

Abschlussbericht

des Forschungsvorhabens

„Weiterbildung von polnischen Fachkräften zur Sanierung
umweltgeschädigter Glasmalereien und nachhaltige
Maßnahmen zur Rettung gefährdeter Farbverglasungen
von hohem Wert“

Az. 33822/01-45

Berlin, November 2020



Bundesanstalt für Materialforschung
und -prüfung, Fachbereich 4.5
„Kunst- und Kulturgutanalyse“

Abschlussbericht des Forschungsvorhabens

„Weiterbildung von polnischen Fachkräften zur Sanierung umweltgeschädigter Glasmalereien und nachhaltige Maßnahmen zur Rettung gefährdeter Farbverglasungen von hohem Wert“

Projektlaufzeit: 09.11.2016 – 08.11.2020
BAM-Vorhaben: 4104
Projektleiter (BAM): Dr.-Ing. Manfred Torge

Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen wurden gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Osnabrück
Az. 33822/01-45



Inhaltsverzeichnis:	Seite
0. Zusammenfassung	
1. Anlass und Zielsetzung des Projektes	1
1.1 Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden	
2. Objekte und ihre Bedeutung	2
2.1. Dorfkirche St. Theresia vom Kinde in Koszewsko (Klein Küssow)	3
2.2. Evangelischen Liebfrauenkirche Legnica (Liegnitz)	4
2.3. Katholischen Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Oswiecim (Auschwitz)	4
3. Ergebnisse der Materialuntersuchungen	5
3.1. Analysen an Glasproben aus der Kirche in Koszewko	5
3.2. Analysen an Glasproben aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz	8
3.3. Analysen an Glasproben aus der Pfarrkirche in Auschwitz	14
3.4. Untersuchungen zum Schadensbild an Gläsern aus Auschwitz	17
4. Klimamessungen	20
4.1 Messkonzept und Zeitraum	20
4.2 Messgeräte und Messfühler	20
4.2.1 ALMEMO-Messsystem	20
4.2.2 Custos Aeris-Messsystem	22
4.3 Anordnung der Messtechnik	24
4.3.1 Dorfkirche Koszewko	25
4.3.2 Liebfrauen Liegnitz	
4.3.3 Pfarrkirche Auschwitz	28
4.4 Ergebnisse der Klimamessungen	
4.4.1 Klimamessungen in der Dorfkirche Koszewko	29
4.4.1.1 Südseite K1, Fenster sIII	29
4.4.1.2 Nordseite K2, Fenster nIII	36
4.4.2 Klimamessungen in der Pfarrkirche Auschwitz	42
4.4.3 Klimamessungen in der Liebfrauenkirche Liegnitz	49
4.4.3.1 Nordseite L2, Fenster nX, ALMEMO-Messsystem	49
4.4.3.2 Nordseite, Fenster nX, Custos Aeris-Messsystem	56
4.4.3.3 Südseite L3, Fenster sIX, ALMEMO-Messsystem	62
4.4.3.4 Südseite Fenster sIX, Custos Aeris-Messsystem	69
5. Weiterbildungsmaßnahmen innerhalb des Restaurierungsprojektes	75

6. Exemplarische 3D-Oberflächenvergleiche ausgewählter Fensterfelder	77
6.1 Die untersuchten Glasmalereien und die jeweiligen Fragestellungen an die 3D-Scans	77
6.2 Technischer Hintergrund	78
6.2.1 Reduktion von Spiegelungen durch den Einsatz von Mattierungssprays	79
6.2.2 Der Einsatz von Polarisationsfiltern zur Reduktion der Spiegelungen	80
6.2.3 Datenaufbereitung	81
6.3 Ergebnisse der einzelnen Kampagnen	81
6.4 Ergebnisse der 3D-Oberflächenvergleiche	83
6.4.1 3D-Oberflächenvergleiche ganzer Fensterfelder	83
6.4.2 3D-Vergleiche einzelner Glasscheiben	84
6.5 Zusammenfassung und Ausblick	88
6.6 Literaturangaben	89
7. Ergebnisse der Infrarot-Thermografischen-Untersuchungen	92
8. Diskussion	97
9. Öffentlichkeitsarbeit	99
10. Fazit	100
11. Projektteam	101
12. Anhang	
- Abbildungsverzeichnis	
- Tabellenverzeichnis	
- Auswahl von Klimadiagrammen - ALMEMO-Messtechnik	
- Auswahl von Klimadiagrammen - Custos Aeris-Messtechnik	
- Arbeitsplan	

Zusammenfassung

Das Gesamtprojekt bestand aus zwei Teilen. Es umfasste die von der DBU-geförderten naturwissenschaftlichen Untersuchungen an historischen Glasmalereifenstern einschließlich der gutachterlichen Bewertung ihres Erhaltungszustandes, um so ein Konzept zu ihrer Sanierung und den langfristigen Erhalt durch die Installation einer Außenschutzverglasung zu ermöglichen. Die praktischen Sanierungs- und Erhaltungsmaßnahmen bis hin zum Einbau der Außenschutzverglasung wurden durch die Deutsch-Polnische Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz in Görlitz (DPS) mit Mitteln der Beauftragten der deutschen Bundesregierung für Kultur und Medien finanziert. Beide Teile des Projektes waren eng miteinander verzahnt und der erfolgreiche Abschluss des Vorhabens nur durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Denkmalpflegern und Restauratoren möglich.

Gegenstand der Bearbeitung waren Glasmalereien in drei Kirchen in Polen. Im Chorraum der Dorfkirche von Koszweko (Klein Küssow) befinden sich fünf Fenster, davon enthalten drei (nII, nIII, sIII) mittelalterliche Wappenscheiben der Familie von Küssow aus dem 15. Jh. Die Liebfrauen Kirche in Legnica (Liegnitz) besitzt einen umfangreichen Bestand von 14 Glasmalereifenstern, die zu Beginn des 20.Jh. von bekannten deutschen Werkstätten hergestellt wurden. Die Fenster nX und sIX wurden für das Projekt ausgewählt. Eines der bedeutendsten Ausstattungstücke der katholischen Pfarrkirche in Oswiecim (Auschwitz) ist die Glasmalerei mit der Darstellung des heiligen Märtyrers Andreas Bobola (1591 – 1657), die nach einem Entwurf des Auschwitzer Künstler Adam Giebułtowski im Jahre 1940 von der bekannten Glasmalereiwerkstatt Müller in Quedlinburg hergestellt wurde.

Die Bearbeitung des Projektes umfasste naturwissenschaftliche Untersuchungen, praktische Sanierungen an den umweltgeschädigten Glasmalereien und Maßnahmen zur Weiterbildung. Die Weiterbildungsmaßnahmen erfolgten sowohl für polnische Denkmalpfleger als auch für Restauratoren und den im Projekt beteiligten Glasmalerei-Werkstätten. Zur Untersuchung des Bestandes, der Entwicklung von Restaurierungskonzepten und der Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen waren naturwissenschaftliche Vor- und Begleituntersuchungen notwendig, die in Kooperation mit der Universität Bamberg durchgeführt wurden.

Die Wirksamkeit der Schutzverglasungen wurde mit Hilfe von Klimamessungen an unterschiedlichen Positionen des Fensters (innen, im Spalt und außen) überprüft. Die Messungen dauerten jeweils 12 Monate. Zum Einsatz kam die auch schon in vorherigen Projekten verwendete ALMEMO-Messtechnik und an zwei Fenstern (nX, sIX) in Liegnitz zusätzlich das Custos Aeris-Messsystem. Beide Systeme lieferten zuverlässig Messwerte, die in unterschiedlicher Art und Weise ausgewertet wurden.

Innerhalb des Forschungsprojektes konnte weiterhin gezeigt werden, dass die dreidimensionale Dokumentation historischer Glasscheiben mit einem handelsüblichen Structured Light Scanner möglich ist. Diese Methode kann gezielt an repräsentativen Einzelfenstern durchgeführt werden, um aussagekräftige Ergebnisse für ein Monitoring der Oberflächenveränderungen zu erzielen. Weiterhin wurden Messungen an den Fenstern der Liebfrauenkirche in Liegnitz als thermographische Analyse durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Wärmemustern und thermischen Anomalien lag.

1. Anlass und Zielsetzung des Projektes

Das DBU-Projekt hat die Fortbildung polnischer Fachkräfte zur Sanierung umweltgeschädigter Glasmalereien zum Inhalt und ist eng verzahnt mit praktischen Arbeiten zum Schutz der durch Umwelteinflüsse geschädigten Glasmalereien in drei Kirchen in Polen. Zur Untersuchung des Bestandes, der Entwicklung von Restaurierungskonzepten und der Überprüfung der Wirksamkeit der Maßnahmen sind naturwissenschaftliche Vor- und Begleituntersuchungen notwendig, die in Kooperation mit der Universität Bamberg durchgeführt wurden. Das Ziel besteht darin, ein nachhaltiges Konzept zu erarbeiten, um den weiteren Zerfall und einen möglichen Totalverlust dieser einmaligen Kunstwerke aus dem Mittelalter, dem beginnenden 20. Jh. sowie aus den 1940-er Jahren zu verhindern.

Konstruktive Schutzkonzepte, das restauratorische Fachwissen und Know-how der Experten für den Schutz historischer Glasmalereien sollen durch Weiterbildungsmaßnahmen innerhalb des Vorhabens polnischen Fachleuten und Studenten vermittelt werden.

Für alle drei Objekte stellt die nach den Richtlinien des CVMA zu installierende Außenschutzverglasung die wichtigste Konservierungsmaßnahme für einen nachhaltigen Schutz der Originalsubstanz dar. Mit Hilfe von Klimamessungen an den jeweiligen Fenstern kann das Schädigungspotenzial der Umgebungsbedingungen abgeschätzt und die Wirksamkeit der durchgeführten Maßnahmen evaluiert werden.

Finanziert wird das Restaurierungsprojekt durch die Deutsch-Polnische Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz (DPS) in Görlitz mit Mitteln der Beauftragten der deutschen Bundesregierung für Kultur und Medien und die flankierenden naturwissenschaftlichen Untersuchungen von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück mit der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) in Berlin als Maßnahmenträger.

1.1 Darstellung der Arbeitsschritte und angewandten Methoden

Die Arbeitsschritte umfassen den Ausbau der Glasmalereifenster, Sicherungs- und Sanierungsarbeiten, den Einbau der Schutzverglasungen und der restaurierten Originale. Begleitet werden diese Tätigkeiten durch naturwissenschaftliche Untersuchungen. Ein detaillierter Arbeitsplan befindet sich im Anhang.

Die Schadensphänomene sowohl an der Farbverglasung des Mittelalters als auch an der Blankverglasung des 18./19. Jh. werden mit naturwissenschaftlichen Methoden (Lichtmikroskopie und Rasterelektronenmikroskopie) untersucht. Die Analysen von charakteristischen Glasproben mit Hilfe der energiedispersiven Röntgenanalytik (EDX) im Elektronenmikroskop liefert eine exakte chemische Zusammensetzung, deren Ergebnisse mit Hilfe einer vorhandenen Datenbank ausgewertet werden können. Somit lassen sich die vorhandenen Glastypen genau bestimmen. Die elektronenmikroskopischen Abbildungen erlauben Rückschlüsse zur Morphologie der untersuchten Glasproben und geben Hinweise auf Mikrorisse und Craqueléschäden. Im Rahmen des Projektes sollen ausgewählte Felder des Glasmalereizyklus vor Ort in der Glasmalereiwerkstatt mit Hilfe vom Structured-Light-Scanning (SLS) detailgetreu dreidimensional erfasst werden. Ziel dieses berührungslosen 3D-Scans ist es, sowohl Schäden als auch die Veränderung der Oberfläche durch die

Abnahme von Schmutz und Korrosionsschichten zu dokumentieren. Daher erfolgen die 3D-Scans jeweils vor und nach der Restaurierung.

Mit Hilfe thermographischer Analysen (IR-Thermographie) erfolgen qualitative Untersuchungen von Wärmemustern und thermischen Anomalien durch den Einbau der Außenschutzverglasung an ausgewählten Fenstern.

2. Objekte und ihre Bedeutung

2.1 Dorfkirche St. Theresia vom Kinde in Koszewsko (Klein Küssow)

Die Kirche, in der Nähe von Stettin gelegen, wurde als Backsteinbau über einem Sockel aus Feldsteinen im 15. Jh. erbaut und im 18. Jh. umgebaut. Der Innenraum enthält mit Kanzelaltar, Lesepult, Emporen und Grabmälern eine reiche Ausstattung, teilweise noch in ursprünglicher Farbgebung.

Das Langhaus besitzt sieben kleine Fenster mit einer Blankverglasung aus Goethegläsern. Im Chorraum befinden sich fünf Fenster, davon enthalten drei (nII, nIII, sIII) mittelalterliche Wappenscheiben der Familie von Küssow aus dem 15. Jh. Sie sind von Resten einer Blankverglasung mit Goetheglas aus dem 18. Jh. umgeben, die infolge von UV-Strahlung unterschiedlich starke Solarisationschäden (gelb bzw. violett verfärbt) zeigen. Alle Fenster besitzen vermutlich noch die originalen Holzrahmen.

Die farbigen Wappenscheiben haben fortgeschrittene Korrosionsschäden mit Malschichtverlusten, Glas- u. Bleibrüchen. Eine fachgerechte isothermisch wirkende Schutzverglasung fehlt. Die erst vor kurzem entdeckten mittelalterlichen Glasmalereifragmente sind in Polen von besonderem Wert, da sich dort nur wenige Verglasungen aus dem Mittelalter erhalten haben.



Bild 1: Mittelalterliche Wappenscheiben in der Dorfkirche Koszewko

2.2 Evangelischen Liebfrauenkirche Legnica (Liegnitz)

Als älteste Sakralkirche in Liegnitz (Niederschlesien) wurde sie 1203 zum ersten Mal erwähnt und mehrmals umgebaut. In der Kirche befinden sich 14 große Fenster mit Glasmalereien von hoher Qualität, die 1905/06 gestiftet (u.a. von Kaiser Wilhelm II) und von bekannten deutschen Werkstätten hergestellt wurden (Franke, Naumburg; Müller, Quedlinburg; Geiges, Freiburg; Oetken, Oldenburg; Linnemann, Frankfurt/M.). Die farbigen Verglasungen enthalten Darstellungen aus der Geschichte Schlesiens, der Reformation und Szenen aus dem Neuen Testament. Die Glasmalereifenster sind bisher nicht durch Außenschutzverglasungen geschützt, so dass alle Umwelteinflüsse direkt auf die Originalverglasung einwirken können und infolge von Glasbrüchen und Fehlstellen auch auf die Malschichten der Innenseiten gelangen. Bei allen Verglasungen sind Schäden an den Gläsern (Sprünge), vor allem am Schwarzlot durch deutlich sichtbare Abgänge und auch Bleibrüche zu beobachten. Um weitere Schwarzlotverluste zu verhindern, ist hier ein dringender Handlungsbedarf gegeben. Die in einer kurzen Zeitspanne entstandenen Glasmalereien bilden ein heute nur noch selten erhaltenes einheitliches und damit auch wertvolles Ensemble.

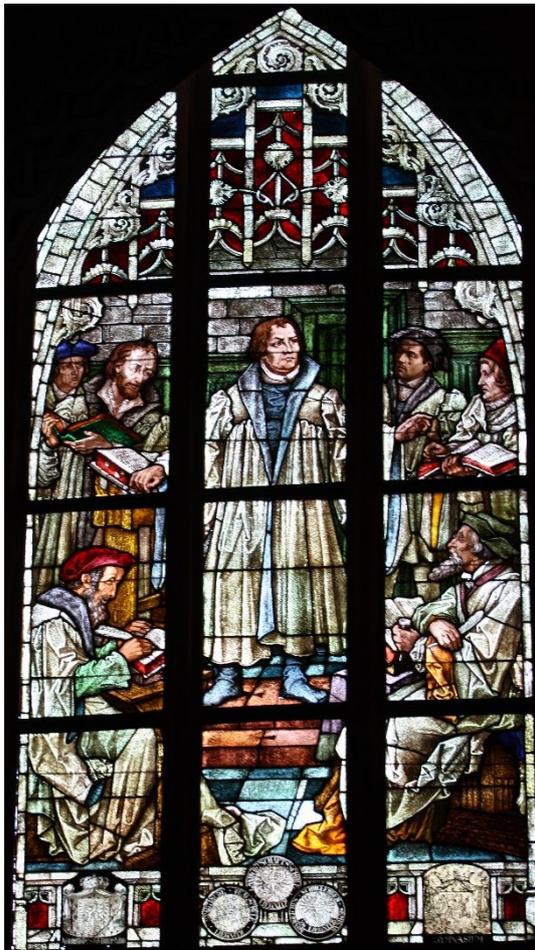


Bild 2: Liebfrauenkirche Liegnitz Fenster nX (Detail)
Werkstatt Linnemann, Frankfurt/M



Bild 3: Liebfrauenkirche Liegnitz Fenster sIX
Werkstatt A. Seiler, Breslau 1902

2.3 Katholischen Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Oswiecim (Auschwitz)

Die Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Auschwitz steht nördlich des Markplatzes, an der in Ost-West-Richtung verlaufenden Hauptstraße. Die genaue Bauzeit der Kirche ist nicht bekannt. In den Jahren 1325 – 1327 wurde sie erstmals erwähnt. Mehrere, nicht näher bekannte Umbauten erfolgten im 18. Jahrhundert. Zu einer umfangreichen Renovierung kam es nach einem Brand im Jahre 1863. Auf den Grundmauern des 16. Jahrhunderts wurde der Turm in den Jahren 1863 – 1877 wiederaufgebaut. Seine bis heute überlieferte Gestalt erhielt der Baukörper anlässlich der Renovierung im Jahre 1881.

Eines der bedeutendsten Ausstattungsstücke der Kirche ist die Glasmalerei in der Kapelle des gekreuzigten Christus mit der Darstellung des heiligen Märtyrers Andreas Bobola (1591 – 1657), eines polnischen Jesuiten. Die Ausführung der Glasmalerei erfolgte in Gedenken an seine Heiligsprechung durch Papst Pius den XI. am 17. April 1938.

Den Entwurf für die Glasmalerei fertigte der Auschwitzer Künstler Adam Giebułtowski im Jahre 1940. Er bediente sich einer Komposition, die typisch war für die polnische Glasmalerei dieser Zeit. Sie verbindet die traditionelle Darstellung eines Gesichts, das seine Plastizität durch eine Licht-und-Schatten-Modellierung erhält, mit geometrischen Partien des Gewandes und Hintergrundes. Die Ausführung erfolgte durch die bekannte Glasmalereiwerkstatt Ferdinand Müller aus Quedlinburg.

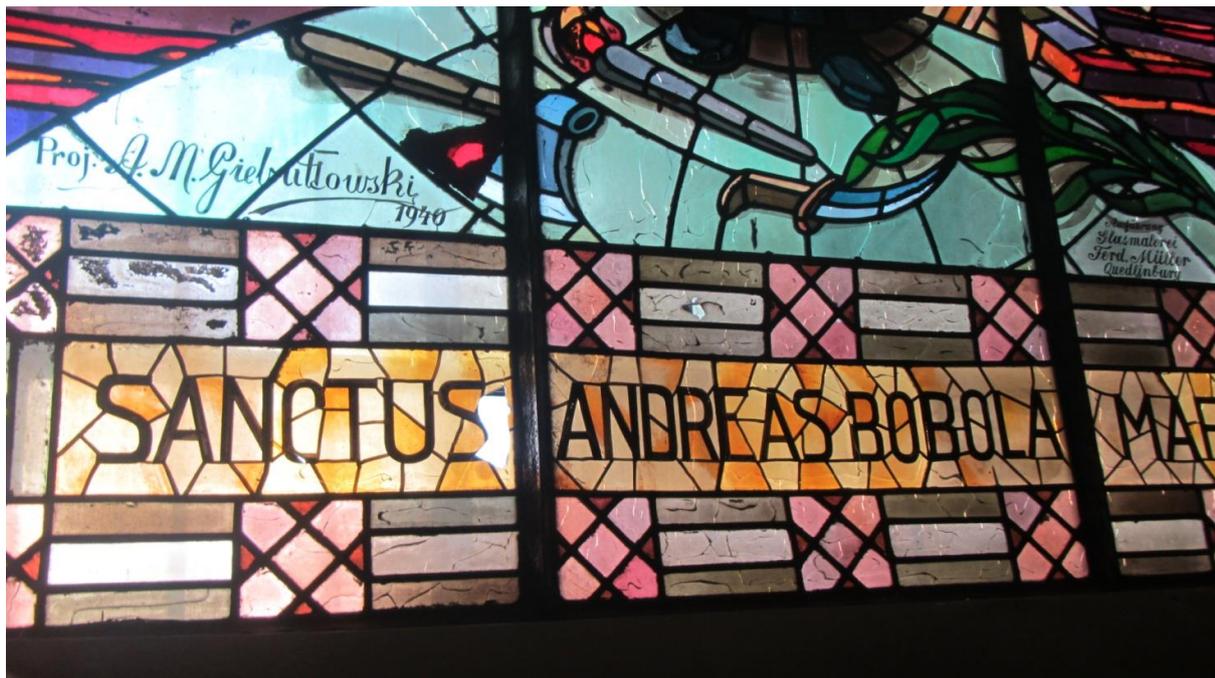


Bild 4: Glasmalerei mit Craqueléschäden in der Pfarrkirche Auschwitz

Am gesamten Fenster sind starke Schäden sichtbar wie Fehlstellen, Risse, Craquelé und Bleibrüche, so dass mit einem absehbaren Totalverlust der Glasmalerei zu rechnen ist! Hinzu kommt, dass die Außenschutzverglasung aus drahthaltigem Industrieglas keine Hinterlüftung hat. Diese Lösung ist sowohl ästhetisch als auch funktionell unzureichend.

3. Ergebnisse der Materialuntersuchungen

In der Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung erfolgten Untersuchungen zur Bestimmung der chemischen Zusammensetzung typischer Gläser der zu restaurierenden Fenster. Die Analysen wurden in einem Environmental Scanning Electron Microscope (ESEM) durchgeführt und erfolgten am Querschnitt der angeschliffenen, polierten und mit Kohlenstoff leitfähig beschichteten Gläser. 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. Die Probenahme erfolgte jeweils in der Restaurierungswerkstatt. Die Glasproben wurden, wenn möglich, nach den Untersuchungen wieder in den Bestand zurückgeführt.

3.1 Analysen an Glasproben aus der Kirche in Koszewko

Materialproben wurden aus dem mittelalterlichen Feldern sIII und nIII sowie für das Goetheglas aus dem Fenster I entnommen.

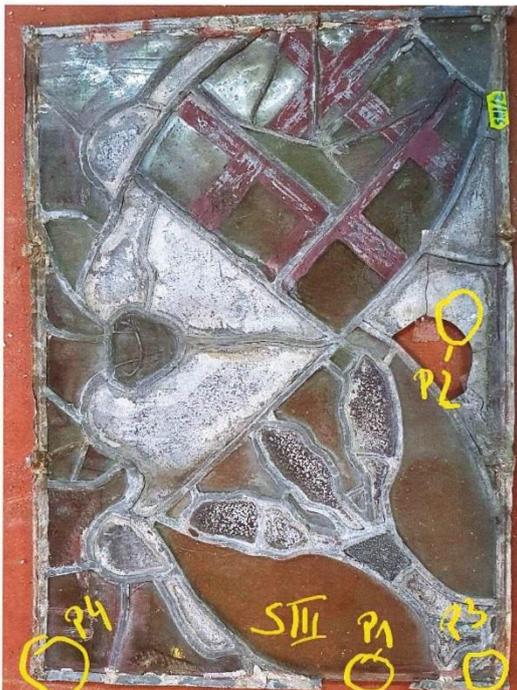


Bild 5: Koszewko, Feld sIII

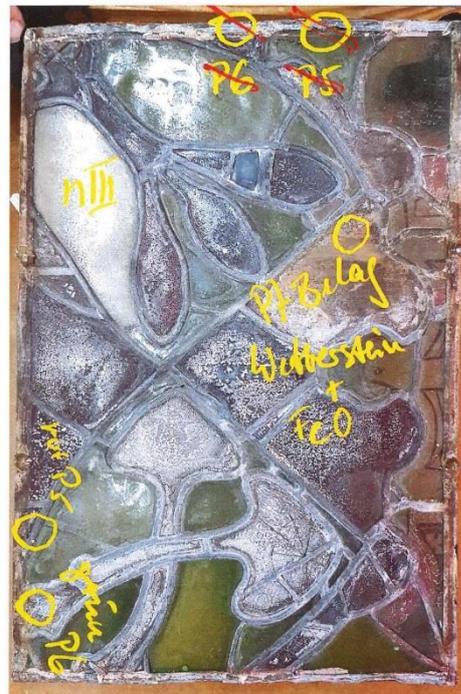


Bild 6: Koszewko, Feld nIII

- P1: farblos, nicht korrodiert – MA 15. Jh.?
- P2: blau, korrodiert – MA 15. Jh.
- P3: blau, korrodiert – MA 15. Jh.
- P4: farblos, nicht korrodiert – MA 15. Jh.
- P5: rot, korrodiert – MA 15. Jh.
- P6: grün – MA 15. Jh.



P9: Glasprobe solarisiert, violett, nicht korrodiert, 19.-20. Jh.

P10: Glasprobe solarisiert, gelblich, nicht korrodiert 19.-20. Jh.

P11: Glasprobe solarisiert, violett, nicht korrodiert, 19.-20. Jh.

P12: Glasprobe, grün, nicht korrodiert, 19.-20.Jh.

P13: Glasprobe solarisiert, gelblich, nicht korrodiert 19.-20. Jh.

P14: Glasprobe solarisiert violett, nicht korrodiert, 19.-20. Jh.

Bild 7: Probenahme von Goetheglas aus dem Fenster I

Tabelle 1: Zusammensetzung von Gläsern aus Koszewko in Masse % (EDX-standardfrei)

	P1	P2	P3	P4	P5 Überfang Grundglas	P5 Überfang Rot	P6
SiO ₂	78,2	53,3	53	50,9	50,9	55	52,9
Na ₂ O	13,5	-	-	3,5	2,4	1,7	0,3
K ₂ O	1,8	21,7	21,8	6,6	11,7	10,9	21,4
CaO	5,9	19,5	19,6	21,9	22,1	20,4	17,3
MgO	-	3,3	3,1	5,3	4,9	4,1	3,4
Al ₂ O ₃	0,6	1,2	1,1	5,3	1,2	1,27	1,3
P ₂ O ₅	-	0,5	0,5	4,3	5,1	3,3	0,6
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0,4	0,2	-	1,7
MnO	-	0,3	0,6	1,3	1,1	1,1	0,8
SO ₃	-	0,2	0,2	-	0,3	-	0,2
Cl	-	-	-	0,6	0,1	-	-
PbO	-	-	-	-	-	0,6	-
CuO	-	-	-	-	-	1,2	-

Tabelle 2: Zusammensetzung von Gläsern aus Koszewko in Masse % (EDX-standardfrei)

	P9 Goethe Glas	P10 Goethe Glas	P11 Goethe Glas	P12 Goethe Glas	P13 Goethe Glas	P14 Goethe Glas
SiO ₂	75,5	76,4	74,4	71,3	76,7	74,8
Na ₂ O	16	14,9	13,9	10,9	11,4	12,9
K ₂ O	1,7	1,8	2,9	0,9	4,0	2,9
CaO	6,1	5,6	6,1	12,6	5,6	4,7
MgO	-	-	-	0,3	-	-
Al ₂ O ₃	0,7	0,4	0,7	3,0	0,6	0,6
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	-	-	0,3	0,6	-
MnO	-	-	-	0,1	0,7	-
SO ₃	-	-	-	0,8	0,4	-
Cl	-	0,9	0,9	-	0,2	0,5
PbO	-	-	-	-	-	-
ZnO	-	-	1,2	-	-	3,3

Die Ergebnisse der Analysen zur chemischen Zusammensetzung der Proben P2 bis P6 lassen eindeutig auf Gläser mit mittelalterlicher Zusammensetzung schließen. Mit einem CaO/K₂O-Verhältnis von ca.1 handelt es sich bei den Proben P2, P3 und P6 um sehr korrosionsempfindliche Gläser. Die Glasprobe P4 ist aufgrund eines deutlich geringeren K₂O-gehaltes weniger empfindlich und auch visuell sichtbar nicht korrodiert. Bei der Glasprobe 5 handelt es sich um ein rotes Überfangglas. Das Glas P1 hat eine Zusammensetzung, die auf eine Ergänzung während einer Restaurierung im 19. bzw. 20. Jh. schließen lässt. Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung der Proben P9 bis P14 lässt auf einen Glastype schließen, wie er im 19. und 20. Jh. verwendet wurde. Solarisationserscheinungen, also Verfärbungen in Richtung gelblich bzw. violett, werden in der Regel durch Arsen-, Mangan- und Eisenanteile in der Glaszusammensetzung infolge von Wertigkeitswechsel in Kombination mit UV-Strahlung hervorgerufen¹. Letztere wurden in den Glasproben P12 und P13 nachgewiesen. In den übrigen Proben liegen diese vermutlich unter der Nachweisgrenze.

Der Vergleich mit Analysenergebnissen aus einer vorhandenen Datenbank zeigt bei den Proben P2 und P3 Ähnlichkeiten im CaO/K₂O-Verhältnis mit mittelalterlichen Gläsern aus dem Ostchor des Naumburger Domes bzw. des Erfurter Domes im Fenster sVI. Die Probe P6 hingegen lässt sich mit Gläsern aus dem Stendaler Dom vergleichen. Einige englische Gläser wie z.B. aus Coventry weisen ein ähnliches CaO/K₂O-Verhältnis auf wie die Probe P4. Die Analysenergebnisse von Glasproben aus der Peterskirche in Leipzig, die auf das 19.Jh. datiert sind, zeigen insbesondere im relativ hohen Silizium- und Natriumgehalt vergleichbare Zusammensetzungen zu den Gläsern P1, P9, P10, P13 und P14, allerdings waren die Leipziger Gläser nicht solarisiert.

¹ Manfred Torge

Untersuchungen zur Solarisation von Gläsern – Mögliche Ursachen und Behandlungsmethoden
 Restaura 8 (2008) S. 534-537

3.2. Analysen an Glasproben aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz

Ein starker Sturm im Winter 2017/2018 verursachte noch vor Beginn der Restaurierungsarbeiten und dem Einbau der Schutzverglasung starke Schäden am Maßwerk des Fensters nX. Maßwerkteile und Glassegmente stürzten in die Tiefe und wurden vom Schutzgitter vor dem Fenster aufgehalten. Einige dieser Bruchstücke wurden für die Bestimmung der Glaszusammensetzung verwendet bevor sie wieder in den Glasbestand zurückgeführt wurden.



Bild 8: Fenster nX mit Schäden im Maßwerk



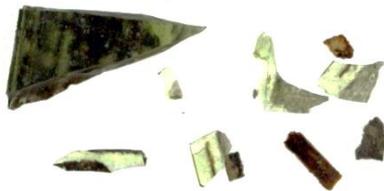
Bild 9: Fenster nX, Glasstück aus Maßwerk und Schäden in Feld 6b

Probenahme aus dem Fenster nX

- P1: farblos, Glassplitter aus Feld 6b
(Glasschäden durch Maßwerkeinsturz)
- P2: mehrere Glassplitter aus Maßwerk mit Schwarzlotbemalung
- P3: vier Gläser unterschiedliche Dicke (verschmutzt mit Lasur und Schwarzlot), aus
Maßwerk herausgefallen



- P1: farblos, Glassplitter aus Feld 6b
(Glasschäden durch Maßwerkeinsturz)



- P2: mehrere Glassplitter aus Maßwerk
mit Schwarzlotbemalung



P3: vier Gläser unterschiedlicher Dicke aus Maßwerk herausgefallen, verschmutzt mit Lasur und Schwarzlot

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Gläser aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz, Fenster nX in Masse % (EDX-standardfrei)

	P1a	P1b	P2	P3a	P3b
SiO ₂	72,0	72,4	74,6	72,8	72,3
Na ₂ O	15,3	15,7	8,1	13,1	15,5
K ₂ O	0,6	-	4,4	2,5	-
CaO	8,2	8,2	5,7	5,9	8,3
MgO	0,1	-	-	0,6	-
Al ₂ O ₃	0,7	0,8	0,8	1,4	0,8
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	2,2	2,2	2,1	1,2	2,3
MnO	0,5	0,6	4,1	2,4	0,9
SO ₃	-	-	-	-	-
Cl	-	-	0,2	0,1	-
TiO ₂	0,4	-	-	-	-

Die Gläser lassen sich auf den Anfang des 20.Jh. datieren und sind aufgrund ihrer Zusammensetzung beständig gegenüber Umwelteinflüssen. Sie zeigen Ähnlichkeiten zu Glaszusammensetzungen aus der Pfarrkirche in Niedersteine aus dieser Zeit, die ebenfalls deutschen Ursprungs sind (Bayerische Hofglasmalerei Zettler, München).

Die Glasanalysen wurden jeweils aus drei Messpunkten gemittelt. Malschichten wie Schwarzlot und Lasuren sind inhomogen, so dass die aufgeführten Analysen unterschiedlichen Probestellen entsprechen. Sie zeigen dennoch die typische Zusammensetzung des Schwarzlotes und setzen sich aus einem bleihaltigen Fluss und färbenden Komponenten wie Eisen, Chrom, Kobalt und Kupfer zusammen. Lasuren bestehen aus einer ähnlichen Zusammensetzung, sind allerdings viel dünner auf das Glas aufgetragen, weshalb der SiO₂-Gehalt in Tabelle 4 durch die Glaszusammensetzung verfälscht wird

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von Malschichten und Korrosionsprodukten von Proben aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz, Fenster nX in Masse % (EDX-standardfrei)

	P2-1 Schwarz- lot	P2-2 Schwarz- lot	P2-3 Schwarz- lot	P3a-1L Lasur	P3a-1L Lasur
SiO ₂	33	31,5	33	65	64,6
Na ₂ O	-	-	-	6,3	6
K ₂ O	1,7	1,5	1,6	2,1	2
CaO	1,2	1,5	1,6	3,9	3,7
MgO	1,5	1,8	0	0,8	1
Al ₂ O ₃	3,5	4,7	4,9	2	1,9
CoO	-	3,1	1,5	-	-
Fe ₂ O ₃	14	7,9	4,8	1,8	2,3
MnO	0,4	0,6	0,2	1,9	1,7
Cr ₂ O ₃	5,7	6,1	7,8	0,6	0,7
CuO	2,1	3,8	4,2	1,7	1,9
PbO	23,6	29,7	33,7	13	12,8
ZnO	13,3	7,3	3,9	1	1,4
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-
SO ₃	-	-	-	-	-
TiO ₂	-	-	-	-	-
Cl	-	0,4	0,2	-	0,2

In der elektronenmikroskopischen Aufnahme (Bild 10) ist eine Malschicht am Glasquerschnitt abgebildet. Sie hat eine Stärke von ca. 10-20 µm und ist relativ inhomogen. Die Lasur in Bild 12 befindet sich auf der Glasoberfläche. Im Elementspektrum werden ähnliche Elemente wie in der Malschicht detektiert (Bilder 11, 13)

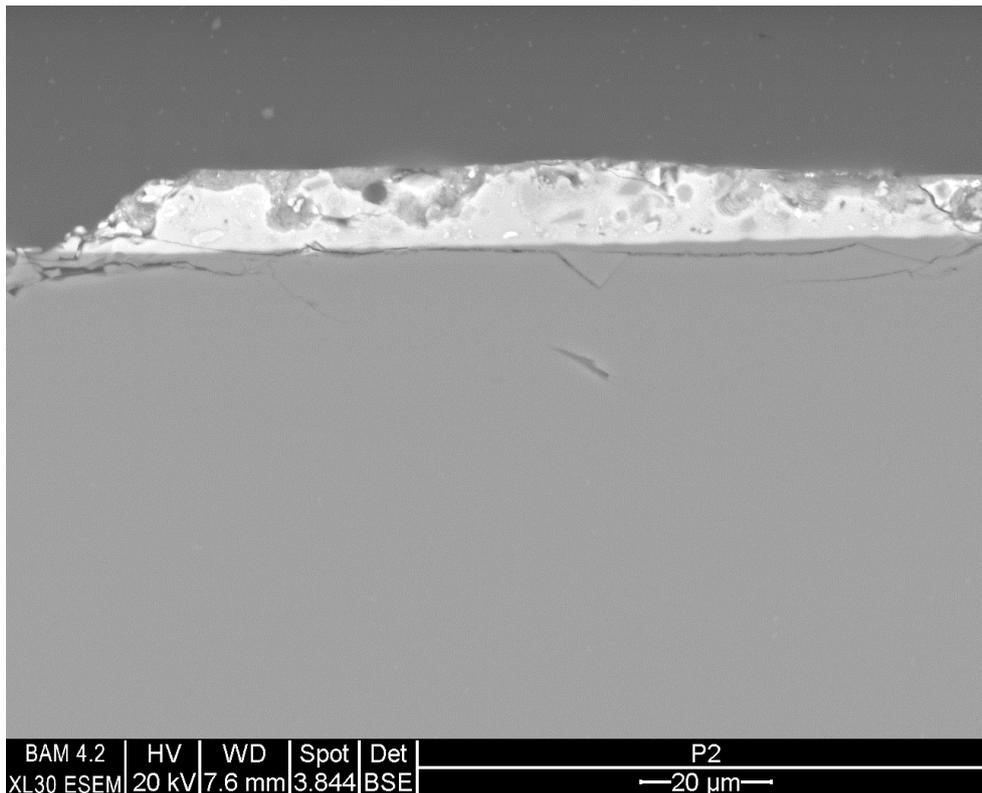


Bild 10: Elektronenmikroskopische Aufnahme; Probe P2 mit Schwarzlot

Label A:

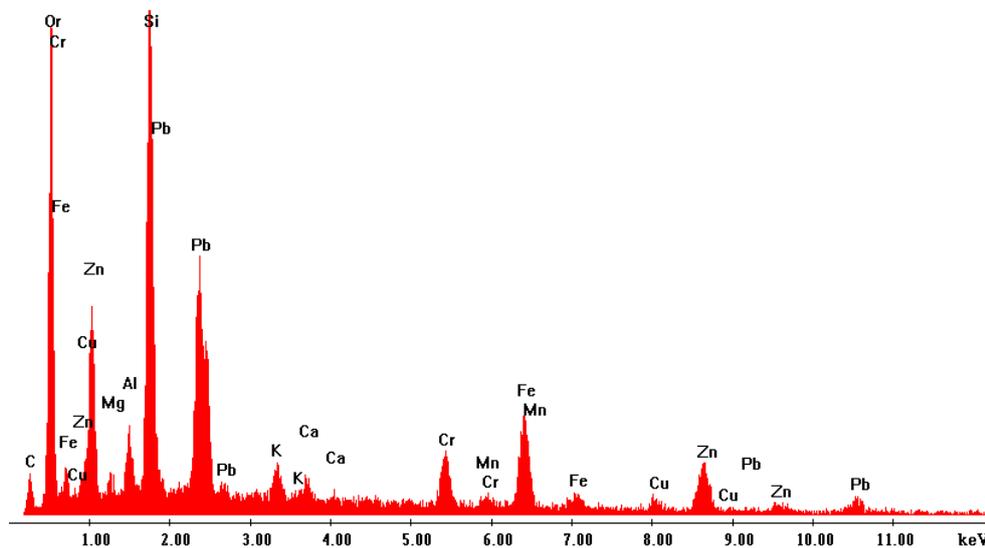


Bild 11: Elementspektrum im Bereich des Schwarzlotes auf Probe 2

Malschichten und Lasuren können aufgrund ihrer Zusammensetzung bei hoher relativer Luftfeuchtigkeit durch Kondensation von Wasser und Feuchteinwirkung geschädigt werden. Außenschutzverglasungen an Glasmalereien des 19. und 20 Jh. sollen diese Schadensphänomene verhindern. Verwitterungsschäden in den Lasurschichten auf der Glasoberfläche sind in Abb. 12 sichtbar.

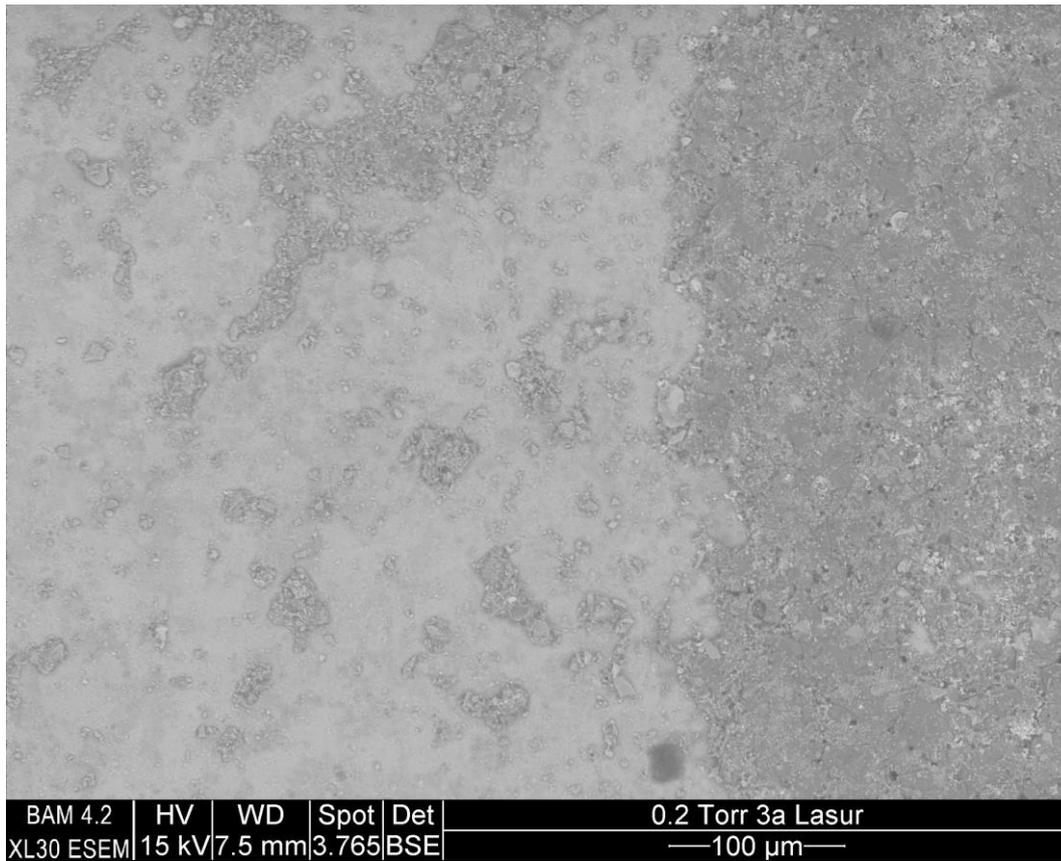


Bild 12: Elektronenmikroskopische Aufnahme, Bereiche mit Lasur auf Probe 3

Label A:

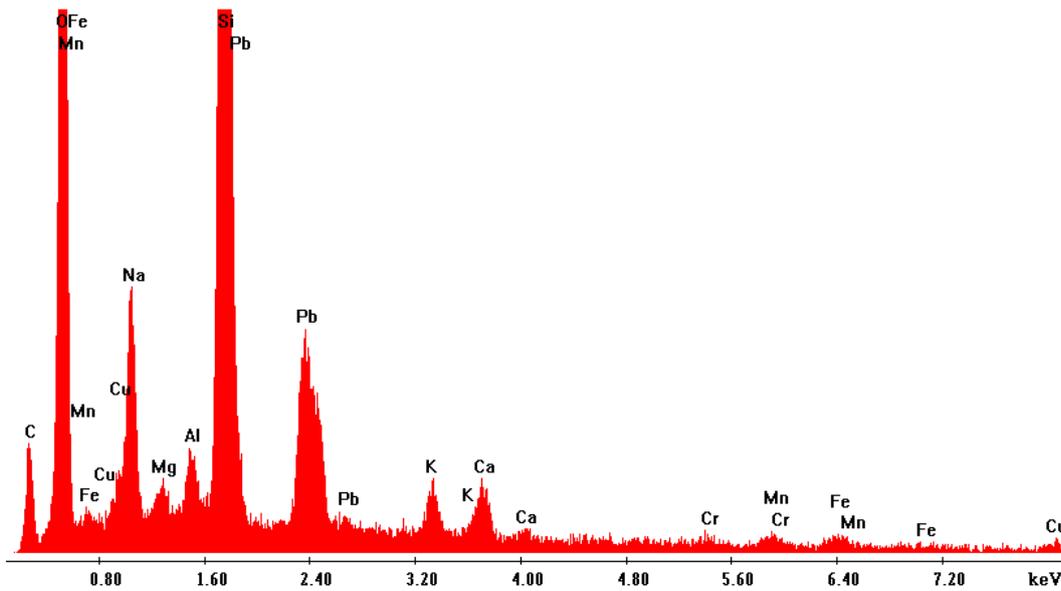


Bild 13: Elementspektrum im Bereich der Lasur auf Probe 3

3.3 Analysen an Glasproben aus der Pfarrkirche in Auschwitz

Die Entnahme von sehr kleinen Glassplintern aus dem stark geschädigten Fenster der katholischen Pfarrkirche Maria Himmelfahrt in Auschwitz erfolgte durch den Restaurator in der Werkstatt in Breslau. Einen Überblick zu den Glasproben liefern die Bilder 15-20.



Bild 14: Fenster nII, Pfarrkirche Auschwitz

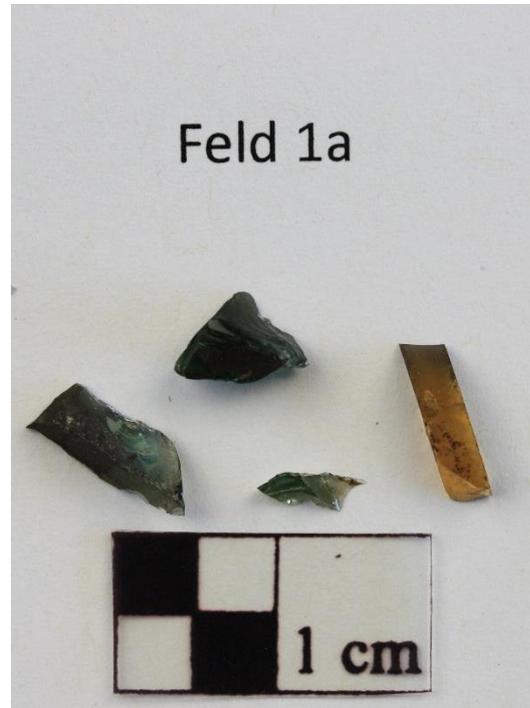


Bild 15: Glasproben

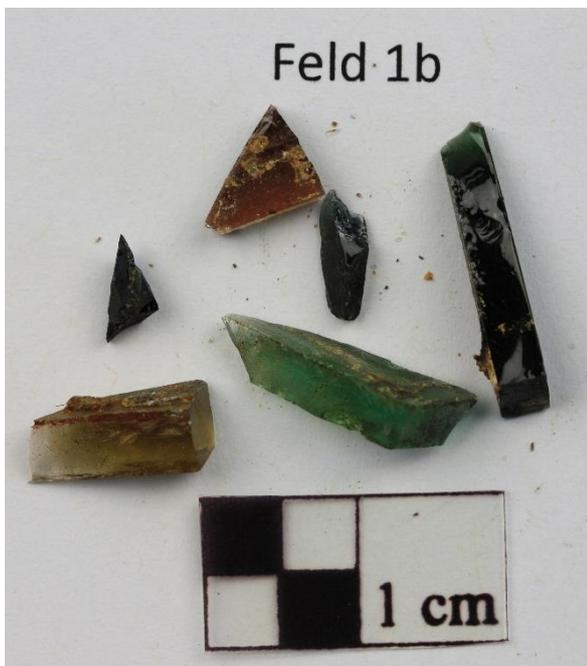
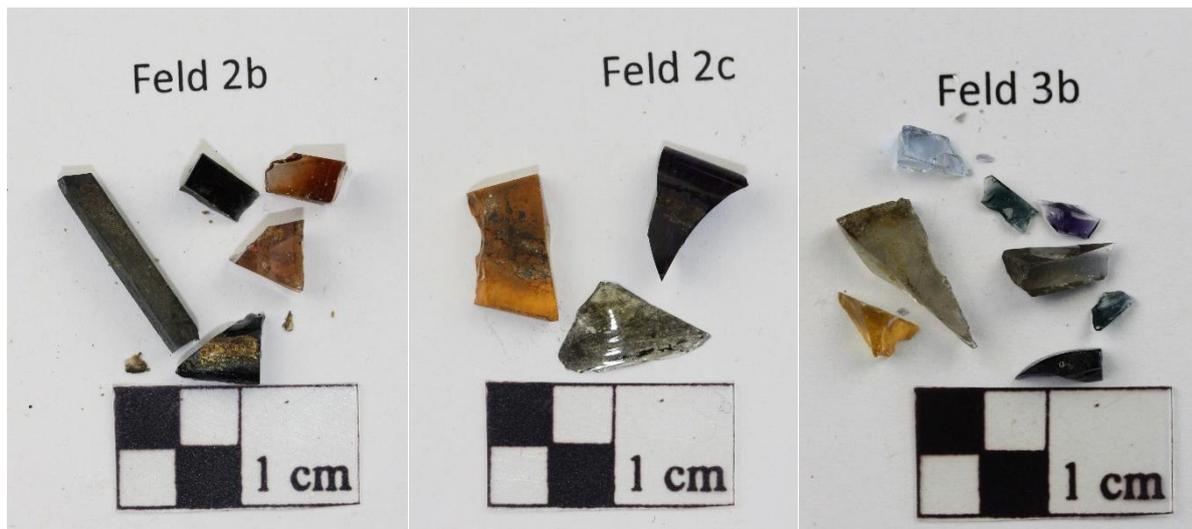


Bild 16: Glasproben



Bild 17: Glasproben



Bilder 18-20: Glasproben aus dem Fenster mit der Darstellung des heiligen Märtyrers Andreas Bobola.

Zur Bestimmung der Glaszusammensetzung wurden aus allen Entnahmestellen typische Glasproben ausgewählt, so dass sich ein repräsentativer Querschnitt aller im Fenster enthaltenen Farbgläser ergab. Die Glastücke wurden in Epoxidharz eingebettet, im Querschnitt angeschliffen und poliert. Die Analysen der Elementzusammensetzung erfolgte wiederum im ESEM XL30 mittels EDX. Die anschließende Bestimmung der chemischen Zusammensetzung erfolgte standardfrei. Die Analysenergebnisse der untersuchten Proben sind in Tabelle 5 zusammengestellt.

Bei den Gläsern handelt es sich Soda-Kalk-Gläser, mit einem SiO_2 -gehalt zwischen 72 und 76 % und einem Na_2O -gehalt von 11 bis 16 %. Nur in vier Gläsern wurden geringe Anteile an K_2O bestimmt. Der CaO -gehalt liegt bei der Mehrzahl der Gläser zwischen 6 und 10 %, so dass diese Gläser als stabil angesehen werden müssen und in der Mehrzahl nicht einem Glastyp zugeordnet werden können, der das Schadensbild eines Craquelè zeigt. Ausnahmen bilden 2 grüne Gläser, die Probe P2a ein farbloses Glas mit grünem Überfang und die grüne Glasprobe P2c. In beiden liegt der CaO -gehalt unterhalb von 5%, so dass diese Glasproben weniger stabil sind als die Übrigen. Der grüne Überfang von Probe P2a hat zudem deutlich mehr K_2O als Na_2O , wodurch die chemische Beständigkeit ebenfalls herabgesetzt wird. Bei einem gleichzeitigen PbO -Gehalt von 13 % wirkt sich diese Zusammensetzung jedoch positiv auf die Herstellung von Überfanggläsern aus. Die Probe P2c könnte von der Zusammensetzung her am ehesten einem Glastyp zugeordnet werden können der zum Craquelè neigt, allerdings liegt der Gehalt von $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ bei diesem Glastyp üblicherweise bei 20 % oder darüber bei gleichzeitigem CaO -Gehalt unter 5%.²

Hinsichtlich der oxidischen Zusammensetzung gibt es gewisse Übereinstimmungen mit den Proben P1a und P1b aus der Marienkirche in Liegnitz sowie mit einer Probe aus der Johanniskirche in Thorn die auf das Jahr 1950 datiert ist.

² Torge, M.; Müller, W.; Adam, K.; Köcher, Ch.

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von Glasproben aus der Kirche in Auschwitz, Fenster nII in Masse %, (EDX-standardfrei)

	P1 gelb	P1a blau	P1a gelb	P1c farblos	P1c violett	P2a farblos mit grünem Überfang	P2a grüner Überfang	P2a violett Glas	P2b blaues Glas	P2c grünes Glas	P3b blaues Glas	P3b gelbes Glas	P3b Inkarnatglas
SiO ₂	75,3	71,6	75,5	73,1	75,7	79,1	65,7	74,8	73,9	72	74,4	74	73,5
Na ₂ O	14,7	13,5	14,5	15,1	11,9	15,9	3,3	15,8	14,2	11,2	12,9	15,6	15,3
K ₂ O	-	-	-	-	3,2	-	11,6	-	-	2,8	2,1	-	0,4
CaO	7,7	10,5	7,4	6,7	6,4	4,7	1,0	6,9	9,4	2,9	9,5	7,7	7,4
MgO	1,4	0,2	1,5	0,3	-	-	0,3	0,4	0,4	-	0,4	0,6	-
Al ₂ O ₃	0,9	0,5	1,1	0,6	0,5	0,3	0,3	-	0,7	1,3	0,6	0,7	0,7
P ₂ O ₅	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Fe ₂ O ₃	-	2,9	-	-	-	-	-	-	1,4	1,6	-	-	-
MnO	-	-	-	-	1,9	-	2,2	1,4	-	2,5	-	1,4	1,7
SO ₃	-	0,8	-	-	0,4	-	-	0,7	-	-	0,1	-	1
Cl	-	-	-	0,1	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-
PbO	-	-	-	-	-	-	13,0	-	-	1,4	-	-	-
CuO	-	-	-	-	-	-	1,5	-	-	-	-	-	-
BaO	-	-	-	4,1	-	-	-	-	-	1	-	-	-
ZnO	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3,2	-	-	-
Cr ₂ O ₃	-	-	-	-	-	-	1,1	-	-	-	-	-	-

3.4 Untersuchungen zum Schadensbild an Gläsern aus Auschwitz

Die Glaszusammensetzung kann aufgrund der Analysen nicht ursächlich für das starke Crauquelè verantwortlich sein. Bei genauer Betrachtung der einzelnen Felder des Fensters fallen „Zinnnasen“ auf einer großen Anzahl von Bleien, vertikal nach unten gerichtet, auf (Bild 21). Der Schmelzpunkt von Zinn liegt bei 231,9 °C, das bedeutet, dass die Glasmalereifenster großer Hitze ausgesetzt gewesen sein müssen. Vermutlich liegt darin auch die Ursache für die zahlreichen Risse und Sprünge im Glas



Bild 21: Detailaufnahme mit „Zinnnasen“ und Glassprüngen

Die Sprünge im Glas weisen häufig eine geschwungene Form auf, reichen nicht immer von einer bis zur anderen Glasseite, sind zur Oberfläche jedoch häufig offen. Auch elektronenmikroskopische Aufnahmen zeigen, dass weitere mikroskopisch kleine Risse vorhanden sind (Bild 22).

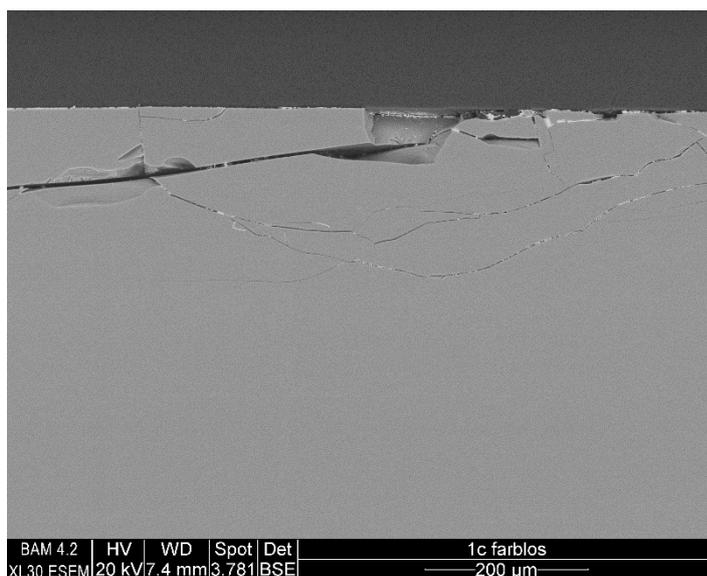


Bild 22: Elektronenmikroskopische Aufnahme am Glasquerschnitt

Auf einigen Gläsern des Fensters befanden sich dunkle krustenförmige Ablagerungen, die sich schollenförmig abnehmen ließen. Ihre Zusammensetzung wurde an einer Pulverprobe von der Rückseite des Feldes 1a (Auschwitz) mit Hilfe von ESEM und IR-ATR-Untersuchungen bestimmt.

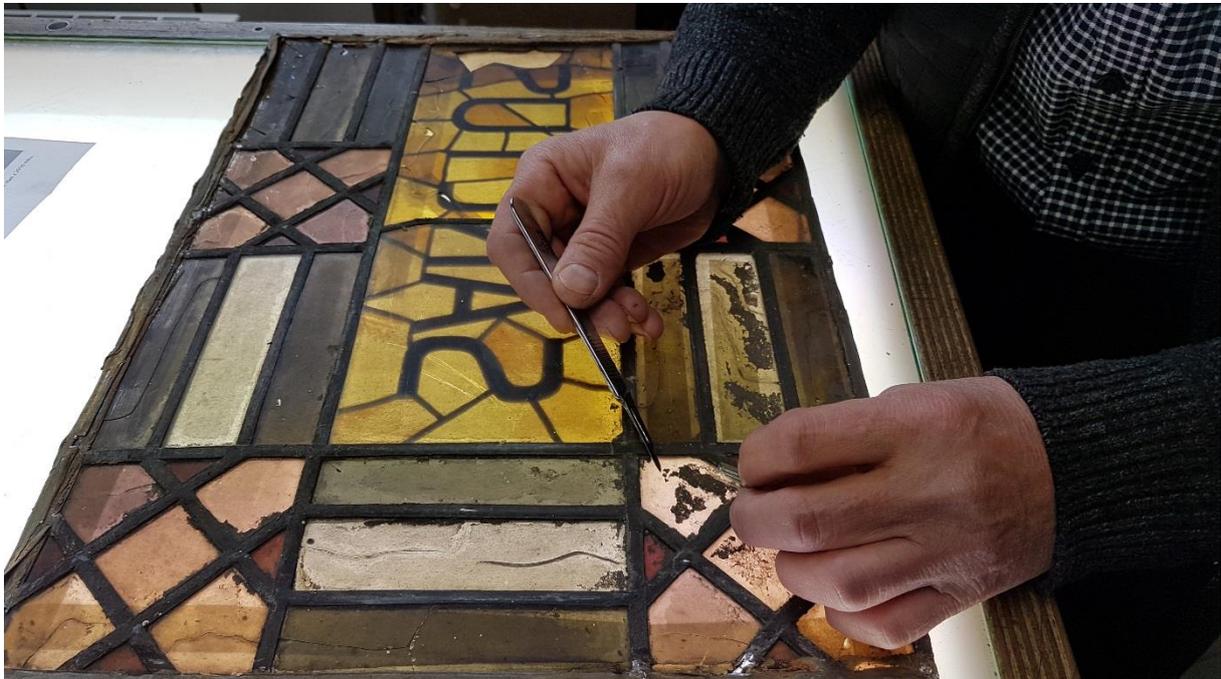
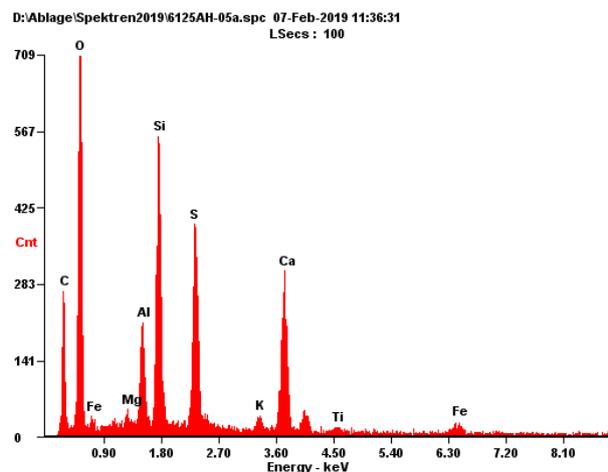
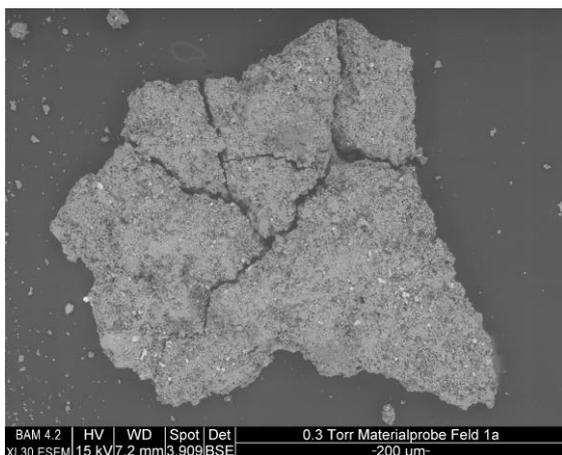


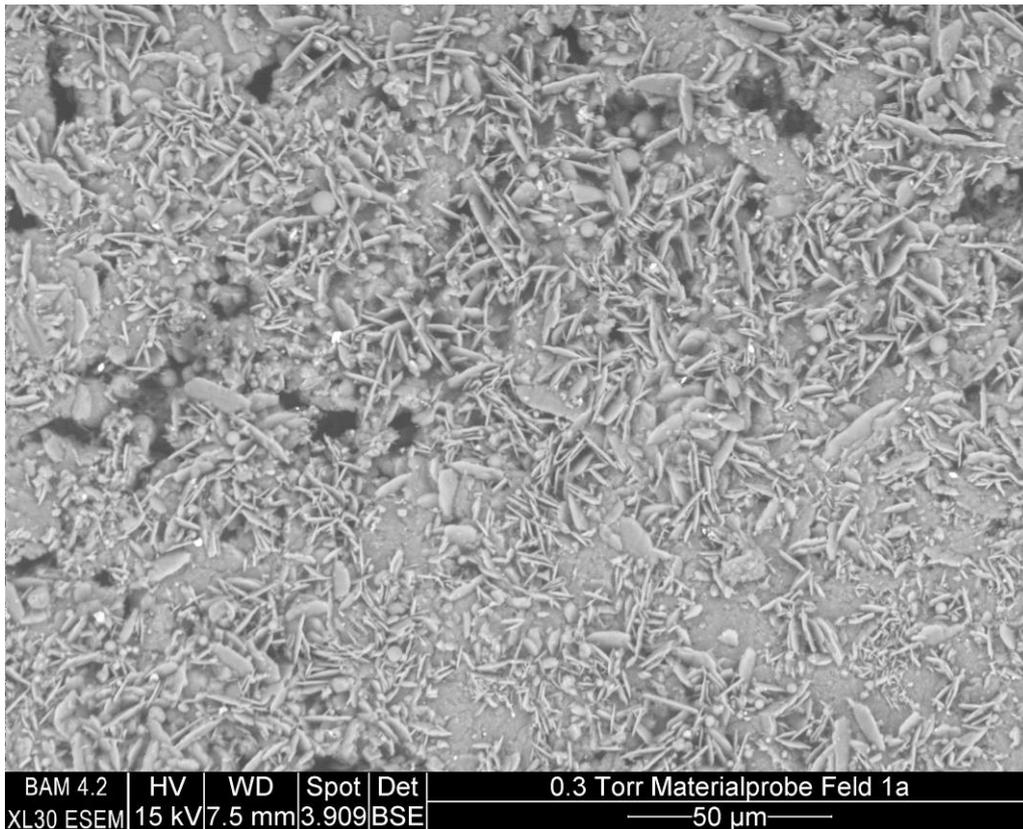
Bild 23: Entnahme einer Pulverprobe in der Restaurierungswerkstatt

Annahme: Es handelt sich vermutlich um eine Kaltmalerei zur Abdunklung zu heller Glasstücke; Rückseitig aufgetragen; nur noch in Fragmenten vorhanden, lässt sich schollenförmig abnehmen.
Probenahme: Slawomir Oleszczuk

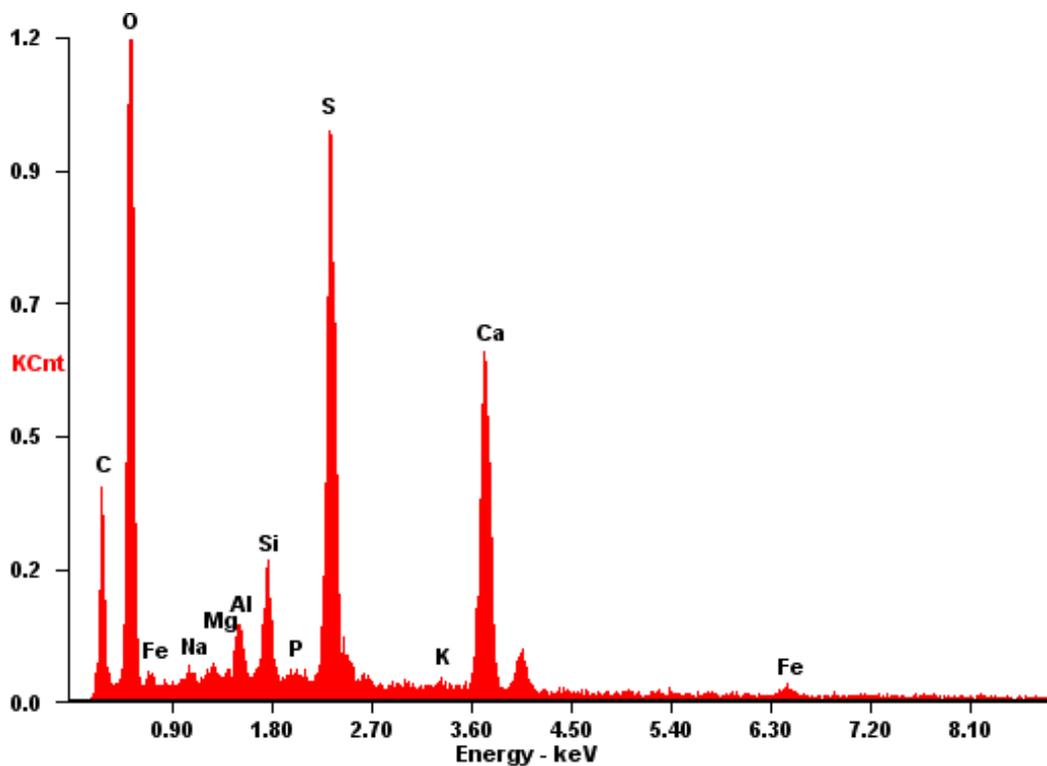
Untersuchungen mit dem ESEM (Ines Feldmann BAM, FB 4.2)



Bilder 24, 25: ESEM-Aufnahme, Rückseite der Materialprobe mit Bestandteilen des Glases (Si, Al, Mg) und Gips (Ca, S)



Bilder 26, 27(unten): ESEM-Aufnahme der Oberflächenmorphologie und Elementanalyse der Materialprobe, Hauptbestandteil ist Gips (Ca, S)



Vermutlich wurde mit Kohlenstoff eingefärbter Gips zur Abdunklung von zu hellen Bereichen benutzt. Gips wurde z.B. auch im 20.Jh. als Füllstoff in Kaltmalerei eingesetzt.

4. Klimamessungen

4.1 Messkonzept und -zeitraum

Die Erfassung der Klimadaten wie Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit sowie die Strömungsgeschwindigkeit der Luft erfolgte mit dem ALMEMO-Messsystem nach dem Einbau der Außenschutzverglasung an den Fenstern nIII und sIII in Koszewko, den Fenstern nX und sIX in Liegnitz und dem Fenster nII in der Pfarrkirche in Auschwitz. Die Fenster, an denen die Messtechnik installiert wurde, unterscheiden sich sowohl hinsichtlich ihrer Lage (Nord- und Südfenster) als auch in ihrer Größe. Die Messungen wurden über einen Zeitraum von 12 Monaten durchgeführt und erfolgten in Abhängigkeit vom Stand der Sanierungsarbeiten in Koszewko im Zeitraum von April 2018 – April 2019, in Leslau am Fenster nX von Oktober 2018 – Oktober 2019 sowie am Fenster sIX von Oktober 2019 – Oktober 2020. In Auschwitz wurde die Messtechnik im Juni 2019 eingebaut und die Messwerterfassung erfolgte bis Juni 2020. 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). Im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung wurden zusätzlich die Temperatur und die Strömungsgeschwindigkeit der Luft gemessen. An den beiden Fenstern nX und sIX in Liegnitz wurde das Messprogramm durch weitere Temperaturmessungen bzw. Messungen der relativen Luftfeuchtigkeit mit Hilfe des Custos Aeris Systems an den Positionen 1, 2 und 3 erweitert. Beide Messsysteme befinden sich an den jeweiligen Fenstern in unmittelbarer Nähe.

4.2 Messgeräte und Messfühler

4.2.1 ALMEMO-Messsystem

Für die Registrierung und Speicherung der Klimadaten wurde ein ALMEMO®-Datenlogger 2590-4S verwendet. Die eingesetzten Messfühler besitzen einen speziell entwickelten intelligenten ALMEMO®-Stecker mit programmierbarem Datenträger in dem die Parameter der angeschlossenen Fühler und Geräte gespeichert werden. Dadurch werden alle angesteckten Einheiten automatisch erkannt und die Funktionen entsprechend angepasst. Alle Fühler sind vom Hersteller programmiert und kalibriert. Beim Anstecken werden alle Parameter (wie z.B. Messbereich, Messwertkorrekturen, Skalierungen, Fühlerbezeichnung) automatisch an das Messgerät übertragen, so dass Fehlmessungen durch falsche Programmierung und Fühlerverwechslungen ausgeschlossen sind. Die Datenspeicherung erfolgt auf serienmäßigen Datenloggern mit 520 kB oder auf externen Smart-Media-Cards (MMC) mit 512 MB. Die Messdateien werden auf der MMC-Card als ASCII-Textdateien im Tabellenmode im Standard-FAT16-Format gespeichert. Die Datenübertragung von der MMC Speicherkarte erfolgt mittels eines angeschlossenen GSM-Mobilfunkmodems. Damit war eine kontinuierliche Fern-Kontrolle der Messwerterfassung und des Betriebs der Messtechnik möglich, so dass sich die Notwendigkeit von vor-Ort-Besuchen auf ein Minimum reduzierte.

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

Zur Messung der relativen Luftfeuchtigkeit 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 kamen daher unterschiedliche ALMEMO[®]-Messmodule für Feuchte und Temperatur FHAD 460 (freiliegendes ungeschütztes Sensorelement), FHAD 462 (Sensorelement mit geschlitzter Fühlerkappe) und FHAD 36Rx (Präzisionsfühler mit geschlossener Schutzkappe). Bei diesen Messsystemen 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. Die Messmodule mit Schutzkappe sind gegen mechanische Beschädigung und gegen Schmutz und Staub geschützt und können somit auch im Außenbereich verbaut werden. Aufgrund dieser konstruktiven Maßnahme befindet sich die Temperatur-/Feuchtemessstelle nicht direkt auf der Glasoberfläche, sondern ca. 5 mm davon entfernt. Der digitale Feuchte-Temperatursensor FHAD620 kann ohne Schutzkappe direkt auf die Glasoberfläche im Innenbereich aufgebracht wurden.

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

4.2.2. Custos Aeris Messsystem

Das Custos Aeris Messsystem bietet die Möglichkeit einer berührungslosen Überwachung der Klimadaten Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit an Kirchenfenstern mit Außenschutzverglasung. Das System besteht aus einem Hauptmodul und einem Luftspaltmodul (Bild 28).

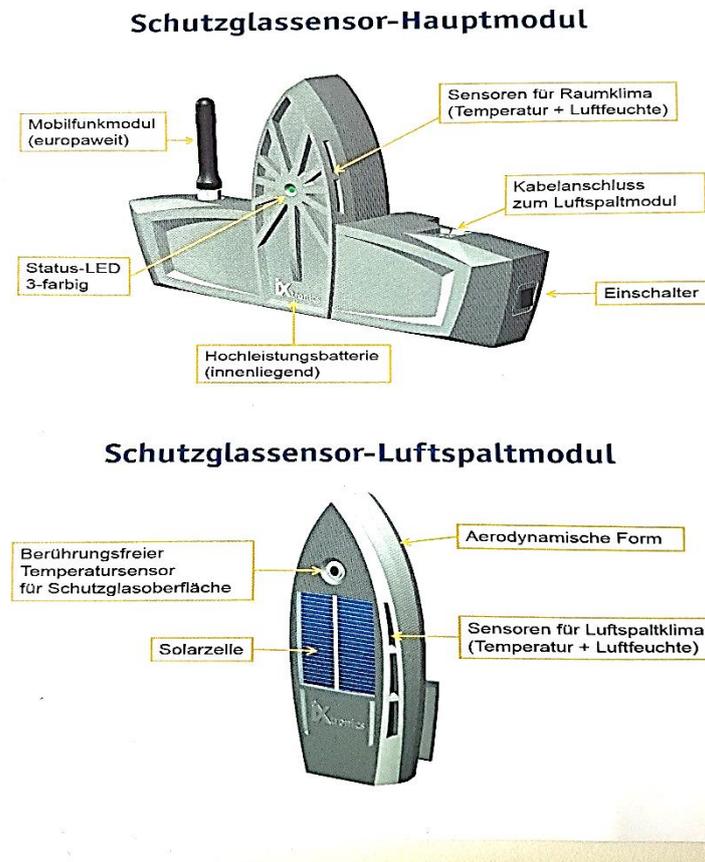


Bild 28: Custos aeris Messsystem mit Haupt- und Schutzglasmodul /iXtronics/

Im Hauptmodul befinden sich Sensoren für das Raumklima (Temperatur und relativer Luftfeuchte) sowie ein berührungsfreier Sensor zur Messung der Temperatur auf der Glasoberfläche (Pos. 1). Das Luftspaltmodul hat ebenfalls Sensoren zur Messung des Luftspaltklimas (Temperatur und rel. Luftfeuchte) und mittels eines weiteren berührungsfreien Temperatursensors wird die Oberflächentemperatur der Außenschutzverglasung gemessen (Pos. 3). Aus den Klimadaten werden über Algorithmen die Taupunkte berechnet. Das Custos Aeris system dient somit zur Überwachung von Kondensatbildung im Luftspalt von Schutzverglasungen an Kirchenfenstern. Das System ist kommerziell erhältlich (iXtronics GmbH, Paderborn). Der Messbereich beträgt -20 bis 85 °C mit einer Messtoleranz $< 0,5\%$. Die Messdatenerfassung erfolgt im 15 Minuten-Intervall. Die Messdaten werden täglich zu einen gesicherten Web-server gesendet. Die Daten werden in grafischer Form ausgewertet und dem Nutzer auf einer Web-Plattform zur Verfügung gestellt. Dort ist ein download aller Messdaten als CSV-Datei möglich. Das Messsystem ist energieautark für mindestens ein Jahr, leicht zu installieren und kann serienmäßig in ganz Europa eingesetzt werden. Das Sensorsystem wurde 2014-17 innerhalb

eines DBU-Projektes entwickelt und getestet. Weitere detaillierte Informationen sind im Abschlussbericht dieses Vorhabens zusammengestellt.³

Alle notwendigen Sensoren sind in den Gehäusen integriert, so dass auch der Montageaufwand am Kirchenfenster relativ einfach zu bewerkstelligen ist. Luftspaltmodul und Hauptmodul verfügen über Montageklappen, die einfach über die Deckschienen der Originalverglasung geschoben werden (Bild 29). Über ein Flachbandkabel sind beide Einheiten verbunden. Alternativ können die beiden Module mit Hilfe vorhandener Bohrungen auch an Nylonschnüren befestigt werden.

Im Hauptmodul ist ein leistungsstarker Akku eingebaut, der die Energieversorgung des Messsystems für mindestens ein Jahr garantiert. Da auf der Vorderseite des Luftspaltmoduls Solarzellen integriert sind, ist die Lebensdauer des Akkus deutlich länger.

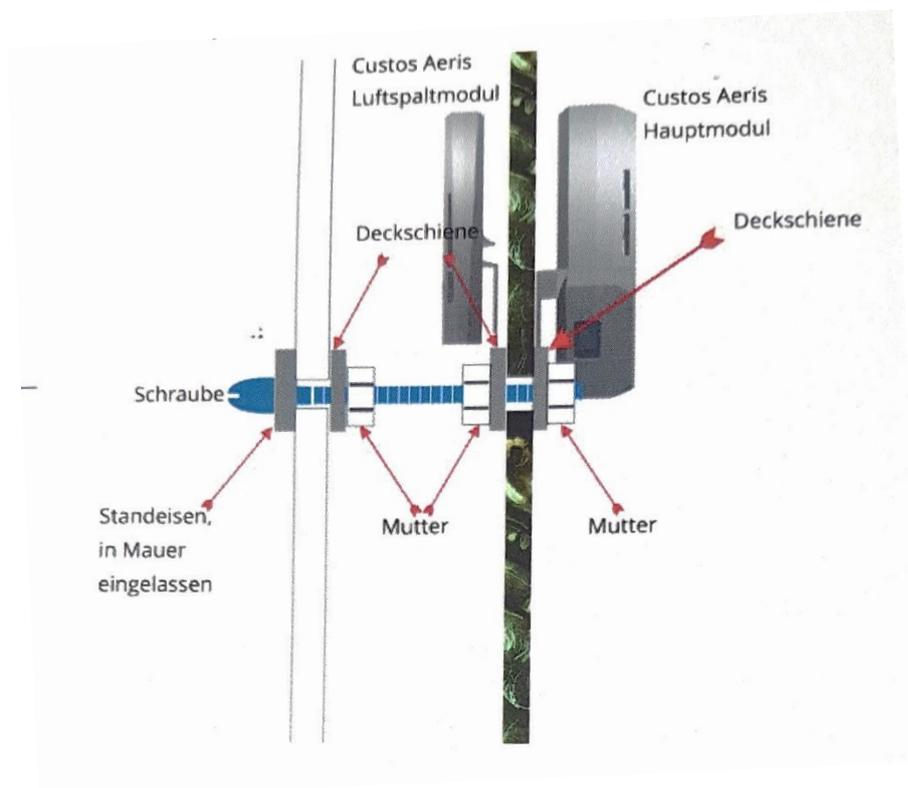


Bild 29: Montagelösung des Custos Aeris-Messsystems⁴

Nach erfolgter Montage wird ein Schalter am Hauptmodul auf „Ein“ gestellt. Das Hauptmodul loggt sich beim stärksten Mobilfunknetz ein und sendet dann jeden Morgen um 8:00 Uhr die Daten des letzten Tages in die Cloud. Der Nutzer erhält über Benutzername und Passwort Zugang auf sein Modul und kann dort die Messdaten grafisch und numerisch ansehen.

³ Abschlussbericht des DBU-Vorhabens Az.30751/45

⁴ Hajurveda Heritage VIPpost Ausgabe 4, Januar 2019

4.3 Anordnung der Messtechnik

Die Anordnung der Temperatur- und Feuchtefühler erfolgte in allen Objekten in der Regel auf der Innen- und Außenseite der Originale (Pos. 1, 2) und auf der Innen- und/oder Außenseite der Schutzverglasung (Pos. 3, 4).

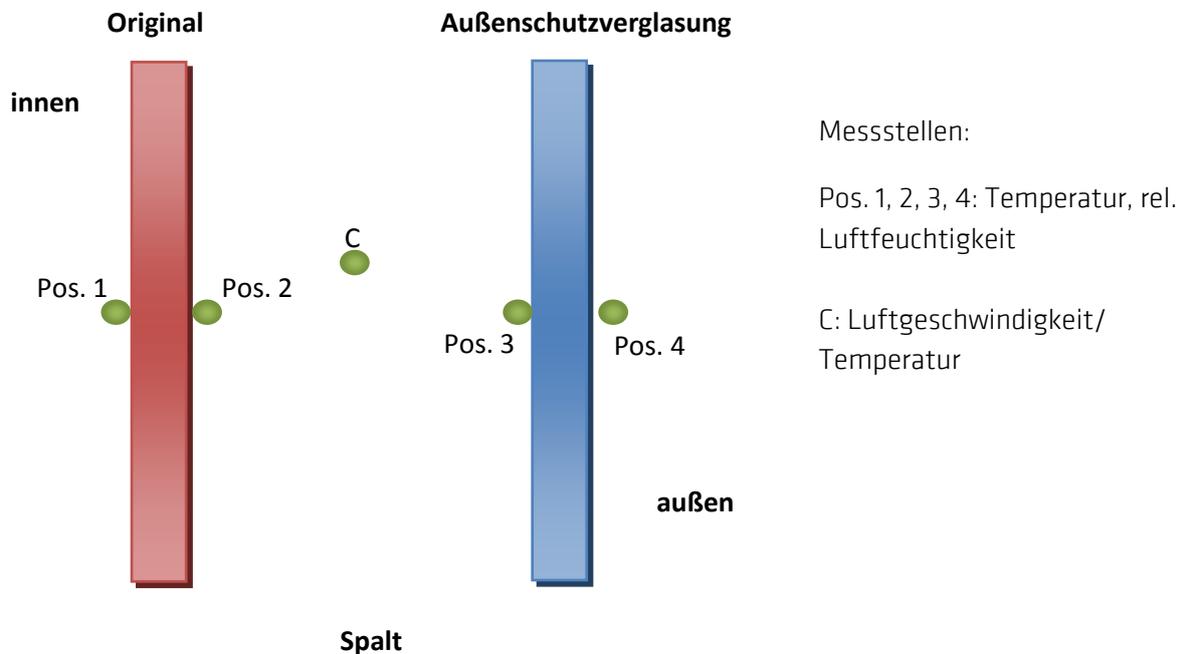
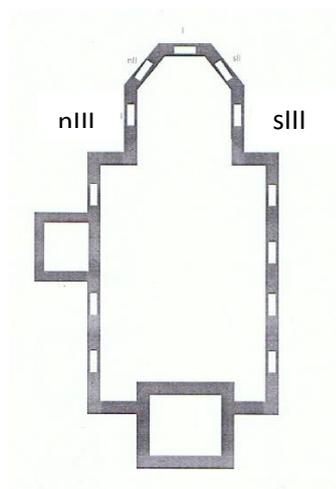


Bild 30: Schematische Übersicht der Messstellen

Die Fixierung der Messfühler an den Messstellen erfolgte mit Tesa „extra power“ Gewebeband. Das Thermoanemometer zur Messung der Luftgeschwindigkeit im Spalt wurde mittig zwischen Original- und Außenschutzverglasung so angeordnet, dass vertikale Luftbewegungen registriert werden. Zur Installation und Deinstallation der Messtechnik waren Gerüste an den Fenstern in Liegnitz und Auschwitz notwendig. Für den Ein- und Ausbau mussten einzelne Glasfelder von Mitarbeitern der Restaurierungswerkstatt herausgenommen und wiedereingesetzt werden. In Koszewko konnte die Installation und der Ausbau von einer Leiter aus erfolgen.

4.3.1 Dorfkirche Koszewko



Bilder 31-33: Anordnung der Fenster nIII und sIII im Grundriss der Dorfkirche von Koszewko

Die mittelalterlichen Felder wurden aus dem Glasverband des Fensters entnommen, restauriert und in Kupferprofilrahmen eingefasst. Mit Hilfe spezieller Halterungssysteme am Holzrahmen sind sie in den Kircheninnenraum versetzt worden. Die Außenverglasung wurde durch eine neue Goetheglas-Scheibe geschlossen. Das Fenstermaß beträgt 121 cm x 65 cm bzw. 183 x 65 cm. Der Abstand zwischen Goetheglas und mittelalterlichem Original beträgt etwa 3 cm. Die Goetheglas-Scheibe wurde mit einer kommerziellen Polyester-Schutzfolie (4 Mil Clear SR) stabilisiert, um Schäden an den mittelalterlichen Gläsern durch von außen wirkende Kräfte zu verhindern. Auf diese Art und Weise wurde eine kostengünstige Schutzverglasung installiert, die speziell auf den langfristigen Erhalt der einzelnen mittelalterlichen Glasmalereifelder ausgelegt ist. In beiden Fenstern wurden Sensoren zur Messung von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit (Pos. 1, 2, 4) sowie der Strömungsgeschwindigkeit im Spalt angebracht. Der Einbau der Messtechnik in Koszewko erfolgte am 12.04.2018, der Ausbau am 11.04.2019.

4.3.2 Liebfrauenkirche Liegnitz

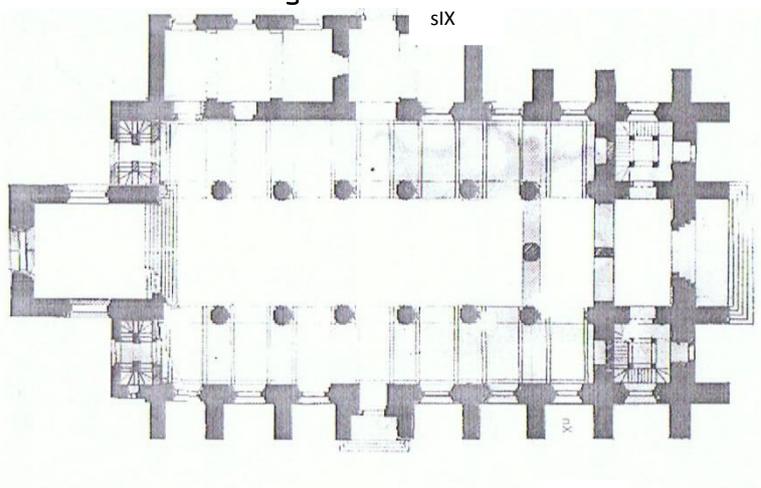


Bild 34: Grundriss Liebfrauenkirche Liegnitz mit den Fenstern sIX und nX

nX

Einbau der Messtechnik in Liegnitz Fenster nX am 10.10.2018



Liegnitz L1 am Lüftungsflügel 10b (ALMEMO-Sensoren)

Pos. 1, 2, 4 Temperatur relative Luftfeuchte, im Spalt
Temperatur, Luftgeschwindigkeit

Spaltbreite ca. 3 cm

Liegnitz L2, Feld 9b

Pos. 1, 2, 3 Temperatur, rel. Luftfeuchte

im Spalt Temperatur, Luftgeschwindigkeit
(zwischen 8b und 9b)

Custos Aeris-Messsystem

Montage zwischen Feld 8c und 9c

Pos. 1, 2, 3 Temperatur, rel. Luftfeuchtigkeit

Fenstermaße:

Höhe: 10,6 m

Breite: 1,8 m

Spaltbreite ca. 7 cm

Bild 35: Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster nX



Einbau Messtechnik 01.10.19

Custos Aeris-Messsystem:

zwischen Feld 3a und 4a

Liegnitz L3, ALMEMO-Sensoren:

Temperatur/rel. Luftfeuchte, Pos.1
oben Feld 3a

Temperatur/rel. Luftfeuchte, Pos.2
oben Feld 3a (ohne
Schutzkappe)

Temperatur/rel. Luftfeuchte, Pos.3
Feld 4a unten gegenüber Custos

Temperatur/
Luftgeschwindigkeit im Spalt
zwischen Feld 3a und 4a

Fenstermaße:

Höhe: 6,44 m

Breite: 2,37 m

Spaltbreite ca. 4,5 cm

Bild 36: Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster sIX

4.3.3 Pfarrkirche Auschwitz

Einbau der Messtechnik am 27.06.2019

ALMEMO-Sensoren:

Temperatur/
rel. Luftfeuchte, Pos. 4

Temperatur/
rel. Luftfeuchte, Pos. 1
Temperatur/
rel. Luftfeuchte, Pos. 2

Temperatur/Luftgeschwindigkeit im
Spalt

Fenstermaße:
Höhe: 2,33 m; Breite: 1,57 m
Spaltbreite ca. 7 cm

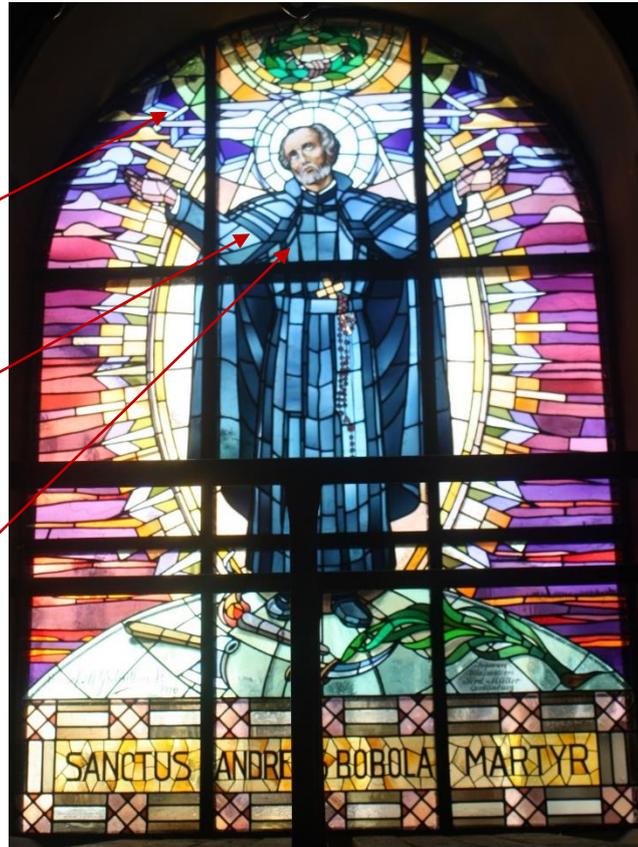


Bild 37: Pfarrkirche Auschwitz, Fenster nII

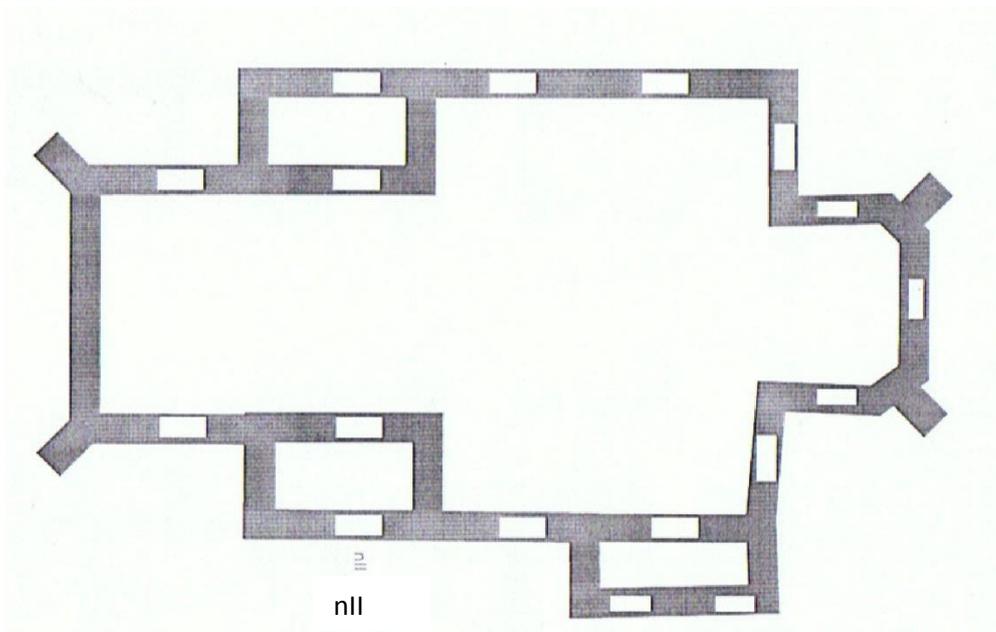


Bild 38: Grundriss der Pfarrkirche Auschwitz

4.4. Messergebnisse

4.4.1. Klimamessungen in der Dorfkirche Koszewko

Die Klimamessungen in der Pfarrkirche Koszewko erfolgten an den Fenstern nIII und sIII im Zeitraum vom 12.04.2018 - 11.04.2019. In beiden Fenstern befindet sich je ein kleines mittelalterliches Glasmalereifeld mit einem Abstand von nur 3 cm zur Verglasung des Fensters.

4.4.1.1. Südseite K1, Fenster sIII

Die Klimadaten wurden monatlich per Modem bzw. bei vor Ort Terminen ausgelesen. 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 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

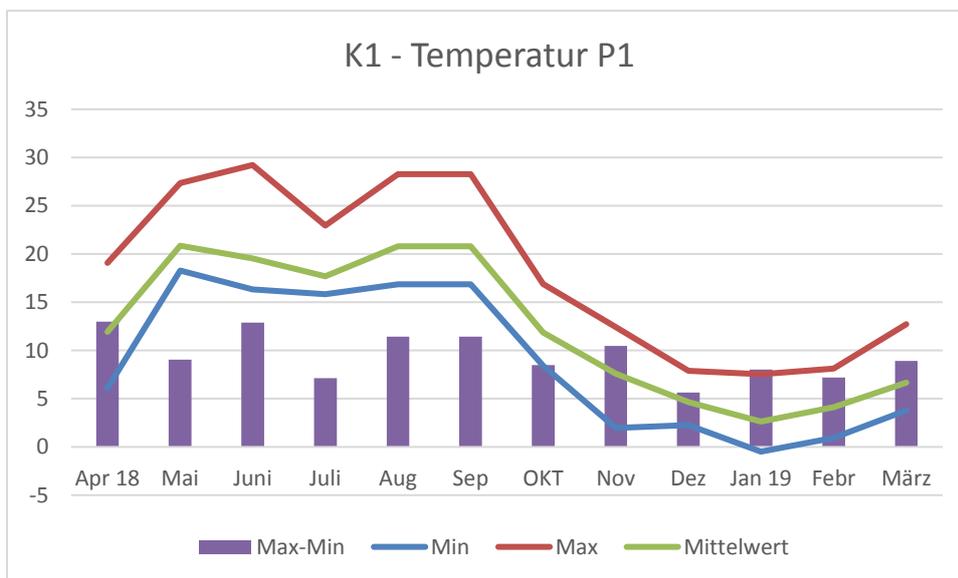


Bild 39: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sIII betrug im Juni 29,2°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -0,5°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat April 13,0 K.

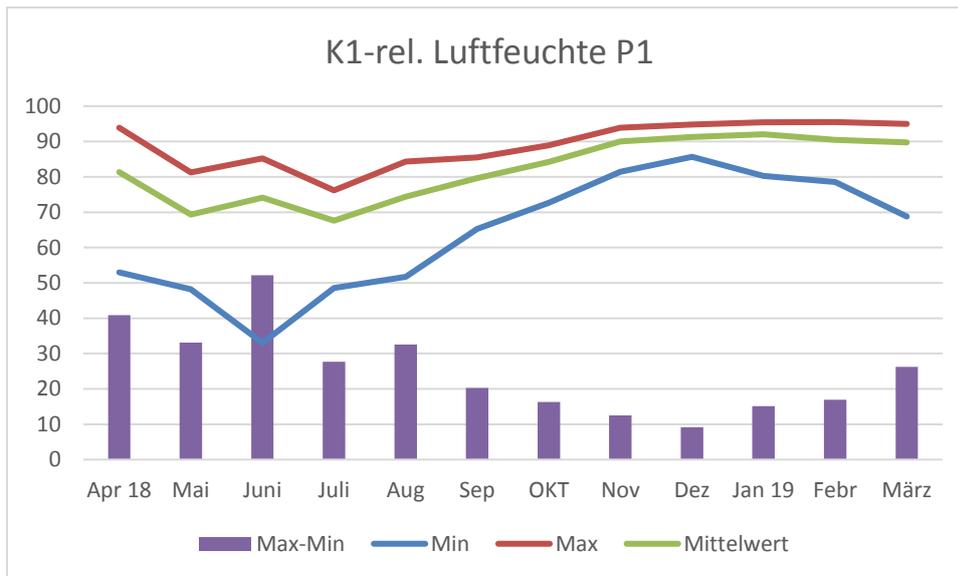


Bild 40: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die Maximalwerte der Feuchtigkeit lag von Oktober bis April deutlich über 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sIII betrug im Februar 95,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juni bei 33,0 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juni mit Δ r. F. = 52,2 % festgestellt.

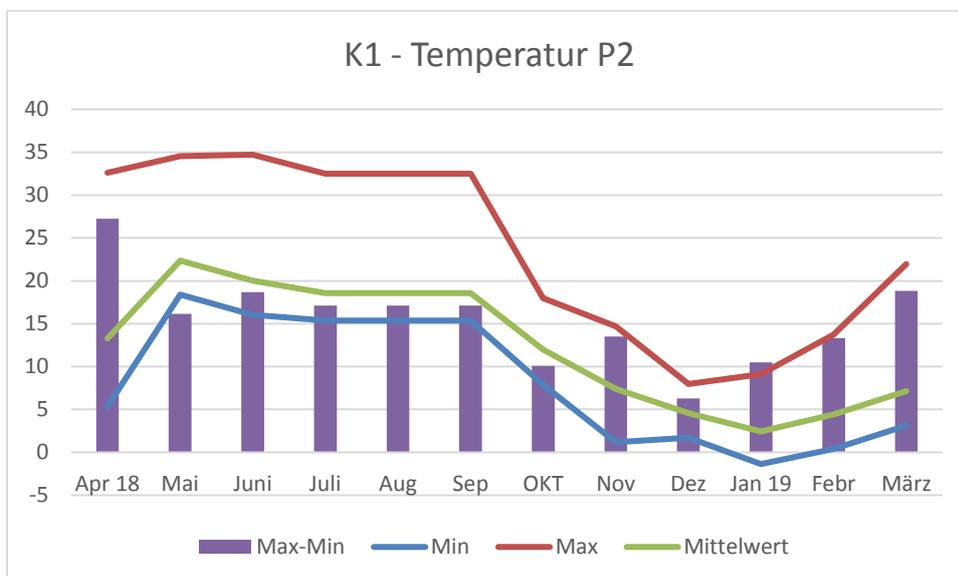


Bild 41: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sIII betrug im Mai 35,6°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -1,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat April bei 27,2 K.

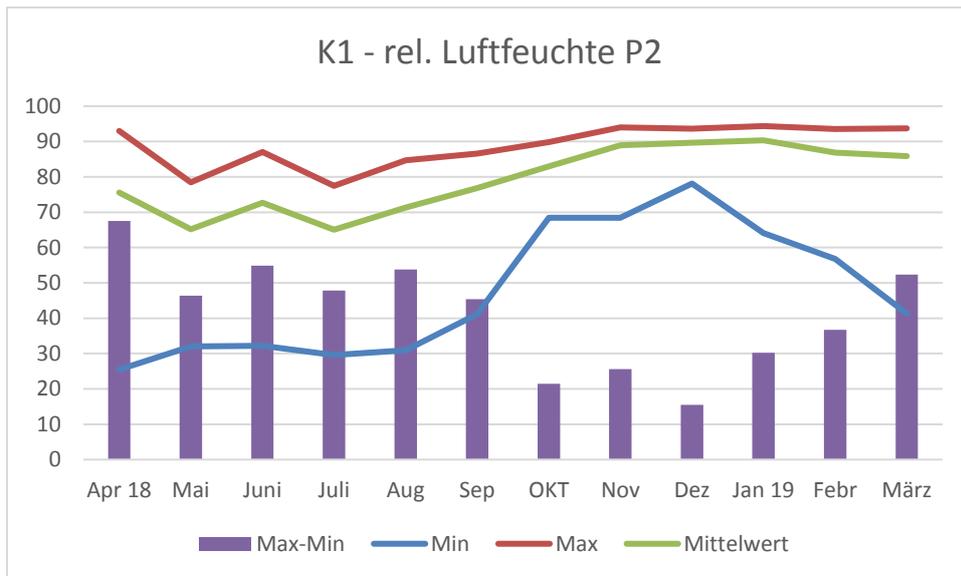


Bild 42: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lag in den Monaten Oktober bis April deutlich über 90% r. F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sIII betrug im Januar 94,4 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im April bei 25,5 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im April mit Δ r. F. = 67,6 % festgestellt.

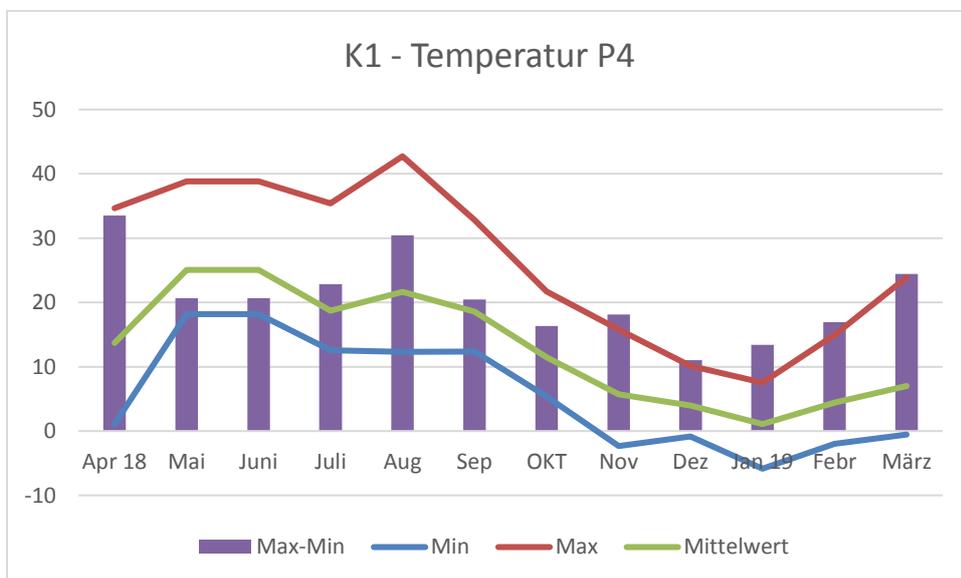


Bild 43: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Feld sIII betrug im August 42,7°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei - 5,8°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat April bei 32,5 K.

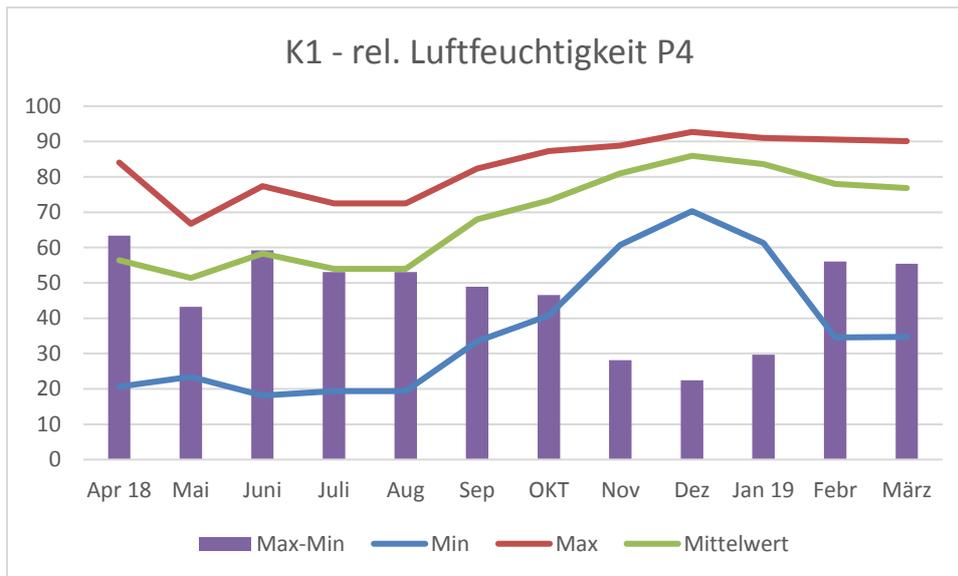


Bild 44: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit wurden in den Monaten November bis März mit ca. 90 % erreicht. Die minimale Feuchtigkeit lag in den Monaten Juni bis August bei 19 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im April mit Δ r. F. = 63,4 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten.

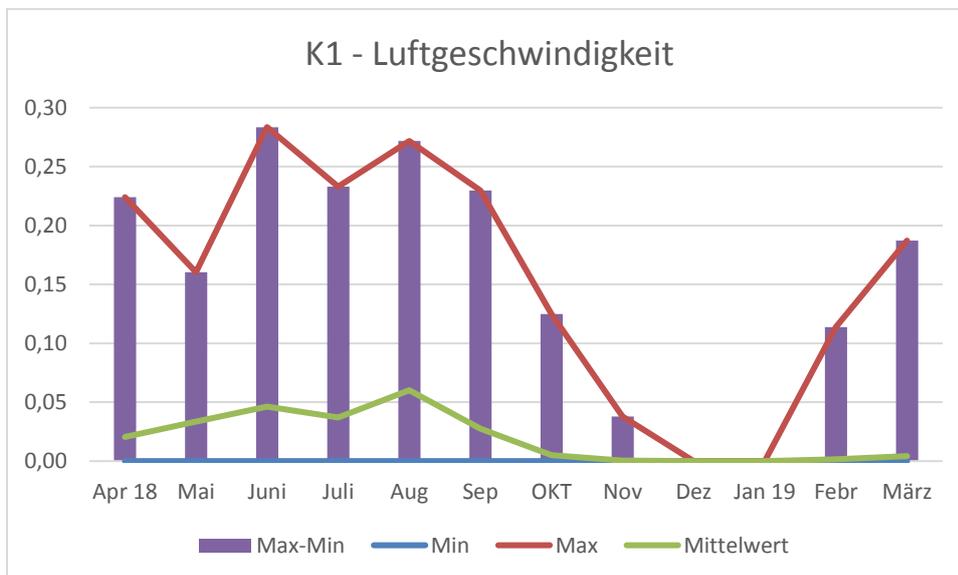


Bild 45: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster sV

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Feld sV betrug im Juni 0,28 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.

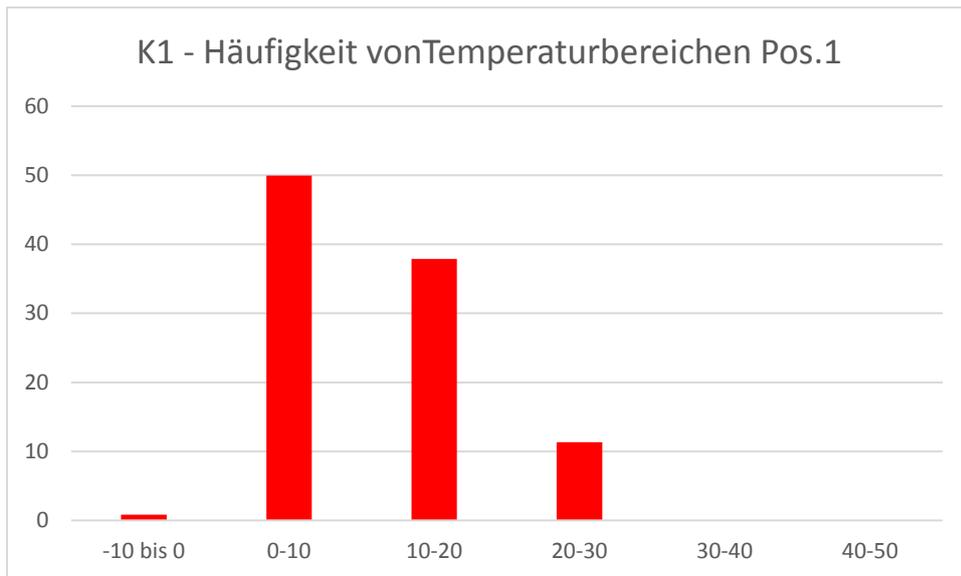


Bild 46: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Innenseite der Originalverglasung liegen im Bereich zwischen 0-10°C. In den Wintermonaten wurden Werte unterhalb von 0°C nur zu knapp einem % der Messzeit erreicht. Die höchsten Temperaturen lagen im Bereich zwischen 20 und 30°C und wurden nur etwa zu etwa 11% 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 und im Sommer etwas wärmer. Die Temperaturen liegen zu knapp einem % der Messzeit im Bereich von 30 bis -40°C (Bild 61).

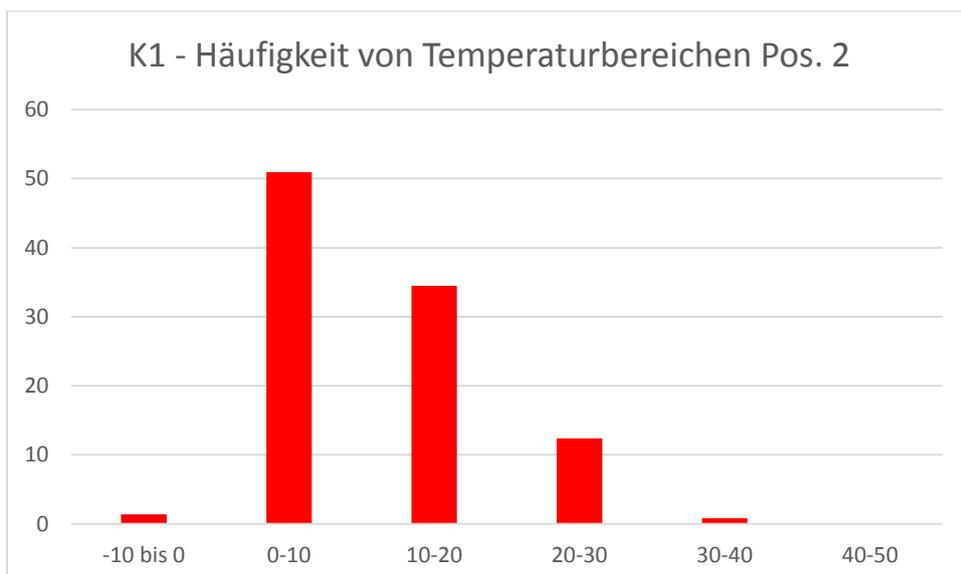


Bild 47: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

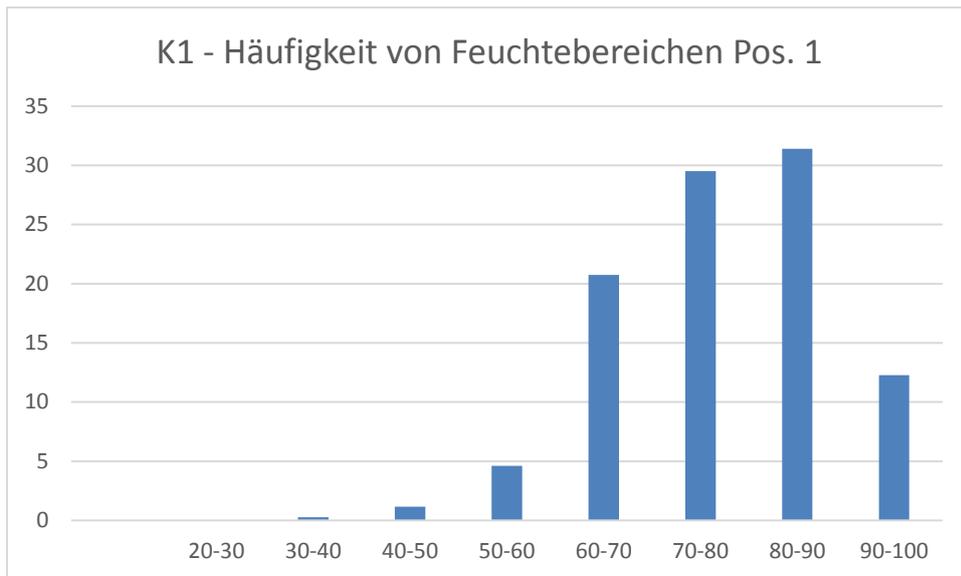


Bild 48: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) im gesamten Messzeitraum

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung liegt zu mehr als 30 % der Messzeit in einem Bereich zwischen 80-90 % r. F. Zu mehr als 12 % der Messzeit wurden Werte über 90 % r. F. registriert. An der Außenseite der Originalverglasung liegen die Werte zu etwa 2/3 der Messzeit über 80 % und erreichen auch Werte zwischen 90 und 100 % r. F. (Bild 49)

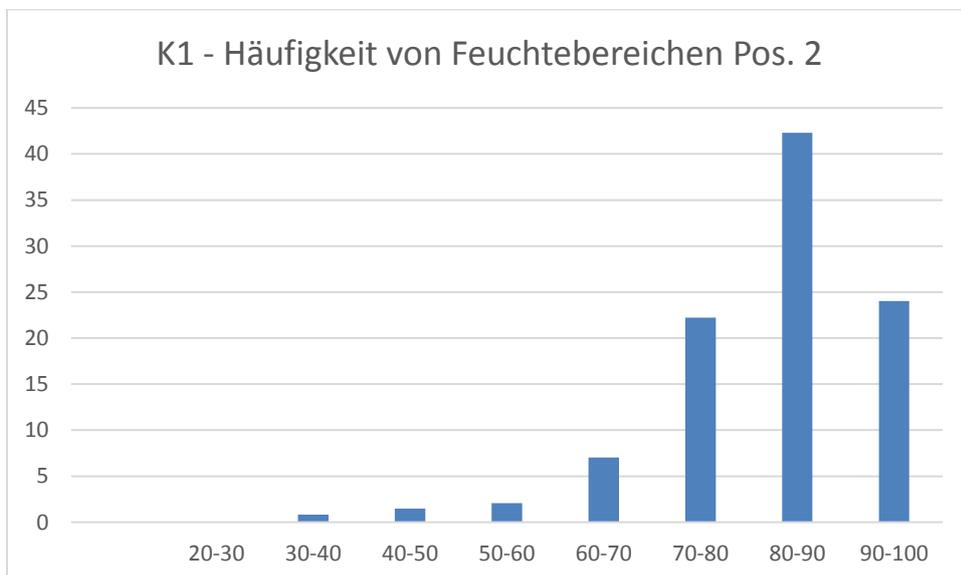


Bild 49: Häufigkeitsverteilung von Feuchtigkeitsbereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2) im gesamten Messzeitraum

Tauwasserbildung an der Originalverglasung wurde jedoch weder beobachtet noch konnte dieses Ereignis aus den Messwerten berechnet werden. Die Außenschutzverglasung dämpft den unmittelbaren äußeren Witterungseinfluss. Nur auf der Innenseite der Schutzverglasung war Kondensatbildung sichtbar.

Tabelle 6: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 04/18-04/19 am Fenster sIII in Kozewko

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
04/18	6,1	19,1	53,0	93,9	5,4	32,6	25,5	93,0	-	-	-	-	1,1	34,6	20,6	84,0	0,22
05			Ausfall Datenlogger 26.04. - 28.05.2018														
06	16,3	29,2	33,0	85,2	16,0	34,7	32,2	87,0	-	-	-	-	11,7	39,8	18,1	77,4	0,28
07	15,8	23,0	48,5	76,2	15,4	32,5	29,6	77,4	-	-	-	-	12,6	35,4	19,4	72,5	0,23
08	16,9	28,3	51,7	84,3	16,2	37,4	30,9	84,7	-	-	-	-	12,3	42,7	19,9	84,0	0,27
09	15,5	22,5	65,2	85,5	14,9	31,1	41,1	86,6	-	-	-	-	12,3	32,8	33,4	82,4	0,23
10	8,4	16,9	72,7	88,9	7,9	18,0	68,4	89,8	-	-	-	-	5,4	21,7	40,8	87,4	0,12
11	2,0	12,4	81,4	93,9	1,2	14,7	68,4	94,0	-	-	-	-	-2,4	15,8	60,7	88,8	0,04
12	2,3	7,9	85,7	94,8	1,7	8,0	78,1	93,6	-	-	-	-	-0,9	10,1	70,3	92,7	0
01/19	-0,5	7,5	80,3	95,5	-1,4	9,1	64,1	94,4	-	-	-	-	-5,8	7,5	61,3	91,0	0
02	0,9	8,1	78,6	95,5	0,4	13,7	56,8	93,5	-	-	-	-	-2,0	14,9	34,6	90,6	0,1
03	3,8	12,7	68,8	95,0	3,1	22,0	41,4	93,8	-	-	-	-	-0,5	23,9	34,7	90,2	0,2

4.4.1.2 Nordseite K2, Fenster nIII

Die Klimamesswerte wurden per Modem ausgelesen. Es erfolgte die Berechnung charakteristischer Werte, wie Maxima und Minima von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und Luftströmungsgeschwindigkeit. Die Werte sind in Tabelle 7 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

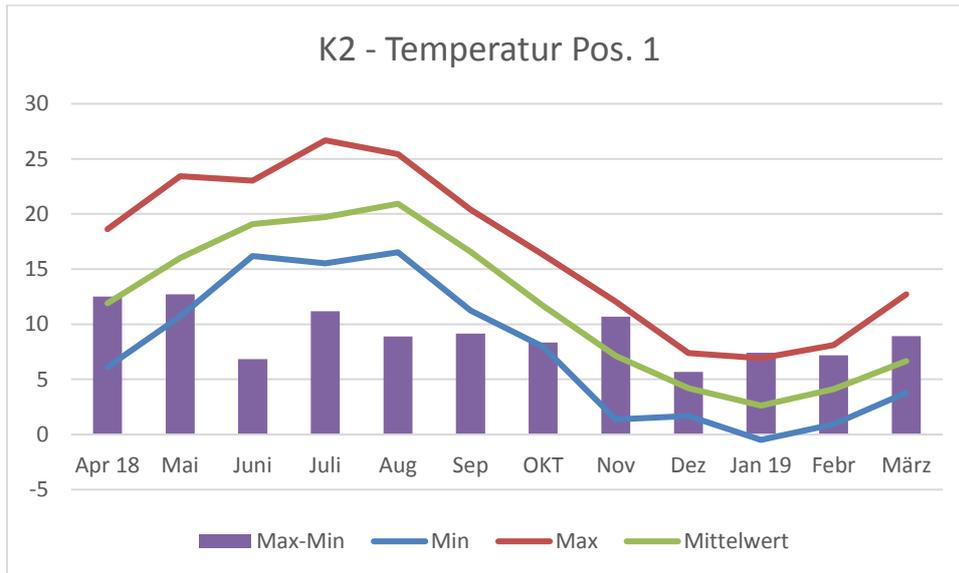


Bild 50: Temperaturextrema sowie -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nIII betrug im Juli 26,7°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -0,5°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat Mai 12,7 K.

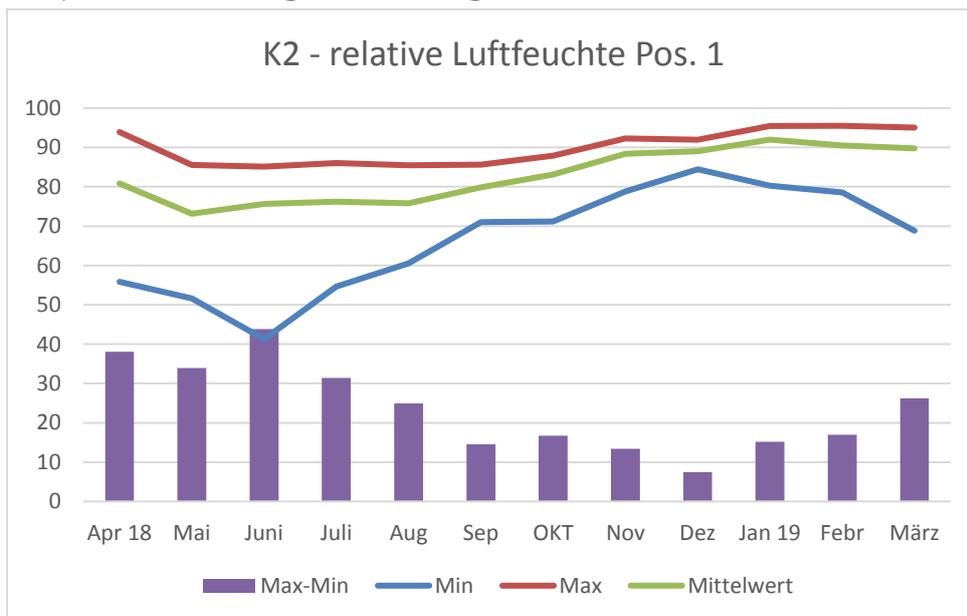


Bild 51: Extrema und Schwankungen der relativen Luftfeuchte an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1)

Die Maximalwerte der rel. Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten November bis April oberhalb von 90 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nIII betrug im Februar 95,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juni bei 41,3 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im Juni mit Δ r. F. = 43,9 % festgestellt. Beim direkten Vergleich mit den Messwerten der Südseite (K1) zeigt sich, dass die Maximaltemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit etwa gleich hohe Werte erreicht. Insbesondere die Werte der relativen Luftfeuchtigkeit liegen auf der Südseite und auf der Nordseite in den Wintermonaten deutlich über 90 % r. F.

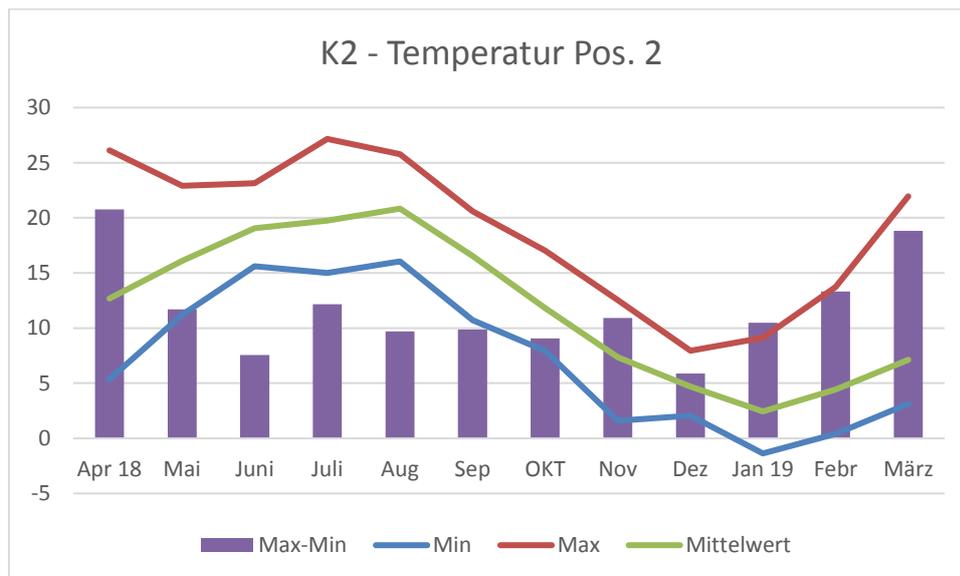


Bild 52: Temperaturextrema sowie -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.2)
Die maximale gemessene Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nIII betrug im Juli 27,2°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -1,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat April 20,1 K

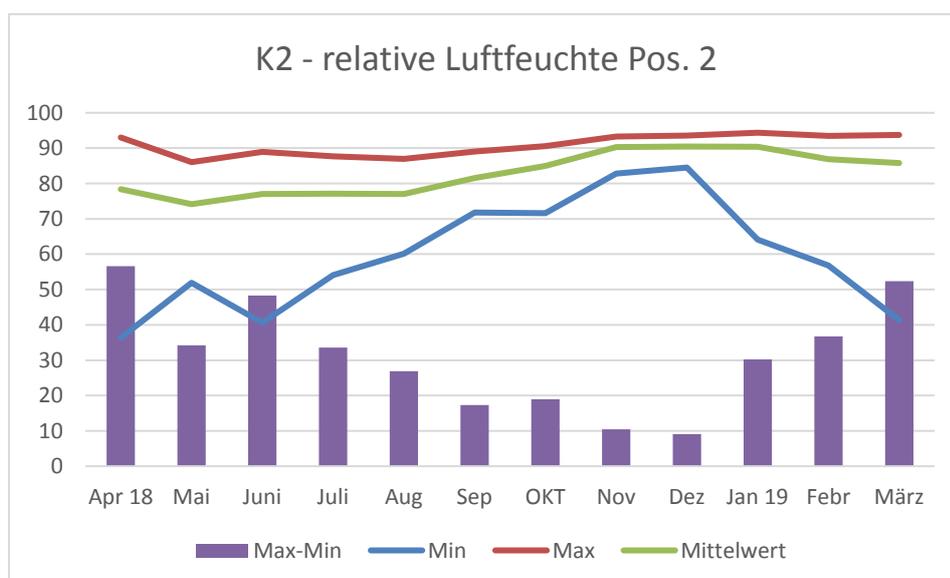


Bild 53: Extrema und Schwankungen der relativen Luftfeuchte an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1)

Die Maximalwerte der relativen Feuchtigkeit lagen in den Monaten Oktober bis April deutlich über 90 % r.F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nIII betrug im Januar 94,4 % r. F. im Vergleich zu 95,5 % r. F. auf der Südseite. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im April bei 36,4 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden ebenfalls im April mit Δ r. F. = 56,6 % festgestellt.

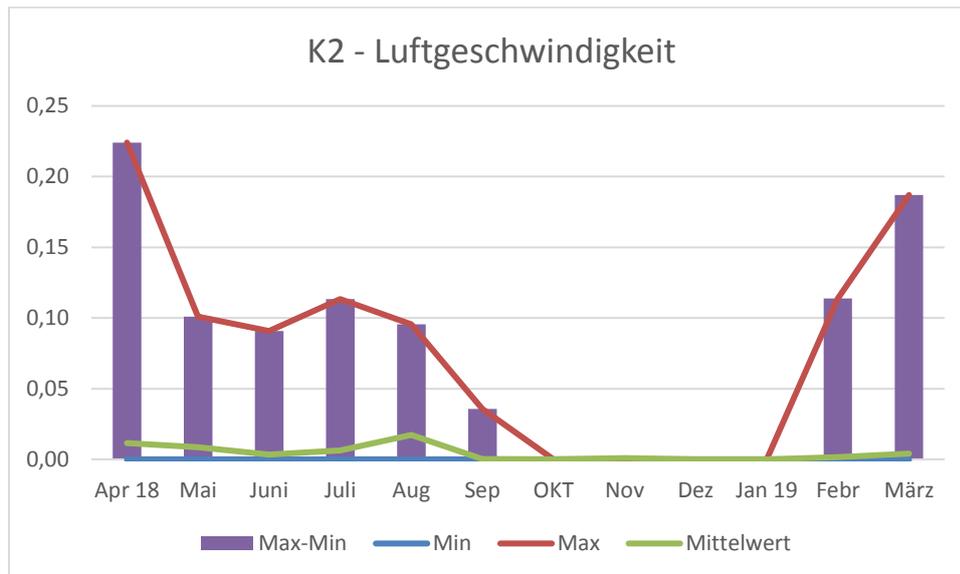


Bild 54: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster nIII

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt am Fenster nIII betrug im April 0,22 m/s und liegt damit unter den Maximalwerten der Südseite. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt in allen Monaten des Jahres 0 m/s, d.h. sie kommt im Tagesverlauf zum Erliegen. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass geringe Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen und dass die Luftströmung in den Monaten Oktober bis Januar völlig zum Erliegen kommt. Obwohl die Spaltbreite nur ca. 3cm betrug wurden eine Luftzirkulation in den Monaten registriert, in denen es auch eine deutliche Erwärmung der Glasmalereifelder gemessen worden ist. Die Extremwerte der Temperatur auf der Nord- und Südseite unterscheiden sich deutlich voneinander, die Werte der relativen Luftfeuchte sind jedoch nahezu gleich, eine damit einhergehende höhere Beanspruchung der Glasmalereien am Fenster sIII 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 %.

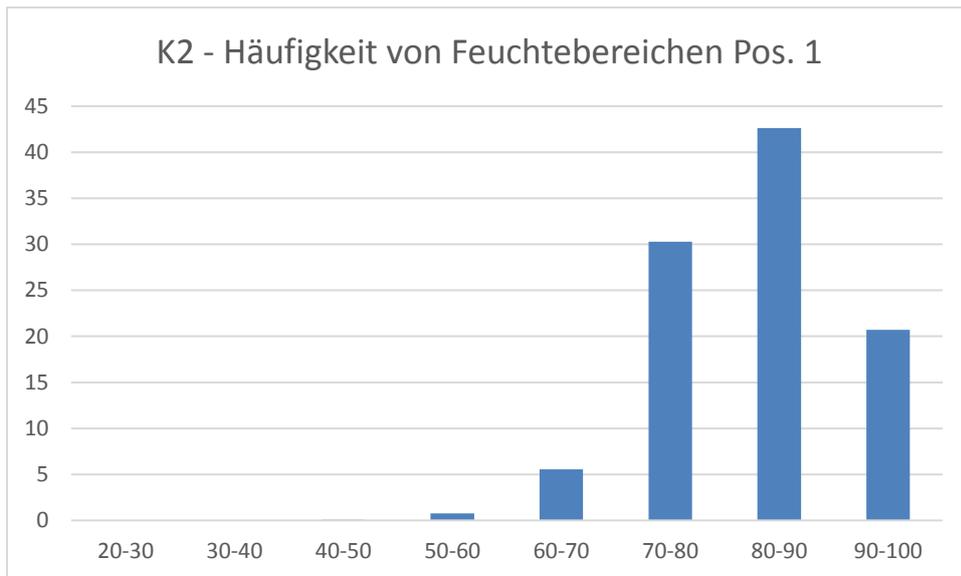


Bild 55: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) im gesamten Messzeitraum

An der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) von Fenster nIII wurden zu mehr als 60% der Messdauer eine relative Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80 % gemessen. Im Vergleich dazu waren die Werte auf der auf der Südseite an Fenster sIII deutlich geringer (vgl. Bilder 48, 49).

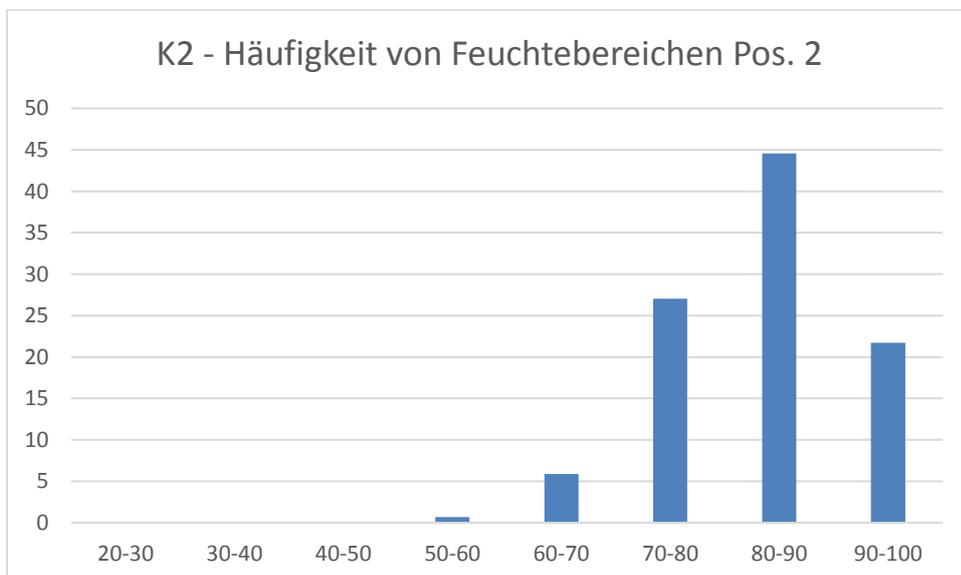


Bild 56: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.2) im gesamten Messzeitraum

Feuchtigkeitswerte zwischen 90-100 % r. F. werden zu mehr als 20 % der Gesamtmesszeit an der Innenseite der Originalverglasung gemessen. Die Maximalwerte lagen bei 94,4 %. Die Kondensation von Tauwasser wurde auf der Originalverglasung nicht beobachtet, allerdings ist Tauwasserbildung bei einem vor Ortbesuch im April auf der Innenseite der Schutzverglasung beobachtet worden. Unter Berücksichtigung der Feuchtwerte in den Monaten Januar bis März ist auch in diesen Monaten mit Tauwasserbildung auf der Schutzverglasung zu rechnen.



Bild 57: Tauwasserbildung auf der Innenseite der Schutzverglasung im April 2019, beim Ausbau der Messtechnik beobachtet.

An den mittelalterlichen Glasfeldern wurde zu diesem Zeitpunkt eine relative Luftfeuchtigkeit von ca. 95 % r. F. gemessen. Die Kondensation von Wasser auf den nach innen versetzten Originalen wurde jedoch weder auf der Innen- noch auf der Außenseite beobachtet. Allerdings ist die relative Luftfeuchtigkeit mit Werten über 90 % deutlich zu hoch für den langfristigen Erhalt der mittelalterlichen Gläser. Bedingt durch Schäden im Dachbereich weist die gesamte Kirche im Innenraum zu hohe Feuchtwerte auf. Hier sollte eine möglichst baldige Instandsetzung erfolgen. Vorerst muss in der Kirche eine regelmäßige Querlüftung mit vorhandenen Fensteröffnungen erfolgen, um die relative Luftfeuchtigkeit auf einem niedrigen Niveau zu stabilisieren.

Tabelle 7: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 04/18-04/19 am Fenster nIII in Koszewko

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
04/18	6,1	18,6	55,8	93,9	5,4	26,1	36,4	93,0	-	-	-	-	1,1	29,3	20,6	91,6	0,22
05	10,7	23,4	51,7	85,6	11,2	22,9	51,9	86,0	-	-	-	-	7,2	28,4	32,3	94,4	0,1
06	16,2	23,0	41,3	85,1	15,6	23,2	40,6	88,9	-	-	-	-	12,1	28,7	28,9	89,3	0,09
07	15,5	26,7	54,6	86,0	15,0	27,2	54,1	87,6	-	-	-	-	12,6	29,4	33,5	95,4	0,11
08	16,5	25,4	60,5	85,4	16,0	25,8	60,1	87,0	-	-	-	-	12,6	29,0	33,5	91,3	0,1
09	11,2	20,4	71,1	85,6	10,7	20,6	71,8	89,1	-	-	-	-	5,9	26,0	42,1	93,3	0,04
10	8,0	16,3	71,2	87,9	8,0	17,0	71,6	90,6	-	-	-	-	5,1	20,3	45,1	95,1	0
11	1,4	12,0	78,8	92,3	1,6	12,5	82,8	93,3	-	-	-	-	-1,9	14,0	68,6	96,7	0
12	1,7	7,4	84,4	93,6	2,1	8,0	84,5	93,6	-	-	-	-	-0,6	11,7	73,0	99,6	0
01/19	-0,5	6,1	80,3	95,5	-1,4	9,1	64,1	94,4	-	-	-	-	-5,8	6,4	61,3	91,0	0
02	0,9	8,1	78,6	95,5	0,4	13,7	56,8	93,5	-	-	-	-	-2,0	14,9	34,6	90,6	0,11
03	3,8	12,7	68,8	95,0	3,1	22,0	41,4	93,8	-	-	-	-	-06	23,9	34,7	90,2	0,19

4.4.2. Klimamessungen in der Pfarrkirche Auschwitz

Die Klimamessungen in der Pfarrkirche Auschwitz wurden im Zeitraum vom 27.6.2019– 30.06.2020 am Fenster nll durchgeführt. Das Fenster hat eine Höhe von ca. 2,33 m und eine Breite von 1,57 m. Der Abstand zwischen Original- und der neuen Außenschutzverglasung beträgt 7 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.

Die Klimadaten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden an den Pos. 1, 2 und 4 gemessen und die Messwerte monatlich per Modem 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. 4. Von besonderer Bedeutung für den Erhaltungszustand der Glasmalereien ist die Dauer von Extremwerten bei Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit an der Originalverglasung.

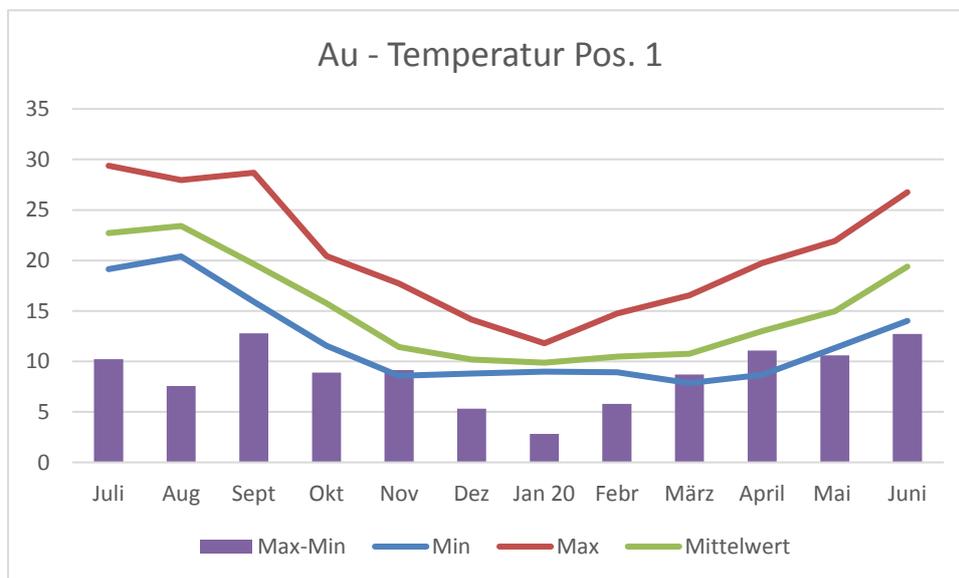


Bild 58: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Fenster nll betrug im Juli 29,4°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei 7,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat September 12,8 K.

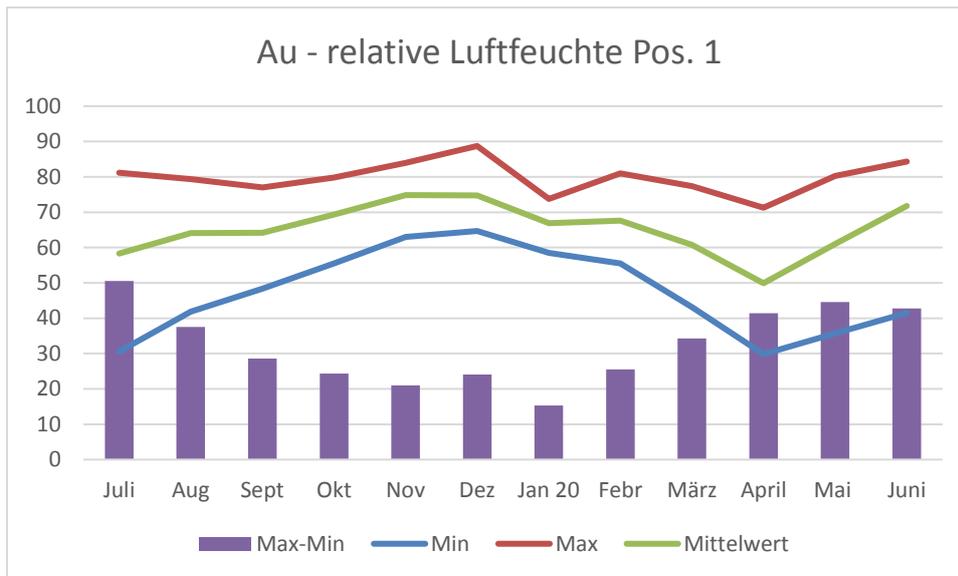


Bild 59: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Fenster nll betrug im Dezember 90 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 30,6 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juli mit Δ r. F. = 50,0 % festgestellt.

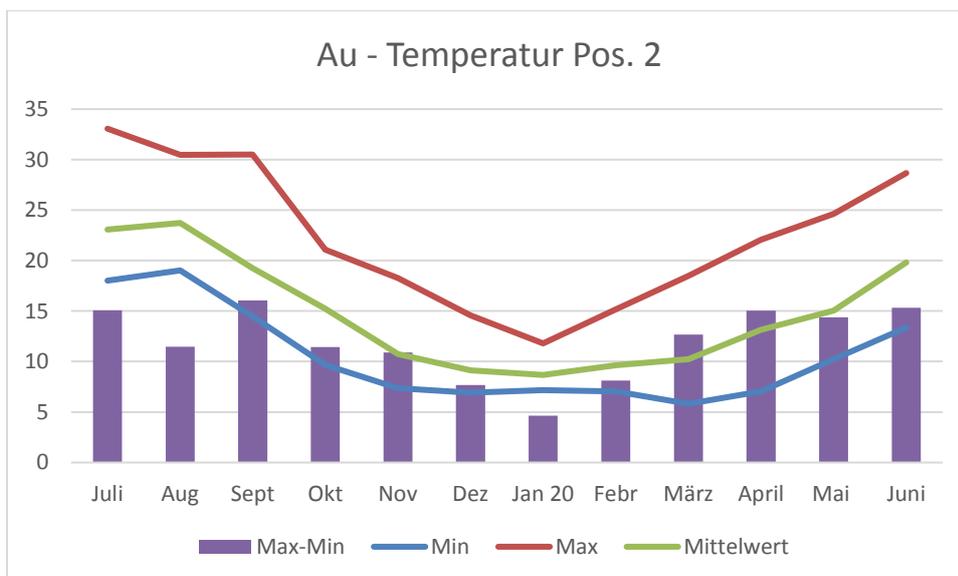


Bild 60: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Fenster nll betrug im Juli 33,1°C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei 6,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Juni bei 15,3 K. Aus dem Verlauf des Mittelwertes wird deutlich, dass hohe Temperaturen und niedrige Temperaturen etwa gleich häufig auftreten (Tag-Nachtzyklus).

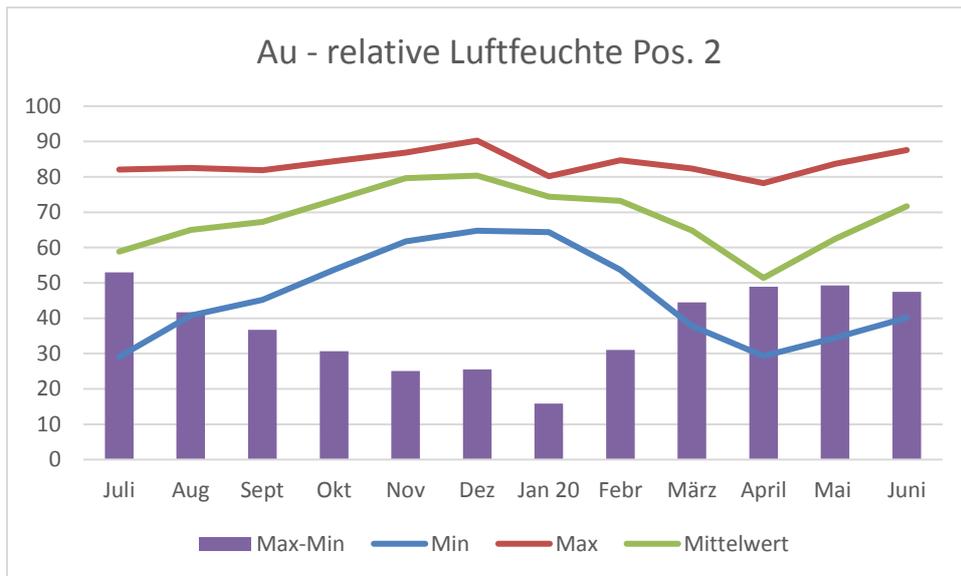


Bild 61: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Fenster nII betrug im Dezember 90,3 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im April bei 29,3 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde im Juli mit Δ r. F. = 53 % festgestellt.

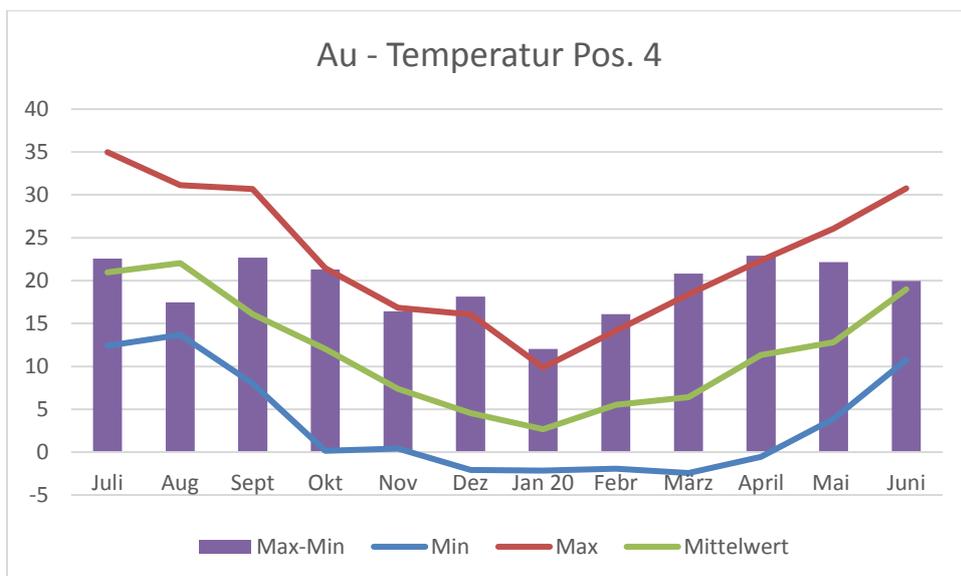


Bild 62: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Außenschutzverglasung am Fenster nII betrug im Juli 35°C. Die minimalen Temperaturen lagen im Dezember bis März an derselben Messstelle bei -2,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat April bei 23 K.

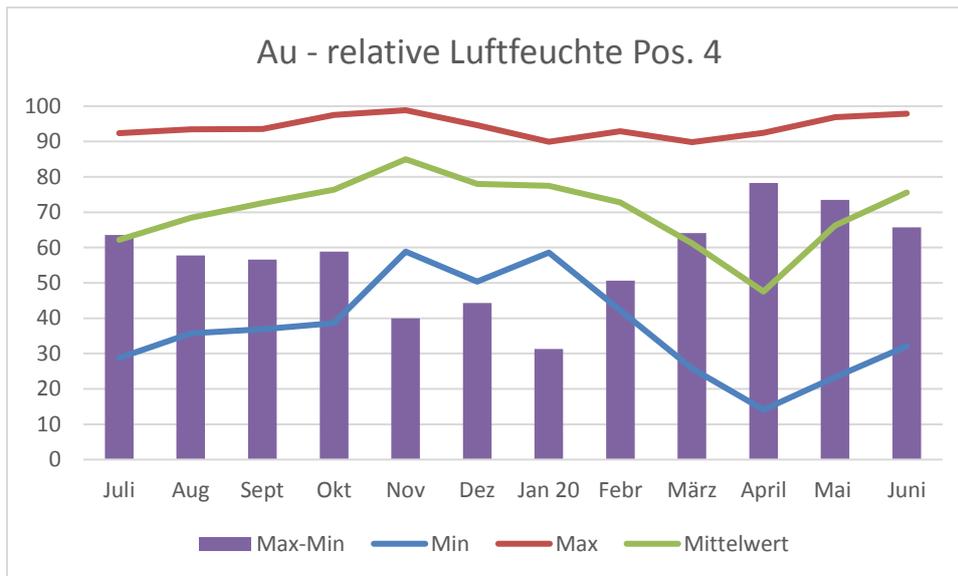


Bild 63: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Außenschutzverglasung (Pos. 4)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen im Messzeitraum deutlich über 90 %. Der Maximalwert betrug im Februar 98,9 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im April bei 14,1 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurde ebenfalls im April mit Δ r. F. = 78,3 % festgestellt. Die Mittelwertskurve zeigt, dass höhere Feuchtigkeitswerte häufiger auftreten.

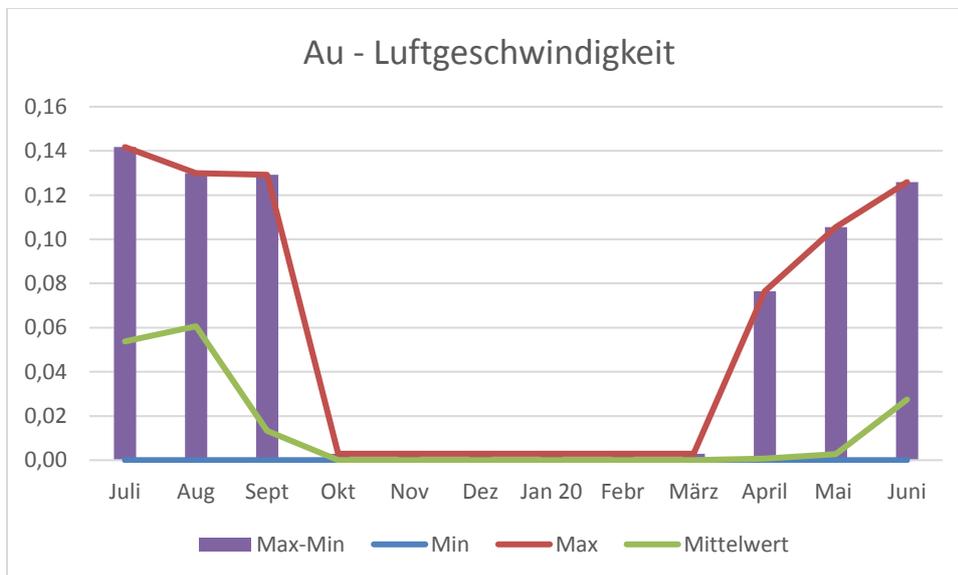


Bild 64: Luftgeschwindigkeitsextrema und -schwankungen im Spalt zwischen Original- und der Außenschutzverglasung

Die Maximalwerte der Luftgeschwindigkeit werden in den Sommermonaten erreicht und liegen im Juli bei 0,14m/s. In den Monaten Oktober bis März wurde aufgrund der geringen Temperaturen im Spalt auch keine Luftzirkulation gemessen.

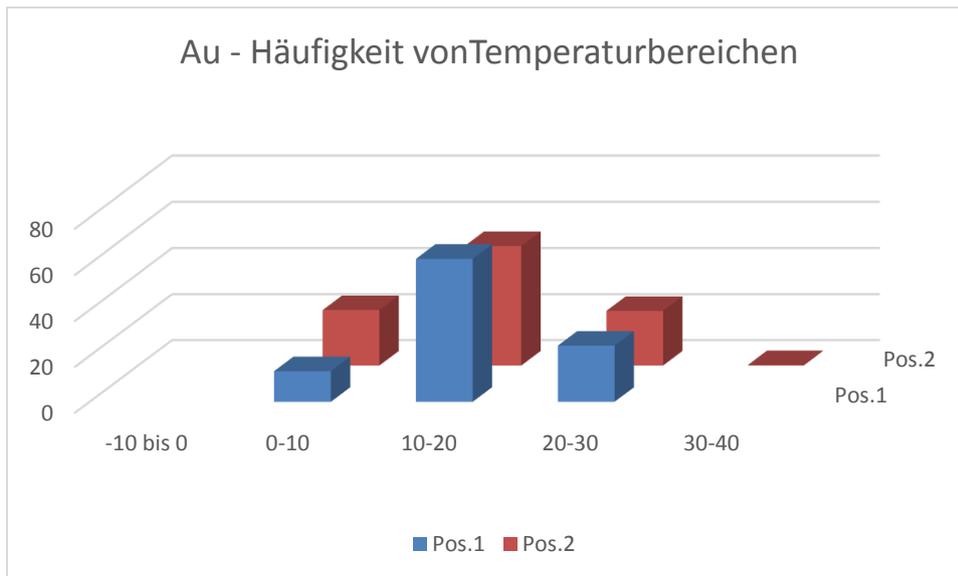


Bild 65: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen an der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die häufigsten Temperaturen an der Innenseite der Originalverglasung lagen im Messzeitraum im Bereich zwischen 10-20°C. In den Wintermonaten wurden Werte zwischen 0 bis 10°C gemessen. Die höchsten Temperaturen an Pos. 1 lagen im Bereich zwischen 20 und 30°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.

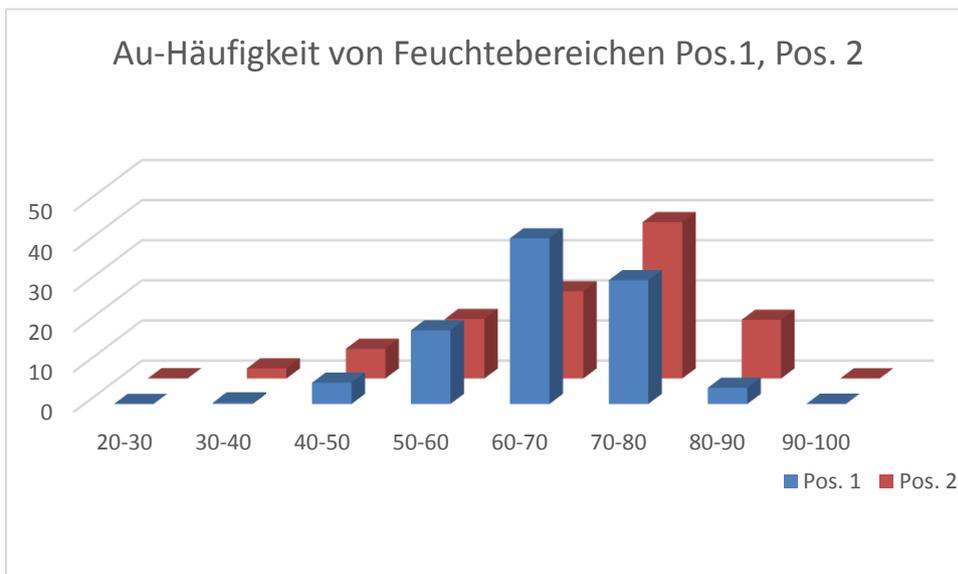


Bild 66: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit der Originalverglasung (Pos. 1, Pos. 2) in % der gesamten Messdauer

Die relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) liegt zu etwa 2/5 der Messzeit in einem Bereich zwischen 60-70 %. Auf der Außenseite wurden fast 40 % der Messzeit Werte über 70-80 % r. F. registriert und lediglich zu 14 % der Messzeit Werte gemessen, die 80 % r. F. überschreiten. Kondensation von Tauwasser infolge von Taupunktunterschreitung wurde weder gemessen noch berechnet. Auch treten geringe relative Luftfeuchten von unter 40% nur im einstelligen Prozentbereich auf. Die Klimawerte machen deutlich, dass die Gläser in Auschwitz wesentlich besseren Bedingungen ausgesetzt sind als die in Koszewko.

Tabelle 8: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 07/19-06/20 am Fenster nll in Auschwitz

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
07/19	19,2	29,4	30,6	81,1	18,0	33,1	29,1	82,1	-	-	-	-	12,4	35,0	28,8	92,4	0,14
08	20,4	30,0	41,9	79,4	19,0	30,5	40,8	82,5	-	-	-	-	13,7	31,1	35,7	93,5	0,13
09	15,9	28,7	48,4	77,0	14,5	30,5	45,2	81,9	-	-	-	-	8,0	30,7	36,9	93,5	0,13
10	11,5	20,4	55,5	79,8	9,7	21,1	53,7	84,4	-	-	-	-	0,1	16,8	38,6	97,5	0,13
11	8,6	17,7	63,0	84,0	7,4	18,3	61,8	86,8	-	-	-	-	0,4	21,4	58,9	98,9	0
12	8,8	14,1	64,7	88,7	6,9	14,6	64,8	90,3	-	-	-	-	-2,1	16,0	50,4	94,6	0
01/20	9,0	11,8	58,5	73,8	7,2	11,8	64,4	80,2	-	-	-	-	-2,2	9,8	58,6	89,9	0
02	8,9	14,7	55,5	81,0	7,0	15,2	53,7	84,7	-	-	-	-	-1,9	14,2	42,2	92,8	0
03	7,8	16,6	43,1	77,4	5,8	18,5	37,8	82,3	-	-	-	-	-2,4	18,4	25,8	89,8	0
04	8,7	19,7	29,8	71,3	7,0	22,1	29,3	78,2	-	-	-	-	-0,6	22,3	14,1	92,4	0
05	11,3	21,9	35,7	80,2	10,2	24,6	34,5	83,7	-	-	-	-	12,7	28,7	23,4	96,8	0,11
06	14,0	26,8	41,5	84,3	13,4	28,7	40,2	87,6	-	-	-	-	16,4	32,7	32,2	97,9	0,13

4.4.3 Klimamessungen in der Liebfrauenkirche Liegnitz

4.4.3.1 Nordseite L2, Fenster nX, ALMEMO-Messsystem

Am Fenster nX erfolgten Klimamessungen mit Hilfe der ALMEMO-Messtechnik und des Custos Aeris-Messsystems über dem Zeitraum von einem Jahr. Die Ergebnisse beider Messungen werden im Folgenden dargestellt. Während die mit der ALMEMO-Messtechnik registrierten Messwerte aus Gründen der Vergleichbarkeit mit den Daten aus vorhergehenden Vorhaben in gleicher Art und Weise ausgewertet wurden, erfolgte die Auswertung der Messwerte des Custos Aeris-Messsystems mit Hilfe der in dieser Web-anwendung hinterlegten Algorithmen. 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 9 zusammengestellt. Die Auswertung der ALMEMO-Klimamessungen erfolgte anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen.

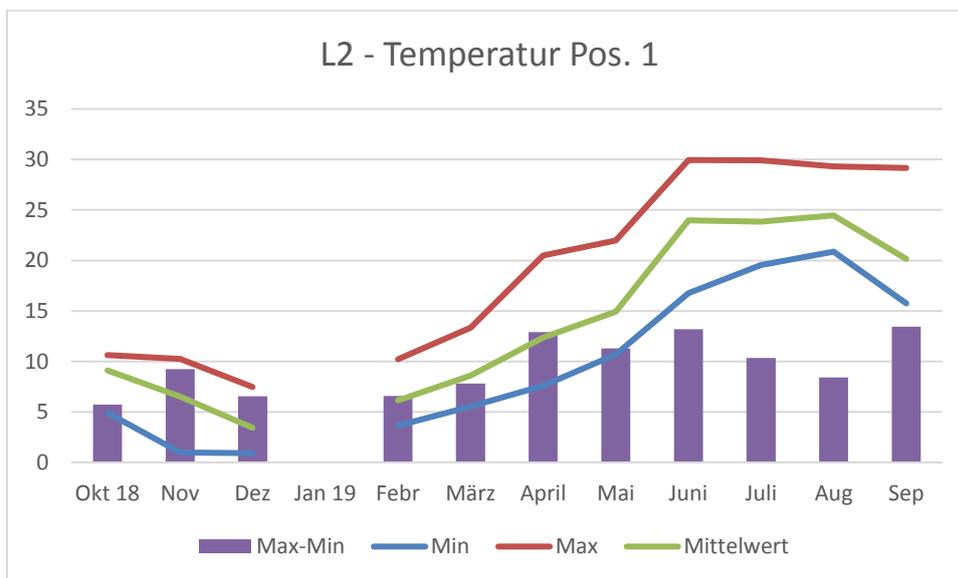


Bild 67: Temperaturextrema sowie -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nX9b betrug im Juni 29,9°C, die minimale Temperatur lag im Februar an derselben Messstelle bei 3,6°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat September 13,4 K. Im Zeitraum von 13.12.2019 bis zum 21.02.2020 kam es an dieser Messstelle zu einem Ausfall des Datenloggers, der erst bei einem Vorort-Besuch behoben werden konnte.

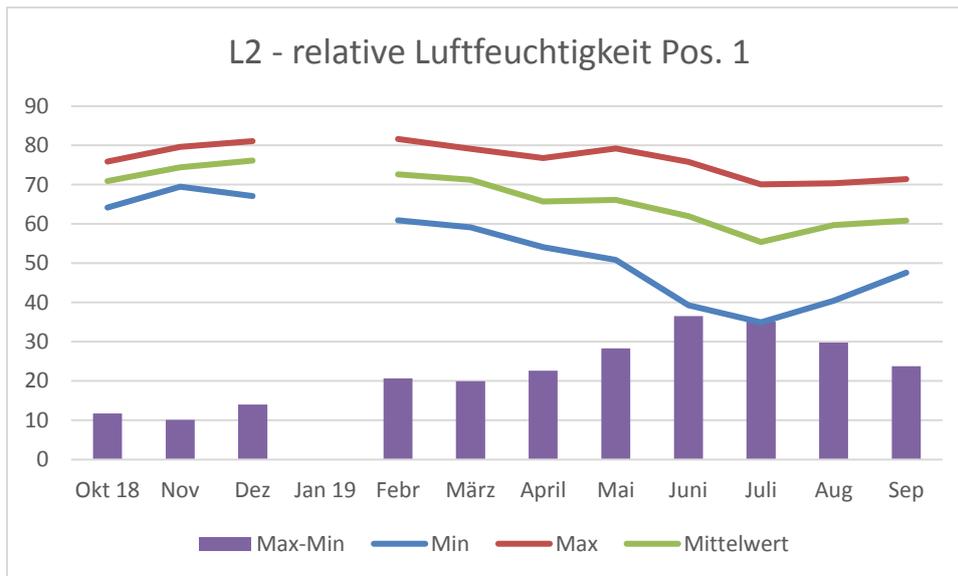


Bild 68: Feuchtigkeitsextrema sowie -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die Maximalwerte der rel. Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten Dezember und Februar oberhalb von 80 % r. F. Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld nX9b betrug im Februar 81,1 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im Juli bei 35,0 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juni mit Δ r. F. = 36,6 % festgestellt.

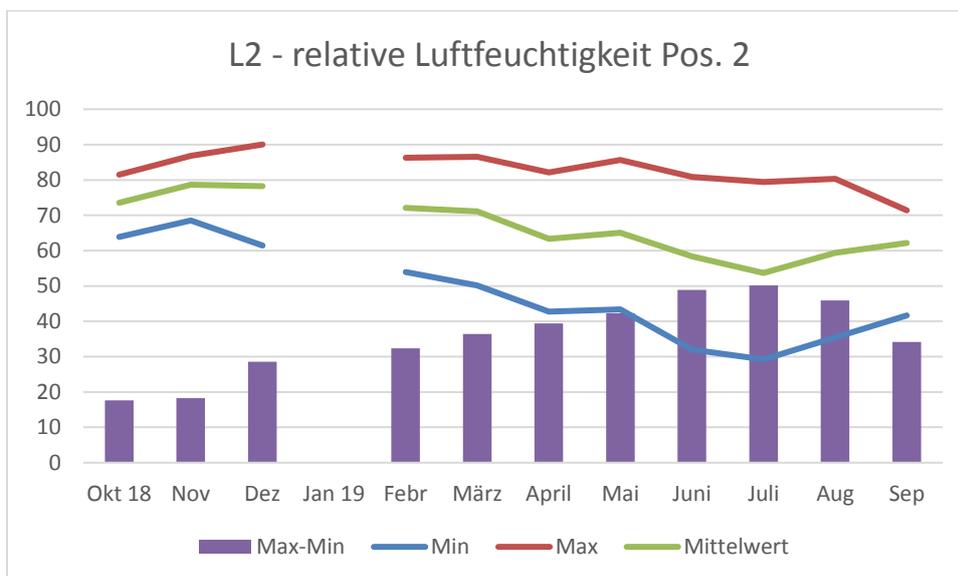


Bild 69: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos.2)

Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nX9b betrug im Dezember 90,0 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im Juli bei 29,1 % r. F. die maximale Schwankungsbreite wurde ebenfalls im Juli mit Δ r. F. = 50,2 % berechnet.

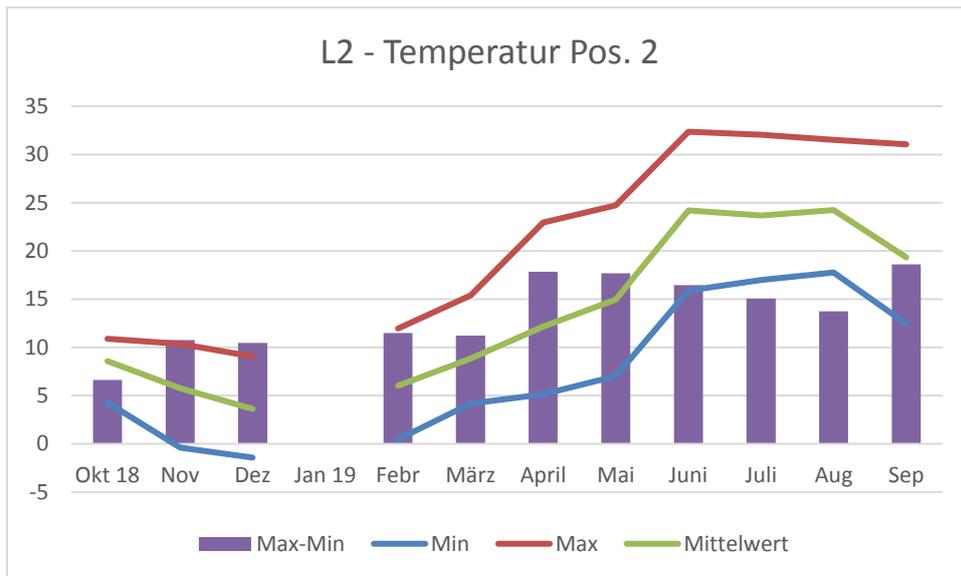


Bild 70: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos.2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nX9b betrug im Juni 32,4°C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei -1,4°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat September bei 18,6K.

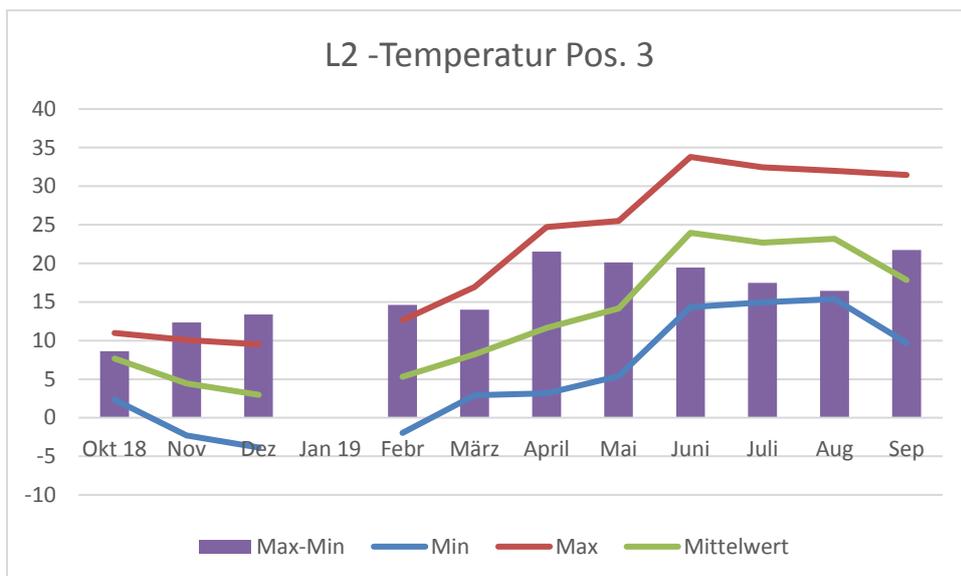


Bild 71: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld nX9b betrug im Juni 33,8°C. Die minimale Temperatur lag im Dezember an derselben Messstelle bei -3,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat September bei 21,7 K.

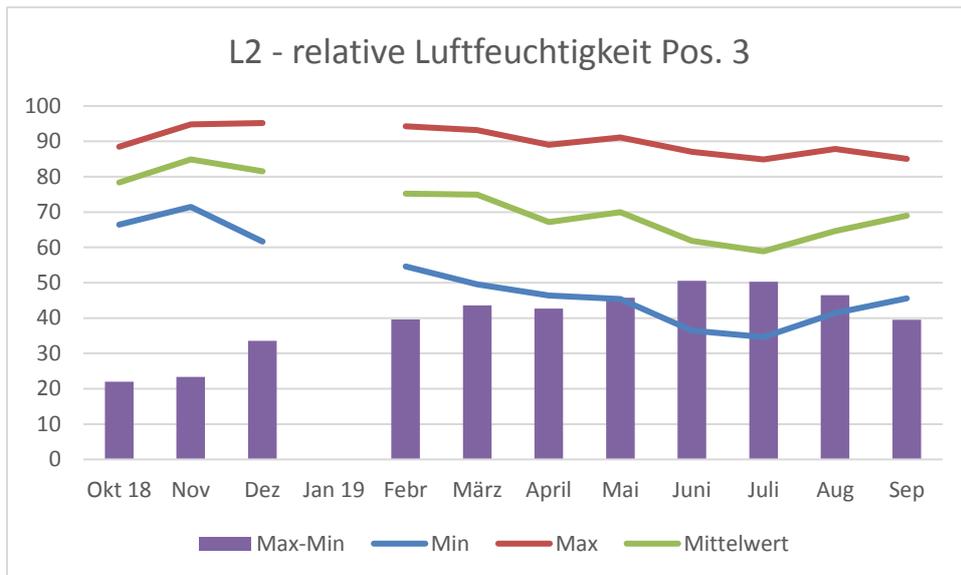


Bild 72: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos.2)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in den Monaten November bis März deutlich über 90 % r. F. Die maximale relative Luftfeuchtigkeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld nX9b betrug im Dezember 95,2 % r. F. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im Juli bei 34,6 % an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Juni mit Δ r. F. = 50,5 % festgestellt.

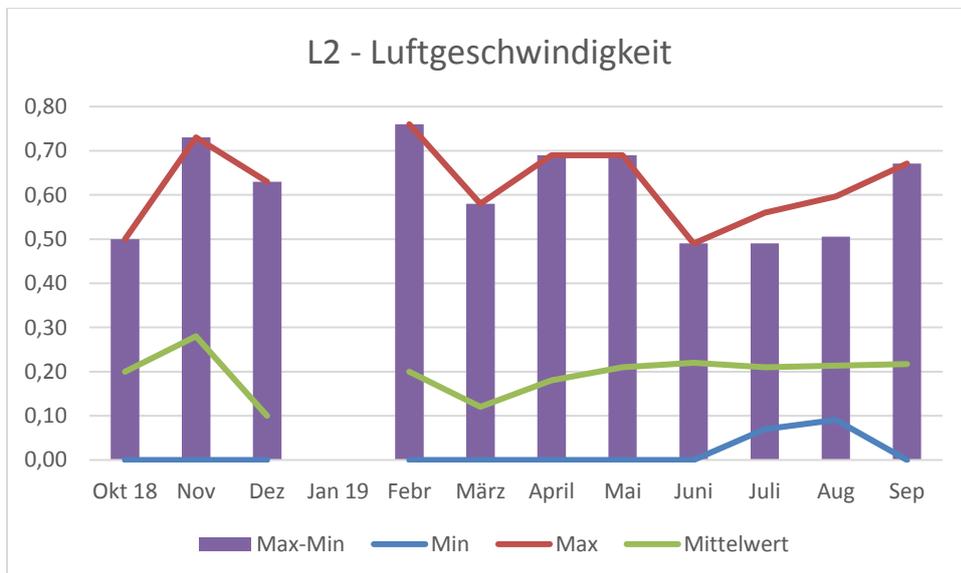


Bild 73: Extremwerte und Mittelwert der Luftgeschwindigkeit [m/s] im Spalt zwischen Original- und Außenschutzverglasung im Fenster nX

Die maximal gemessene Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Feld nX9b und nX8b betrug im Februar 0,76 m/s und liegt damit deutlich über den Maximalwerten der Südseite. Die minimale Luftgeschwindigkeit beträgt mit Ausnahme der Monate Juli und August 0 m/s. Aus dem Verlauf des

Mittelwertes wird deutlich, dass geringere Luftgeschwindigkeiten an diesem Fenster überwiegen und dass die Luftströmung auch in den Wintermonaten nicht wie sonst üblich völlig zum Erliegen kommt. Oberhalb des Glasmalereifeldes nX9b liegt ein Lüftungsfenster. 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.

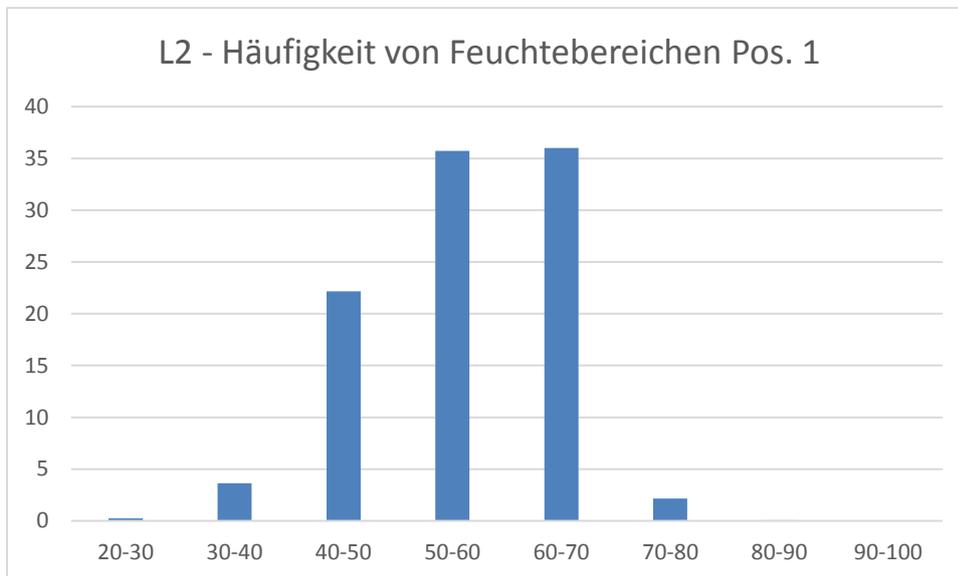


Bild 74: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) im gesamten Messzeitraum

An der Innenseite der Originalverglasung (Pos. 1) von Feld nX9b wurden zu weniger als 1 % der Messdauer eine relative Luftfeuchtigkeit oberhalb von 80 % gemessen. Unterhalb von 40 % r. F. waren es knapp 4 % der Messdauer

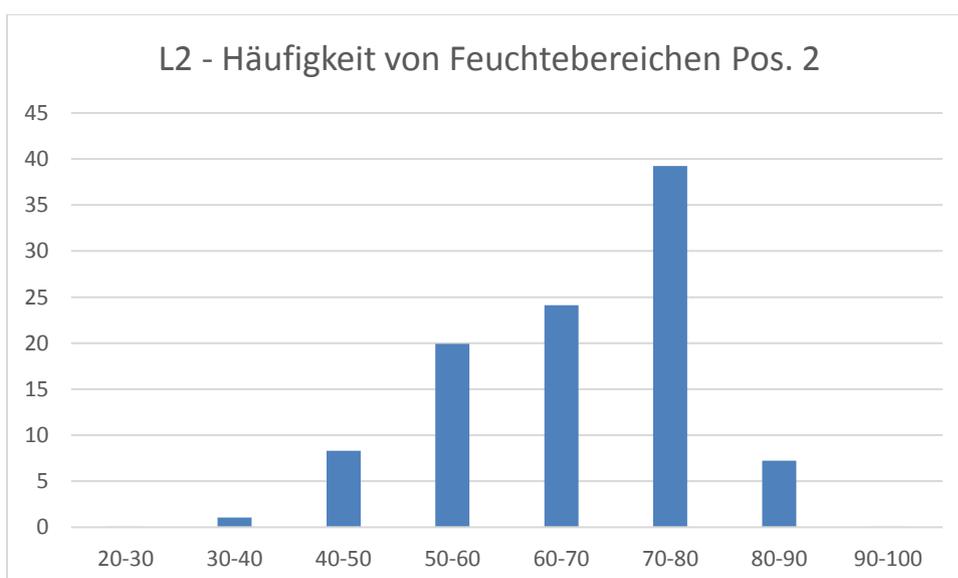


Bild 75: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos.2) im gesamten Messzeitraum

Feuchtigkeitswerte zwischen 90-100 % r.F. werden nur zu 0,04 % der Gesamtmesszeit an der Außenseite der Originalverglasung gemessen. Die Maximalwerte lagen bei 90,1%. Werte oberhalb von 80% r. F. wurden zu etwa 7 % der Messzeit festgestellt und Fechtebereiche unterhalb von 40 % r. F. zu 1,1 %. Zu mehr als 80% der Messzeit sind die Glasmalereien moderaten Bedingungen zwischen 40 und 80 % relativer Luftfeuchte ausgesetzt.

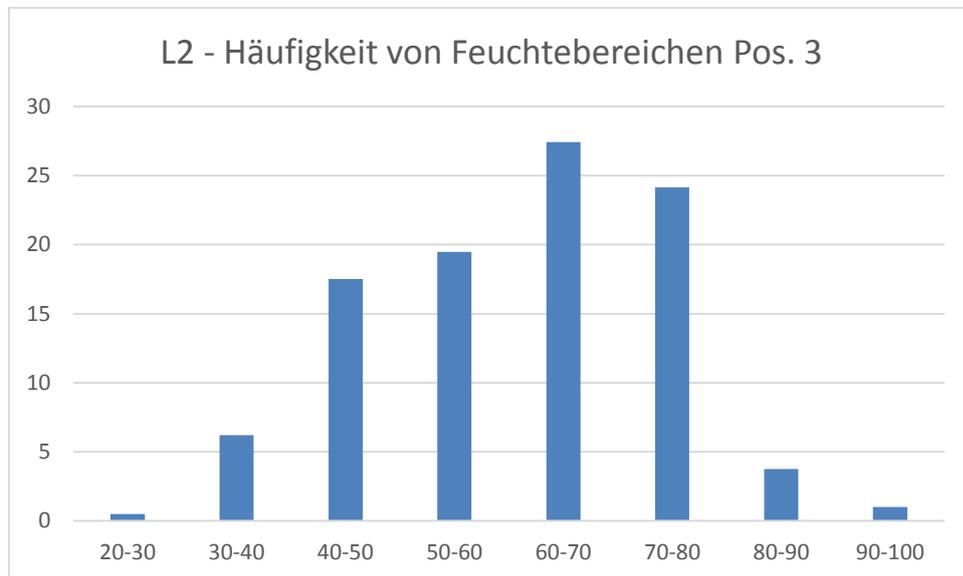


Bild 76: Häufigkeitsverteilung von Feuchtebereichen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.2) im gesamten Messzeitraum

Werte der relativen Feuchtigkeit werden zwischen 90-100 % r. F. zu etwa 1 % der Gesamtmesszeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung gemessen. Die Maximalwerte lagen bei 91,1 %. Werte oberhalb von 80% r. F. wurden zu etwa 4,8 % der Messzeit festgestellt und Fechtebereiche unterhalb von 40 % r. F. zu 6,5 %. Zu mehr als 87% der Messzeit werden auch hier moderate Bedingungen zwischen 40 und 80 % relativer Luftfeuchte gemessen.

Tabelle 9: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 10/18-09/19 am Fenster nX in Liegnitz (L2)

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
10/18	4,9	10,6	64,2	75,9	4,3	10,9	63,8	81,5	2,3	11,0	66,5	88,5	-	-	-	-	0,5
11	1,0	10,2	69,5	79,6	-0,4	10,4	68,5	86,3	-2,3	10,1	71,5	94,8	-	-	-	-	0,73
12	0,9	7,5	67,1	81,1	-1,4	9,0	61,4	90,0	-3,9	9,5	61,3	95,2	-	-	-	-	0,63
01/19				Ausfall Datenlogger bis 13.12.2018 - 21.02.2019													
02	3,6	10,2	61,0	81,6	0,5	12,0	54,0	86,3	-2,0	12,6	54,6	94,2	-	-	-	-	0,76
03	5,6	13,4	59,1	79,1	4,2	16,9	50,2	86,6	2,9	16,9	49,5	93,2	-	-	-	-	0,58
04	7,6	20,5	54,1	76,8	5,1	23,0	42,7	82,1	3,2	24,7	46,4	89,0	-	-	-	-	0,69
05	10,7	22,0	50,9	79,2	7,0	25,5	43,3	85,6	5,4	25,5	45,4	91,1	-	-	-	-	0,69
06	16,8	29,9	39,3	75,8	15,9	32,4	32,0	80,8	14,3	33,8	36,5	87,0	-	-	-	-	0,49
07	19,6	29,9	35,0	70,1	17,0	32,5	29,1	79,4	15,0	32,5	34,6	84,9	-	-	-	-	0,56
08	20,9	29,3	40,6	70,4	17,8	31,5	35,4	80,4	15,5	31,9	41,4	87,9	-	-	-	-	0,6
09	15,7	29,2	47,6	71,4	12,4	31,0	41,7	75,9	9,7	31,4	45,5	85,0	-	-	-	-	0,67

4.4.3.2 Nordseite Fenster nX, Custos Aeris Messsystem

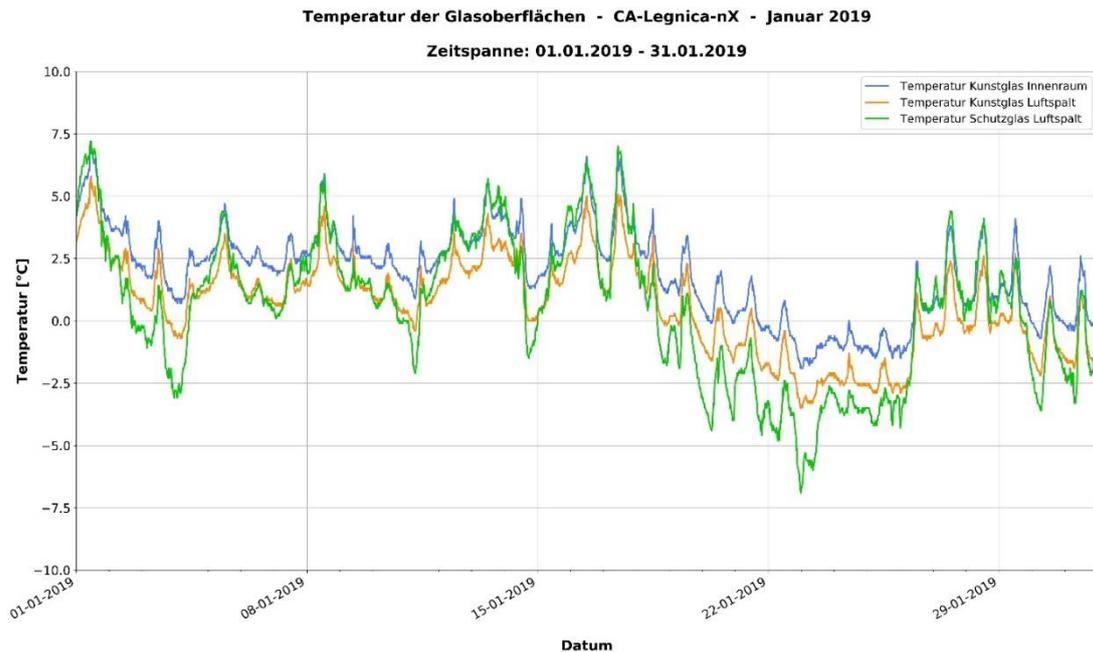


Bild 77: Custos Aeris, Temperatur der Glasoberflächen

Die Temperatur der Glasoberfläche wird berührungslos alle 15 min gemessen und für die unterschiedlichen Pos. 1, 2, 3 verschiedenfarbig dargestellt

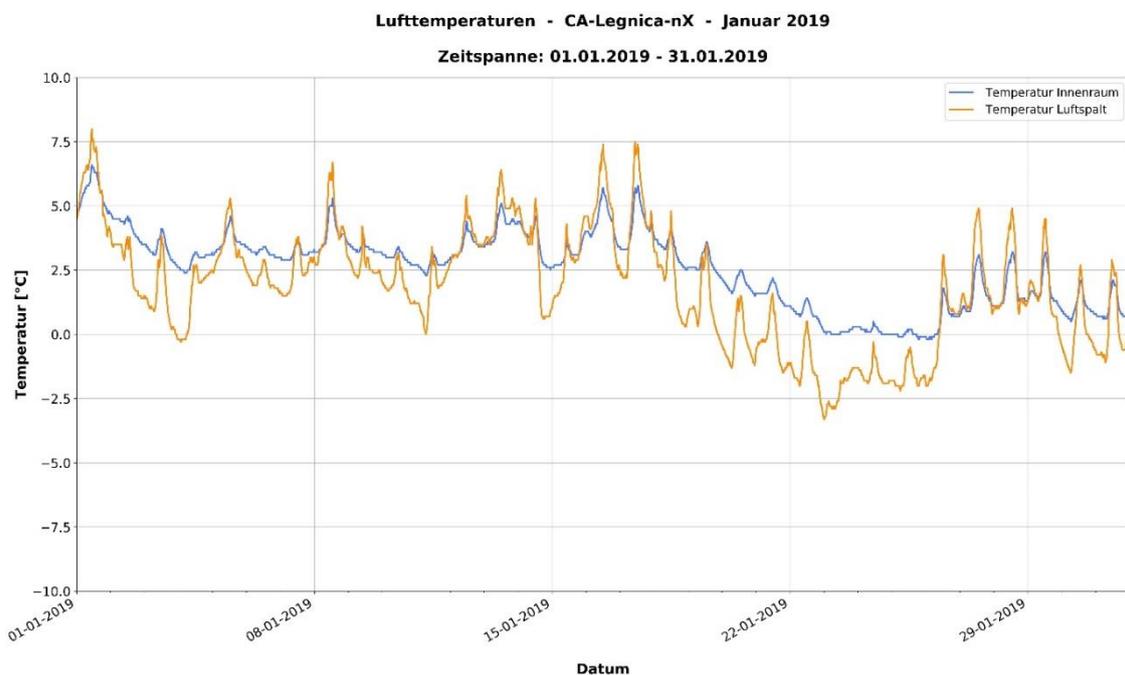


Bild 78: Custos Aeris, Lufttemperatur im Kirchenraum und im Spalt zwischen Original und Aussenschutzverglasung

Die Lufttemperatur ist eine der wichtigsten Größen zur Berechnung des Taupunkts. Sie wird in einem Diagramm verschiedenfarbig für den Luftspalt zwischen Original und Außenschutzverglasung sowie für den Kircheninnenraum angezeigt.

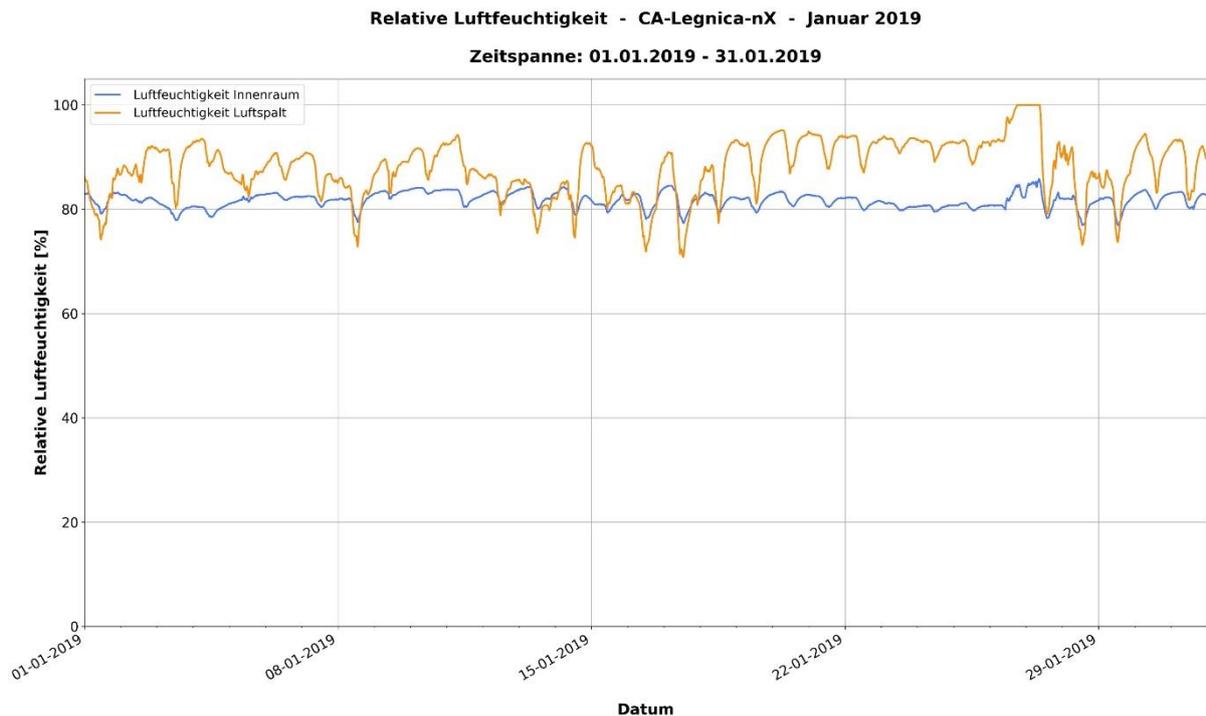


Bild 79: Custos Aeris, relative Luftfeuchtigkeit im Kirchenraum und im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit dient ebenfalls zur Berechnung des Taupunkts und ist im Diagramm für den Kirchenraum und den Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung dargestellt.

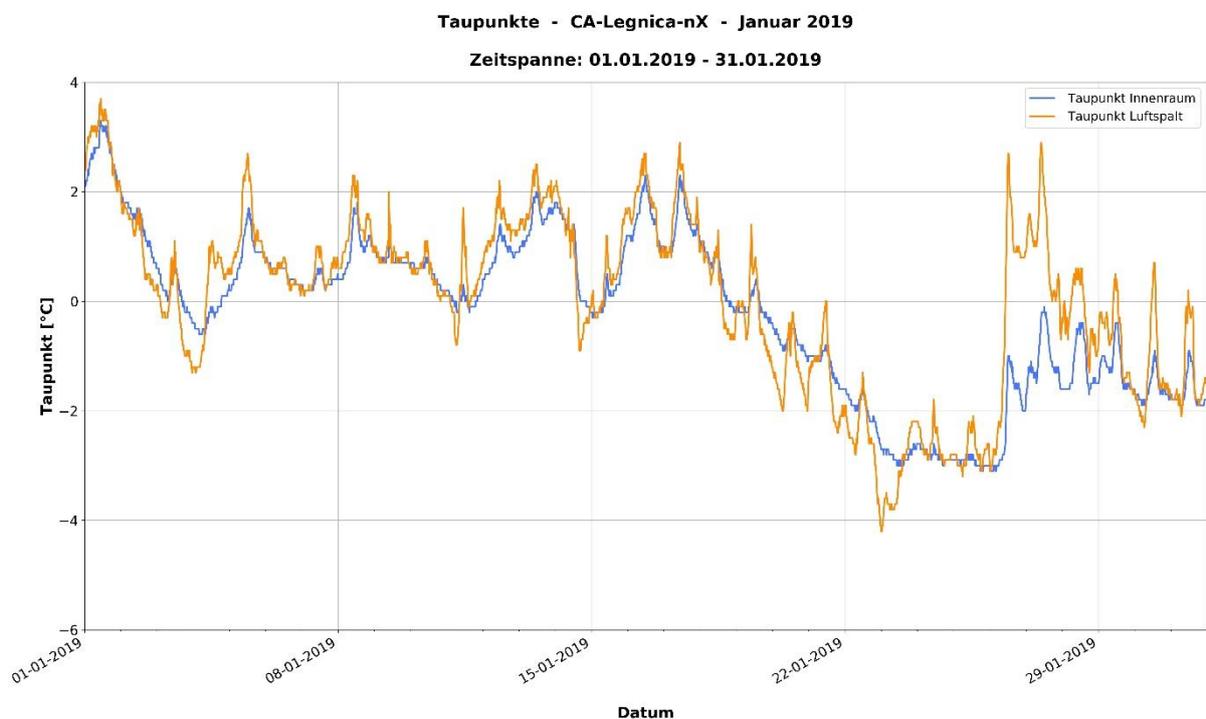


Bild 80: Custos Aeris, Taupunkte im Kirchenraum und im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die Taupunkte werden aus den Lufttemperaturen und den relativen Luftfeuchten für Luftspalt und dem Inneren der Kirche berechnet.

Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-nX - Januar 2019

Zeitspanne: 01.01.2019 - 31.01.2019

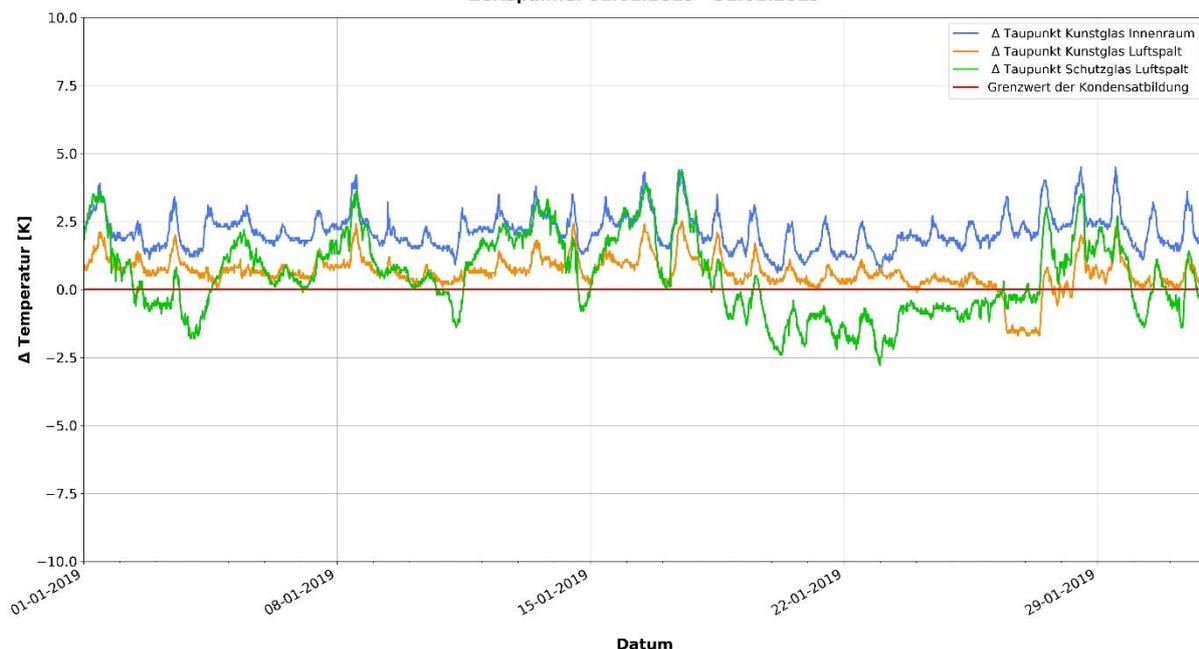


Bild 81: Custos Aeris Taupunktüberwachung für die Glasoberflächen an Pos. 1, 2 und 3

Unterschreitet die Temperatur der Glasoberfläche den Taupunkt der Luft, so fällt Kondensat aus. Dies wird im Diagramm durch Unterschreiten der Null-Linie dargestellt.

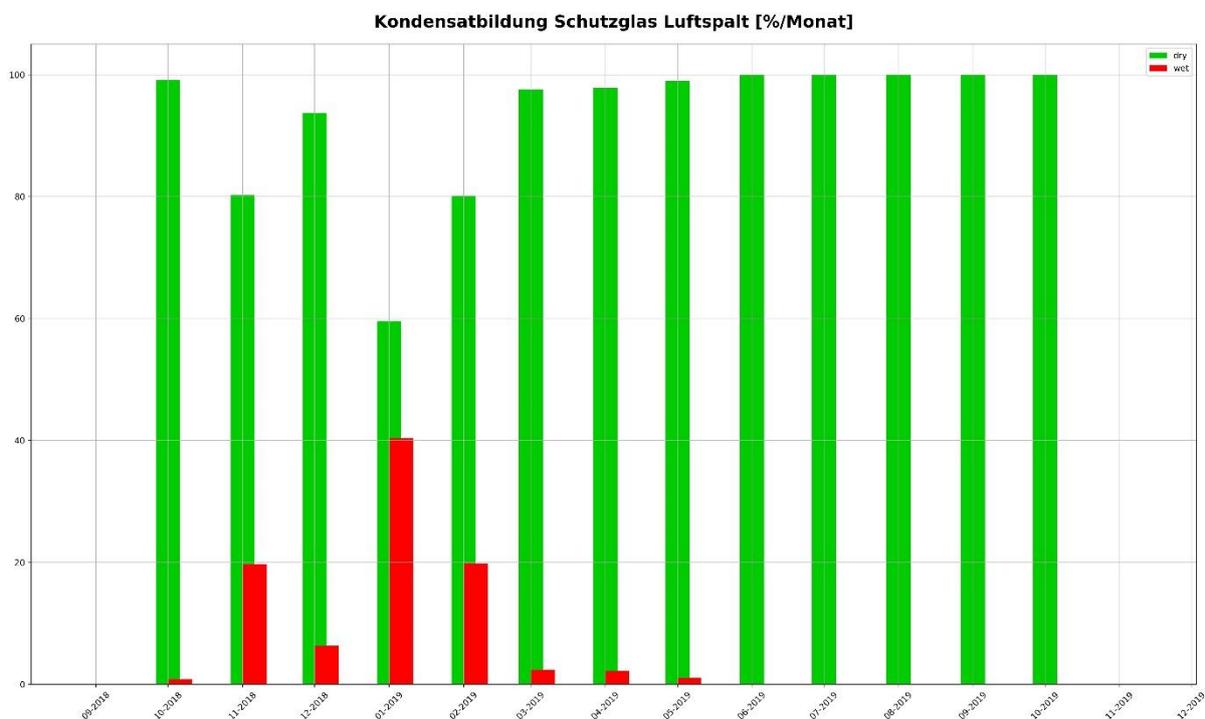


Bild 82: Custos Aeris, Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 3

Die Häufigkeit von Taupunktunterschreitungen an der Innenseite der Schutzverglasung in % der Messzeit wird durch die roten Balken im Diagramm dargestellt.

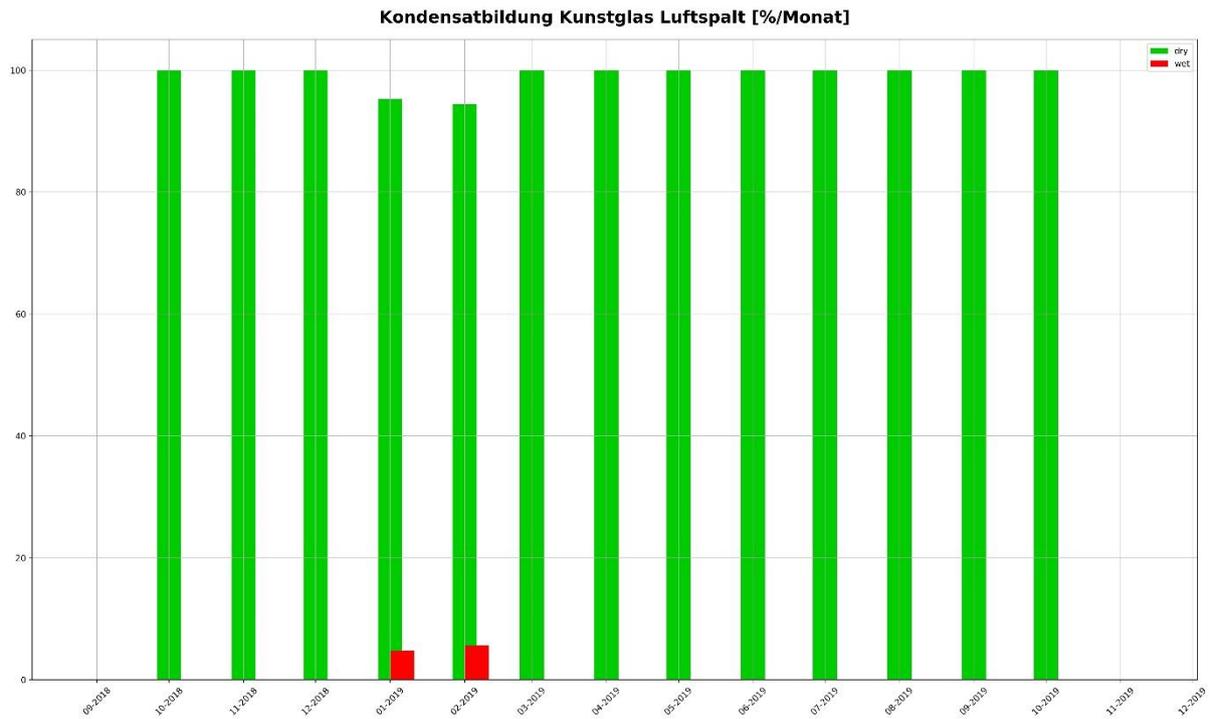


Bild 83: Custos Aeris, Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 2

Die Häufigkeit von Taupunktunterschreitungen an der Außenseite der Originalverglasung in % der Messzeit wird durch die roten Balken im Diagramm dargestellt.

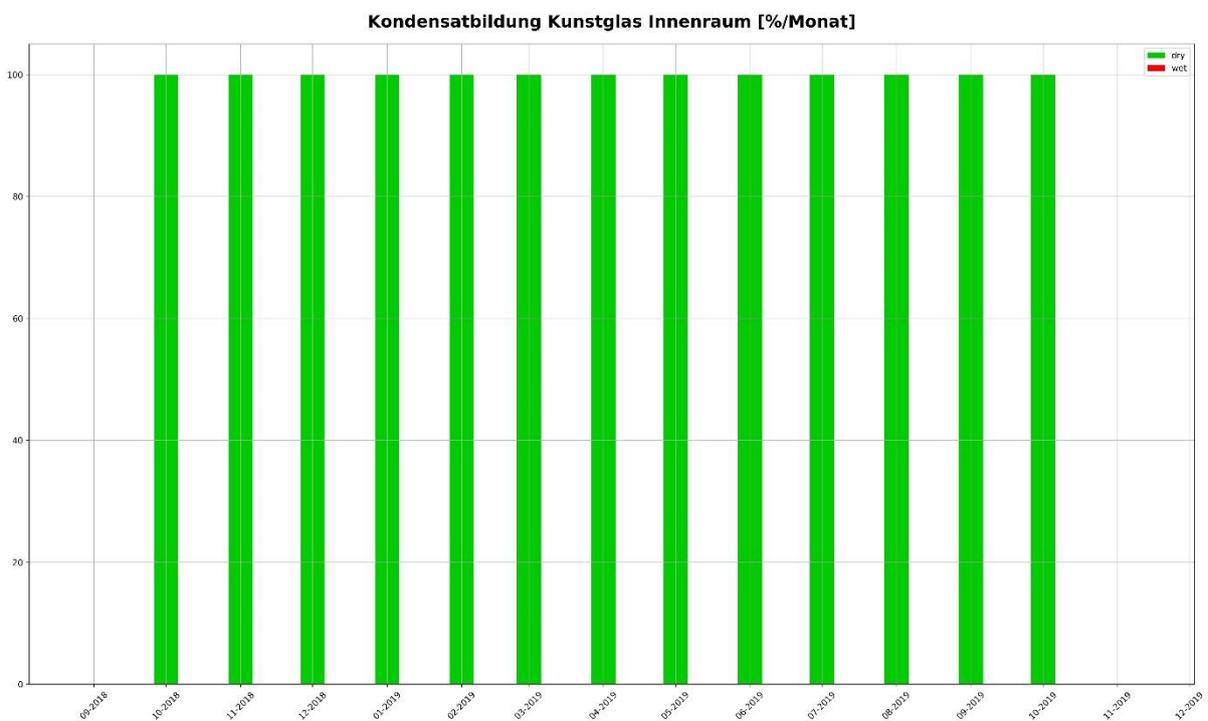


Bild 84: Custos Aeris, Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 1

Im Jahresverlauf wurden keine Taupunktunterschreitungen auf der Innenseite der Originalverglasung festgestellt (grüne Balken).

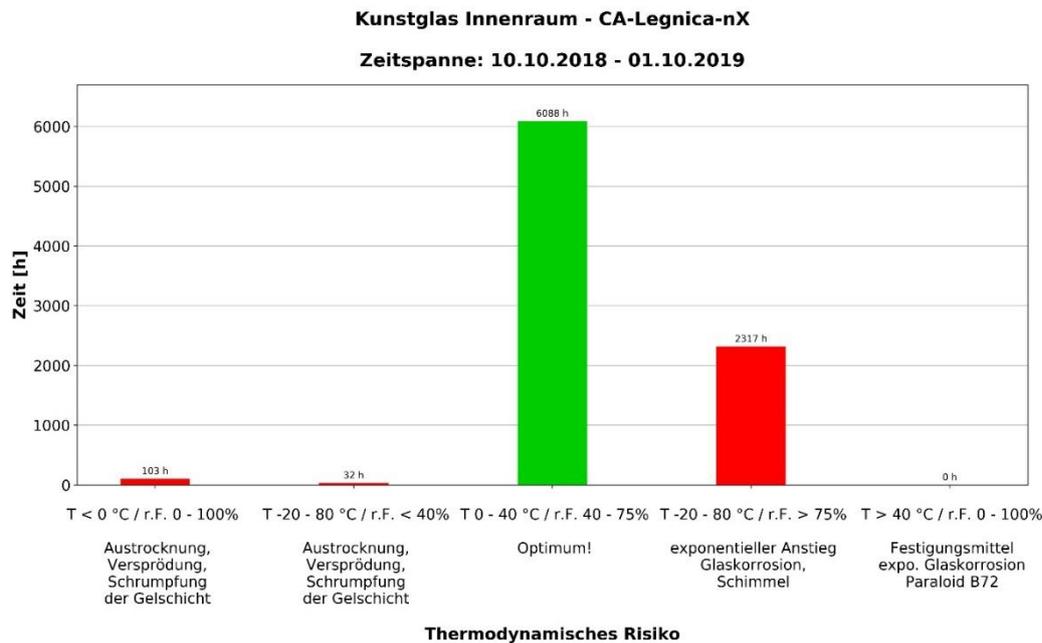


Bild 85: Bewertung des Schädigungsrisikos der Klimabedingungen innerhalb bestimmter Temperatur- und Feuchtebereiche an Pos. 1.

Das Optimum für einen langfristigen Erhalt von Glasmalereien liegt demnach in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 40°C und einem Feuchtebereich zwischen 40 und 75% r. F. Werte außerhalb dieser Cluster können in Abhängigkeit von der Glaszusammensetzung zu Schäden an Gläsern oder Malschichten bzw. auch Restaurierungsmitteln führen.

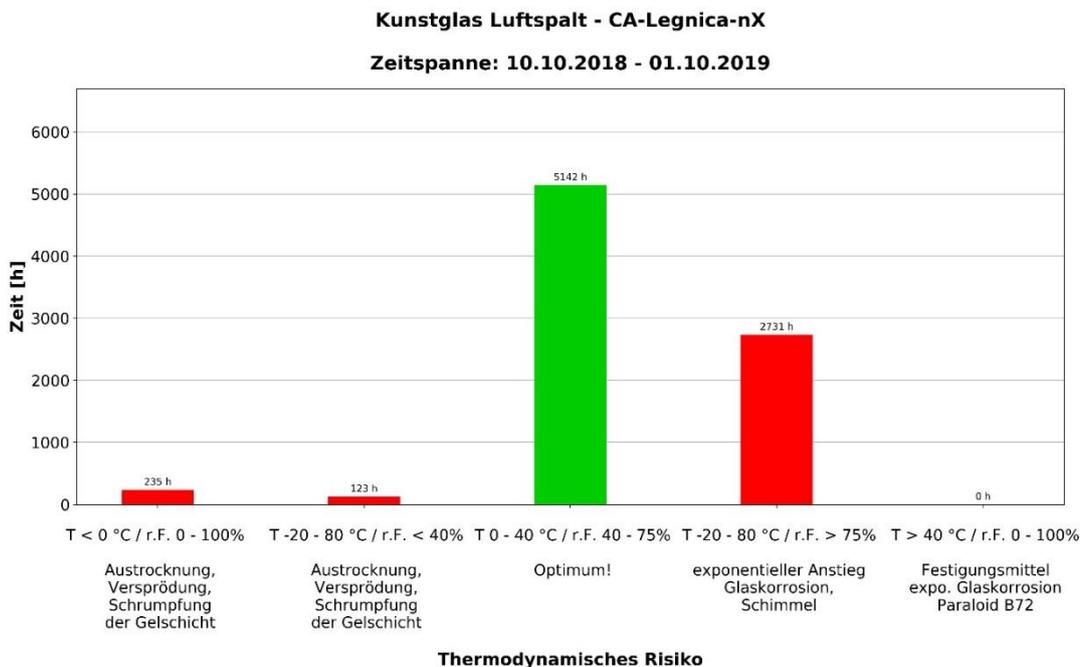


Bild 86: Bewertung des Schädigungsrisikos der Klimabedingungen innerhalb bestimmter Temperatur- und Feuchtebereiche an Pos. 2.

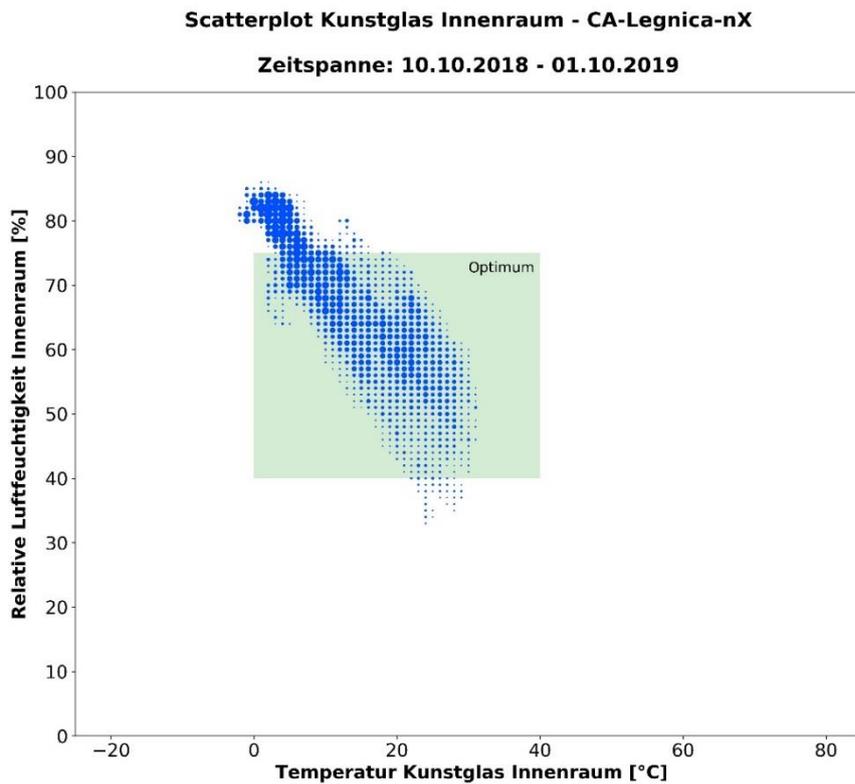


Bild 87: Scatterplot aus Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte zur Bewertung optimaler Klimabedingungen an Pos. 1

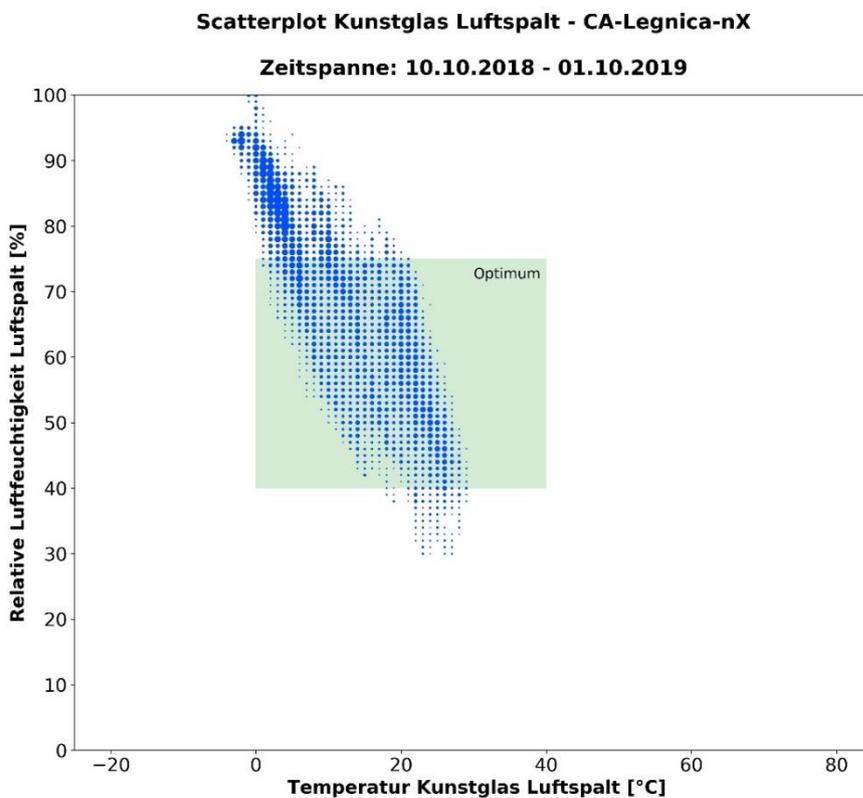


Bild 88: Scatterplot aus Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte zur Bewertung optimaler Klimabedingungen an Pos. 2

4.4.3.3 Südseite Fenster sIX, ALMEMO-Messsystem

Die Klimamessungen in der Liebfrauenkirche Liegnitz am Fenster sIX erfolgten nach dem Einbau der Schutzverglasungen im Zeitraum vom 01.10.2019 – 30.09.2020. Das vierbahnige Fenster hat eine Höhe von ca. 6,44 m und eine Breite von 2,37 m. Der Abstand zwischen Original- und der Außenschutzverglasung beträgt 5-6 cm. Am unteren Fenstersims befindet sich eine Lufteintrittsöffnung von ca. 2-3 cm über die gesamte Breite des Glasmalereifensers. Die Luftaustrittsöffnung am oberen Feld hat eine Breite von ca. 1-2 cm. Die Außenschutzverglasung besteht aus Verbundsicherheitsglas. Der Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung wird von innen belüftet. Die Messung der Luftgeschwindigkeit erfolgte in der Spaltmitte zwischen den Feldern 3a und 4a. Die Klimadaten (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) wurden an den Pos. 1 - Pos. 3 ebenfalls in einer Höhe zwischen den Feldern 3a und 4a 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 10 zusammengestellt. Die Auswertung der Klimamessungen erfolgt anhand gemessener und berechneter Kennwerte mit Hilfe der nachfolgenden grafischen Darstellungen. 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 89 bis 97.

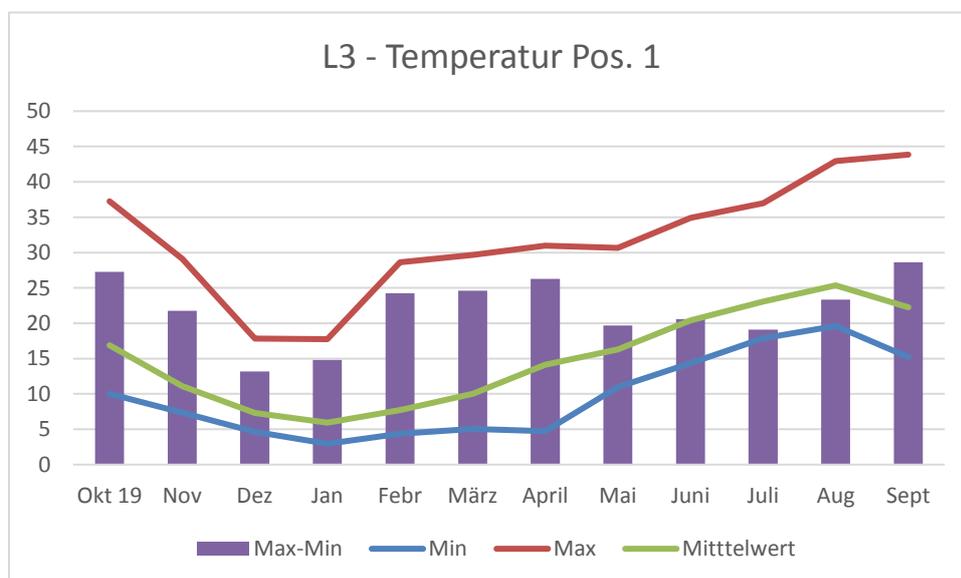


Bild 89: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sIX3a betrug im Juni 43,8°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei 5,9°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat September 28,6K.

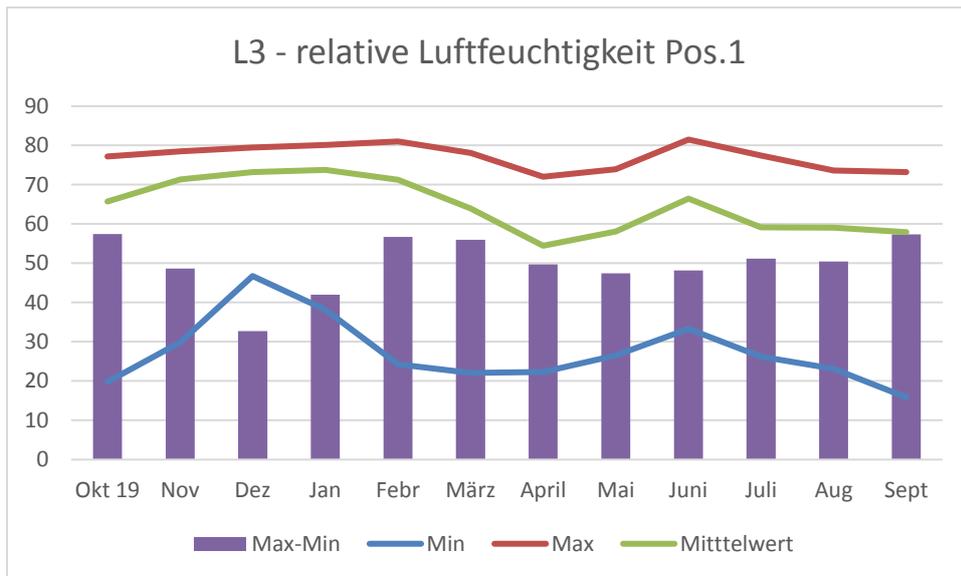


Bild 90: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Originalverglasung (Pos.1)

Die maximale Feuchtigkeit an der Innenseite der Originalverglasung am Feld sIX 3a betrug im Juni 81,5 % r. F. Die minimale Feuchtigkeit lag im März bei 22,1 % r. F. an derselben Messstelle. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Oktober mit Δ r. F. = 57,4 % registriert.

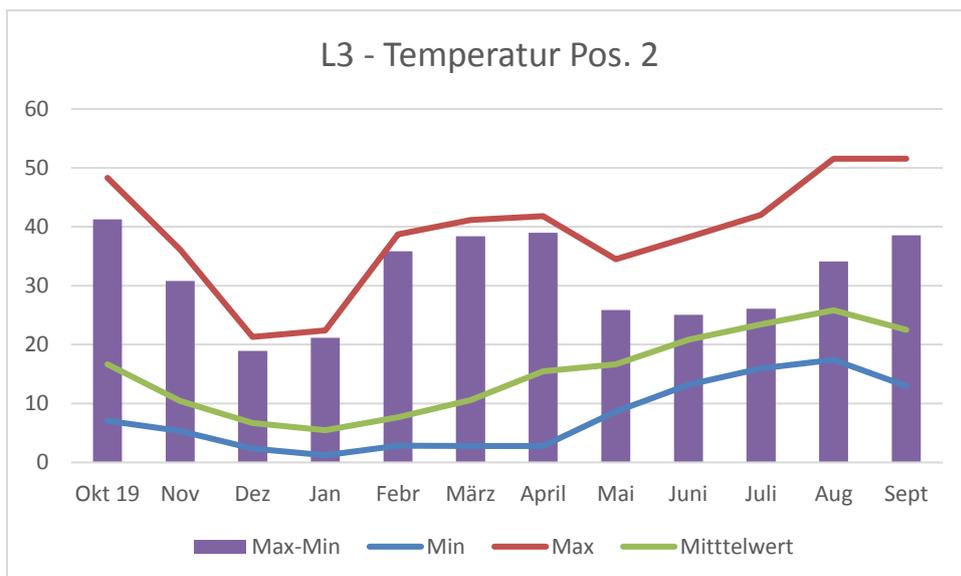


Bild 91: Temperaturextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die maximale Temperatur an der Außenseite der Originalverglasung am Feld sIX 3a betrug im September 51,6°C. Die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei 1,2°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich lag im Monat Oktober bei 41,3 K.

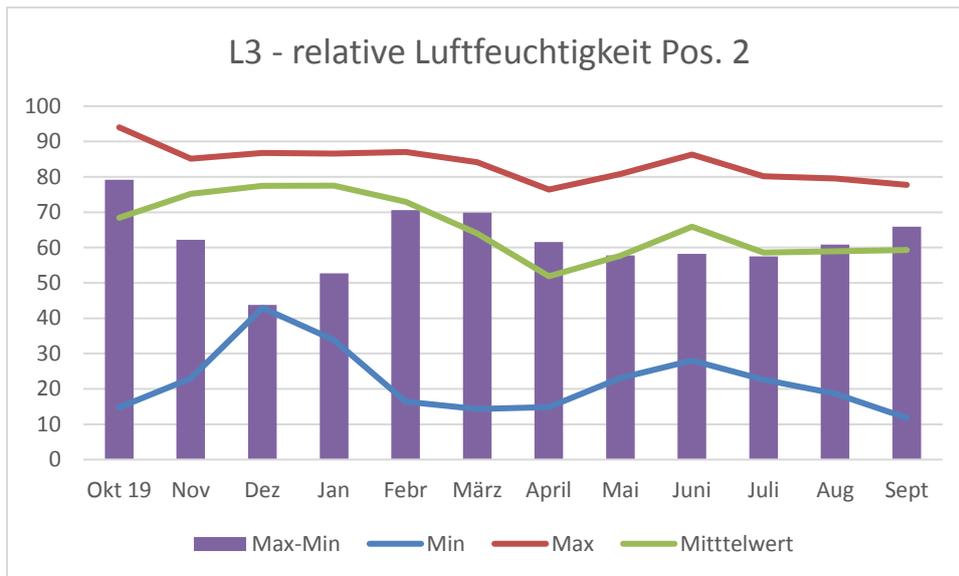


Bild 92: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Außenseite der Originalverglasung (Pos. 2)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen im Monat Oktober am Feld sIX 3a bei 94,0 %. Die minimale relative Luftfeuchtigkeit lag im März bei 14,3 % an derselben Messstelle. Die maximale Feuchteschwankung betrug im Oktober mit $\Delta r. F. = 79,2 \%$.

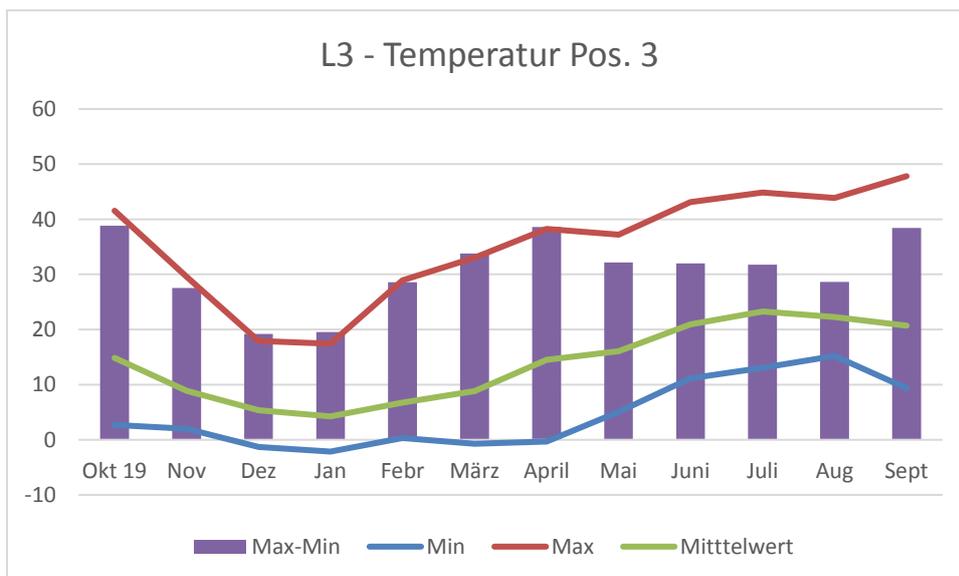


Bild 93: Temperaturextrema und -schwankungen an der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die maximale gemessene Temperatur an der Innenseite der Außenschutzverglasung am Feld sIX 3a betrug im September 47,8°C, die minimale Temperatur lag im Januar an derselben Messstelle bei -2,1°C. Der maximale Temperaturschwankungsbereich betrug im Monat April 38,8 K.

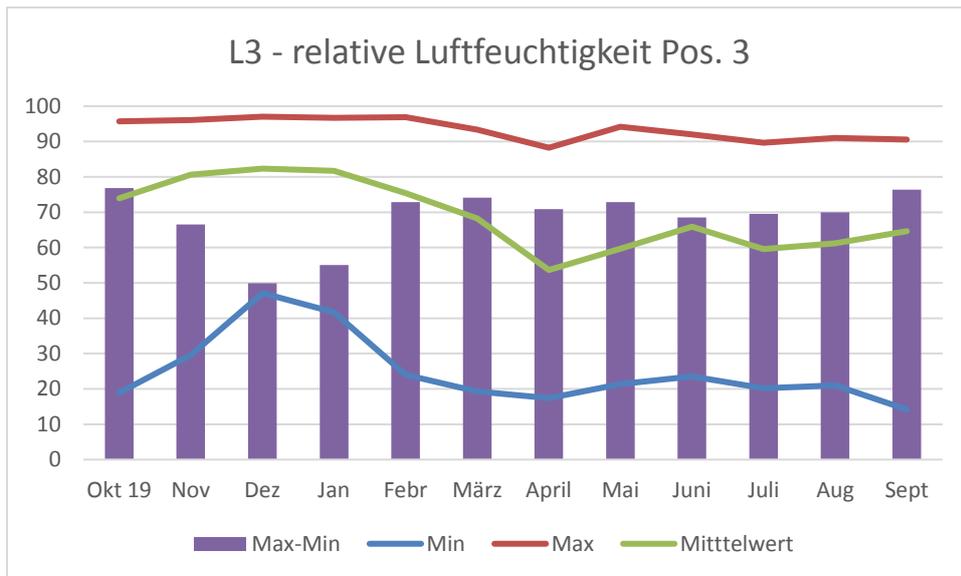


Bild 94: Feuchtigkeitsextrema und -schwankungen an der Innenseite Außenschutzverglasung (Pos.3)

Die Maximalwerte der relativen Luftfeuchtigkeit lagen in allen Monaten außer im April bei 90 % bzw. deutlich oberhalb davon. Die maximale Feuchtigkeit betrug im Februar 96,8 % r. F. Die maximalen Feuchteschwankungen wurden im Oktober mit Δ r. F. = 76,8 % festgesellt.

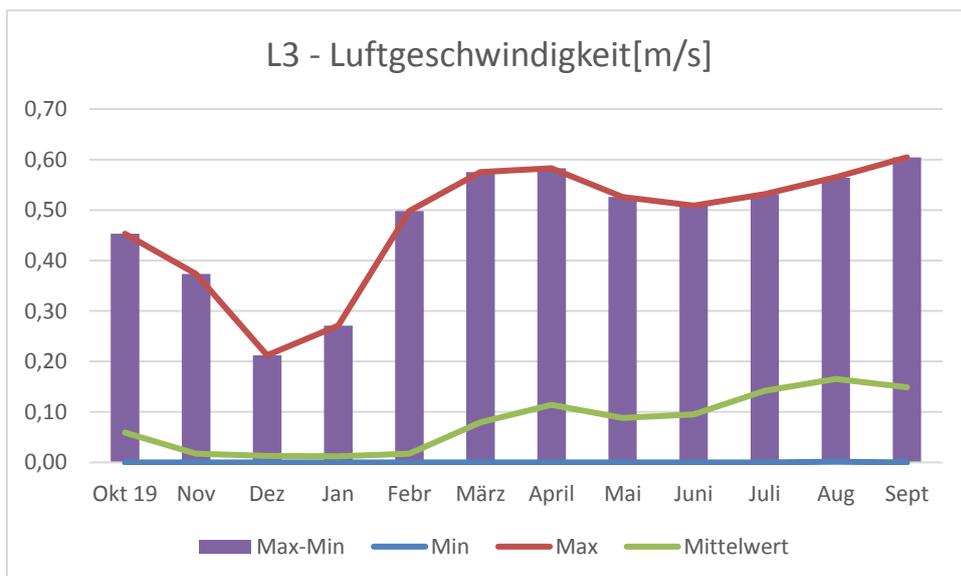


Bild 95: Luftgeschwindigkeit (Min/Max) im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die maximale Luftgeschwindigkeit im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung am Fenster sIX betrug im September 0,6 m/s. Die minimale Luftgeschwindigkeit liegt in allen Monaten bei 0 m/s. Die Mittelwertskurve deutet an, dass geringe Luftgeschwindigkeiten häufiger sind als hohe.

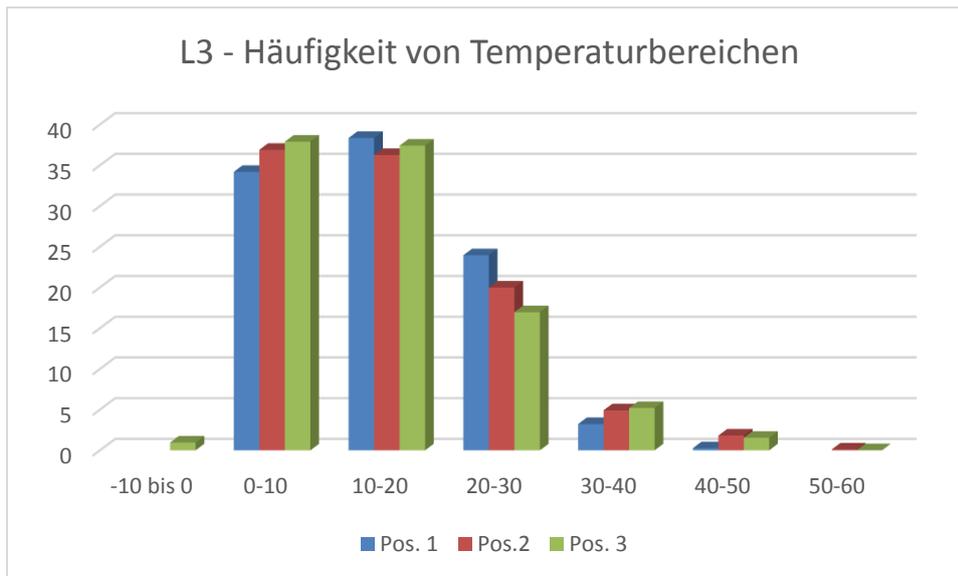


Bild 96: Häufigkeitsverteilung von Temperaturbereichen am Fenster sIX (Pos. 1, Pos. 2, Pos. 3) in % der gesamten Messdauer

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 1 % der Messzeit wurden auch Temperaturen unterhalb von 0°C an der Innenseite der Aussenschutzverglasung (Pos. 3) gemessen. Zu etwa 5 % der Messzeit lagen die Temperaturen auch oberhalb von 30°C.

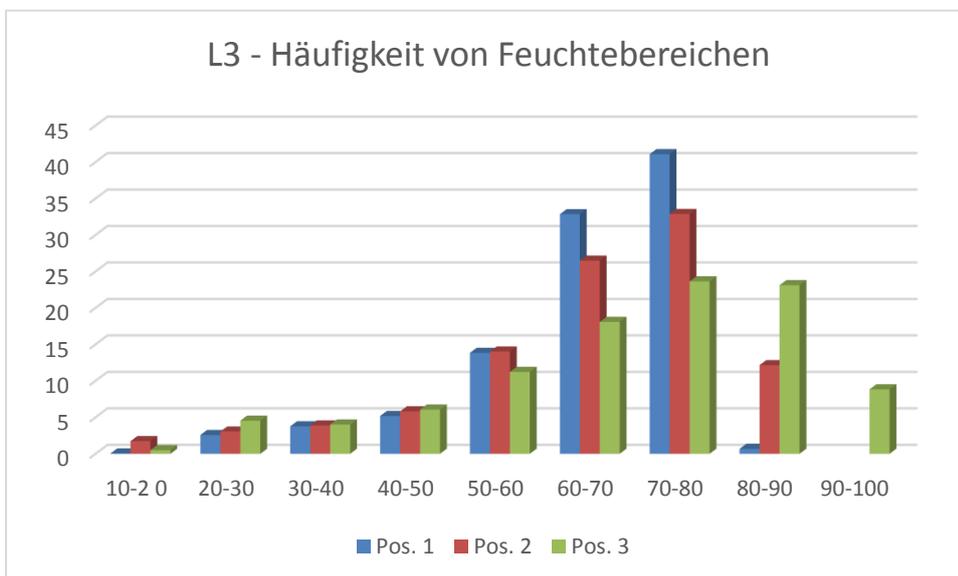


Bild 97: Häufigkeitsverteilung von Bereichen der relativen Luftfeuchtigkeit am Fenster sIX (Pos1, Pos. 2, Pos. 3) in % der gesamten Messdauer

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 zu weniger als einem Prozent an Pos. 1 und zu etwa 12 % der

Messzeit an Pos. 2 registriert. Zu mehr als 20% der Messzeit werden diese Werte an Pos. 3 gemessen und Feuchtwerte oberhalb von 90 % zu etwa einem Zehntel der Messzeit an der Innenseite der Außenschutzverglasung 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 sollte, wenn überhaupt, nur auf der Innenseite der Außenschutzverglasung erfolgen.

Tabelle 10: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 10/19-09/20 am Fenster sIX in Liegnitz (L3)

	Pos.1				Pos. 2				Pos. 3				Pos. 4				Luft- geschwindigkeit
Monat	Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		Temperatur Min/Max [°C]		rel. Feuchte Min/Max [%]		V _{Luft} Max [m/s]
10/19	10,0	37,3	19,8	77,2	7,0	48,3	14,8	94,0	2,7	41,5	18,9	95,7	-	-	-	-	0,45
11	7,3	29,1	28,9	78,5	5,3	36,1	23,0	85,1	2,0	29,6	29,6	96,1	-	-	-	-	0,37
12	4,6	18,7	46,8	79,4	2,4	21,3	42,9	86,7	-1,3	17,9	47,1	97,0	-	-	-	-	0,21
01/20	3	17,7	38,1	80,2	1,2	22,4	33,8	86,6	-2,1	17,4	41,7	96,7	-	-	-	-	0,27
02	4,4	28,6	24,3	81,0	2,9	38,7	16,4	87,0	0,3	28,9	24,0	96,9	-	-	-	-	0,50
03	5,1	29,6	22,1	78,1	2,8	41,2	14,3	84,2	-0,7	33,0	19,3	93,4	-	-	-	-	0,58
04	4,7	31,0	22,3	72,1	2,8	41,8	14,9	76,4	-0,3	38,3	17,4	88,3	-	-	-	-	0,58
05	11,0	30,7	26,5	74,0	8,4	34,5	23,1	80,8	5,1	37,2	21,4	94,2	-	-	-	-	0,53
06	14,3	34,9	33,3	81,5	13,2	38,2	28,1	86,3	11,1	43,1	23,5	92,0	-	-	-	-	0,51
07	17,9	37,0	26,2	77,4	16,0	42,0	22,6	80,2	13,1	44,9	20,2	89,7	-	-	-	-	0,53
08	19,6	43,0	23,1	73,6	17,4	51,6	18,6	79,5	14,2	50,3	21,0	91,0	-	-	-	-	0,57
09	15,2	43,8	15,9	73,2	13,0	51,6	11,8	77,7	9,4	47,8	14,2	90,6	-	-	-	-	0,6

4.4.3.4 Südseite Fenster sIX, Custos Aeris-Messsystem

Temperatur der Glasoberflächen - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020

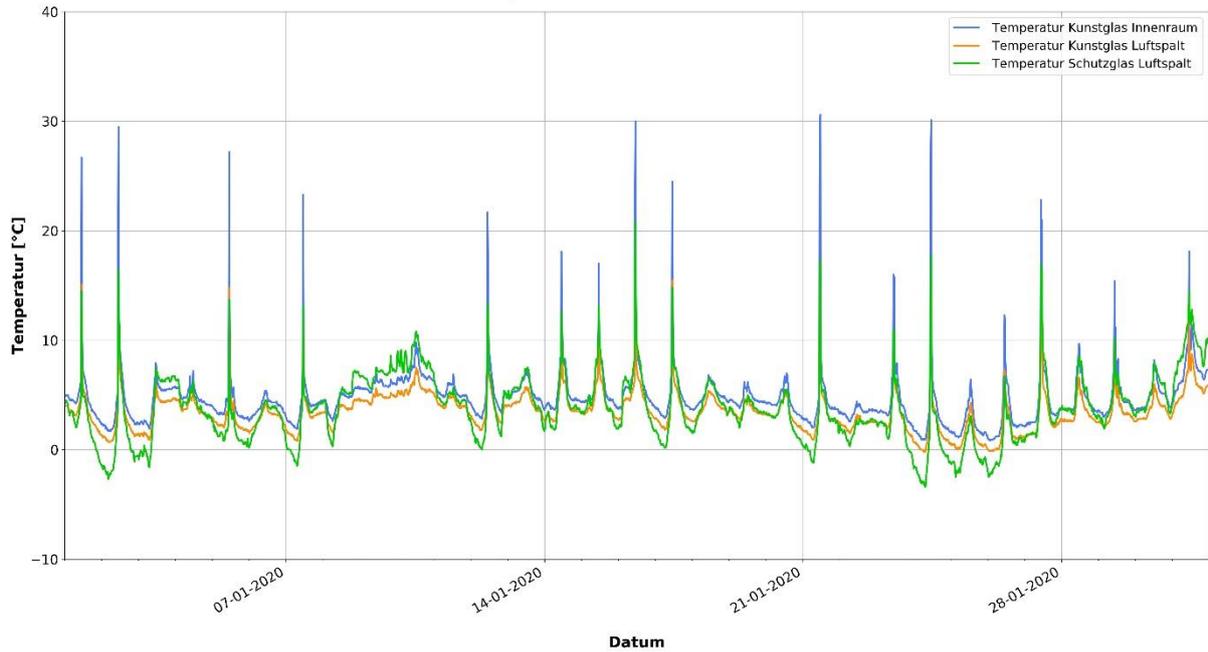


Bild 98: Custos Aeris, Temperatur der Glasoberflächen, Fenster sIX

Die Temperatur der Glasoberflächen wurde berührungslos alle 15 min gemessen und für die unterschiedlichen Pos. 1, 2, 3 verschiedenfarbig dargestellt

Lufttemperaturen - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020

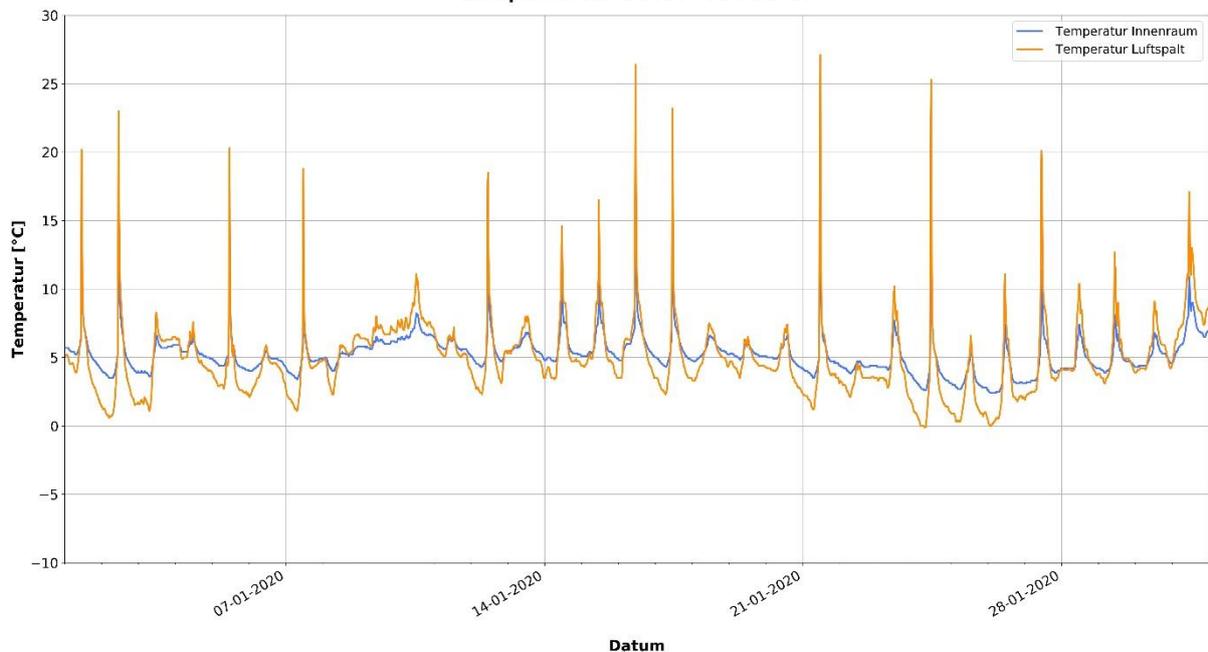


Bild 99: Custos Aeris, Lufttemperatur im Kirchenraum und im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die Lufttemperatur wird in einem Diagramm verschiedenfarbig für den Luftspalt zwischen Original und Außenschutzverglasung sowie für den Kircheninnenraum angezeigt. Auf der Südseite sind die Temperaturschwankungen deutlich höher als auf der Nordseite am Fenster nX

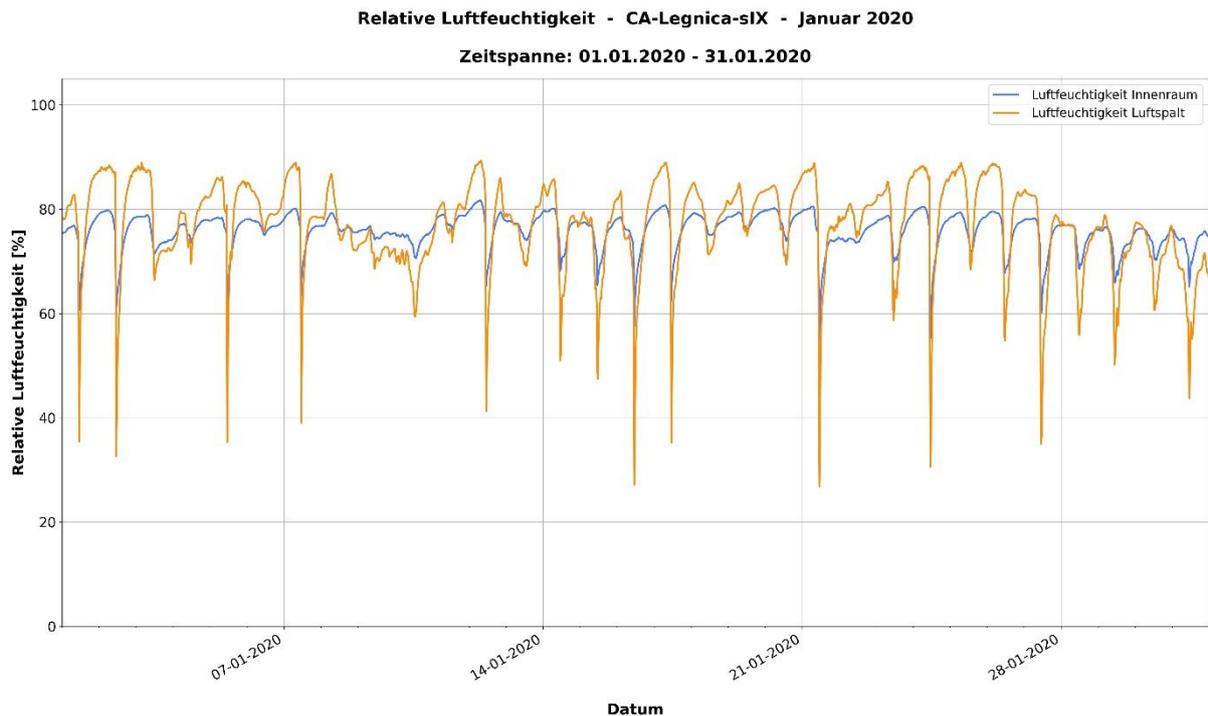


Bild 100: Custos Aeris, relative Luftfeuchtigkeit im Kircheninnenraum und im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die Messung der relativen Luftfeuchtigkeit ist zur Berechnung des Taupunkts notwendig und wird im Diagramm für den Kircheninnenraum und den Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung dargestellt.

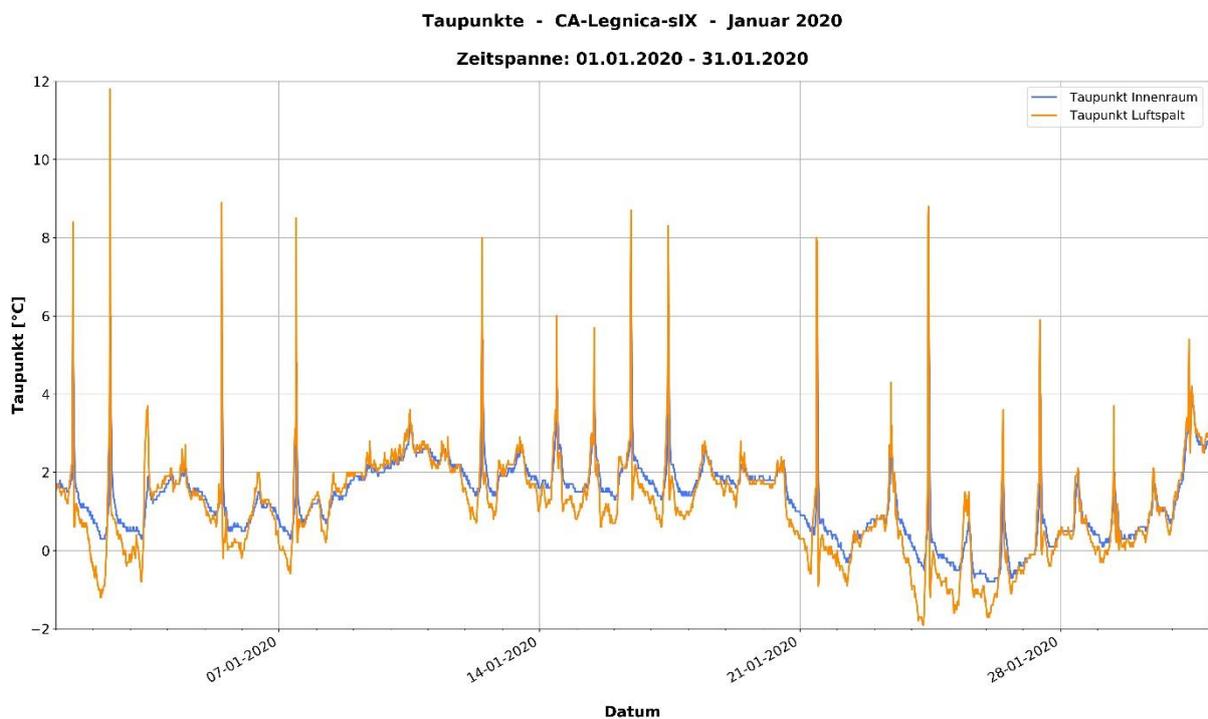


Bild 101: Custos Aeris, Taupunkte im Kirchenraum und im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung

Die Taupunkte werden aus den Lufttemperaturen und den relativen Luftfeuchten für den Luftspalt und dem Inneren der Kirche berechnet.

Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-SIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020

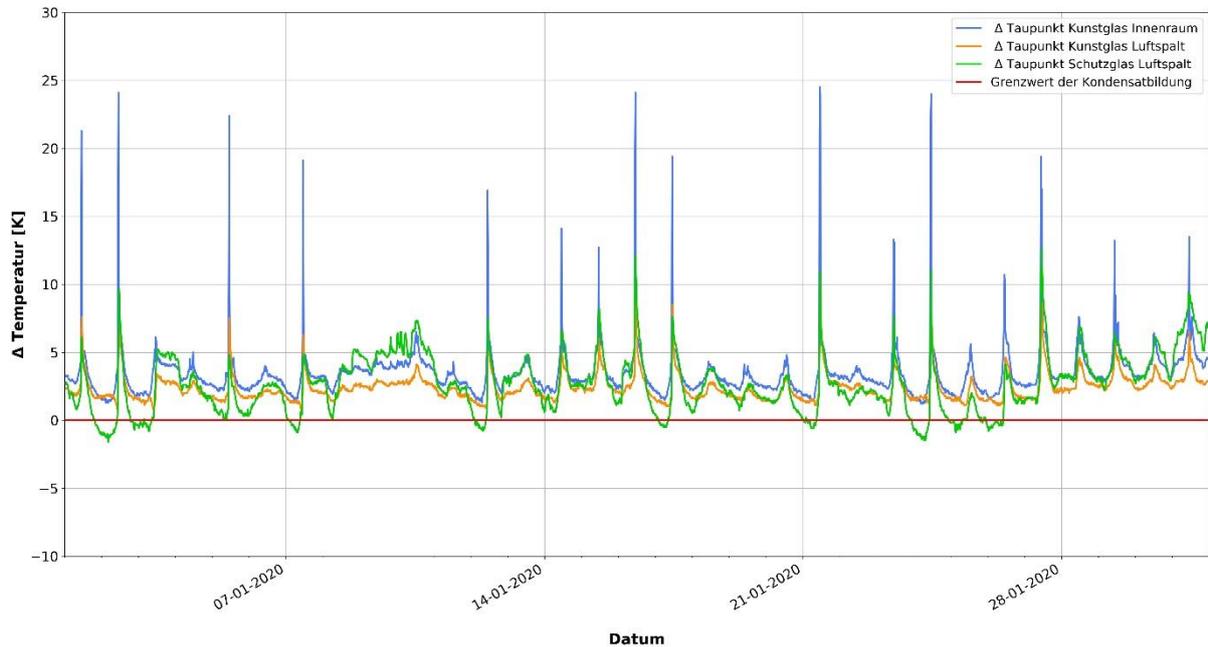


Bild 102: Custos Aeris Taupunktüberwachung für die Glasoberflächen an Pos. 1, 2 und 3

Unterschreitet die Temperatur der Glasoberfläche den Taupunkt der Luft, so fällt Kondensat aus. Dies wird im Diagramm durch Unterschreiten der Null-Linie dargestellt. Die Kondensatbildung erfolgt in diesem Fall auf der Innenseite der Außenschutzverglasung (Pos.3)

Kondensatbildung Schutzglas Luftspalt [%/Monat]

Zeitspanne: 01.10.2019 - 30.09.2020

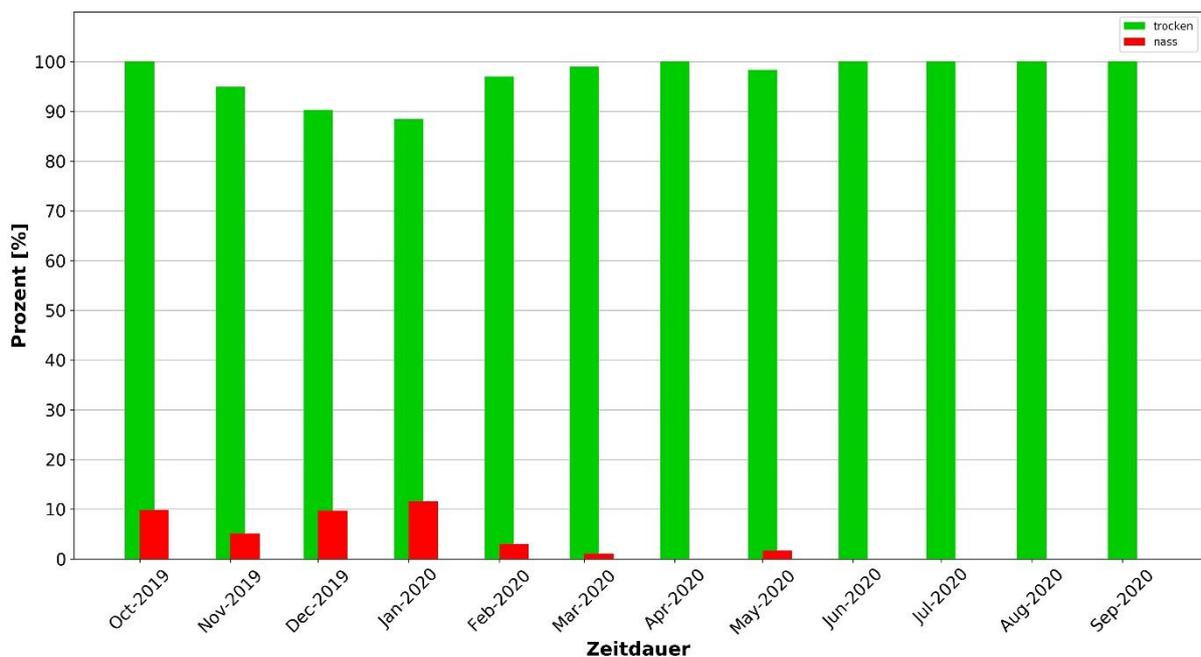


Bild 103: Custos Aeris, Häufigkeit der Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 3

Die Häufigkeit von Taupunktunterschreitungen an der Innenseite der Schutzverglasung in % der Messzeit wird durch die roten Balken im Diagramm dargestellt.

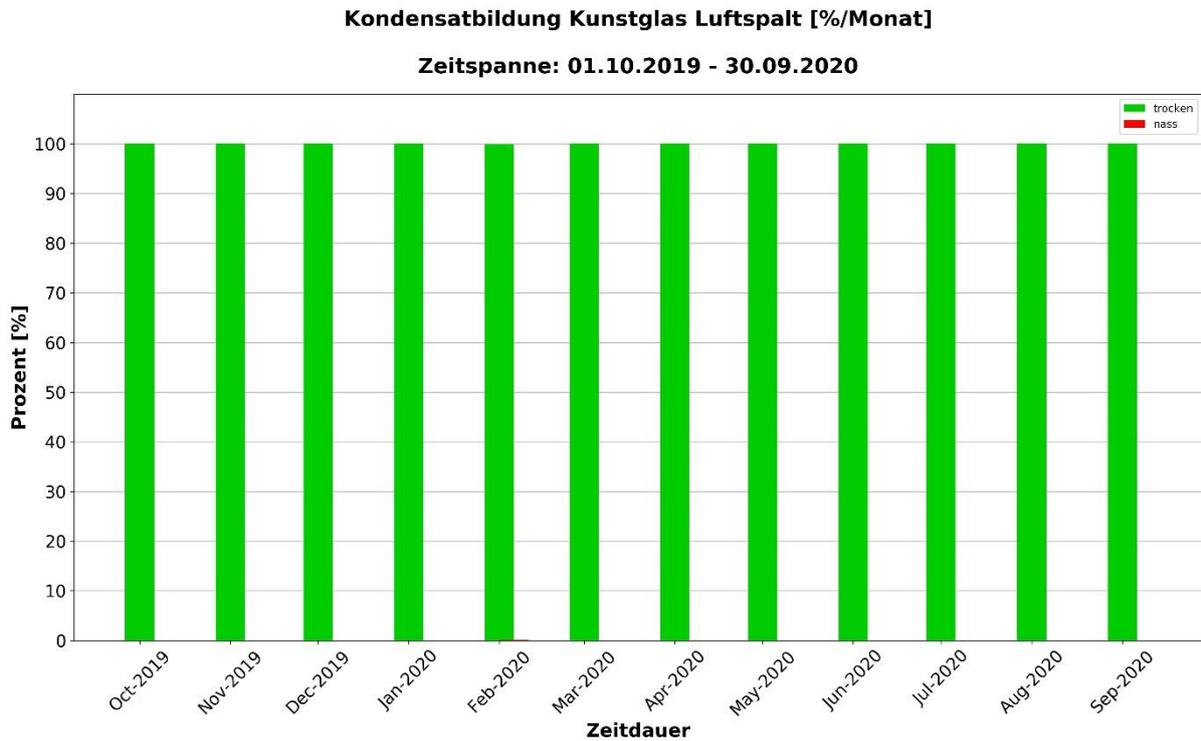


Bild 104: Custos Aeris, Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 2

Taupunktunterschreitungen an der Außenseite der Originalverglasung sind während der Messdauer am Fenster sIX nicht festgestellt worden.

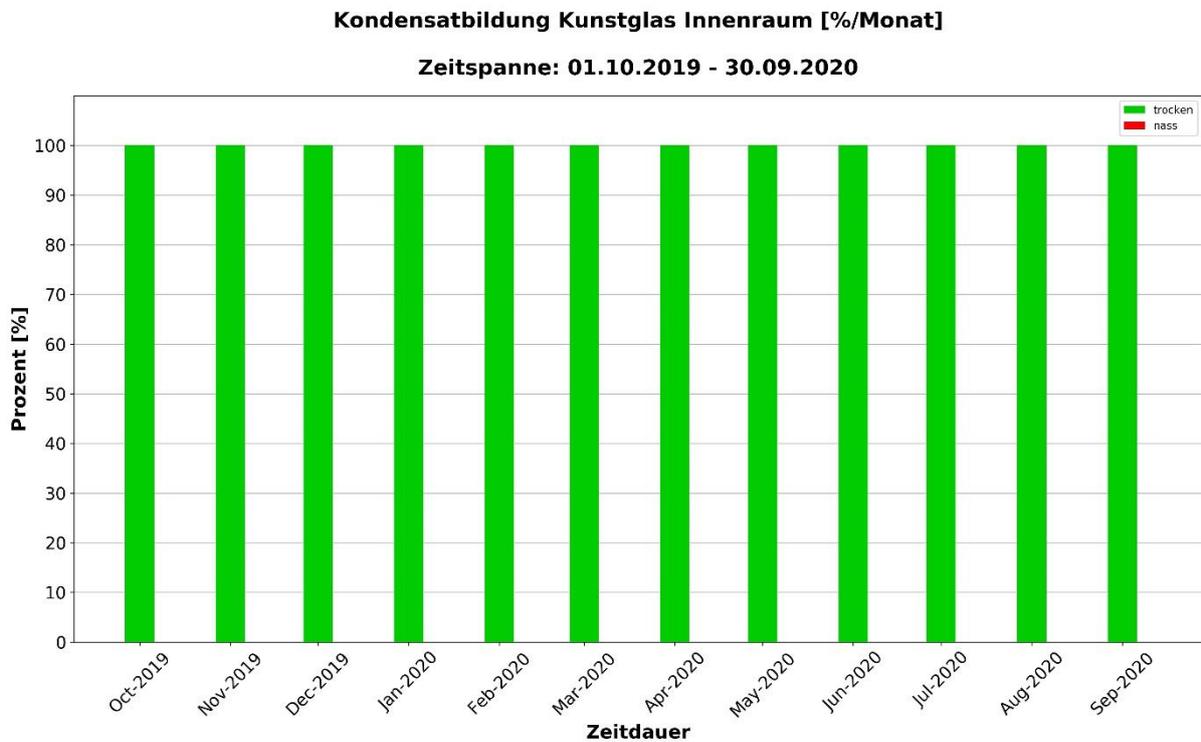


Bild 105: Custos Aeris, Taupunktunterschreitung in % der Messzeit an Pos. 1

Im Jahresverlauf wurden keine Taupunktunterschreitungen auf der Innenseite der Originalverglasung festgestellt (grüne Balken).

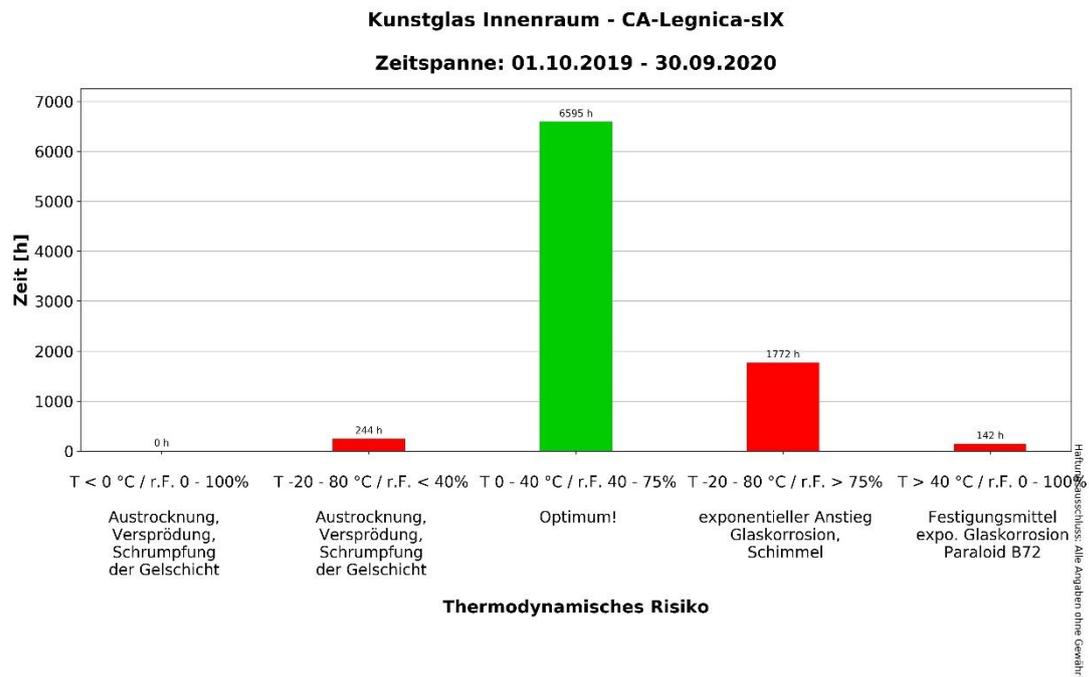


Bild 106: Bewertung des Schädigungsrisikos der Klimabedingungen innerhalb bestimmter Temperatur- und Feuchtebereiche an Pos. 1.

Das Optimum für einen langfristigen Erhalt von Glasmalereien liegt nach dieser Darstellung in einem Temperaturbereich zwischen 0 und 40°C und einem Feuchtebereich zwischen 40 und 75% r. F. Werte außerhalb dieses Clusters können in Abhängigkeit von der Glaszusammensetzung zu Schäden an Gläsern oder Malschichten bzw. auch Restaurierungsmitteln führen.

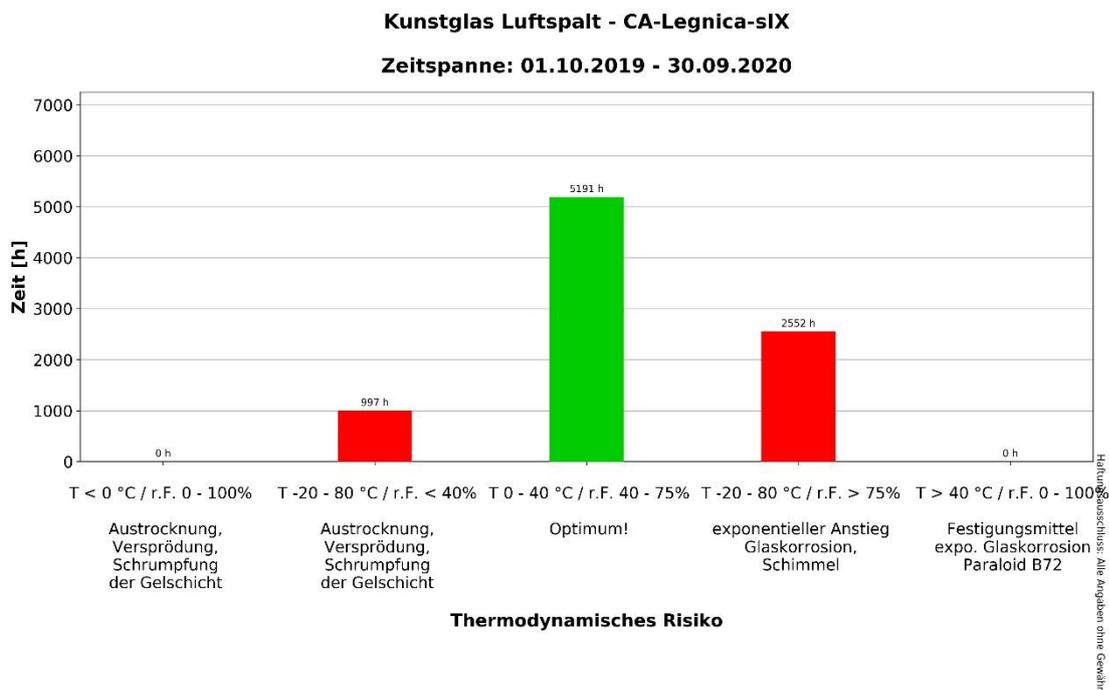


Bild 107: Bewertung des Schädigungsrisikos der Klimabedingungen innerhalb bestimmter Temperatur- und Feuchtebereiche an Pos. 2.

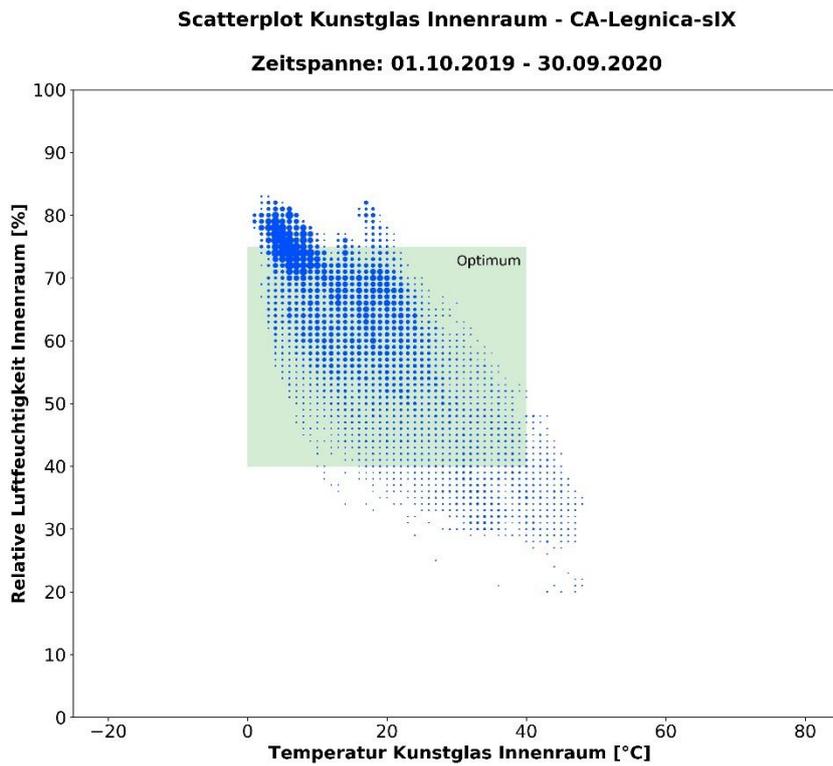


Bild 108: Scatterplot aus Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte zur Bewertung optimaler Klimabedingungen an Pos. 1

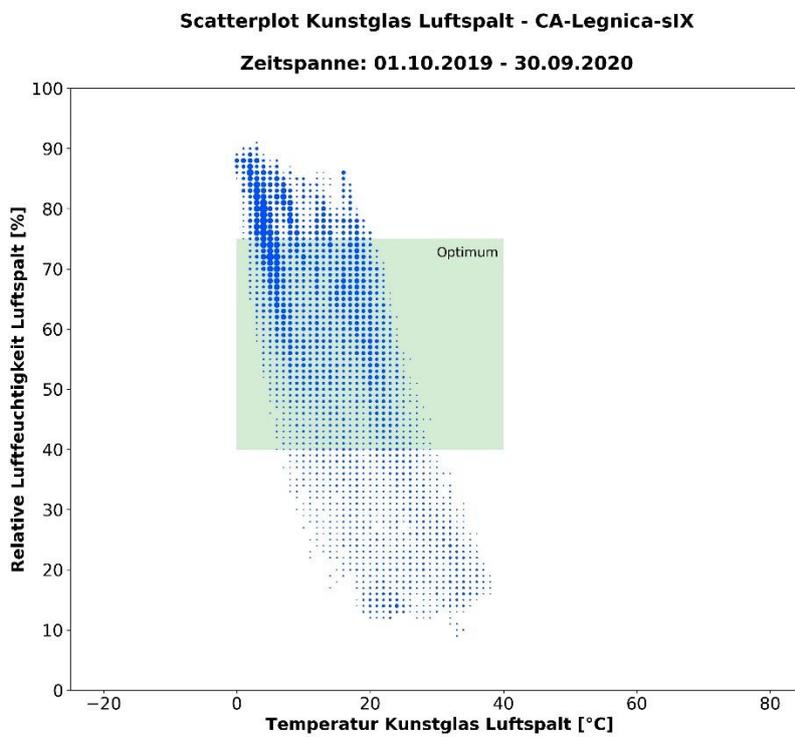


Bild 109: Scatterplot aus Werten von Temperatur und relativer Luftfeuchte zur Bewertung optimaler Klimabedingungen an Pos. 2

5. Weiterbildungsmaßnahmen innerhalb des Restaurierungsprojektes

Die Bearbeitung des Projektes umfasste naturwissenschaftliche Untersuchungen, praktische Sanierungen an den umweltgeschädigten Glasmalereien und Maßnahmen zur Weiterbildung. Die Weiterbildungsmaßnahmen erfolgten sowohl für polnische Denkmalpfleger als auch für Restauratoren und den im Projekt beteiligten Glasmalerei-Werkstätten. Die Maßnahmen wurden in den Werkstätten oder vor Ort an den Objekten durchgeführt. Dabei wurden die beteiligten Restauratoren und Denkmalpfleger in Koszewko, Liegnitz und Auschwitz durch die im Projekt tätigen Experten zu den Möglichkeiten eines nachhaltigen Schutzes der historischen Verglasungen informiert. So besteht z.B. das Schutzverglasungssystem in Kozewko aus den vorhandenen, restaurierten Holzrahmen mit Goetheglas. Die mittelalterlichen Felder wurden aus dem Holzrahmen herausgenommen und an ihre Stelle ein nicht unterteiltes Glassegment eingesetzt. Dieses Glassegment ist auf der Innenseite mit einer Sicherheitsfolie stabilisiert worden, um Schäden an den mittelalterlichen Gläsern durch von außen wirkende Kräfte zu verhindern. Die mittelalterlichen Felder wurden nach der Restaurierung mit Kupferrahmen versehen und in etwa drei Zentimeter Abstand nach innen versetzt und mit einem speziellen Halterungssystem befestigt. Dieses innovative Schutzverglasungssystem ist so zum ersten Mal in Polen verwendet worden. Vertreter der polnischen Denkmalpflege aus Stettin (Frau Stanecker, Herr Wolender) wurden von den Beteiligten über alle Details und die Funktionsweise der Außenschutzverglasung informiert. Dieses Informations- und Weiterbildungsangebot wurde auch bei den offiziellen Abnahmen der restaurierten Fenster von den beteiligten Denkmalpflegern und Kunsthistorikern gern angenommen. In Liegnitz am Nordfenster waren das Herr Dabnicki, Frau Gajewska-Prorok, Frau Chatkarska, am Südfenster Herr Dobrzyniecki, Frau Kubik, Frau Bryla-Zogata und in Auschwitz Frau Hizijcha und der Diözesendenkmalpfleger Herr Tracz. Die aktuellen und auch die bereits abgeschlossenen Restaurierungsprojekte sind auch bei Fachleuten in Polen auf großes Interesse gestoßen, so dass eine Anfrage von Frau Utzig (CVMA Krakau) nach dem Abschlussbericht von Thorn und Leslau gern nachgekommen wurde.

Leider ist es aufgrund der terminlichen Abstimmungen der einzelnen Restaurierungsprojekte nicht gelungen einen Studenten der Universität Thorn, wie schon im vorhergehenden Projekt (Adam Kazmierczak), auch dieses Mal in das laufende Projekt mit einzubinden. Jedoch werden die in den Projekten erzielten Ergebnisse und das Know-how teilweise auch für die studentische Ausbildung von Denkmalpflegern und Restauratoren an der Universität Thorn von Dr. Ulrich Schaaf und Adam Kazmierczak genutzt, die beide an der Fakultät der Schönen Künste lehren.

Ein besonderes Highlight war die Weiterbildungsmaßnahme im Januar 2019 für den Restaurator Herrn Oleszczuk in der Werkstatt des Kölner Domes. Hier wurden anhand eines Originalfeldes aus Auschwitz die Restaurierungsprobleme mit Frau Dr. Brinkmann und Herrn Berkenkopf diskutiert und mögliche Sanierungsmethoden erörtert. Mit den anwesenden Kollegen vom Fraunhofer ISC in Bronnbach (Frau Dr. Wittstadt und Frau Maas-Diegeler) erfolgte ein reger Erfahrungsaustausch anhand von Pilotstudien im Kölner Dom zu den Möglichkeiten der Sicherung craquellierter Gläser mittels Gemischen aus A18 und Ormocer, die für die Tränkung von Glasflies zur Stabilisierung der Gläser verwendet werden. Das zweitägige Werkstattgespräch ist von allen Beteiligten als sehr nützlich gewertet worden. Im Sinne einer Weiterbildung kann auch die Begegnung der beiden aus Polen und Deutschland in

Liegnitz tätigen Werkstätten (Oleszczuk Fenster nX,, Buhlig Fenster sIX) betrachtet werden. Auch hier kam es bei einem vor Ort treffen zu einem regen Erfahrungsaustausch.

Als neues naturwissenschaftliches Verfahren wurde in Polen erstmals das Structured-Light-Scanningverfahren (SLS) durch die Projektpartner der Universität Bamberg angewendet. Bei den gemeinsamen Treffen in der Restaurierungswerkstatt wurde dieses Verfahren von Max Rahrig ausführlich erläutert und die Funktionsweise an Originalfeldern demonstriert, so dass auch für die Projekteilnehmer ein Weiterbildungseffekt zu verzeichnen ist. Ähnlich verhält es sich auch mit den von den Projektpartnern der Universität Bamberg im Februar 2020 durchgeführten Aufnahmen mit einer IR- und Wärmebildkamera. Prof. Bellendorf und Max Rahrig nutzten die Möglichkeit während eines Projektreffens in Berlin bei einer Führung in den Laboren des Fachbereiches 8.7. „Thermographische Verfahren“ die Möglichkeiten der BAM auf diesem Gebiet kennenzulernen.

6. Exemplarische 3D-Oberflächenvergleiche ausgewählter Fensterfelder

Ein weiterer Teil des Projektes befasste sich mit der Dokumentation und Erfassung restaurierungsbedingter Veränderungen der Oberflächen historischer Glasfenster. Hierzu wurde die Oberflächengeometrie der bemalten Gläser vor und nach ihrer restauratorischen Behandlung mittels Structured-Light-Scanning (SLS) dreidimensional erfasst. Die Scanarbeiten wurden an den ausgebauten Scheiben in der Werkstatt des polnischen Glasrestaurators Sławomir Oleszczuk, in einem Fall im Pfarrhaus der Kirche in Ausschwitz, durchgeführt. Die Daten wurden anschließend in Bamberg am Kompetenzzentrum für Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien (KDWT) der Universität Bamberg mit einer 3D-Inspektionssoftware analysiert, um die Unterschiede in der Geometrie zwischen den beiden Scan-Kampagnen zu detektieren.

6.1 Die untersuchten Glasmalereien und die jeweiligen Fragestellungen an die 3D-Scans

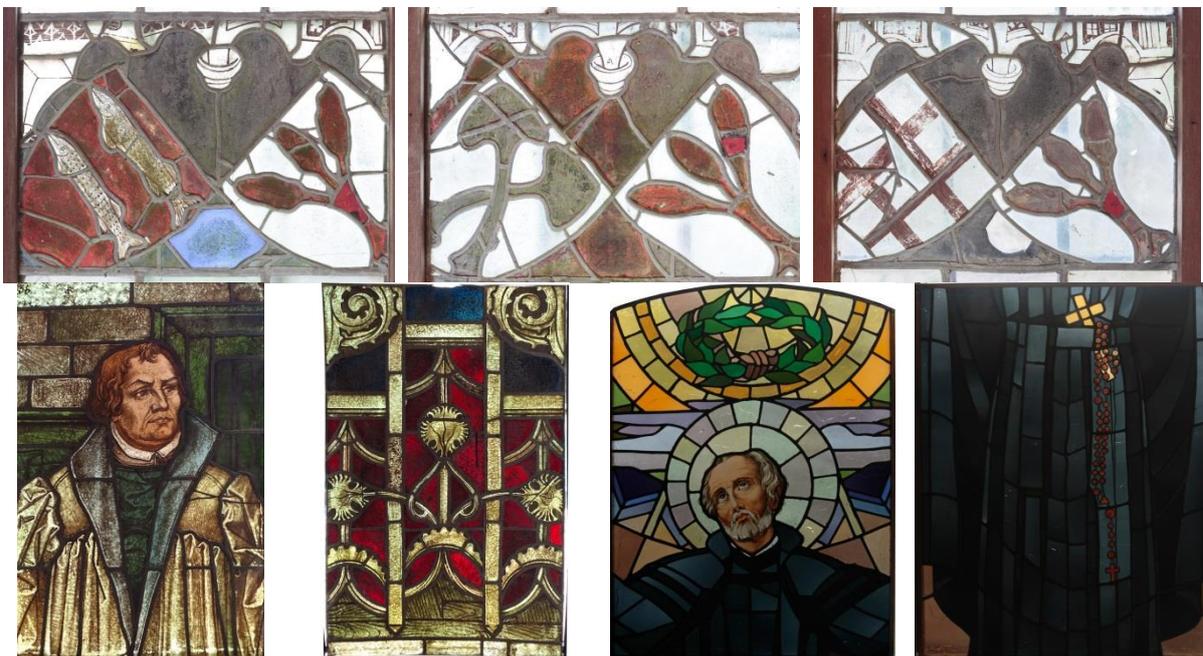


Abb. 1: Übersicht der untersuchten Fensterfelder. Oben v.l.n.r.: Koszewko *nII*, *nIII*, *sIII*. Unten v.l.n.r.: Liegnitz *nX3b*, *nX4b* sowie Ausschwitz *3b* und *2b*. (Oleszczuk 2017-2019)

In der Dorfkirche von Koszewko haben sich Glasmalereien mit den Wappen der Familie "von Küssow" aus dem 15. Jahrhundert erhalten (Abb. 1). Sie zeigten Korrosionsschäden durch Umwelteinflüsse, die in einem partiellen Verlust der Malschicht resultierten. Außerdem waren Schmutzauflagerungen sowie Glasbruch und Defekte an den Bleiruten festzustellen. Im Zuge der Restaurierung wurden stark verdunkelte Partien durch manuelle Reinigung aufgehellt. Auf der Grundlage von 3D-Vergleichen sollte gezeigt werden, wie behutsam die Klebung und Reparatur gebrochener Scheiben durchgeführt wurde.

Die Liebfrauenkirche in Liegnitz (Abb. 1) ist mit hochwertigen Glasmalereien aus den Jahren 1905/6 ausgestattet, die in verschiedenen bekannten deutschen Glaswerkstätten hergestellt wurden: Franke, Naumburg; Müller, Quedlinburg; Geiges, Freiburg; Oetken, Oldenburg; Linnemann, Frankfurt/M. Aufgrund einer fehlenden Außenschutzverglasung waren die Schwarzlotmalereien besonders gefährdet, was zu partiellen Abplatzungen der Malerei führte. Aufgrund der Schäden lag der Fokus der Restaurierung auf einer sorgfältigen Reinigung der Gläser und einer anschließenden Konsolidierung der Malerei. Die 3D-Vergleiche auf Basis der Oberflächenscans wurden durchgeführt, um festzustellen, inwieweit mit dieser Technik die manuelle Entfernung der Schmutzschichten messbar ist.

Die Glasmalereien in der Pfarrkirche von Auschwitz (Abb. 1) stammen aus dem Jahr 1940. Sie wurden von der Firma Müller in Quedlinburg hergestellt. Durch thermische Beanspruchung, vermutlich verursacht durch einen Brand, wiesen die Gläser ein sehr starkes Craquelé aus Rissen und Fehlstellen auf. Zudem waren Verfärbungen im Glas detektierbar. Während der Restaurierung wurde das komplexe Rissmuster mit Acrylharz verstärkt. Mit den 3D-Vergleichen sollte geprüft werden, ob das Acrylharz nur in die Risse geflossen ist oder zusätzlich als Schicht auf der Oberfläche aufliegt.

6.2 Technischer Hintergrund

Die dreidimensionale Vermessung gläserner Oberflächen stellt systembedingt ein vergleichsweise großes Problem dar. Die gängigen Sensoren für die berührungslose Erfassung von Oberflächen lassen sich aufgrund ihrer Messtechnik in aktive und passive Systeme unterteilen. Zur ersten Gruppe zählen Techniken, die aktiv einen Impuls auf die zu dokumentierende Oberfläche werfen und anschließend dessen Reflektion erfassen. Beim Impuls kann es sich um einen Laserstrahl oder ein Lichtmuster handeln, demnach zählen in diese Kategorie sowohl die Laserscanner als auch Structured-Light-Scanner. Passive Systeme erfassen die Oberfläche auf Grundlage der „Shape from Shading“, „Shape from Motion“ oder vergleichbarer Verfahren. Hierbei kann es sich bspw. um Stereokameras oder um die Berechnung von Bildverbänden diverser Einzelaufnahmen handeln: Die Berechnung der Daten erfolgt dabei mittels „Structure from Motion“ und „Image based Modeling“. In beiden Fällen muss die zu erfassende Oberfläche eindeutig definierbar sein, das bedeutet, sie sollte opak und nicht lichtdurchlässig sein (Stylianidis et al. 2016).

Glas hingegen zeichnet sich durch seine optischen Eigenschaften in der Regel als transluzentes Material aus. Aufgrund seiner Lichtdurchlässigkeit lässt sich die Glasoberfläche optisch nur schwer fassen, wodurch die gängigen Systeme für die 3D-Erfassung erheblich beeinträchtigt sind. In den vergangenen zwei Dekaden wurden diverse Systeme entwickelt, um dieses Problem zu lösen (Eren 2010; Ihrke et al. 2010; Yeung 2011; Mériaudeau et al. 2012). Hierbei handelt es sich bspw. um Verfahren, welche die Oberfläche thermisch oder mit ultraviolettem Licht anregen (Rantson et al. 2010). Andere Systeme bedienen sich der Lichtbrechungseigenschaften des Glasobjektes in einem Bad mit fluoreszierender Flüssigkeit (Hullin et al. 2008). All diese Verfahren weisen zwei grundlegende Probleme auf: Die Geräte sind in der Regel Einzelanfertigungen oder Prototypen und somit nicht frei auf dem Markt erhältlich. Darüber hinaus sind sie aufgrund der Messtechnik nur extrem begrenzt für die Dokumentation von Kulturgut anwendbar. Die fragilen historischen Objekte erlauben in der Regel weder eine thermische Anregung noch ein Versenken des Objektes in einer Flüssigkeit.

In verschiedenen Forschungsprojekten der Restaurierungswissenschaft der Universität Bamberg konnte in den vergangenen Jahren gezeigt werden, dass Korrosionsphänomene die optischen Eigenschaften historischer Glasmalereien verändern und dadurch eine hochauflösende, dreidimensionale Vermessung der Glasoberflächen mit gängigen Structured-Light-Scannern sehr wohl möglich wird (Drewello, Kleine et al. 2010; Drewello, Wetter et al. 2010; Drewello, Kleine et al. 2016). Aufgrund der jahrhundertelangen Exposition der Fenster haben sich bspw. Wettersteinkrusten, Kalk- und Staubablagerungen auf den Oberflächen gebildet, wodurch eine hauchdünne, opake Schicht auf der Oberfläche entstanden ist. Durch anwendungstechnisches Knowhow in der Gerätenutzung, in Kombination mit langjähriger Erfahrung in der Dokumentation sensibler Kulturgüter, wird durch diese Schicht eine Vermessung der Oberfläche mit optischen Systemen möglich. Salemi et al. hat vergleichbare Ergebnisse unter Verwendung eines Konica Minolta Laser Scanners erzielt (Salemi et al. 2008)

Beim Structured-Light-Scanning (SLS) wird durch einen Projektor ein Streiflicht auf die zu messende Oberfläche projiziert. Diese Streifen werden wiederum von einer Kamera erfasst, die entlang dieser 3D-Koordinaten berechnet (Rahrig et al. 2018; Gühring 2002; Akce 2007; Floth et al. 2011). Das verwendete Gerät, Comet L3D der Firma Steinbichler, verfügt über einen 5 Megapixel Bildsensor, wobei die Messauflösung abhängig von den gewählten Objektiven ist. Im Falle der Fensterfelder wurden zwei Setups mit Auflösungen zwischen 0,1 mm und 45 µm gewählt (s.u.). Hierbei gilt: Je feiner die Auflösung, desto kleiner die zu erfassende Fläche. Ein Einzelscan mit 0,1 mm Auflösung erfasst dabei eine Fläche von etwa 18x25 cm, wobei hingegen ein Einzelscan von 45 µm Auflösung nur eine Fläche von ca. 5x8 cm abdeckt. Systembedingt lässt sich daher nur selten mit einem einzelnen Scan die gesamte Oberfläche eines Objektes erfassen, so dass eine Serie sich überlappender Einzelscans notwendig ist. Anhand der Überlappungsbereiche kann die Software die Einzelscans zueinander referenzieren, wodurch diese zu einem virtuellen Gesamtbild des Objektes verknüpft werden können.

Die Hersteller der Scanner empfehlen in der Regel eine möglichst parallele Ausrichtung des Scanners auf die zu messende Oberfläche. Somit ist gewährleistet, dass die größtmögliche Fläche mit einem Einzelscan erfasst wird. Außerdem reflektiert die Oberfläche das Licht des Projektors so optimal zur Kamera. Opake Flächen lassen sich so, mit vergleichsweise kurzen Belichtungszeiten der Einzelmessung, aufnehmen. Im Falle der Glasoberflächen ist genau dieses Setup jedoch problematisch. Durch die Lichtquelle des Projektors entstehen stark spiegelnde Spots, welche zu einer Überbelichtung des Scans und somit zu Löchern im Datensatz führen. Positioniert man den Scanner jedoch in einem Winkel zwischen 45° bis 80° schräg zu der zu dokumentierenden Oberfläche, werden die Highlights/Spots des Projektors nicht unmittelbar in die Kamera reflektiert. Mit diesem Setup wird nicht das gesamte Sichtfeld des Scanners bei einem Einzelscan verwendet, die Scans werden in der Fläche etwas kleiner. Dies liegt daran, dass die Oberfläche schräg im Sichtfeld liegt und sich Teilbereiche schneller außerhalb des Fokusbereiches befinden. Dennoch wird der Datensatz in seiner Fläche homogener aufgenommen, wodurch die Überlappungen zwischen den Einzelscans reduziert werden können und nicht so viele zusätzliche Scans benötigt werden.

Bemalte und bewitterte Glasscheiben bestehen aus unterschiedlich reflektierenden Zonen in unmittelbarer Nachbarschaft. Hierbei kann es sich um inhomogene Schichtstärken der Korrosions- und Schmutzablagerungen, aber auch um helle und dunkle Schwarzlotmalerei handeln. Dies erfordert variierende Belichtungseinstellungen für eine möglichst flächendeckende Dokumentation der Glasoberflächen. Der SLS benötigt für die Erfassung von dunklen Bereichen längere Belichtungszeiten, während für helle Oberflächen kürzere Belichtungszeiten ausreichen. Eine kombinierte Aufnahme der Glasoberfläche mit unterschiedlichen Belichtungseinstellungen kann hilfreich sein das Problem zu lösen. Bei dem verwendeten Gerät ist es möglich, analog zu einem HDR-Foto, eine sogenannte Belichtungsfusion zu erstellen. Hierbei werden zwei bis drei Aufnahmen mit jeweils unterschiedlichen Belichtungseinstellungen in einen gemeinsamen Einzelscan zusammengeführt, der somit optimale Flächeninformationen heller und dunkler Bereiche beinhaltet.

6.2.1 Reduktion von Spiegelungen durch den Einsatz von Mattierungssprays

Der Einsatz von Mattierungssprays, wie sie in der Industrie häufig beim Scannen glänzender Oberflächen zum Einsatz kommen, ist im Bereich der Denkmalpflege problematisch. In der Regel ist nicht völlig ersichtlich, aus welchen Bestandteilen die Sprays bestehen. Somit können sie Lösemittel enthalten, die wiederum schadhaft mit den historischen Objekten und Materialien reagieren könnten. Zudem erfordern die Sprays eine mechanische Reinigung der Oberflächen, um nach der Datenaufnahme wieder entfernt zu werden. Einzig Cyclododecan, ein flüchtiges Bindemittel, welches

seit langem von Restauratoren zur temporären Festigung eingesetzt wird, sollte als Spray zur Mattierung bei der Vermessung von Kulturgütern verwendet werden (Díaz-Marín et al. 2015). Da es binnen weniger Stunden rückstandsfrei sublimiert, ist keine mechanische Reinigung notwendig. Zudem reagiert es nicht mit den historischen Materialien, mit Ausnahme einiger moderner Kunststoffe. Cyclododecan wird an der Universität Bamberg bereits seit 2005 zur Mattierung glänzender Objekte angewendet (Bellendorf 2007). Die Erfahrung hat jedoch gezeigt, dass die erhältlichen Sprays in der Regel keinen einheitlich dünnen Film auftragen, sondern teilweise zur Bildung von (kleinen) Klumpen neigen. Aufgrund der generellen Schichtdicke und der ungleichmäßigen Verteilung musste im Fall der hier zu dokumentierenden Gläser auf den Einsatz von Cyclododecan verzichtet werden. Die Klumpen und Schichtdicken würden die Ergebnisse eines 3D-Vergleichs zwischen dem Zustand vor und nach der Reinigung und Konservierung sowie im Anschluss der Maßnahme zu stark verfälschen.

6.2.2 Der Einsatz von Polarisationsfiltern zur Reduktion der Spiegelungen

Im Vergleich zu den Glasmalereien aus Kozsewko, sind die Gläser aus Liegnitz und Auschwitz verhältnismäßig jung. Sie stammen aus dem Beginn bzw. der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts. Aufgrund der technischen Entwicklungen und der voranschreitenden Industrialisierung waren die Rohstoffe zur Glasherstellung in dieser Zeit deutlich reiner, wodurch hochwertigere und stabilere Gläser produziert werden konnten (Wedepohl 2003). Darüber hinaus waren diese Gläser deutlich kürzer der Witterung ausgesetzt, als etwa die mittelalterlichen Scheiben. Somit befanden sich diese Gläser in einem vergleichsweise guten Zustand, was in einer weniger stark korrodierten Oberfläche resultierte. Daher war beim Scannen mit deutlich stärkeren Spiegelungen zu rechnen. Um die Spiegeleffekte dieser jungen Scheiben zu reduzieren, wurde daher der Einsatz von Polarisationsfiltern getestet.

Lichtquellen, wie LEDs, Glühbirnen oder die Sonne senden Lichtstrahlen in ungeordneten Wellen aus. Wenn diese Lichtstrahlen von einer Oberfläche reflektiert werden, wird der Lichtstrahl erneut aufgefächert und in verschiedene Richtungen als Streulicht abgestrahlt. So kommt es bspw. zu Spiegelungen auf der Wasseroberfläche. Polarisationsfilter haben die Eigenschaft, lediglich Licht einer einzigen Wellenrichtung passieren zu lassen, die anderen werden geblockt (Chen et al. 2007).

Für die Dokumentation der Gläser wurden drei Varianten getestet: Jeweils ein Polarisationsfilter vor dem Projektor oder vor der Kamera des Scanners sowie gleichzeitig vor beiden. Der Polarisationsfilter vor dem Projektor sollte generell die Spiegelungen auf der Glasoberfläche reduzieren, der Filter vor der Kamera sollte hingegen das Licht zum Sensor filtern, wodurch das vom Glas reflektierte Streulicht reduziert werden sollte. Chen et al. hat sich bereits mit den Möglichkeiten von Polarisationsfilter zum Scannen transluzenter Objekte befasst und für Marmor, Obst und einer modernen gläsernen Vase gute Ergebnisse erzielt (Chen et al. 2007).

Die empirischen Studien an Glasmalereien und Polarisationsfiltern, waren wenig erfolgreich. Beim kombinierten Einsatz von zwei Polarisationsfiltern, jeweils einer vor dem Projektor und einer vor der Kamera, kam sowohl mit gekreuzten als auch mit parallel geschalteten Filtern nicht genügend Licht auf den Bildsensor, so dass keine Datenaufnahme möglich war. Der Einsatz eines einzelnen Polarisationsfilters vor dem Projektor oder vor der Kamera hat identische Ergebnisse geliefert. In beiden Fällen konnten die Spiegelungen reduziert werden, jedoch blockierten die Filter verhältnismäßig viel Licht. Somit mussten die Belichtungszeit und Lichtintensität des Projektors verstärkt werden. Die Erhöhung konterkarierte allerdings den Filtereffekt, sodass erneut Hotspots auf der Glasoberfläche

entstanden (Abb. 2). Die besten Ergebnisse zum Scannen der Glasoberflächen wurden demnach ohne jegliche Filter, lediglich mit einem schräg zum Objekt positioniertem Scanner erzielt.

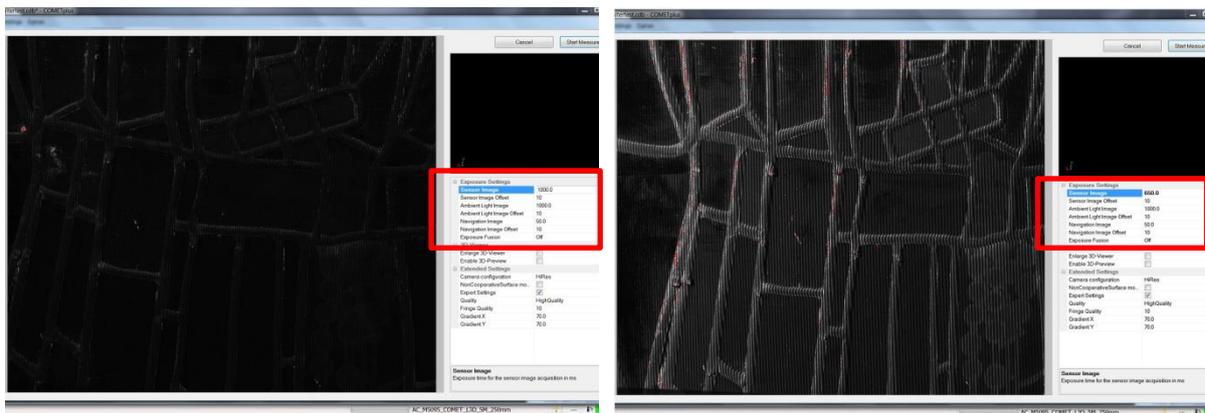


Abb. 2: Auschwitz 2b; Vergleich unterschiedlicher Belichtungseinstellungen. Links: Setup mit Polarisationsfilter vor der Kamera und der maximalen Lichtstärke. Die Einstellung ist für eine Messung zu dunkel. Rechts: Setup ohne Polarisationsfilter, mit dem Scanner in einem Winkel von 70° zur Oberfläche ausgerichtet. Es ergeben sich ideale Einstellungen zur Messung, ohne Reflektionen auf der Glasoberfläche.

6.2.3 Datenaufbereitung

Ziel der dreidimensionalen Dokumentation der Glasmalereien war ein 3D-Vergleich der Oberflächen vor und nach der Restaurierung. Daher wurde bei der Datenaufbereitung sehr behutsam mit den Daten umgegangen. Nach Abschluss der Messungen wurde lediglich ein Iterative Closest Point Matching (ICP/“Best-fit“) der Einzelscans zueinander durchgeführt, um die Scans geometrisch bestmöglich zueinander auszurichten. Anschließend wurden die Scans in ein Flächenmodell überführt. Hierbei wurde die Auflösung des Oberflächenmodells an die Auflösung der verwendeten Objektivs angepasst; 0,1 mm für das 250er Objektiv mit dem die Fensterfelder in Gänze auf ihrer Vorder- und Rückseite erfasst wurden; 45 µm bei dem 75er Objektiv, mit dem jeweils Teilbereiche einiger weniger Einzelscheiben pro Fensterfeld aufgenommen wurden.

Die Datensätze wurden weder geglättet noch wurden Fehlstellen interpoliert und geschlossen. Sollten einige Einzelscheiben zu stark reflektiert haben, wurde im Verlauf der Nachbearbeitung geprüft, ob die Glasoberfläche erfasst wurde oder ob es sich um verrauschte Daten handelte. Verrauschte Bereiche wurden manuell entfernt. Die Übersicht der Fenster war daher teilweise lückenhaft, was den Betrachter ggf. irritieren könnte, es sollte aber vermieden werden, dass die Oberflächenvergleiche durch interpolierte Fehlstellen verfälscht wurden. Die Nachbearbeitung der Daten erfolgte in der Software CometPlus der Fa. Steinbichler, sowie in Geomagic Wrap 2017. Die Daten wurden anschließend als STL-Daten gespeichert und für die Berechnung der 3D-Vergleiche in GOM Inspect importiert.

6.3 Ergebnisse der einzelnen Kampagnen

Die hochauflösende Dokumentation von Gläsern in den einzelnen Kampagnen lieferte bereits aufschlussreiche Möglichkeiten der Oberflächenuntersuchung. Wie bereits Drewello und Kleine et al. eindrücklich am Beispiel des mittelalterlichen Mose-Fensters aus St. Jakob in Straubing dargelegt hatte, kann mit Hilfe von SLS die Oberflächentopografie von Glasmalereien erfasst werden. Durch den Unterschied in der Topografie ließ sich nicht nur die Schwarzlotmalerei von der Glasoberfläche unterscheiden, es konnten auch Aussagen zur Maltechnik getroffen werden. Bspw. mit welchen Werkzeugen das Schwarzlot aufgetragen oder leuchtende Akzente gesetzt wurden. Ferner konnte die

dreidimensionale Oberflächendokumentation bei der Rekonstruktion und Retusche ausgeblicher oder schadhafter Bereiche helfen (Drewello, Kleine et al. 2010 und 2016).

Bei Schwarzlot handelt es sich um die Farbe, die seit dem Mittelalter vorzugsweise für die Glasmalerei verwendet wurde. Schwarzlot besteht aus einem Gemenge aus fein gemahlenem Glaspulver, Kohlenstoff und weiteren Bestandteilen. Die Farbe wird zähflüssig mit einem Pinsel auf die Glasscheiben aufgetragen. Alternativ kann sie auch als dünner Film appliziert werden, wobei anschließend mit einem weichen Werkzeug, wie etwa einem Holzspatel, Akzente in die Schicht geritzt werden können. Nach dem Trocknen werden die Gläser gebrannt, wodurch die Glaspartikel des Schwarzlots mit der Glasoberfläche eine stabile und langlebige Verbindung eingehen (Brepohl 2012).

An den Fenstern aus Koszewko und Liegnitz ließ sich die Glasmalerei sehr gut im 3D-Modell erfassen (Abb. 3). Darüber hinaus konnten aber auch weitere Oberflächeninformationen in den 3D-Modellen abgelesen werden, so zum Beispiel die unterschiedlichen Korrosionsphänomene. Hierbei handelte es sich um Schmutzkrusten, die auf der Glasoberfläche auflagerten (Abb. 3), aber auch um Korrosionen, die die Glasoberfläche Stück für Stück zersetzten und eine Kraterlandschaft im Glas hinterließen (Abb. 3). Risse im Glas und historische Reparaturen, wie bspw. Reparaturbleie konnten ebenfalls detektieren werden (Abb. 3). Bereiche, in denen sich die Glasoberfläche in einem vorzüglichen Zustand befand, stellten sich im 3D-Scan hingegen vornehmlich als Negativbefund, ohne Oberflächeninformation, dar (Abb. 3). Dies begründete sich durch die fehlenden Wettersteinkrusten und sonstigen Ablagerungen, weshalb das Glas nicht opak, sondern weiterhin vollständig transluzent war, wodurch eine Vermessung der Oberfläche nicht möglich war.

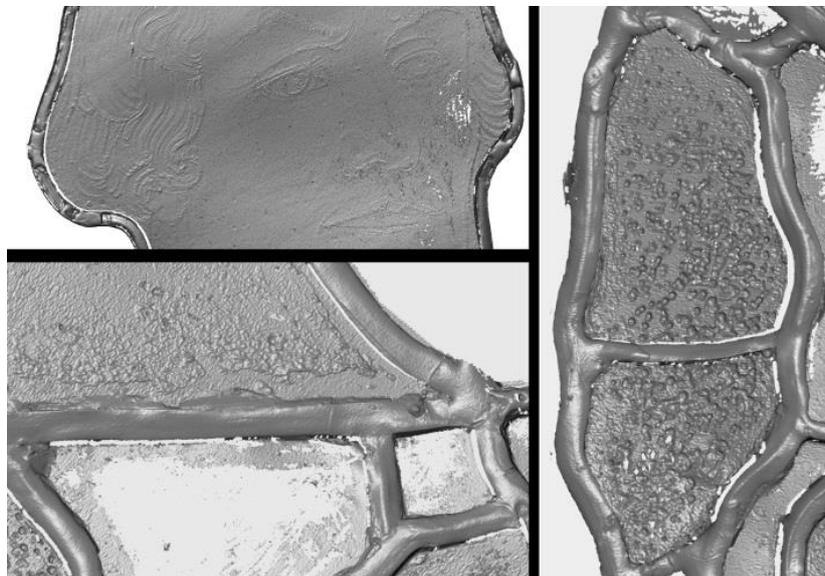


Abb. 3: Übersicht verschiedener Oberflächendetails im 3D-Scan. Oben links: Farbauftrag der Schwarzlotmalerei in einem Gesicht. Unten links: Ablagerungen von Schmutz und Staub auf der Glasoberfläche, darunter eine saubere Glasoberfläche als Negativbefund (keine Oberfläche messbar). Rechts: Stark korrodierte Glasoberfläche mit einem horizontal eingefügten Reparaturblei.

6.4 Ergebnisse der 3D-Oberflächenvergleiche

6.4.1 3D-Oberflächenvergleiche ganzer Fensterfelder

Die Hauptfragestellung zur 3D-Dokumentation der historischen Gläser lag in einem Vergleich der Oberflächen vor und nach ihrer Konservierung. Eine Nebeneinanderstellung der beiden Datensätze der Gläser für einen optischen Vergleich lieferte zunächst nur wenige Aussagen. Gut erkennbar war, dass durch die Reinigung der Oberflächen teilweise die Lichtdurchlässigkeit deutlich erhöht wurde und somit die Scans des Nachzustands mehr Fehlstellen durch nicht erfassbare Bereiche aufwiesen (Abb. 4). Weitere Unterschiede zwischen den beiden Kampagnen ließen sich auf diese Weise jedoch nur sehr bedingt ausmachen. Für eine objektive Erfassung der Veränderungen bot sich daher ein mathematischer Vergleich der 3D-Modelle mittels 3D-Inspektionssoftware an.

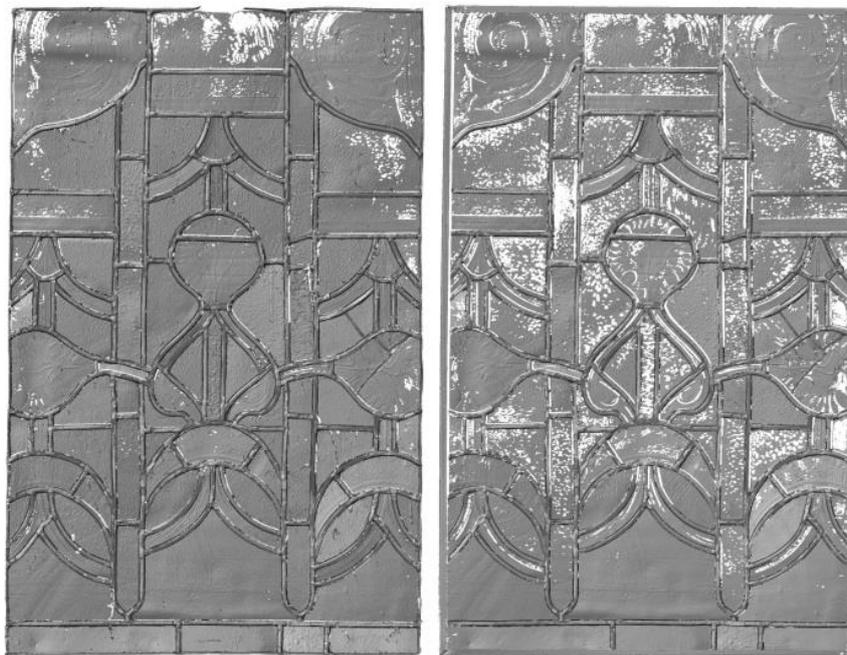


Abb. 4: Nebeneinanderstellung von Fensterfeld *nX4b* aus Liegnitz. Links: Vorzustand. Rechts: Nach der Reinigung und Konservierung.

Für die Erstellung der Vergleiche wurde die Software GOM Inspect 2018 verwendet. Hierzu wurden die 3D-Oberflächenmodelle des Vorzustands als Referenzmodell und die des Nachzustands als sogenanntes Ist-Modell im Datenformat STL eingeladen. Bei diesen Vergleichen wurden die geometrischen Unterschiede zwischen den 3D-Modellen in einem Fehlfarbenbild visualisiert. Blaue Bereiche zeigten dabei ein Schwinden und gelb bis rote Bereiche einen Zuwachs der Oberfläche an (Abb. 5).

Aufgrund der Arbeitsprozesse im Umfeld der Konservierung war es nicht möglich, ein statisches Messnetz für die Orientierung der Scankampagnen zueinander einzurichten. Die Gläser wurden während ihrer Behandlung mehrfach gedreht, um Vorder- und Rückseiten zu bearbeiten. Zudem wurden sie mehrfach von beiden Seiten fotografisch dokumentiert. Durch diese vielen notwendigen Transporte und Bewegungen innerhalb der Restaurierungswerkstatt musste die Ausrichtung der Gläser zueinander mittels „Iterativ-Closest-Point“ (ICP) bzw. „Best-Fit“ erfolgen. Hierzu wurden die Gläser zunächst anhand einer 3-Punkt-Vorausrichtung grob übereinandergelegt, anschließend konnte die ICP Ausrichtung berechnet werden.

Die Standardabweichung der Scans mit dem 250er Messfeld in der Auflösung von 0,1 mm war nach der Ausrichtung unverhältnismäßig groß. Sie lag im Durchschnitt bei etwa 0,8 mm. Ein Blick auf den Oberflächenvergleich lieferte hierzu den Aufschluss (Abb. 5). In den Vergleichen waren deutliche Abweichungen zwischen den 3D-Daten des Vor- und Nachzustandes sichtbar, welche sich jedoch nicht auf die Konservierung zurückführen ließen, sondern vielmehr auf den Bewegungsspielraum, den die Bleiruten boten. Da Blei kein starres Metall, sondern vergleichsweise weich ist, kam es beim Transport der Fenster zu leichten Bewegungen des Bleinetzes. Besonders der mittlere Bereich der Gläser neigte somit zum leichten Durchhängen, wodurch schüsselförmige Abweichungen in den 3D-Vergleichen entstanden. An den mittelalterlichen Fenstern aus Erfurt konnten bereits ähnliche Erfahrungen gemacht werden (Drewello, Wetter et al. 2010). Für die Vergleiche war dieser Bewegungsraum kontraproduktiv, für die historischen Glasfenster jedoch ein wichtiger Schutzfaktor. Durch das flexible System können Wind- und Sturmböen, die gegen die Fenster drücken, ausgeglichen und so das Brechen von Einzelscheiben verhindert werden.

Dennoch ließen sich bestimmte Veränderungen an den Gesamtübersichten der Gläser ablesen, wie bspw. die Verstärkungen der Randpartien. Hier wurden Rahmen aus Kupferblech um die Fenster gesetzt, um ihnen mehr Stabilität zu geben und den Wiedereinbau in der Kirche zu erleichtern. Aber auch Änderungen im Bleinetz ließen sich erfassen (Abb. 5). Hierbei konnte es sich um Bereiche handeln, in denen Bleie ausgetauscht oder wo neue Bleiruten eingezogen wurden. Es fanden sich aber auch Stellen, an denen Reparaturbleie entfernt wurden. Gesprungene Scheibe wurden bei einer historischen Reparatur vielfach mit einer Bleirute gesichert. Da die Sprünge bei der Restaurierung geklebt wurden, konnten die Sicherheitsbleie entfernt werden.

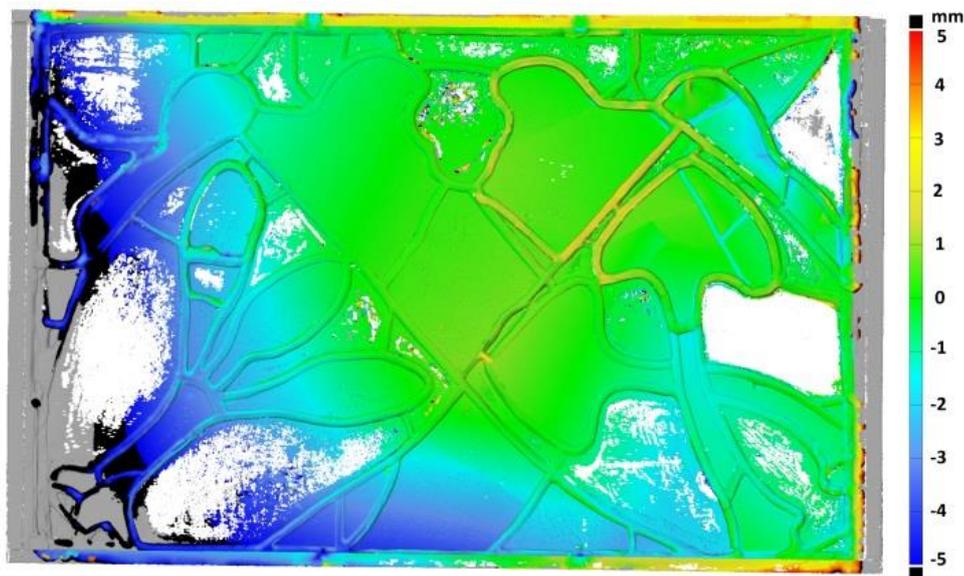


Abb. 5: 3D-Vergleich der Außenseite von *nIII* aus Koszewko vor und nach der Restaurierung.

6.4.2 3D-Vergleiche einzelner Glasscheiben

Da die Korrosionsschichten relativ dünn auf den historischen Gläsern auflagen, wurden zusätzlich zu den Scans der gesamten Fenster, einzelne Scheiben mit einer höheren Auflösung dreidimensional dokumentiert. Hierzu wurde das 75 mm Objektiv, mit einer Auflösung im Punktabstand von 45 μm , verwendet. Mit diesem Objektiv wurde, im Vergleich zum 250 mm Objektiv, pro Einzelscan eine deutlich kleinere Fläche erfasst. Der Bildausschnitt lag bei etwa 5x8 cm, im Gegensatz zu etwa 18x25 cm. Bei einem gleichbleibenden Bildsensor von 5 Megapixeln im Scanner erhöhte sich so die

Oberflächenauflösung von 0,1 mm auf 45 µm. Eine vollumfängliche Erfassung der Fensterfelder und aller Einzelscheiben mit dieser Auflösung konnte aus zeitlichen Gründen nicht erfolgen. Pro Kirche und Dokumentationskampagne mussten die Messungen mit beiden Auflösungsstufen innerhalb von zwei halben Tagen erfolgen. Die Auswahl der dokumentierten Einzelscheiben erfolgte in Absprache mit dem Projektteam und den Restauratoren. Es wurden gezielt Scheiben ausgewählt, die repräsentative Schadensphänomene für die jeweiligen Fenster aufwiesen. Bei den Aufnahmen wurde darauf geachtet auch die umliegenden Bleiruten zu erfassen, um Veränderungen sowohl auf der Glasoberfläche als auch an den Bleiruten zu detektieren.

Die Aufbereitung der Datensätze erfolgte analog zu den Scans der gesamten Fenster. Die Ausrichtung der Scans in GOM Inspect 2018 wurde ebenfalls mittels ICP durchgeführt. Wobei aber lediglich die Oberfläche der Gläser, ohne Bleiruten, für die Berechnung des Alignment genutzt wurde. Dieses auswahlbasierte Ausrichten dient der deutlich exakteren Berechnung der 3D-Vergleiche. Die Restaurierungsmaßnahmen erfolgten bei den Gläsern nicht als flächendeckender Abtrag ganzer Schichtpakete. Es erfolgten vielmehr punktuelle Maßnahmen an den jeweils korrodierten Stellen. Somit war zu erwarten, dass die überwiegende Fläche einer einzelnen Scheibe sich in ihrer Geometrie nicht zu sehr verändern wird. Abweichungen und Verfälschungen der 3D-Vergleiche aufgrund eines Verrutschens der Einzelscheiben zwischen den beweglichen Bleiruten wurde durch das auswahlbasierte Ausrichten ebenfalls entgegengewirkt. Die Standardabweichung bei der Berechnung der 3D-Vergleiche der Einzelscans lag somit durchschnittlich bei etwa 0,05 mm.

Koszewko: In den hochauflösenden 3D-Vergleichen der Einzelscheiben lassen sich diverse Informationen zu den unterschiedlichen Arbeitsschritten der Konservierung fassen. Abbildung 6 zeigt den 3D Vergleich der Innen- und Außenseite einer Einzelscheibe aus einer Wappendarstellung aus Fenster *nll* aus Koszewko. Die Scheibe zeigt einen der beiden Fische (Hechte) des Wappens. Da die Scheibe mittig gebrochen war, wurde das Alignment nur auf eine der beiden Teilscheiben, den vorderen Teil des Fisches, gerechnet. Fünf Maßnahmen sind offensichtlich. Bei einer Betrachtung der Außenseite ist zunächst auffällig, dass die hintere Teilscheibe extreme Veränderungen aufzeigte. Sie verlaufen von über -1 mm im unteren Bereich der Scheibe bis zu + 0,6 mm im oberen Bereich. Hier fand also eine deutliche Verkipfung der Teilscheibe statt. Diese Bewegung war auf ein Zusammenkleben der beiden Teilscheiben zurückzuführen. Im Vorzustand waren die Teilscheiben noch deutlich zueinander verkippt und mit einem Reparaturblei verbunden. Nach der Konservierung bildeten sie eine einheitliche Ebene. Zum Kleben der Teilscheiben war es notwendig, dass die Scheiben ausgebaut wurden. Dazu mussten die Bleiruten vorsichtig geöffnet werden, wodurch Verformungen der Bleiruten entstanden. Die untere Bleirute wurde dabei lediglich aufgebogen. Dies führte zu Veränderungen bis +/- 1 mm. Das obere Blei wurde hingegen ausgetauscht, wodurch deutlich stärkere Veränderungen in der Oberfläche entstanden. Der Vergleich der Innenseite zeigt zudem eine starke Abweichung im Übergang zwischen den beiden Teilscheiben. Hier befand sich vor der Restaurierung ein älteres Reparaturblei, welches nach der Klebung der Scheiben nicht mehr notwendig war und entfernt wurde.

Es lässt sich noch eine weitere Anomalie der Oberfläche greifen: Auf der rechten Teilscheibe (Abb. 6, Außenseite) ist nahe der oberen Bleirute ein Bereich sichtbar, bei dem es ein Anwachsen der Oberfläche im Vergleich zum Vorzustand gab. Hierbei handelt es sich vermutlich um einen Rückstand der Kittmaße. Nachdem die Scheibe geklebt und wieder in das Bleinetz eingefügt wurde, wurde der Zwischenraum zwischen Glasscheibe und Bleirute mit Fensterkitt gefüllt. Hierdurch entstand eine festere Verbindung zwischen Glas und umgebendem Bleinetz, wodurch die Stabilität der Fenster erhöht wurde. Zudem verhinderte dies ein Verrutschen der Einzelscheiben und ein mögliches

Herausfallen der Scheiben. Bei den weißen Bereichen handelt es sich um nicht scanbare Bereiche. Hier war die Lichtdurchlässigkeit des Glases zu hoch für eine Erfassung der Oberfläche mit dem 3D-Scanner.

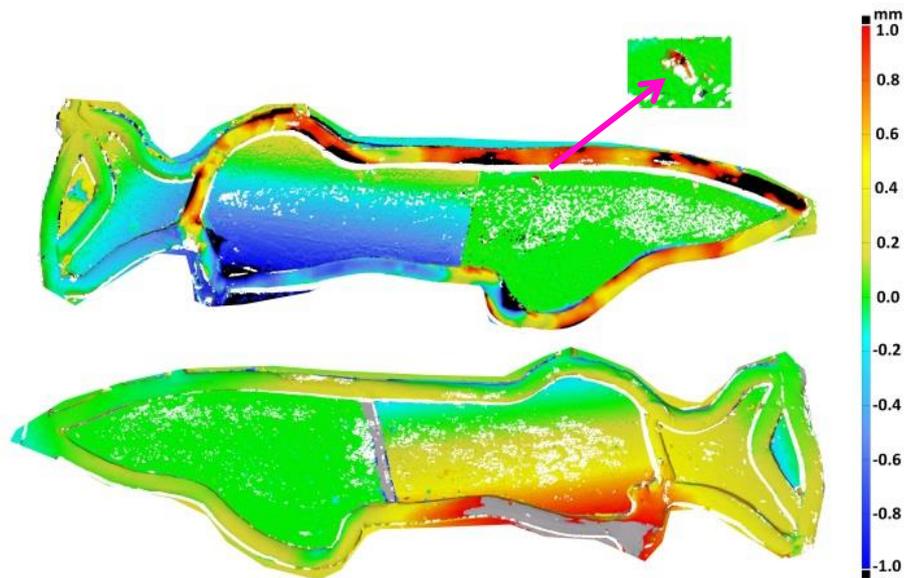


Abb. 6: 3D-Vergleich einer Einzelscheibe von *nII*, Koszewko. Oben: Vergleich der Außenseite; Unten Vergleich der Innenseite.

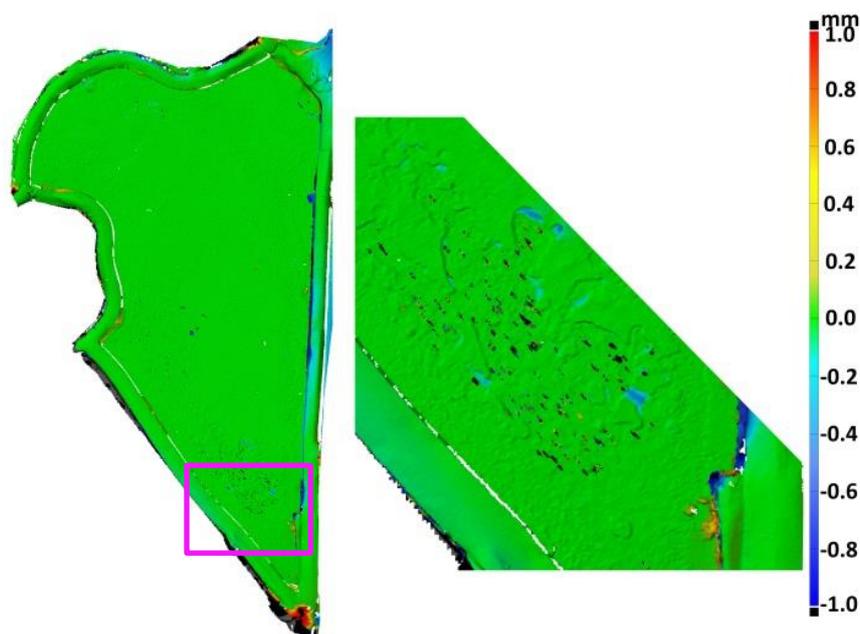


Abb. 7: Übersicht und Detail eines 3D-Vergleichs. Einzelscheibe von *nII*, Koszewko.

In einer weiteren Einzelscheibe des Fensters lässt sich nachweisen, wie vorsichtig und behutsam die Konservierung erfolgte. In der Betrachtung der ganzen Scheibe fallen kaum Veränderungen auf, daher wurde ein Teilbereich in der Darstellung vergrößert (Abb. 7). Der Teilbereich zeigt einen Ausschnitt von der Außenseite des Fensters. Die Außenbereiche waren stärker der Witterung ausgesetzt, weshalb hier per se starke Korrosionsprodukte zu vermuten waren. Der Detailausschnitt zeigt die Oberfläche des Glases mit verschiedenen leichten Versprüngen. Hierbei handelt es sich um die Ränder der aufliegenden Wettersteinkruste. Der 3D-Vergleich zeigt das hier nur ganz vereinzelt lose Bereiche der Kruste entfernt wurden. Die anderen Bereiche scheinen demnach eine stabile Verbindung mit dem Glas aufzuweisen, sodass ein flächiges Abnehmen der Korrosionsschicht nicht nötig war, oder dem Glas

mehr geschädigt hätte. Die schwarzen Bereiche sind auf kleine Fehlstellen im Scan des Vorzustandes zurückzuführen. In der linken Ecke des Ausschnitts ist ein weiterer kleiner Partikel Kittmasse sichtbar.

Das Fenster *nIII* aus Koszewko war vor der Konservierung in einem sichtlich schlechten Zustand (Abb. 1). Diverse Einzelscheiben waren gebrochen und teilweise bereits durch Reparaturbleie fixiert. Im Rahmen der Konservierung wurden diese Bleie entfernt und, wie der Detailausschnitt zeigt (Abb. 8), die zum Teil stark fragmentierten Einzelscheiben wieder zusammengefügt. Hierbei sind keinerlei Rückstände des Klebstoffes auf den Glasflächen detektierbar. Das Acrylharz (Araldit 2020) wurde demnach sorgfältig auf den Bruchkanten der Fragmente aufgetragen, etwaige Überstände wurden entfernt.

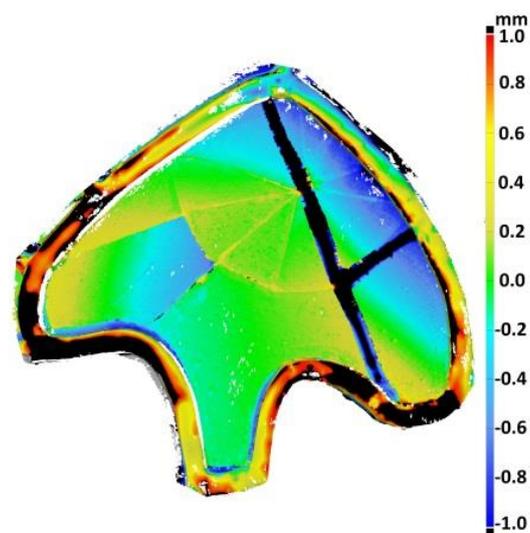


Abb. 8: 3D-Vergleich einer stark fragmentierten Einzelscheibe von *nIII* aus Koszewko, welche während der Restaurierung geklebt wurde.

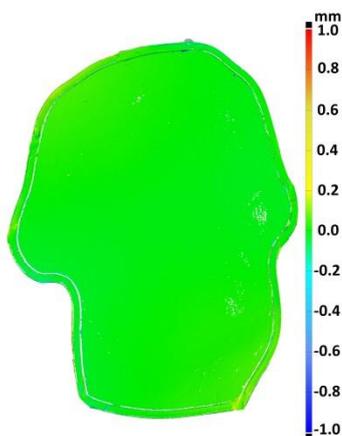


Abb. 9: 3D-Vergleich einer Glasscheibe von *nX3b* aus Liegnitz.



Abb. 10: Links: Durchlichtaufnahme von *nX3b* (Oleszczuk 2019). Rechts: 3D-Scan der Rückseite der Scheibe.

Liegnitz: Der Oberflächenvergleich der Innenseite des Portraits von Martin Luther im Fenster *nX3b* aus der Kirche von Liegnitz zeigt keinerlei messbaren Veränderungen (Abb. 9). Hier sollte die Schwarzlotmalerei gefestigt werden. Die Arbeiten hatten keinerlei Rückstände des Festigungsmittels auf der Oberfläche hinterlassen. In der Betrachtung der Scans einer einzelnen Kampagne ist die filigrane Strichzeichnung des Gesichts deutlich sichtbar (Abb. 3). Ein Vergleich mit der Durchlichtaufnahme der Scheibe zeigt zudem deutlich abweichende Helligkeitsverläufe im Glas, ohne dass es sich um unterschiedlich farbige Scheiben handelt (Abb. 10). Diese Farbwechsel sind auf eine

abweichende Glasstärke der Scheibe zurückzuführen. Auf der Rückseite ist eine deutliche Stufe im Glas zu erkennen. Hier wurde bei der Herstellung der Glasmalerei ein Teil der Oberfläche abgeätzt, wodurch die Scheibe dünner wurde und sich eine andere Lichtbrechung und Färbung ergibt.

Auschwitz: In den 3D-Scans der Fenster aus Auschwitz ist bereits in der Gesamtübersicht das extreme Schadensbild der craquelierten Einzelscheiben deutlich sichtbar (Abb. 11). Die Risse ziehen sich chaotisch durch die Scheiben. Die Darstellung der Innenseite mit den diversen Fehlstellen im Scan zeigt aber auch, dass die Gläser ansonsten in einem verhältnismäßig guten Zustand waren und im Gegensatz zu den deutlich älteren Scheiben aus Koszewko deutlich lichtdurchlässiger waren.

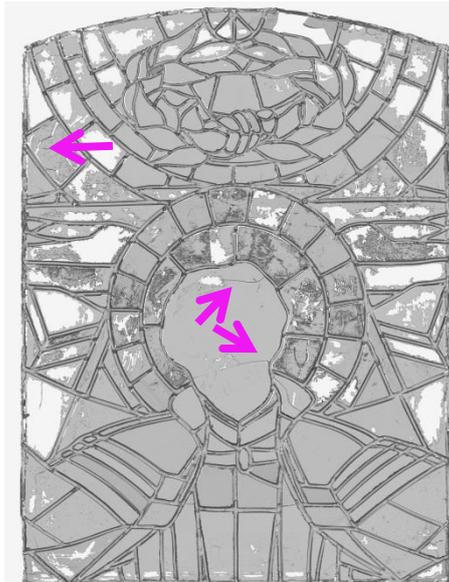


Abb. 11.: Innenseite Fensterfeld 3b aus Auschwitz vor der Restaurierung. Übersicht der Innenseite. Einige Risse im Glas wurden markiert (Pfeile).



Abb. 12.: Innenseite Fensterfeld 3b aus Auschwitz nach der Restaurierung. Aufgrund der deutlich erhöhten Leuchtkraft konnte lediglich die Oberfläche der Malerei und Bleiruten erfasst werden.

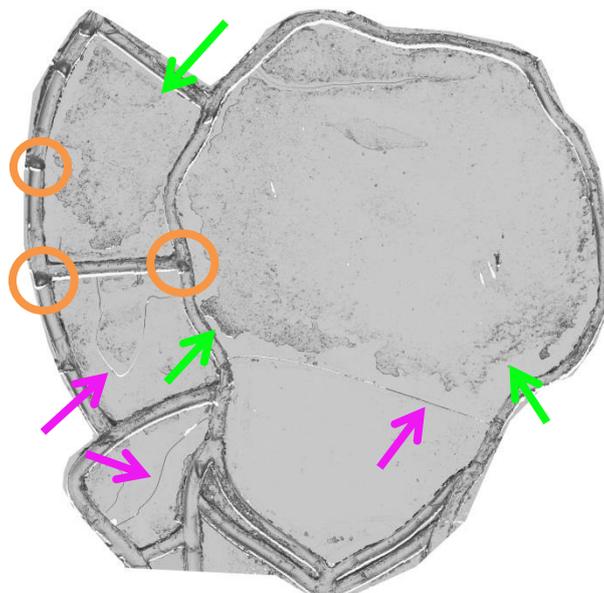


Abb. 13: Fensterfeld 3b aus Auschwitz Detail der Außenseite. Orange: Tropfen an Lötstellen des Bleinetzes. Grün: aufliegende Gipschicht. Pink: Risse im Glas.

Die detaillierte Betrachtung der hochauflösenden Scans liefert weitere Hinweise für den Grund der vielen Risse. An den Knotenpunkten zwischen den einzelnen Bleiruten haben sich sowohl auf der Innenseite wie auch auf der Außenseite, Tropfen aus Lötzinn gebildet (Abb. 13). Die Tropfen befinden sich allesamt an der Unterkante der Lötstelle, und scheinen sich demnach erst gebildet zu haben, als die einzelnen Fensterfelder bereits aufrecht in der Kirche verbaut waren. Wären die Tropfen bereits beim Verbleien der Scheiben in der Glaserwerkstatt entstanden, müsste es auch anders orientierte Tropfen geben, da die Fenster dort horizontal auf einem Tisch bearbeitet worden wären. Es ist daher anzunehmen, dass die Fenster irgendwann im Laufe ihrer Exposition an der Kirche einer starken Hitzequelle ausgesetzt waren. Die Ursache des Feuers konnte jedoch nicht näher geklärt werden. Die Kirche selbst hat seit der Entstehungszeit der Gläser in den 1940er Jahren nicht gebrannt. Daher ist davon auszugehen, dass in der unmittelbaren Nähe der Fenster ein großes Feuer stattgefunden haben könnte, die genauen Umstände bleiben jedoch unklar.

Auf der Außenseite der Fenster in Auschwitz sind im 3D-Scan flächendeckend deutlich sehr unebene Strukturen erkennbar (Abb. 13). Naturwissenschaftliche Untersuchungen haben ergeben, dass es sich hierbei um eine flächig aufgetragene Gipsschlämme handelt, die zu einer deutlichen Verdunkelung der Gläser führte (s. Kap. 3.3). Im Rahmen der Restaurierung wurde diese Gipsschicht entfernt, um die ursprüngliche Leuchtkraft der Gläser wiederherzustellen. Hierbei wurde die Lichtdurchlässigkeit derart erhöht, dass die 3D-Dokumentation des Nachzustandes nur äußerst lückenhaft erfolgen konnte (Abb. 12) und sich die Datensätze nicht für einen 3D-Vergleich nutzen ließen.

6.5 Zusammenfassung und Ausblick

Innerhalb des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass die dreidimensionale Dokumentation historischer Glasscheiben mit einem handelsüblichen Structured Light Scanner sehr wohl möglich ist, ohne dass hierzu aufwändige Sonderkonstruktionen, Modifikationen am Scanner oder die Beschichtung der historischen Kulturgüter nötig ist. Die hochauflösende 3D-Betrachtung der Gläser kann hilfreiche Aussagen zur Arbeitsweise der Glasmaler und zu Schadensphänomenen, vor allem hervorgerufen durch anthropogene Umwelteinflüsse, liefern.

Die großflächige Berechnung von 3D-Oberflächenvergleichen der historischen Fenster vor und nach ihrer Konservierung oder für eine zeitlich versetzte, wiederkehrende Erfassung für Zwecke des Monitorings gestaltet sich dennoch problematisch. Das flexible Bleinetz bietet zu großen Bewegungsspielraum. Im eingebauten Zustand wird die Bewegungsfreiheit als Stoßdämpfer zum Abfangen von Spannungen durch zu starke Windlasten benötigt. Im Arbeitsalltag der Konservierungswerkstätten, muss zudem die ungehinderte Zugänglichkeit der Vorder- und Rückseiten für einen reibungslosen Arbeitsablauf gewährleistet sein. Aus diesen praktischen Gründen ist demnach keine Installation eines fixierten Referenzierungssystems möglich. In den Vergleichen der ganzen Fensterfelder sind demnach nur extreme Veränderungen oder Eingriffe detektierbar. So können Veränderungen des Bleinetzes und Hilfskonstruktionen, wie etwa Verstärkungen am Rand der Fensterfelder, erfasst werden. Darüber hinaus lässt sich indirekt die Veränderung der Lichtdurchlässigkeit der Gläser durch die Reinigung im Rahmen der Konservierung erfassen. Im Vorzustand opake Oberflächen, lassen nach der Konservierung und Reinigung aufgrund ihrer Aufhellung teilweise nicht mehr flächendeckend Vermessen.

Die Betrachtung von 3D-Vergleichen einzelner Glasscheiben liefert jedoch eindruckliche Ergebnisse zum Verlauf der Konservierung. Hier lassen sich sowohl kleinteilige Veränderungen an den Bleiruten, aber auch die behutsamen restauratorischen Maßnahmen an den Glasoberflächen hochauflösend

dokumentieren. Hierbei können sowohl die Entfernung von Korrosionsprodukten, das Kleben von Rissen aber auch Spuren der Fixierung der Einzelscheiben mit Fensterkitt im Bleinetz erfasst werden.

Da die dreidimensionale Vermessung und Berechnung von Oberflächenvergleichen im Kontext der Konservierung von historischen Gläsern vergleichsweise aufwändig sind, ist anzunehmen, dass solch eine Dokumentation nicht flächendeckend an dem gesamten Fensterzyklus einer mittelalterlichen Kirche anwendbar ist. Vielmehr sollte diese Methode gezielt an repräsentativen Einzelfenstern durchgeführt werden, um aussagekräftige Ergebnisse für ein Monitoring der Oberflächenveränderungen und ggf. für eine stichprobenartige Qualitätskontrolle der Konservierungsmaßnahmen zu liefern.

6.6 Literaturangaben

Akce, D. / Remondino, F. / Novák, D. / Hanusch, T. / Schrotter, G. / Gruen, A. (2007): Performance Evaluation of a coded structured light system for cultural heritage applications. In: *Proc. SPIE 6491, Videometrics IX*, 64910V, S. 1-12, DOI: [10.1117/12.705578](https://doi.org/10.1117/12.705578).

Bellendorf, P. (2007): *Metallene Grabplatten aus Franken und Thüringen aus dem 15. bis 18. Jahrhundert - eine interdisziplinäre Studie zum Denkmalbestand und seiner Gefährdung durch Umwelteinflüsse*, Bamberg, Univ., Diss., S. 122-123.

Brepohl, E. (2013): *Theophilus Presbyter und das mittelalterliche Kunsthandwerk*, Böhlau Verlag Cologne/ Weimar/ Vienna.

Chen, T. / Lensch, H. P. A. / Fuchs, C. / Seidel, H.-P. (2007): Polarization and Phase-Shifting for 3D Scanning of Translucent Objects. In: *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR)*, Minneapolis, S. 1-8.

Díaz-Marín, M. D. C. / Aura Castro, E. / Sánchez Belenguer, C. / Vendrell Vidal, E. (2016): Cyclododecane as opacifier for digitalization of archaeological glass. In: *Journal of Cultural Heritage*, 17 S. 131-140, DOI: [10.1016/j.culher.2015.06.003](https://doi.org/10.1016/j.culher.2015.06.003).

Drewello, R. / Kleine, M. / Bellendorf, P. (2010): Das mittelalterliche Mosesfenster in Straubing. In: Piloni, L. / Shepard, M. B. / Strobl, S. (Hrsg.): *The Art of Collaboration Stained-Glass Conservation in the Twenty-first century*, Harvey Miller Publishers, S.183-192.

Drewello, R. / Wetter, N. / Rahrig, M. / Bellendorf, P. (2010): 3D-Dokumentation mittelalterlicher Glasmalerei mit der Methode der 3D-Weißlicht-Streifenprojektion. In: Bornschein, F. / Torge, M. / Sabel, M. / Feldmann, I. / Kohl, A. / Sterzing, N. / Hahn, O. / Drewello, R. / Wetter, N. / Rahrig, M. / Bellendorf, P. (Hrsg.): *Konservierung mittelalterlicher Glasmalerei im Kontext spezieller materieller und umweltbedingter Gegebenheiten*. Dom zu Erfurt St. Marien, Domkapitel, S. 142-154, DOI: [10.5165/hawk-hhg/epublication/43](https://doi.org/10.5165/hawk-hhg/epublication/43).

Drewello, R. / Kleine, M. / Bellendorf, P. (2016): Das Mosesfenster in St. Jakob in Straubing im Schnittpunkt von Wissenschaft, Restaurierung und topografischer Dokumentation. In: *Corpus Vitrearum Deutschland / Germanisches Nationalmuseum (Hrsg.): Originale Kaltmalerei auf historischen Glasmalereien*, arthistoricum.net, Heidelberg S. 73-80, DOI: [10.11588/arthistoricum.383.545](https://doi.org/10.11588/arthistoricum.383.545).

Eren, G. (2010): *3D scanning of transparent objects*. Université de Bourgogne, 2010DIJOS029, tel-00584061, <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00584061> (27. Sept. 2020).

Floth, M. / Breuer, M. (2011): Optische 3D-Messtechniken für die berührungslose, detaillierte Erfassung von Objektoberflächen in Archäologie und Denkmalpflege. In: Heine, K. / Rheidt, K. / Henze, F. / Riedel, A. (Hrsg.): *Von Handaufmass bis High Tech III, 3D in der historischen Bauforschung*, Verlag Philipp von Zabern, Darmstadt/Mainz, S. 8-13.

Gühring, J. (2002): 3D-Erfassung und Objektrekonstruktion mittels Streifenprojektion, In: Deutsche Geodätische Kommission (Hrsg.): *Reihe C Heft Nr. 560*.

Hullin, M.B. / Fuchs, M. / Ihrke, I. / Seidel, H.P. / Lensch, H.P.A. (2008): Fluorescent Immersion Range Scanning. In: *ACM Transactions on Graphics*, 27, Issue 3, Article 87, DOI: 10.1145/1360612.1360686.

Ihrke, I. / Kutulakos, K. N. / Lensch, H. P. A. / Magnor, M. / Heidrich, W. (2010): Transparent and Specular Object Reconstruction. In: *Computer Graphics forum*, Vol. 29, 8, S. 2400-2426, DOI: 10.1111/j.1467-8659.2010.01753.x.

Mériaudeau, F. / Rantson, R. / Fofi, D. / Stolz, C. (2012): Review and comparison of non-conventional imaging systems for three-dimensional digitization of transparent objects. In: *J. Electron. Imag.*, 21 (2), 021105, S. 1-6, DOI: 10.1117/1.JEI.21.2.021105.

Rahrig, M. / Drewello, R. / Lazzeri, A. (2018): Opto-Technical Monitoring – A Standardized Methodology to assess the Treatment of Historical Stone Surfaces. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2, S. 945-952, DOI: 10.5194/isprs-archives-XLII-2-945-2018.

Rantson, R. / Stolz, C. / Fofi, D. / Mériaudeau, F. (2010): Non Contact 3D Measurement Scheme for Transparent Objects Using UV Structured light. In: *20th International Conference on Pattern Recognition*, Istanbul, IEEE, S. 1646-1649, DOI: 10.1109/ICPR.2010.407.

Stylianidis, E. / Remondino, F. (Hrsg.) (2016): *3D Recording, Documentation and Management of Cultural Heritage*, Whittles Publishing, Dunbeath.

Salemi, G. / Achilli, V. / Boatto, G. (2008): 3D Virtual Modelling of a Gothic Stained-Glass Panel. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, Vol. XXXVII, Part B5, S. 297-302.

Wedepohl, K. H. (2003): *Glas in Antike und Mittelalter. Geschichte eines Werkstoffs*, E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.

Yeung, S.K. / Wu, T.P. / Tang, CH. K. / Chan, T. F. / Osher, S. (2011): Adequate reconstruction of transparent objects on a shoestring budget. In: *CVPR 2011*, Colorado Springs, CO, USA, IEEE, S. 2513-2520.

7. Ergebnisse der Infrarot-Thermografischen-Untersuchungen

Mit Hilfe der Infrarot-Thermografie (IRT) sollten die gereinigten und restaurierten Glasmalereien im eingebauten Zustand im Kontext zur Schutzverglasung untersucht werden. Ein besonderer Schwerpunkt lag dabei in der Detektion von Wärmebrücken bzw. Bereichen mit lokal abweichender Oberflächentemperatur, wodurch Wasser auf den historischen Oberflächen kondensieren könnte.

IRT wird häufig in der Bauwerksdiagnostik und Bauforschung eingesetzt, um Materialunterschiede und Schäden zu detektieren. So können durch Putz verdeckte Mauerwerke und Fachwerkskonstruktionen aber auch Risse und Delaminationen erfasst werden (vgl. Luib 2019). Für die Untersuchung der Glasmalereien wurde das Prinzip der stationären passiven Thermografie angewendet, also ohne künstliche Anregungsquelle. Dabei wird nur die natürliche Anregung durch Sonnenlicht und Abschattungseffekte bzw. die Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenbereich berücksichtigt. Zum Einsatz kam eine VarioCAM Infrarotkamera der Fa. InfraTec. Das Gerät arbeitet im langewelligen Infrarotbereich (LWIR) mit einer Sensitivität im Spektralbereich von 7,5 bis 14 μm . Die Kamera verfügt über einen ungekühlten Mikrobolometer Focal Plane Array Detektor mit einer Auflösung von 640 x 480 Pixel, welche mittels opto-mechanischem MicroScan auf 1280 x 960 Pixel erhöht werden kann. Bei einer Genauigkeit von $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ können Temperaturen zwischen -40 und $1200\text{ }^{\circ}\text{C}$ erfasst werden, wobei die verwendete IR-Kamera auf einen Temperaturbereich von -40 ° - $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ kalibriert ist. Dabei ist der Bilddetektor aufgrund sehr kurzer Integrationszeiten des Focal Plane Arrays von schnell wechselnden Umgebungsbedingungen unbeeinflusst (Luib 2019).

Um die zur Detektion von kritischen Bereichen erforderlichen Temperaturunterschiede zwischen Innen- und Außenraum zu gewährleisten, mussten die Messungen im Winter erfolgen. In dieser Jahreszeit ist die Temperaturdifferenz zwischen Innen und Außen in der Regel am höchsten, was bestmögliche Ergebnis erwarten lässt.



Abb. 14: Thermografische Untersuchungen an der Südfassade der Liebfrauenkirche in Liegnitz.

Die Messungen an der Liebfrauenkirche in Liegnitz erfolgten an zwei aufeinanderfolgenden Tagen Mitte Februar 2020. Hierbei wurden auf der Nord- und Südseite jeweils die Fenster untersucht, welche innerhalb des Projektes mit einer Außenschutzverglasung ausgestattet wurden. Hierbei wurden die originalen Fenster wenige Zentimeter in den Innenraum versetzt. Es sollte untersucht werden, ob durch die bauliche Veränderung mögliche thermische Anomalien entstanden sind, welche einen negativen Einfluss auf die Glasmalereien haben könnten. Die beiden Fenster wurden von innen und außen thermografisch dokumentiert (Abb. 14). Die Messungen erfolgten dabei einmal am Nachmittag

und einmal am Vormittag, um im Außenbereich mögliche Fehlinterpretationen durch Temperatureffekte der kalten Nacht und der wärmenden Wintersonne auszuschließen.

Die IRT-Messungen von außen waren wenig aussagekräftig. Der Grund hierfür lag im Material der modernen Schutzverglasungen. Dieses reflektierte die Temperaturen der Umgebung und überdeckte im Thermogramm somit die hinter der Schutzverglasung liegenden historischen Gläser. Eine Überlagerung des Thermogramms mit einem Foto zeigt deutlich die Abgrenzung zwischen der thermischen Reflektion des kalten Himmels und den wärmeren umliegenden Gebäuden und Bäumen (Abb. 15). Die starke Reflektion der Umgebung ist bedingt durch die glatte Oberfläche der modernen Schutzverglasung (hergestellt nach dem Floatglasverfahren) und dem thermischen Verhalten von Glas. Glas weist einen niedrigen Emissionskoeffizienten und einen hohen Reflexionskoeffizienten auf (vgl. Fouad, Richter 2012). Somit wird in den Thermogrammen der Glasoberfläche immer zu einem großen Anteil die Umgebung reflektiert. Stellt sich die Umgebung als thermisch äußerst heterogen dar, wie im Falle der Außenaufnahmen, dominiert dieses Phänomen in den Thermogrammen derart, dass nur wenige bis keine Informationen über die eigentlich zu betrachtende Oberfläche gewonnen werden können.



Abb. 15: Nebeneinanderstellung eines Thermogramms der Außenschutzverglasung der Nordfassade der Liebfrauenkirche in Liegnitz. Links: Thermogramm mit Temperaturbereich (TB) 4 °C (blau) bis 10 °C (pink); Mitte: Farbfoto des gezeigten Bereichs; Rechts: Überlagerung des Fotos mit TB von 4 °C bis 7,5 °C.

Die thermografischen Untersuchungen der Innenseiten sind deutlich weniger durch Reflektionseffekte der Umgebung beeinflusst. Die Wände und Decken im Kircheninnenraum weisen weitgehend gleichmäßige Temperaturen auf, wodurch die Glasoberflächen die Innenraumflächen deutlich homogener reflektieren, als dies außen der Fall ist. Somit waren hier mit der IRT auch geringe Wärmeunterschiede in der Verglasung detektierbar.

Die Untersuchung der Fensterfelder *nX1b* bis *nX3b*, welche die Darstellung Martin Luthers umfasst, zeigte eine sehr gleichmäßige Temperaturverteilung (Abb. 16). Hierbei ließ sich deutlich zwischen den am Rand der Fensterfelder angesetzten Bleibändern, welche sich als schwarze Streifen zwischen Fensterfeld und steinerner Fensterrippe darstellten, und den helleren Glasscheiben unterscheiden. Die Temperaturdifferenz zwischen den Bleiruten und den Glasscheiben variierte zwischen 0,3 ° und 1,3 °C. Es ließen sich keine gravierenden, lokal eingrenzbaeren, materialbezogenen Temperaturunterschiede erfassen, welche auf Hotspots oder Wärmebrücken hindeuteten.

Die Betrachtung des Fensterfeldes auf der Südseite der Kirche zeigte eine vergleichbare Situation (Abb. 17). Der dargestellte Temperaturbereich variierte von 5,5 °C bis 12 °C im unteren Thermogramm Nr. 1, über 4 °C bis 10 °C in den beiden folgenden Thermogrammen (2-3) und 5,5 °C bis 13,5 °C in den Thermogrammen 4 bis 6. Die Anpassung der Temperaturbereiche war notwendig, um den jeweils bestmöglichen Kontrast zwischen den Oberflächen zu erzielen. Aufgrund der Ausrichtung des Fensters nach Süden wurde besonders in den oberen Bereichen das steinerne Maßwerk der Fensterfassung im Laufe des Tages deutlich erwärmt. Gleiches galt für das Thermogramm Nr. 1. Hier wurde das

Sonnenlicht durch den Lüftungsschlitz unterhalb der Fensterfelder reflektiert. Für eine bessere Vergleichbarkeit der Flächen wurde daher eine großzügige Überlappung zwischen den einzelnen Aufnahmen vorgesehen. In den Thermogrammen 2 bis 4 ist auf der linken Bildseite ein dunkler Kältepunkt zu sehen (markiert in Thermogramm Nr. 2), hierbei handelt es sich um den Datenlogger der Klimamessung. Es konnten keine weiteren thermischen Anomalien detektiert werden.

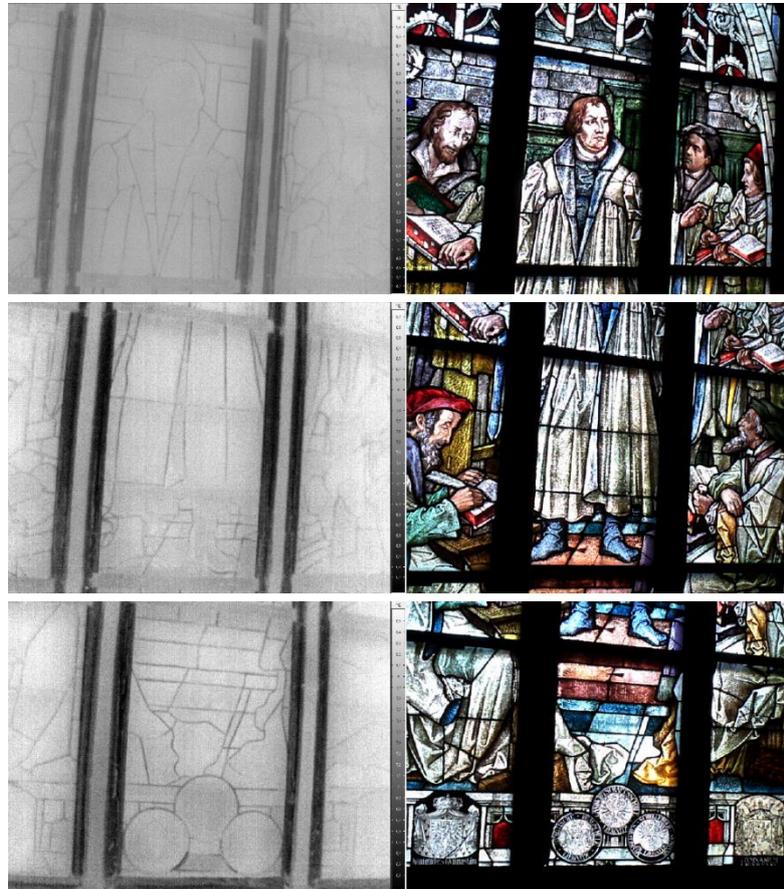


Abb. 16: Links Thermogramme der Fensterfelder nX1b (unten) bis nX3b (oben), rechts daneben die korrespondierenden Felder als Fotografien. Die beiden unteren Thermogramme zeigen einen TB von 6 °C (schwarz) bis 9 °C (weiß), das obere umfasst einen TB von 4 °C (schwarz) bis 10 °C (weiß).

Zur Auswertung der Thermogramme sei angemerkt, dass keine zusätzliche Bestimmung der Emissionsgradwerte unterschiedlicher Materialien (Glasmalerei, gealterte Glasoberfläche, Stein und Metalle) erstellt wurde. Die hier vorgestellte Untersuchung wurde als qualitative thermographische Analyse durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Wärmemustern und thermischen Anomalien lag. Ein Vergleich absoluter radiometrischer Werte oder quantifizierter Temperaturmessungen war durch die Messungen nicht intendiert. Vielmehr handelte es sich um einen Vergleich der gesamten thermischen Muster, welche vom IR-Kamerasensor erfasst wurden (vgl. Luib 2019).

Im Rahmen des Projektes wurden nur die Fenster der Liebfrauenkirche in Liegnitz thermografisch untersucht. In Koszewko hatte sich lediglich eine sehr kleine Fläche von historischen Glasmalereien erhalten. Daher wurde dort keine flächige Schutzverglasung installiert, somit wurde die IRT-Untersuchung obsolet. Die Messungen in Auschwitz konnten aufgrund des Ausbruchs der SARS-CoV-2/COVID-19-Pandemie nicht mehr im Frühjahr 2020 durchgeführt werden. Im weiteren Verlauf des Jahres bis zum Ende der Projektlaufzeit verhinderten die sommerlichen Temperaturen und die andauernde Pandemie die Messungen.

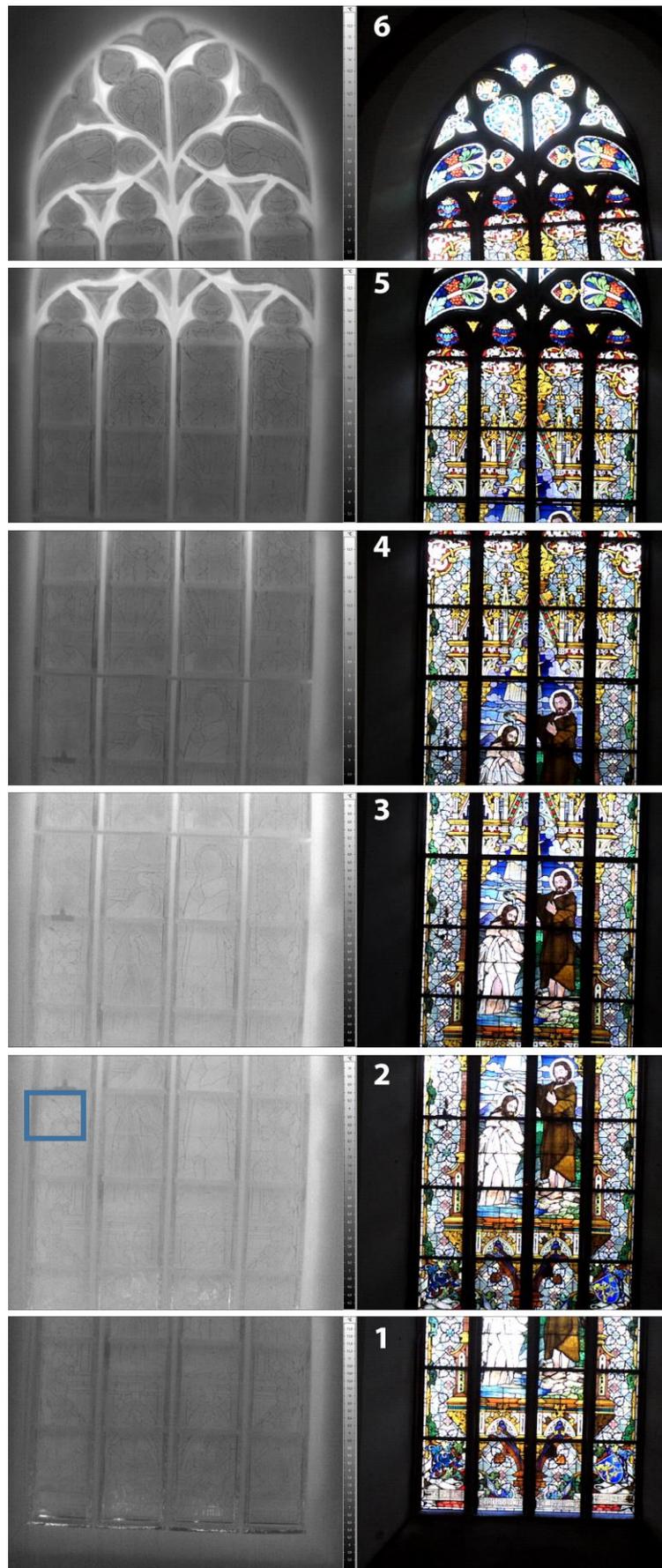


Abb. 17: Thermogramme der Glasmalereien auf der Südseite der Liebfrauenkirche in Liegnitz. Die blaue Hervorhebung zeigt den Klimadatenlogger, dessen Gehäuse kälter als die Umgebung ist.

Literaturangaben:

Fouad, N. A., Richter, T. (2012): *Leitfaden Thermografie im Bauwesen: Theorie, Anwendungsbeispiele, praktische Umsetzung*, Stuttgart, Fraunhofer-IRB-Verlag, 2012.

Luib, A. (2019): Infrared Thermal Imaging as a Non-Destructive Investigation Method for Building Archaeological Purposes. In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, S. 695–702, DOI: [10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-695-2019](https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-695-2019).

8. Diskussion

Das Gesamtprojekt bestand aus zwei Teilen. Es umfasste die von der DBU-geförderten naturwissenschaftlichen Untersuchungen an historischen Glasmalereifenstern einschließlich der gutachterlichen Bewertung ihres Erhaltungszustandes, um so ein Konzept zu ihrer Sanierung und den langfristigen Erhalt durch die Installation einer Außenschutzverglasung zu ermöglichen. Die praktischen Sanierungs- und Erhaltungsmaßnahmen bis hin zum Einbau der Außenschutzverglasung wurden durch die Deutsch-Polnische Stiftung Kulturpflege und Denkmalschutz in Görlitz (DPS) mit Mitteln der Beauftragten der deutschen Bundesregierung für Kultur und Medien finanziert. Beide Teile des Projektes waren eng miteinander verzahnt und der erfolgreiche Abschluss des Vorhabens nur durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Denkmalpflegern und Restauratoren möglich.

Analysen an Gläsern und Malschichten lieferten Erkenntnisse zur chemischen Zusammensetzung der Materialien und ihrer Gefährdung durch Umwelteinflüsse. Die Bestimmung der Zusammensetzung von verkrusteten Ablagerungen war nur ein wichtiger Schritt für die Erstellung eines Restaurierungskonzeptes für die Glasmalereien in Auschwitz. Durch eine aus dem Projekt finanzierte Weiterbildungsmaßnahme für den polnischen Restaurator in der Werkstatt des Kölner Domes war es möglich, in einen regen Meinungsaustausch mit Fachkollegen zu kommen und am Beispiel eines Originalfeldes aus Auschwitz Restaurierungsprobleme und Sanierungsmethoden zu diskutieren, die schließlich in einem Konzept zum Erhalt der Glasmalereien mündeten. Wie wichtig der Einbau von Außenschutzverglasungen in der Liebfrauenkirche in Liegnitz war, zeigt sich allein daran, dass ein Wintersturm das desolate Maßwerk von Fenster nX noch vor Beginn der Restaurierungsarbeiten zum Einsturz brachte. Neben den Glasarbeiten waren hier wie am Fenster sIX auch Steinmetzarbeiten notwendig, um das Maßwerk zu sanieren und eine Außenschutzverglasung zu installieren. Die mittelalterliche Glasmalereifelder der Dorfkirche in Koszewko wurden aus dem Fensterverbund entnommen und mit einem Abstand von 3 cm nach Innen versetzt, vor das mit einer Glasscheibe wieder verschlossenen Fenster. Hier übernimmt die ursprüngliche Fensterverglasung die Funktion der Schutzverglasung. Diese Lösung ist ein innovatives Schutzsystem, das so erstmals in Polen zur Anwendung kam.

Die Wirksamkeit der Schutzverglasungen wurde mit Hilfe von Klimamessungen an unterschiedlichen Positionen des Fensters (innen, im Spalt und außen) überprüft. Die Messungen dauerten jeweils 12 Monate, um die jahreszeitlichen Schwankungen zu berücksichtigen. Zum Einsatz kam die auch schon in vorherigen Projekten verwendete ALMEMO-Messtechnik und an zwei Fenstern (nX, sIX) in Liegnitz zusätzlich das Custos Aeris-Messsystem. Beide Systeme lieferten zuverlässig Messwerte, die in unterschiedlicher Art und Weise ausgewertet wurden. Die Diagramme der ALMEMO-Messungen erlauben einen Vergleich mit früheren Klimamessungen an Objekten in Deutschland und Polen (z.B. für die Dome von Stendal, Havelberg, Leslau, Thorn und anderer Kirchen). Das Custos Aeris-Messsystem wird sich in Zukunft für die Klimamessungen zur Überprüfung der Wirksamkeit von Außenschutzverglasungen etablieren. Es ist leicht zu installieren und lässt sich mit hoher Zuverlässigkeit betreiben. In der vorhandenen Web-Anwendung liefert es zahlreiche Diagramme zur Auswertung der Messergebnisse. Die Abschätzung des thermodynamischen Risikos ermöglicht auch

hier den Vergleich unterschiedlicher Objekte, allerdings sollte in jedem Einzelfall auch die Glaszusammensetzung der Originalverglasung berücksichtigt werden, denn mittelalterliche Gläser und Gläser des 19. Jh. zeigen ein deutlich unterschiedliches Korrosionsverhalten.

Innerhalb des Forschungsprojektes konnte gezeigt werden, dass die dreidimensionale Dokumentation historischer Glasscheiben mit einem handelsüblichen Structured Light Scanner sehr wohl möglich ist, ohne dass hierzu aufwändige Sonderkonstruktionen, Modifikationen am Scanner oder die Beschichtung der historischen Kulturgüter nötig ist. Die hochauflösende 3D-Betrachtung der Gläser kann hilfreiche Aussagen zur Arbeitsweise der Glasmaler und zu Schadensphänomenen, vor allem hervorgerufen durch anthropogene Umwelteinflüsse, liefern. Die Betrachtung von 3D-Vergleichen einzelner Glasscheiben liefert Ergebnisse zum Verlauf der Konservierung. Hier lassen sich sowohl kleinteilige Veränderungen an den Bleiruten, aber auch die behutsamen restauratorischen Maßnahmen an den Glasoberflächen hochauflösend dokumentieren. Hierbei können sowohl die Entfernung von Korrosionsprodukten, das Kleben von Rissen aber auch Spuren der Fixierung der Einzelscheiben mit Fensterkitt im Bleinetz erfasst werden.

Da die dreidimensionale Vermessung und Berechnung von Oberflächenvergleichen im Kontext der Konservierung von historischen Gläsern vergleichsweise aufwändig sind, ist anzunehmen, dass solch eine Dokumentation nicht flächendeckend an dem gesamten Fensterzyklus einer mittelalterlichen Kirche anwendbar ist. Vielmehr sollte diese Methode gezielt an repräsentativen Einzelfenstern durchgeführt werden, um aussagekräftige Ergebnisse für ein Monitoring der Oberflächenveränderungen und ggf. für eine stichprobenartige Qualitätskontrolle der Konservierungsmaßnahmen zu liefern.

Im Rahmen des Projektes wurden die Fenster der Liebfrauenkirche in Liegnitz thermografisch untersucht. Die Messungen wurden als qualitative thermographische Analyse durchgeführt, wobei der Schwerpunkt auf der Untersuchung von Wärmemustern und thermischen Anomalien lag. Ein Vergleich absoluter radiometrischer Werte oder quantifizierter Temperaturmessungen war durch die Messungen nicht intendiert. Vielmehr handelte es sich um einen Vergleich der gesamten thermischen Muster, welche vom IR-Kamerasensor erfasst wurden. Zur Auswertung der Thermogramme sei angemerkt, dass keine zusätzliche Bestimmung der Emissionsgradwerte unterschiedlicher Materialien (Glasmalerei, gealterte Glasoberfläche, Stein und Metalle) erstellt wurde.

9. Öffentlichkeitsarbeit

Nach dem Abschluss der Sanierungsarbeiten an den Glasmalereien, ihrem Wiedereinbau und der Fertigstellung der Außenschutzverglasung in den drei Objekten in Koszewko, Auschwitz und Liegnitz erfolgte jeweils die Abnahme der Arbeiten durch die örtliche Denkmalpflege in Anwesenheit der regionalen Presse, Rundfunk und Fernsehmedien. In allen drei Objekten wurden Hinweistafeln angebracht, die in deutscher und polnischer Sprache die Geldgeber für diese Vorhaben benennen und mit den jeweiligen Logos auf die Förderinstitutionen verweisen. Die Vertreter der jeweils zuständigen polnischen Denkmalpflegämter wurden von den Beteiligten über alle Details und die Funktionsweise der Außenschutzverglasung informiert. Dieses Informations- und Weiterbildungsangebot wurde auch bei den offiziellen Abnahmen der restaurierten Fenster von den beteiligten Denkmalpflegern und Kunsthistorikern gern angenommen.

Teilergebnisse des Vorhabens wurden auf wissenschaftlichen Tagungen und in Zeitschriften bzw. online veröffentlicht. Die Ergebnisse des Restaurierungsprojektes in Koszewko wurden als Posterbeitrag mit dem Titel **„EDX-Untersuchungen an mittelalterlichen Gläsern und innovativer Schutz der Glasmalereifelder“** auf der Internationalen Tagung AIHV2018 vom 03.-7.09.2018 in Istanbul präsentiert. Mit den gleichen Autoren M. Torge, K. Seneschal-Merz, I. Feldmann, M. Bücken, S. Oleszczuk wurden die Ergebnisse unter dem Titel **„EDX-Analysis on medieval glasses and innovative protection of stained glass panels“** auf dem 93rd Annual Meeting of DGG and Annual Meeting of USTV vom 13.-15.05 in Nürnberg vorgestellt. Auf einer weiteren internationalen Tagung in Avila 2019, 01.-05.09.2019 (Spanien) wurden die Ergebnisse vom Structured Light Scanning an ausgewählten Glasmalereifeldern aus Koszewko, Liegnitz und Auschwitz präsentiert und von der International Society of Photogrammetry and Remote Sensing veröffentlicht: Rahrig, Max / Torge, Manfred (2019): **„3D Inspection of the restoration and conservation of Stained Glass Windows using high resolution Structured Light Scanning.“** In: *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLII-2/W15, 2019, pp. 965–972, Doi: <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-2-W15-965-2019>. (peer reviewed). Die Ergebnisse der 3D-Messungen sind auch Inhalt einer Dissertation: Rahrig, Max (2021): **„Bildgebende zerstörungsfreie Prüfmethode in der Kulturerbeforschung“**, Veröffentlichung der Doktorarbeit an der Universität Bamberg, erscheint voraussichtlich im März 2021. (Hier erfolgt eine eins-zu-eins Wiedergabe des Artikels Rahrig/Torge 2019, welcher Bestandteil der kumulativen Promotion ist.) Eine weitere Veröffentlichung von Ergebnissen erfolgt in: Rahrig, Max / Bellendorf, Paul (2021): **„Historische Glasfenster in Polen – 3D-Scans zur Evaluation von Restaurierungsmaßnahmen.“** In: Arera-Rütenik, T. / Bellendorf, P. / Breitling, S. / Drewello, R. / Hess, M. / Vinken, G. (Hrsg.): *Kompetenzzentrum Denkmalwissenschaften und Denkmaltechnologien 2018 – 2020*, KDWT (Hrsg.): Berichte des KDWT Band 2, S. 148 – 152, im Druck.

Es ist weiterhin vorgesehen den Abschlussbericht im Fraunhofer-IRB-Verlag in der Reihe Bauforschung Denkmalpflege zu publizieren und so einer breiten Öffentlichkeit zugänglich zu machen.

Die in den Objekten installierten Außenschutzverglasungen dienen als Modell für die Weiterführung der Arbeiten, insbesondere in der Liebfrauenkirche in Liegnitz wo noch 12 wertvolle Glasmalereifenster den direkten Umweltbedingungen ausgesetzt sind.

10. Fazit

Naturwissenschaftliche Untersuchungen an historischen Glasmalereifenstern und praktische Sanierungs- und Erhaltungsmaßnahmen bis hin zum Einbau der Außenschutzverglasung waren eng miteinander verzahnt und der erfolgreiche Abschluss des Vorhabens nur durch die interdisziplinäre Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern, Denkmalpflegern Restauratoren und Eigentümer möglich. Der Projektfortschritt war jeweils abhängig von der Finanzierung der praktischen Arbeiten zur Sanierung der Glasmalereien. Insbesondere zu Beginn des Projektes waren daher intensive Gespräche zwischen Vertretern der BAM, der Deutsch-Polnischen-Stiftung und der Beauftragten für Kultur und Medien notwendig. Erst mit dem beschlossenen Haushalt der neuen Regierung im Jahre 2017 konnten die praktischen Arbeiten im 3. Quartal begonnen werden. Der ursprüngliche Arbeitsplan wurde den tatsächlichen Gegebenheiten angepasst und das Projekt konnte aufgrund dieser Verzögerungen zu Beginn auch erst im November 2020 abgeschlossen werden. Die Arbeitsschritte wurden wie im Arbeitsplan vorgegeben auch eingehalten. Sanierungskonzepte wurden jeweils mit dem zuständigen Restaurator besprochen und das Objekt in Teilschritten bearbeitet und von den beteiligten Gutachtern abgenommen. Die naturwissenschaftlichen Untersuchungen erfolgten begleitend zu den praktischen Arbeiten. Bei regelmäßigen Treffen in der Restaurierungswerkstatt erfolgte ein intensiver Meinungsaustausch, so dass die bestmögliche Lösung für das Restaurierungsobjekt gefunden wurde. Hierbei war auch der Aufenthalt des polnischen Restaurators in der Werkstatt des Kölner Domes von besonderer Bedeutung. Einen Weiterbildungseffekt hatte dieser Aufenthalt durch die intensiven Diskussionen am zu restaurierenden Objekt letztendlich für alle Beteiligten. Ein Informations- und Weiterbildungsangebot wurde auch bei den offiziellen Abnahmen der restaurierten Fenster von den beteiligten Denkmalpflegern und Kunsthistorikern gern angenommen und es hat sich bei dieser Gelegenheit auch bewährt, über alle Details und die Funktionsweise der Außenschutzverglasung zu informieren. Die Zusammenarbeit mit den Projektpartnern der Universität in Bamberg erwies sich als sehr gut und war so abgestimmt, dass Glasmalereifelder vor und nach der Bearbeitung untersucht werden konnten. Die Ergebnisse der 3D-Scans an Glasmalereien sind für ein Monitoring von Oberflächenveränderungen geeignet.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass die Finanzierung des Gesamtprojektes durch DBU und BKM sowie ein Netzwerk von Spezialisten dazu beigetragen haben, dass materielles Kulturerbe in Polen erhalten bleibt und am Ende des Projektes in einem besseren Zustand ist als zu Beginn.

Projektteam:

An der Bearbeitung des Projektes (BAM-Vorhaben 4104) waren folgende Mitarbeiter beteiligt:

Projektleiter, BAM 4.5	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	Dr. Karine Seneschal-Merz
	Dipl.-Ing. (FH) Ines Feldmann

Externe wissenschaftliche Einrichtungen:

Otto-Friedrich-Universität Bamberg:	Prof. Dr. Rainer Drewello Prof. Dr. Paul Bellendorf
Structured-Light-Scanning	Max Rahrig (MA) Sören Siebe (MA)
Thermographie	Eva Basse, (MA) Leander Pallas (BA) Christoph Altmann (BA)

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



Anhang

- Abbildungsverzeichnis
- Tabellenverzeichnis
- Auswahl von Klimadiagrammen - ALMEMO-Messtechnik
- Auswahl von Klimadiagrammen - Custos Aeris-Messtechnik
- Arbeitsplan

Abbildungsverzeichnis

Bild 1: Mittelalterliche Wappenscheiben in der Dorfkirche Koszewko

Bild 2: Liebfrauenkirche Liegnitz Fenster nX (Detail), Werkstatt Linnemann, Frankfurt/M

Bild 3: Liebfrauenkirche Liegnitz Fenster sIX, Werkstatt A. Seiler, Breslau 1902

Bild 4: Glasmalerei mit Craqueléschäden in der Pfarrkirche Auschwitz

Bild 5: Koszewko, Feld sIII

Bild 6: Koszewko, Feld nIII

Bild 7: Probenahme von Goetheglas aus dem Fenster I

Bild 8: Fenster nX mit Schäden im Maßwerk

Bild 9: Fenster nX, Glasstück aus Maßwerk und Schäden in Feld 6b

Bild 10: Elektronenmikroskopische Aufnahme; Probe P2 mit Schwarzlot

Bild 11: Elementspektrum im Bereich des Schwarzlotes auf Probe 2

Bild 12: Elektronenmikroskopische Aufnahme, Bereiche mit Lasur auf Probe 3

Bild 13: Elementspektrum im Bereich der Lasur auf Probe 3

Bild 14: Fenster nII, Pfarrkirche Auschwitz

Bilder 16-20: Glasproben aus dem Fenster mit der Darstellung des heiligen Märtyrers Andreas Bobola

Bild 21: Detailaufnahme mit „Zinnnasen“ und Glassprüngen

Bild 22: Elektronenmikroskopische Aufnahme am Glasquerschnitt

Bild 23: Entnahme einer Pulverprobe in der Restaurierungswerkstatt

Bilder 24, 25: ESEM-Aufnahme, Rückseite der Materialprobe mit Bestandteilen des Glases (Si, Al, Mg) und Gips (Ca, S)

Bilder 26, 27: ESEM-Aufnahme der Oberflächenmorphologie und Elementanalyse der Materialprobe, Hauptbestandteil ist Gips (Ca, S)

Bild 28: Custos aeris Messsystem mit Haupt- und Schutzglasmodul /iXtronics/

Bild 29: Montagelösung des Custos Aeris-Messsystems

Bild 30: Schematische Übersicht der Messstellen

Bilder 31-33: Anordnung der Fenster nIII und sIII im Grundriss der Dorfkirche von Koszewko

Bild 34: Grundriss Liebfrauenkirche Liegnitz mit den Fenstern sIX und nX

Bild 35: Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster nX

Bild 36: Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster sIX

Bild 37: Pfarrkirche Auschwitz, Fenster nII

Bild 38: Grundriss der Pfarrkirche Auschwitz

Bilder 39-49: Klimadiagramme Dorfkirche Koszewko, Fenster sIII

Bilder 50-56: Klimadiagramme Dorfkirche Koszewko, Fenster nIII

Bild 57: Tauwasserbildung auf der Innenseite der Schutzverglasung im April 2019, beim Ausbau der Messtechnik beobachtet

Bilder 58-66: Klimadiagramme Pfarrkirche Auschwitz, Fenster nI

Bilder 67-76: Klimadiagramme Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster nX

Bilder 77-88: Custos Aeris, Klimadiagramme Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster nX

Bilder 89-97: Klimadiagramme Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster sIX

Bilder 98-109: Custos Aeris, Klimadiagramme Liebfrauenkirche Liegnitz, Fenster sIX

Abb. 1: Übersicht der untersuchten Fensterfelder. Oben v.l.n.r.: Koszewko *nII*, *nIII*, *sIII*. Unten v.l.n.r.: Liegnitz *nX3b*, *nX4b* sowie Auschwitz *3b* und *2b*. (Oleszczuk 2017-2019)

Abb. 2: Auschwitz *2b*; Vergleich unterschiedlicher Belichtungseinstellungen. Links: Setup mit Polarisationsfilter vor der Kamera und der maximalen Lichtstärke. Die Einstellung ist für eine Messung zu dunkel. Rechts: Setup ohne Polarisationsfilter, mit dem Scanner in einem Winkel von 70° zur Oberfläche ausgerichtet. Es ergeben sich ideale Einstellungen zur Messung, ohne Reflektionen auf der Glasoberfläche.

Abb. 3: Übersicht verschiedener Oberflächendetails im 3D-Scan. Oben links: Farbauftrag der Schwarzlotmalerei in einem Gesicht. Unten links: Ablagerungen von Schmutz und Staub auf der Glasoberfläche, darunter eine saubere Glasoberfläche als Negativbefund (keine Oberfläche messbar). Rechts: Stark korrodierte Glasoberfläche mit einem horizontal eingefügten Reparaturblei.

Abb. 4: Nebeneinanderstellung von Fensterfeld *nX4b* aus Liegnitz. Links: Vorzustand. Rechts: Nach der Reinigung und Konservierung.

Abb. 5: 3D-Vergleich der Außenseite von *nIII* aus Koszewko vor und nach der Restaurierung.

Abb. 6: 3D-Vergleich einer Einzelscheibe von *nII*, Koszewko. Oben: Vergleich der Außenseite; Unten Vergleich der Innenseite.

Abb. 7: Übersicht und Detail eines 3D-Vergleichs. Einzelscheibe von *nII*, Koszewko.

Abb. 8: 3D-Vergleich einer stark fragmentierten Einzelscheibe von *nIII* aus Koszewko, welche während der Restaurierung geklebt wurde.

Abb. 9: 3D-Vergleich einer Glasscheibe von *nX3b* aus Liegnitz

Abb. 10: Links: Durchlichtaufnahme von *nX3b* (Oleszczuk 2019). Rechts: 3D-Scan der Rückseite der Scheibe.

Abb. 11.: Innenseite Fensterfeld *3b* aus Auschwitz vor der Restaurierung. Übersicht der Innenseite. Einige Risse im Glas wurden markiert (Pfeile).

Abb. 12.: Innenseite Fensterfeld *3b* aus Auschwitz nach der Restaurierung. Aufgrund der deutlich erhöhten Leuchtkraft konnte lediglich die Oberfläche der Malerei und Bleiruten erfasst werden.

Abb. 13: Fensterfeld 3b aus Auschwitz Detail der Außenseite. Orange: Tropfen an Lötstellen des Bleinetzes. Grün: aufliegende Gipsschicht. Pink: Risse im Glas.

Abb. 14: Thermografische Untersuchungen an der Südfassade der Liebfrauenkirche in Liegnitz.

Abb. 15: Nebeneinanderstellung eines Thermogramms der Außenschutzverglasung der Nordfassade der Liebfrauenkirche in Liegnitz. Links: Thermogramm mit Temperaturbereich (TB) 4 °C (blau) bis 10 °C (pink); Mitte: Farbfoto des gezeigten Bereichs; Rechts: Überlagerung des Fotos mit TB von 4 °C bis 7,5 °C.

Abb. 16: Links Thermogramme der Fensterfelder nX1b (unten) bis nX3b (oben), rechts daneben die korrespondierenden Felder als Fotografien. Die beiden unteren Thermogramme zeigen einen TB von 6 °C (schwarz) bis 9 °C (weiß), das obere umfasst einen TB von 4 °C (schwarz) bis 10 °C (weiß).

Abb. 17: Thermogramme der Glasmalereien auf der Südseite der Liebfrauenkirche in Liegnitz. Die blaue Hervorhebung zeigt den Klimadatenlogger, dessen Gehäuse kälter als die Umgebung ist.

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Zusammensetzung von Gläsern aus Koszewko in Masse % (EDX-standardfrei)

Tabelle 2: Zusammensetzung von Gläsern aus Koszewko in Masse % (EDX-standardfrei)

Tabelle 3: Chemische Zusammensetzung der Gläser aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz, Fenster nX in Masse % (EDX-standardfrei)

Tabelle 4: Chemische Zusammensetzung von Malschichten und Korrosionsprodukten von Proben aus der Liebfrauenkirche in Liegnitz, Fenster nX in Masse % (EDX-standardfrei)

Tabelle 5: Chemische Zusammensetzung von Glasproben aus der Kirche in Auschwitz, Fenster nII in Masse %, (EDX-standardfrei)

Tabelle 6: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 04/18-04/19 am Fenster sIII in Koszewko

Tabelle 7: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 04/18-04/19 am Fenster nIII in Koszewko

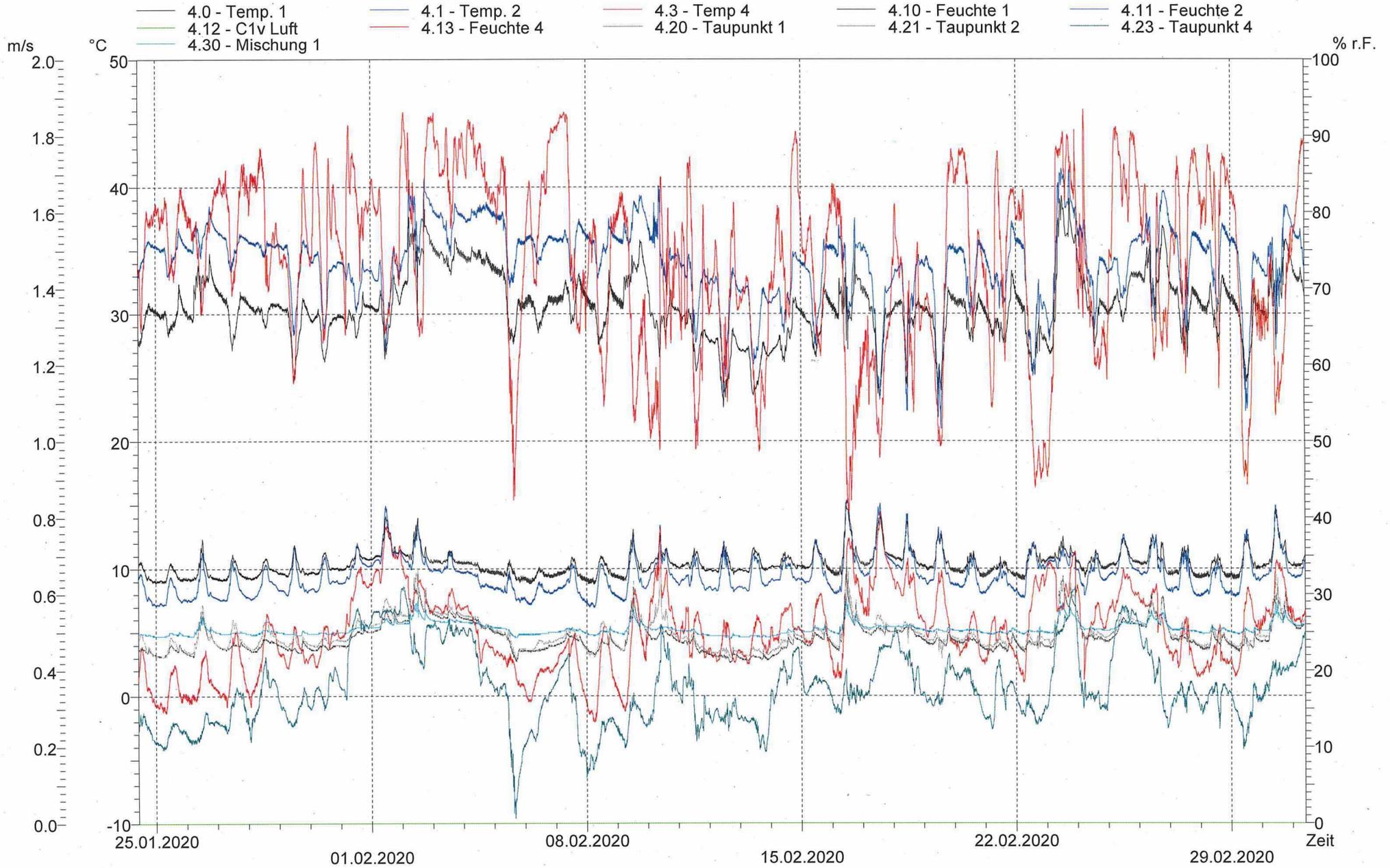
Tabelle 8: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 07/19-06/20 am Fenster nII in Auschwitz

Tabelle 9: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 10/18-09/19 am Fenster nX in Liegnitz (L2)

Tabelle 10: Extremwerte der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit im Messzeitraum 10/19-09/20 am Fenster sIX in Liegnitz (L3)

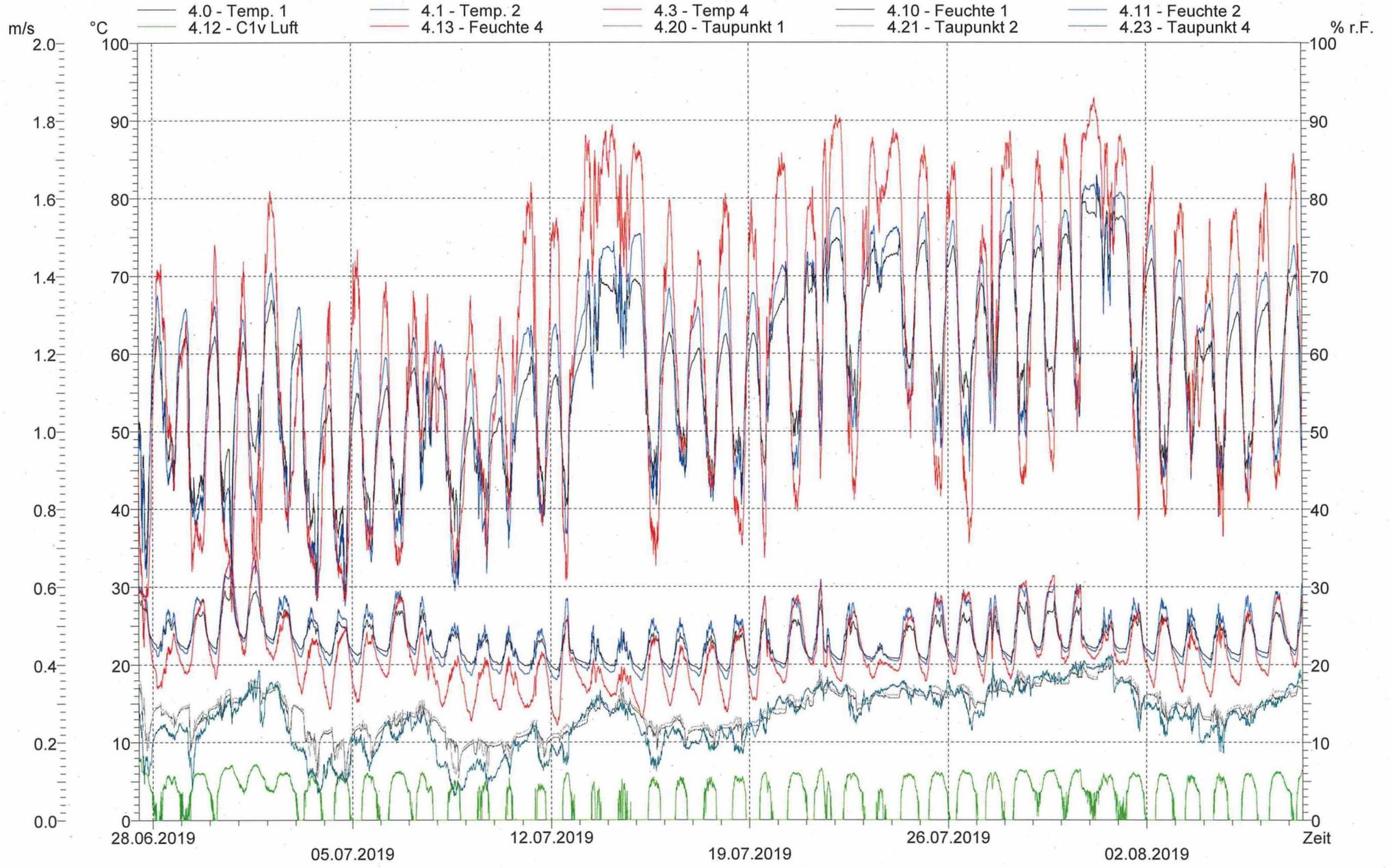
2020-03-02-Au.amr

Klimamessungen Auschwitz 1 24.01.-02.03.2020



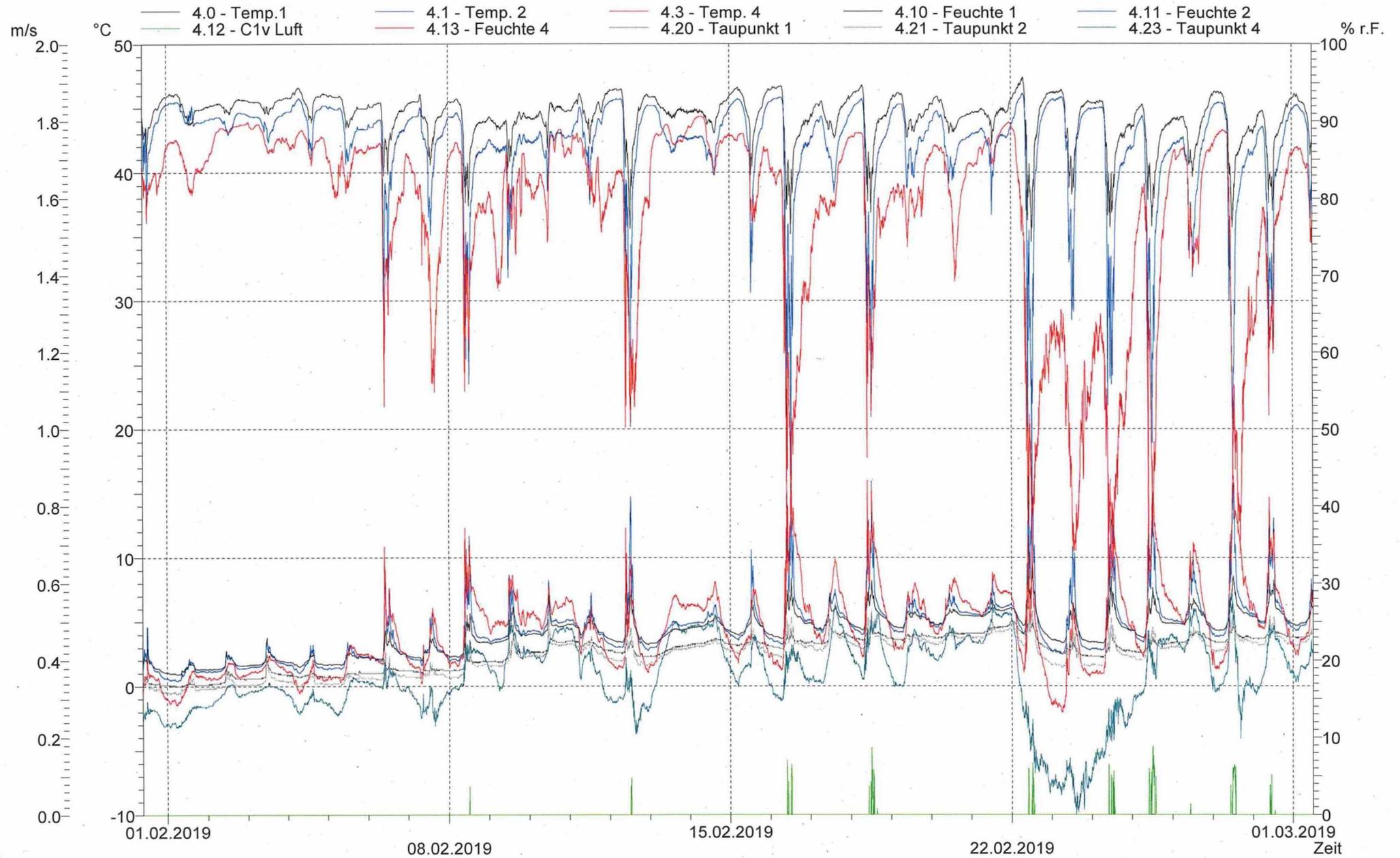
2019-08-07-Au.amr

Klimamessungen Auschwitz 27.06.-07.08.2019



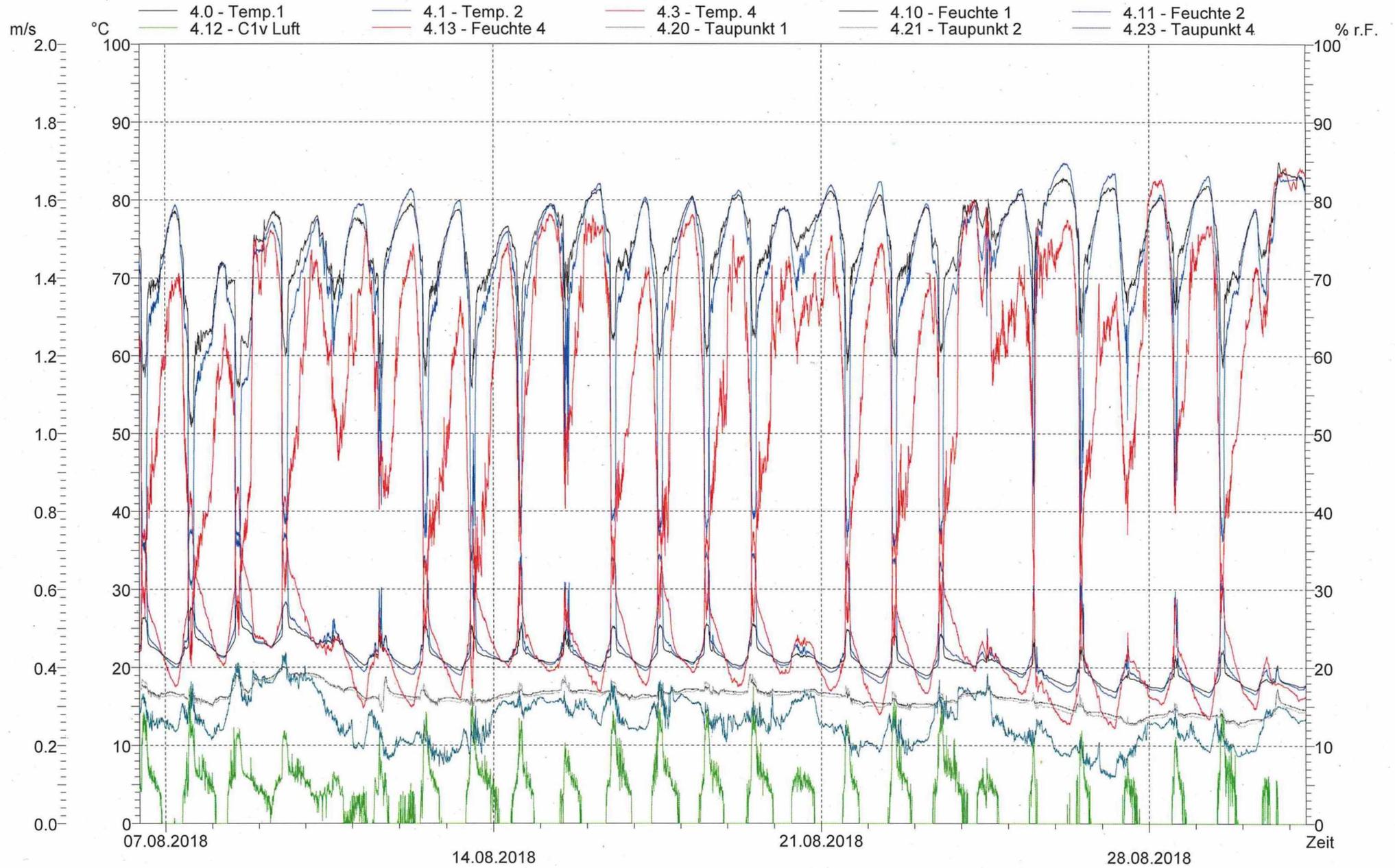
2019-03-01-K1.amr

Klimamessungen Koszewko K1 31.01.-1.3.2019



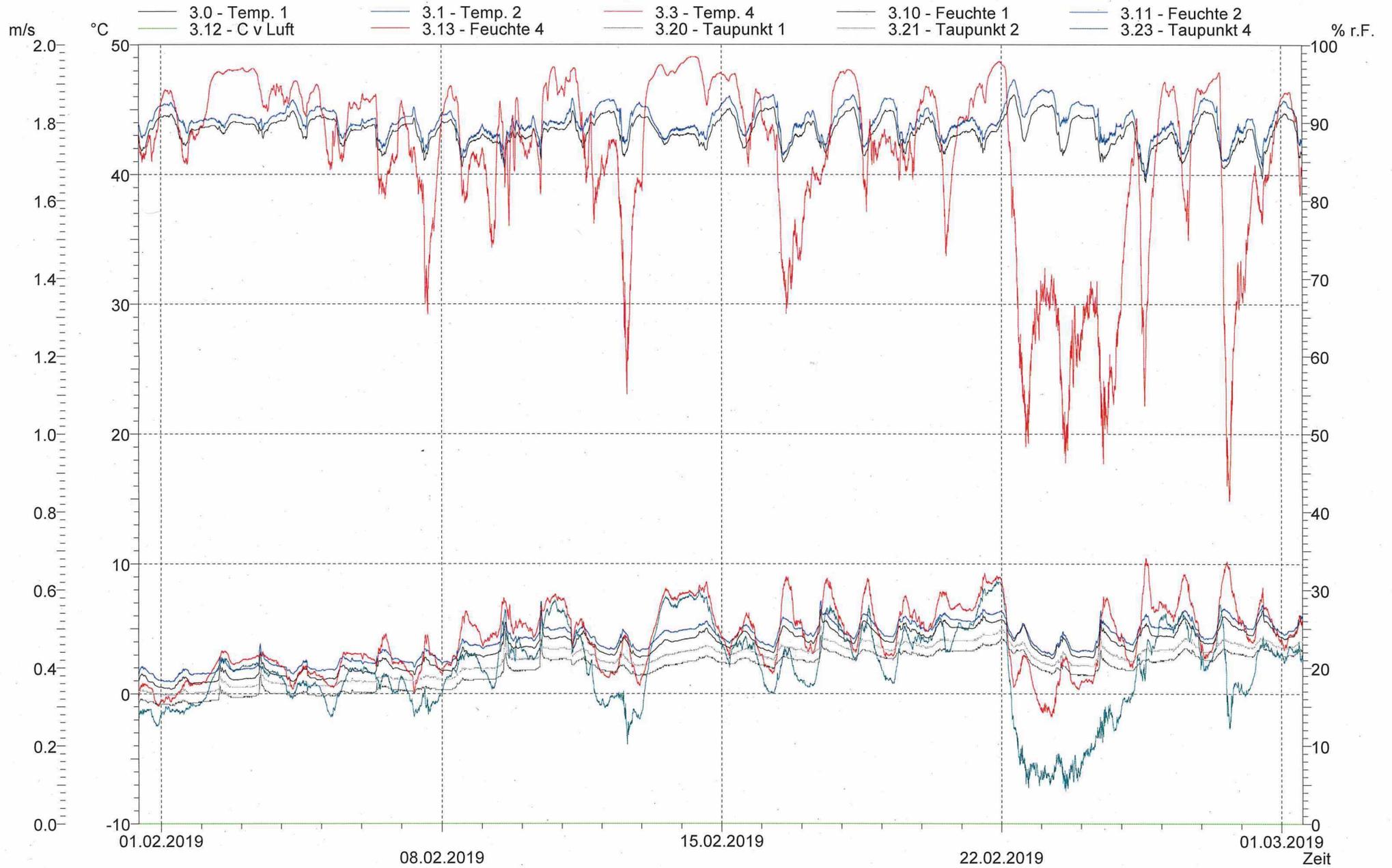
2018-08-31-K1.amr

Klimamessungen Kosz.1 06.-31.08.2018



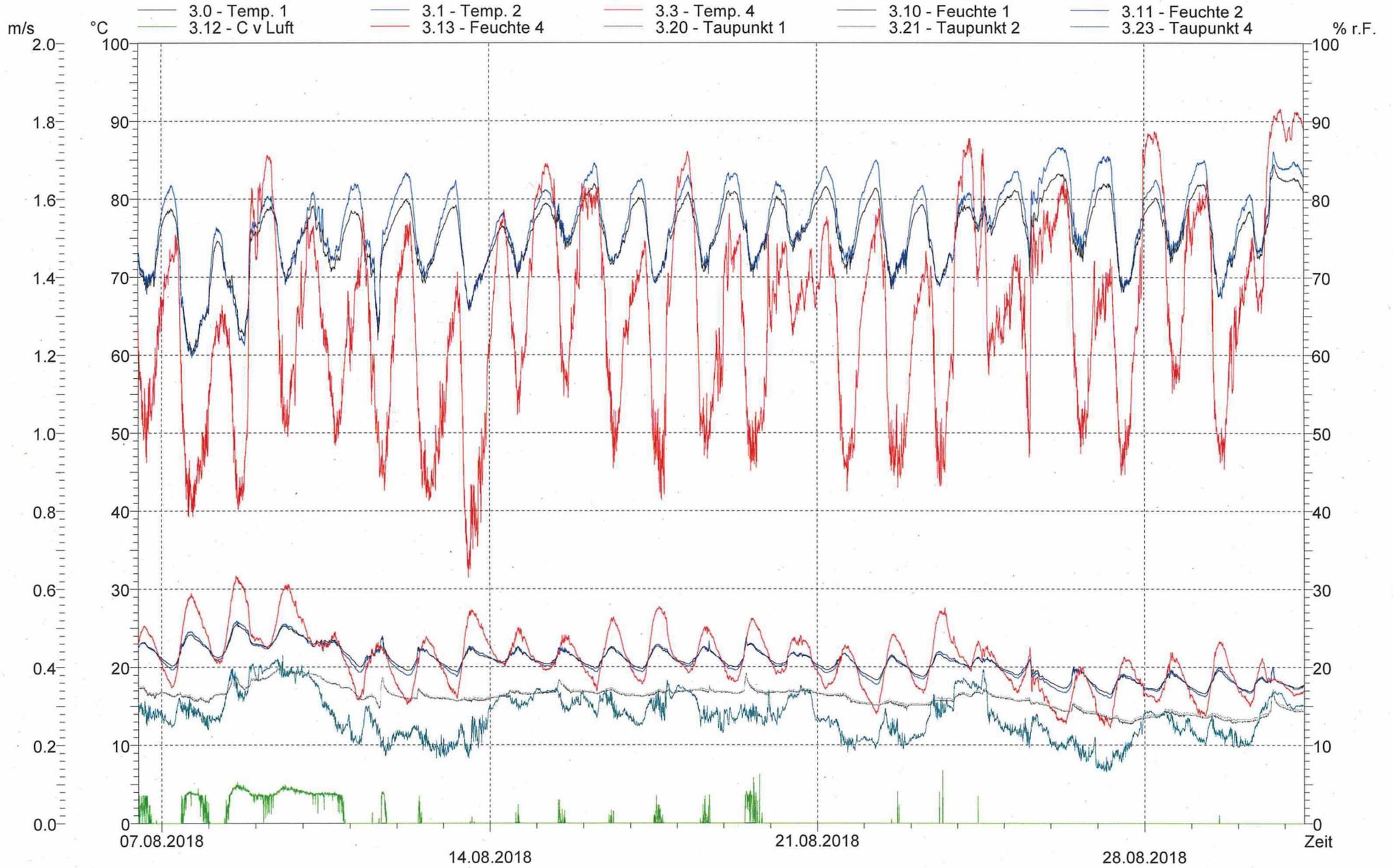
2019-03-01-K2.amr

Klimamessungen Koszewko 2 31.01.-1.03.2019



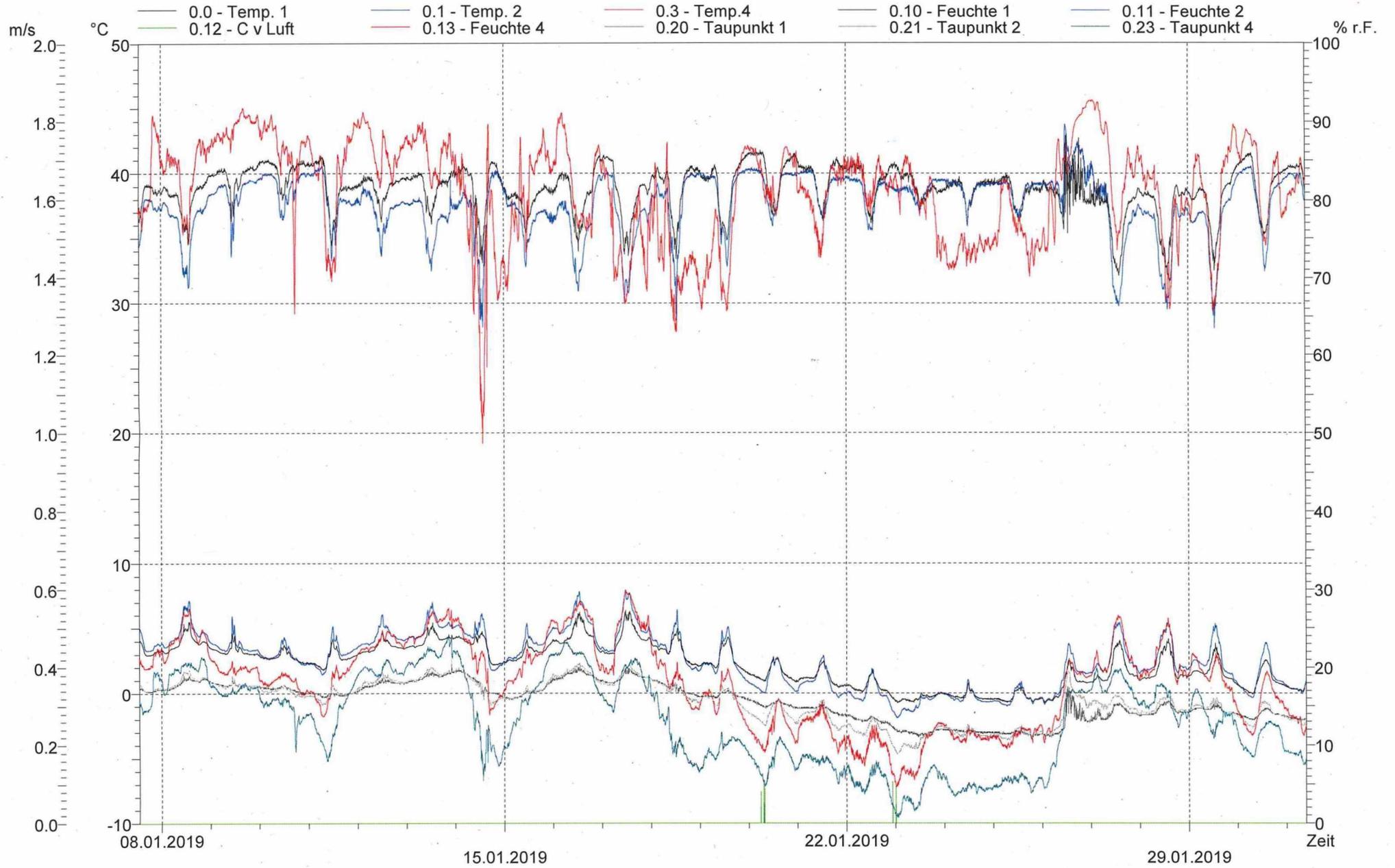
2018-08-31-K2.amr

Klimamessungen Kosz.2 06.-31.08.2018



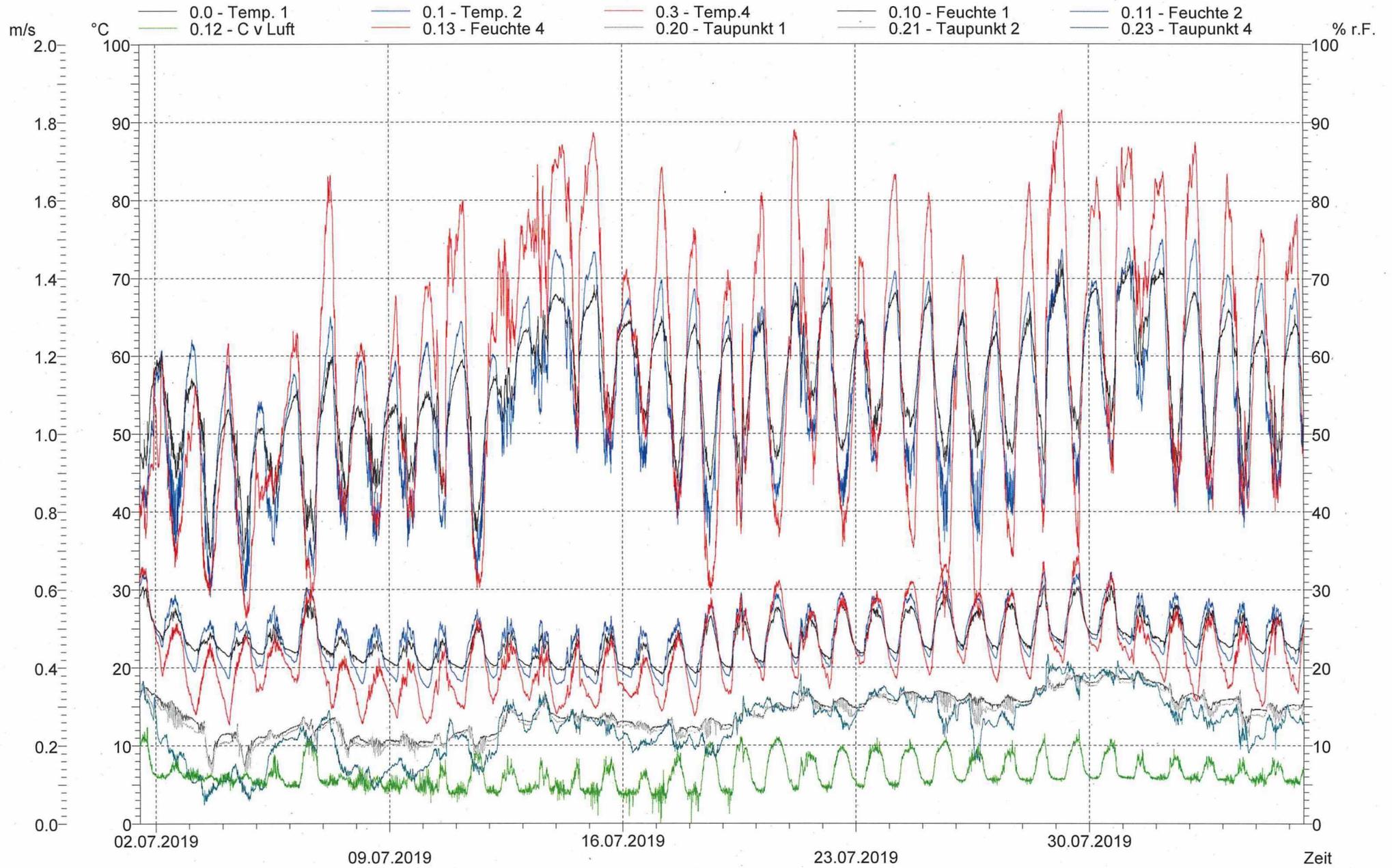
2019-01-31-L1.amr

Klimamessungen Liegnitz L1 08.-31.01.2019



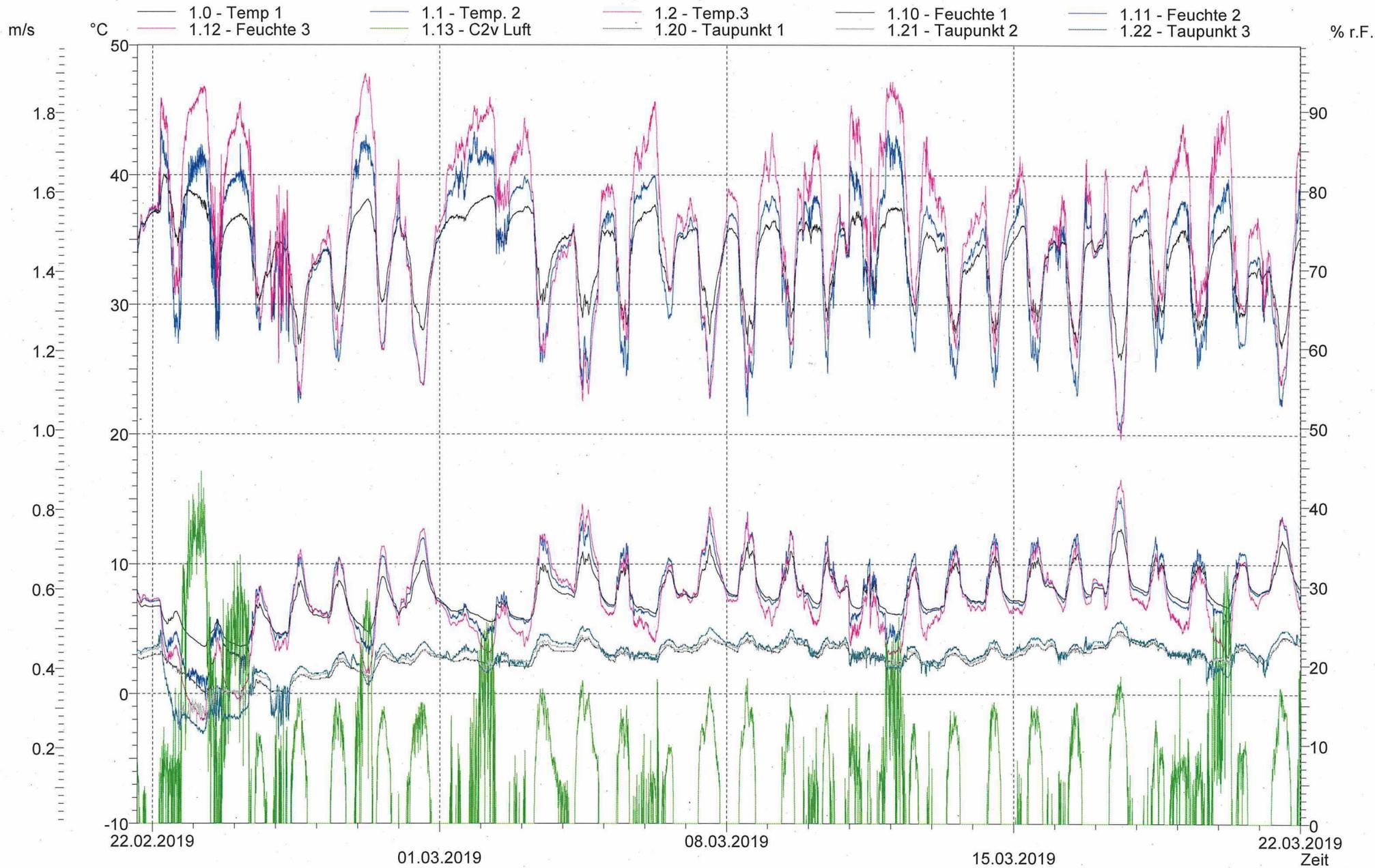
2019-08-05-L1.amr

Klimamessungen Liegnitz L1 01.07.-05.08.2019



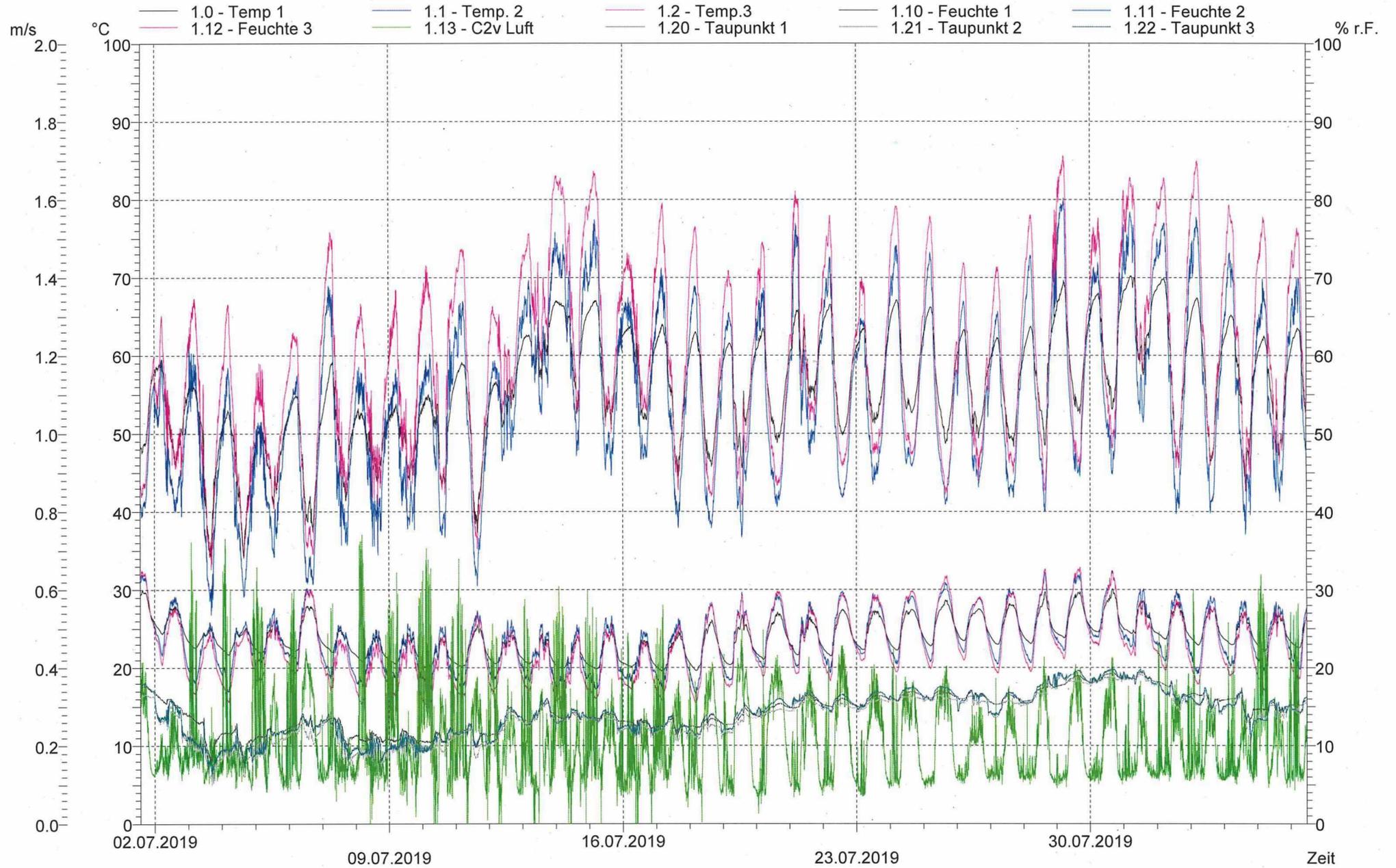
2019-04-08-L2.amr

Klimamessungen Liegnitz 2 22.02.-22.03.2019



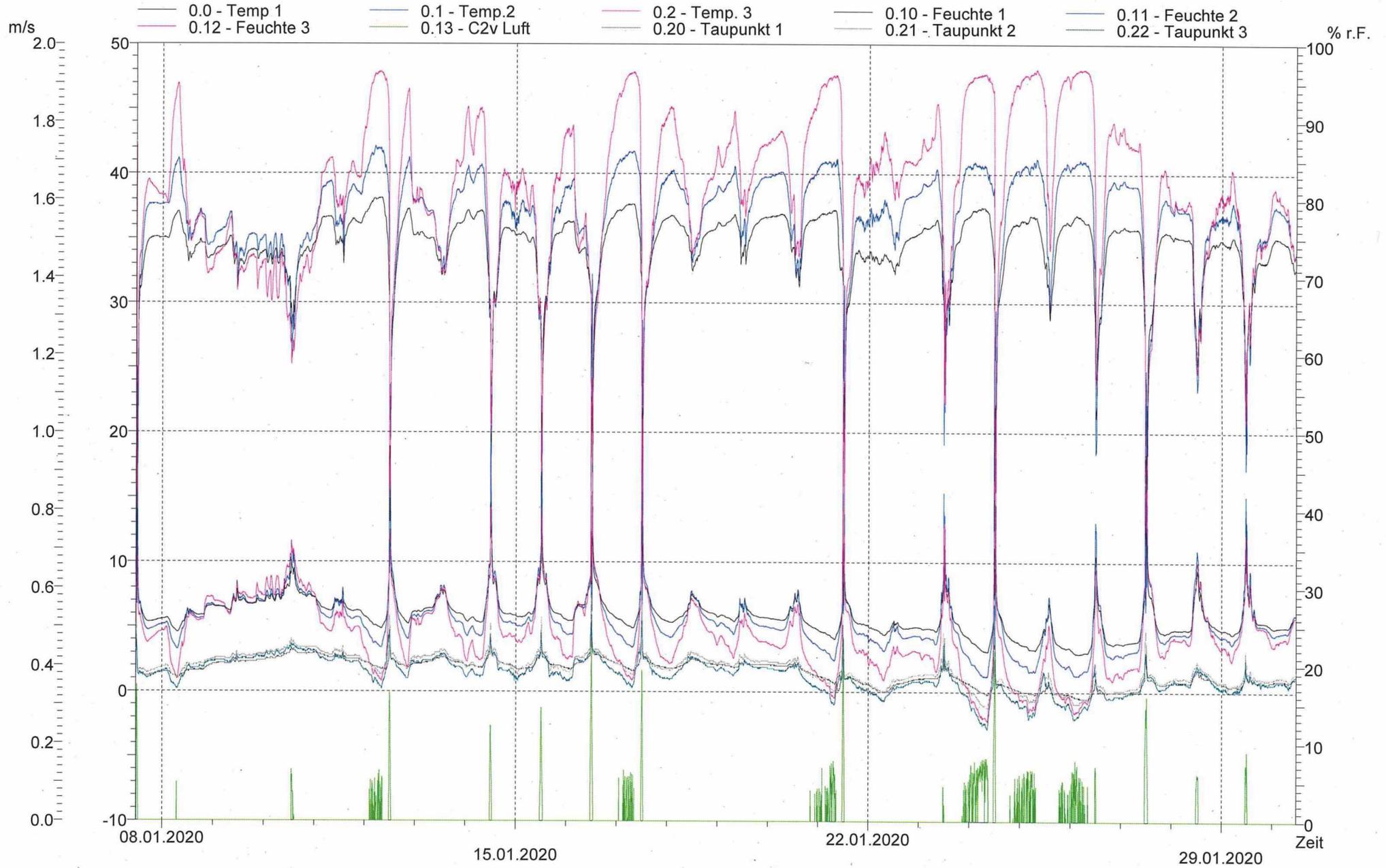
2019-08-05-L2.amr

Klimamessungen Liegnitz L2 01.07.-05.08.2019



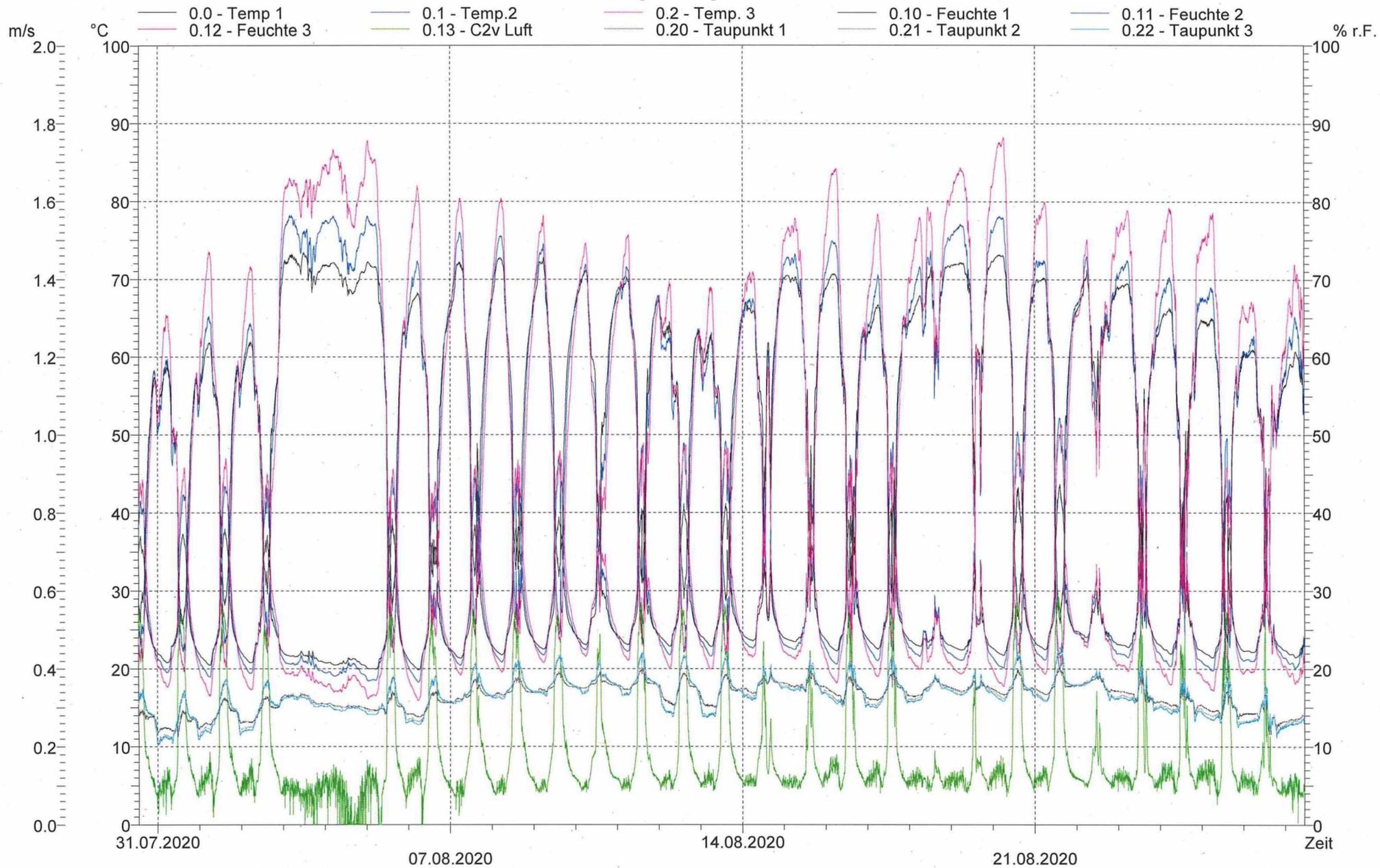
2020-01-30-L3.amr

Klimamessungen Liegnitz 3 08.01-30.01.2020



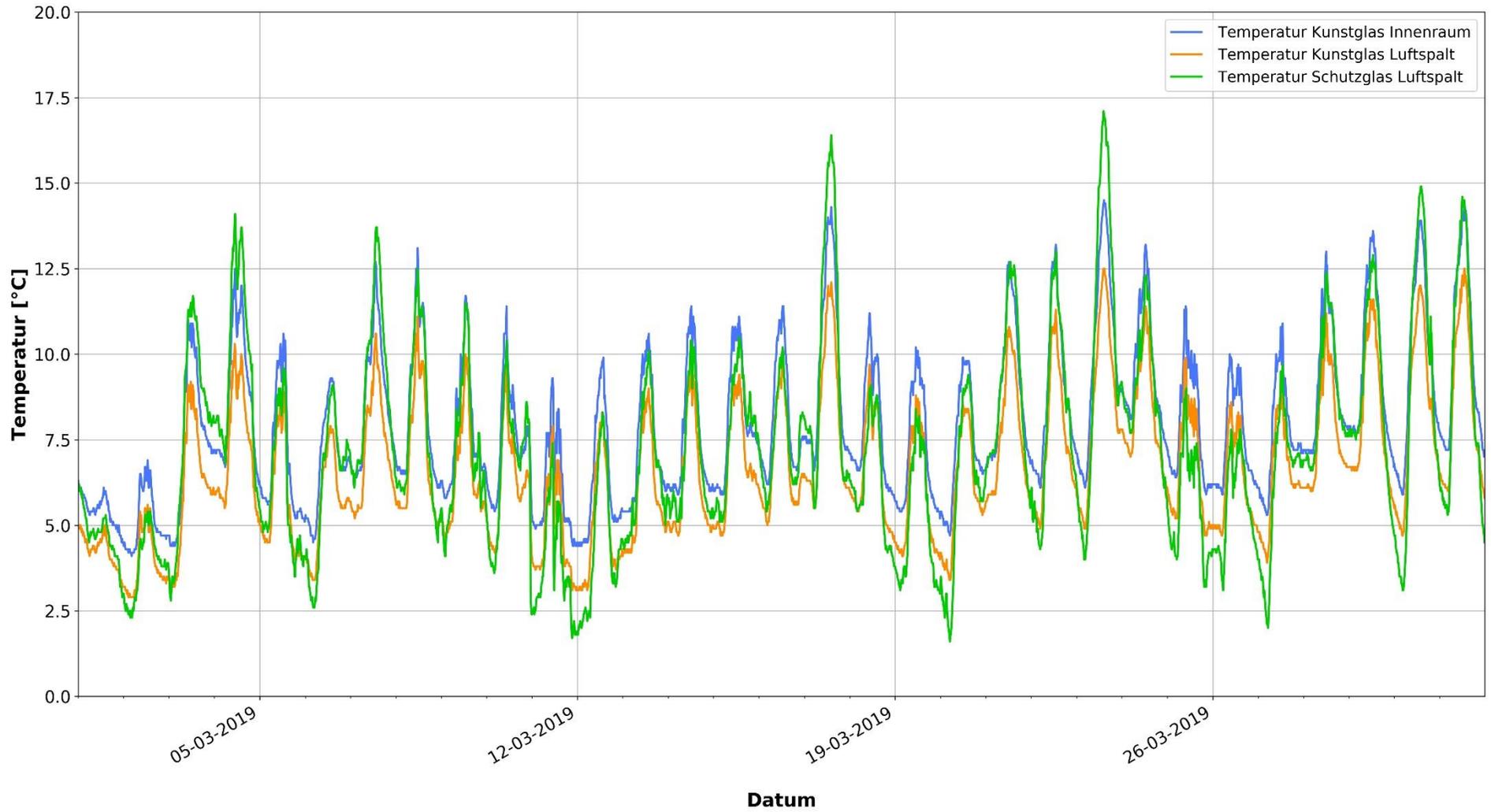
2020-08-27-L3.amr

Klimamessungen Liegnitz 31.07.-27.08.2020



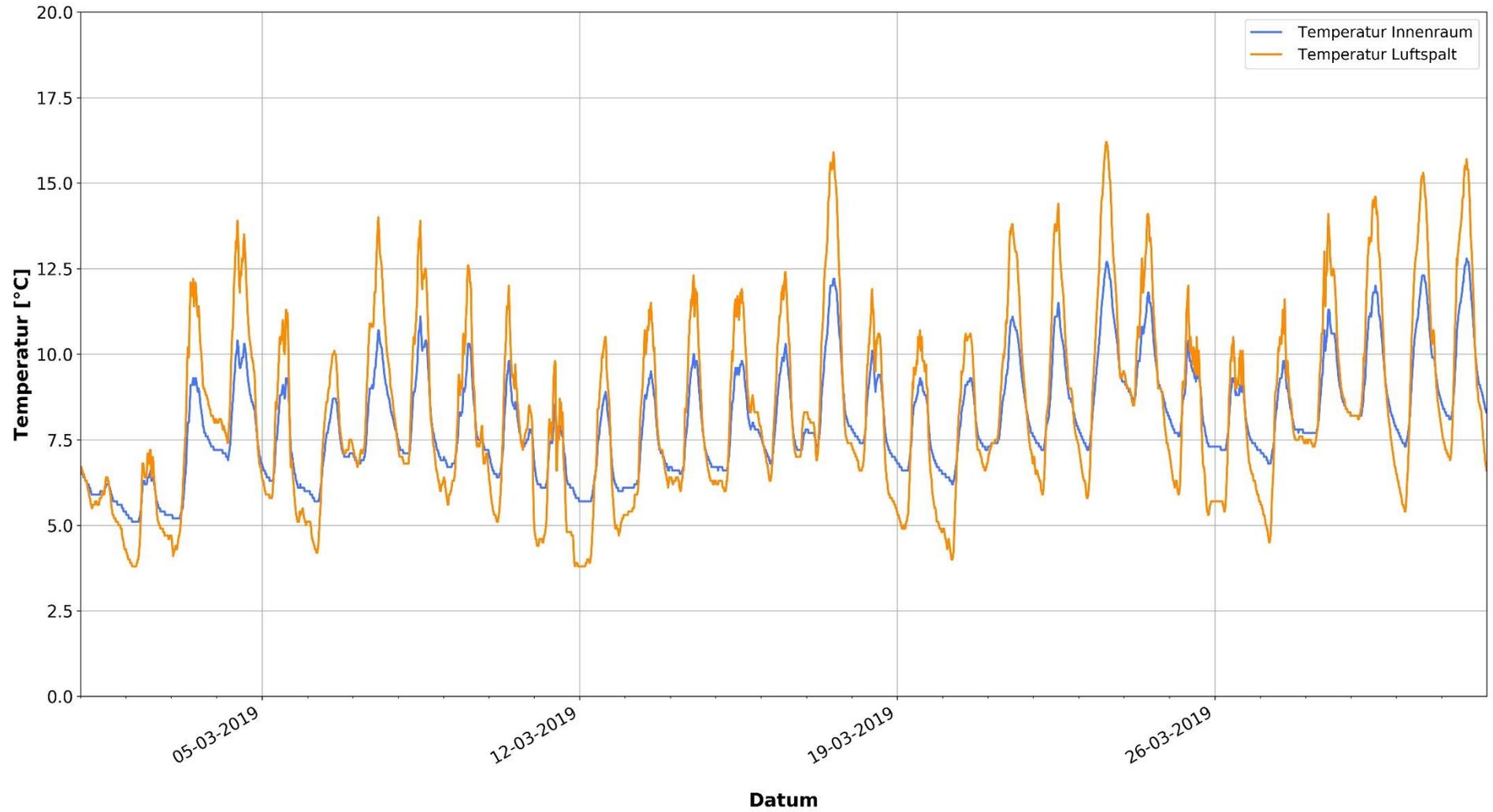
Temperatur der Glasoberflächen - CA-Legnica-nX - März 2019

Zeitspanne: 01.03.2019 - 31.03.2019



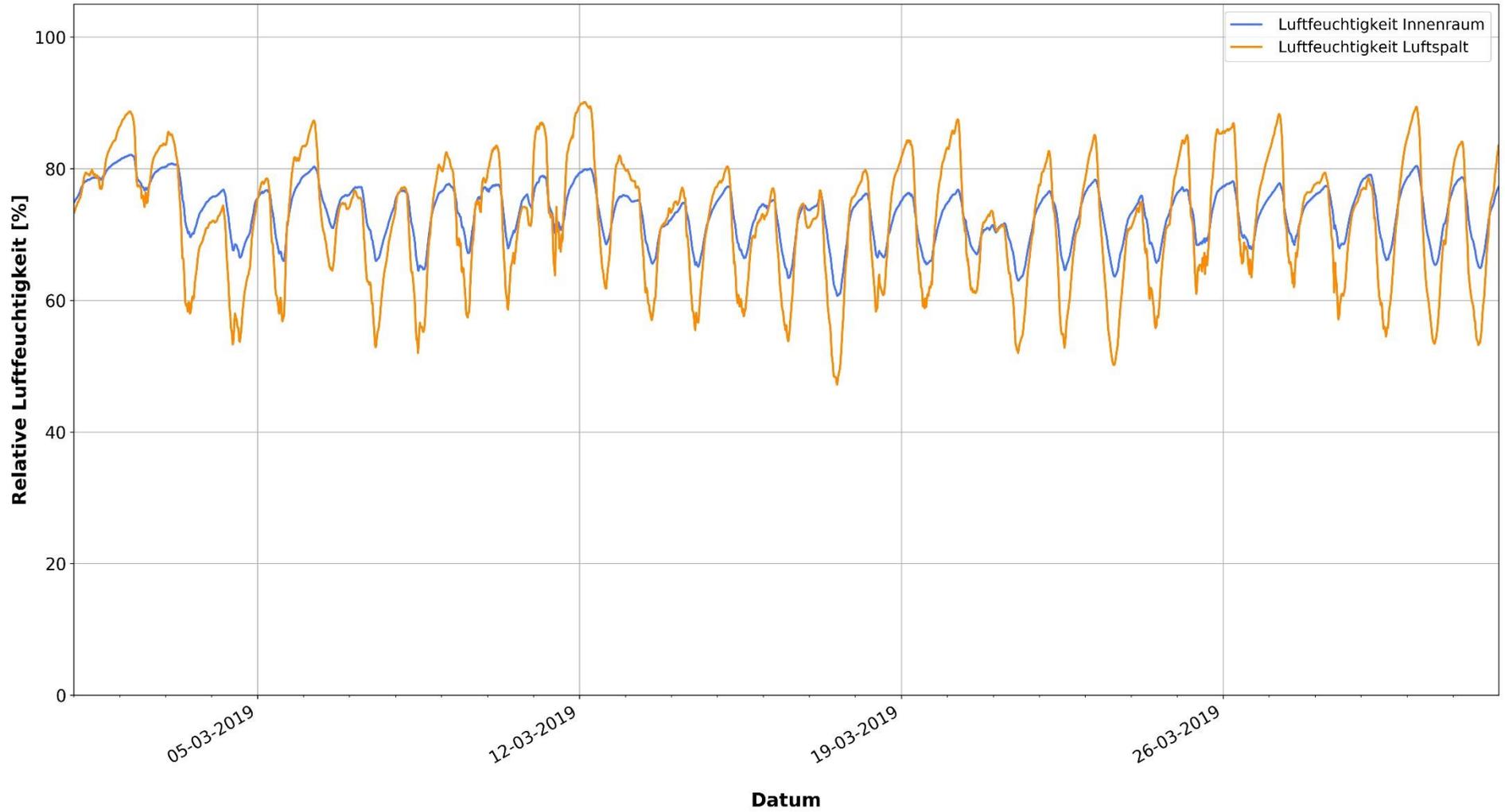
Lufttemperaturen - CA-Legnica-nX - März 2019

Zeitspanne: 01.03.2019 - 31.03.2019



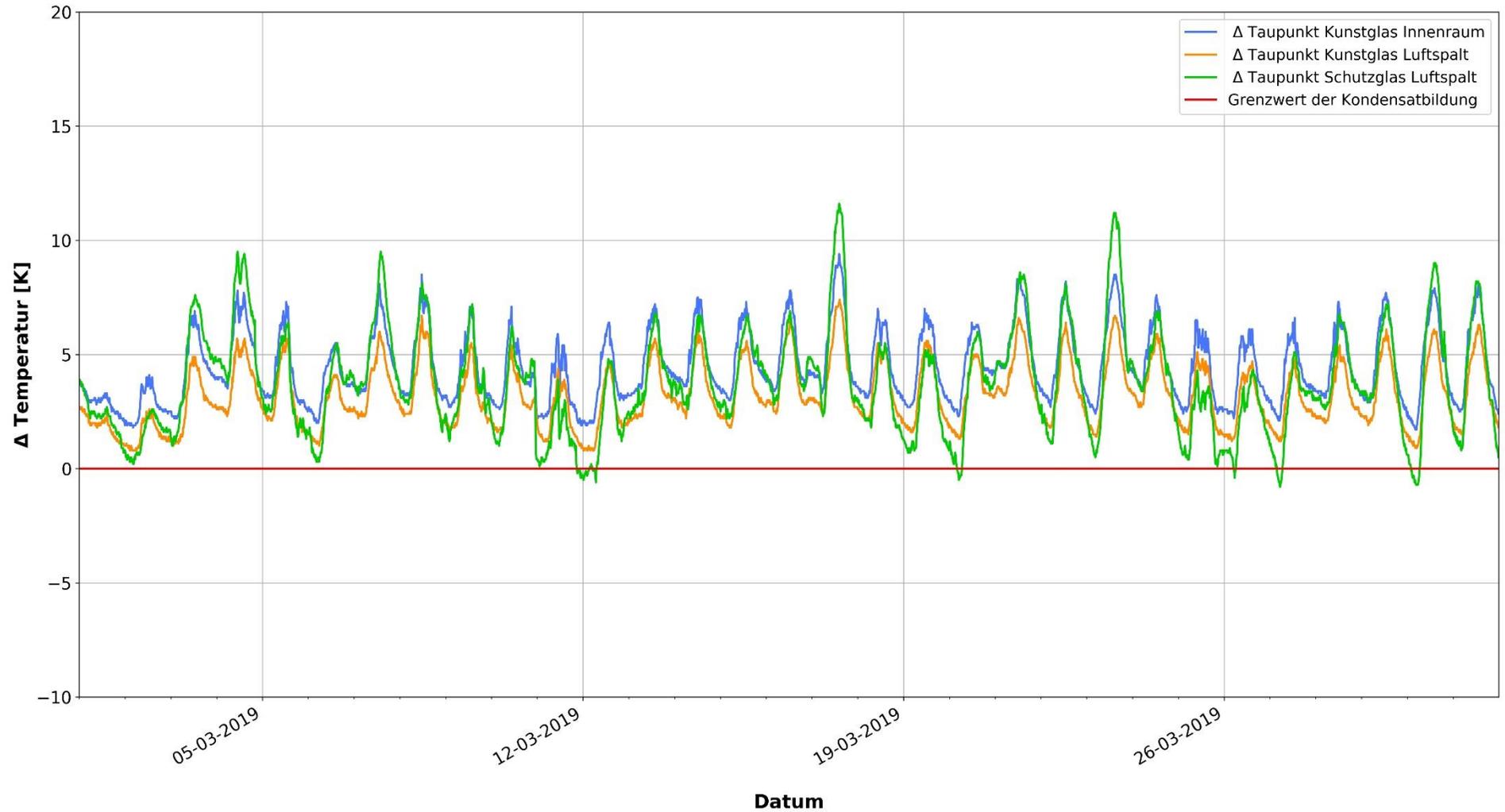
Relative Luftfeuchtigkeit - CA-Legnica-nX - März 2019

Zeitspanne: 01.03.2019 - 31.03.2019



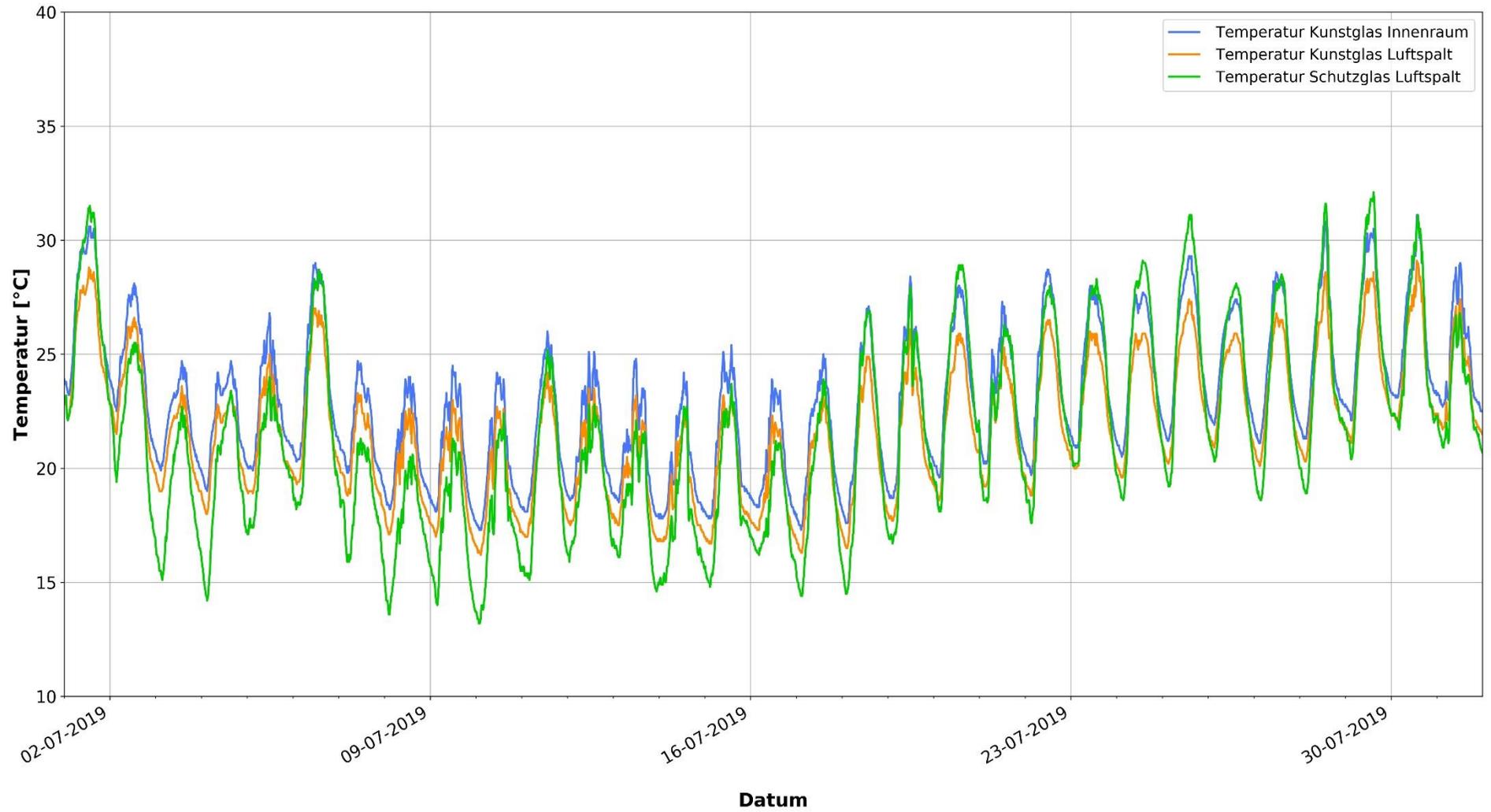
Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-nX - März 2019

Zeitspanne: 01.03.2019 - 31.03.2019



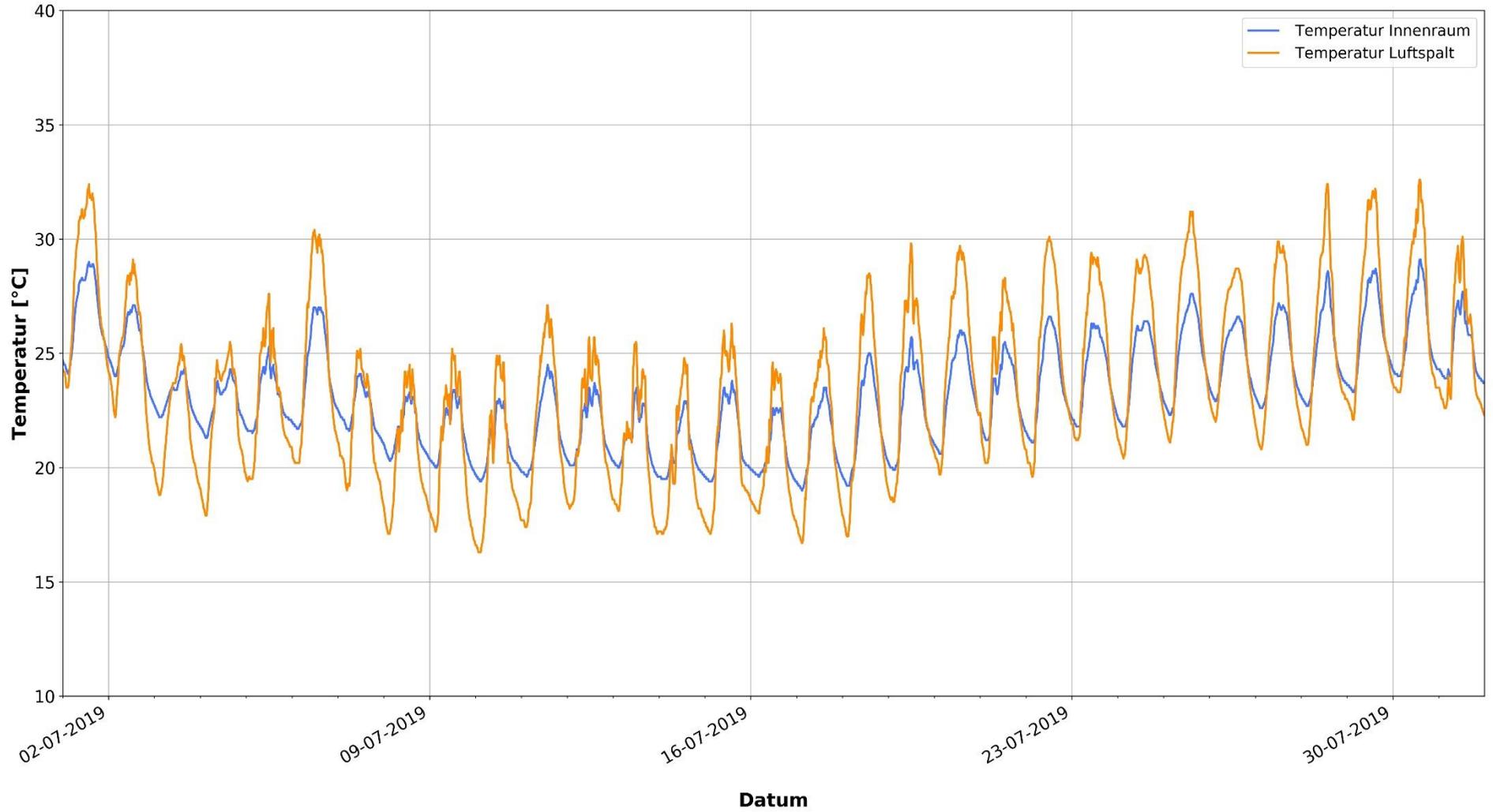
Temperatur der Glasoberflächen - CA-Legnica-nX - Juli 2019

Zeitspanne: 01.07.2019 - 31.07.2019



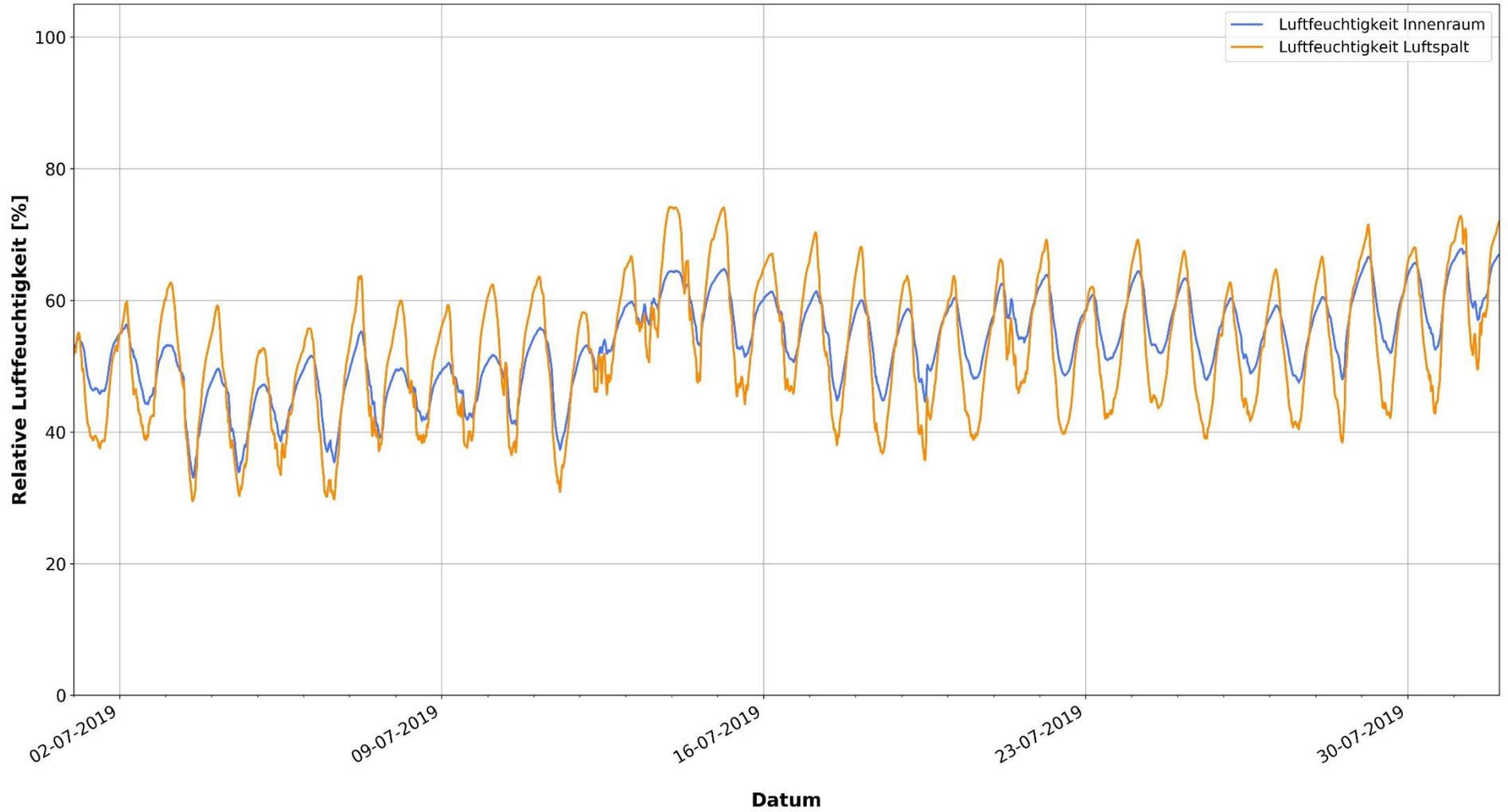
Lufttemperaturen - CA-Legnica-nX - Juli 2019

Zeitspanne: 01.07.2019 - 31.07.2019



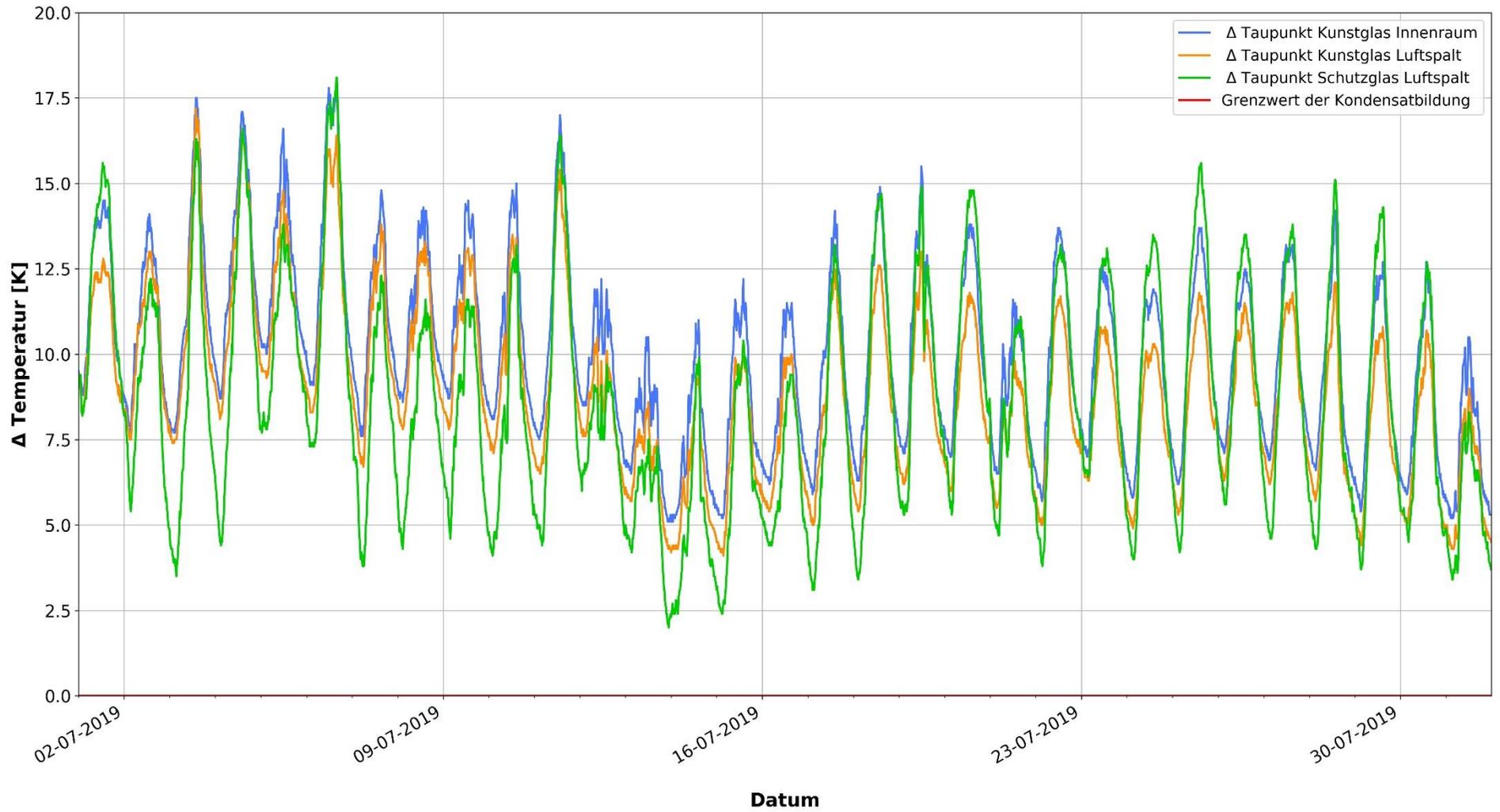
Relative Luftfeuchtigkeit - CA-Legnica-nX - Juli 2019

Zeitspanne: 01.07.2019 - 31.07.2019



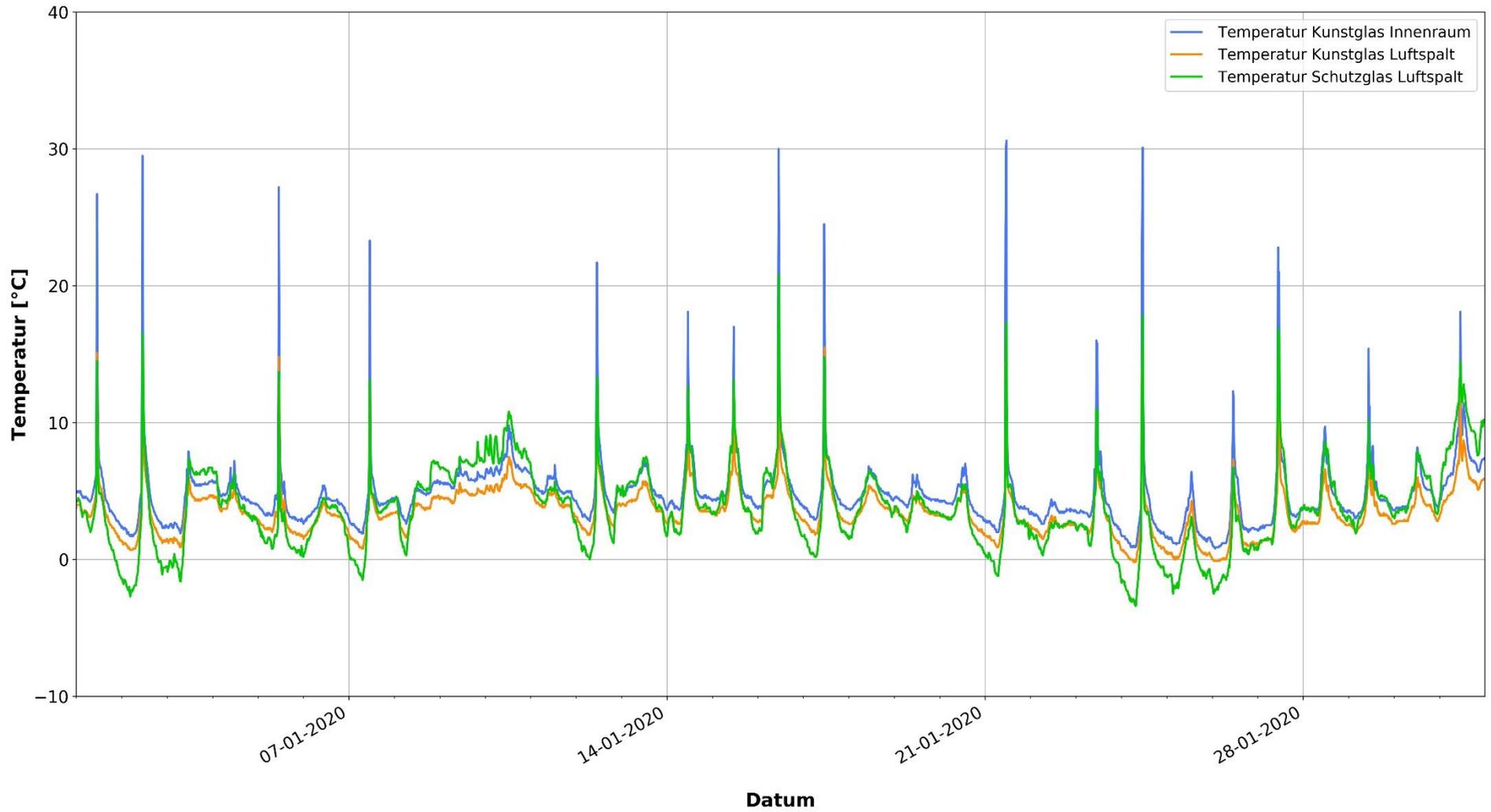
Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-nX - Juli 2019

Zeitspanne: 01.07.2019 - 31.07.2019



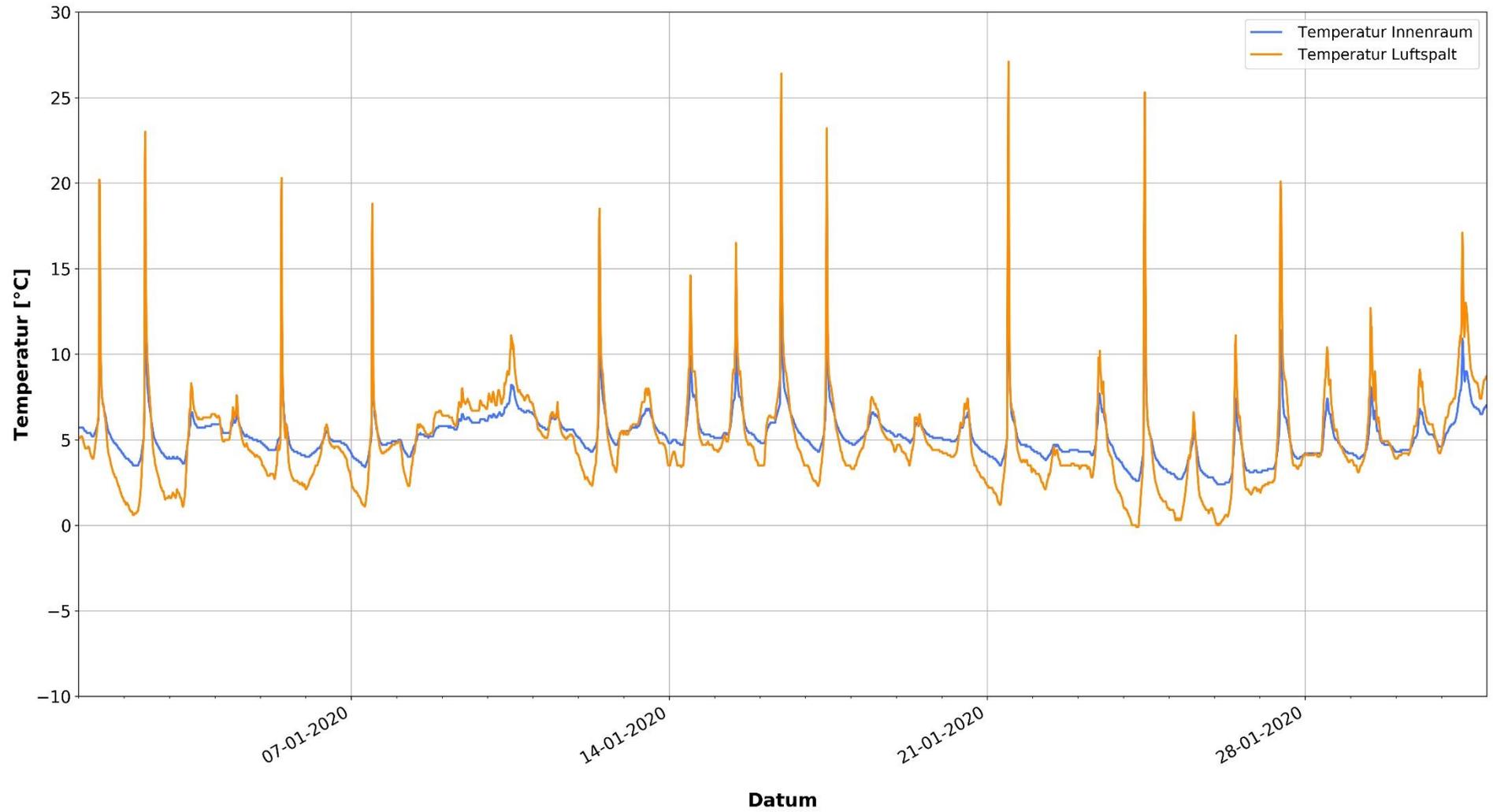
Temperatur der Glasoberflächen - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020



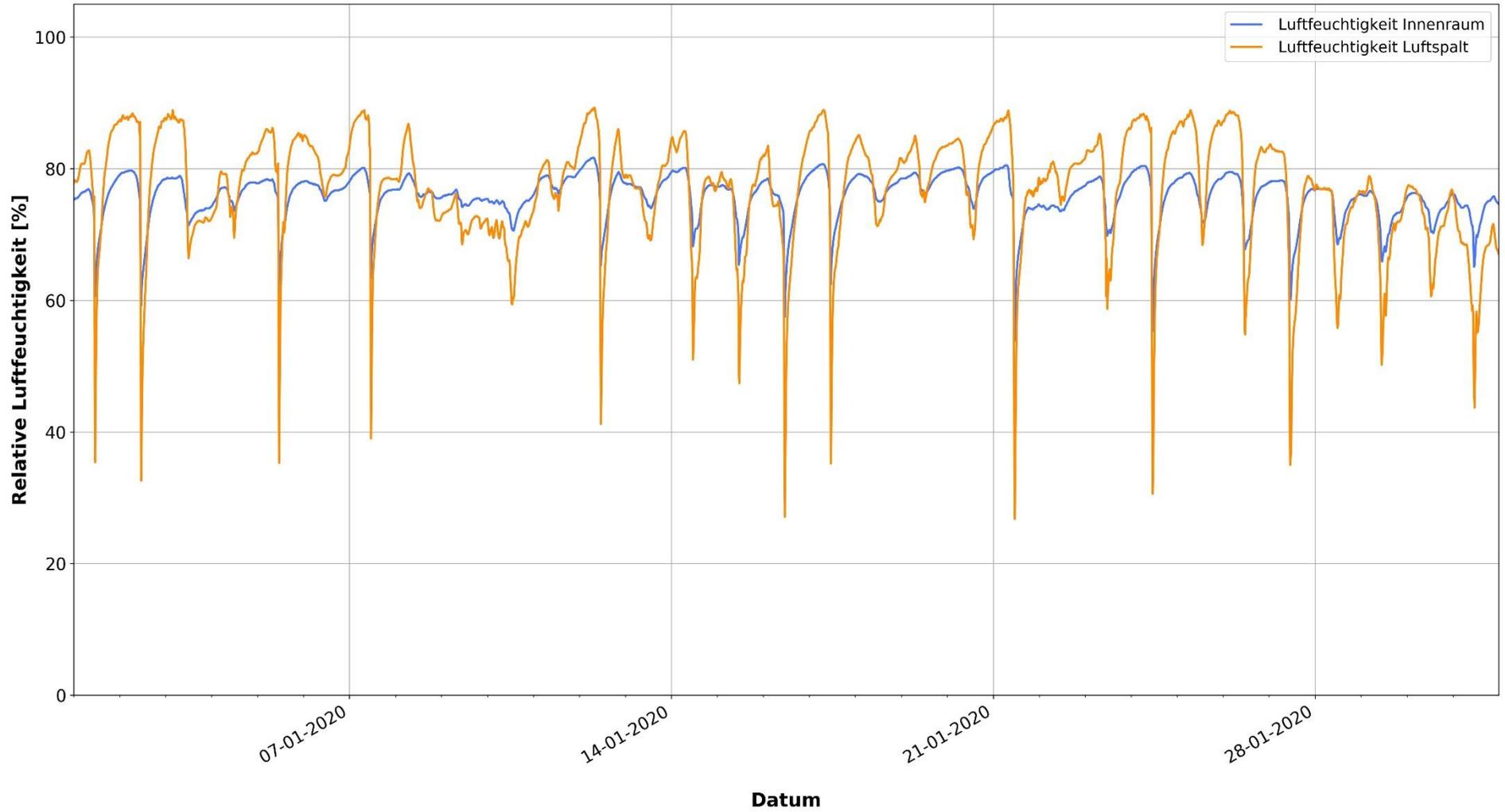
Lufttemperaturen - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020



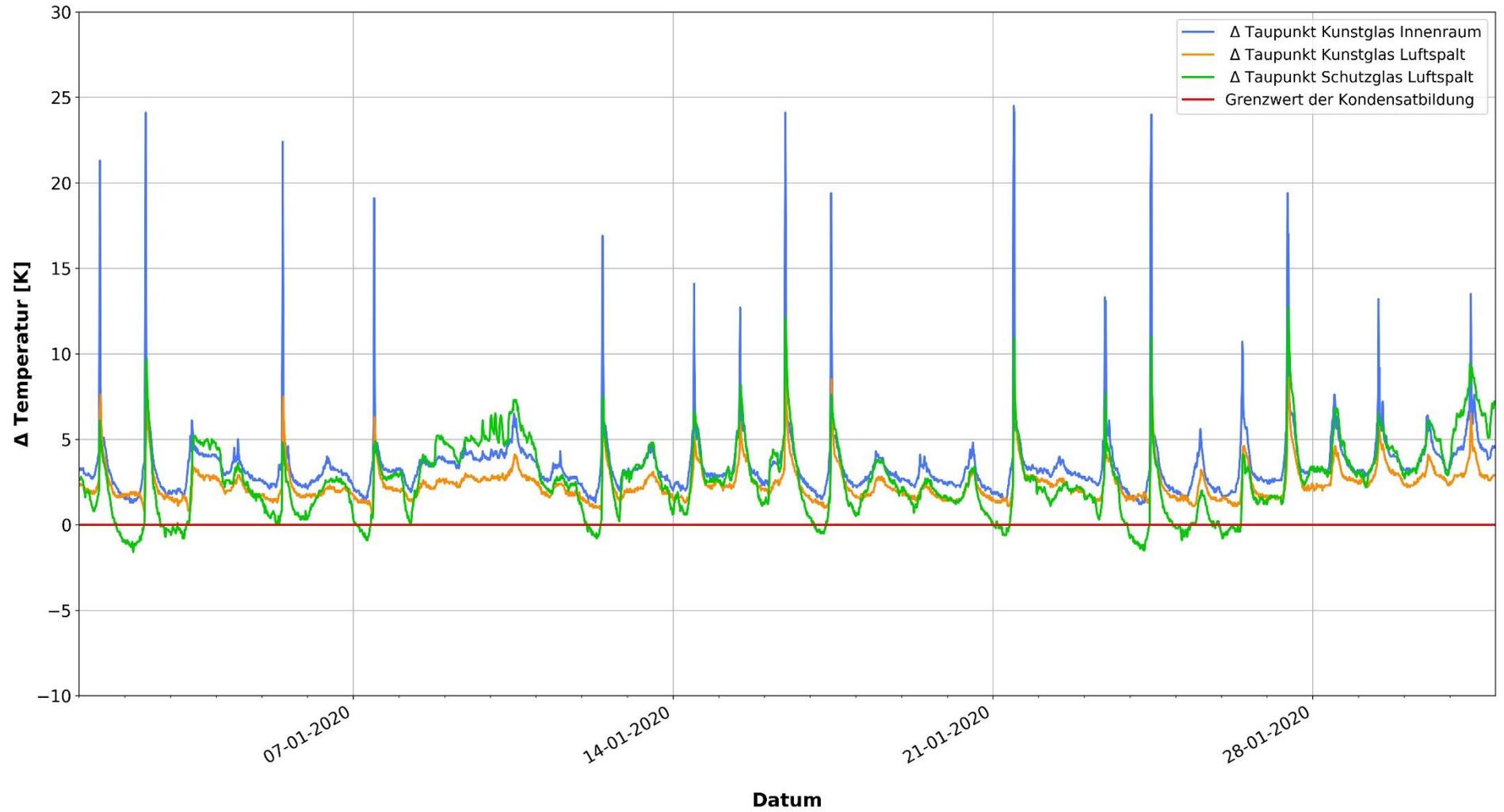
Relative Luftfeuchtigkeit - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020



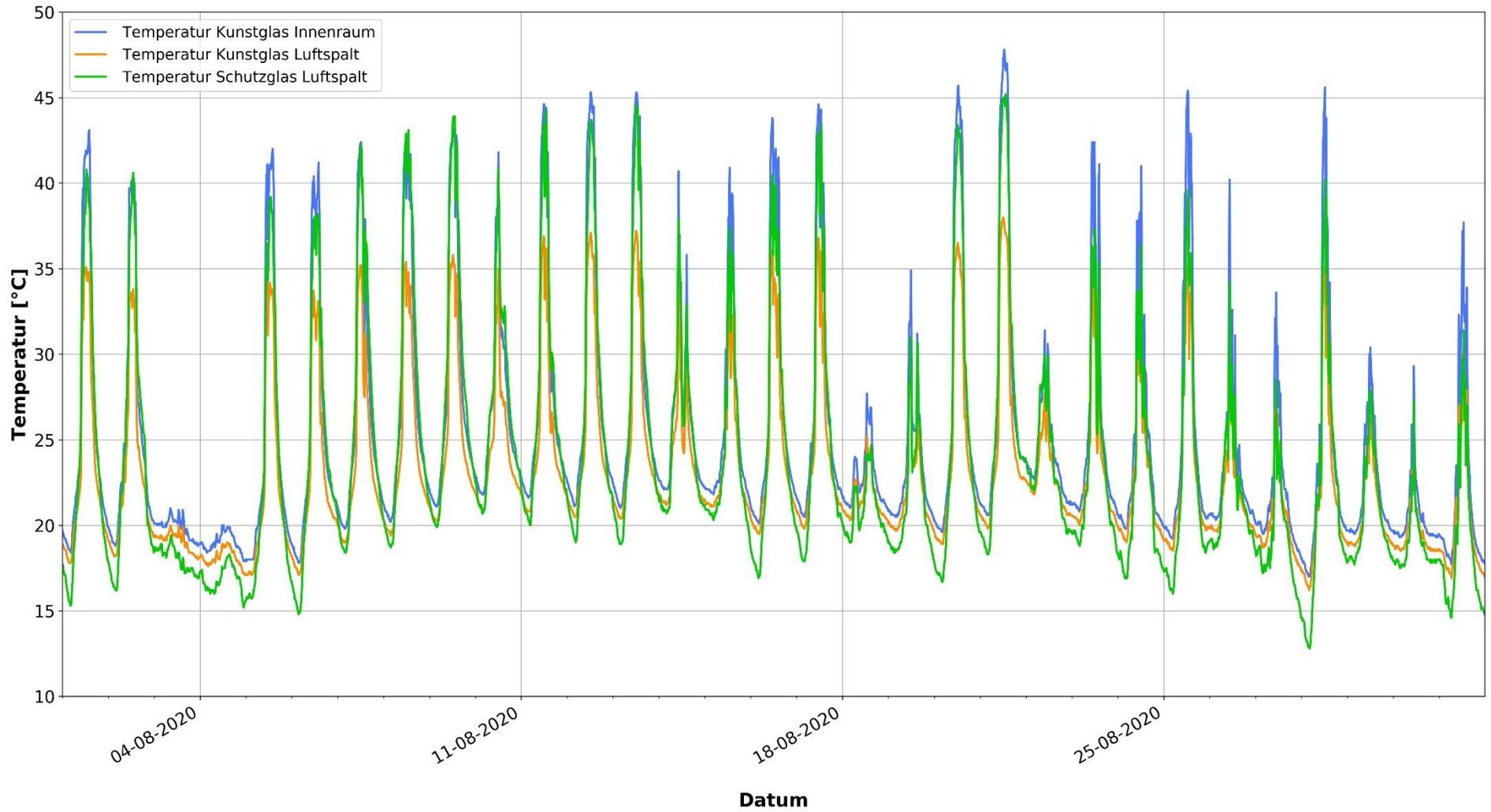
Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-sIX - Januar 2020

Zeitspanne: 01.01.2020 - 31.01.2020



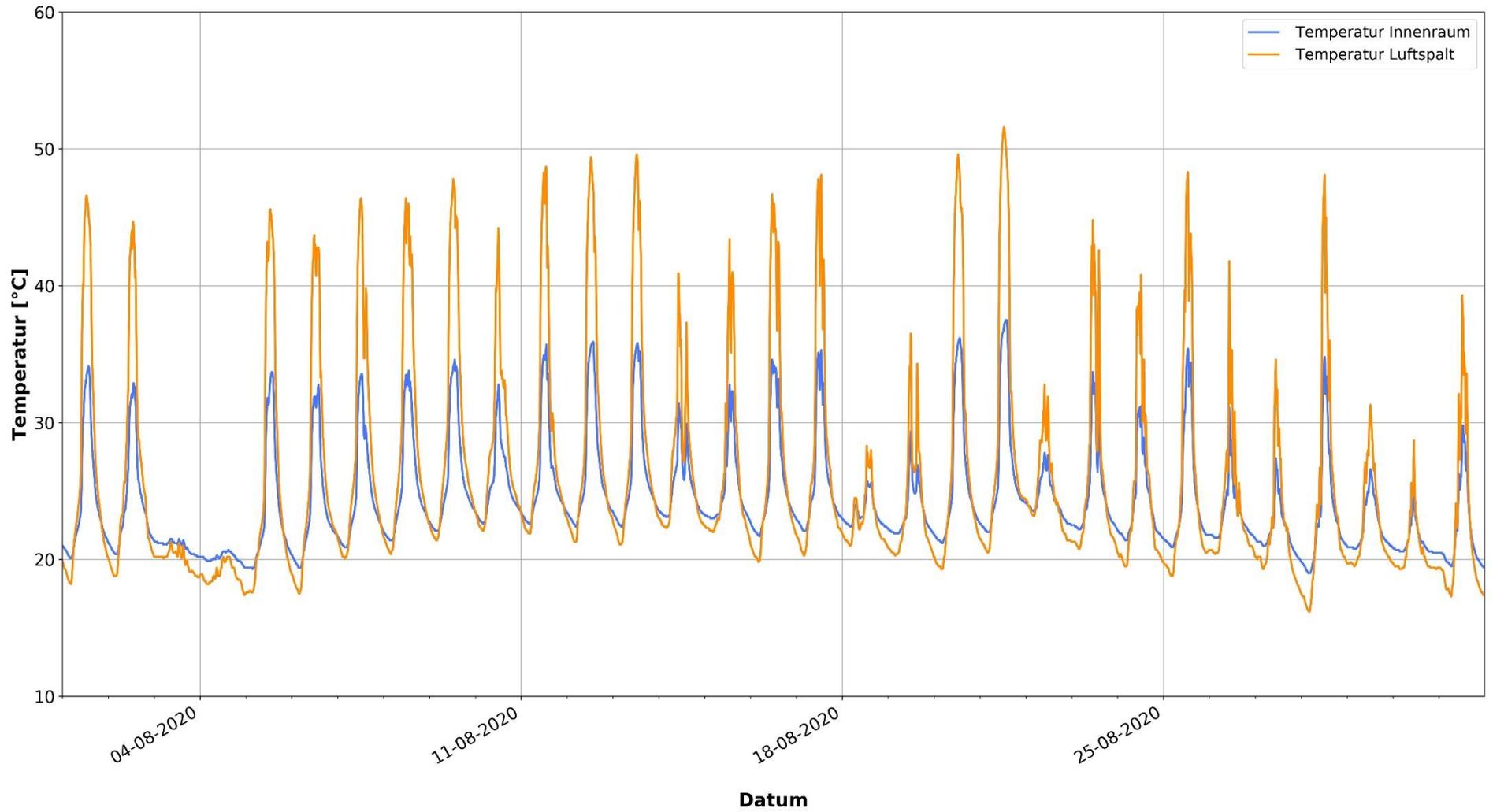
Temperatur der Glasoberflächen - CA-Legnica-sIX - August 2020

Zeitspanne: 01.08.2020 - 31.08.2020



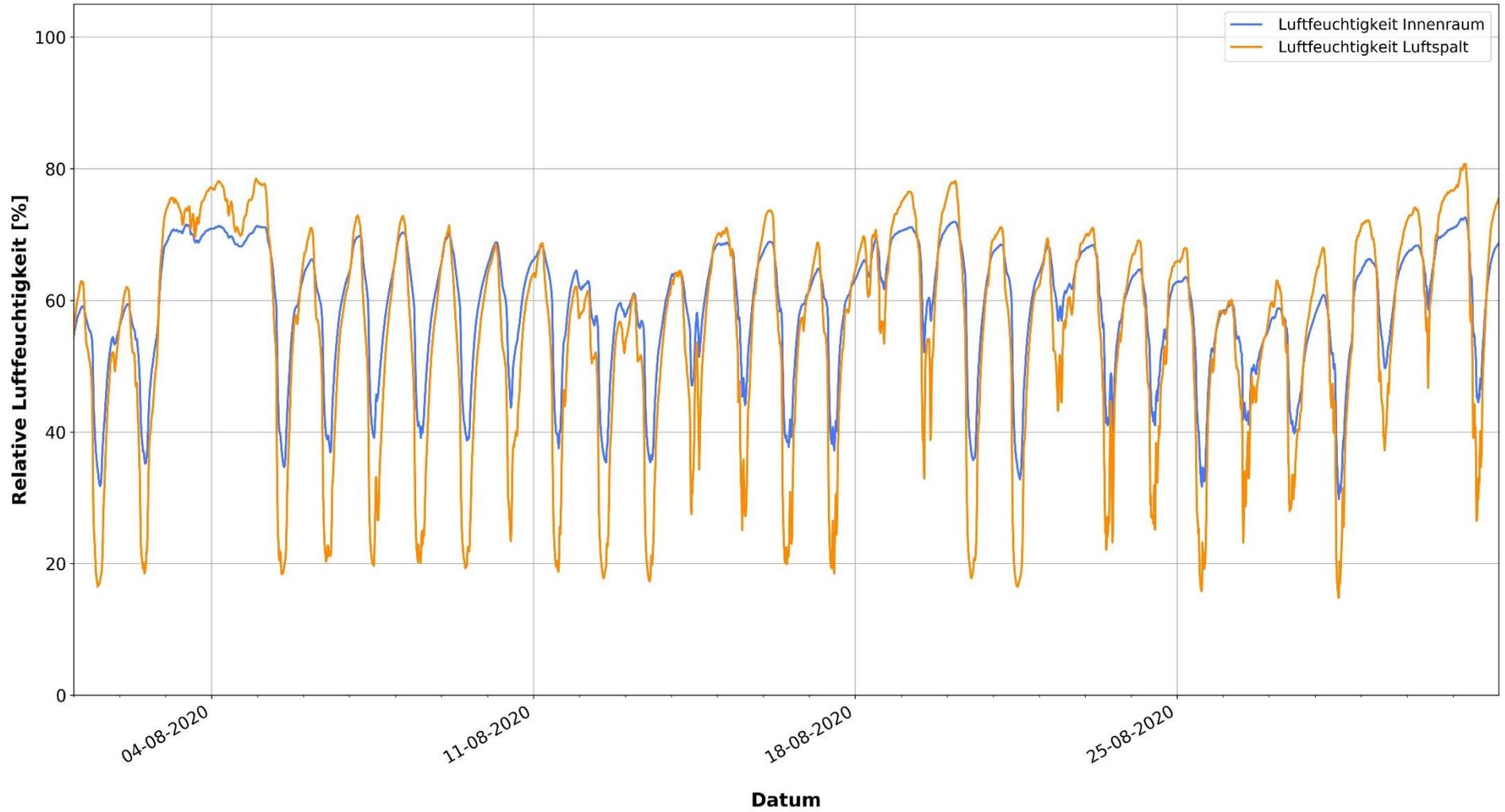
Lufttemperaturen - CA-Legnica-sIX - August 2020

Zeitspanne: 01.08.2020 - 31.08.2020



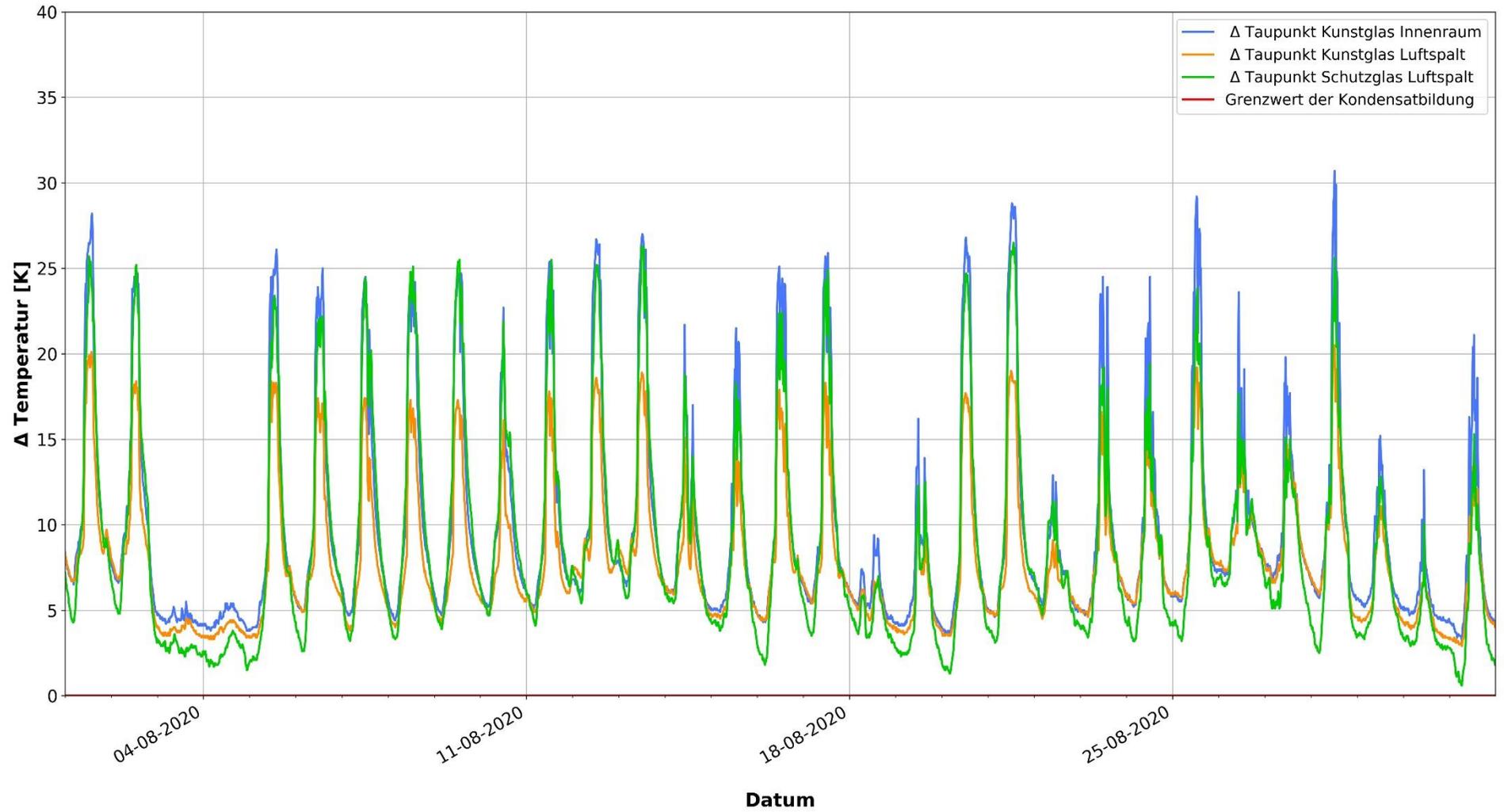
Relative Luftfeuchtigkeit - CA-Legnica-sIX - August 2020

Zeitspanne: 01.08.2020 - 31.08.2020



Überwachung der Kondensatbildung - CA-Legnica-sIX - August 2020

Zeitspanne: 01.08.2020 - 31.08.2020



Anlage 2:

Arbeitsplan

Objekt	Nr.	Titel	2017				2018				2019						
			I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	IV			
Dorfkirche Koszewko	1	Ausbau und Restaurierung der Glasmalereifelder															
	2	Probenahme, 3D-Scan und Materialuntersuchungen (Schadensanalyse: Glaszusammensetzung, Korrosionsprodukte, Verwitterungszonen, ...)															
	3	Konstruktion eines Schutzverglasungssystems															
	4	Abnahme, 3D-Scan der restaurierten Felder,															
	5	Einbau der restaurierten Felder, Abnahme															
	6	Einbau der Klimamesstechnik															
	7	Ausbau der Klimamesstechnik															
	8	Weiterbildungsmaßnahmen															
Legnica sIX	9	Ausbau und Restaurierung der Glasmalereifelder															
	10	Probenahme, Materialuntersuchungen (Schadensanalyse)															
	11	Konstruktion und Einbau der Außenschutzverglasung															
	12	Weiterbildungsmaßnahmen															
	13	Abnahme der restaurierten Felder															
	14	Einbau der restaurierten Glasmalereien, Abnahme															
	15	Einbau der Klimamesstechnik															
	16	IR-Messungen vor Ort															
17	Ausbau der Klimamesstechnik																
Legnica (nX)	18	Ausbau und Restaurierung der Glasmalereifelder															
	19	Probenahme, 3D-Scan, Materialuntersuchungen (Zustand der Malschichten, Glasanalysen, Korrosionsprodukte)															
	20	Steinsanierung, Einbau der Außenschutzverglasung															
	21	Abnahme, 3D-Scan der restaurierten Felder															
	22	Einbau des restaurierten Fensters, Abnahme															
	23	Einbau Klimamesstechnik															
	24	Ausbau der Klimamesstechnik															
	25	Weiterbildungsmaßnahmen															
Pfarrkirche Oswiecim	26	Ausbau und Restaurierung der Glasmalereifelder															
	27	Probenahme, Materialuntersuchungen (Zustand der Malschichten, Glasanalysen, Korrosionsprodukte)3D-Scan															
	28	Einbau der Außenschutzverglasung															
	29	Einbau des restaurierten Fensters, Abnahme															
	30	Einbau Klimamesstechnik															
	31	Ausbau der Klimamesstechnik															
	32	IR-Messungen vor Ort															
	33	Weiterbildungsmaßnahmen															
alle Objekte	34	Dokumentation der restauratorischen Arbeiten															
	35	3D-Scan, Auswertung der Ergebnisse															
	36	Erstellen des Abschlussberichtes															
	37	Publikation															

Legnica (sIX): kleines Fenster: deutsche Werkstatt
 Legnica (nX): großes Fenster: polnische Werkstatt

Restauratorischer Teil:	
Wissenschaftlicher Teil:	
Weiterbildungsmaßnahmen:	

Arbeitsplan unter Berücksichtigung der Mittelbewilligung für 2017, 2018 und 2019 vom BKM