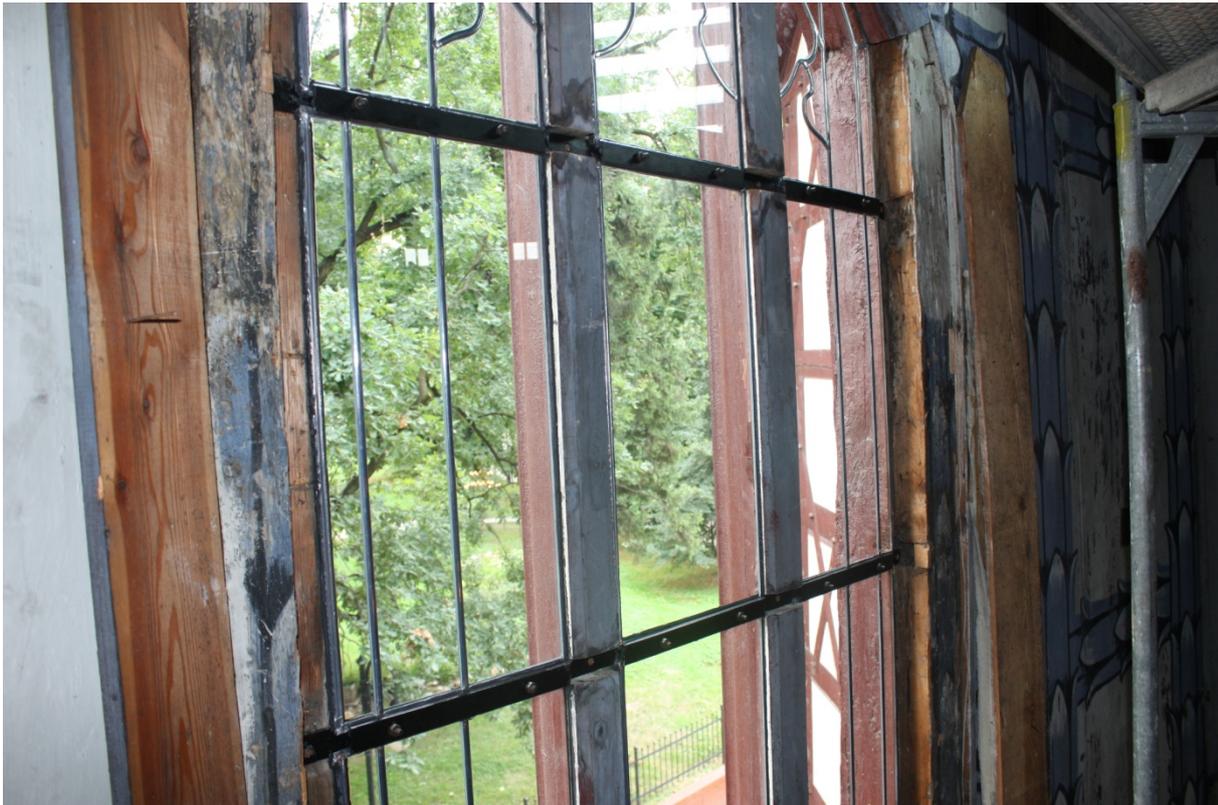


Bild 33: Detailaufnahme zum Einbau der Schutzverglasung

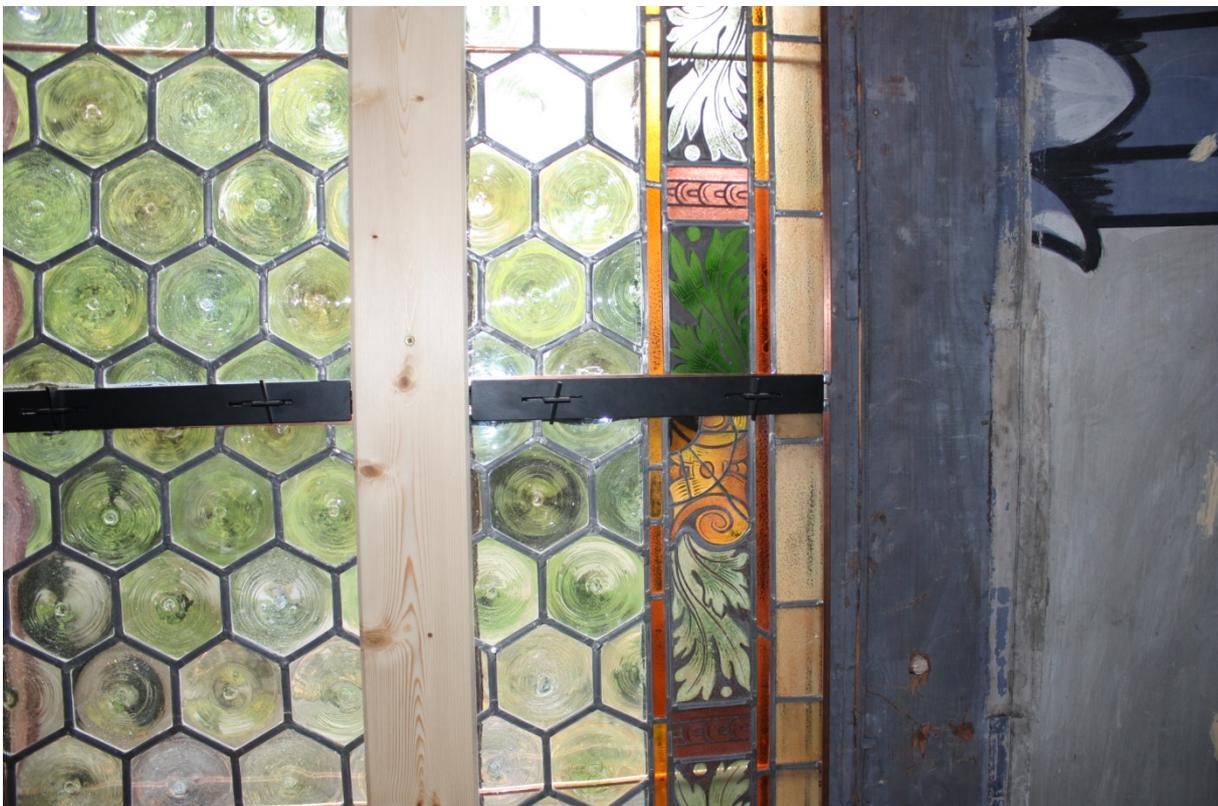


Bild 34: Detailaufnahme zum Einbau der Glasmalereien

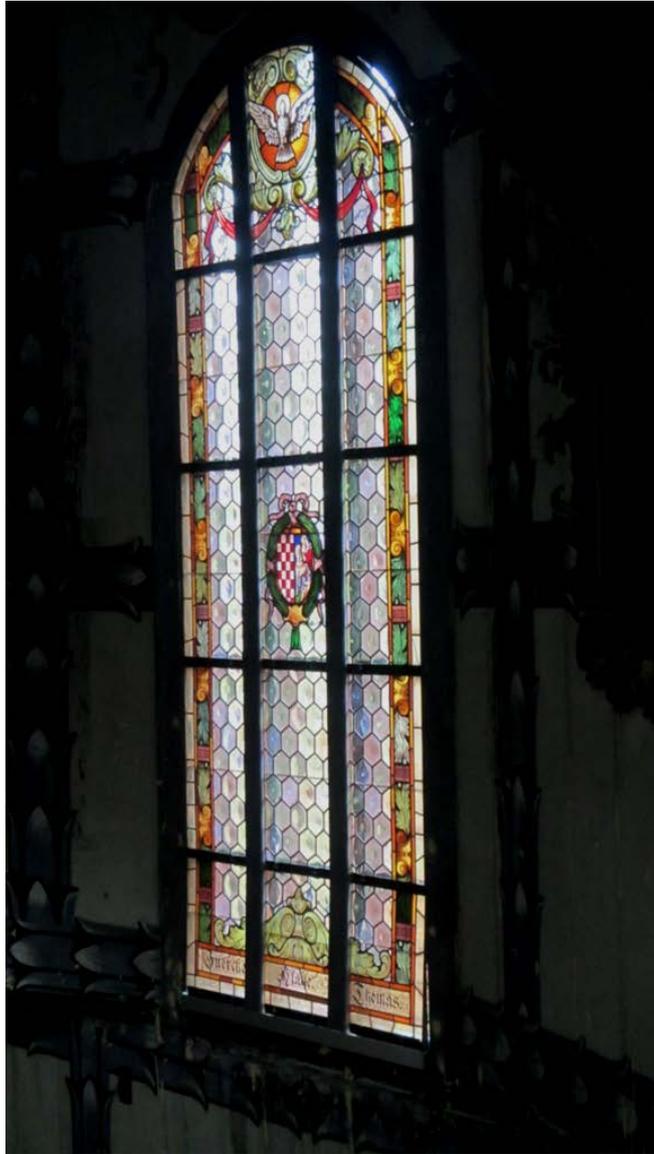


Bild 35:

Fenster I nach Restaurierung mit Außenschutzverglasung und Lüftungsöffnungen oben und unten



Bild 36: Fenster II, Detail Lüftungsöffnung unten

Die Restaurierungsarbeiten und die Konstruktion sowie Installation der Außenschutzverglasung wurden von der Restaurierungswerkstatt Beata Oleszczuk in Breslau ausgeführt.

## **4. Klimamessungen**

### **4.1. Messkonzept und –zeitraum**

Die Klimamessungen erfolgten an ausgewählten Fenstern in Waldenburg, Niedersteine und Jauer, jeweils dort, wo die Originalverglasungen mittels einer Außenschutzverglasung vor Umwelteinwirkungen geschützt worden ist. Die Fenster an denen die Messtechnik installiert wurde, unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Lage (Nord-, Süd- und Ostfenster) als auch in ihrer Größe. Die Klimamessungen erfolgten in Abhängigkeit vom Stand der Sanierungsarbeiten an den Fenstern im Zeitraum von September 2012 - August 2014. Die Messstellen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit befanden sich in der Regel an 4 Positionen - auf der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1), auf der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2), auf der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 3) und auf der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4-vgl. Bild 37)). Im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung wurden zusätzlich die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gemessen. Je nach Erfordernissen und Zugänglichkeit an den Objekten wurde das Messprogramm durch weitere Temperaturmessungen bzw. Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit an Pos. 1 oder Pos. 2 in unterschiedlichen Höhen erweitert. In Niedersteine erfolgten Klimamessungen sowohl an einem Nord- als auch an einem Südfenster über den Zeitraum eines Jahres. In Waldenburg wurden Messungen an einem zu restaurierenden Fenster nXI bis zu dessen Ausbau durchgeführt. Die Evaluierung der „neuen Schutzverglasung“ erfolgte über einen Zeitraum von 15 Monaten am Fenster nXII. In der Friedenkirche in Jauer begannen die Klimamessungen nach Abschluss der Restaurierungsarbeiten und dem Einbau der Außenschutzverglasungen im Dezember 2013 und wurden bis August 2014 fortgeführt. Weitere Messungen zur Bestimmung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit in der Nähe von Holzkonstruktionen sowie der Bestimmung der Holzfeuchte in einem Balken mit Mazerationsschäden sind im Dachgeschoss in Jauer über einen Zeitraum von 16 Monaten durchgeführt worden. Zusätzlich zu den Klimamessungen an den Fenstern in Jauer, Niedersteine und Waldenburg erfolgte die Bestimmung der Luftschadstoffe  $\text{NO}_x$  und  $\text{SO}_2$  mit Hilfe von Kurzzeitmessungen mit Passivsammlern. In den beiden letztgenannten Objekten wurden das Schädigungspotential der komplexen Umwelteinwirkungen und die Schutzwirkung der Außenschutzverglasung auch mit Hilfe von Glasdosimetern bewertet, die 12 Monate an unterschiedlichen Positionen (Pos. 1, Pos. 2, Pos. 4) der Fenster exponiert waren und vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung (ISC) in Würzburg - Außenstelle Bronnbach ausgewertet worden sind.

### **4.2. Messgeräte und Messfühler**

Für die Registrierung und Speicherung der Klimadaten wurde ein ALMEMO<sup>®</sup>-Messsystem verwendet. Die eingesetzten Messfühler besitzen einen speziell entwickelten intelligenten

ALMEMO<sup>®</sup>-Stecker mit programmierbarem Datenträger (EEPROM), in dem die Parameter der angeschlossenen Fühler und Geräte gespeichert werden. Dadurch werden alle angesteckten Einheiten automatisch erkannt und die Funktionen entsprechend angepasst. Alle Fühler sind vom Hersteller programmiert und kalibriert. Beim Anstecken werden alle Parameter (wie z.B. Messbereich, Messwertkorrekturen, Skalierungen, Fühlerbezeichnung) automatisch an das Messgerät übertragen, so dass Fehlmessungen durch falsche Programmierung und Fühlerverwechslungen ausgeschlossen sind. Ein großes Spektrum von Messfühlern und Sensoren kann so über das patentierte Steckersystem an jeden Messeingang eines Messgerätes angeschlossen werden. Die Umschaltung der Messstellen erfolgt galvanisch getrennt mit verschleißfreien Halbleiterrelais, so dass eine kontinuierliche Messstellenabfrage mit bis zu 100 Messungen/Sekunde möglich ist. Alle Geräte besitzen ein identisches Softwareprotokoll, sie sind über Schnittstellen adressierbar und vernetzungsfähig und ein einziges Terminal genügt, um die Messdaten abzufragen. Die Datenspeicherung erfolgt auf serienmäßigen Datenloggern mit 520 kB oder auf externen Smart-Media-Cards (MMC) mit 512 MB. Die Messdateien werden auf der MMC-Card als ASCII-Textdateien im Tabellenmode im Standard-FAT16-Format gespeichert. Die Datenübertragung von der MMC Speicherstecker erfolgt mittels eines angeschlossenen GSM-Mobilfunkmodems. Damit ist auch eine kontinuierliche Fern-Kontrolle der Messwernerfassung möglich, so dass sich die Notwendigkeit von vor-Ort-Besuchen auf ein Minimum reduziert. Alternativ kann die Datenübertragung mit einem Standard-Card-Lesegerät erfolgen. Mit Hilfe der Software Wincontrol werden die Messwerte automatisch ausgelesen und in Tabellenform oder als Grafik dargestellt. Ein integriertes Konvertierungsprogramm ermöglicht die Umwandlung der Messdateien in Excel-Dateien für weitere Auswertungen.

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

Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit ist ein kapazitiver Sensor geeignet. Er besteht aus einem Glassubstrat, auf dem eine feuchteempfindliche Polymerschicht zwischen zwei Metallschichten aufgebracht ist. Durch Wasseraufnahme entsprechend der relativen Luftfeuchtigkeit ändern sich die Dielektrizitätskonstante und damit die Kapazität des

Dünnschichtkondensators. Das Messsignal ist direkt proportional zur relativen Feuchte und unabhängig vom Umgebungsdruck. Mit diesem Sensor ist eine Messung über längere Zeiträume auch bei Minustemperaturen möglich. Allerdings hat er nur eine begrenzte Langzeitstabilität und ist empfindlich gegenüber Betauung und bestimmten aggressiven Medien. Zum Einsatz kam ein ALMEMO<sup>®</sup>-Messmodul für Feuchte und Temperatur FHAD 462. Bei diesem Messsystem werden 4 Klimagrößen angezeigt: Temperatur, relative Feuchte, Taupunkttemperatur und Mischungsverhältnis. Der Einsatzbereich liegt zwischen -20 und 60°C im Feuchtebereich zwischen 5 bis 98 % r. F. Die Genauigkeit der Feuchtemessung beträgt 1,8 % r. F. im Bereich zwischen 20...80 % r. F. (bei Nenntemperatur). Die Genauigkeit der Temperaturmessung beträgt +/- 1K im Bereich von -20...60°C. Dieses Messmodul ist mit einer Schutzkappe gegen mechanische Beschädigung und gegen Schmutz und Staub geschützt. Aufgrund dieser konstruktiven Maßnahme befindet sich die Temperatur-/Feuchtemessstelle nicht direkt auf der Glasoberfläche, sondern ca. 5 mm davon entfernt. Erstmals wurde auch der digitale Feuchte-Temperatursensor FHAD62-0 eingesetzt, der ohne Schutzkappe direkt auf die Glasoberfläche im Innenbereich aufgebracht wurde.

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

Die Holzfeuchte in Konstruktionshölzern des Dachgeschosses wurde nach dem Leitfähigkeitsprinzip mit einer Holzfeuchtesonde für Langzeitmessungen FHA636 MF10 bestimmt. Dazu wurden 2 Elektroden im Abstand von ca. 4 cm so eingebracht, dass die Messung quer zur Holzmaserung erfolgte.

### 4.3. Anordnung der Messtechnik

Die Anordnung der Temperatur- und Feuchtfühler erfolgte in allen Objekten an den Fenstern im Innenraum, im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung und auf der Außenseite (Bild 37). Messungen mit Passivsammlern wurden in Niedersteine, Waldenburg und Jauer durchgeführt. Glasdosimeter wurden in Niedersteine und Waldenburg eingesetzt.

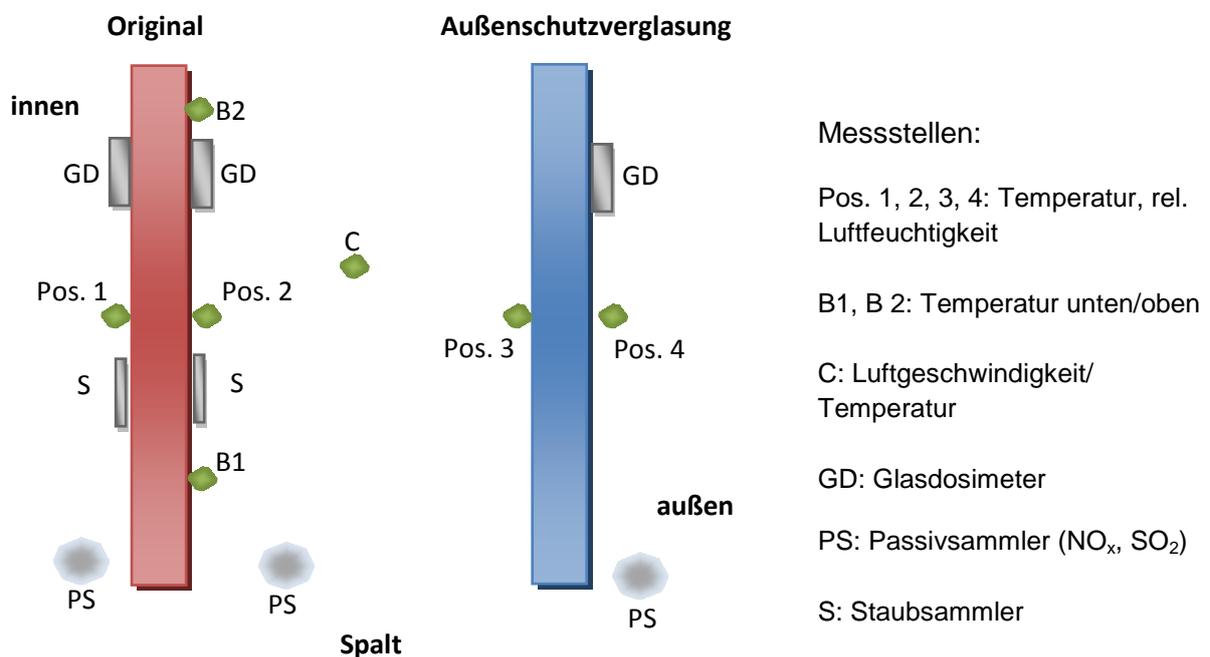
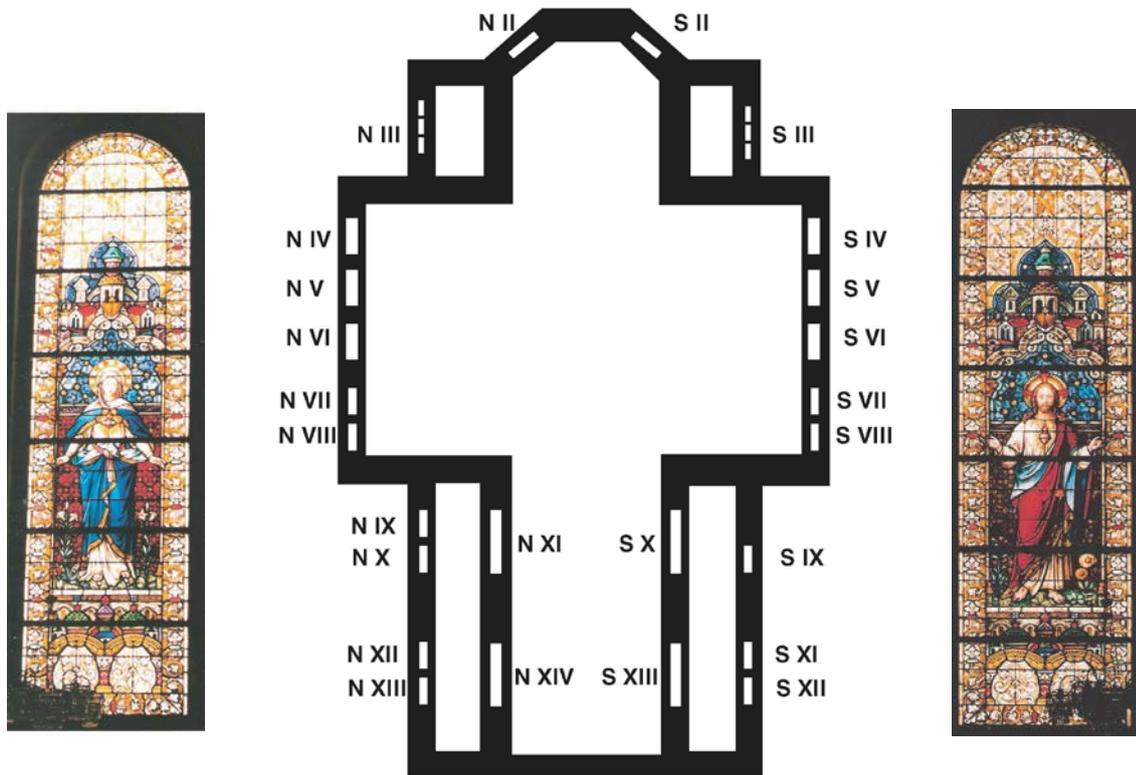


Bild 37: Schematische Übersicht zu den Messstellen

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

### 4.3.1. Niedersteine



Bilder 38-40: Grundriss der katholischen Pfarrkirche Niedersteine mit den Fenstern nV (links) und sV (rechts) an denen die Klimamesstechnik installiert worden ist

Tabelle 1: Anordnung der Messtechnik in Niedersteine an den Fenstern nV und sV

Messtelle	N 1 Fenster sV	N 2 Fenster sV	N 3 Fenster nV
00	Feld 1, Pos. 1 Temperatur/ rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	Feld 1/Feld 7, Pos. 2 Temperatur B1/B2	Feld 1/Feld 7, Pos. 2 Temperatur B1/B2
01	Feld 1. Pos.2 Temperatur/ rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	Feld 6, Pos. 1 Temperatur/rel. Luftfeuchte	Feld 6, Pos. 1 Temperatur/rel. Luftfeuchte
02	Feld 1, Pos. 3 Temperatur/ rel. Luftfeuchte	Im Spalt zwischen Feld 5/6 Temperatur/Luftgeschwindigkeit im Spalt <b>Staubsammler 3 (Pos.2)</b> <b>Feld 2b</b>	Im Spalt zwischen Feld 5/6 Temperatur/Luftgeschwindigkeit im Spalt <b>Staubsammler 4 (Pos. 2)</b> <b>Feld 2b</b>
03	Feld 1 Pos. 4 Temperatur/ rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	Feld 6, Pos. 3 Temperatur/rel. Luftfeuchte	Temperatur/rel. Luftfeuchte Feld 6, Pos. 3

GD...Glasdosimeter, PS...Passivsammler

#### 4.3.2. Waldenburg

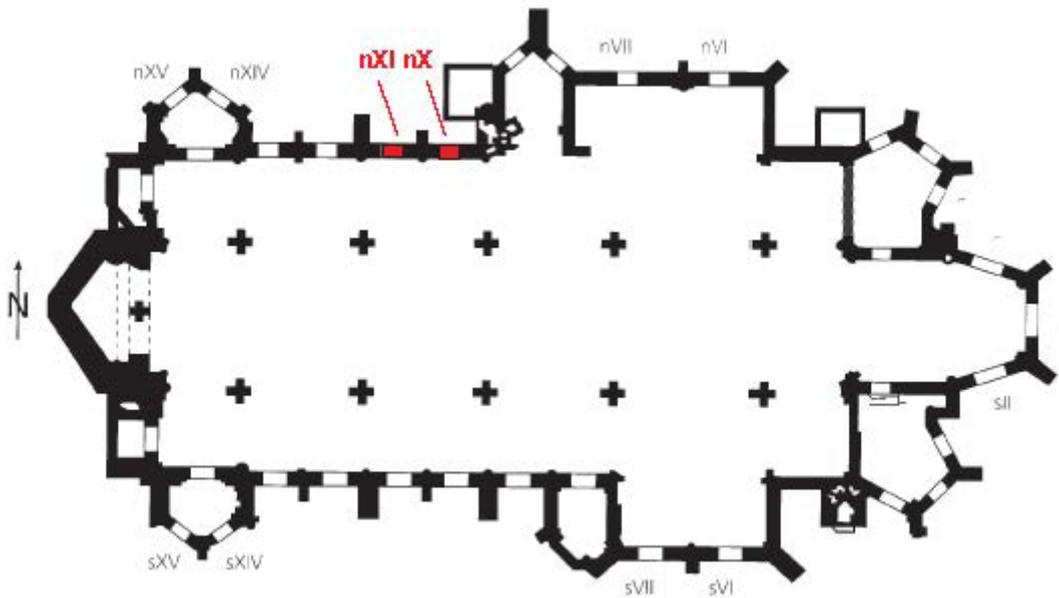


Bild 41: Grundriss der katholischen Pfarrkirche Waldenburg



Bild 42: Waldenburg, Fenster nXII, nXI und nX (von links nach rechts)

Die Klimamessungen wurden am Fenstern nXI bis zu dessen Ausbau und über die gesamte Messzeit am Fenster nXII durchgeführt (Tabelle 2).

Tabelle 2: Anordnung der Messtechnik in Waldenburg an den Fenstern nXI und nXII

Messstelle	<b>W 1</b> Fenster nXII	<b>W 2</b> Fenster nXI/nXII	<b>W 3</b> Fenster nXI- ein
00	Feld 1b, Pos. 1 Temperatur/rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	n XI: Feld 1a/Feld 6b, Pos. 2 Temperatur B1/B2	Feld 1a, Pos. 1 Temperatur/rel. Luftfeuchte
01	Feld 1b, Pos. 2 Temperatur/rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	--	Feld 1a, Pos. 2 Temperatur/rel. Luftfeuchte
02	Feld 1b, Pos. 3 Temperatur/rel. Luftfeuchtigkeit	nXII: Feld 1b/Feld 6b, Pos. 2 Temperatur B1/B2	Feld 1a, Pos. 3 Temperatur/rel. Luftfeuchte
03	Feld 1b, Pos. 4 Temperatur/rel. Luftfeuchte <b>GD, PS</b>	nXII: im Spalt zwischen Feld 2b/Feld 3b Temperatur/Luftgeschwindigkeit <b><i>Staubsammler 1 (Pos. 1)</i></b> <b><i>Feld 2b</i></b> <b><i>Staubsammler 2 (Pos. 2)</i></b> <b><i>Feld 2b</i></b>	Feld 1a, Pos. 4 Temperatur/rel. Luftfeuchte

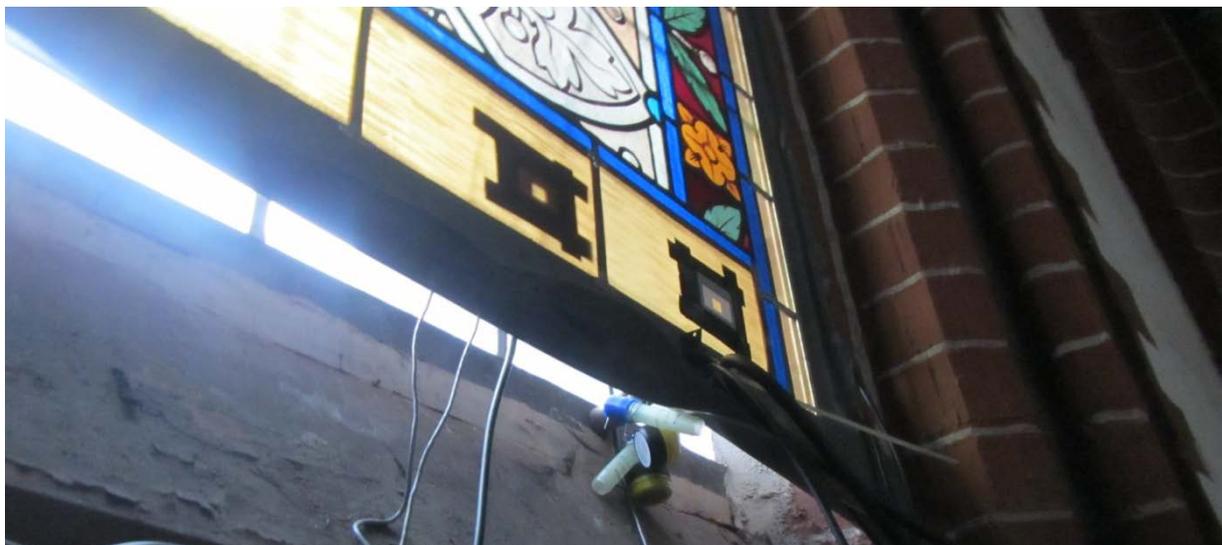


Bild 43: Passivsammler und Glasdosimeter an Fenster nXII

### 4.3.3. Jauer

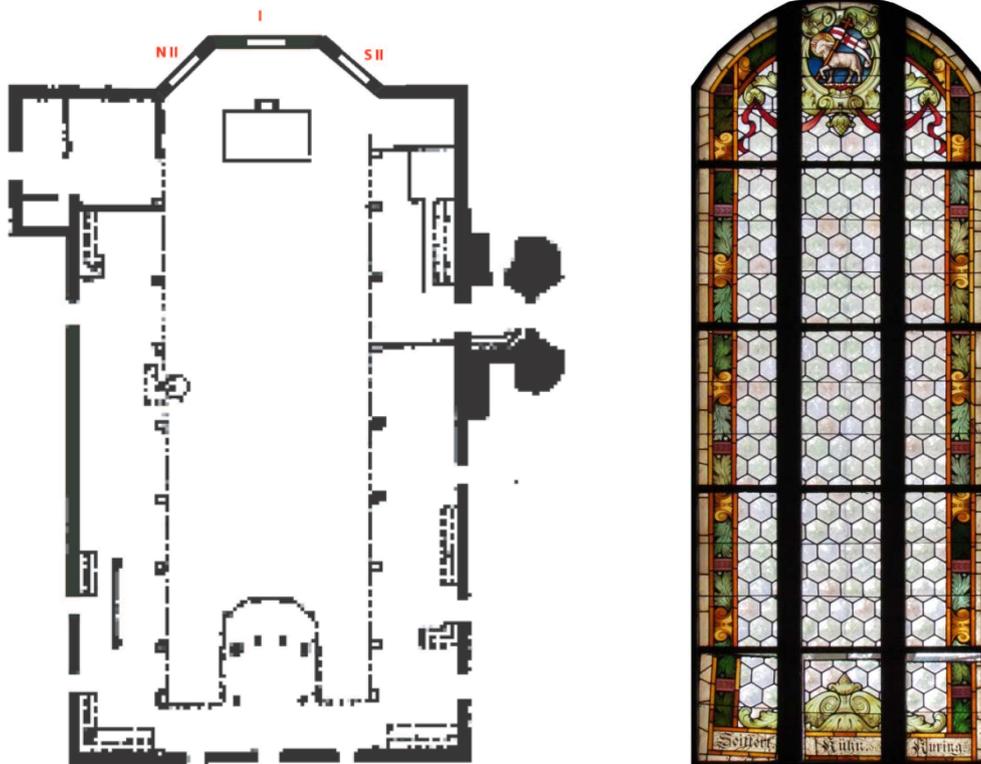


Bild 44-45: Grundriss der Friedenskirche Jauer und Fenster sII (vor Restaurierung)

Der Einbau der Messtechnik erfolgte nach der Restaurierung der Glasmalereien und der Installation der Außenschutzverglasung im Dezember 2013. Die Luftprobenahme mit Hilfe von Passivsammlern wurde bereits vor der Restaurierung im Dezember 2013/Januar 2014 durchgeführt. Eine Exposition von Glasdosimetern erfolgte an diesem Fenster nicht.

Tabelle 3: Anordnung der Messtechnik in Jauer

Messstelle	<b>J 1 Im Dachgeschoss</b>	<b>J 2 Fenster sII</b>
00	Holzfeuchte mazerierter Balken im Dachgeschoss	zwischen Feld 3c/Feld 4c, Pos. 1 Temperatur/rel. Luftfeuchte <b>PS (Pos. 1/Pos. 4)</b>
01	Holzfeuchte neuer Balken mit Holzschutz im Dachgeschoss	zwischen Feld 3c/Feld 4c, Pos. 2 Temperatur/rel. Luftfeuchte
02	Temperatur/rel. Luftfeuchte im Dachgeschoss -T3	zwischen Feld 3c/Feld 4c, Pos. 2 Temperatur/rel. Luftfeuchte
03	Temperatur/rel. Luftfeuchte Im Kirchenraum an der Decke mit Bemalung – T2	im Spalt zwischen Feld 3c/Feld 4c, Pos. 2 Luftgeschwindigkeit

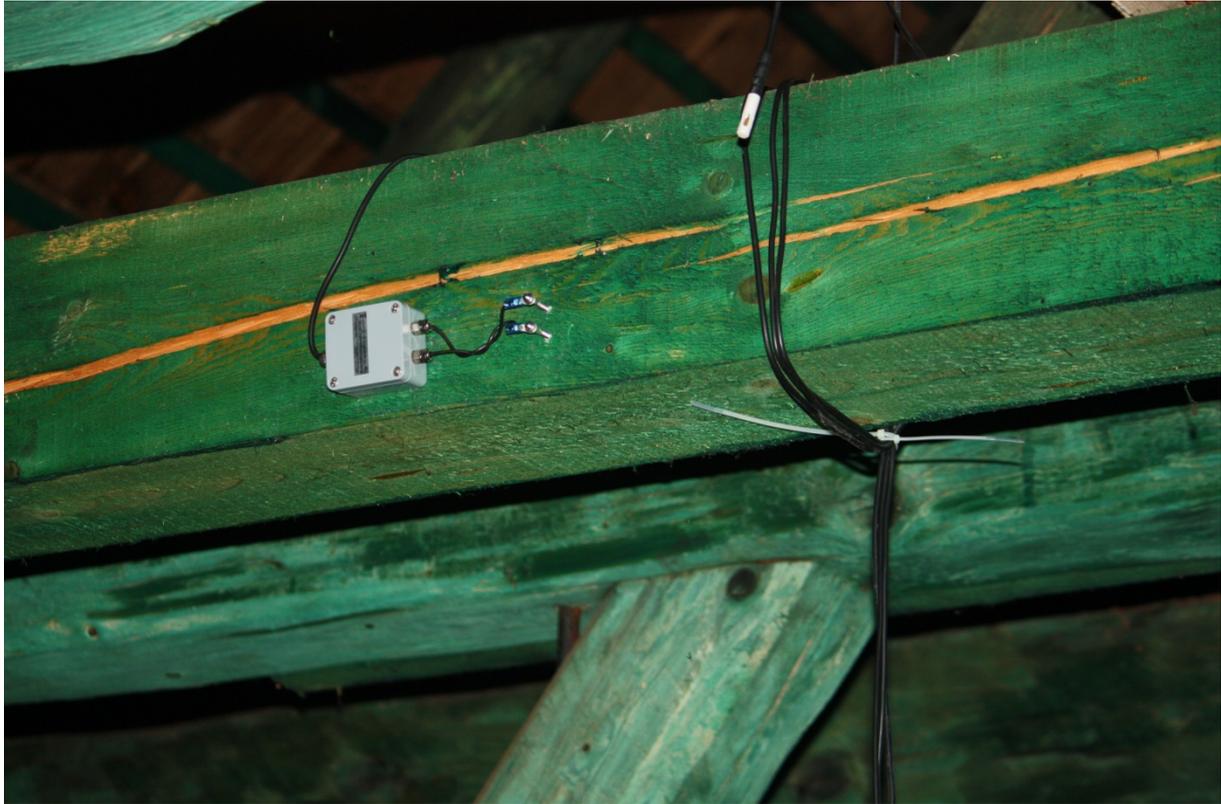


Bild 46: Messung von Temperatur, relativer Luftfeuchte und Holzfeuchte an einem neuen Balken



Bild 47: Messung der Temperatur und relativen Luftfeuchte im Deckenbereich

## **4.4. Messergebnisse**

### **4.4.1. Niedersteine**

Die Klimamessungen in der Pfarrkirche Niedersteine erfolgten an den Fenstern nV und sV im Zeitraum vom 12.12.2012 - 09.12.2013. Beide Fenster haben eine Höhe von ca. 532 cm, die Breite der einzelnen Felder beträgt 157 cm. Der Abstand zwischen Original- und Außenschutzverglasung beträgt 7 cm. Am unteren Fenstersimms befindet sich eine Lufteintrittsöffnung von ca. 1-2 cm über die gesamte Breite des Glasmalereifeldes. Die Luftaustrittsöffnung am oberen Feld hat eine Breite von ca. 1 cm. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas.

#### **4.4.1.1. Südseite N1, Fenster sV**

Die Klimadaten wurden monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. Die Modemverbindungen waren jedoch zeitweise aufgrund technischer Probleme unterbrochen und somit die Funktionsfähigkeit der Messgeräte nicht überprüfbar. Infolge von Geräteausfällen sind Messwertverluste in den Monaten Februar, Juni/Juli und August 2013 aufgetreten. Ein Ausfall des Temperatur-Feuchtefühlers an Pos. 4 wurde im Mai für etwa 2/3 der Messzeit festgestellt. Die vorhandenen Messwerte wurden in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in Tabelle 4 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

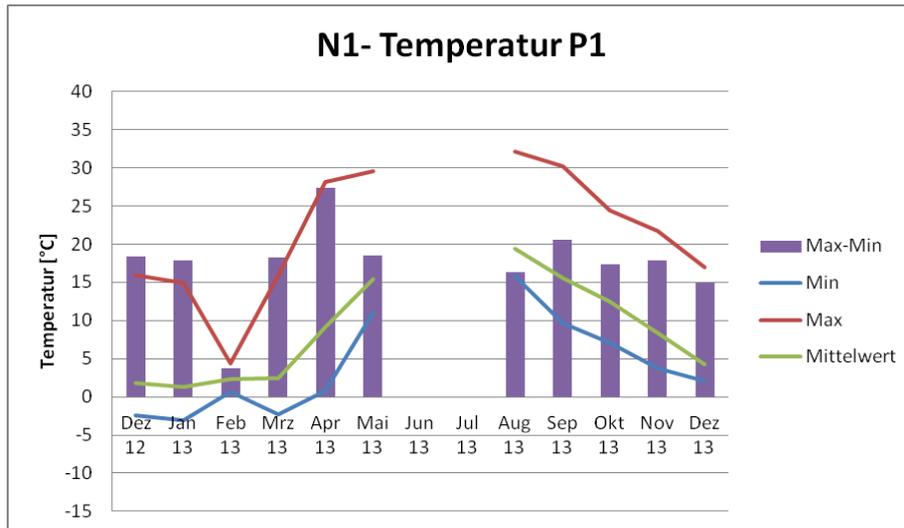


Bild 48: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sV1 betrug im August 32,1°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -3,0°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat April 27,4 K.

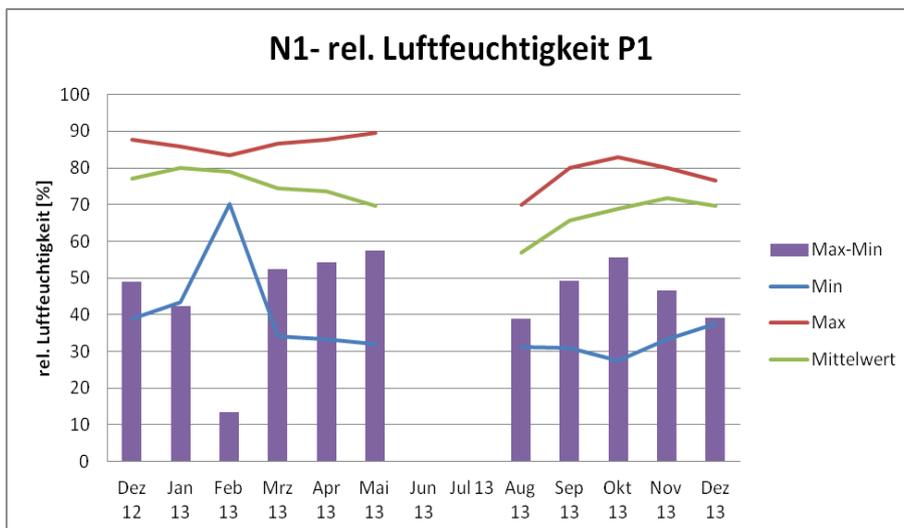


Bild 49: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit lagen im ersten Halbjahr deutlich über 80 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sV1 betrug im Mai 89,6 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Oktober bei 27,4 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Mai mit  $\Delta$  r. F. = 57,6 % festgestellt.

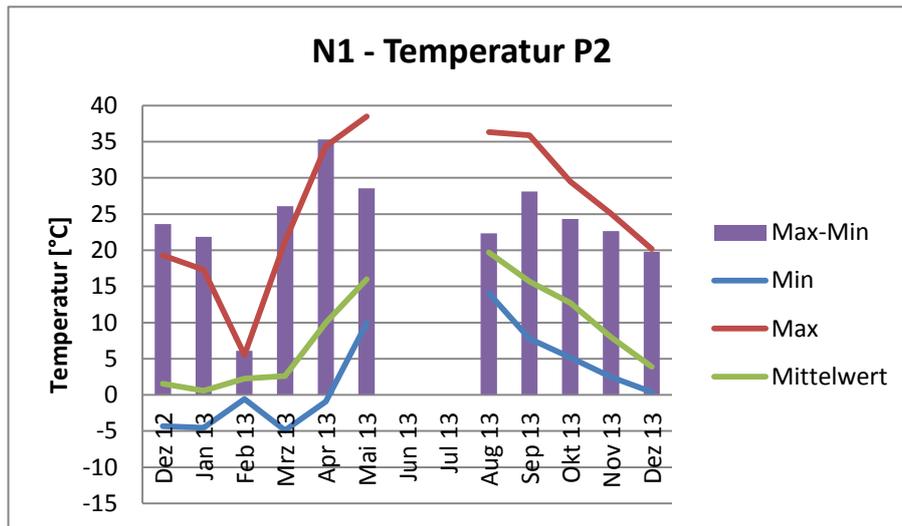


Bild 50: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sV1 betrug im Mai 38,5°C. Die minimale Temperatur lag im März an derselben Messstelle bei -4,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat April bei 34,5 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe Temperaturen häufig kurzzeitige Spitzenwerte sind.

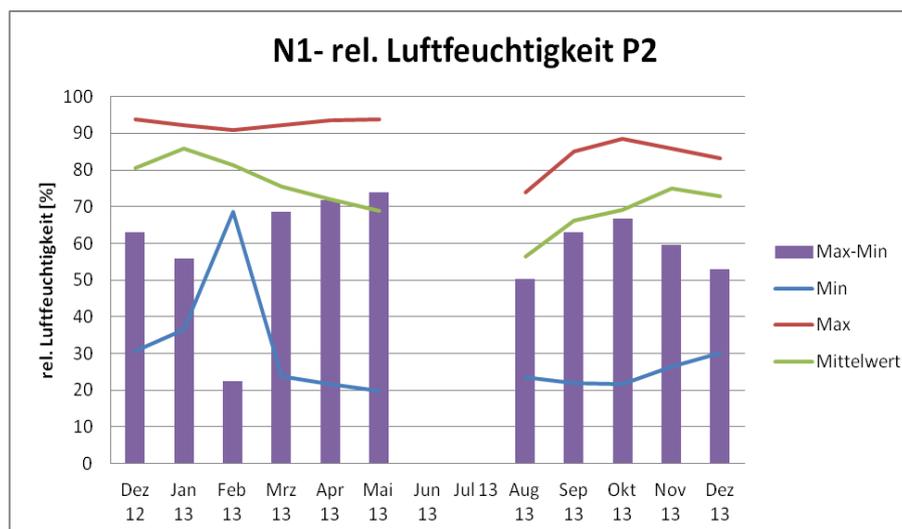


Bild 51: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember bis Mai deutlich über 90 % r. F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sV1 betrug im Dezember 93,8 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im Mai bei 19,8 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im Mai mit  $\Delta r. F. = 74 \%$  festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger im Herbst und in den Wintermonaten auftreten.

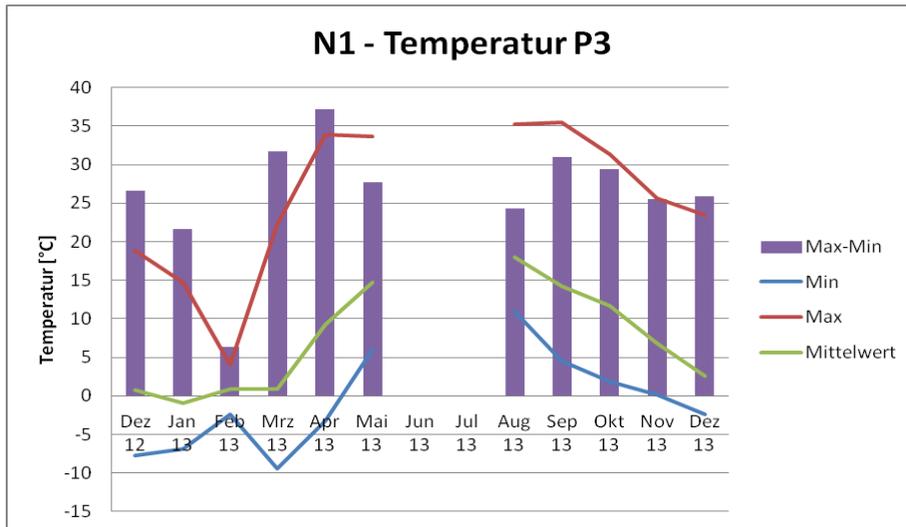


Bild 52: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sV1 betrug im September 35,5°C, die minimale Temperatur lag im März an derselben Messstelle bei - 9,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat April 37,1 K.

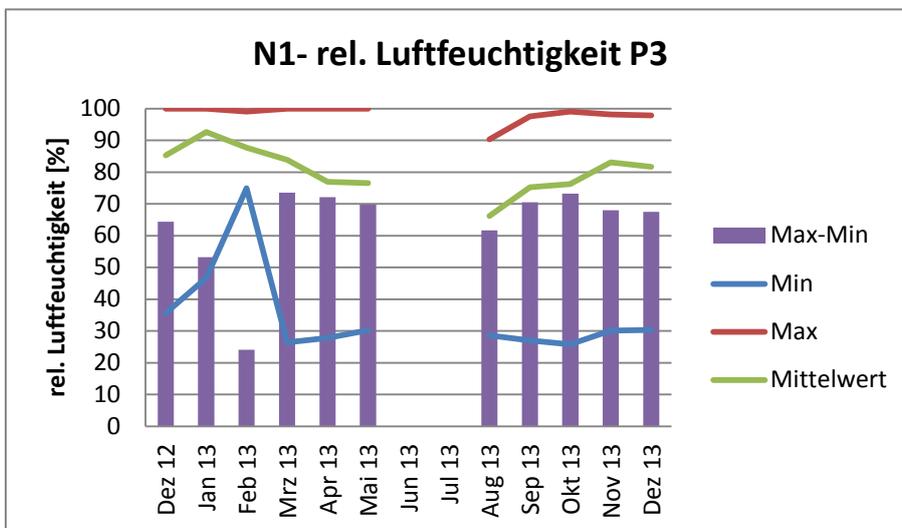


Bild 53: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember bis Mai fast immer bei 100 % r .F. Selbst im Monat August werden noch 90 % r. F. erreicht. Die minimale Feuchtigkeit lag im Oktober bei 27,1 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im März und Oktober mit  $\Delta$  r. F. = 73 % festgestellt.

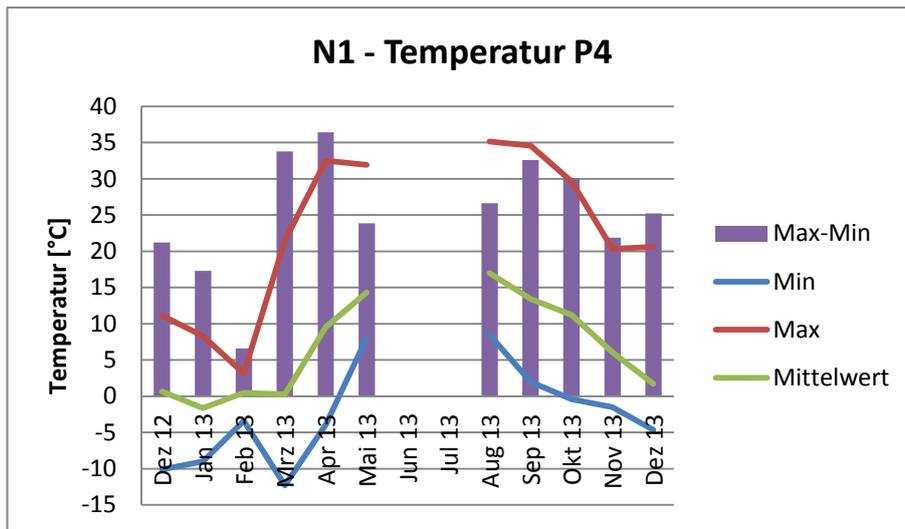


Bild 54: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Feld sV1 betrug im August 35,2°C. Die minimale Temperatur lag im März an derselben Messstelle bei - 12,3°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat April bei 36,4 K.

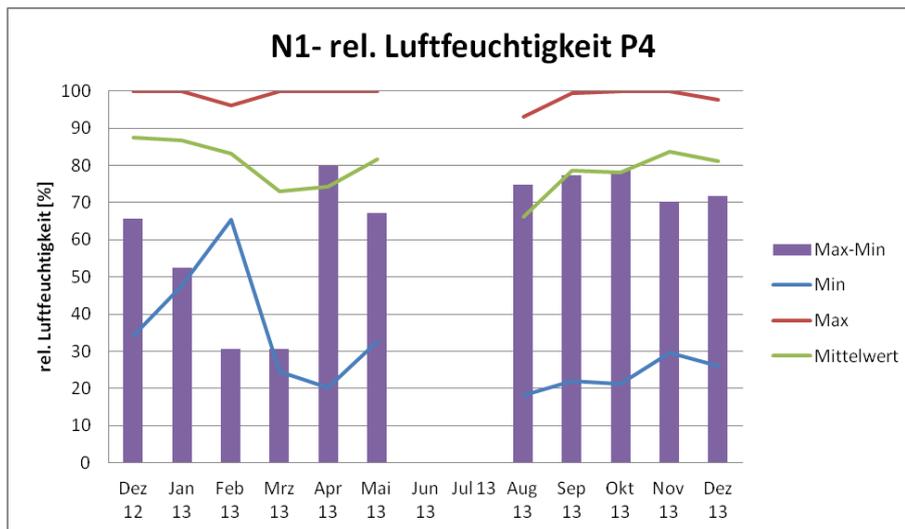


Bild 55: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit erreichten in den Monaten Dezember bis Mai und September bis Oktober fast immer 100 %. Die minimale Feuchtigkeit lag im August bei 18,1 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im April mit  $\Delta$  r. F. = 79,8 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten.

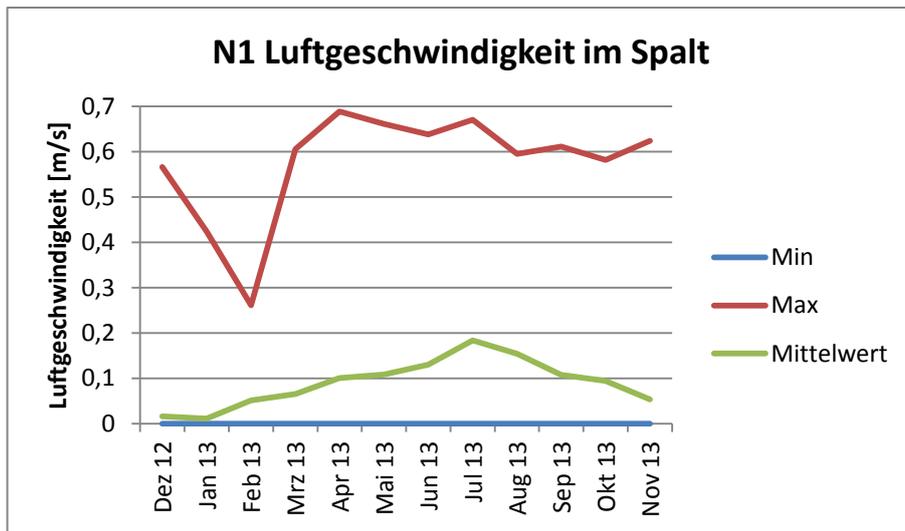


Bild 56: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster sV

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld sV betrug im April 0,69 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, das bedeutet, dass die Luftströmung völlig zum Erliegen kommt. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen.

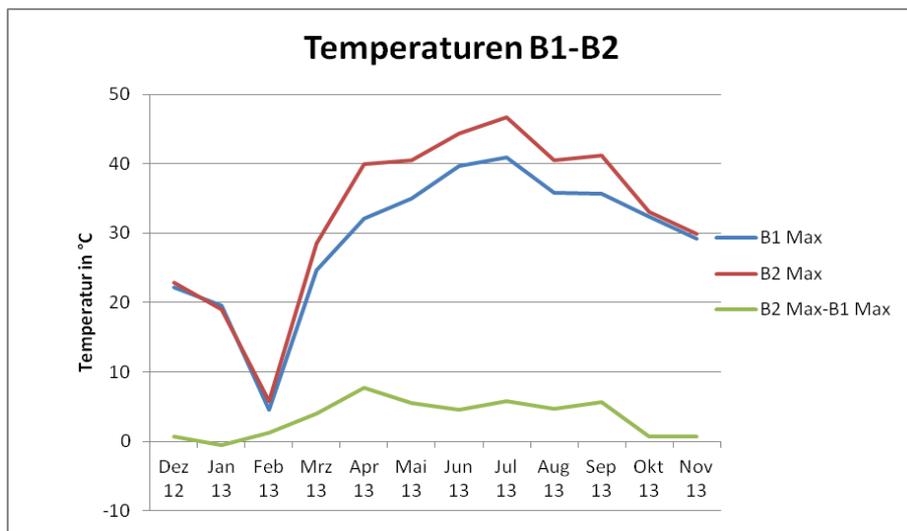


Bild 57: Temperaturextrema und –differenzen an der Außenseite Originalverglasung (Pos. 2) in unterschiedlichen Höhen (B1, B2) am Fenster sV

Der jahreszeitliche Temperaturverlauf in unterschiedlichen Höhen auf der Außenseite der Originalverglasung entspricht dem Verlauf der Temperatur auf Pos. 2 (Bild). Glasmalereifelder in einer größeren Höhe erwärmen sich stärker als die Felder der ersten Reihe. Die Temperaturdifferenzen zwischen unten (B1) und oben (B2) sind in den Monaten März bis Oktober höher als in den übrigen Monaten und beeinflussen die Strömungsgeschwindigkeit der Luft.

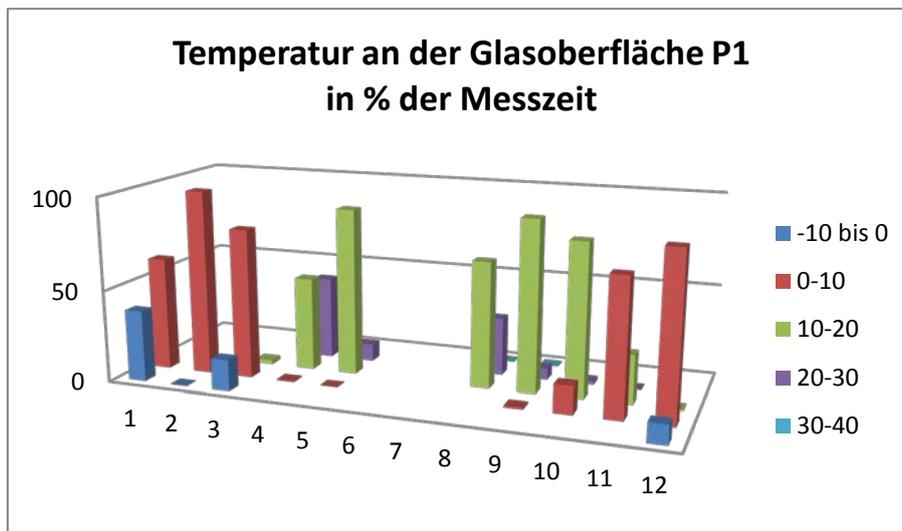


Bild 58: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Innenseite der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Maximalwerte der Temperatur am Feld sV1 im Bereich zwischen 30 und 40°C an der Innenseite der Originalverglasung wurden im April zu 3,3 % und in den Monaten August und September zu weniger als 1% der Messzeit registriert. Die häufigsten Temperaturbereiche in den Monaten April, Mai, August, September und Oktober liegen zwischen 10 und 20°C. Im Januar lagen die Temperaturen zu knapp 40 % der Messzeit zwischen 0 und -10°C.

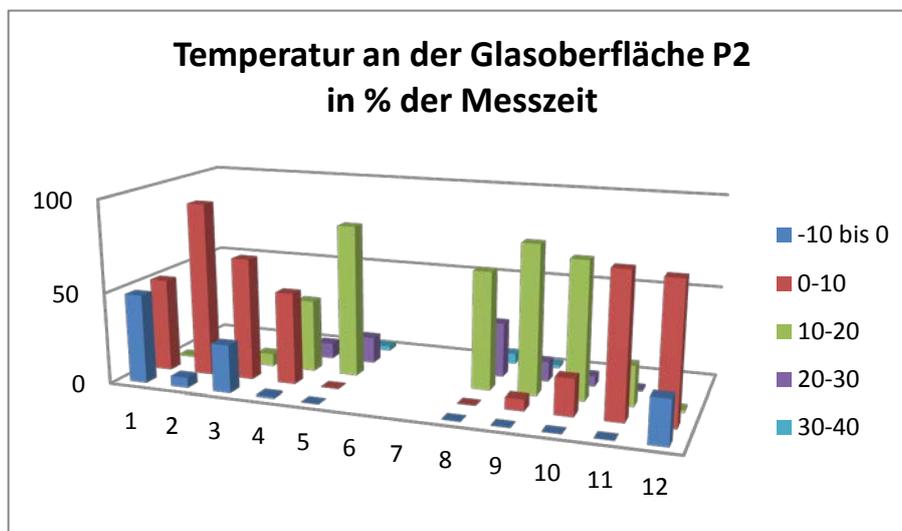


Bild 59: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die jahreszeitlichen Verläufe der Temperaturen an der Innen- und Außenseite der Originalverglasung stimmen annähernd überein. Die Dauer von Temperaturminima ist an der Außenseite der Originalverglasung jedoch etwas länger. Zu etwa knapp 50 % der Messzeit im Januar wurden Temperaturbereiche zwischen 0 und -10°C erreicht. Die Außentemperatur bestimmt somit die Temperaturverteilung am Original.

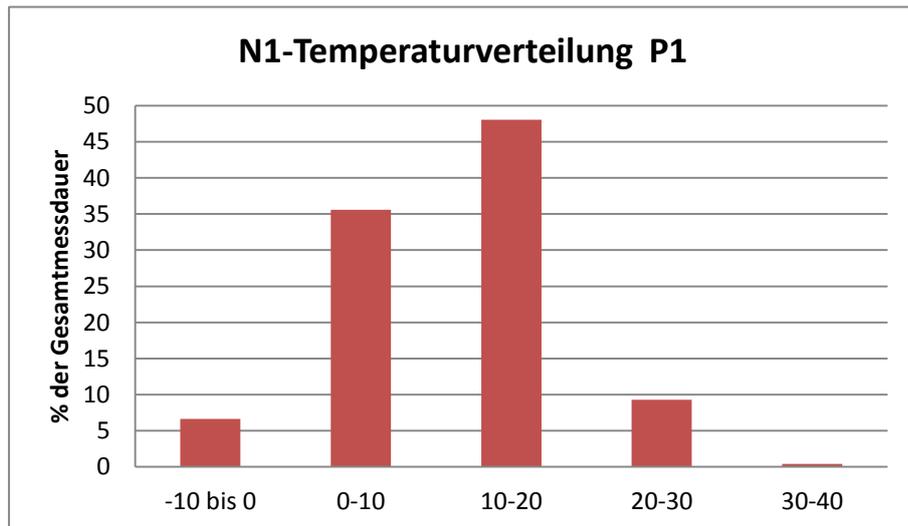


Bild 60: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Innenseite der Originalverglasung liegen im Bereich zwischen 10-20°C. In den Wintermonaten wurden Werte zwischen 0 bis -10°C erreicht. Die höchsten Temperaturen lagen im Bereich zwischen 30 und 40°C und wurden nur etwa zu weniger als 1% der Messzeit registriert. Der Temperaturverlauf an der Außenseite der Originalverglasung ist nahezu identisch. Die Gläser sind in den Wintermonaten außen vermutlich geringfügig länger kalt als innen. Die Temperaturen liegen zu etwa 10 % der Messzeit im Bereich von 0 bis -10°C (Bild 61).

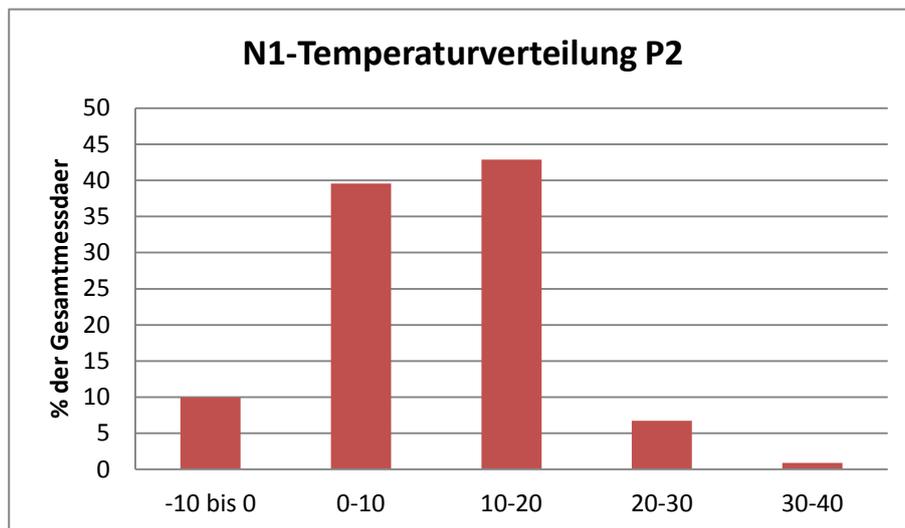


Bild 61: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

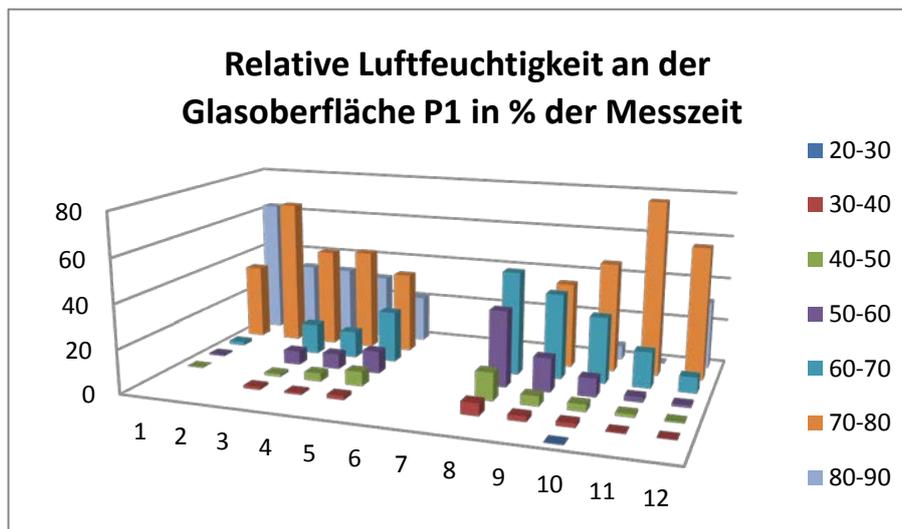


Bild 62: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Innenseite der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

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

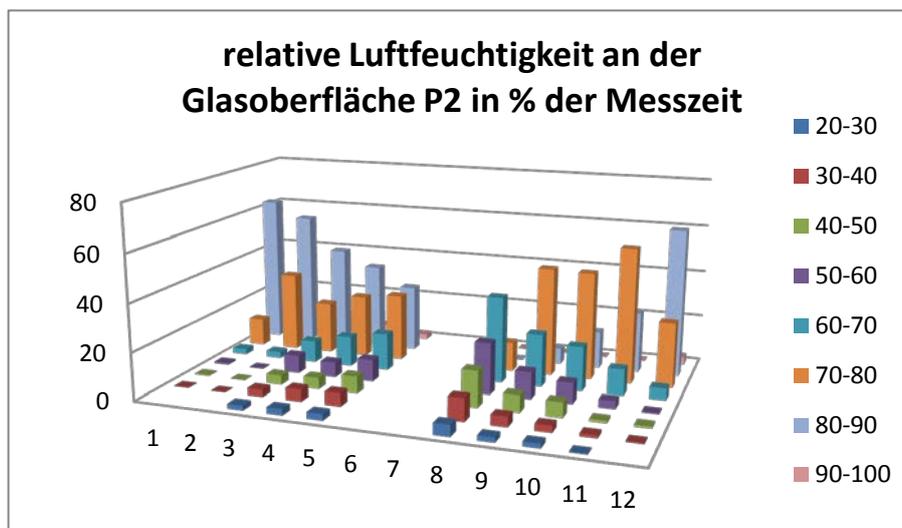


Bild 63: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Originalverglasung im Messzeitraum Januar (1) bis Dezember (12)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit und ihre Häufigkeit an der Außenseite der Originalverglasung sind höher als an der Innenseite. Eine relative Luftfeuchtigkeit über 90 % wurde in den Monaten Dezember (r. F.  $\text{max}$  93,8 %) bis Mai gemessen, im Januar zu 21 % der Messzeit. Tauwasserbildung auf der Innenseite der Originalverglasung wurde jedoch nicht beobachtet. In den übrigen Monaten überwiegt eine relative Luftfeuchtigkeit im unkritischen Bereich.

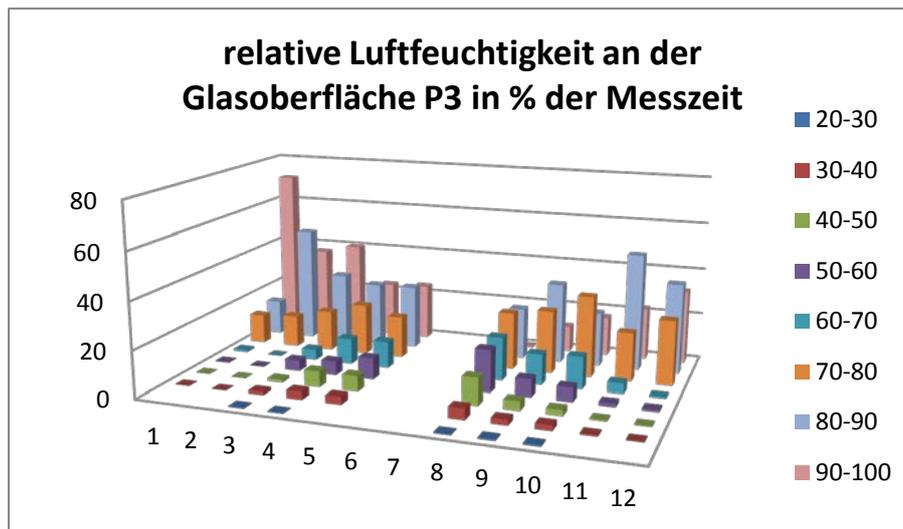


Bild 64: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 3) in den Monaten Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung ist häufig höher als an der Originalverglasung. Werte zwischen 90 und 100 % r. F. wurden während der gesamten Messdauer registriert, im Januar zu 71 % der Messzeit (r. F.  $r_{max} = 100$  %). Dabei wurde auch Kondenswasser auf der Innenseite der Außenschutzverglasung beobachtet.

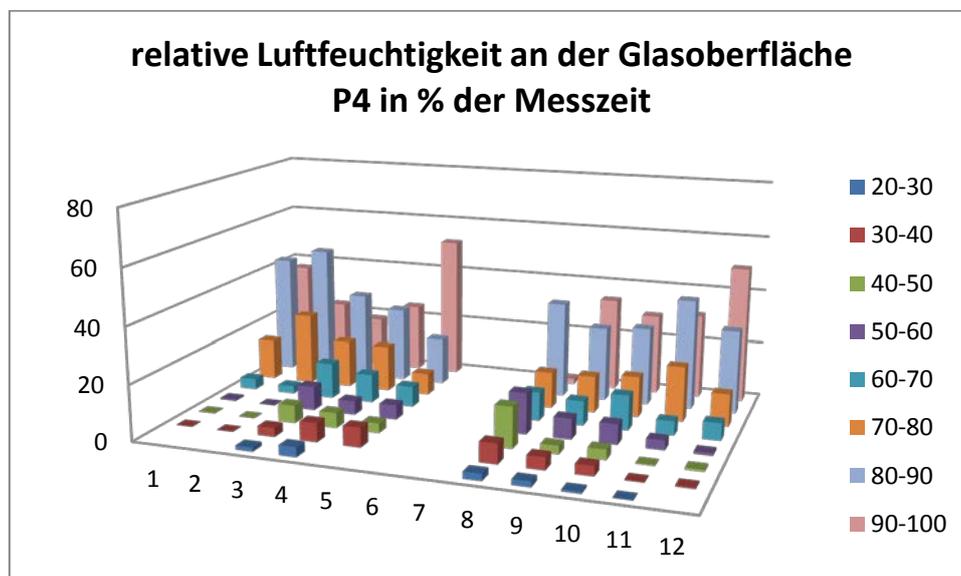


Bild 65: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4) in den Monaten Januar (1) bis Dezember (12)

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Außenschutzverglasung ist wiederum häufig höher als an der Innenseite. Werte zwischen 90 und 100 % r. F. wurden in allen Monaten während der gesamten Messdauer registriert, da sich die Umgebungsbedingungen unmittelbar auswirken.

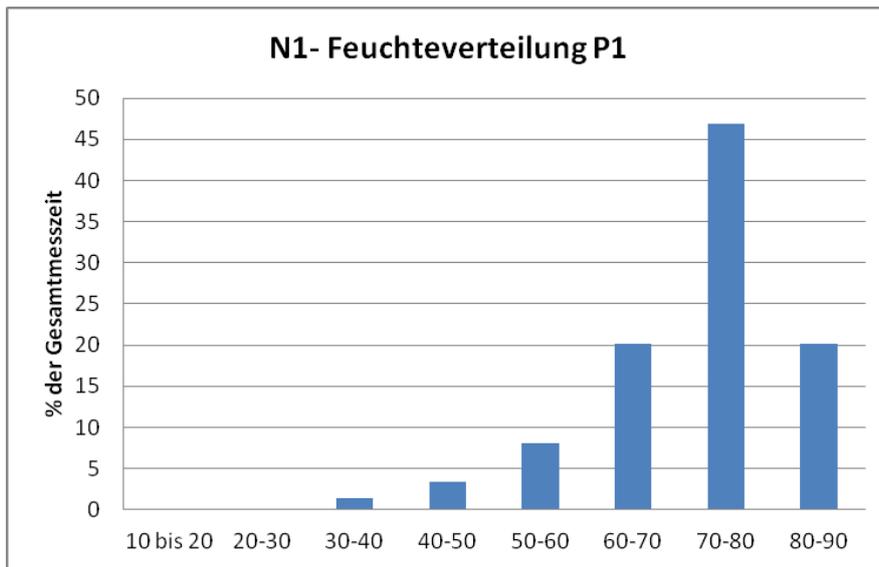


Bild 66: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung liegt zu fast der Hälfte der Messzeit in einem Bereich zwischen 70-80 % r. F. Zu mehr als 20 % der Messzeit wurden Werte über 80 % r. F. registriert. An der Außenseite der Originalverglasung liegen die Werte zu etwa 1/3 der Messzeit über 80 % und erreichen auch Werte zwischen 90 und 100 % r. F. (Bild 67)

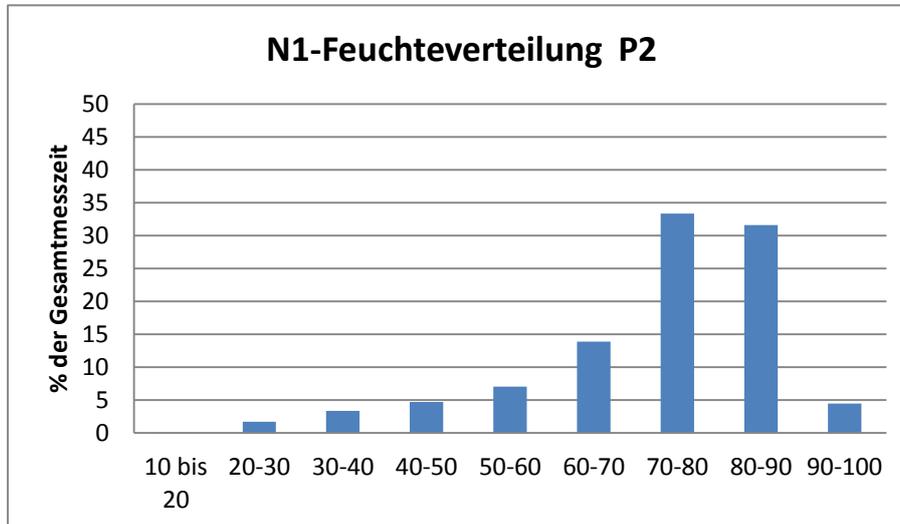


Bild 67: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) im gesamten Messzeitraum

Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde jedoch weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. Die Außenschutzverglasung dämpft den unmittelbaren äußeren Witterungseinfluss.

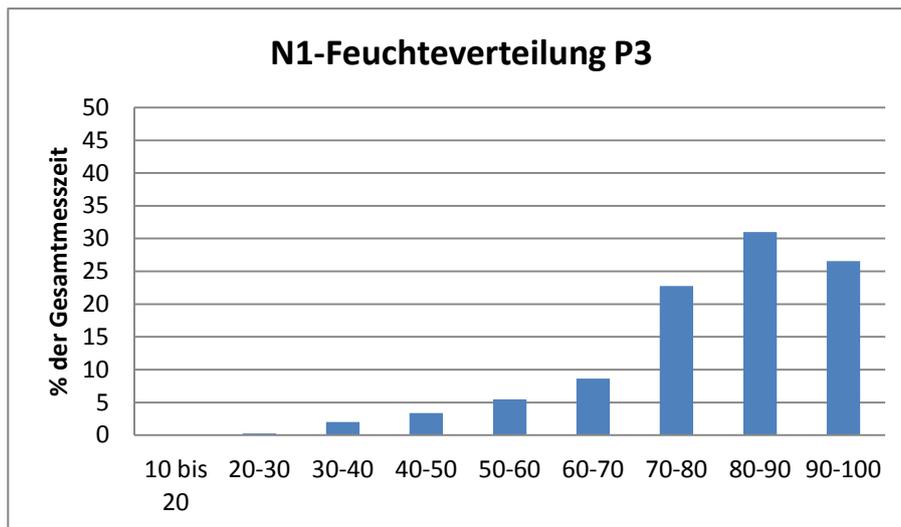


Bild 68: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 3) im gesamten Meßzeitraum

Feuchtebereiche zwischen 90 und 100% zu mehr als ¼ der Meßzeit führten in Abhängigkeit von der Temperatur des Glases zur Tauwasserbildung.

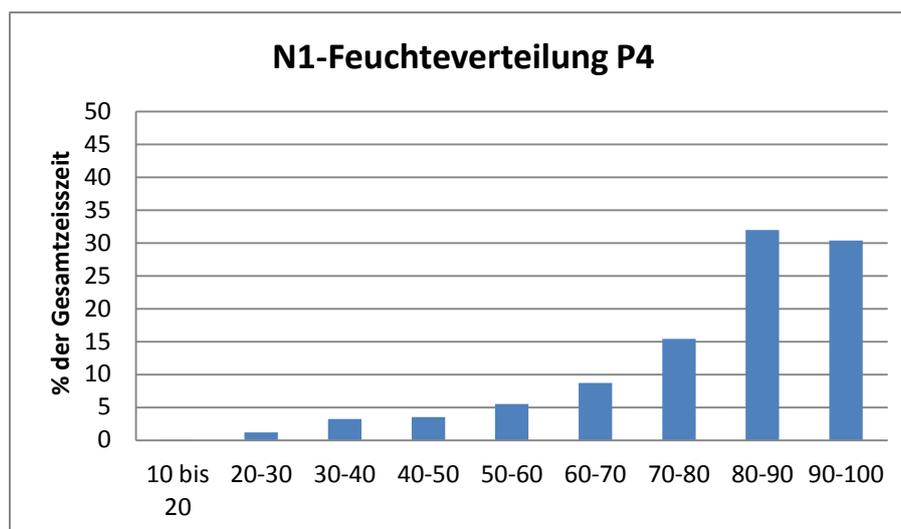


Bild 69: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4) im gesamten Meßzeitraum

Aufgrund des unmittelbaren Witterungseinflusses werden zu 30 % der Meßzeit Feuchtebereiche zwischen 90 und 100 % an der Außenseite der Außenschutzverglasung gemessen. Der Feuchteverlauf nimmt von außen Pos. 4 nach innen Pos. 1 hin ab. Die Messungen zeigen, dass eine Schutzverglasung nicht völlig undurchlässig für Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit konstruiert werden kann. Dennoch ist ein deutlicher Unterschied zwischen einem geschützten und einem nichtgeschützten Fenster besonders hinsichtlich des jahreszeitlichen Verlaufs der relativen Luftfeuchtigkeit festzustellen.

Tabelle 4: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum am Fenster sV

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luftgeschwindigkeit
<b>Monat</b>	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V <sub>Luft</sub> Max [m/s]
12/12	-2,4	15,9	38,8	87,7	-4,3	19,3	30,6	93,8	-7,7	18,9	35,6	100	-10,1	11,1	34,3	100	0,57
01/13	-3,0	14,9	43,4	85,8	-4,6	17,3	36,5	92,3	-6,9	14,7	46,7	100	-9,0	8,3	47,6	100	0,42
02	0,6	4,4	70,1	83,4	-0,6	5,5	68,5	90,9	-2,4	4,0	75	99,1	-3,4	3,2	65,3	96,1	0,26
03	-2,3	15,9	34,1	86,7	-4,9	21,2	23,7	92,3	-9,4	22,3	26,4	100	-12,3	21,5	24,6	99,8	0,61
04	0,7	28,2	33,4	87,6	-0,9	34,4	21,7	93,4	-3,2	33,9	27,8	100	-4,0	32,5	20,2	99,9	0,69
05	11,2	29,5	32,1	89,6	9,9	38,5	19,8	93,7	5,9	33,6	30,2	100	8,1	32,0	32,7	100	0,64
06	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,66
07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,67
8	15,8	32,1	31,1	70	14,0	36,3	23,6	73,9	10,9	35,2	28,6	90,3	8,5	35,2	18,1	93,0	0,60
9	9,6	30,2	30,8	80	7,8	35,9	21,8	84,9	4,5	35,5	27,1	97,6	2,0	34,6	22,1	99,4	0,61
10	7,1	24,4	27,4	83	5,2	29,5	21,6	88,5	1,9	31,4	25,8	99,1	-0,4	29,6	21,2	99,9	0,58
11	3,8	21,7	33,4	80	2,4	25,1	26,5	86	0,1	25,6	30,2	98,2	-1,5	20,4	29,5	99,9	0,62
12/13	2,1	17,0	37,5	76,7	0,4	20,2	30,2	83,3	-2,4	23,5	30,4	97,9	-4,6	20,6	26,0	97,7	0,64

#### 4.4.1.2. Nordseite N3, Fenster nV

Die Klimamesswerte wurden jeweils bei vor Ort Terminen ausgelesen. Das vorhandene Messgerät wurde ohne Modem betrieben, so dass keine kontinuierliche Kontrolle der Funktionsfähigkeit möglich war und es häufiger als an den anderen Messstationen zu Ausfällen kam. Infolge von Geräteausfällen sind Messwertverluste in den Monaten Februar bis Juli 2013 aufgetreten. Die vorhandenen Messwerte wurden in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in Tabelle 5 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

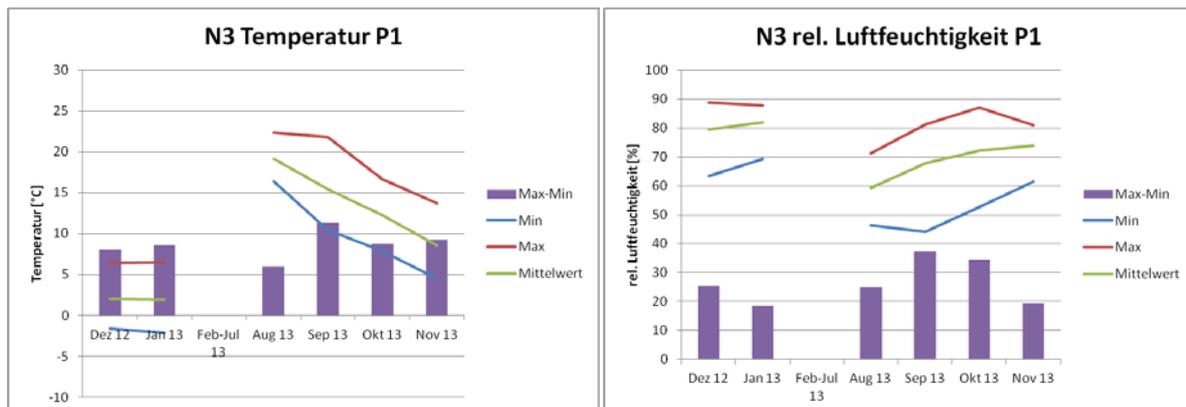


Bild 70-71: Temperatur- und Feuchteextrema sowie –schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nV6 betrug im August 22,4°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -2,1°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat September 11,4 K.

Die Maximalwerte der rel. Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten September bis Januar zwischen 80 und 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nV6 betrug im Dezember 88,8 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im September bei 44,1 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im September mit  $\Delta$  r. F. = 37,2 % festgestellt. Beim direkten Vergleich mit den Messwerten der Südseite (N1) zeigt sich, dass die Maximaltemperatur im August auf der Nordseite etwa 13 K geringer ist und die relative Luftfeuchtigkeit etwa gleich hohe Werte erreicht. Die Minimalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit liegen auf der Südseite deutlich unter denen der Nordseite ( $\Delta$  r. F. ca. 20 %), somit fallen auch die Luftfeuchteschwankungen auf der Nordseite geringer aus.

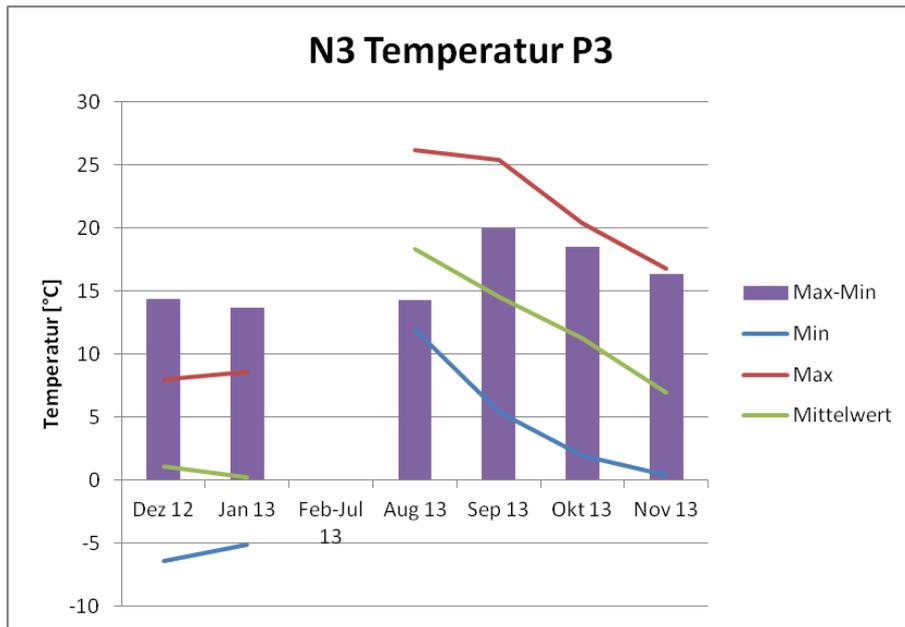


Bild 72: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nV6 betrug im August 26,2°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -6,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat September bei 20K.

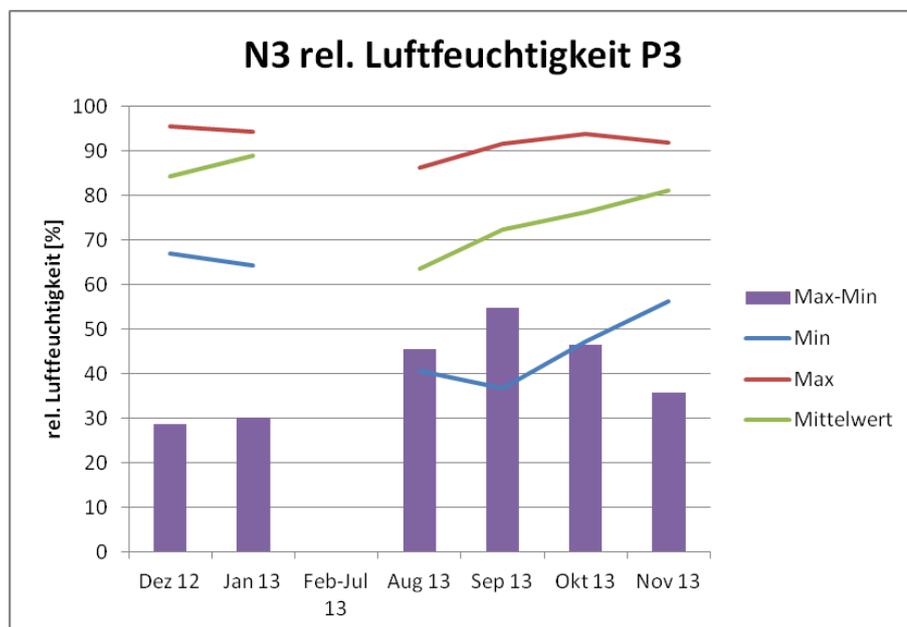


Bild 73: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in den Monaten September bis Januar deutlich über 90 % r.F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nV6 betrug im Dezember 95,5 % r. F. im Vergleich zu 100

% r. F. auf der Südseite. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im September bei 36,8 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im September mit  $\Delta$  r. F. = 54 % festgestellt.

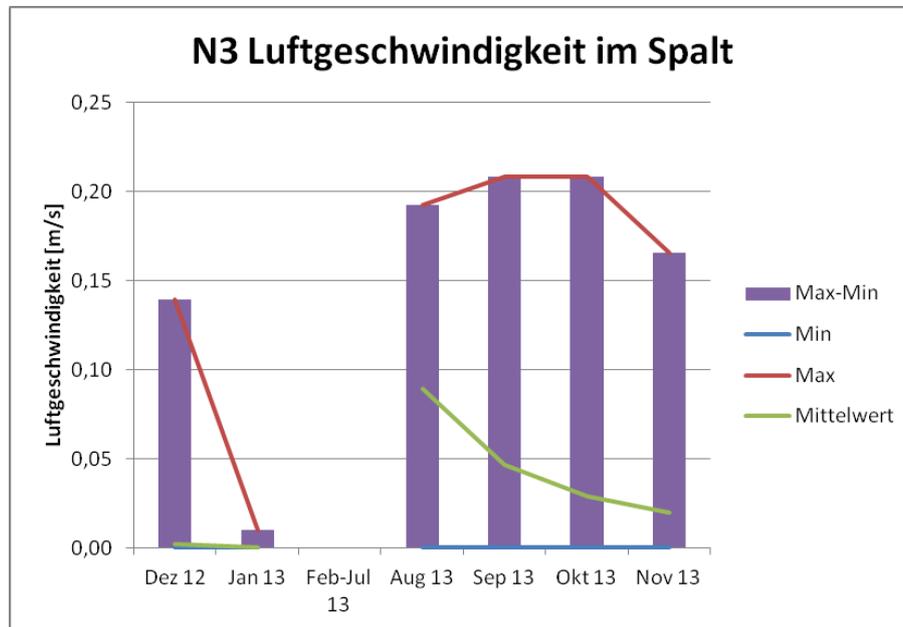


Bild 74: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster nV

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld nV betrug in den Monaten September und Oktober 0,21 m/s und liegt damit deutlich unter den Maximalwerten der Südseite. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen und dass die Luftströmung in den Wintermonaten Dezember und Januar fast völlig zum Erliegen kommt. Glasmalereifelder in unterschiedlichen Höhen auf der Nordseite erwärmen sich kaum stärker als die Felder der ersten Reihe. Die Temperaturdifferenzen zwischen unten (B1) und oben (B2) betragen maximal 1 K, so dass daraus auch keine Rückschlüsse auf einen Einfluss auf die Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung möglich sind. Die Extremwerte von Temperatur und relativer Luftfeuchte sind auf der Nordseite zwar geringer als auf der Südseite, eine damit einhergehende höhere Beanspruchung der Glasmalereien am Fenster sV ist daraus jedoch noch nicht abzuleiten. Entscheidend für die Beanspruchung der Glasmalereien ist die Dauer von extremen Klimaereignissen, insbesondere die Zeitspanne bei einer relativen Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80 % in Kombination mit einer Belastung durch Luftschadstoffe.

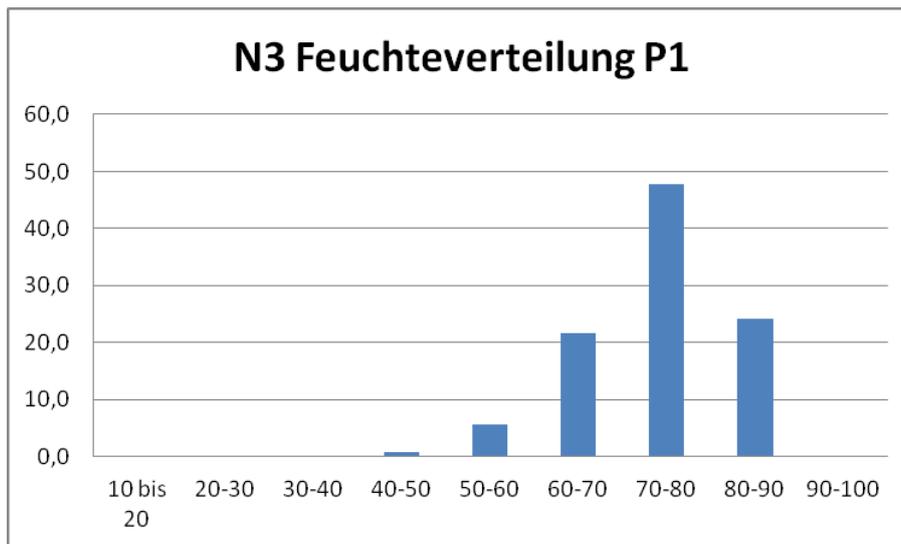


Bild 75: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) im gesamten Messzeitraum

An der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) von Feld nV6 wurden zu mehr als 24% der Messdauer eine relative Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80 % gemessen. Im Vergleich dazu waren es auf der Südseite an Feld sV1 etwa nur 20 % der Messdauer (vgl. Bild 66).

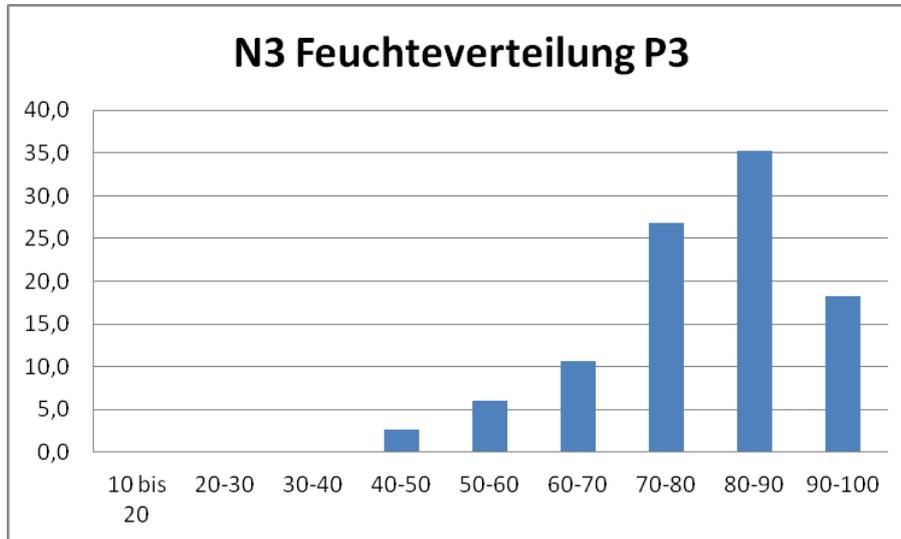


Bild 76: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.3) im gesamten Messzeitraum

Feuchtigkeitswerte zwischen 90-100 % r. F. werden zu 18 % der Gesamtmesszeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung gemessen. Die Maximalwerte lagen bei 95,5 %. Im Vergleich dazu lagen die Werte auf der Südseite bei 25 % der Messzeit und es wurden über mehrere Monate hinweg Werte von 100 % r. F. erreicht, was zur sichtbaren Kondenswasserbildung auf der Innenseite der Außenschutzverglasung führte.

Tabelle 5: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum am Fenster nV

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Luftgeschwindigkeit
<b>Monat</b>	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		B1 Temperatur Min/Max [°C]		B2 Temperatur Min/Max [°C]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V <sub>Luft</sub> Max [m/s]
12/12	-1,6	6,4	63,5	88,2	-4,6	6,1	-3,5	6,5	-6,4	8,0	67,0	95,5	0,14
01/13	-2,1	6,4	69,3	87,8	-4,5	6,0	-3,6	7,0	-5,1	8,6	64,3	94,4	0,01
02-07	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
8	16,4	22,4	46,3	71,3	13,6	23,9	14,5	25,1	12,0	26,2	40,6	86,2	0,19
9	10,5	21,8	44,1	81,1	7,2	22,8	8,2	24,1	5,4	25,4	36,8	91,5	0,21
10	7,9	16,6	52,7	87,2	4,3	17,9	5,6	18,7	1,9	20,4	47,3	93,7	0,21
11	1,8	14,6	61,5	81	1,8	14,6	2,6	15,2	0,4	16,8	56,2	92,0	0,17

#### **4.4.2. Waldenburg**

Die Klimamessungen in der Pfarrkirche Waldenburg wurden im Zeitraum vom 17.09.2012 – 26.02.2013 am Fenster nXI und vom 17.09.2012-11.12.2013 am Fenster nXII durchgeführt. Die Messungen am Fenster nXI erfolgten vor der Restaurierung mit der alten Schutzverglasung bis zum Ausbau des Fensters. Beide Fenster haben eine Höhe von ca. 11,50 m und eine Breite von 2,10 m. Die Maße der einzelnen Felder sind 90 x 90 cm. Der Abstand zwischen Original- und der neuen Außenschutzverglasung beträgt 7-8 cm. Am unteren Fenstersims befindet sich eine Lufteintrittsöffnung von ca. 3-4 cm über die gesamte Breite des Glasmalereifeldes. Die Luftaustrittsöffnung am oberen Feld hat eine Breite von ca. 1-2 cm. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas.

##### **4.4.2.1. Fenster nXI**

Die vorhandene Außenschutzverglasung wurde im Bereich des Maßwerkes von außen belüftet. Im unteren Bereich war jedoch keine Lufteintrittsöffnung vorhanden, so dass eine Luftströmung im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung nicht möglich war. Die Klimadaten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden an den Pos. 1 - Pos. 4 gemessen und die Messwerte monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. Die vorhandenen Daten sind in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet worden. Mit Hilfe einer Konvertierung in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit berechnet. Diese Werte sind in Tabelle 6 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

Die Extremwerte, sowohl Minima als auch Maxima von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit, nehmen von innen nach außen zu (Pos. 1...Pos. 4). Da es sich um ein Nordfenster handelt und die Messzeit das Herbst- und Winterhalbjahr umfasst, sind die Temperatur- und Feuchteschwankungen moderat. Auf eine detaillierte Darstellung von Temperatur- und Feuchtebereichen für die einzelnen Messpositionen wird daher verzichtet. Interessant für den Erhaltungszustand der Glasmalereien ist die Dauer von Extremwerten bei Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung.

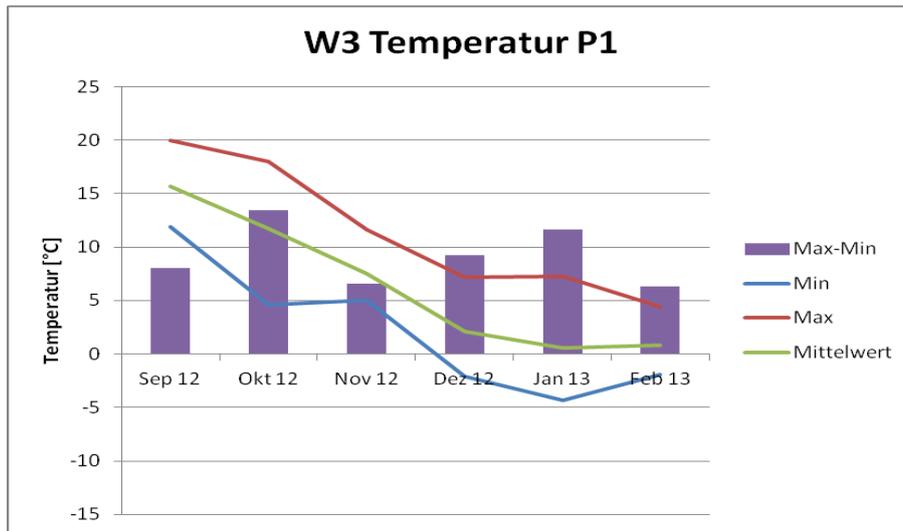


Bild 77: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nX11a betrug im September 20,0°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -4,3°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat Oktober 13,5 K.

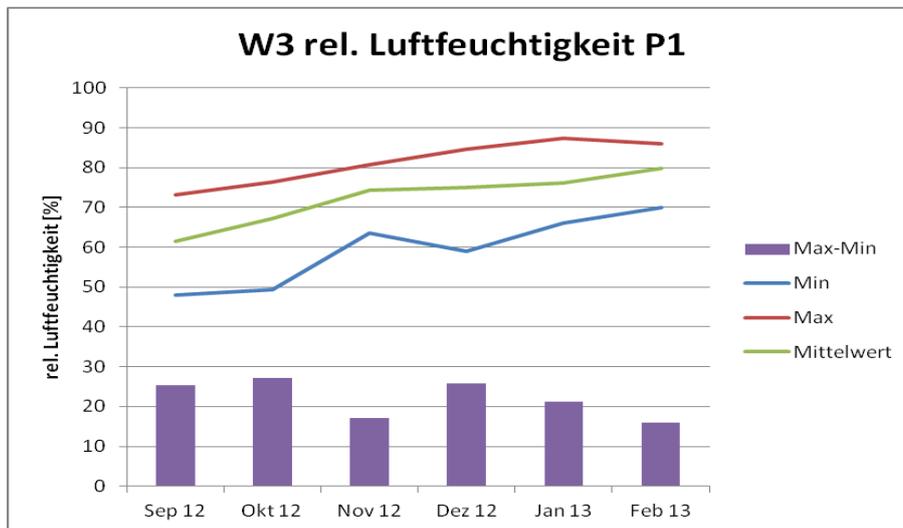


Bild 78: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nX11a betrug im Januar 87,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im September bei 48,0 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Oktober mit  $\Delta$  r. F. = 27,1 % festgestellt.

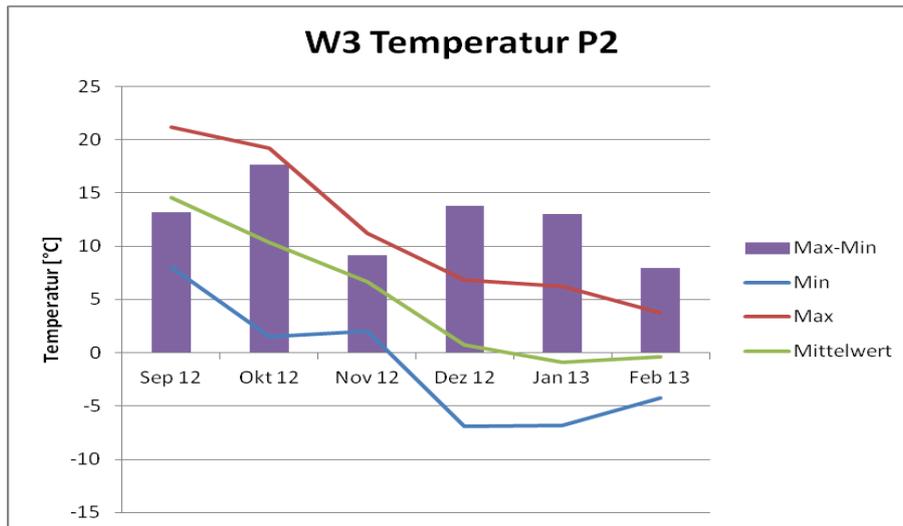


Bild 79: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nX11a betrug im September 21,2°C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei -6,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Oktober bei 17,9 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe Temperaturen und niedrige Temperaturen etwa gleich häufig auftreten (Tag-Nachtzyklus).

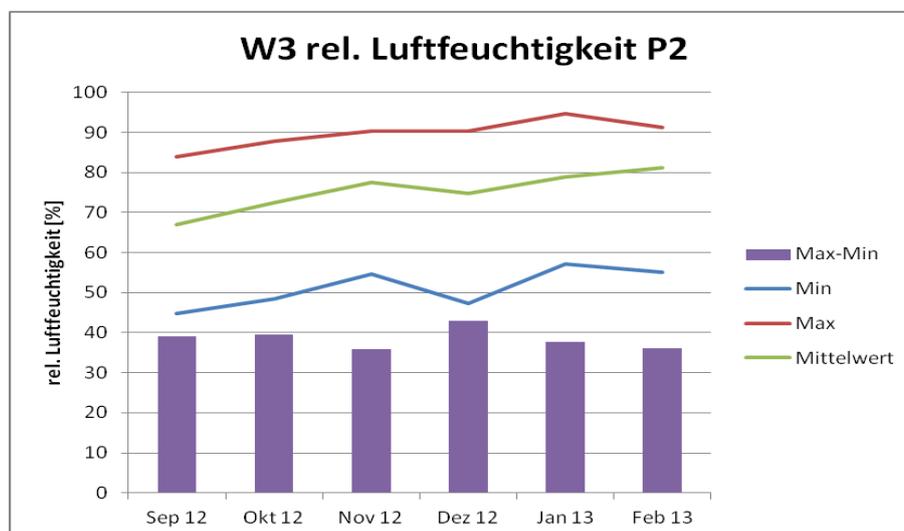


Bild 80: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember bis Februar deutlich über 90 % r. F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sV1 betrug im Januar 94,7 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im September bei 44,9 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Dezember mit  $\Delta$  r. F. = 43 % festgestellt.

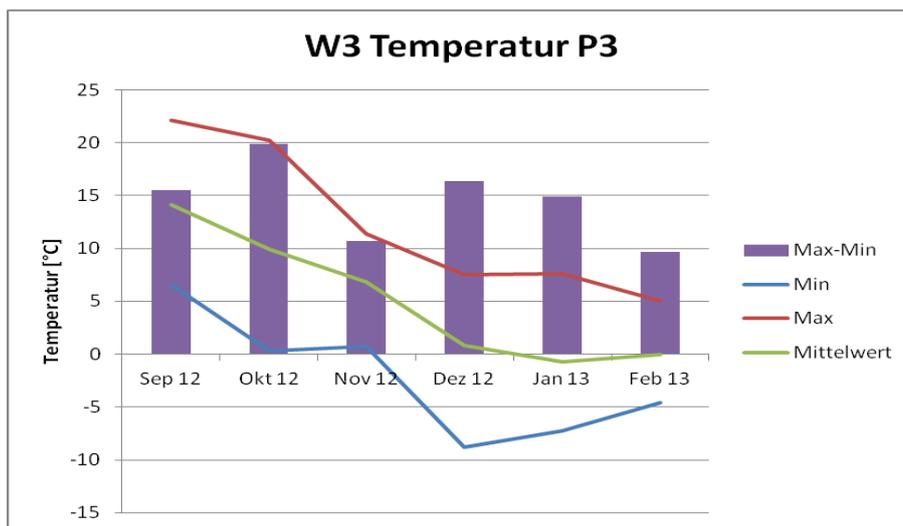


Bild 81: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nX11a betrug im September 22,1°C, die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei - 8,3°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat Oktober 19,1 K.

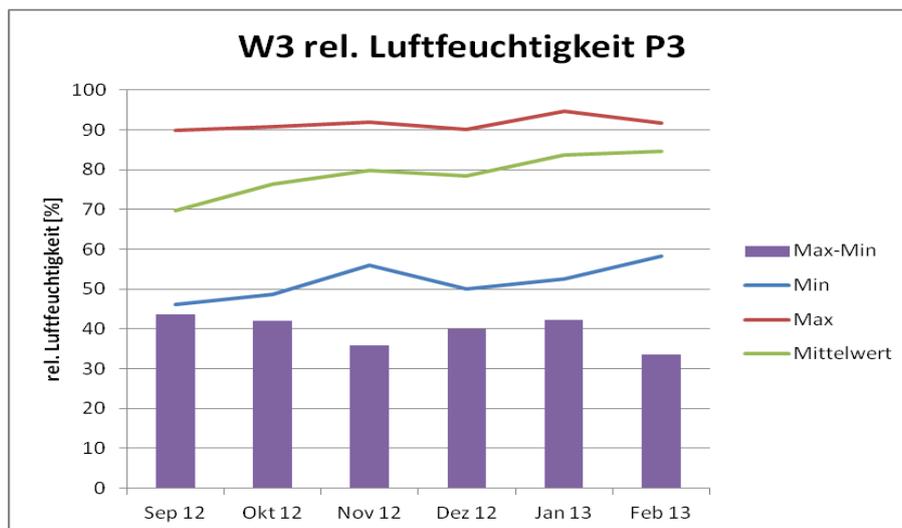


Bild 82: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten September bis Februar nahe bzw. oberhalb von 90 %. Die maximale Feuchtigkeit lag im Januar bei 94,8 % r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im September mit  $\Delta$  r. F. = 43,6 % festgestellt.

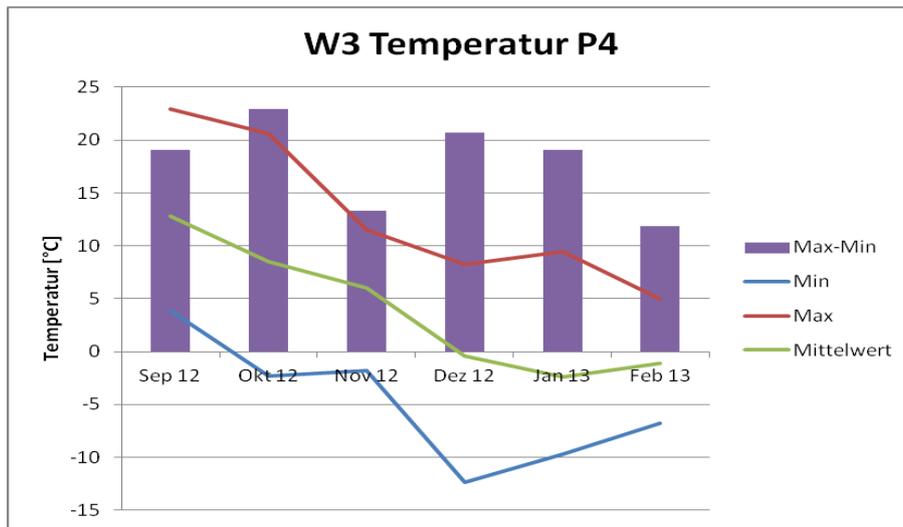


Bild 83: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Feld nX11a betrug im September 22,9°C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei - 12,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Oktober bei 23 K.

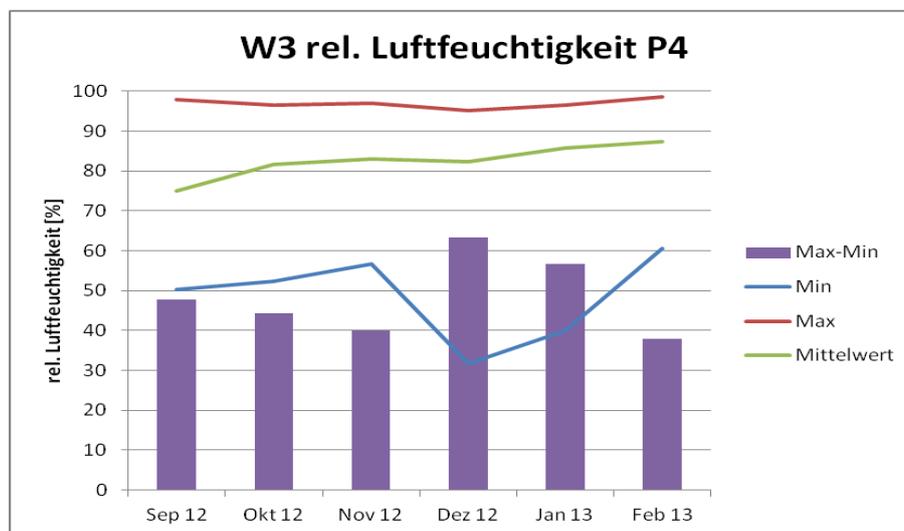


Bild 84: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen im Messzeitraum deutlich über 90 %. Der Maximalwert betrug im Februar 98,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Dezember bei 31,8 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde ebenfalls im Dezember mit  $\Delta$  r. F. = 63,4 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten.

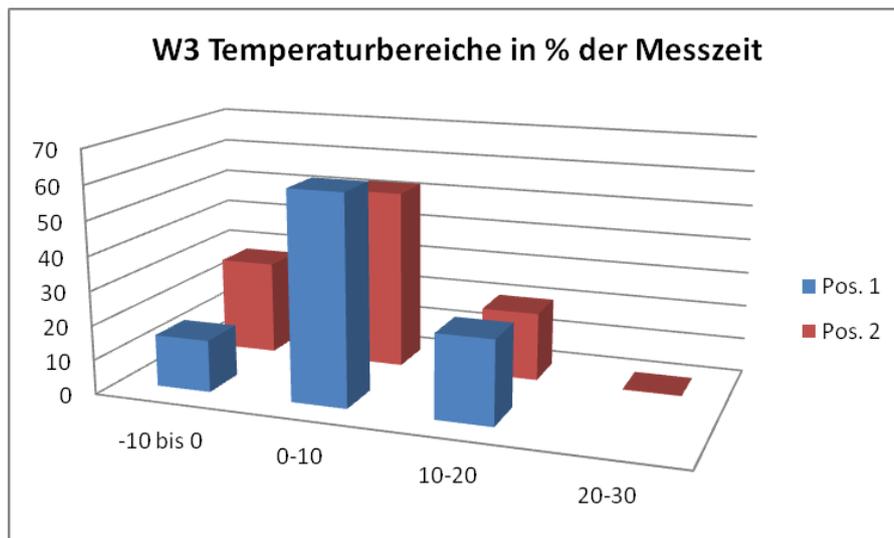


Bild 85: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Innenseite der Originalverglasung lagen im Messzeitraum im Bereich zwischen 0-10°C. In den Wintermonaten wurden Werte zwischen 0 bis -10°C gemessen. Die höchsten Temperaturen an Pos. 1 lagen im Bereich zwischen 10 und 20°C. Der Temperaturverlauf an der Außenseite der Originalverglasung ist nahezu identisch. Die Gläser sind in den Wintermonaten außen geringfügig länger kalt als innen. Lediglich zu 0,2 % der Messzeit wurden an Pos. 2 Temperaturen zwischen 20-30°C gemessen.

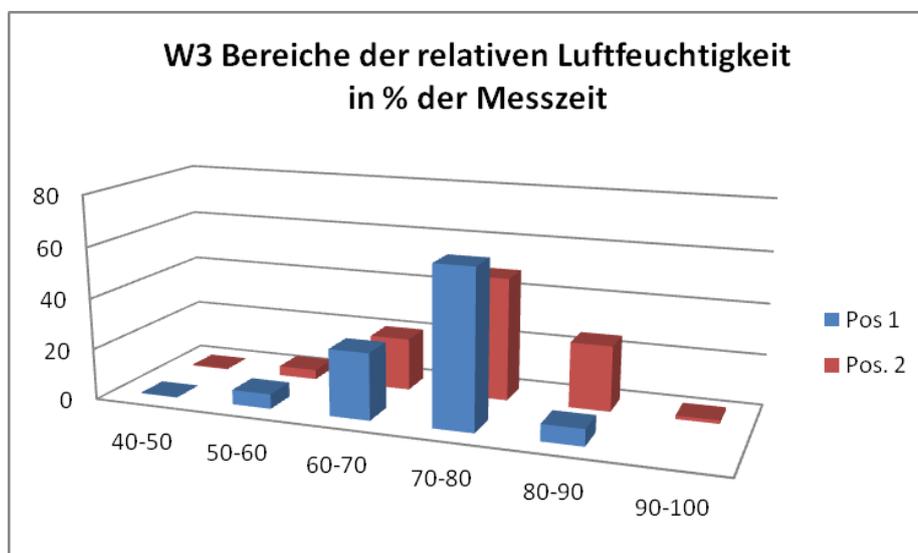


Bild 86: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit der Originalverglasung (Pos1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) liegt zu etwa 2/3 der Messzeit in einem Bereich zwischen 70-80 %. Auf der Außenseite wurden zu 25 % der Messzeit Werte über 80 % r. F. registriert und lediglich zu 1,4 % der Messzeit Werte gemessen, die 90 % r. F. überschreiten.

**Tabelle 6: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 09/12 bis 02/13 an den Fenstern nXI und nXII**

nXI	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luftgeschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V <sub>Luft</sub> Max [m/s]
09/12	11,9	20	48,0	73,3	8,0	21,2	44,9	83,9	6,6	22,1	46,2	89,8	3,8	22,9	50,3	98,0	k.M.
10	4,5	18	49,4	76,6	1,5	19,2	48,4	87,9	0,3	20,2	48,7	90,8	-2,3	20,6	52,3	96,6	k.M.
11	5	11,6	63,6	80,8	2,0	11,2	54,6	90,4	0,7	11,4	56,1	91,9	-1,8	11,5	56,8	96,9	k.M.
12	-2,1	7,2	58,9	84,7	-6,9	6,9	47,4	90,4	-8,8	7,5	50,1	90,2	-12,4	8,3	31,8	95,2	k.M.
01/13	-4,3	7,3	66,2	87,5	-6,8	6,2	57,1	94,7	-7,2	7,6	52,6	94,8	-9,7	9,4	40,0	96,6	k.M.
02	-1,9	4,4	70,1	86,1	-4,2	3,8	55,2	91,4	-4,6	5,0	58,2	91,7	-6,8	5,0	60,6	98,5	k.M.
Fenster nXII																	
09/12	12,2	27,3	32,1	72,2	10,4	32,0	26,0	78,0	6,7	34,1	28,2	92,6	4,3	23,4	44,2	96,1	0,35
10	4,6	10,5	54,6	70,6	3,2	9,7	55,0	74,0	0	7,0	58,4	85,9	-1,7	6,8	47,7	84,8	k.M.
11	5,1	12,0	59,8	81,3	3,6	12,6	59,4	83,4	0,3	11,2	62,5	96,7	-1,1	12,3	53,3	94,7	k.M.
12	-2,0	7,2	62,7	85,9	-3,6	7,9	62,4	86,9	-7,2	6,9	70,3	97,9	-9,2	9,0	28,0	95,8	0,26
01/13	-4,5	7,1	66,3	88,3	-5,6	7,6	64,2	89,3	-8,6	7,0	61,4	99,2	1,3*	9,1*	34,8*	97,3*	0,28
02	-2,0	4,7	66,5	86,7	-3,0	5,2	66,9	90,3	-5,8	5,3	67,6	98,3	-0,6*	5,2*	62,4*	96,6*	0,25

\*Messwertverluste infolge von Geräteausfall, k.M... keine Messwerte aufgezeichnet

#### 4.4.2.2. Fenster nXII

Das Fenster nXII ist bereits mit einer Außenschutzverglasung nach Erkenntnissen und dem Stand der Technik eines 1999 abgeschlossenen DBU-Projektes geschützt. Die Klimamessungen an diesem Fenster erfolgten zur Evaluierung der neuen Schutzverglasung und im Vergleich zum alten Drahtglassystem. Die Klimadaten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden an den Pos. 1 - Pos. 4 gemessen, zusätzlich erfolgten Messungen der Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung sowie Temperaturmessungen in unterschiedlicher Höhe auf der Außenseite der Originalverglasung. Die Messwerte wurden monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. Auch in Waldenburg kam es zeitweise aufgrund von Stromausfällen zu Unterbrechungen der Modemverbindungen, so dass die Funktionsfähigkeit der Messgeräte nicht überprüfbar war. Infolge von Geräteausfällen sind Messwertverluste in den Monaten Oktober/November 2012, Januar/Februar, April–Juni und August, November 2013 aufgetreten. Ein Ausfall des Temperatur-Feuchtefühlers an Pos. 4 infolge von Korrosion der Bauteile führte zu Messwertverlusten im Januar/Februar. Im Zeitraum von Juni bis August war der Temperatur/Feuchtefühler an Pos. 2 defekt. Die vorhandenen Messwerte wurden in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet. Mit Hilfe einer Konvertierung der Daten in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit berechnet. Die Werte sind in Tabelle 6 und 7 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen. Tabelle 6 zeigt die Gegenüberstellung der Klimadaten von September 2012 - Februar 2013 von Fenster nXI mit der alten Schutzverglasung im Vergleich zu Messwerten an Fenster nXII.

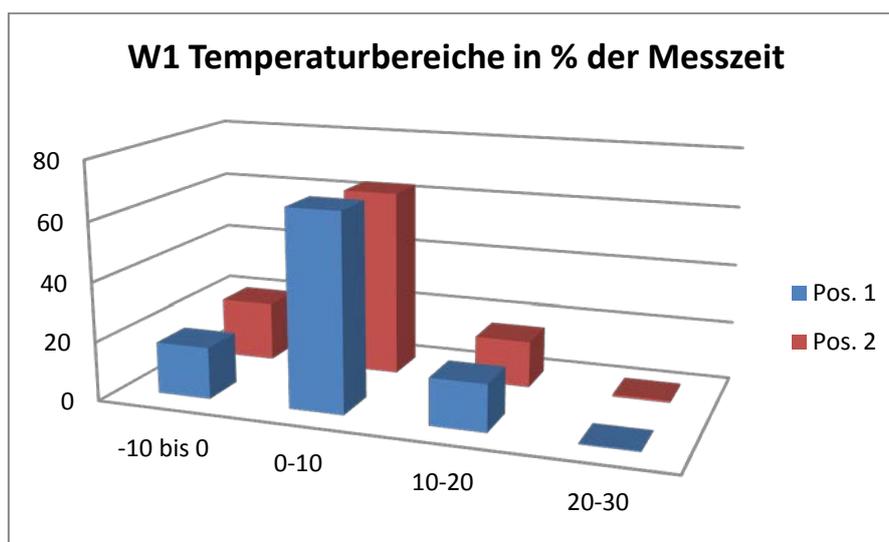


Bild 87: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung von Fenster nXI (Pos. 1, Pos. 2) in % der Messdauer von September 2012 bis Februar 2013 (vgl. Bild 85)

Im Vergleich zum Fenster nXI sind am Fenster nXII die Temperaturen auf der Innen- und Außenseite der Originalverglasung nahezu identisch. In den Wintermonaten wurden Temperaturen zwischen -10 bis 0°C außen (Pos. 2) längere Zeit gemessen als innen (Pos. 1). Ein entsprechender Verlauf wurde auch am Fenster nXI festgestellt (Bild 85). Vermutlich aufgrund der Lage des Fensters nXII im Kirchenschiff wurden auch an der Innenseite für 0,3 % der Messzeit Temperaturen zwischen 20-30°C gemessen ( $T_{\max} = 27,3^{\circ}\text{C}$ ).

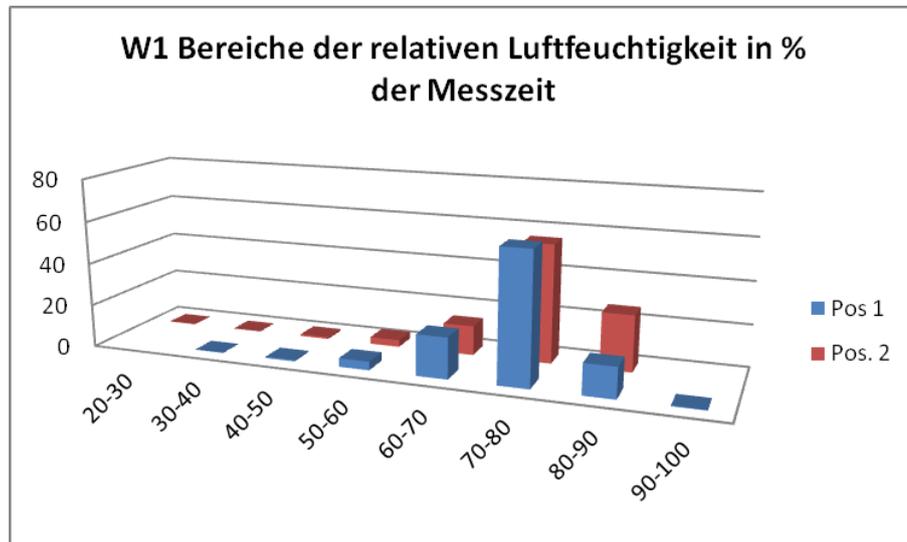
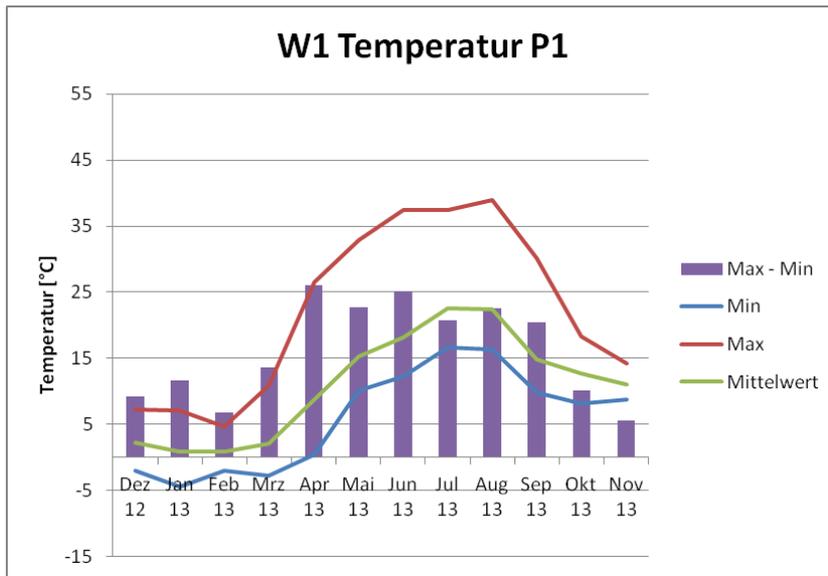


Bild 88: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung am Fenster nXII (Pos1, Pos. 2) in % der Messdauer von September 2012 bis Februar 2013 (vgl. Bild 86)

Die Dauer der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung (Pos. 1, 2) im Bereich zwischen 60-70 und 70-80 % r. F. sowie an der Außenseite (Pos. 2) zwischen 80-90 % r. F. ist an den Fenstern nXI und nXII identisch. Dagegen wird der Bereich zwischen 80-90 % r. F. an den Innenseite (Pos. 1) etwa doppelt so lang gehalten wie am Fenster nXI. Auch Feuchtebereiche zwischen 90-100 % wurden an Pos. 1 gemessen (r.  $F_{\max}$ : 90,3 %, 0,4% der Messzeit). Der Vergleich der Klimadaten an beiden Fenstern in einem identischen Messzeitraum zeigt, dass weitere signifikante Verbesserungen der klimatischen Bedingungen durch eine neue Außenschutzverglasung am Fenster nXI wahrscheinlich nicht zu erwarten sind. Allerdings hat eine innenbelüftete Außenschutzverglasung den Vorteil, dass der direkte Kontakt mit Luftschadstoffen und Feinstaub nicht mehr möglich ist. Entsprechende Messergebnisse sind im Abschnitt 4.5 zusammengestellt. Detaillierte Klimadiagramme für den Messzeitraum Dezember 2012 bis November 2013 am Fenster nXII sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt.



Bilder 89: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung (Pos. 1)

Die Maximaltemperaturen an der Originalverglasung sind im Jahresverlauf auf der Innenseite (Pos. 1) geringer als auf der Außenseite (Pos. 2). Im Juni liegt die Maximaltemperatur an Pos. 1 bei 37,4°C, an Pos. 2 bei 43,4°C. Die maximalen Temperaturschwankungen im April betragen an der Innenseite 26,4 K, an der Außenseite 32,6 K.

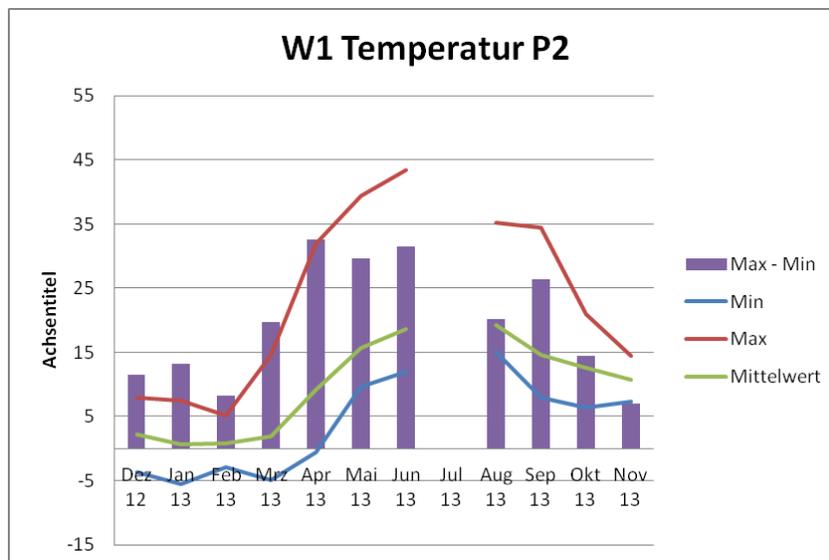


Bild 90: Temperaturextrema und –schwankungen an der Originalverglasung (Pos. 2)

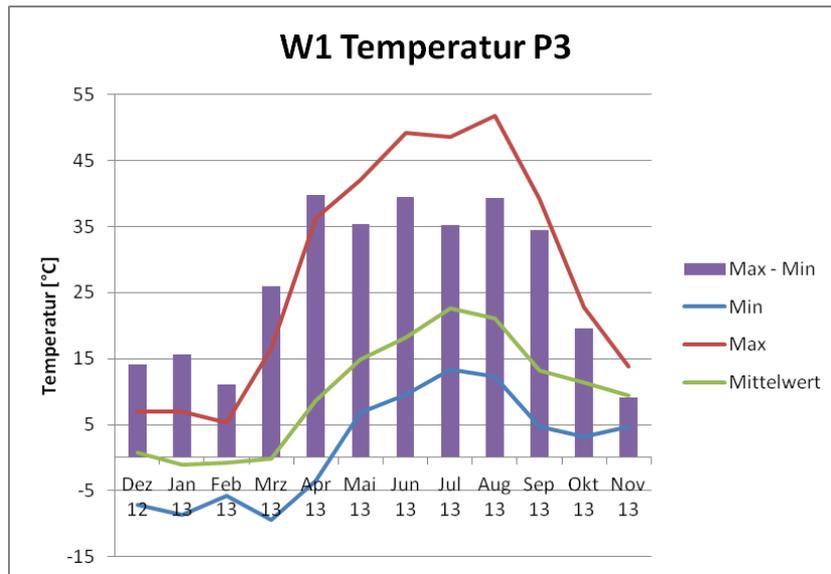


Bild 91: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenschutzverglasung (Pos. 3)

Auf der Innenseite der Außenschutzverglasung werden die höchsten Temperaturen gemessen. Der Maximalwert liegt im August bei 51,7°C, während an der Außenseite zur gleichen Zeit maximal 33,4°C gemessen wurden. Im Januar, Februar, April, Mai und Juni sind Messwertverluste an Pos. 4 infolge eines defekten Fühlers und Geräteausfällen aufgetreten. Die minimale Temperatur mit -11,8°C wurde im März an Pos. 4 gemessen. Sie beträgt an Pos. 3 im gleichen Monat -9,4°C und erreicht Werte von -5 °C an Pos. 2 und -2,8°C an Pos. 1. Die Außenschutzverglasung verringert im Winter die Abkühlung auf extreme Minustemperaturen. Im Sommer hingegen sorgt die Außenschutzverglasung für eine Aufheizung des Zwischenraumes, so dass die Originalscheiben zum Teil auf der Außenseite (Pos. 2) wärmer sind als die Außenseite (Pos. 4) der Außenschutzverglasung. Umso wichtiger ist es, dass die gesamte Konstruktion so erfolgt, dass eine Luftzirkulation im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung möglich ist.

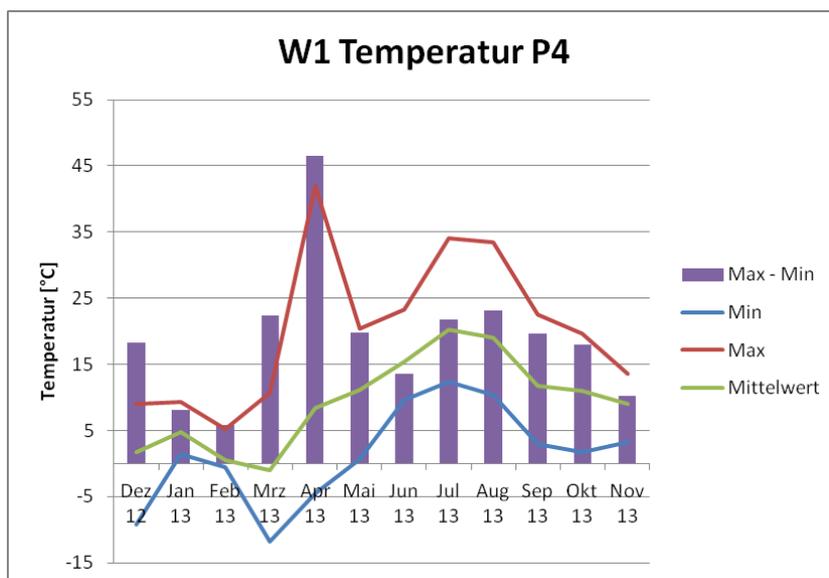


Bild 92: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenschutzverglasung ( Pos. 4)

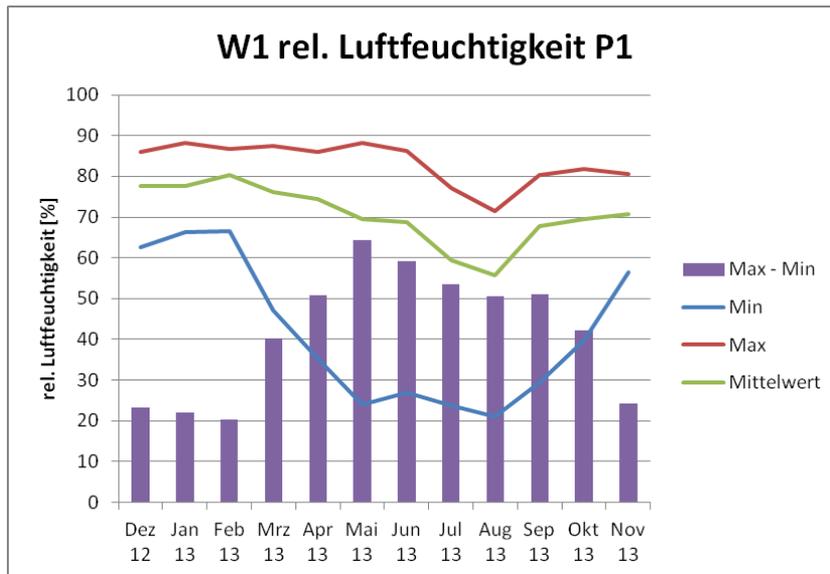


Bild 93: Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung (Pos. 1)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit liegen wiederum auf der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) etwas niedriger als auf der Außenseite (Pos. 2). Im Januar beträgt sie an Pos. 1 maximal 88,3 % r. F., im Vergleich zu 89,3 % r. F an Pos. 2. Die monatlichen Schwankungen sind auf der Außenseite deutlich höher als auf der Innenseite. Im Mai lagen sie bei  $\Delta$ r. F. 64,2 % auf der Innenseite und  $\Delta$ r. F. 72,3 % auf der Außenseite.

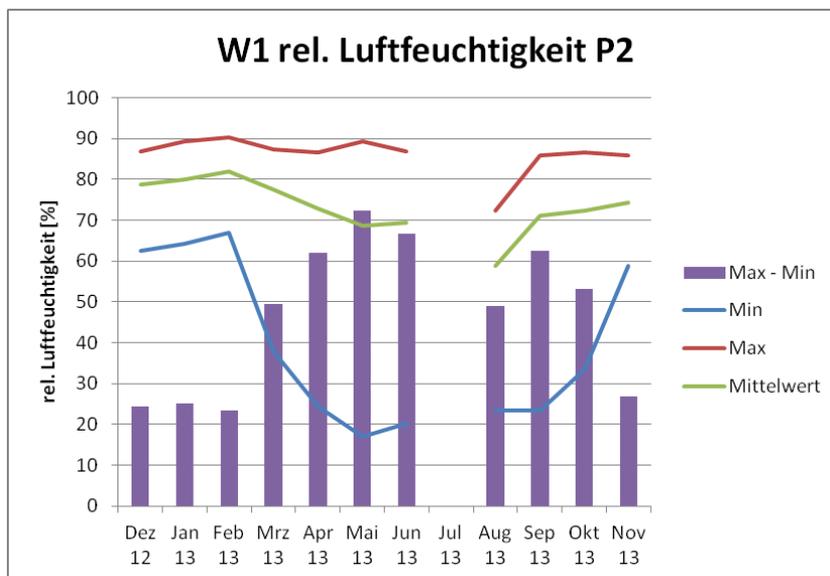


Bild 94: Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung (Pos. 2)

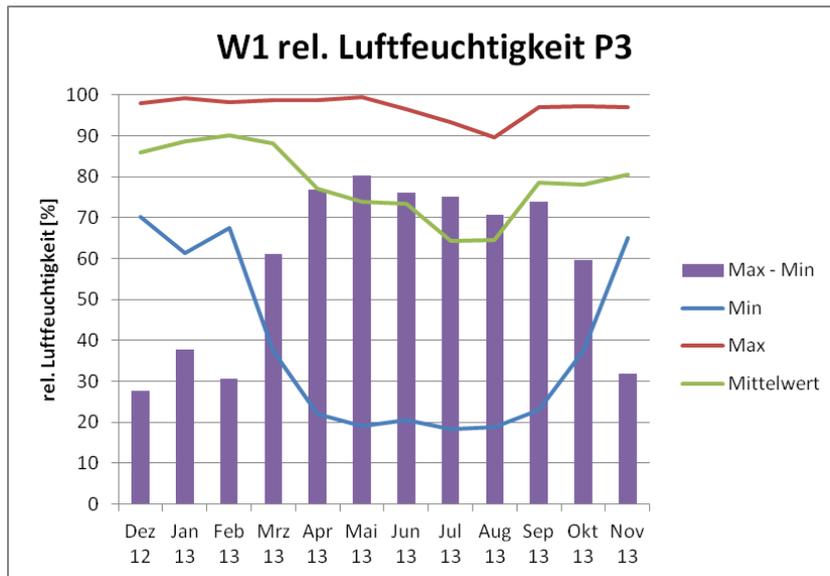


Bild 95: Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung (Pos. 3)

Extremwerte von 100 % r. F. wurden an der Außenschutzverglasung sowohl an Pos. 3 als auch an Pos. 4 gemessen. Die höchsten Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit wurden im Mai an Pos. 3 mit ca.  $\Delta$ r. F. 80 % gemessen. Trotz der Messwertverluste an Pos. 2 im Juli/August und an Pos. 4 zwischen April und Juni ist die Tendenz, dass die Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit von außen nach innen hin (Pos. 4...Pos. 1) gedämpft werden, eindeutig erkennbar. Die hohe relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung kann zur Bildung von Kondenswasser führen. An der Originalverglasung dürfte aufgrund der Klimabedingungen Tauwasserbildung nicht stattfinden.

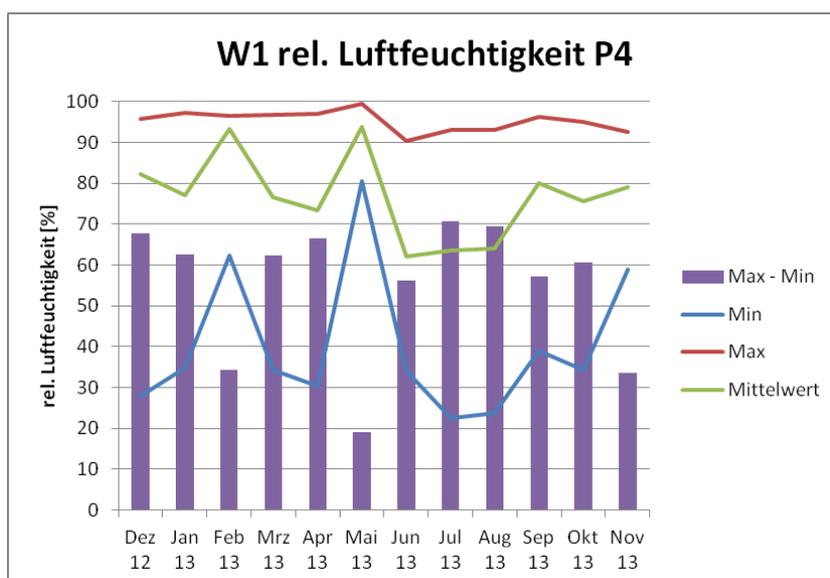


Bild 96: Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

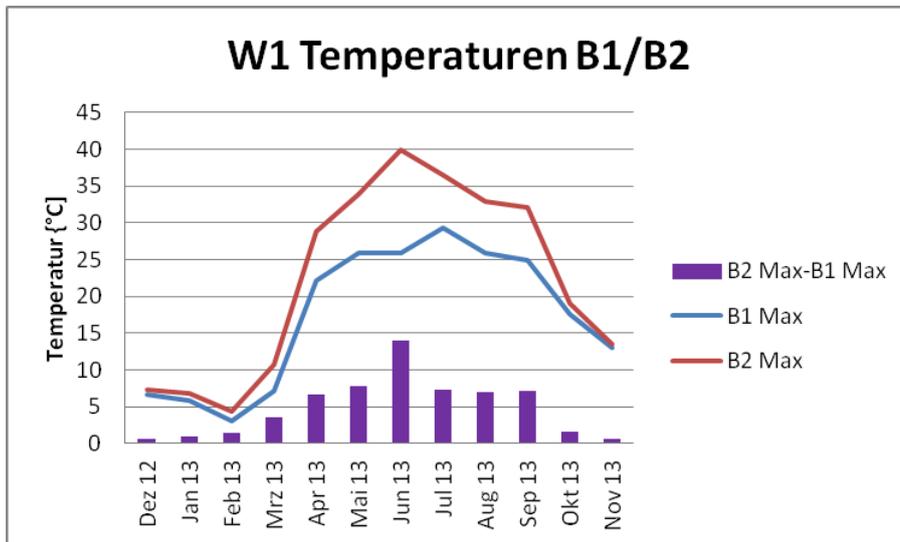


Bild 97: Temperaturmaxima (B1/B2) und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in unterschiedlicher Höhe (Feld nXI1b, nXI 6b)

Die NTC Doppelsensoren zur Temperaturmessung in unterschiedlicher Höhe an einem Fenster liefern Messwerte, die den Temperaturunterschied zwischen dem Feld 1b und dem Feld 6b deutlich machen. Bei einem Höhenunterschied von ca. 4,50 m beträgt der Temperaturunterschied im Juni 14 K zwischen der Maximaltemperatur am Feld nXII1b und nXII6b. In Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Sonneneinstrahlung sind diese Differenzen in den Wintermonaten geringer.

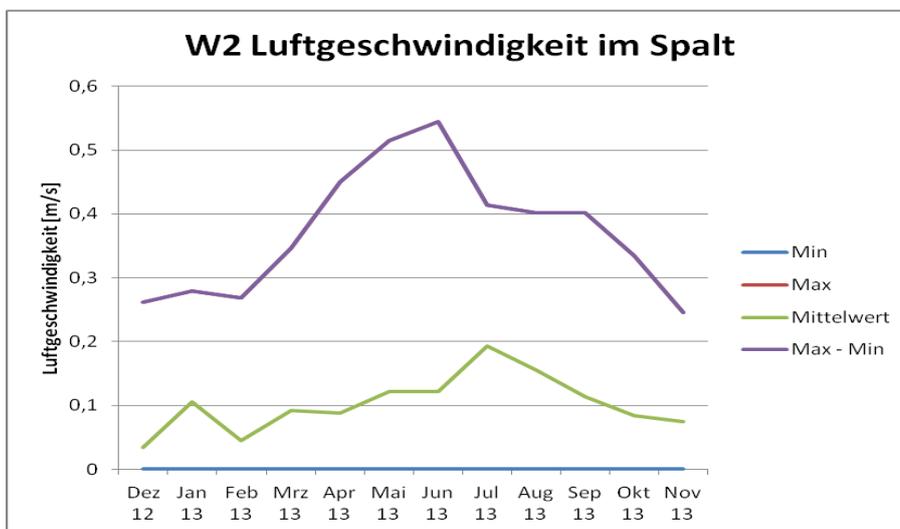


Bild 97: Temperaturmaxima (B1/B2) und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in unterschiedlicher Höhe (Feld nXI1b, nXI 6b)

Die Kurve der maximalen Luftgeschwindigkeit zeigt eine Abhängigkeit zu den gemessenen Temperaturdifferenzen (B2Max- B1Max). Aus den Klimadiagrammen (Anhang) lässt sich ablesen, dass die maximale Luftgeschwindigkeit am Fenster nXII stets in der Zeit gemessen wurde, wenn die untergehende Sonne auf das Nordfenster trifft, im Mai beispielsweise zwischen 17:00 und 19:00 Uhr. In der Zeit zwischen 06:00 und 12:00 Uhr beträgt die Luftgeschwindigkeit häufig 0 m/s.

Die Häufigkeit von Bereichen der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit sind an der Originalverglasung auf der Innen- (Pos. 1) und Außenseite (Pos. 2) unterschiedlich.

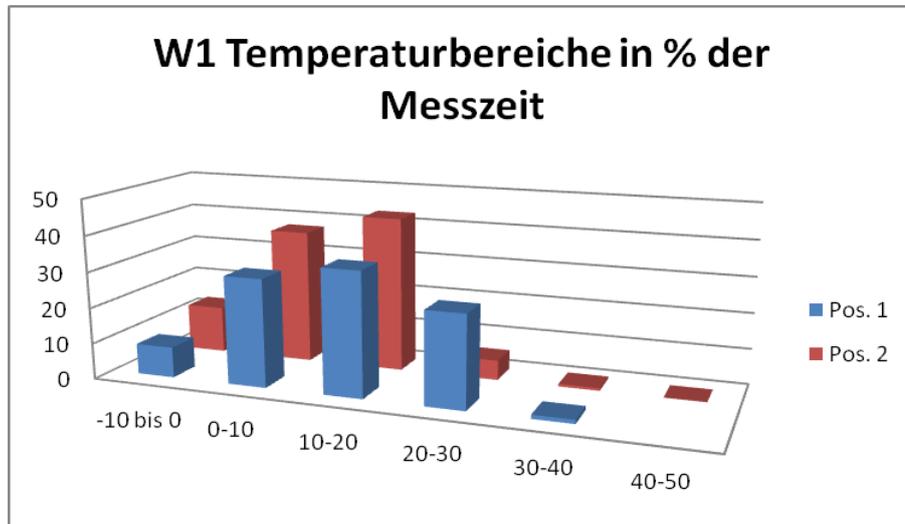


Bild 98: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messzeit

In der Regel werden extreme Temperaturen an Pos. 2 häufiger erreicht als an Pos. 1. Der teilweise Ausfall des Temperatur-Feuchtefühlers an Pos. 2 in den Monaten Juni, Juli, August widerspiegelt diesen Verlauf nur eingeschränkt.

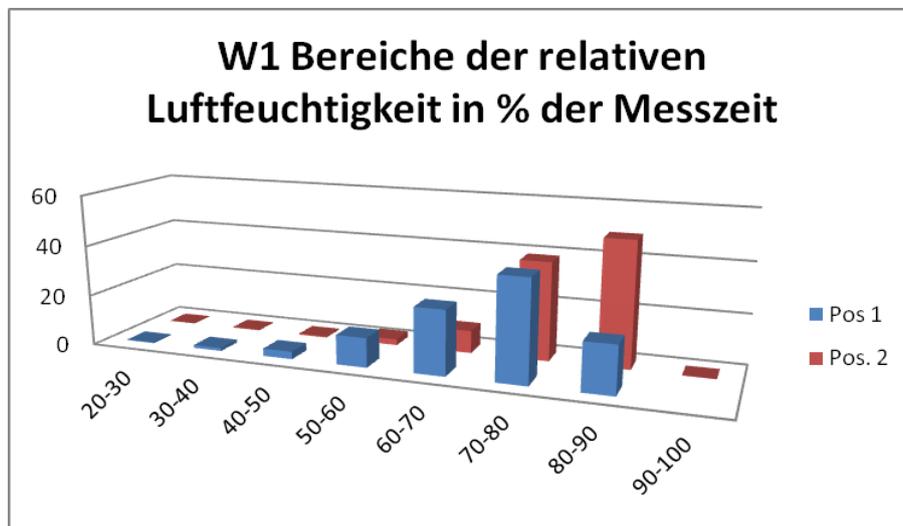


Bild 98: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messzeit

Bereiche höherer Luftfeuchtigkeit wurden häufiger an der Außenseite der Originalverglasung gemessen. Zwischen 90 und 100 % allerdings nur zu 0,1 % der Gesamtmeßzeit mit einem Maximalwert von 90,3 % r. F. im Februar 2013. Die Kondensation von Tauwasser auf der Originalverglasung kann damit ausgeschlossen werden.

**Tabelle 7: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 03/13-11/13 am Fenster nXII**

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
<b>Monat</b>	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V <sub>Luft</sub> Max [m/s]
03/13	-2,8	10,9	47,2	87,5	-5,0	14,7	37,9	87,4	-9,4	16,5	37,5	98,5	-11,8	10,6	34,3	96,7	0,35
04	0,4	26,5	35,3	86,0	-0,6	31,9	24,4	86,5	-3,5	36,3	21,9	98,7	-4,5*	41,9*	30,4*	97,0*	0,45
05	10,1	32,9	24,0	88,3	9,7	39,4	17,1	89,4	6,8	42,1	19,1	99,5	0,6*	20,4*	80,5*	99,5*	0,52
06	12,2	37,4	27,0	86,2	11,9*	43,4	20,2*	86,8*	9,3	49,1	20,4	96,5	9,6*	23,2*	34,0*	90,3*	0,54
07	16,7	37,4	23,7	77,2	k.M	k.M.	k.M.	k.M.	13,4	48,6	18,2	93,3	12,3	34,1	22,5	93,1	0,41
08	16,3	38,9	21,0	71,5	15,2*	35,2*	23,4*	72,5*	12,4	51,7	18,9	89,7	10,3	33,4	23,7	93,1	0,4
09	9,8	30,2	29,3	80,3	7,9	34,4	23,4	86,0	4,7	39,1	23,0	96,9	2,9	22,5	39,0	96,2	0,4
10	8,2	18,4	39,7	81,8	6,4	20,9	33,4	86,8	3,4	22,8	37,7	97,2	1,7	19,7	34,4	95,1	0,33
11	8,7	14,3	56,4	80,6	7,4	14,4	58,9	85,8	4,8	13,8	65,0	96,9	3,2	13,5	58,9	92,5	0,25

Weitere Angaben in Tabelle 6 (09/12-02/13),

\*Messwertverluste infolge von Geräteausfall, k.M... keine Messwerte aufgezeichnet, Messfühlerausfall

### **4.4.3. Jauer**

Die Klimamessungen in der Friedenskirche Jauer erfolgten nach der Restaurierung der drei Chorfenster und dem Einbau von Schutzverglasungen exemplarisch am Fenster sII im Zeitraum vom 10.12.2013 – 19.08.2014. Das Fenster hat eine Höhe von ca. 3,50 m und eine Breite von 1,26 m. Die Maße der einzelnen Felder sind ca. 120 x 70 cm. Der Abstand zwischen Original- und der neuen Außenschutzverglasung beträgt 5-6 cm. Am unteren Fenstersims befindet sich eine Lufteintrittsöffnung von ca. 2-3 cm über die gesamte Breite des Glasmalereifensters. Die Luftaustrittsöffnung am oberen Feld hat eine Breite von ca. 1-2 cm. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas.

Im Bereich des Dachgeschosses und der Deckenbemalung fanden zusätzlich Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte an zwei ausgewählten Dachbalken statt. Ein Balken wies deutliche Mazerationsschäden auf, im Vergleich dazu wurde auch an einem vorhandenen neuen Konstruktionsholz die Änderung der Holzfeuchte in Abhängigkeit von der Umgebungsfeuchte gemessen.

#### **4.4.3.1. Fenster sII**

Der Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung wird von innen belüftet. Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgte in der Spaltmitte zwischen den Feldern 3c und 4c. Die Klimadaten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden an den Pos. 1 - Pos. 3 ebenfalls in einer Höhe zwischen den Feldern sII3c und sII4c gemessen und die Messwerte monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. Die vorhandenen Daten sind in Tabellen- und Diagrammform dargestellt und ausgewertet worden. Mit Hilfe einer Konvertierung in das EXCEL-Format wurden charakteristische Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit berechnet. Diese Werte sind in Tabelle 8 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

Die Extremwerte, sowohl Minima als auch Maxima, von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit nehmen von innen nach außen zu (Pos.1...Pos.3). Da es sich um ein Chorfenster handelt und die Messzeit nur vom Winterhalbjahr über das Frühjahr bis zum Sommer reichte, unterscheiden sich die Temperatur- und Feuchteschwankungen von denen anderer Objekte mit einer Messdauer von mindestens 12 Monaten. Die grafische Darstellung der Messwerte von Temperatur- und relativer Luftfeuchtigkeit für die einzelnen Messpositionen ist in den nachfolgenden Diagrammen zusammengestellt. Entscheidend für den Erhaltungszustand der Glasmalereien ist die Dauer von Extremwerten bei Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung. Eine Zusammenstellung dieser Klimadaten findet sich in den Bildern 107 und 108.

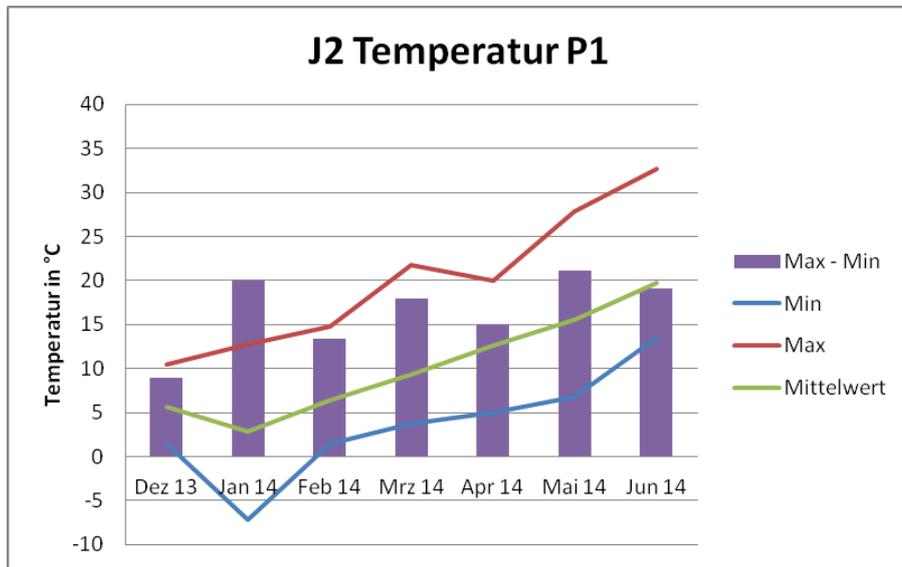


Bild 99: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nX1a betrug im Juni 32,7°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -7,2°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat Januar 20 K.

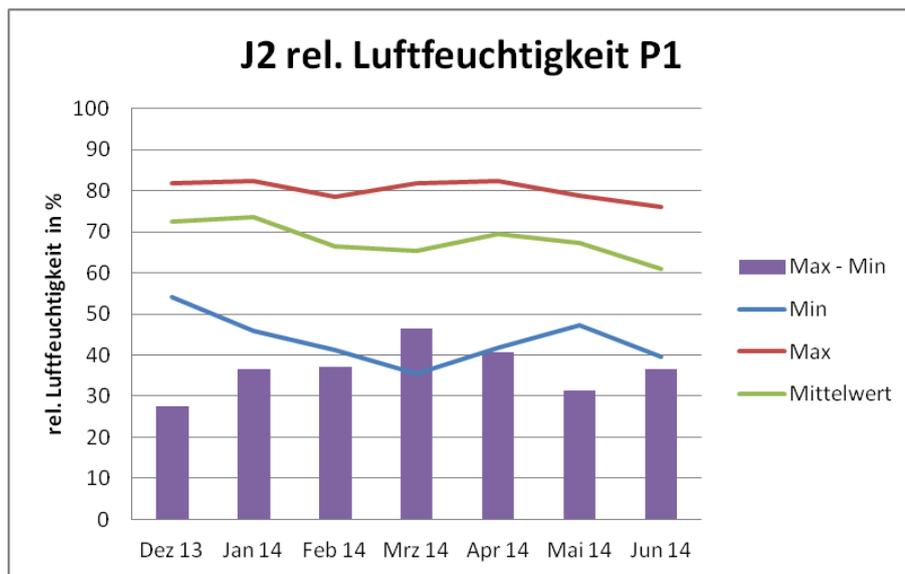


Bild 100: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sII betrug im April 82,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im März bei 35,4 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im März mit  $\Delta$  r. F. = 46,5 % registriert.

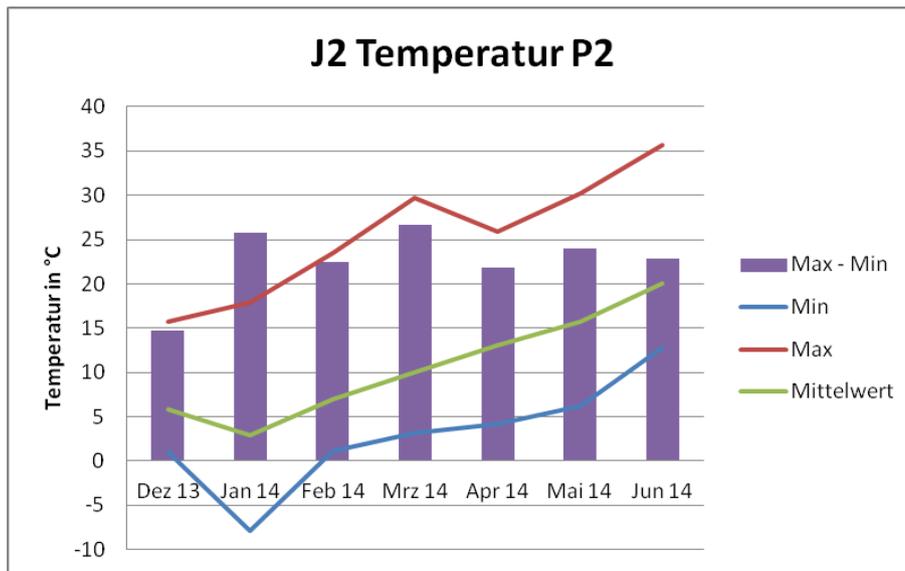


Bild 101: Temperaturextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sII betrug im Juni 35,7°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -7,8°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat März bei 26,6 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe Temperaturen und niedrige Temperaturen etwa gleich häufig auftreten (Tag-Nachtzyklus).

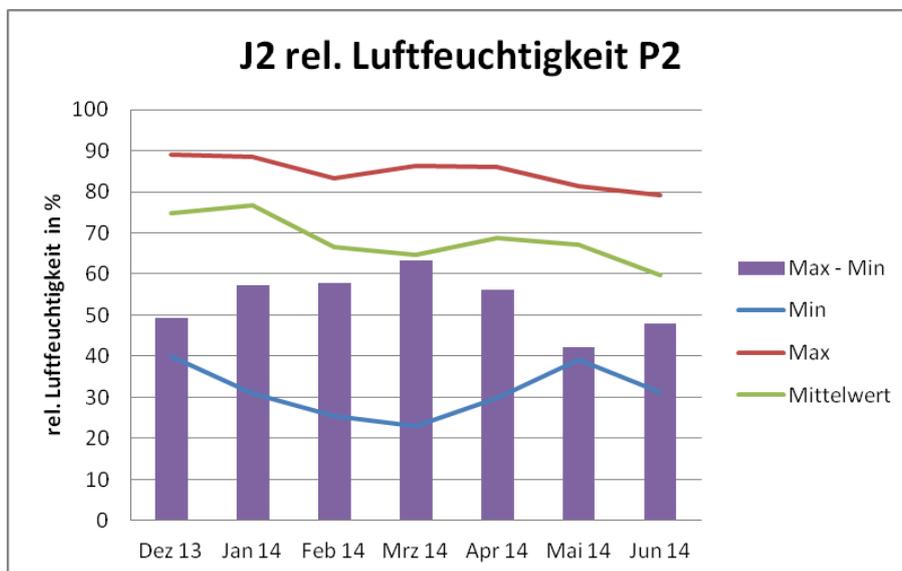


Bild 102: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember und Januar am Feld sII3c nahe 90 %. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im März bei 23,1 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im März mit  $\Delta r. F. = 67\%$  festgestellt.

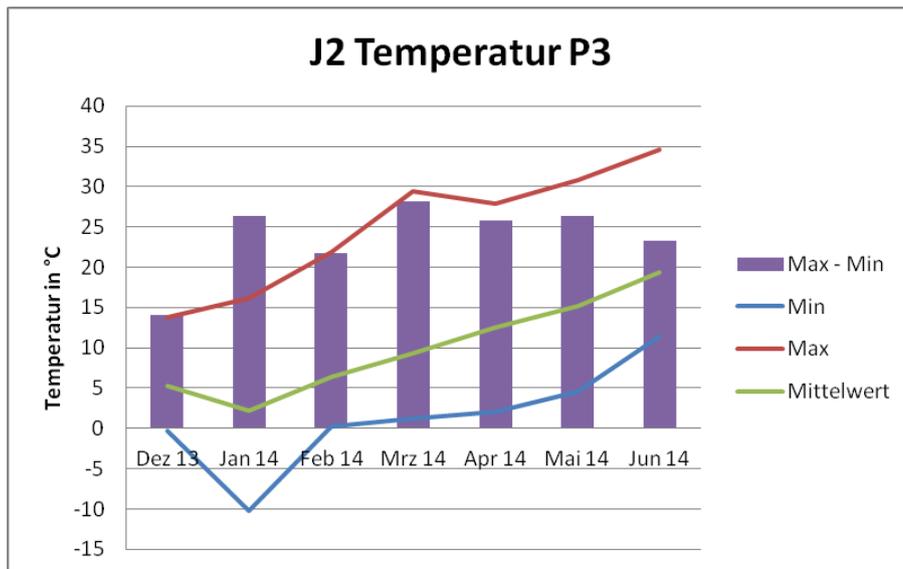


Bild 103: Temperaturextrema und –schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sll3c betrug im Juni 34,6°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -10,2°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat März 28,2 K.

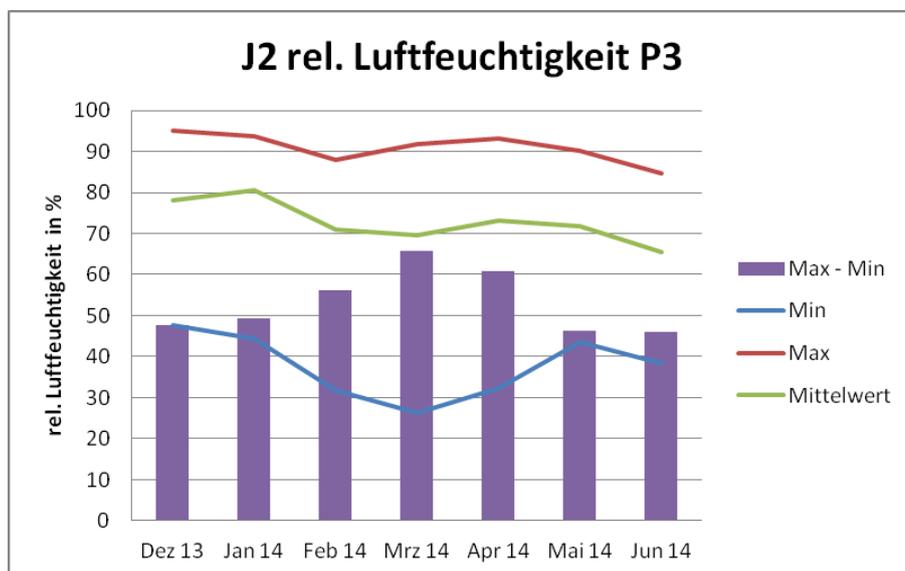


Bild 104: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember, Januar, März, April und Mai oberhalb von 90 %. Die maximale Feuchtigkeit betrug im Dezember 95,1 % r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im März mit  $\Delta$  r. F. = 65,8 % festgesellt.

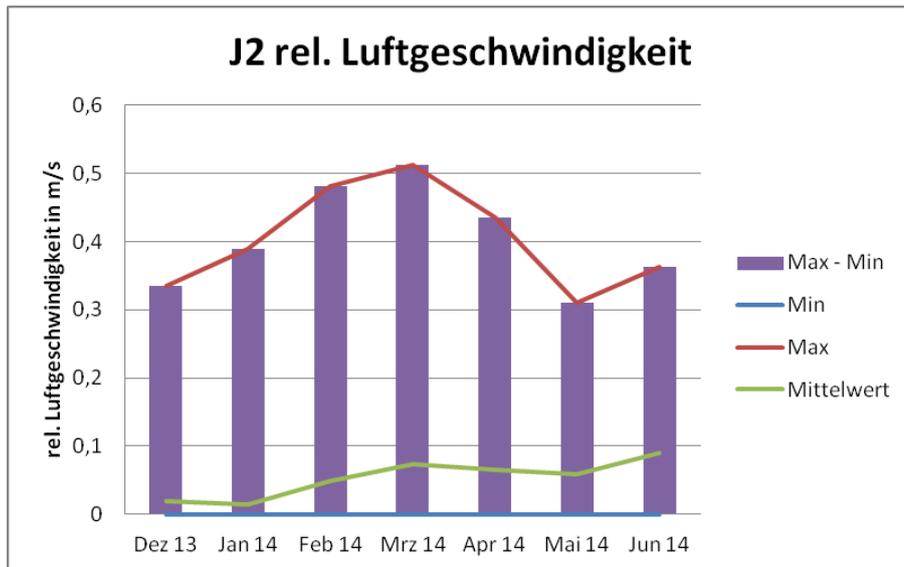


Bild 105: Luftgeschwindigkeit (Min/Max) im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die maximale Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung am Fenster sII betrug im März 0,5 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit liegt in allen Monaten bei 0 m/s. Die Mittelwertskurve deutet an, dass geringe Luftgeschwindigkeiten häufiger sind als hohe.

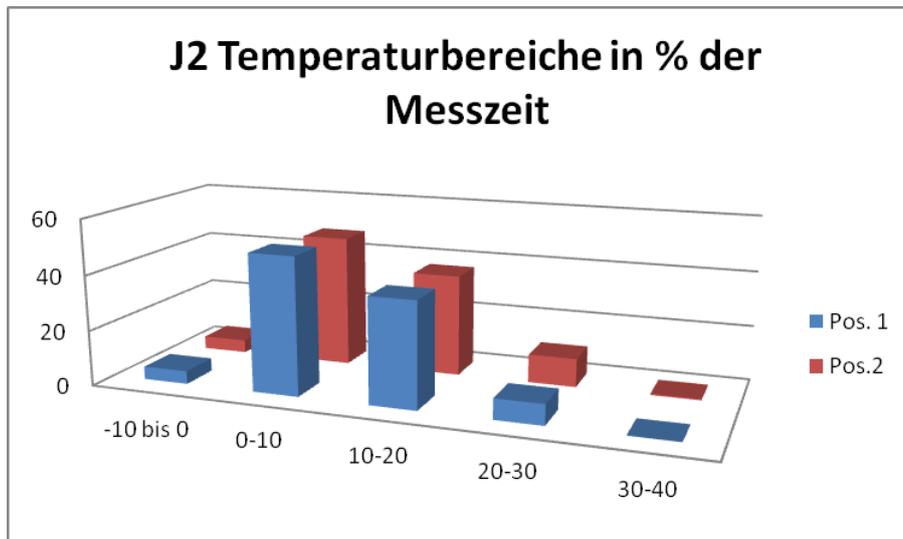


Bild 107: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen sowohl auf der Außenseite als auch an der Innenseite der Originalverglasung lagen im Messzeitraum im Bereich zwischen 0-20°C. Zu weniger als 5 % der Messzeit wurden auch Temperaturen unterhalb von 0°C gemessen und zu ca.0,5 % der Messzeit lagen die Temperaturen auch oberhalb von 30°C. Der Temperaturverlauf auf beiden Seiten der Originalverglasung ist nahezu identisch.

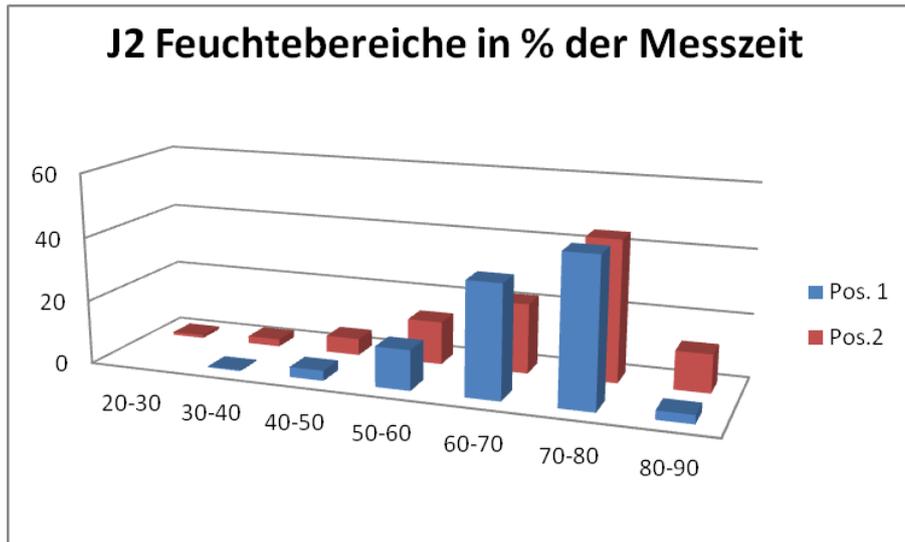


Bild 108: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit der Originalverglasung (Pos1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) liegt zu etwa 40% der Messzeit in einem Bereich zwischen 70-80 % und zu einem weiteren Drittel der Messzeit zwischen 60-70 %. Werte über 80 % r. F. wurden lediglich zu knapp 3 % an Pos. 1 und zu etwa 12 % der Messzeit an Pos. 2 registriert. Durch den Einbau der Außenschutzverglasung werden Bedingungen erreicht, die sich in Bezug auf Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit für historische Gläser und Malschichten in einem tolerierbaren Bereich bewegen. Eine Kondensation von Wasser auf der Originalverglasung ist ausgeschlossen.

**Tabelle 8: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 02/13-08/13 am Fenster sII**

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Luft- geschwindigkeit
<b>Monat</b>	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V <sub>Luft</sub> Max [m/s]
02/14	3,6	14,8	41,8	74,1	2,9	23,5	25,6	78,6	1,2	21,7	32,5	83,9	0,48
03	3,7	21,7	35,4	81,9	3,1	29,7	23,1	86,3	1,2	29,4	26,2	91,9	0,51
04	5,0	20,0	41,7	82,5	4,2	25,9	29,9	86,0	2,0	27,9	32,4	93,1	0,44
05	6,8	27,8	47,4	78,8	6,2	30,2	39,2	81,5	4,5	30,9	43,7	90,1	0,31
06	13,5	32,7	39,5	76,2	12,9	35,7	31,3	79,3	11,4	34,6	38,4	84,5	0,36
07	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.
08	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.	k.M.

\* k.M... keine Messwerte infolge von Geräteausfall

#### 4.4.3.2. Dachgeschoss und Holzbalken

Im Bereich des Dachgeschosses und der Deckenbemalung fanden Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit statt. Die Holzfeuchte wurde an zwei ausgewählten Dachbalken gemessen. Ein Balken wies deutliche Mazerationsschäden auf, im Vergleich dazu wurde auch an einem ungeschädigten Konstruktionsholz die Änderung der Holzfeuchte in Abhängigkeit von der Umgebungfeuchte gemessen. Die Klimamessungen (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte) erfolgten im Zeitraum vom 16.04.2013 bis 19.08.2014. Die Messwerte wurden monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen. Diese Werte sind in den Tabellen 9 und 10 zusammengefasst.

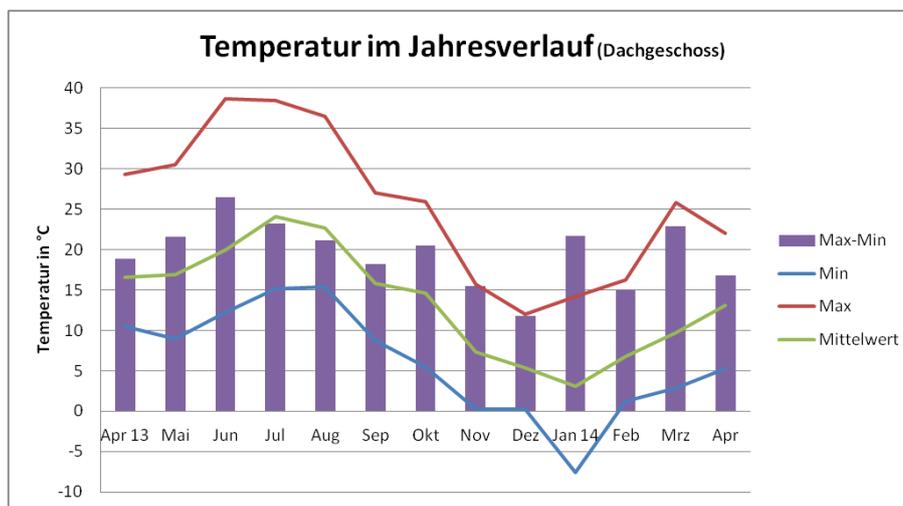


Bild 109: Temperaturextrema und –schwankungen im Dachgeschoss, Friedenskirche Jauer

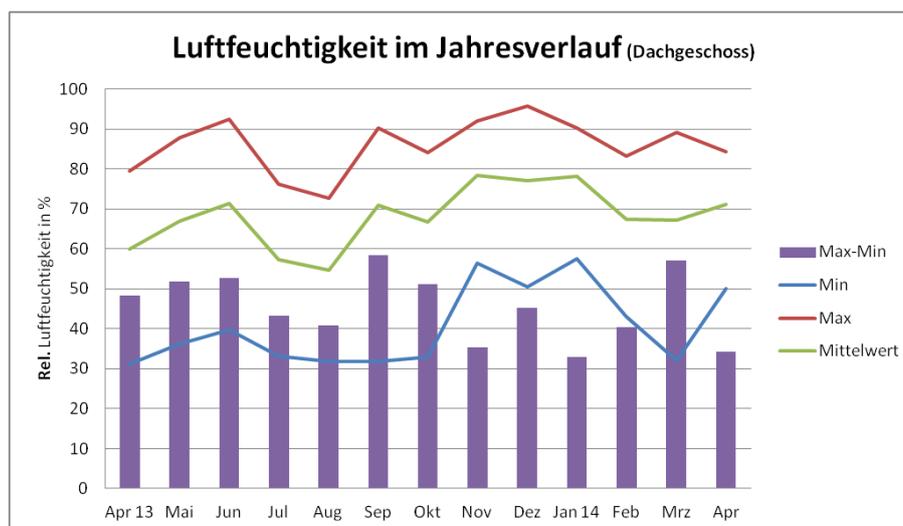


Bild 110: Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit im Dachgeschoss

Der Verlauf von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Dachgeschoss wird direkt durch die Außenbedingungen bestimmt, da keine Wärmedämmung vorgesehen ist. So werden im Sommer Temperaturen von fast 40°C erreicht während sie in den Wintermonaten in den Frostbereich sinken (- 7,6°C, Januar 2014). Die höchsten Werte der relativen Luftfeuchtigkeit wurden im Juni mit 92,4% und im Dezember mit 95,6 % gemessen. Die Schwankungen im Jahresverlauf liegen zwischen  $\Delta r. F \sim 30\text{-}60\%$ . Eine hohe relative Luftfeuchtigkeit wirkt sich unmittelbar auf die Holzfeuchte von mit Flammschutzmitteln behandelten Kontruktionshölzern aus (vgl. Bild 110 und 111).

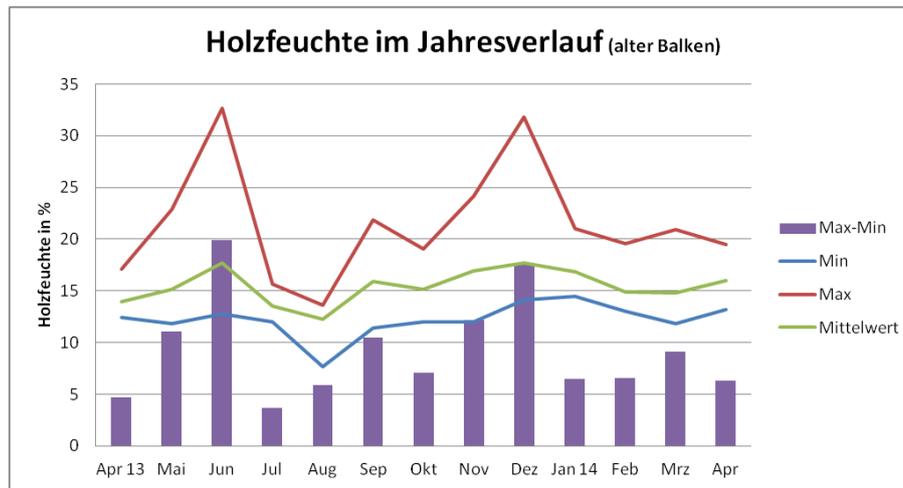


Bild 111: Extremwerte und –schwankungen der Holzfeuchte eines mit Flammschutzmitteln behandelten Balkens

Neue Balken in unmittelbarer Nähe zeigen deutlich geringere Schwankungen in der Holzfeuchte. Während die maximale Holzfeuchte im alten Balken bei fast 33 % liegt, wurden im neuen Balken nur knapp 14 % gemessen.

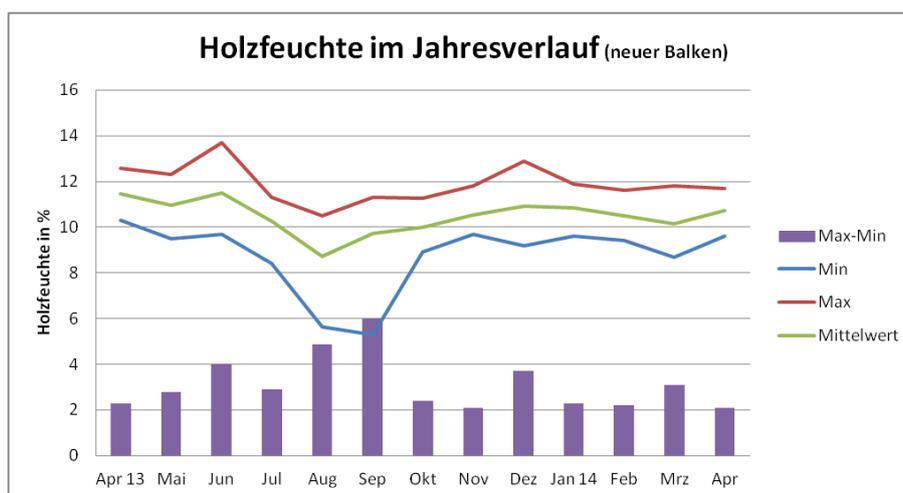


Bild 112: Extremwerte und –schwankungen der Holzfeuchte eines neuen Balkens

Die im Dachgeschoss gemessenen Änderungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit wirken sich auch direkt im Inneren der Kirche im Bereich der Deckenmalerei aus, wie die nachfolgenden Diagramme belegen. Die Extremwerte sind zwar leicht gedämpft, der Verlauf der Kurven ist jedoch identisch (vgl. Bilder 109, 113 und 110, 114).

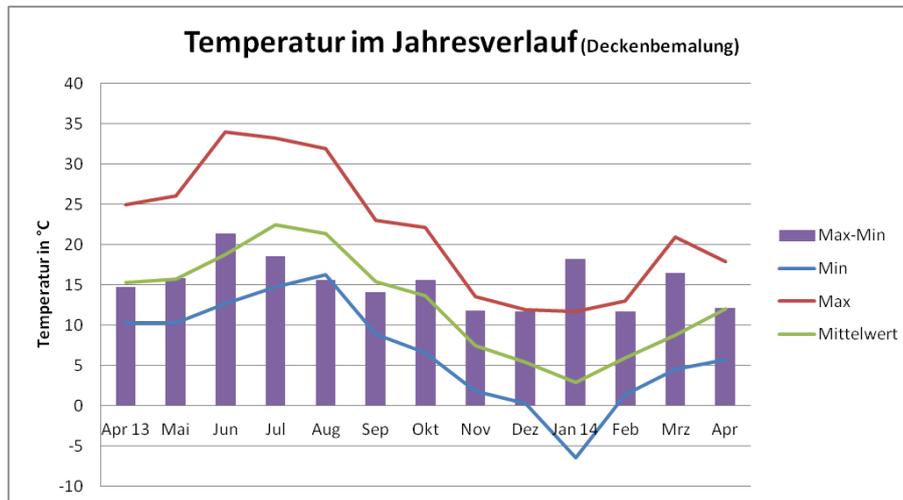


Bild 113: Temperaturextrema und –schwankungen in der Kirche unmittelbar unter der Deckenbemalung

Der Maximalwert der Temperatur im Bereich der Deckenbemalung lag im Juni bei knapp 35°C. Die höchsten Temperaturschwankungen wurden ebenfalls im Juni mit 21,4 K gemessen. Die relative Luftfeuchtigkeit erreichte in den Monaten Juni und Dezember Werte deutlich über 90 % r.F. Die Schwankungen betragen zwischen  $\Delta r. F \sim 20-40 \%$

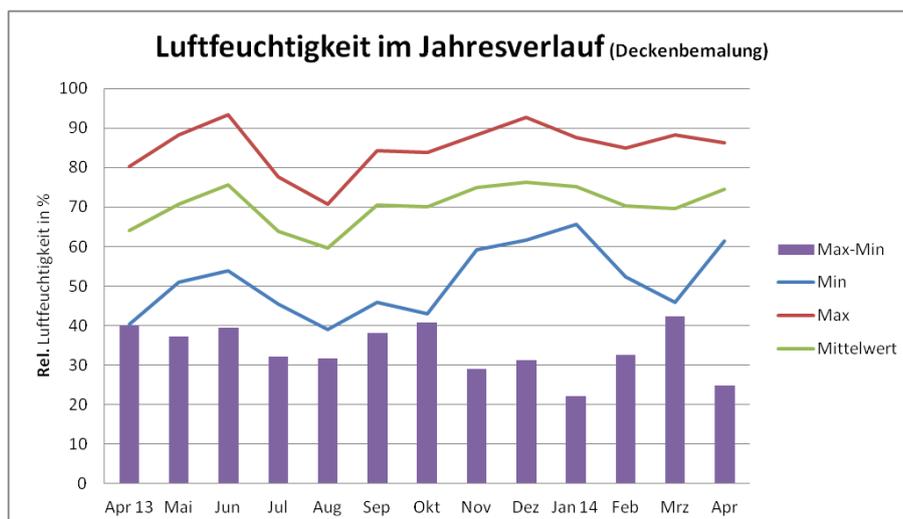


Bild 114: Feuchtigkeitsextrema und –schwankungen in der Kirche unmittelbar unter der Deckenbemalung

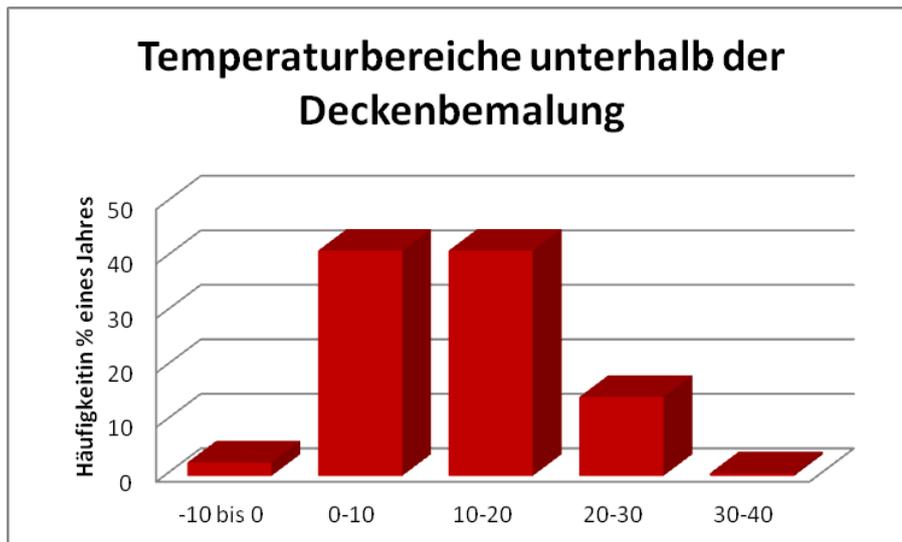


Bild 115: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen unterhalb der Deckenbemalung in % der Messdauer von Mai 2013-April 2014

Für die Berechnung der Häufigkeitsverteilungen von Bereichen der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit an der Deckenbemalung sind die Messwerte eines Jahreszyklus zugrunde gelegt worden (Mai 2013-April 2014). Temperaturen zwischen 0-10°C und 10-20°C sind am häufigsten und ergeben in der Summe mehr als 80 % der gemessenen Daten. Werte unter dem Gefrierpunkt wurden häufiger erreicht als Temperaturen im Bereich zwischen 30-40°C. Die relative Luftfeuchtigkeit an der Deckenbemalung lag zu etwa 46 % der Messzeit im Bereich zwischen 70 und 80%. Sehr geringe Feuchtigkeitswerte zwischen 30-40 % r. F wurden nur zu 0,1 % der Messzeit registriert, während Werte zwischen 80-90 % r. F zu knapp 10 % im Jahresverlauf erreicht wurden.

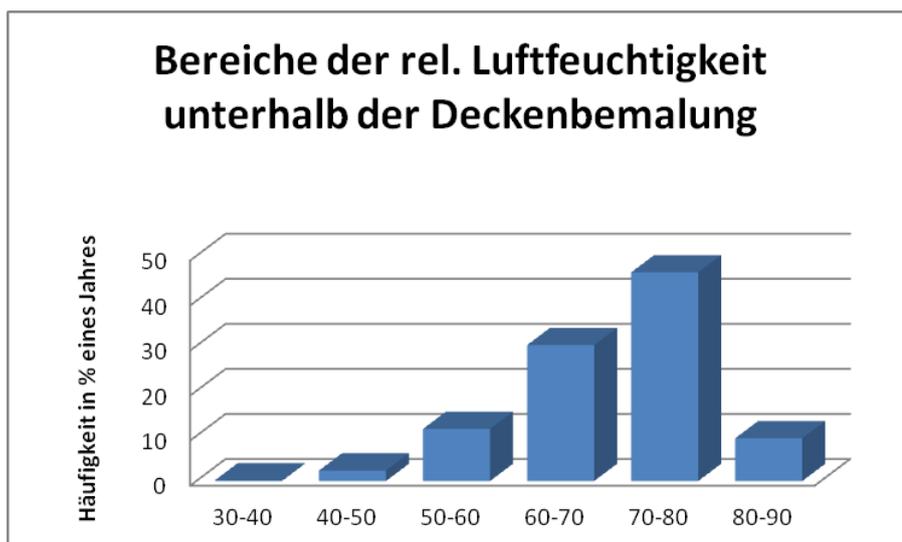


Bild 116: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit unterhalb der Deckenbemalung in % der Messdauer von Mai 2013-April 2014

Tabelle 9: Extremwerte von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Holzfeuchte im Messzeitraum 04/13-08/14 in der Friedenskirche Jauer

Monat	Dachgeschoss				Nahe der Deckenbemalung				Alter Balken		Neuer Balken	
	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Holzfeuchte Min/Max [%]		Holzfeuchte Min/Max [%]	
04/13	10,5	29,4	31,1	79,4	10,3	25,0	40,3	80,4	12,4	17,1	10,3	12,6
05	9,0	30,5	36,2	87,9	10,3	26,1	51,0	88,3	11,8	22,9	9,5	12,3
06	12,2	38,7	39,7	92,4	12,6	34,1	54,0	93,4	12,8	32,7	9,7	13,7
07	15,2	38,4	33,1	76,2	14,7	33,2	45,5	77,7	12,0	15,7	8,4	11,3
08	15,4	36,5	31,8	72,6	16,3	31,9	39,1	70,7	7,7	13,6	5,6	10,5
09	8,8	27,0	31,8	90,1	8,9	22,0	46,0	84,2	11,4	21,9	5,3	11,3
10	5,4	25,9	32,9	84,2	6,6	22,1	43,0	83,8	12,0	19,1	8,9	11,3
11	0,3	15,8	56,5	91,9	1,8	13,6	59,2	88,4	12,0	24,2	9,7	11,3
12	0,2	12,0	50,5	95,6	0,2	12,0	61,6	92,7	14,1	31,8	9,2	12,9
01/14	-7,6	14,2	57,4	90,3	-6,5	11,7	65,6	87,7	14,5	21,0	9,6	11,9
02	1,2	16,3	43,0	83,3	1,4	13,0	52,4	84,9	13,0	19,5	9,4	11,6
03	2,9	25,8	32,0	89,1	4,5	20,9	46,0	88,4	11,8	20,9	8,7	11,8
04	5,2	22,0	50,1	84,3	5,7	17,8	61,3	86,2	13,2	19,5	9,6	11,7
05	7,2	34,1	32,6	88,8	7,5	28,5	47,4	87,2	12,6	20,5	9,5	11,8
06	14,4	33,4	38,7	78,2	14,4	29,6	50,4	82,2	11,8	16,1	5,3	11,1
07	15,2	36,2	25,9	79,0	15,6	32,6	36,0	78,7	11,8	16,7	5,3	10,7
08	16,2	34,2	38,5	72,7	16,5	30,8	46,8	74,2	12,4	15,0	6,3	10,9

## **5. Vergleich und Bewertung der Klimamessungen an den Fenstern**

### **5.1. Klima und Außenschutzverglasung**

Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit sind entscheidende Einflussfaktoren für den Erhaltungszustand von historischen Glasmalereien, denn bei vielen chemischen Reaktionen führt eine Erhöhung der Temperatur um 10 K schon zu einer Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit. Zudem können rasche Temperaturänderungen Spannungen in Materialkombinationen mit unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten hervorrufen, die zu Materialverlusten führen. Sowohl in Niedersteine auf der Nord- und Südseite als auch am Nordfenster in Waldenburg liegen die am häufigsten gemessenen Temperaturen zwischen 0 und 20°C. Fenster auf der Südseite erreichen durchaus Spitzenwerte über 30°C und mit steigender Höhe des Fensters nehmen diese Temperaturen zu. Daher sind die Glasmalereien in größerer Höhe eher durch hohe Temperaturen und Temperaturwechsel gefährdet als die in der untersten Reihe. Durch die Außenschutzverglasung kommt es außerdem zu einer Temperaturerhöhung im Spalt, die sich auch auf die Temperatur der Außenseite der Originalverglasung auswirkt. An Südfenstern wurden bis zu 8 K höhere Temperaturen an der Außenseite der Originalverglasung gemessen als an der Außenseite der Außenschutzverglasung. Schnelle Temperaturänderungen am Original sind jedoch nahezu ausgeschlossen, da die direkte Einwirkung von plötzlich einsetzenden Wetteränderungen (wie z. B. Schlagregen) durch die Außenschutzverglasung verhindert wird. Die Temperaturänderungen verlaufen daher langsamer als an der Außenschutzverglasung. Im Winter bewirkt die Außenschutzverglasung, dass ein Temperaturgradient von außen nach innen gemessen wird. Außen ist es stets kälter als an der Originalverglasung. So wurden in Waldenburg an der Innenseite der Originalverglasung Werte von bis zu -4,5°C gemessen bei Außentemperaturen von etwa -10°C. Das Zusammenwirken von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit kann zu Schädigungsprozessen durch Eis- oder Kondenswasserbildung auf bemalten Glasoberflächen führen. Die Höhe der relativen Luftfeuchtigkeit hat einen Einfluss auf die Entstehung von Feuchtigkeitsfilmen auf Materialoberflächen und damit einhergehende Diffusionsprozesse, die einen Ionenaustausch in oberflächennahen Bereichen bewirken und als Beginn einer Korrosion auch bei Gläsern beobachtet werden. Daher sollte die relative Luftfeuchtigkeit an den Originalen 80 % nicht überschreiten. Dieser Idealwert wird allerdings an keinem der untersuchten Fenster dauerhaft eingehalten. Die im Jahresverlauf am häufigsten gemessenen Werte lagen zwischen 70 und 80 % r. F., bis zu einem Drittel der Messzeit jedoch auch zwischen 80 und 90 % r. F. an der Originalverglasung. Nur selten wurden auch Werte knapp über 90 % gemessen, so dass eine Tauwasserbildung ausgeschlossen werden kann. An der Außenschutzverglasung hingegen wurden an Pos. 3 und 4 Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit bis zu 100 % registriert. Insbesondere am Südfenster in Niedersteine wurde ablaufendes Kondenswasser an der Innenseite der Außenschutzverglasung beobachtet. Ohne Schutzverglasung würde die hohe Luftfeuchtigkeit der äußeren Umgebungsbedingungen und auch Niederschläge direkt auf die

Außenseite der Originalverglasung einwirken. Der Nutzen der Außenschutzverglasung hinsichtlich der Verbesserung der relativen Luftfeuchtheitswerte lässt sich ermitteln, wenn man die Bereiche der gemessenen relativen Luftfeuchtigkeit über einen Jahresverlauf auf der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4) mit denen auf der Außenseite des Originals (Pos. 2) vergleicht.

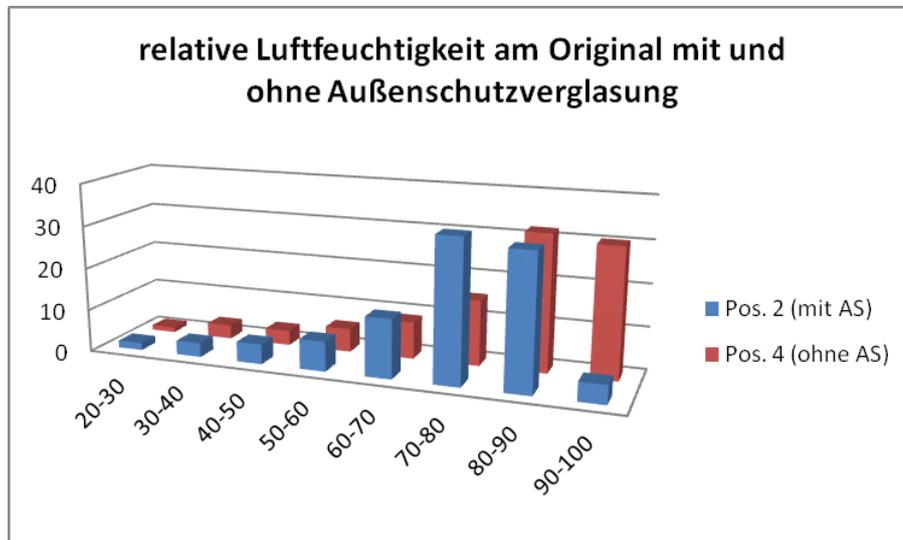


Bild 117: Pfarrkirche Niedersteine; Bereiche der relativen Luftfeuchtigkeit am Feld sV1, Pos. 2 (mit AS), Pos. 4 (ohne AS)

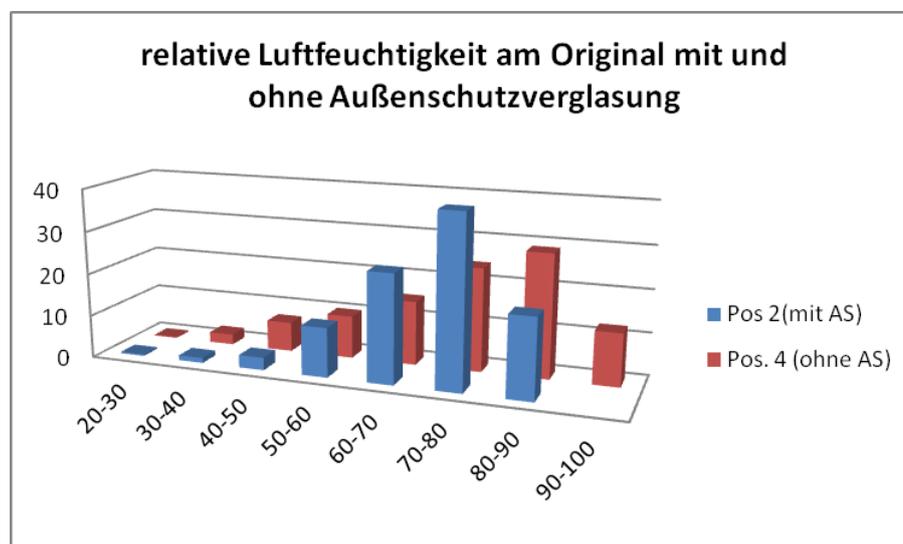


Bild 118: Pfarrkirche Waldenburg, Bereiche der relativen Luftfeuchte am Feld nX11b

Der Wirksamkeit der Außenschutzverglasung liegt eindeutig darin, dass Bereiche hoher relativer Luftfeuchtigkeit (90-100 %) an Pos. 2 gar nicht mehr erreicht werden bzw. deutlich kürzer sind als ohne Schutzverglasung und damit Kondenswasserbildung auf den Originalen ausgeschlossen ist. Dieser Effekt konnte eindeutig mit Hilfe der durchgeführten Klimamessungen nachgewiesen werden.

## 5.2. Ergebnisse der Passivsammler

Passivsammler der Firma „passam ag“, Schweiz, wurden für die Bestimmung des SO<sub>2</sub>-Gehaltes und des NO<sub>x</sub>-Gehaltes der Umgebung eingesetzt. Die Expositionsdauer im Zeitraum von 11.12.2012 bis 11.01.2013 betrug 4 Wochen. Die Passivsammler wurden zeitgleich an unterschiedlichen Positionen an den mit Außenschutzverglasung versehenen Fenstern exponiert. Das Fenster sII in Jauer war zum Zeitpunkt der Messung noch nicht restauriert, so dass die Schadstoffmessung dort außen und innen ohne Außenschutzverglasung erfolgte. In Waldenburg wurde am restaurierten Fenster nXII, Feld 1b gemessen und am noch nicht restaurierten Fenster nXI (mit altem Schutzverglasungssystem). Die Exposition der Passivsammler erfolgte wie in Niedersteine an Pos. 1 (Innenseite-Original) im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung sowie an Pos. 4 (Außenseite-Außenschutzverglasung). In Niedersteine wurden die Messungen sowohl am restaurierten Nord- als auch am Südfenster (nV, sV) durchgeführt. Die Schadstoffkonzentration wurde nach 4-wöchiger Expositionsdauer von jeweils 2 Passivsammlern je Messstelle vom Hersteller analysiert.

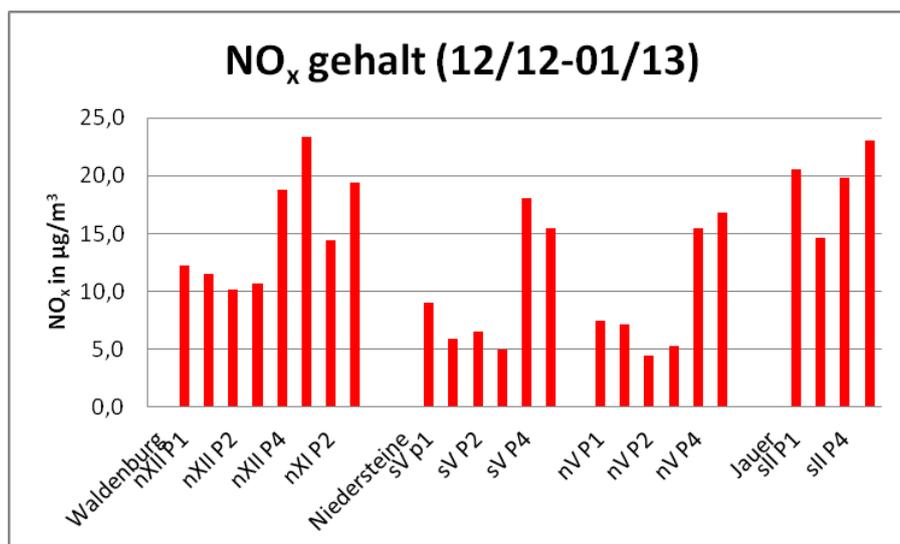


Bild 119: Ergebnisse der Passivsammlermessungen für NO<sub>x</sub> in Waldenburg, Niedersteine und Jauer

Die Messwerte sind repräsentativ für den unmittelbaren Messort. Als genereller Trend wird deutlich, dass die Konzentration des NO<sub>x</sub>-Gehaltes an der Außenseite (Pos. 4) jeweils den höchsten Wert aufweist. Die neueingebauten Schutzverglasungssysteme in Waldenburg und Niedersteine bewirken einen deutlichen Abfall der NO<sub>x</sub>-Konzentration im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung (Pos. 2). An Pos. 1, der dem Kircheninnenraum zugewandten Seite, steigt die Konzentration wieder geringfügig an. Bemerkenswert sind die Messwerte in Waldenburg am Fenster nXI, wo an Pos. 2 eine ähnlich hohe Schadstoffkonzentration wie im Außenbereich (nXII, Pos.4) gemessen wurde, d.h. dass das alte Schutzverglasungssystem durchlässig für gasförmige Umweltschadstoffe war. Ein

ähnliches Ergebnis wurde auch in Jauer festgestellt, ohne Schutzverglasung bewegen sich die NO<sub>x</sub>-Werte innen und außen auf ähnlich hohem Niveau.

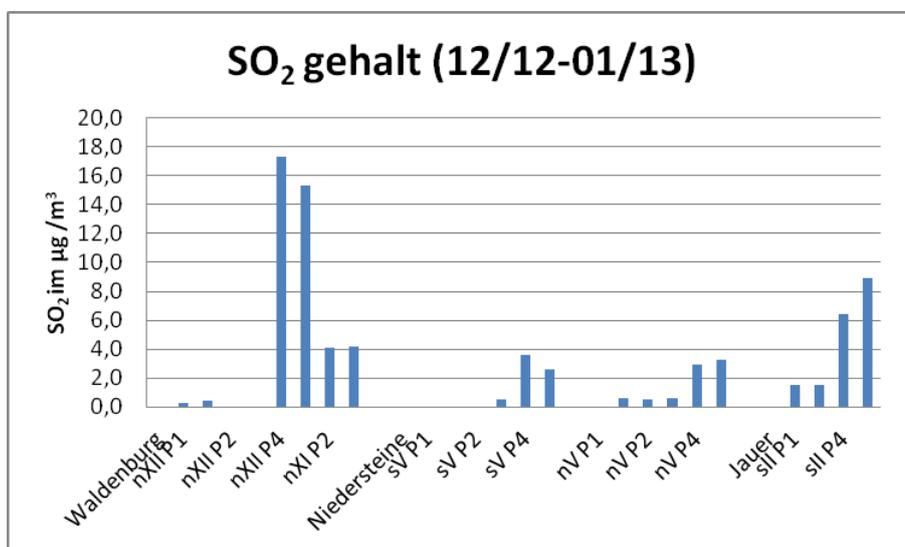


Bild 120: Ergebnisse der Passivsammlermessungen für SO<sub>2</sub> in Waldenburg, Niedersteine und Jauer

Erwartungsgemäß ist der SO<sub>2</sub>-Gehalt wiederum im Außenbereich (Pos. 4) am höchsten, wobei deutliche Unterschiede zwischen der Industriestadt Waldenburg und der ländlichen Umgebung von Niedersteine bestehen. Die Schutzverglasungen in Waldenburg und Niedersteine vermindern den Zustrom von SO<sub>2</sub> belasteter Umgebungsluft, so dass die Werte nahe der Nachweisgrenze liegen. Auf der Südseite in Niedersteine wurde kein SO<sub>2</sub> an Pos. 1 nachgewiesen und nur eine sehr geringe Konzentration an Pos. 2. Auf der Nordseite sind die Werte der SO<sub>2</sub>-Belastung an Pos. 1 und Pos. 2 ebenfalls sehr gering. In Waldenburg konnte kein SO<sub>2</sub> im Spalt zwischen Original und neuer Schutzverglasung gefunden werden, allerdings wurde eine sehr geringe Konzentration im Kircheninnenraum (Pos. 1) festgestellt. Da zum Zeitpunkt der Messung auch das alte Schutzverglasungssystem am unmittelbar benachbarten Fenster noch vorhanden war und dort im Spalt (nXI, Pos. 2) eine deutliche SO<sub>2</sub>-Konzentration nachweisbar war ist zu vermuten, dass auch der Innenraum dadurch beeinflusst wurde. In Jauer wurde im Außen- und Innenbereich SO<sub>2</sub> nachgewiesen. Die Werte an Pos. 2 sind zwar geringer als an Pos. 4, sie liegen jedoch noch deutlich über denen von Waldenburg und Niedersteine, wo schon neue Schutzverglasungen installiert worden sind.

Die Schadstoffmessungen zeigen, dass eine gut funktionierende Außenschutzverglasung in der Lage ist, Umweltbelastungen durch Luftschadstoffe von den Glasmalereien fern zu halten. Die hohen Schadstoffkonzentrationen im Außenbereich sind innen deutlich reduziert. In der Kombination mit einer geringeren Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum Außenbereich ist das Schädigungspotential der Umgebungsbedingungen als deutlich geringer einzuschätzen als ohne Vorhandensein einer Schutzverglasung.

### 5.3. Ergebnisse der Glasdosimeterstudie

Durch den Einsatz von Glasdosimetern können komplexe korrosive Belastungen an Baudenkmalern bzw. Objektteilen ortsspezifisch und quantitativ erfasst werden /18/. Bei der Überprüfung von Außenschutzverglasungen an Kirchenfenstern konnte gezeigt werden, dass mit Hilfe von Glasdosimetern in Verbindung mit sensitiven Analyseverfahren auch unter Realbedingungen (Einsatz am Bauwerk) Langzeiteffekte an Glasmalereifenstern abgeschätzt werden können /19/. Glasdosimeter sind seit Jahrzehnten in der Denkmalpflege etabliert und können dort eingesetzt werden, wo eine vergleichende Bewertung komplexer Umgebungsbelastungen im Hinblick auf die Verwitterung von Gläsern gefragt ist, so dass frühzeitig auch Maßnahmen zu ihrer Erhaltung ergriffen werden können. Das Wirkungsprinzip beruht darauf, dass Veränderungen an empfindlichen Glasoberflächen infolge ihrer Exposition mit Hilfe der IR-Spektroskopie qualitativ und quantitativ erfasst werden können. Durch die Messung vor und nach der Exposition wird im Bereich der Bande bei  $3350\text{ cm}^{-1}$  die Extinktionsdifferenz ( $\Delta E$ -Wert) bestimmt, die ein Maß für das zu erwartende Schädigungspotential der komplexen Umgebungsbedingungen darstellt. Je größer der  $\Delta E$ -Wert ist, umso höher ist das Schädigungspotential zu bewerten. Die Glasdosimeter wurden vom Fraunhofer-Institut für Silicatforschung Würzburg, Außenstelle Bronnbach hergestellt und ausgewertet. Ihre Exposition erfolgte in Waldenburg am Fenster nXI und in Niedersteine an den restaurierten Fenstern nV und sV. Für die Untersuchungen wurden Glasdosimeter des Typs MI eingesetzt und über einen Zeitraum von 12 Monaten exponiert. Sie wurden an der Glasinnenseite (Original-Pos.1, an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) sowie an der Außenseite der Schutzverglasung (Pos. 4) befestigt. Die Expositionsdauer erfolgte von Dezember 2012 bis Dezember 2013.

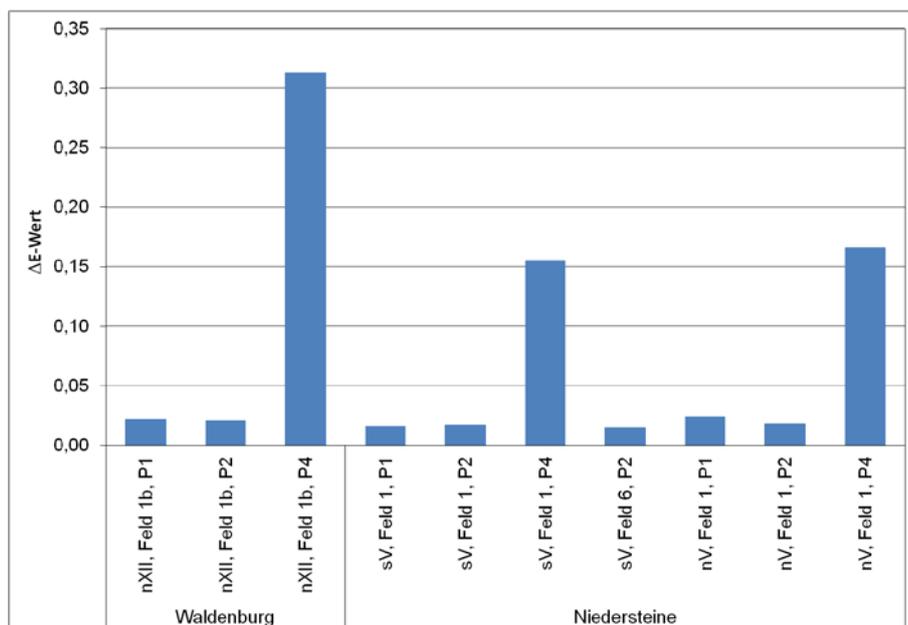
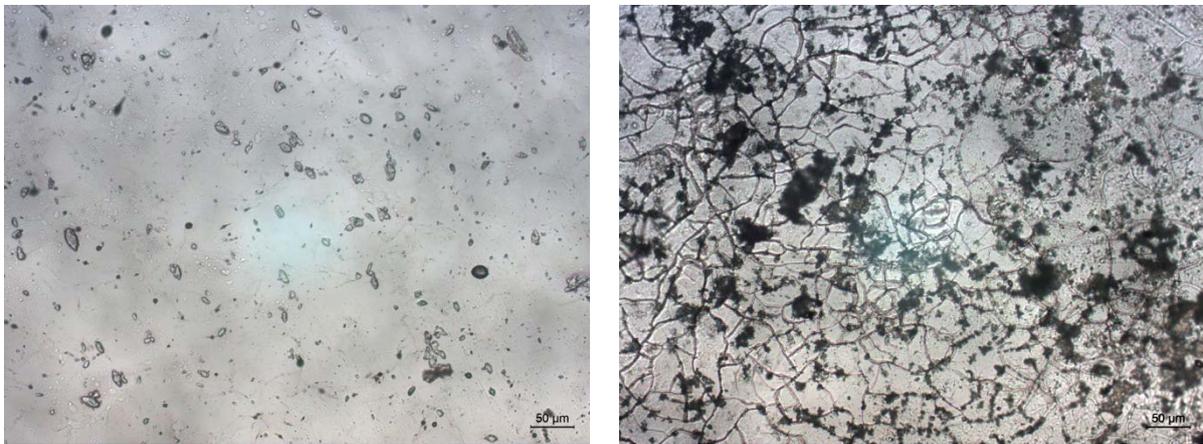


Bild 121: Ergebnisse der Glasdosimeterstudie an Außenschutzverglasungen in Waldenburg und Niedersteine /20/

Die komplexen Umweltbelastungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (P4) sind an allen drei Fenstern deutlich höher als an den übrigen Positionen am Original. In Waldenburg, dem Standort mit der höchsten gemessenen  $\text{SO}_2$ -Belastung, wurde auch der höchste  $\Delta E$ -Wert bestimmt. Er liegt deutlich über den Werten, die in vergleichbaren Studien in den 1990-er Jahren auf der Außenseite des Stendaler Domes gemessen wurden /9/. In Niedersteine ist die Belastung auf der Nordseite höher als am Südfenster, ein Ergebnis das auch Messungen früherer Studien bestätigt /21/. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Werte der einzelnen Standorte (Waldenburg und Niedersteine) zwar für die Außenseite (direkte Bewitterung) z.T. erheblich voneinander abweichen, die Werte für die Innenseite des Originals und den Zwischenraum jedoch vergleichbar sind. Die Dosimeter an den Innenseiten der Originale (Position 1) zeigen sowohl IR-spektroskopisch als auch mikroskopisch nur Anzeichen einer sehr geringen Belastung, die der Außenseite hingegen schon eine deutliche Glaskorrosion (Bilder 122, 123).



Bilder 122-123: Mikroskopische Aufnahmen der Oberfläche der Glasdosimeter aus Waldenburg, links: Expositionsort nXII 1b, Pos. 1; rechts: nXII 1b, Pos. 4 /20/

Während an Pos. 1 auf der Oberfläche des Glasdosimeters nur vereinzelt Kristalle bis zu  $30\mu\text{m}$  Größe festgestellt wurden, zeigt die Oberfläche des Glasdosimeters an Pos. 4 schon eine ausgeprägte Gelschicht mit einem partiell geweitetem Rissnetzwerk und kompakten Kristallagglomeraten bis zu  $80\mu\text{m}$  Größe. Die ermittelten  $\Delta E$ -Werte an der Innenseite des Originals (P1) sowohl in Waldenburg als auch in Niedersteine liegen wie bei den P2-Werten (Original-Außenseite) um 0,02 und können bei den 12-Monats-Messungen als unbedenklich betrachtet werden. Ein geringfügig höherer  $\Delta E$ -Wert an Pos. 1 des Nordfensters in Niedersteine im Vergleich zu Pos. 2 lässt sich auf die auch an diesem Fenster an Pos. 1 nachgewiesene höhere  $\text{SO}_2$ -Konzentration zurückführen. Zusätzlich können aber auch Emissionen aus hölzernen Einrichtungsgegenständen der Kirche, die sich unterhalb dieses Fensters befinden, einen Einfluss haben. Die Untersuchungen zeigen, dass die Glasdosimeter sehr sensitiv auf Umwelteinflüsse reagieren und signifikante Daten zur Bewertung des Schädigungspotentials liefern. Die fachgerechte Installation einer Außenschutzverglasung führt in allen untersuchten Fällen zu besseren Umgebungsbedingungen für die Glasmalereifenster.

#### 5.4. Klimatische Einflüsse auf Konstruktionshölzer im Dachgeschoss

Die Dachkonstruktion der Friedenskirche in Jauer wurde im letzten Jahrhundert mit Flammschutzmitteln behandelt. Typische Folgen dieser Behandlung sind Auffaserungserscheinungen im oberflächennahen Bereich, die auch als Holzkorrosion bekannt sind und als Mazeration bezeichnet werden. Der Einfluss der Umgebungsfeuchte auf die Änderung der Holzfeuchte von mit Holzschutzmitteln behandelten und unbehandelten Balken wurde durch Langzeitmessungen überprüft (Bilder 109-112). Eine hohe relative Luftfeuchte der Umgebung wirkt sich unmittelbar auf die Holzfeuchte von mit Flammschutzmitteln behandelten Hölzern aus.

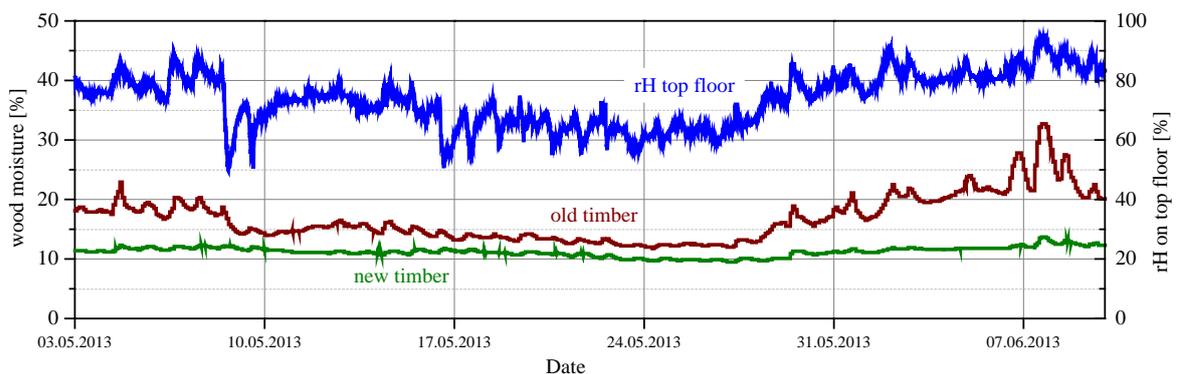


Bild 124: Relative Luftfeuchtigkeit im Dachgeschoss und Holzfeuchte von je einem alten (behandelt) und einem neuen Konstruktionsholz (unbehandelt)

Die Temperatur und die rel. Luftfeuchtigkeit im Dachgeschoss schwanken sehr stark im Jahresverlauf ( $T_{\max} = 38,7^{\circ}\text{C}$ ;  $T_{\min} = -7,6^{\circ}\text{C}$ ;  $r. F._{\max} = 92,4 \%$ ,  $r. F._{\min} = 25,9 \%$ ). Die Holzfeuchte des historischen und des neuen Balkens werden durch Änderungen der Luftfeuchte beeinflusst und unterscheiden sich deutlich voneinander. Die maximale Schwankung der Holzfeuchte im historischen Balken beträgt ca. 25 %. Im neuen Balken sind es nur ca. 7 %. Aufgrund der Flammschutzmittelbehandlung der historischen Balken befinden sich in den oberflächennahen Bereichen hygroskopische Salze, die deutlich mehr Feuchtigkeit aufnehmen und abgeben können. Die salzbedingte Feuchtigkeitsaufnahme spielt sich vor allem an der Oberfläche bis zu 5 mm Tiefe ab. Darunter liegende Schichten verhalten sich trotz teilweise erheblicher Salzgehalte ähnlich wie neu eingebautes Holz [22]. Für die Praxis bedeutet dies, dass in Dachräumen mit häufigen und starken Luftfeuchteschwankungen zwischen 76 % und 100 % r. F. die Feuerschutzsalze mit zunehmender Intensität und Geschwindigkeit Feuchtigkeit aufnehmen. Die Lösung der Salze ermöglicht deren schnellere Umlagerung und Anreicherung. Bei trockeneren Umgebungsbedingungen unter 63 % rel. Feuchte geben die Salze Feuchtigkeit ab und kristallisieren aus. Die dabei entstehenden Kristallisationsdrücke bewirken von der Oberfläche ausgehend die Schädigung der Holzstruktur.



Bild 125: Historischer Dachbalken mit Mazerationsschäden, Friedenskirche Jauer

### 5.5. Klimatische Einflüsse auf bemalte Hölzer

Schwankungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit sind für den Erhaltungszustand der Holzvertäfelung von maßgeblicher Bedeutung. Die bemalten Holzvertäfelungen können als laminierte Strukturen betrachtet werden, deren Materialien auf unterschiedliche Art und Weise auf eine Änderung des Mikroklimas reagieren.



Bild 126: Farbabplatzung an der Holzvertäfelung, Friedenskirche Jauer

Die Unterschiede im Ausdehnungskoeffizienten dieser Materialien sind häufig die Ursache für Schäden von bemaltem Holz in Gebäuden mit wechselnden Umgebungsbedingungen. Aufgrund seiner Natur reagiert Holz stärker mit Änderungen seiner Dimension bei Schwankungen der relativen Feuchtigkeit als bei Temperaturschwankungen /23/. Wie stark die relative Luftfeuchtigkeit die Eigenschaften von Holz beeinflusst, hängt sowohl von der Holzsorte als auch vom Alter ab. Eichenholz mit einer höheren Dichte im Vergleich zu Kiefernholz schwindet und dehnt sich daher stärker. Auch sehr altes Holz reagiert noch auf Feuchtigkeitsschwankungen. Entscheidend dafür ist die sich einstellende Gleichgewichtsfeuchte, d.h. das Gleichgewicht zwischen der Umgebungsfeuchte und dem Wassergehalt in den Holzzellen bei einer bestimmten Temperatur. Diese hängt wiederum von der Holzart ab. Ein typischer Wert bei 20°C und 65 % r. F. liegt bei ca. 12 % Holzfeuchte /24/. Weil Wassermoleküle an den Zellwänden chemisch stärker gebunden sind als in der Umgebungsluft, wird für ihre Desorption mehr Energie benötigt als für die Absorption aus der Umgebungsfeuchte. Somit ändert sich die Gleichgewichtsfeuchte bei kurzzeitigen Schwankungen der relativen Luftfeuchte nur wenig. Die Tatsache, dass Holzkonstruktionen zusätzlich bemalt sind und die Malschichten unterschiedliche Porositäten aufweisen, kann die Wassersorption beträchtlich beeinflussen, und dreidimensionale Veränderungen sind nur schwer voraussehbar. Zusätzliche Einflüsse haben feuchtigkeitssensible Stoffe aus vergangenen Holzbehandlungen, die wiederum auch die Eigenschaften des Holzes verändern können.

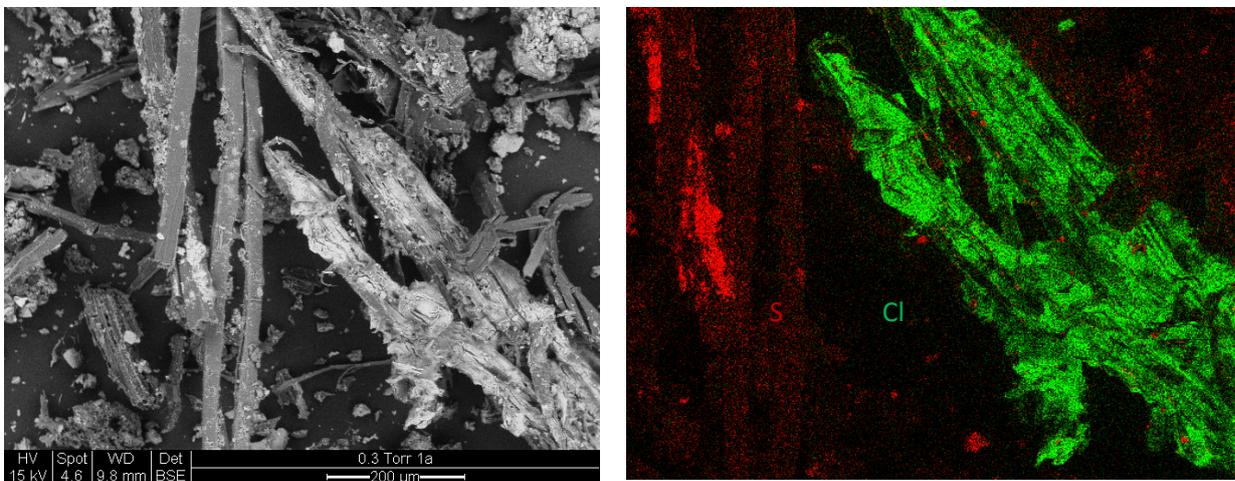
Auch Malschichten selbst verändern sich mit Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen. Ein direkter Einfall des Sonnenlichts auf bemalte Hölzer ist nicht nur ein Risiko für photosensitive Pigmente, sondern kann aufgrund der solaren Strahlung auch zu sehr hohen Temperaturen führen. Die Dimensionsänderungen sind allerdings geringer als die von Holz, so dass Temperatur- und Feuchtigkeitsänderungen i.a. zu Spannungen zwischen Holzsubstrat und Malschicht führen, die wiederum Adhäsionsverluste und Delaminierungserscheinungen zur Folge haben können. Diese Schäden an Malschichten auf Holz sind weltweit bekannt /25/. Die Zeitdauer, die notwendig ist, bis bemalte Hölzer auf geänderte Umgebungsbedingungen reagieren, ist sowohl abhängig von der Art des Holzes, von der Schnittrichtung als auch von den Malschichten und dem Zustand Holz/Malschicht.

Nur durch ein Monitoring mit spezieller Messtechnik lassen sich diese Veränderungen nachweisen /26/. Um die Schäden an bemalten Holzvertäfelungen so gering wie möglich zu halten, sollten die Umgebungsbedingungen möglichst wenig schwanken.

## 6. Analytische Untersuchungen

### 6.1. Untersuchungen zur Mazeration von Holzproben

Die genauen Substanzen, die vor mehr als 70 Jahren als Flammschutzmittel in der Friedenskirche Jauer benutzt wurden, sind leider nicht bekannt. Allgemein sind Ammoniumsalze für solche Anwendungen eingesetzt worden. Häufig wurden Ammoniumphosphate oder -sulfate verwendet /22/, die hygroskopisch sind. Elektronenmikroskopische Untersuchungen an Holzproben belegen hohe Konzentrationen an Schwefel und Chlor in den äußeren Schichten des historischen Balkens. Während der Schwefelgehalt auf die Flammschutzmittelbehandlung zurückzuführen ist, ließ sich analytisch nachweisen, dass Chlor aus einer Holzschutzmittelbehandlung stammt und als PCP vorliegt. Der Gehalt an PCP betrug in der belasteten Probe 3 mg/kg /27/.



Bilder 127-128: Rasterelektronenmikroskopische Aufnahme einer Holzprobe (links) und Elementverteilung an Schwefel und Chlor in der Probe (rechts)

Der Schwefelgehalt des mit Flammschutzmitteln behandelten Balkens wurde mittels eines Verbrennungsanalysators bestimmt /28/. Die Analysen von Proben aus 3-5 cm Tiefe des Balkens ergaben Schwefelkonzentrationen von ca. 0,02 %, ein für Holzproben typischer Wert. Proben vom äußeren Bereich des Balkens hingegen weisen Schwefelkonzentrationen von 7-9 % auf. Hierbei handelt es sich um eine ungewöhnlich hochbelastete Probe /29/.

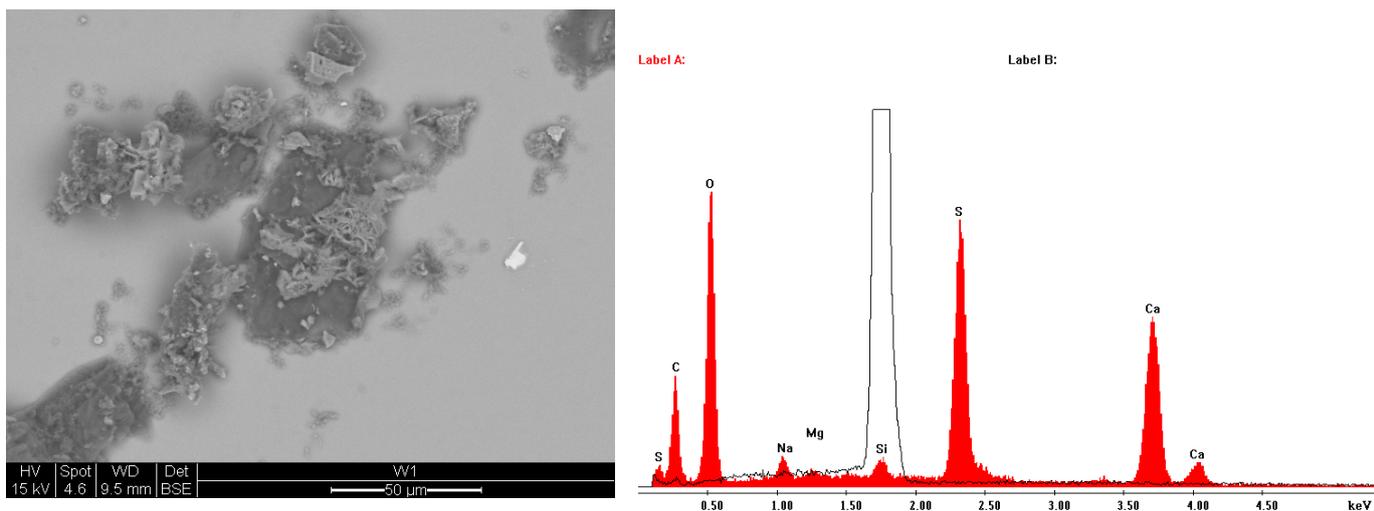
Aus früheren Untersuchungen zur Mazeration historischer Dachkonstruktionen ist die folgende Kategorisierung abgeleitet worden /22/:

Phosphat- bzw. Sulfatgehalt:

- |                   |  |
|-------------------|--|
| < 800 mg/kg Holz  | keine Mazeration Gefahr  |
| < 2000 mg/kg Holz | mittlere Gefahr, Beobachtung der Hölzer alle 5 Jahre   |
| > 2000 mg/kg Holz | höhere Gefahr der Mazeration, jährlich oder alle 2 Jahre Hölzer beobachten, Nutzungs- und Klimaänderungen beachten |

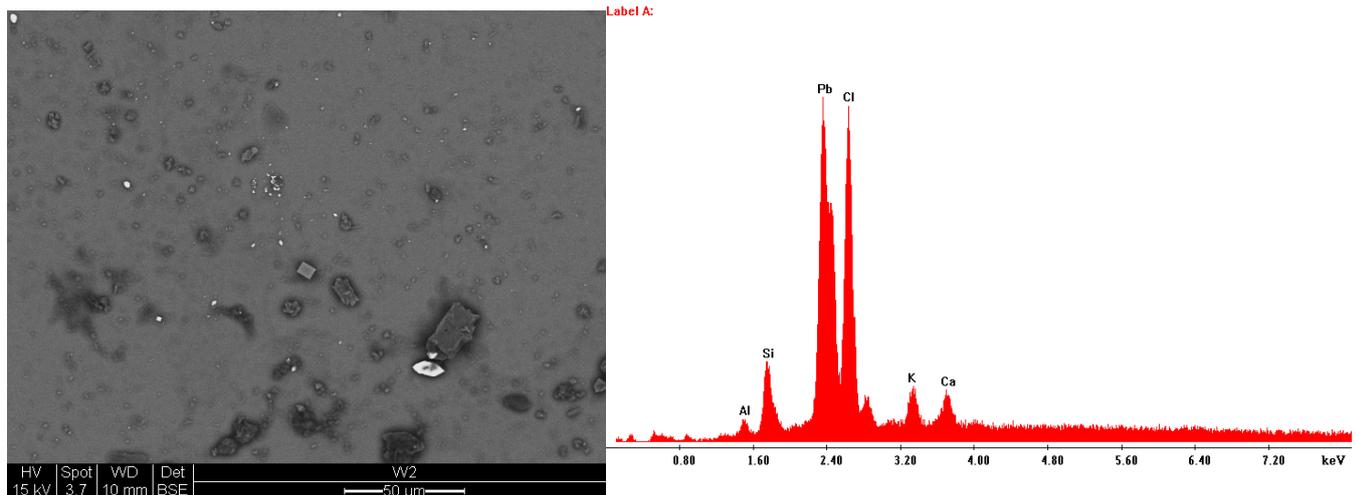
## 6.2. Untersuchungen zur Staubbelastung im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Staub und Ablagerungen von feinen Partikeln können zu Schäden auf historischen Glasmalereien führen /30, 31/. Die für eine gut funktionierende Außenschutzverglasung notwendige Luftzirkulation im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung ermöglicht auch den Transport von Staubpartikeln und Aerosolen. Um mögliche Staubablagerungen auf den Glasoberfläche zu analysieren, erfolgte eine Staubprobenahme als Langzeitmessung mit Hilfe von Silizium-Wafern, dabei handelt es sich um Siliziumscheiben mit den Abmessungen 25 x 25 mm. Die Staubsammler wurden am Fenster nXII in Waldenburg an Pos. 1 und Pos. 2 sowie an den Fenstern nV und sV in Niedersteine an Pos. 2 (im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung) für ein Jahr exponiert. Neben licht- und elektronenmikroskopischen Untersuchungen, erfolgten die Analysen der Partikelablagerungen mit Hilfe des EDX-System im Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM). Die Untersuchungen wurden im High-Vacuum-Mode des Elektronenmikroskops durchgeführt und die Proben mit Kohlenstoff besputtert. In Waldenburg erfolgte ein Vergleich von Staubablagerungen auf der Innenseite (Pos. 1) und der Außenseite am Original (Pos. 2).



Bilder 129-130: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum von Staubablagerungen auf Si-Wafer, Fenster nXII1b, Pos. 1

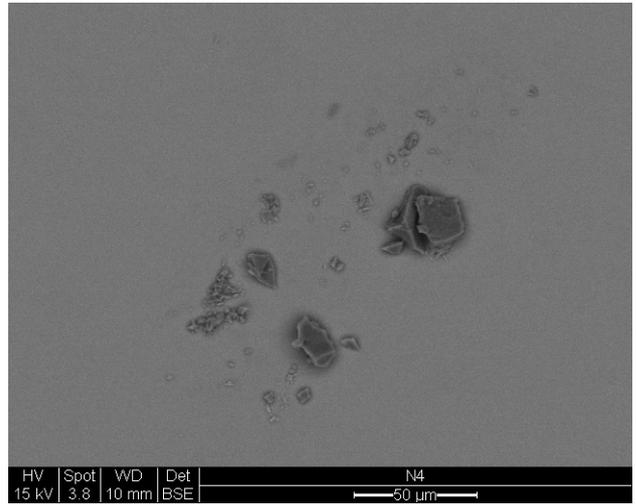
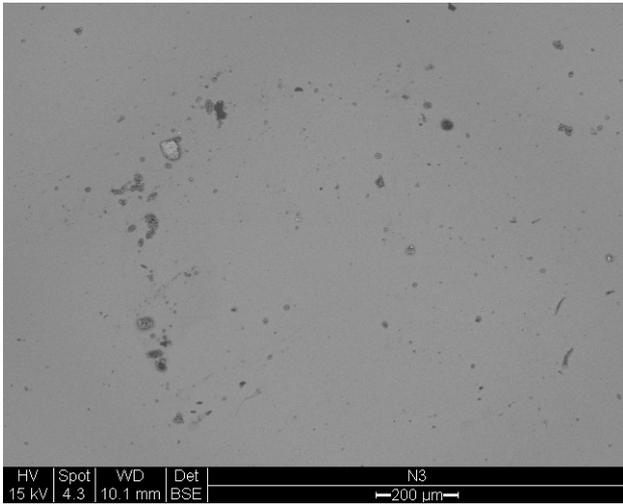
Die EDX-Spektren der Ablagerungen (Label A-rot) wurden im Vergleich zum Spektrum des Si-Wafers (Label B-schwarz) dargestellt. Hauptbestandteil der Ablagerungen sind Calcium, Schwefel und Sauerstoff, d.h. es könnte sich um Gipsablagerungen aus der Umgebung handeln. In den dunklen Bereichen wurden Kohlenstoffanreicherungen (Ruß?) festgestellt. Die Analyse der hellen punktförmigen Ablagerungen in Bild 129 ließ auf wolframhaltige Partikel schließen deren Herkunft möglicherweise auf den Abrieb von Schneidwerkzeugen beim Ausbau der Fenster nX und nXI zurückzuführen ist. In einigen Partikeln wurde auch Chlor festgestellt.



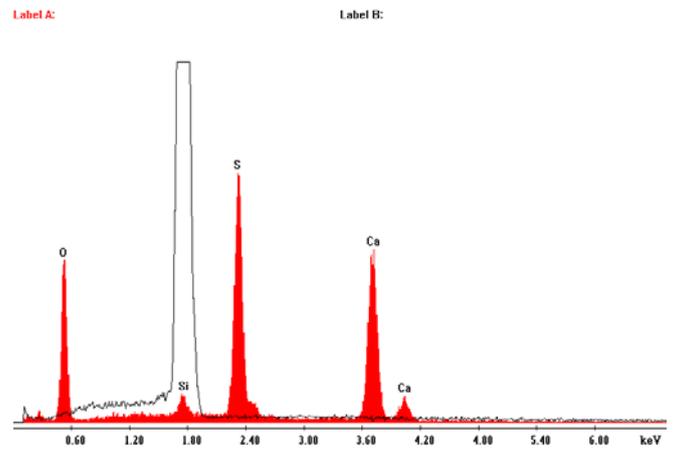
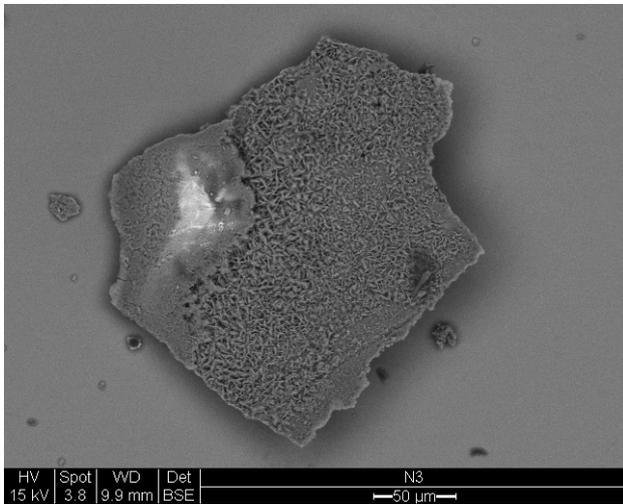
Bilder 131-132: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum von Staubablagerungen auf Si-Wafer, Fenster nXII1b, Pos. 2

Wolframpartikel befinden sich auch als Ablagerungen im Zwischenraum an Pos. 2, darüber hinaus auch Blei, Chlor, Kalium und Calcium (Bild 131/132) sowie in weiteren Spektren auch Natrium, Eisen, Chlor, Calcium, Schwefel und Sauerstoff. Daraus kann mit Sicherheit auch wieder auf Gipsablagerungen aus dem Staub der Umgebung geschlossen werden. Chlorverbindungen von Eisen (Molysit) und Blei (Cutonnit) kommen zwar als natürliche Minerale vor, als Partikelablagerungen an Kirchenfenstern wurden sie bisher jedoch noch nicht gefunden. Spuren von Wolframpartikeln könnten wiederum auf die Bautätigkeit in der Kirche während der Exposition der Staubsammler zurückzuführen sein. Auf der Innen- und Außenseite der Originalverglasung ist mit ähnlichen Staubablagerungen zu rechnen. Für Gipsablagerungen ist unter ungünstigen Umgebungsbedingungen ein gewisses Schädigungspotential auf sehr empfindlichen Gläsern nachgewiesen worden /31/, für Gläser des 19. Jh. sind solche Ablagerungen jedoch unbedenklich.

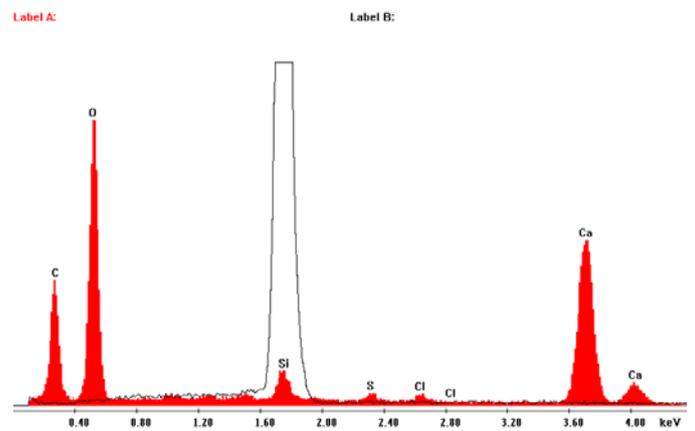
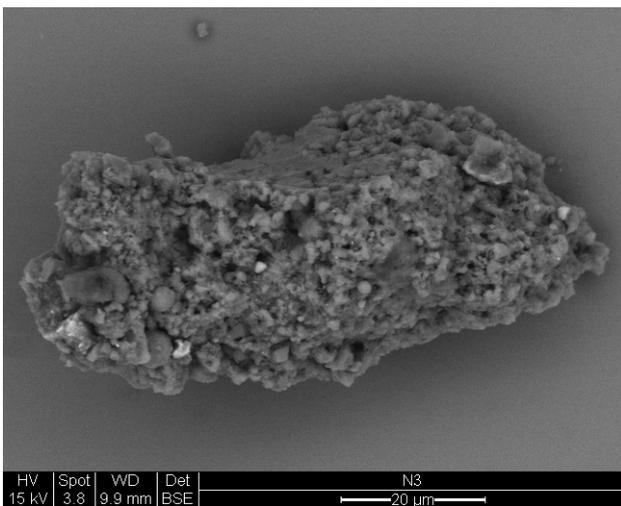
Die Auswertung der Staubsammler in Niedersteine zeigt, dass die gesammelte Staubmenge auf der Südseite höher ist als auf der Nordseite. Die Bestimmung der Elemente der Staubpartikel lässt jedoch auf eine ähnliche Zusammensetzung schließen. Als Hauptkomponenten der EDX-Spektren von Staubsammlern des Südfensters und des Nordfensters wurden Calcium, Schwefel, Kalium, Natrium, Aluminium, Silizium, Blei, Eisen, Chlor, Kohlenstoff und Sauerstoff nachgewiesen (Bilder 133-142). Als Hauptkomponente kann anhand der elektronenmikroskopischen Abbildungen wiederum eindeutig auf Gips geschlossen werden. Chlor wurde sowohl in Kombination mit Natrium und Calcium als auch mit Eisen nachgewiesen. Die Anteile sind jedoch deutlich geringer als in Waldenburg. Zink- und manganhaltige Partikel wurden nur am Südfenster in Niedersteine gefunden, Bleipartikel hingegen auf den Staubsammlern an allen Fenstern. Trotz der hohen  $\text{NO}_x$ -Konzentration der Außenbelastung in der ländlichen Umgebung von Niedersteine konnte an den Staubsammlern kein Ammoniumnitrat nachgewiesen werden, wie es beispielsweise am Stendaler und Havelberger Dom der Fall war /30/.



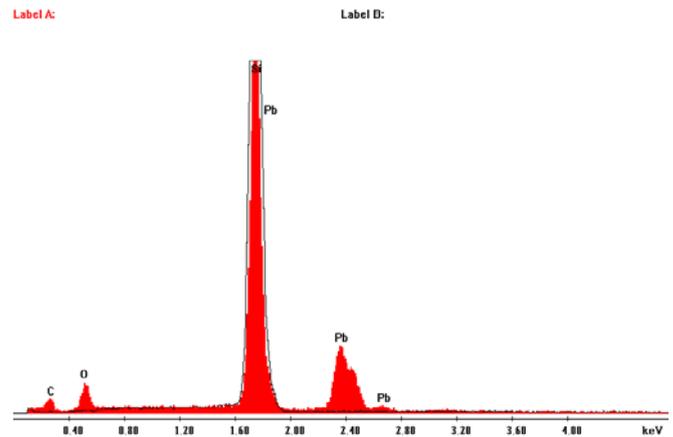
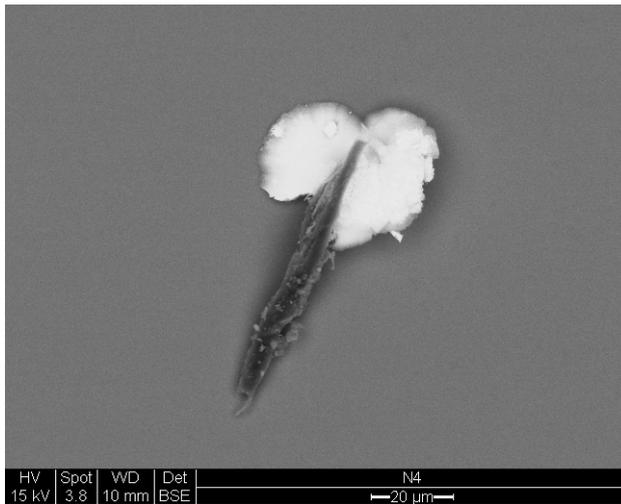
Bilder 133-134: Elektronenmikroskopische Aufnahmen der Staubsammler aus Niedersteine, rechts: Fenster sV, links : Fenster nV (Pos. 2)



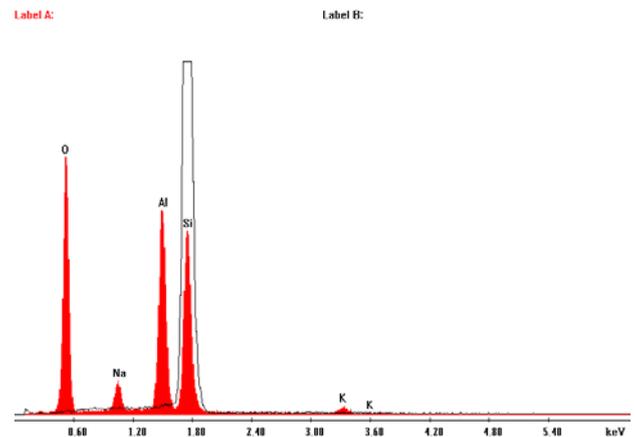
Bilder 135-136: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum eines Gipspartikels



Bilder 137-138: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum eines Calcitpartikels mit Spuren von Chlor



Bilder 139-140: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum eines Bleipartikels



Bilder 141-142: Elektronenmikroskopische Aufnahme und EDX-Spektrum von aluminium- und siliziumhaltigen Partikeln

Partikel, die das Element Wolfram enthalten, wurden im Gegensatz zu Waldenburg in Niedersteine nicht gefunden. Während der Exposition der Staubsammler fanden in Niedersteine auch keine Bauarbeiten an den Fenstern statt.

Die analysierten Partikel im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung in Niedersteine und Waldenburg stellen keine Gefahr für die Glassubstanz dar. Die Hauptkomponenten entsprechen denen, die auch bei früheren Untersuchungen in anderen Objekten gefunden wurden /30/. Neu waren lediglich chlorhaltige Partikel in beiden Kirchen, deren Herkunft möglicherweise auf Farbanstriche zurückzuführen ist, die im Innenraum verwendet wurden.

## 7. Zusammenfassung

Die Deutsch-Polnische Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz hat die Aufgabe, den Schutz wertvoller Kulturgüter durch Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen zu fördern. Dazu dienen zum Beispiel Projekte, die eine Anwendung moderner Entwicklungen auf besonders gefährdete Objekte praktizieren. Im Ergebnis der Bearbeitung werden Modelle zur Verfügung gestellt, die dann für ähnlich gelagerten Probleme allgemein übernommen werden können. Besondere Bedeutung haben in diesem Zusammenhang künstlerisch bedeutende Werke, die bereits sichtbare Zerfallserscheinungen aufweisen und bei denen mit hoher Wahrscheinlichkeit in naher Zukunft mit dramatischen Materialumwandlungen gerechnet werden muss, wenn nicht effektive Schutzmaßnahmen getroffen werden. Das mit diesem Bericht abgeschlossenen Projekt hatte drei solche Fälle zum Arbeitsgegenstand. Durch den Einbau von Außenschutzverglasungen wurden farbige Glasmalereifenster in der katholischen Pfarrkirche Niedersteine, der katholischen Kirche zu den Schutzengeln in Waldenburg und der Friedenskirche in Jauer modellhaft und nachhaltig vor der Einwirkung von Umwelteinflüssen geschützt. Die Restaurierung der Glasmalereifenster, der Entwurf und Einbau der Schutzverglasung erfolgten durch die Restaurierungswerkstatt Witraze Beata Oleszczuk in Breslau in enger Abstimmung mit den am Projekt beteiligten Gutachtern und den zuständigen Denkmalbehörden (Kap. 3). Die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen wurde mit Hilfe von naturwissenschaftlichen Untersuchungen wie Klimamessungen, Schadstoffmessungen und der Bewertung des Schädigungspotentials der Umgebungsbedingungen mit Glasdosimetern nachgewiesen.

Die Messungen von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit erfolgten sowohl an der Innen- und Außenseite der Originalverglasung als auch an der Außenschutzverglasung (Kap. 4). Die Messwerte belegen, dass eine Schutzverglasung nicht völlig dicht im Hinblick auf Veränderungen der Luftfeuchtigkeit konstruiert werden kann. Dennoch ist ein deutlicher Unterschied zwischen einem geschützten und einem nichtgeschützten Fenster besonders hinsichtlich des jahreszeitlichen Verlaufs der relativen Luftfeuchtigkeit festzustellen. Die Außenschutzverglasung dämpft den unmittelbaren äußeren Witterungseinfluss. Die Tendenz, dass die Extremwerte und Schwankungen der relativen Luftfeuchtigkeit von außen nach innen hin (Pos. 4...Pos. 1) abnehmen ist eindeutig erkennbar, dennoch kann eine hohe relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung zur Bildung von Kondenswasser führen. Die Wirksamkeit der Außenschutzverglasung liegt eindeutig darin, dass Bereiche hoher relativer Luftfeuchtigkeit (90-100 %) an der Außenseite und Innenseite der Originalverglasung gar nicht mehr erreicht werden bzw. deutlich kürzer sind als ohne Schutzverglasung und damit Kondenswasserbildung auf den Originalen ausgeschlossen ist. Dieser Effekt konnte eindeutig mit Hilfe der durchgeführten Klimamessungen nachweisen werden (Kap. 5.1).

Im Winter verringert die Außenschutzverglasung die Abkühlung der Glasmalereien auf extreme Minustemperaturen. Im Sommer hingegen sorgt die Außenschutzverglasung für eine Aufheizung des Zwischenraumes, so dass die Originalscheiben zum Teil auf der

Außenseite wärmer sind als die Außenseite der Außenschutzverglasung. Temperaturmessung in unterschiedlicher Höhe an einem Fenster in Waldenburg liefern Messwerte, die den Temperaturunterschied zwischen dem Feld nXII1b und dem Feld nXII6b deutlich machen. Bei einem Höhenunterschied von ca. 4,50 m beträgt der Temperaturunterschied im Juni 14 K zwischen der Maximaltemperatur unten und oben. In Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Sonneneinstrahlung sind diese Differenzen in den Wintermonaten geringer. Umso wichtiger ist es, dass die gesamte Konstruktion so erfolgt, dass eine Luftzirkulation im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung möglich ist. Jedoch sind schnelle Temperaturänderungen am Original nahezu ausgeschlossen, da die direkte Einwirkung von plötzlich einsetzenden Wetteränderungen (wie z. B. Schlagregen) durch die Außenschutzverglasung verhindert wird. Die Temperaturänderungen verlaufen daher langsamer als an der Außenschutzverglasung. An den Glasmalereien auftretende Spannungen in der Grenzfläche Glas/Malschicht, die infolge der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten entstehen, sind damit weitaus ungefährlicher als bei direktem Auftreffen von Regen auf stark sonnenerhitzte Scheiben im ungeschützten Fenster.

Chemische Korrosionsprozesse, zu denen bei den Glasmalereien dieser drei Kirchen vor allem die Malschichten neigen, sind nur zu befürchten, wenn bei hoher Luftfeuchte gleichzeitig eine starke Belastung durch saure Schadstoffe gegeben ist. Genau das ist insbesondere im Winter der Fall. Die Schadstoffmessungen zeigen, dass eine gut funktionierende Außenschutzverglasung in der Lage ist, Umweltbelastungen durch Luftschadstoffe von den Glasmalereien fern zu halten und sie verringert auch den direkten Kontakt mit Luftschadstoffen und Feinstaub. Die hohen Schadstoffkonzentrationen im Außenbereich sind im Kircheninneren merklich reduziert. In der Kombination mit einer geringeren Luftfeuchtigkeit im Vergleich zum Außenbereich ist das Schädigungspotential der Umgebungsbedingungen als deutlich geringer einzuschätzen als ohne Vorhandensein einer Schutzverglasung (Kap. 5.2). Durch den Einsatz von Glasdosimetern konnten komplexe korrosive Umwelteinwirkungen ortsspezifisch und quantitativ erfasst werden. Die Dosimeter an den Innenseiten der Originale wiesen sowohl IR-spektroskopisch als auch mikroskopisch nur Anzeichen einer sehr geringen Belastung auf, die der Außenseite hingegen schon eine deutliche Glaskorrosion. Die Untersuchungen zeigen, dass die Glasdosimeter sehr sensitiv auf Umwelteinflüsse reagieren und signifikante Daten zur Bewertung des Schädigungspotentials liefern. Die fachgerechte Installation einer Außenschutzverglasung führt in allen untersuchten Fällen zu besseren Umgebungsbedingungen für die Glasmalereifenster (Kap. 5.3).

Deutlich geringer wird sich die Außenschutzverglasung auf die klimatischen Bedingungen im Kircheninnenraum auswirken, weil hier andere Öffnungen wie Türen, Undichtheiten im Dach und ähnliches eine Rolle spielen. Das Projekt wurde in einem Fall (Jauer) genutzt, um auf die Situation wertvoller Kunstwerke im Innenraum sowie der für die Statik wichtigen tragenden Holzbalken aufmerksam zu machen. Mit Hilfe von Klimamessungen im Dachbereich der Friedenskirche Jauer konnte nachgewiesen werden, dass eine hohe relative Luftfeuchte der Umgebung sich auch unmittelbar auf die Holzfeuchte von mit

Flammschutzmitteln behandelten Hölzern auswirkt. Für die Praxis bedeutet dies, dass in Dachräumen mit häufigen und starken Luftfeuchteschwankungen zwischen 76% und 100% r.F. die Flammschutzmittel (häufig Salze) mit zunehmender Intensität und Geschwindigkeit Feuchtigkeit aufnehmen. Die Lösung der Salze ermöglicht deren schnellere Umlagerung und Anreicherung. Bei trockeneren Umgebungsbedingungen unter 63 % relativer Luftfeuchte geben die Salze Feuchtigkeit ab und kristallisieren aus. Die dabei entstehenden Kristallisationsdrücke bewirken von der Oberfläche ausgehend die Schädigung der Holzstruktur (Kap. 5.4.).

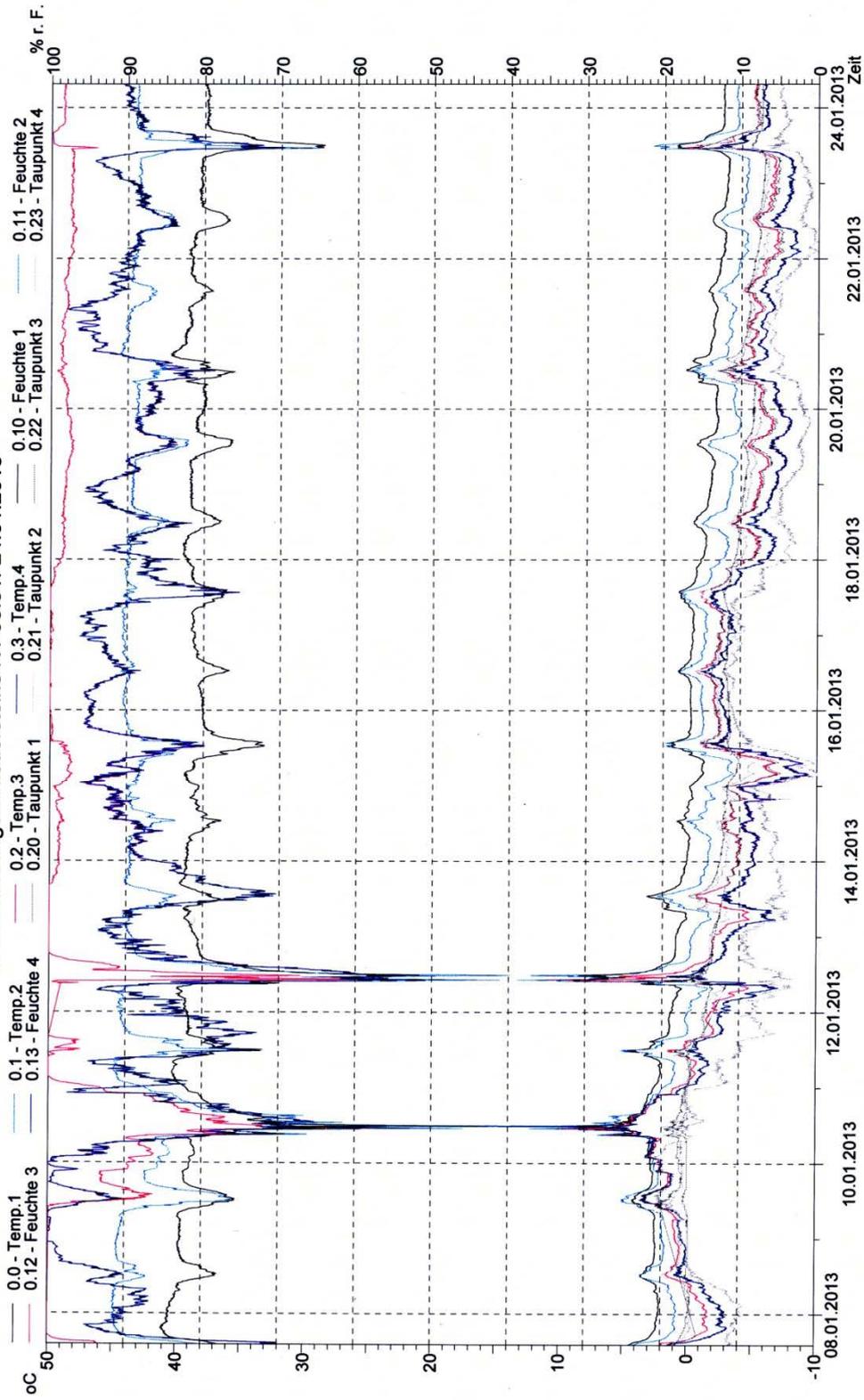
Die Umgebungsbedingungen, insbesondere die Änderungen der relativen Luftfeuchtigkeit können auch Schäden an Malschichten auf Holz verursachen. Die Zeitdauer, die notwendig ist bis bemalte Hölzer auf geänderte Umgebungsbedingungen reagieren, ist sowohl abhängig von der Art des Holzes, von der Schnittrichtung als auch von den Malschichten und dem Zustand Holz/Malschicht. Nur durch ein Monitoring mit spezieller Messtechnik lassen sich diese Veränderungen nachweisen /26/. Um die Schäden an bemalten Holzvertäfelungen so gering wie möglich zu halten, sollten die Umgebungsbedingungen möglichst wenig schwanken.

**Anhang:**

Typische Klimadiagramme für die Kirchen in Waldenburg, Niedersteine und Jauer

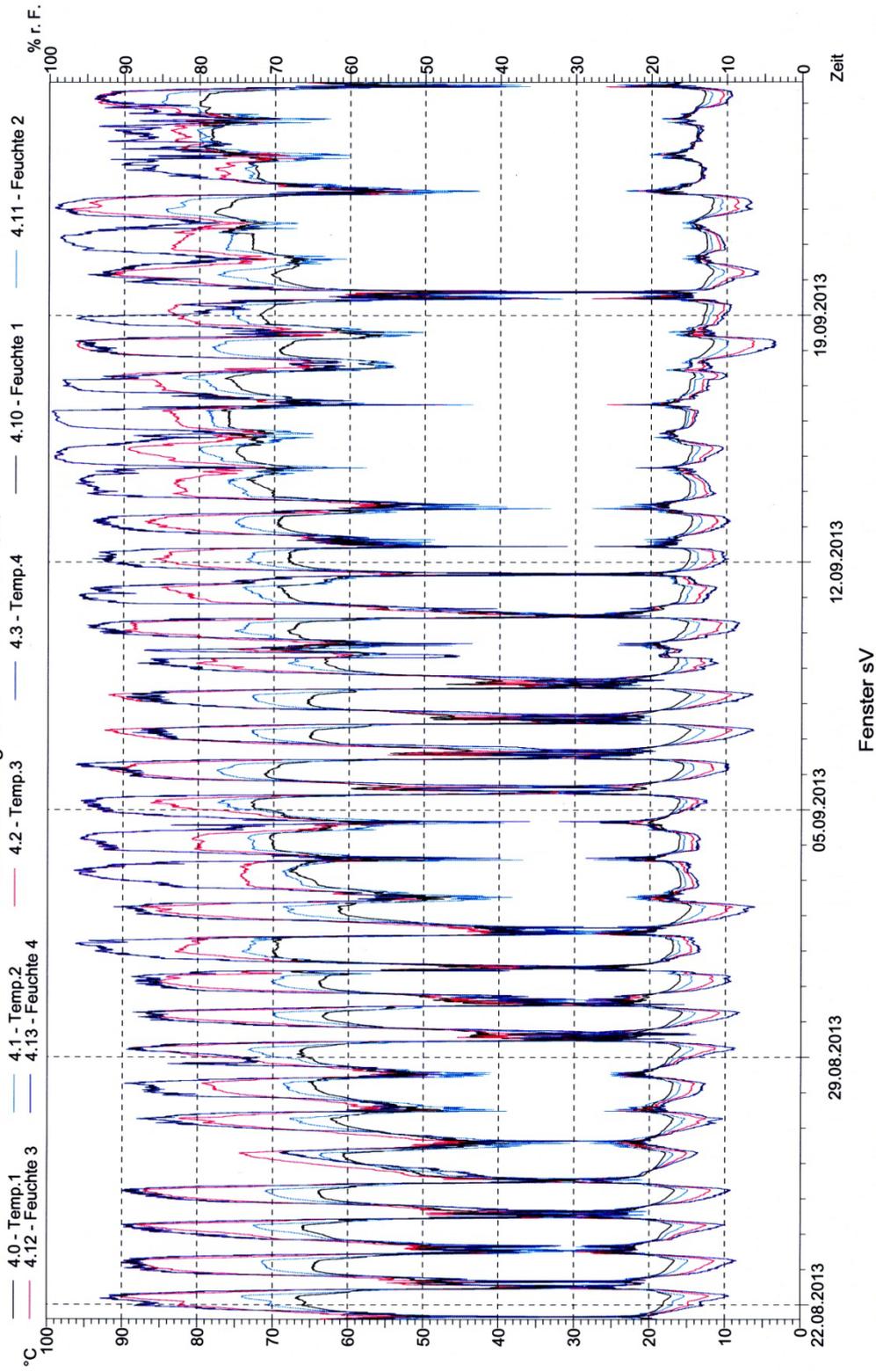
Programm des Abschlusskolloquiums in Waldenburg am 27.08.2014

Klimamessungen Niedersteine N1 08.01.-24.01.2013

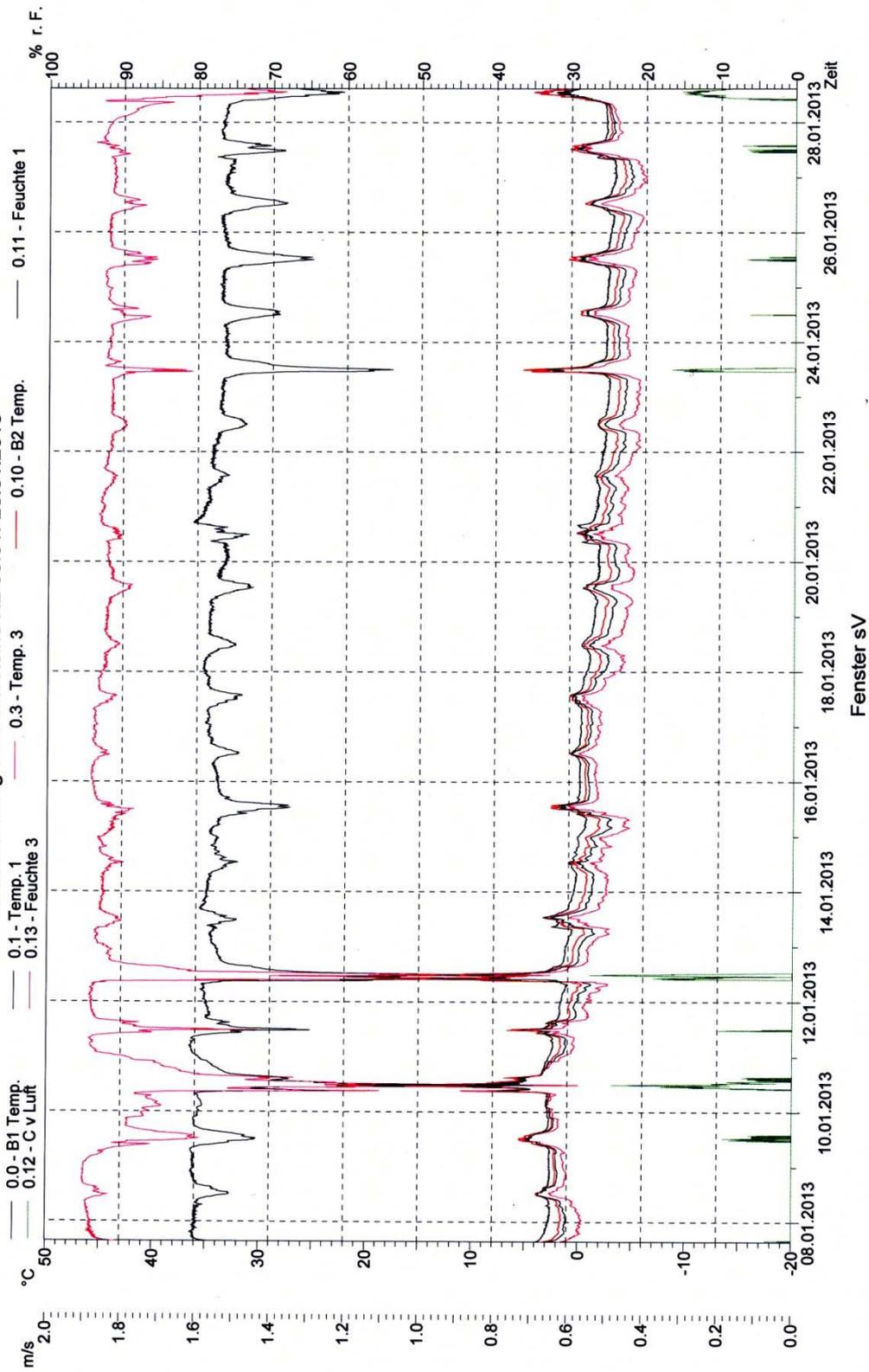


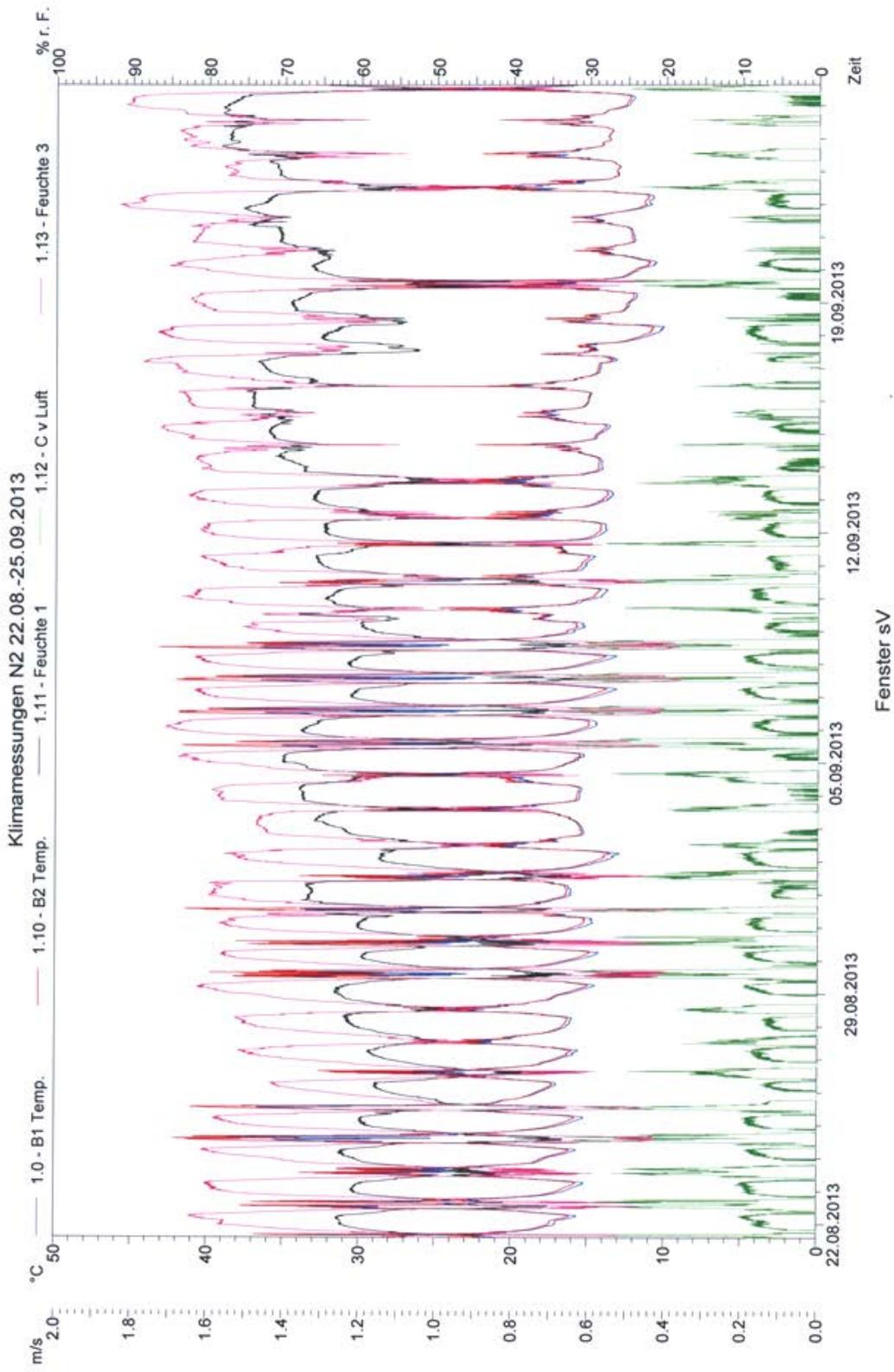
Kondensation auf der Innenseite der Außenschutzverglasung, Fenster sV

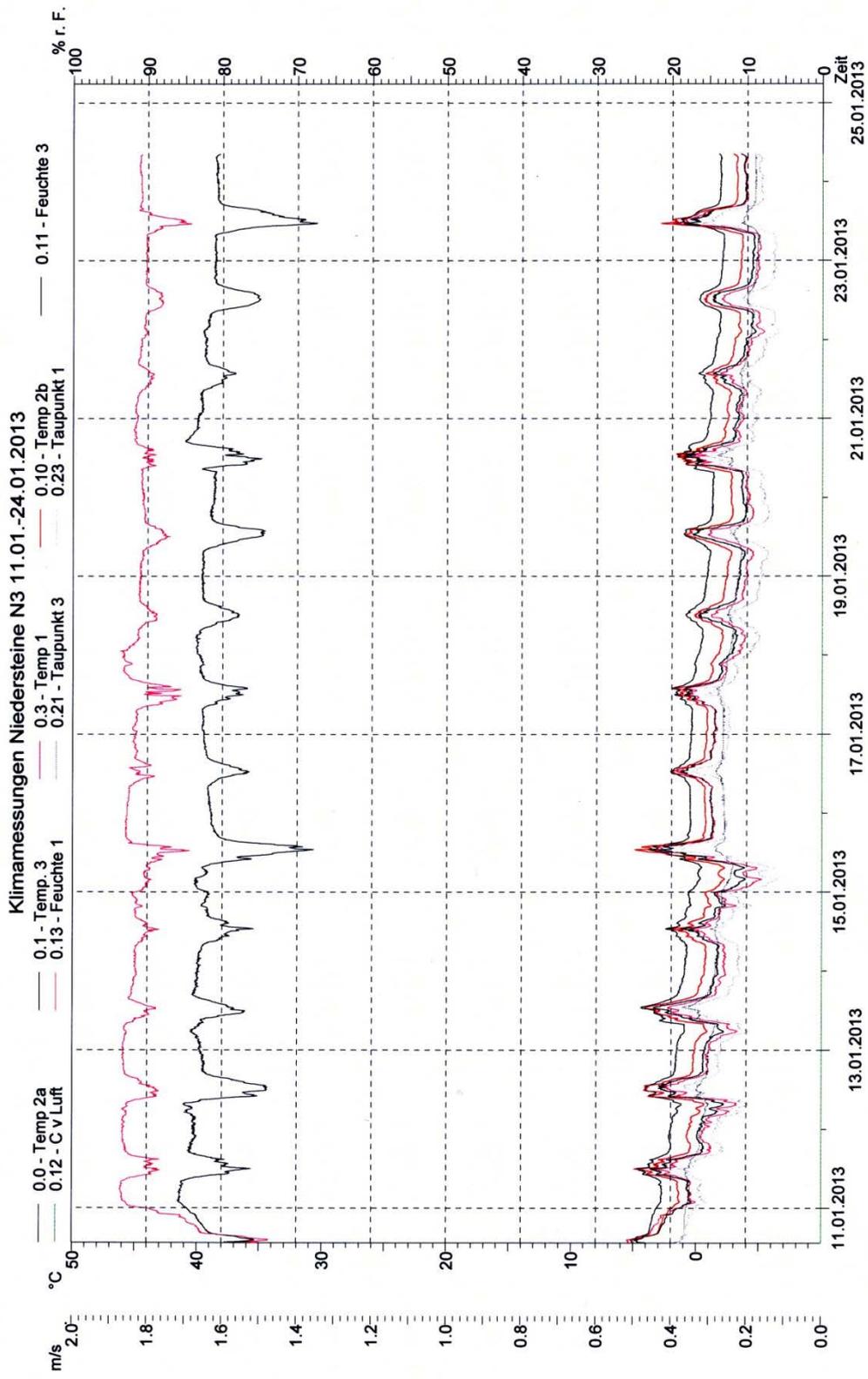
# Klimamessungen N1 22.08.-25.09.2013



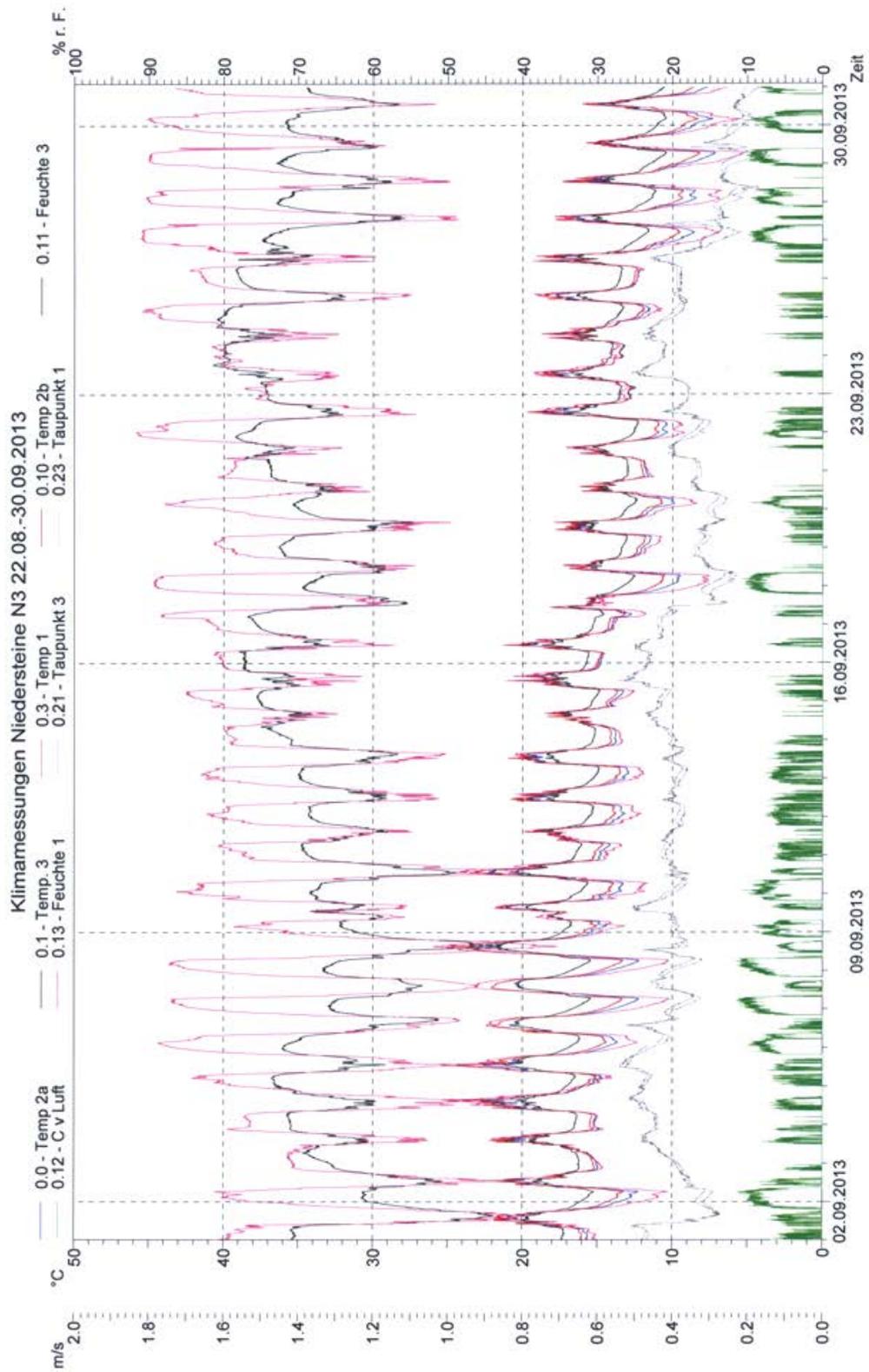
Klimamessungen Niedersteine N2 08.01.-28.01.2013





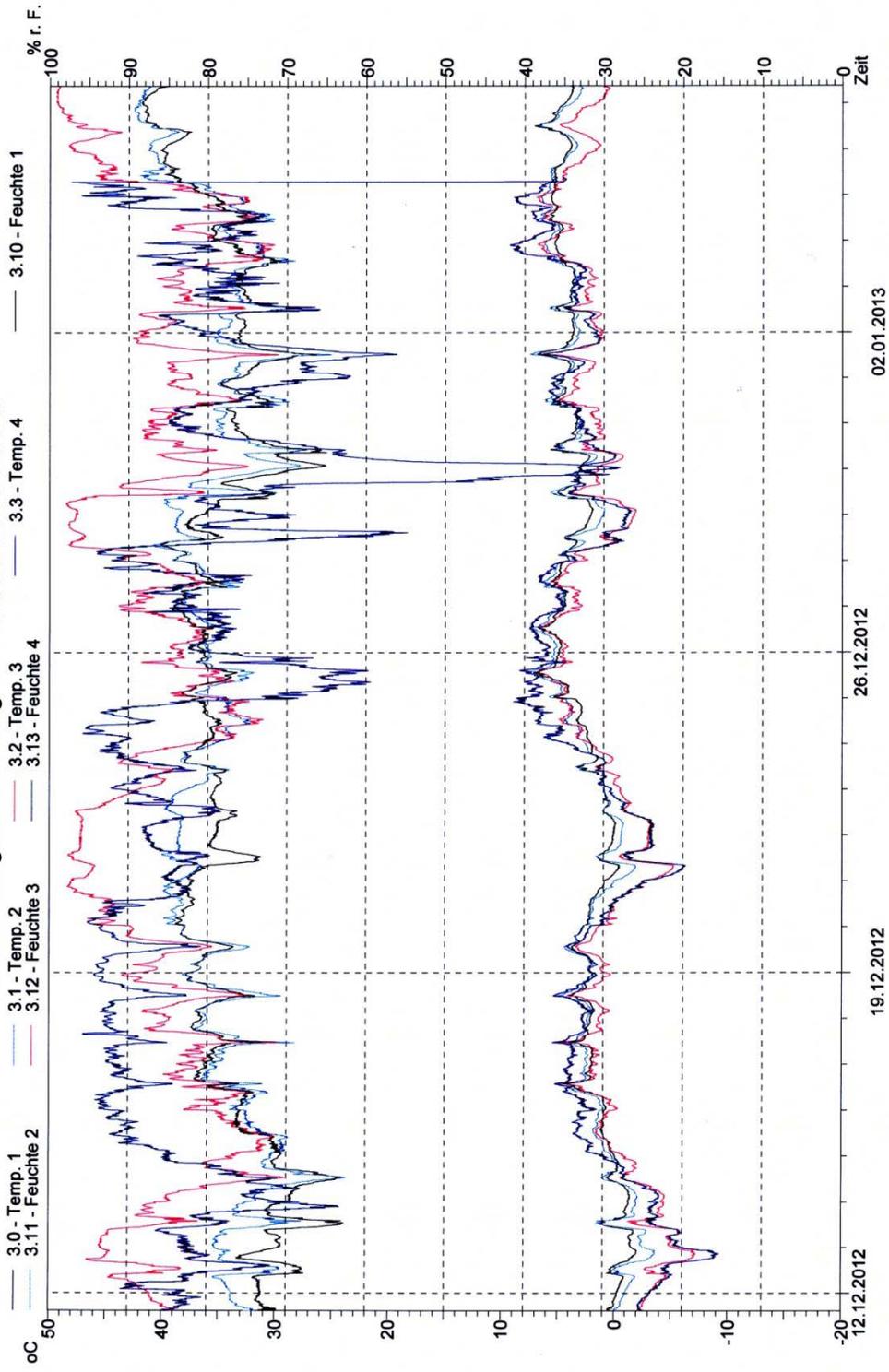


keine Luftzirkulation im Messzeitraum, Fenster nV, Pos. 1 schwarz, Pos. 3 rot



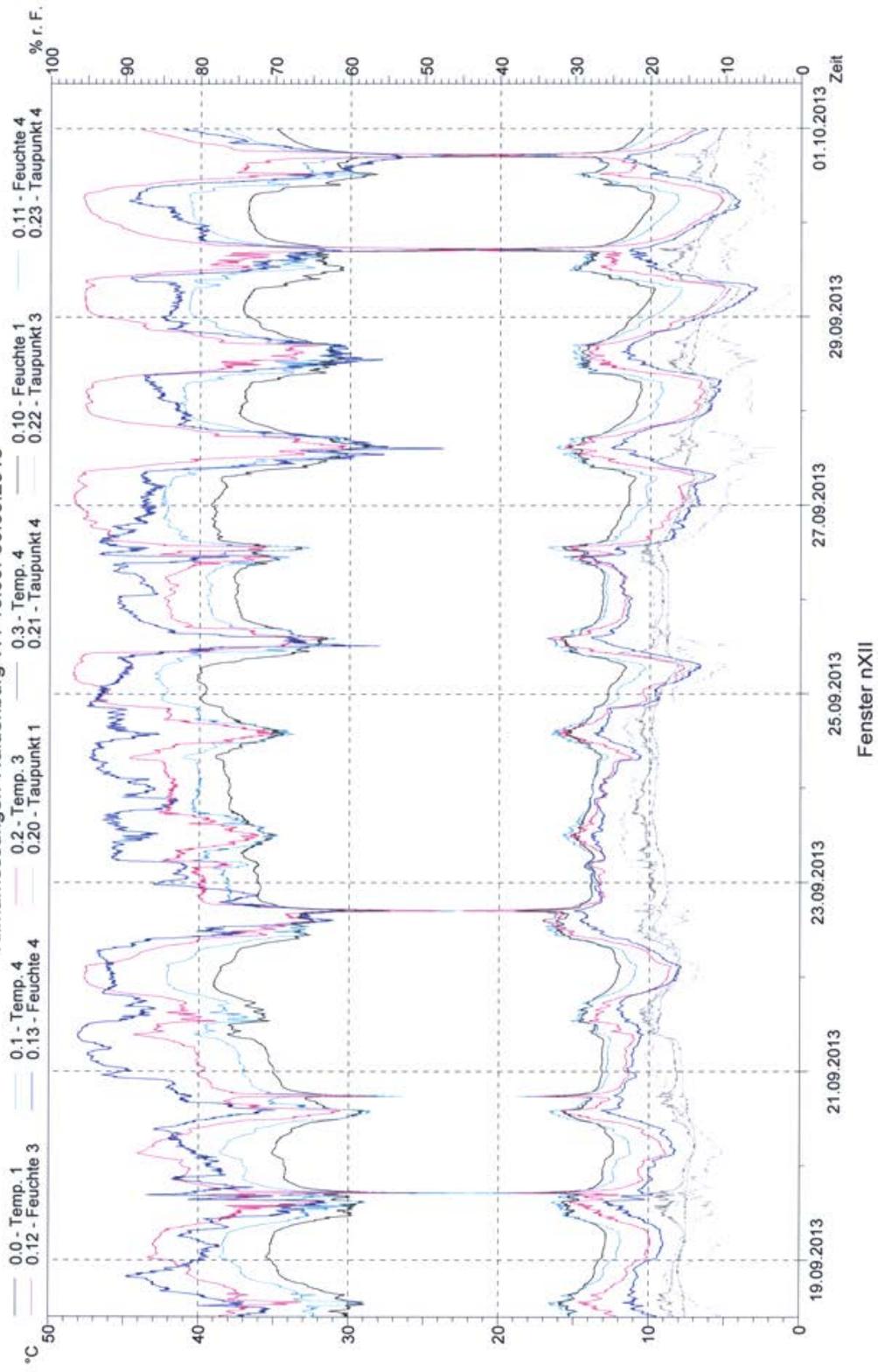
Fenster nV, Pos. 1 schwarz, Pos. 3 rot

Klimamessungen Waldenburg W1 12.12.2012.-07.01.2013

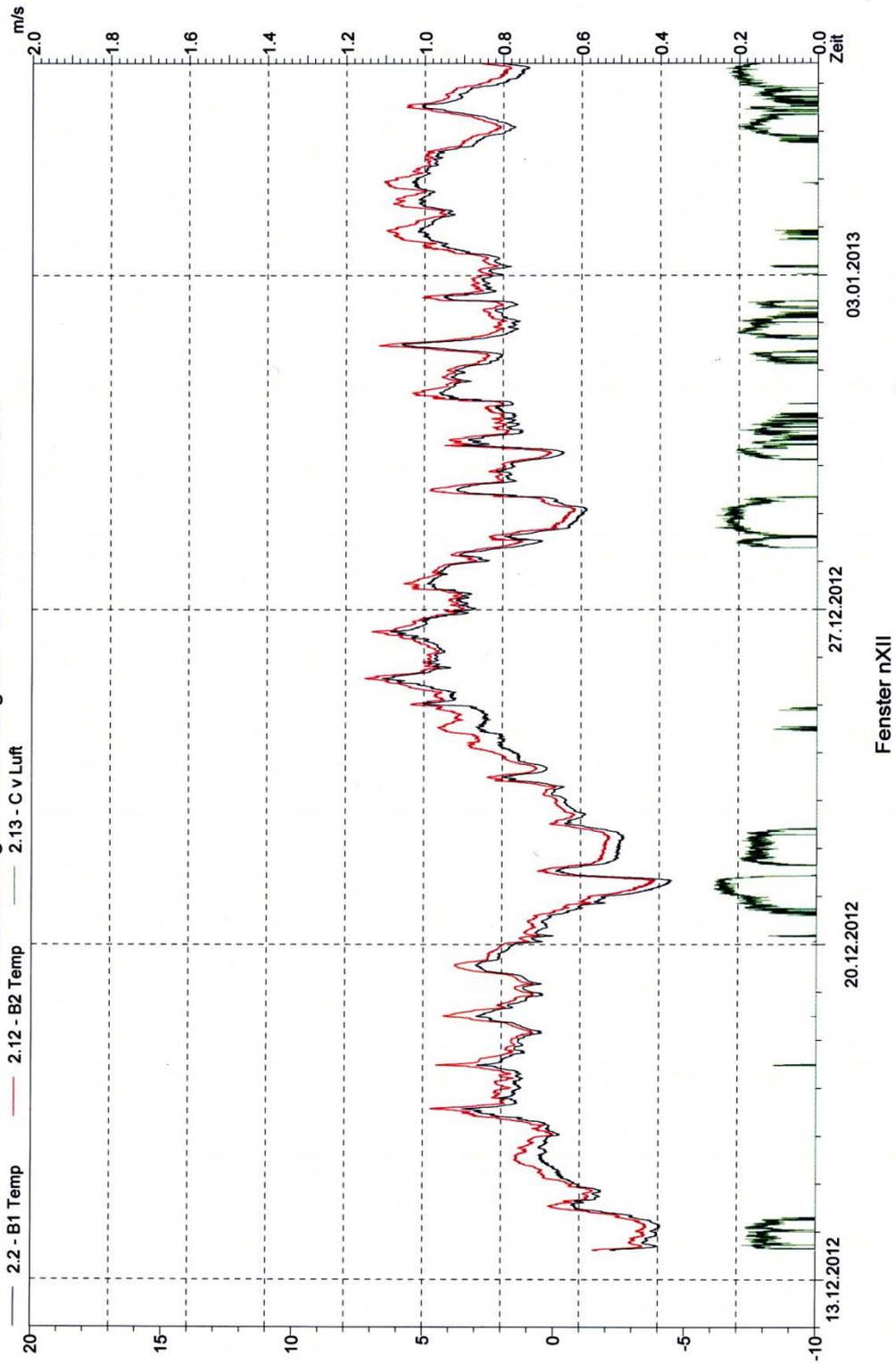


Fenster nXII

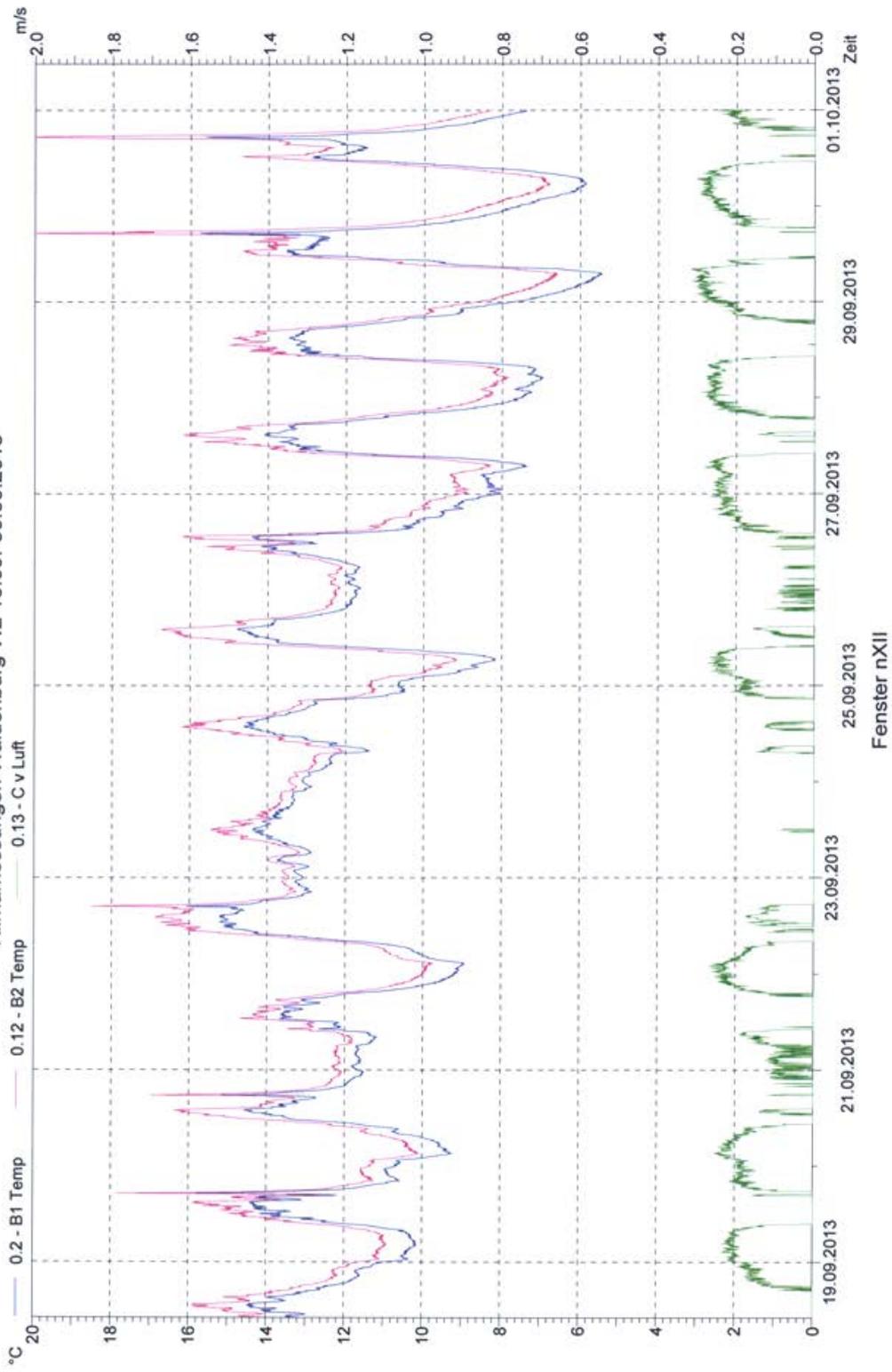
### Klimamessungen Waldenburg W1 18.09.-30.09.2013



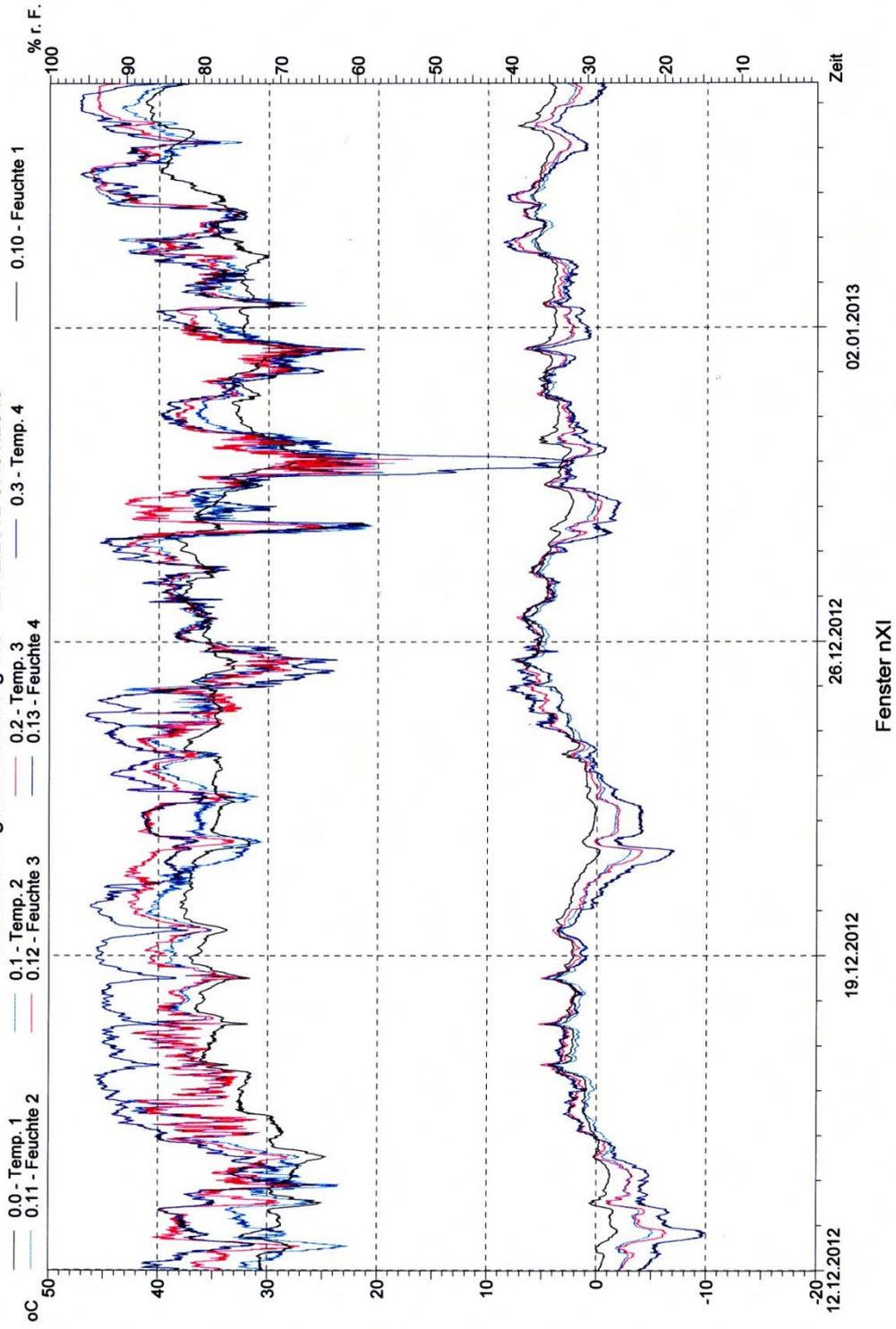
Klimamessungen Waldenburg W2 13.12.2012.-07.01.2013



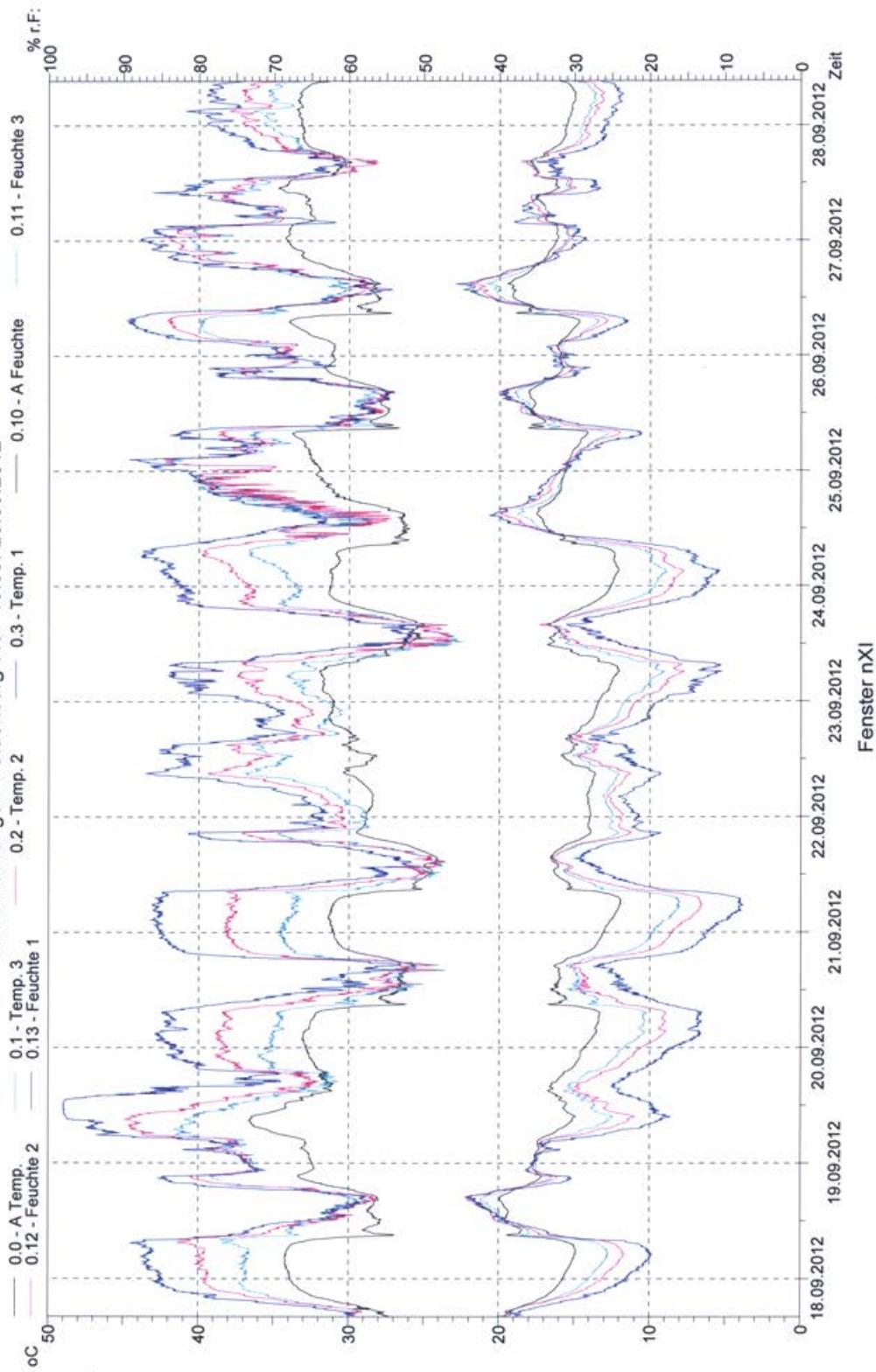
Klimamessungen Waidenburg WZ 18.09.-30.09.2013



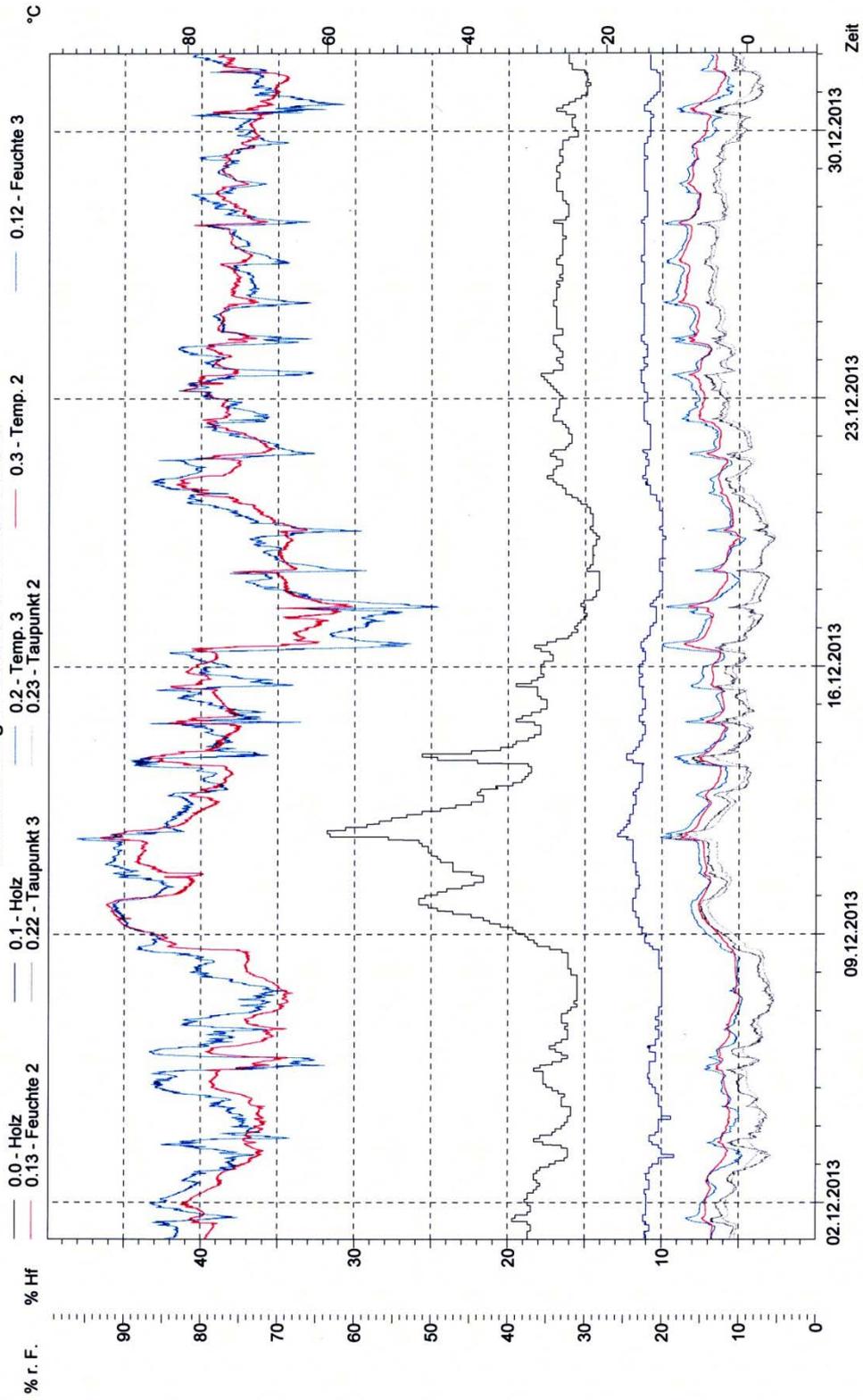
Klimamessungen Waidenburg W3 12.12.2012-07.01.2013



### Klimamessungen Waldenburg W3 18.09.-29.09.2012

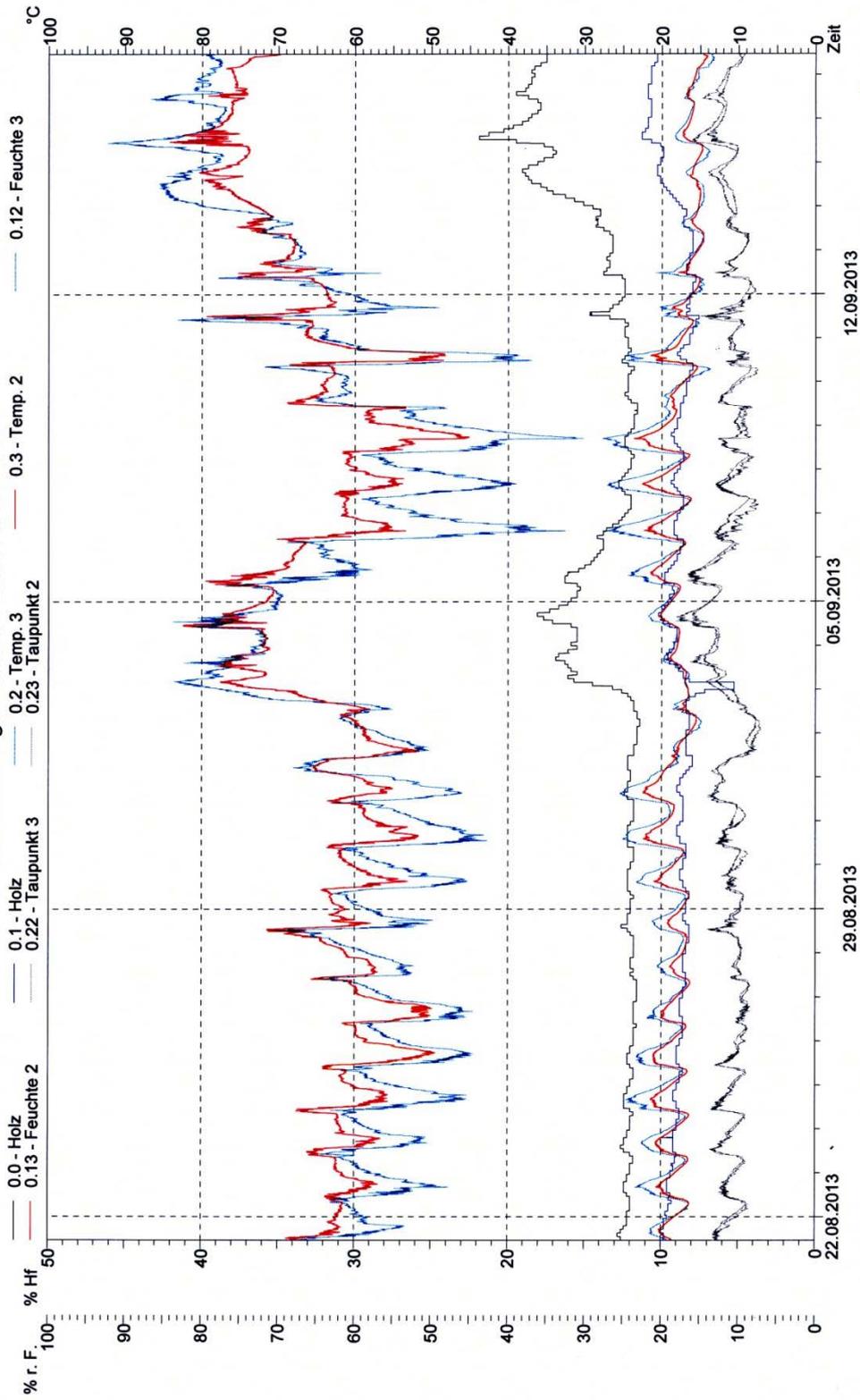


### Klimamessungen Jauer J1 01.12.-31.12.2013



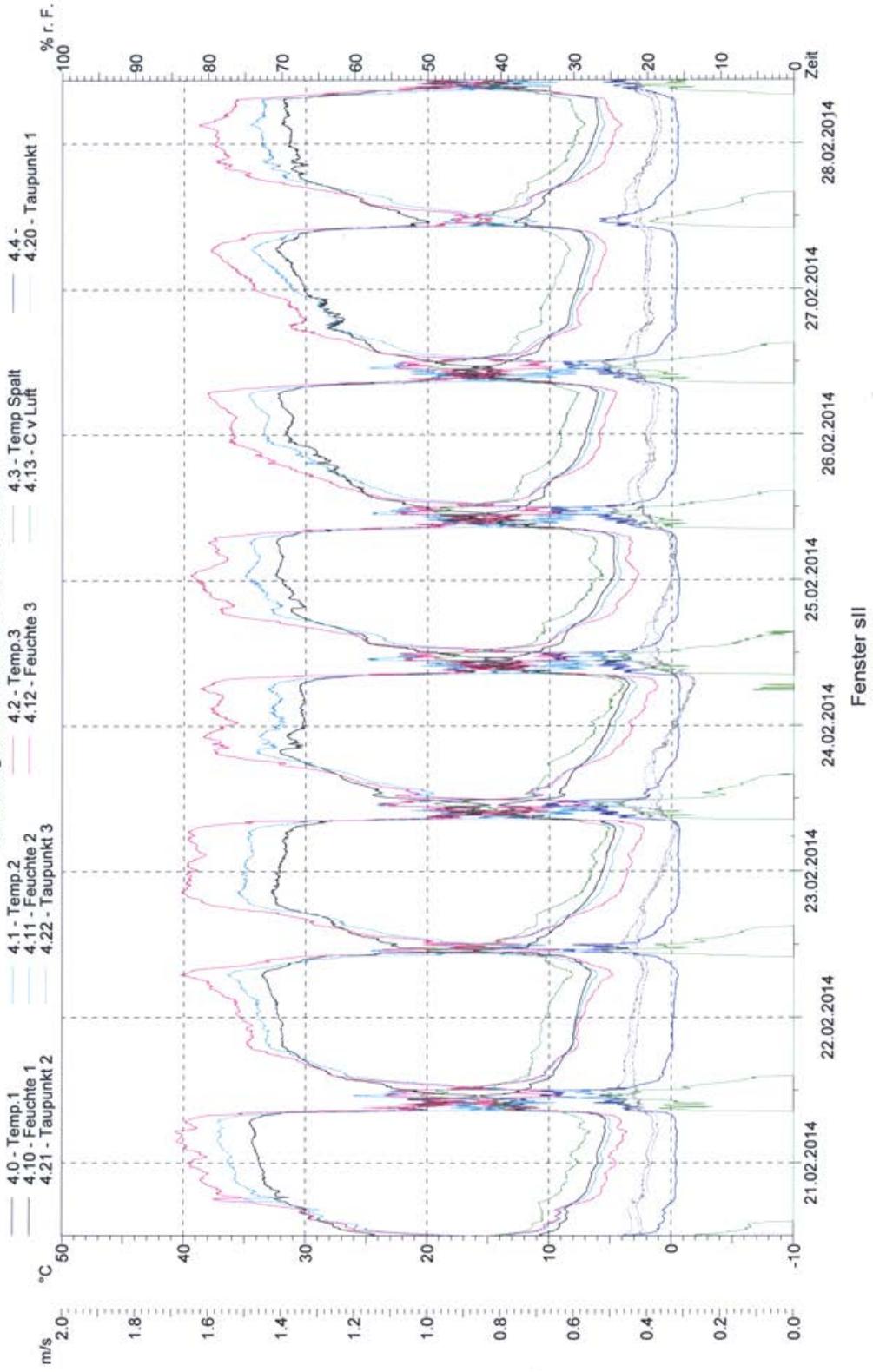
Klima im Dachgeschoss und Holzfeuchte

Klimamessungen Jauer J1 22.08.-17.09.2013

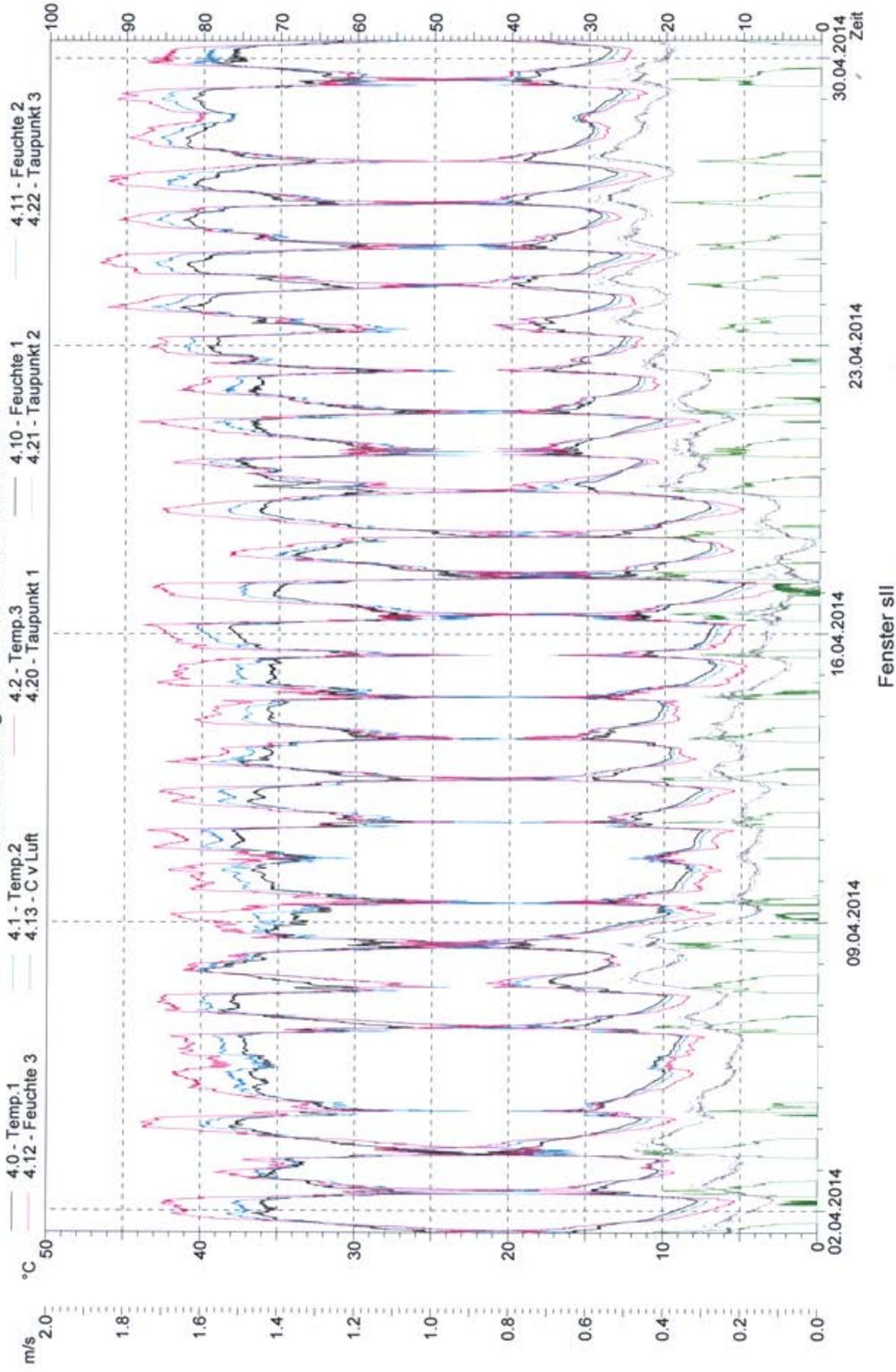


Klima im Dachgeschoss und Holzfeuchte

Klimadiagramm Jauer J2 20.-28.02.2014



Klimamessungen Jauer J2 01.04.-30.04.2014



## **Abschlusskolloquium des Projektes:**

### **„Modellhafte Restaurierung und Schutz von Glasmalereien in bedeutenden sakralen Gebäuden auf dem Gebiet Niederschlesiens, gefährdet durch schädliche Umwelteinflüsse“**

**27.08.2014 10:00-16:00 Uhr Kath. Pfarrkirche zu den Schutzengeln, ul. Gabarska 4, Wałbrzych**

**Moderation Dr. U. Schaaf**

**10:00-11.15 Uhr**

**1. Grußworte und Vorstellung der Förderinstitutionen:**

Pfarrer Werminski, Kirchengemeinde Waldenburg

Dariusz Jankowski, Berater des Ministers für Kultur und Nationales Erbe

Dr. P. Schabe, Fördermöglichkeiten der DPS/BKM

Dr. P. Bellendorf, Förderprogramme DBU

Frau Obelinda, Partnerschaftliche Pilotprojekte zur Konservierung von Glasmalereien und Fenstern - ihre Bedeutung für die Entwicklung denkmalpflegerischer Standards und die Haltung/Einstellung der Denkmaleigentümer

Pause: 11:15-11:30 Uhr

**11:30 -13:30 Uhr**

**2. Vorstellung der Objekte**

Frau E. Gajewska-Prorok, Glasmalereien in Niederschlesien vom Mittelalter bis ins 20. Jahrhundert

Dr. E. Drachenberg, Erfahrungen bei der Restaurierung von historischen Kirchenfenstern/ Vorstellung der Objekte

Dr. W. Müller, Glasmalerei und Umweltbedingungen – materialspezifisch betrachtet

**3. Beispiele aus der praktischen Restaurierung**

S. Oleszczuk, Ausbau, Transport, Lagerung von Glasmalereifenstern

Reinigung/Restaurierung (Klebung, Neuverbleiung, Rahmung) der Glasmalereien,

Außenschutzverglasung (Anforderungen, Entwurf, Einbau)

Einbau und Abnahme der Glasmalereien

Pause: 13:30-14:30 Uhr **14:30-16:00 Uhr**

**4. Naturwissenschaftliche Untersuchungen**

Dr. M. Torge, Klima- und Schadstoffmessungen

Dr. M. Bücker, Holzschutzmittel und ihre Folgen

**5. Diskussion und Schlussworte**

Dr. P. Schabe, Zusammenfassung und Ausblick

**6. Besichtigung der restaurierten Glasmalereien in der katholischen Pfarrkirche zu den Schutzengeln in Waldenburg**

Das Projekt wurde durch die Förderung der „Deutsch-Polnischen Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz“ in Görlitz mit Mitteln der „Deutschen Bundesstiftung Umwelt“ in Osnabrück, Erika Simon-Stiftung, Rinteln und des „Beauftragten für Kultur und Medien“ der Bundesrepublik Deutschland ermöglicht.

## Końcowe sympozjum projektu:

### „Restauracja i ochrona zespołów witrażowych w ważnych budowlach sakralnych znajdujących się na terenie Dolnego Śląska, zagrożonych szkodliwymi wpływami środowiska”

27.08.2014, godz. 10:00-16:00, Wałbrzych, Rzymsko-katolicki kościół parafialny pw. Św. Aniołów Stróżów, ul. Gabarska 4, 53-300 Wałbrzych

Moderator: Dr. Ulrich Schaaf

10.00 – 11.15

#### 1. Powitanie i przedstawienie instytucji finansujących projekt:

Ksiądz prałat Bogusław Werminski, parafia pw. Św Aniołów Stróżów w Wałbrzychu  
Dariusz Jankowski, Radca Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego  
Dr. Peter Schabe, Środki finansowe Niemiecko-Polskiej Fundacji Ochrony Zabytków Kultury oraz Pełnomocnika ds Kultury i Mediów Rządu Niemieckiego  
Dr. Paul Bellendorf, Programy finansowe Niemieckiej Federalnej Fundacji Ochrony Środowiska  
Pani Barbara Nowak-Obelinda, Partnerski projekt pilotażowy dot. konserwacji witraży – jego znaczenie w rozwoju standardów ochrony zabytków, jak i postaw właścicieli obiektów zabytkowych

Przerwa: 11.15 – 11.30

11.30 – 13.30

#### 2. Prezentacja obiektów

Pani Elżbieta Gajewska-Prorok, Witraże na terenie Dolnego Śląska od czasów średniowiecznych do XX w.

Dr. Eberhard Drachenberg, Doświadczenia w obszarze restauracji historycznych okien budowli sakralnych/przedstawienie obiektów

Dr. Wolfgang Müller, Witraże a uwarunkowania atmosferyczne pod względem specyfikacji materiałowej

#### 3. Praktyczne przykłady działań restauracyjnych:

Pan Sławomir Oleszczuk, Demontaż, transport, składowanie okien witrażowych, czyszczenie/restauracja (klejenie, obramowanie) witraży, zewnętrzne oszklenie ochronne (kryteria, koncepcja, montaż) montaż i odbiór witraży

Przerwa: 13.30 – 14.00

14.30 – 16.00

#### 4. Badania przyrodnicze

Dr. Manfred Torge, Pomiar klimatu i szkodliwych substancji

Dr. Michael Bücker, Środki ochronny drewna, skutki ich stosowania

#### 5. Dyskusja oraz zakończenie

Dr. P. Schabe, Podsumowanie, dalsze perspektywy

#### 6. Zwiedzanie odrestaurowanych witraży w kościele pw. Św. Aniołów Stróżów w Wałbrzychu

Projekt został sfinansowany dzięki funduszom „Niemiecko-Polskiej Fundacji Ochrony Zabytków Kultury“ w Zgorzelcu ze środków „Niemieckiej Federalnej Fundacji Ochrony Środowiska“ w Osnabrück, Fundacji Eriki Simon oraz Pełnomocnika ds. Kultury i Mediów Rządu Niemieckiego.



## Literaturzusammenstellung

- /1/ Stefan Oidtman; „Die Schutzverglasung eine wirksame Schutzmaßnahme gegen die Korrosion an wertvollen Glasmalereien“ Verlag M. Brimberg, Aachen, 1994, ISBN 90-386-0344-4
- /2/ Elżbieta Gajewska-Porok, Slavomir Oleszczuk; „Glasmalereien in Schlesien“ Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften, Edition Leipzig, 2001, ISBN 3-361-00528-0
- /3/ Manfred Torge, Wolfgang Müller, Karin Adam, Christa Köcher; „Schadensbilder und Glaszusammensetzungen - Phänomene und Ursachen“ (Vortrag zum Friedrichsfelder Kolloquium 04.03.96) In: das 19. und 20. Friedrichsfelder Kolloquium, Vorträge zur Sicherung und Wiederherstellung historischer Glasmalerei: Herausgegeben von der Berlin-Brandenburgischen Akademie der Wissenschaften, Arbeitsstelle für Glasmalereiforschung des CVMA und der BAM, Berlin, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, ISBN 3-89701-203-0
- /4/ Wolfgang Müller, Manfred Torge, Detlef Kruschke, Karin Adam; Forschungsbericht: „Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien“; Kennzeichen 515-7291 Bau 5026 G5; BAM-Forschungsbericht 217, 1997
- /5/ [www.passam.ch](http://www.passam.ch)
- /6/ [http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/extra/3\\_12/d312\\_MC282.htm](http://www.stadtentwicklung.berlin.de/umwelt/umweltatlas/extra/3_12/d312_MC282.htm)
- /7/ Marina Flügge, „Glasmalerei in Brandenburg vom Mittelalter bis ins 20. Jahrhundert“, Wernersche Verlagsgesellschaft, Worms, 1998, ISBN 3-88462-200-5
- /8/ Frank Martin, Glasmalereien in den Kirchen St. Jacobi, Greifswald St. Marien und St. Nikolai, Rostock, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften - Arbeitsstelle für Glasmalereiforschung, Edition Leipzig 2005, ISBN 3-361-00594-9
- /9/ Bernd Konrad in „Historische Glasmalerei Schutzverglasung-Bestandsicherung-Weiterbildung“, Berlin-Brandenburgische Akademie der Wissenschaften - Arbeitsstelle für Glasmalereiforschung, Edition Leipzig 1999, ISBN 3-361-00500-0
- /10/ Manfred Torge, Detlef Kruschke; „Investigation into 20th century commercial glass paints and enamels“ Corpus Vitrearum Forum, Lisbon in 2011, University Nova Lisbon, Tagungsband, <http://moodle.fct.unl.pt/mod/resource/view.php?id=197618>
- /11/ Slavomir Oleszczuk; Dokumentation zur Restaurierung der Glasmalereien in der katholischen Pfarrkirche des Hl. Jacobus d. Ä. in Niedersteine
- /12/ Abnahmeprotokoll der polnischen Denkmalbehörde vom 12.12.2012
- /13/ Abnahmeprotokoll der polnischen Denkmalbehörde vom 22.08.2013
- /14/ Slavomir Oleszczuk; Dokumentation zur Restaurierung der Glasmalereien in der katholischen Pfarrkirche zu den Schutzheiligen in Waldenburg
- /15/ Krzysztof Dyda; Gutachten: „Montage der Schutzverglasung an den Fenstern des Chores, Friedenskirche in Jauer“

- /16/ Abnahmeprotokoll der polnischen Denkmalbehörde vom 17.09.2013
- /17/ Slavomir Oleszczuk; Dokumentation zur Restaurierung der Glasmalereien in der evangelischen Friedenskirche Jauer
- /18/ VDI 3955 Blatt 2 „Exposition von Glassensoren“, 1993
- /19/ Johanna Leißner, Dieter R. Fuchs; Glassensorstudie zur Abschätzung der korrosiven Verhältnisse an Kirchenfenstern mit Außenschutzverglasungen“, Bericht BMFT-Verbundprojekt BAU 5026C/4 Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung Würzburg 1992
- /20/ Gabriele Maas-Diegeler; Glasdosimeter-Studie zur Bewertung der Außenschutzverglasungen an Kirchen der Standorte Waldenburg und Niedersteine/Polen, Fraunhofer ISC, Fachbereich Kulturgüterschutz, Bronnbach
- /21/ Arnold Wolf; Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien, Mainz, von Zabern 2000
- /22/ I.C: Hennen et al.: Mazeration historischer Dachkonstruktionen, Abschlussbericht F2765, Fraunhofer IRB Verlag ,Stuttgart 2010
- /23/ Tobit Curteis; “Painted wood in historic buildings with uncontrolled environments: active deterioration and passive conservation, Polychromed wood”, a conference held by the Institute of conservation at Hampton Court Palace, October 2007&February 2008
- /24/ N. Knut; “The restoration of paintings”, Köln, 1999
- /25/ T. M. Olstad; “Medieval churches in a cold climate - Parish churches or museums”. Preventive conservation practice, theory and research. Preprints of the IIC Ottawa congress September 1994
- /26/ B. Knight, D. Thicket; “Determination of response rates of wooden objects to fluctuating relative humidity in historic properties”, Proceeding of the Conference at the National Museum of Denmark, November 2007, Copenhagen
- /27/ Lindanbestimmung: PICA Prüfinstitut Chemische Analytik GmbH, 12489 Berlin
- /28/ <http://www.eltra.org/de/>
- /29/ Schwefelanalysen: Eltra GmbH, 42781 Haan
- /30/ Manfred Torge, Abschlussbericht „Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen Glasmalereien mit Schäden durch anthropogenen Einflüsse“ Fraunhofer IRB Verlag Stuttgart, 2011
- /31/ Manfred Torge, Michael Bucker, Ines Feldmann“ The effect of climate and particle deposition on the preservation of historic stained glass windows – in situ measurements and laboratory experiments” in: Recent advances in glass, stained glass, and ceramic conseration 2013 ed. by Hannelore Roemich and Kate van Lookeren Campagne, SPA Uitgrevers 2013

## Projektteam:

An der Bearbeitung des Projektes (BAM-Vorhaben 4210) waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

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

## Externe Prüfinstitute und wissenschaftliche Einrichtungen:

Passivsamler:	passam ag, Labor für Umweltanalytik, CH-8708 Männedorf
Glasdosimeter-Studie:	Gabriele Maas-Diegeler; Fraunhofer ISC, Fachbereich Kulturgüterschutz, Bronnbach
Lindanbestimmung:	PICA Prüfinstitut Chemische Analytik GmbH, 12489 Berlin
Schwefelanalysen:	Eltra GmbH, 42781 Haan

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

