

## PAPERS

## 1.1

**Schutzverglasung: ein thermodynamischer Rückblick auf die letzten 30 Jahre, Erfolge, Misserfolge und Schlussfolgerungen für zukünftige Projekte****Hans-Jürgen Daams**

Hajurveda Heritage

**Michael Robrecht**

iXtronics GmbH, Germany

***Protective Glazing: A Thermodynamic Review of the Past 30 Years: Successes, Failures and Conclusions for Future Projects – Abstract***

For more than 30 years protective glazing has been used for the preventive conservation of old and historically valuable stained glass in the windows of our churches. Initially, the main objective was to avoid condensation, as this has been proven to have a negative influence on the durability of the glass painting. In the course of time, many influencing factors, such as thermal insulation capacity, coatings and absorption capacity of the protective glazing, gap spacing, size of the ventilation surfaces, heat dissipation into the walls and iron, flow behaviour of the air in the air gap, ventilation by outside and/or inside air, thermodynamic properties of the air in the church, outside and in the air gap and

many more have been optimised in such a way that the risk of condensation on the original glazing has been reduced more and more. At the same time, knowledge of the causes of corrosion and their interaction with thermodynamic conditions has also become increasingly better. However, these have not yet been explicitly converted into limit values for thermodynamic measurement series. In fact, even today it is often the case that extensive data series are presented to the user without communicating what their significance is. The investigations presented here serve to define thermodynamic limits for a permanent monitoring of the historically valuable glass paintings and to make statements about the analysis results, instead of just a large amount of numbers.

***Schutzverglasung: ein thermodynamischer Rückblick auf die letzten 30 Jahre, Erfolge, Misserfolge und Schlussfolgerungen für zukünftige Projekte – Zusammenfassung***

Seit mehr als 30 Jahren werden Schutzverglasungen zur präventiven Konservierung alter und historisch wertvoller Glasmalereien in den Fenstern unserer Kirchen eingesetzt. Das Hauptziel war zunächst die Vermeidung von Kondenswasserbildung, da diese nachweislich einen negativen Einfluss auf die Haltbarkeit der Glasmalerei hat. Im Laufe der Zeit wurden viele Einflussfaktoren, wie z.B. Wärmedämmfähigkeit, Beschichtungen und Absorptionsvermögen der Schutzverglasung, Spaltabstände, Größe der Lüftungsflächen, Wärmeabgabe in die Wände und Eisen, Strömungsverhalten der Luft im Luftspalt, Belüftung durch Außen- und/oder Innenluft, thermodynamische Eigenschaften der Luft in der Kirche,

außen und im Luftspalt und vieles mehr so optimiert, daß das Risiko von Kondensat an der Originalverglasung immer mehr reduziert wurde. Auf der anderen Seite sind aber auch die Erkenntnisse über Korrosionsursachen und ihre Wechselwirkung mit thermodynamischen Zuständen immer besser geworden. Diese sind aber noch nicht explizit in Grenzwerte für thermodynamische Messreihen umgestaltet worden. Vielmehr ist es auch heute oft noch so, daß umfangreiche Datenreihen dem Benutzer präsentiert werden ohne zu kommunizieren, was denn deren Bedeutung ist. Die hier vorgestellten Untersuchungen dienen dazu, thermodynamische Grenzen für eine Dauerüberwachung der historisch wertvollen Glasmalereien zu definieren und anstatt einer großen Menge an Zahlen Aussagen über die Analyseergebnisse zu machen.

## Thermodynamische Einflußgrößen

Abb. 1 zeigt in einer Skizze, welche physikalischen Größen die thermodynamischen Zustände bei einer Schutzverglasung bestimmen:

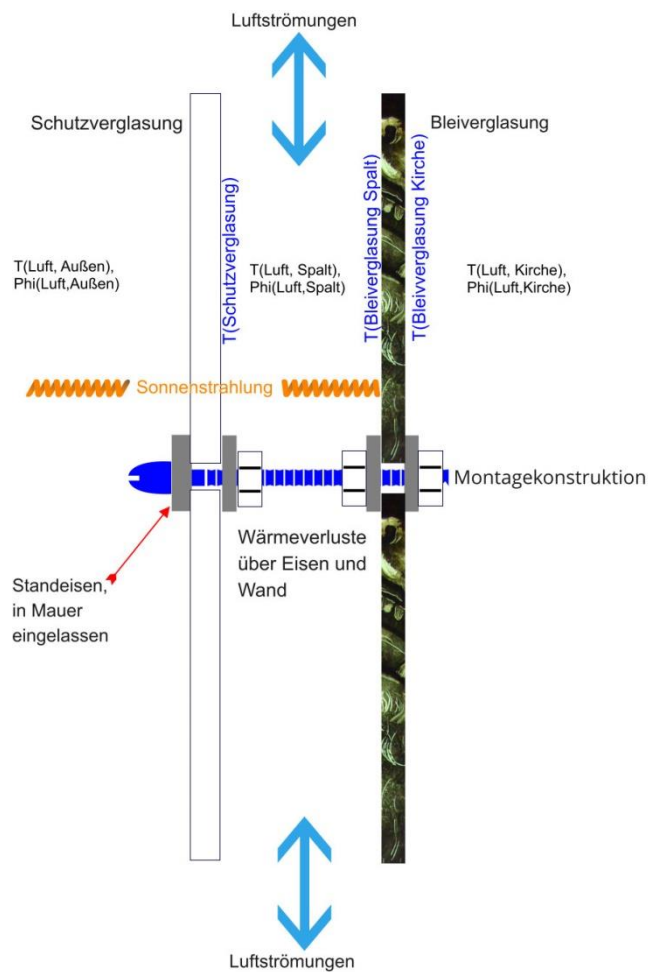


Abb. 1. Skizze der physikalischen Größen, die thermodynamische Zustände bei einer Schutzverglasung bestimmen.

Im Luftspalt stellt sich eine bestimmte Temperatur und relative Luftfeuchte ein, welche abhängt von:

- der Luft im Kircheninneren
- der Außenlufttemperatur
- der Aussenluftfeuchte
- der Sonneneinstrahlung
- der ein- und ausströmenden Luft über die Ein- und Auslassöffnungen
- den Wärmeverlusten über die Montageeisen und die Wände

Die Oberflächentemperaturen von Blei und Schutzverglasung hängen von allen Lufttemperaturen der angrenzenden Luftschichten, der Strahlungsabsorption und der spezifischen Wärmekapazität der Gläser ab.

Glas- und Lufttemperaturen sind nicht gleich und daher kann es zu Tauwasserbildung kommen, wenn die Taupunkttemperatur der Luft an den Glasoberflächen unterschritten wird.

### Ein kurzer historischer Abriss

Schutzverglasungen wurden bereits seit den 1950er Jahren z.B. im Berner Münster, in den Stadtkirchen St. Sebald und St. Lorenz in Nürnberg wie auch im Münster in York verbaut. 1985 wurden Untersuchungen zu Schutzverglasungen in Gouda (Holland) durchgeführt, um zu

analysieren, ob Schutzverglasungen bei holländischem Klima wirken können /JÜTTE 1985/. Im Laufe der Zeit wurde diese Art des Schutzes immer öfter mit unterschiedlichen Konstruktionstypen an unterschiedlichen Objekten erprobt. In den späten 80er und frühen 90er Jahren haben Fuchs und Leissner die Grundlagen für die objektive Darstellung der schützenden Wirkung von Schutzverglasungen gelegt /RÖMICH&FUCH 1993/, /LEISSNER 1993/.

Für die Überwachung des Schadens an den historischen Gläsern wurden spezielle Glassensoren vom Fraunhofer Institut für Silikat Forschung (ISC) entwickelt /FUCHS 1988/. Wichtige Beiträge zu diesem Thema kamen auch von Stefan Oidtmann /OIDTMANN 1993/ und /OIDTMANN 2000/. Auf Basis seiner Dissertation konnten wichtige Grundlagen zu diesem Thema gelegt werden. Weitere Forschungen wurden durch das BMFT (Bundesministerium für Forschung und Technologie) in den Jahren 1990 – 1995 im Projekt „Verbundprojekt zur Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalerei“ durchgeführt. Hieraus entstanden in internationaler Zusammenarbeit zahlreiche Publikationen mit weiteren Grundlagen für die Erstellung von Schutzverglasungen /RÖMICH&FUCHS 1993/, /CAEN 1992/, /LAURIAT 1993/, /LEISSNER 1993/ /OIDTMANN 1993/. Intensive Untersuchungen zur Wirkungsweise von Schutzverglasungen wurden in der Nürnberger Sebalduskirche über Jahre dokumentiert /HÖR 2005/ und /HÖR in BÖTTCHER 2016/. Weitere Detailuntersuchungen zur Wirkungsweise eingebauter Schutzverglasungen fanden dann in den Jahren zwischen 2010 und heute statt /SCHUMACHER 2010/, /TORGE 2011/, SCHUBERT

2013/, /TORGE 2014/, /SELIGER 2017/. Diese Liste ist bei weitem nicht vollständig, stellt aber einen Erkenntnisstand dar, aus dem man Empfehlungen für die Konstruktion von Schutzverglasungen und deren Gelingen im realen Leben ableiten kann.

### Definition der zu überwachenden thermodynamischen Größen

Für die Definition der zu überwachenden thermodynamischen Größen sind zunächst die Beanspruchungen zu klären, denen die Glasmalereien ausgesetzt sind. Hierzu gehören /HÖR 2005/:

- Klimatische Beanspruchungen
- Luftverunreinigungen
- Mikrobielle Beanspruchungen

Aus thermodynamischer Sicht können die klimatischen Beanspruchungen sicherlich erfasst werden, allerdings können Luftverunreinigungen und mikrobielle Beanspruchungen nur indirekt referenziert werden, weil z. B. die Staubbelastung bei bestimmten mikrobiellen Beanspruchungen in Zusammenhang mit thermodynamischen Größen zu Schimmelbildung führen kann. Eine Überwachung der für die Schimmelbildung wesentlichen thermodynamischen Voraussetzungen ist durch Messung der Temperatur und der Luftfeuchtigkeit möglich. Die direkte Messung von Luftverunreinigungen und mikrobielle Beanspruchung wird in diesem Artikel aber nicht behandelt.

Martha Hör hat bereits 2006 festgestellt, daß thermodynamische Extremwerte, Häufigkeit des Auftretens von hoher Lufttemperatur und hoher relativer Luftfeuchte, Tauwasser, Reif- oder Eisbildung wichtige Einflussgrößen sind. Erstmals wurden hier nun Grenzwerte für einen Zielkorridor im Luftspalt gesetzt:

- Lufttemperatur: 12 °C bis 25 °C
- relative Luftfeuchtigkeit: 45 % bis 60 %
- Temperatur- und Luftfeuchtwechsel minimal
- Keine Tauwasserbildung an der Glasmalerei

Aufgrund von Messungen wurde später festgestellt, daß eine hohe relative Luftfeuchtigkeit von > 80 % r. F. an der Originalverglasung schon zu irreversiblen Veränderungen von korrodierten Oberflächen führen kann /GARREICH 2010/.

Oberhalb von 90 % r. F. in der objektnahen Luft kann es in Abhängigkeit von der Temperatur des Glases bereits zur Tauwasserbildung auf der Oberfläche kommen /TORGE 2011/.

Weitere thermodynamisch messbare Einflussgrößen sind /TORGE 2011/ die Gesamtschwankungsbreite von Temperatur und relativer Luftfeuchtigkeit und die Änderungsgeschwindigkeit dieser Größen, die bei Sonneneinstrahlung sehr hoch sein kann. Für beide liegen allerdings keine Grenzwerte vor. Hilfsweise kann aber auf die EN 15757:2010-12 zurückgegriffen werden. Diese ist zwar für organisch hygroskopische Materialien formuliert, gibt aber kurzzeitige Schwankungen von +/- 10% pro 24 Stunden in der relativen Feuchte und +/- 5 Grad Celsius pro 24 Stunden bei der Temperatur vor.

Bei vielen chemischen Reaktionen führt eine Erhöhung der Temperatur um 10 K schon zu einer Verdoppelung der Reaktionsgeschwindigkeit und die Dauer des gleichzeitigen Auftretens hoher Temperaturen und hoher relativer Luftfeuchte tragen wesentlich zur Korrosion bei /TORGE 2014/. Es gibt aber leider keine Grenzwerte hierfür.

Das Mikroklima im Bereich der Glasmalereien bestimmt die Bedingungen für das Wachstum von Schimmelpilzen oder Bakterien /HÖR 2005/ und dies hat korrodierende Wirkung auf das Glas /DREWELLO 2004/. Thermodynamisch zu überwachende Grenzwerte hierfür wurden in Form von IsoPLEthen von /SEDLBAUER 2001/ erarbeitet.

2016 wurde der Grenzwert von 80% relativer Feuchte erneut bestätigt /HÖR in BÖTTCHER 2016/. Zusätzlich wurde festgestellt, daß häufige Wechsel um die 80% relativer Feuchte drum herum ein Schadenrisiko darstellen. Einige der Regeln aus 2006 konnten verschärft und in Zahlen dargestellt werden:

- |  |              |
|--|--------------|
| • Kondensat an der Schutzverglasung:                             | Null         |
| • Frost auf der Schutzverglasung:                                | Null         |
| • Temperaturkorridors der Oberflächentemperatur am Originalglas: | 0°C bis 40°C |
| • Luftfeuchtekorrridor im Luftspalt:                             | 40% bis 75%  |

Zusammenfassend können nun folgende thermodynamisch zu überwachende Grenzwerte formuliert werden:

### Definition von Grenzwerten für eine Dauerüberwachung

• Luftfeuchtekorrridor im Luftspalt:	40% bis 75% (oder 80%)
• Eisbildung auf Schutzverglasung:	Null
• Oberflächentemperatur des Originalglases:	0°C bis 40°C
• Überwachung der Isoplethen für Schimmelbildung:	außerhalb der Isoplethen
• Tauwasser auf Originalglas:	Null
• Tauwasser auf Schutzverglasung:	Null
• Änderungsgeschwindigkeit der Temperatur:	+/- 5°C pro 24 Stunden
• Änderungsgeschwindigkeit der rel. Luftfeuchte:	+/- 10% pro 24 Stunden

### Definition von thermodynamischen Größen, die zu ermitteln sind, für die aber noch keine Grenzwerte definiert wurden:

- Häufigkeit des Übergangswechsels bei einem Grenzwert von 80% rel. Luftfeuchte,
- Schwankungsbreite von Temperatur und relativer Feuchte im Luftspalt
- Das gleichzeitige Vorliegen hoher Temperatur und hoher relativer Feuchte im Luftspalt

### Überwachungskriterien für die Messtechnik und an den Kunden zu übermittelnde Warnmeldungen:

- Rel. Feuchte im Luftspalt kleiner als 40% in % der Gesamtzeit
- Rel. Feuchte im Luftspalt größer 80% in % der Gesamtzeit
- Eis auf Schutzverglasung in % der Gesamtzeit
- Oberflächentemperatur des Originalglases kleiner als 0 Grad in % der Gesamtzeit
- Oberflächentemperatur des Originalglases größer als 40 Grad in % der Gesamtzeit
- Luftfeuchte über 75% und Lufttemperatur zwischen 20 und 40 Grad in % der Gesamtzeit
- Luftfeuchte über 85% und Lufttemperatur zwischen 10 und 40 Grad in % der Gesamtzeit
- Luftfeuchte über 75% und gleichzeitig Lufttemperatur zwischen 40 und 60 Grad in % der Gesamtzeit
- Luftfeuchte über 85% und gleichzeitig Lufttemperatur zwischen 40 und 60 Grad in % der Gesamtzeit
- Kondensat am Schutzglas oder rel. Feuchte der Luft im Nahfeld bei mehr als 90% in % der Gesamtzeit
- Kondensat am Originalglas oder rel. Feuchte der Luft im Nahfeld bei mehr als 90% in % der Gesamtzeit
- Tmax-Tmin im Luftspalt
- Phimax-Phimin im Luftspalt
- Delta T/Zeiteinheit im Luftspalt
- Delta Phi/Zeiteinheit im Luftspalt

### Ergebnisse aus Praxistests

Um zu untersuchen, wieviele der erarbeiteten Grenzwerte in realen Objekten überschritten werden, wurde auf eine hervorragende Datenbasis von Manfred Torge zurückgegriffen /TORGE 2011 und 2014/. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind in folgendem Bild (Abb. 2) gezeigt.

Rot bedeutet, daß ein oben definierter Grenzwert überschritten wurde, grün bedeutet, daß das Klima sich innerhalb der Grenzwerte bewegt und gelb bedeutet, daß keine Daten ermittelt werden konnten oder dass es keinen Grenzwert gibt.

Das „bunte“ Bild zeigt, daß viele der gewünschten Grenzwerte nicht eingehalten werden. Es kam zwar an keinem der Objekte zu Tauwasser an der Originalverglasung, sehr wohl aber an der Schutzverglasung mit bis zu 221 Tagen im Jahr. In vielen Fällen gab es Frost an der Originalverglasung, in fast keinem Fall lag die Temperatur oberhalb von 40 Grad. Die relative Luftfeuchte in der Umgebung des Originalglases ist in fast allen Fällen größer als 80 %. In eher seltenen Fällen ist die Luft zu trocken. In fast allen Fällen ist die Luftfeuchte in der Nähe der Schutzverglasung größer als 80 % oder 90 %. Keine Messdaten gibt es zur Häufigkeit des Übergangs bei 80 % rel. Luftfeuchte und es gibt keine Auswertung, für das gleichzeitige Auftreten hoher Luftfeuchten und Temperaturen in % der Gesamtmeßzeit, was für die Bewertung von Schimmel ganz besonders wichtig wäre.

Oberfläche temperatur des Originalglas es kleiner als 0 Grad 1% der Gesamtzeit	Oberfläche temperatur des Originalglas es größer als 40 Grad in % der Gesamtzeit	rel. Feuchte im Kircheninn enraum an der Originalglas größer 80% in % der Gesamtzeit	rel. Feuchte im Luftspalt nahe Schutzver glasung kleiner als 40% in % der Gesamtzeit	Feuchte im Luftspalt nahe Schutzver glasung größer 80% in % der Gesamtzeit	Feuchte im Luftspalt nahe Schutzver glasung größer 90% in % der Gesamtzeit	Eis auf Schutzver glasung in % der Gesamtzeit	Häufigkeit des Übergangs von 80% rel. Luftfeuchte im Spalt	Luftfeuchte über 75% und Lufttemper atur zwischen 20 und 40 Grad in % der Gesamtzeit	Luftfeuchte über 85% und Lufttemper atur zwischen 10 und 40 Grad in % der Gesamtzeit	Tage Kondensat am Schutzglas	Tage Kondensat am Originalglas	Tmax - Tmin im Luftspalt in Grad Celsius (höchster Wert im Jahr) in %	Phiman- Phimin im Luftspalt (Höchster Wert im Jahr) in %	Delta T/H5 Minuten im Luftspalt	Delta PH/H5 Minuten im Luftspalt	über 75% und gleichzeitig Lufttemper atur zwischen 40 und 60 Grad in % der Gesamtzeit	über 85% und gleichzeitig Lufttemper atur zwischen 40 und 60 Grad in % der Gesamtzeit	
3	0	23	0	55	20	20				81	0	41,8	55,6			"-4%min"		
12	0	11	0	32	33	2				6	0	44,5	53,2			"-4%min"		
10	0,1	28	4	37	0,1	10				30	0	52,9	78,9	4K/min		"-4%min"		
0	4	36	4	63	50	4				221	0	55,2	80,9	4K/min		"-4%min"		
0	0	0	4	43	14,5	2				58	0	53,6	84,7	2K/min		"-4%min"		
10	0	35	5	31	26					33	0	37,1	73,6					
			24		24	18				18	0	20	55					
15	0	5	0	25	14						0	20	43					
15	0	20	0	0,1	0,1						0	40	80					

Abb. 2. Darstellung der Überschreitung von Grenzwerten in realen Objekten auf Basis der Messdaten von Torge 2011 und 2014.

### Messgeräte zur Dauerüberwachung

Die vielen überschrittenen Grenzwerte zeugen davon, daß hohe Risiken bestehen, wenn man die thermodynamischen Zustände nicht kontinuierlich überwacht. Aus diesem Grunde wurde in einem von der DBU geförderten Projekt /SANDER 2017/ „Entwicklung und modellhafte Anwendung eines neuartigen Sensorsystems zur Überwachung der nachhaltigen Wirksamkeit von Schutzverglasungen für durch anthropogene Umwelteinflüsse gefährdete Glasmalereien am Beispiel der Wiesenkirche in Soest“ ein Messgerät entwickelt, welches man einfach in die Deckschienen einhängt, einschaltet und dann für die Überwachung relevante Messwerte ermittelt, speichert und über Mobilfunk in die Cloud sendet. Über Benutzername und Passwort lassen sich dann die Originaldaten in einem Webbrowser ansehen, um eine Beurteilung der Situation durchzuführen. Abbildung 3 zeigt das System fertig montiert:



Abb. 3. Custos Aeris für die Dauerüberwachung der thermodynamischen Zustände von Original- und Schutzverglasung.

Mit diesem System werden Lufttemperaturen und relative Feuchten im Luftspalt und im Nahfeld der Originalverglasung auf der kircheninneren Seite gemessen. Darüber hinaus findet eine berührungslose Oberflächentemperaturmessung der Originalverglasung auf der kircheninneren Seite und auf der Luftspaltseite statt, sowie auf der Luftspaltseite der Schutzverglasung. Damit sind alle relevanten Größen für die oben dargestellte Überwachung von Grenzwerten vorhanden. Für die Auswertung und Darstellung von Gefahren werden bisher schon die Angaben zur Tauwasserbildung auf Original- und Schutzverglasung in % der gesamten Messzeit gemacht (Abb. 4). Rot bedeutet, daß Kondensat vorlag und grün bedeutet, daß die Verglasung kondensatfrei war.

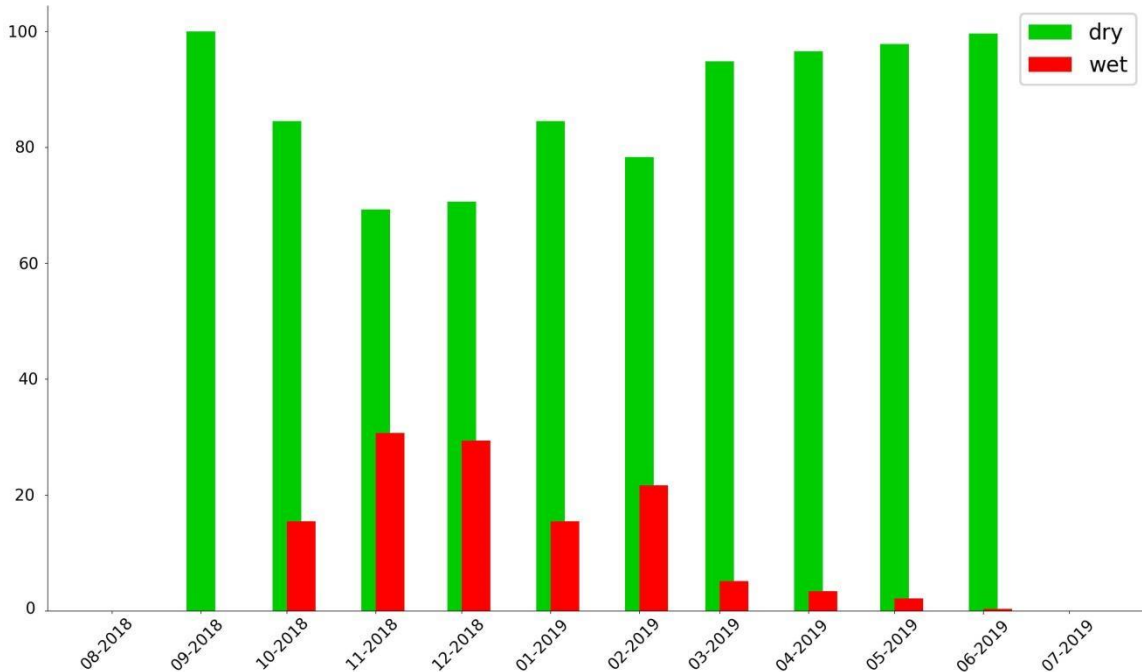


Abb. 4. Monatliche Darstellung des Kondensats in % der Gesamtzeit.

Risikoplots sind gut geeignet, um den thermodynamischen Gesamtzustand zu bewerten. Abbildung 5 zeigt einen solchen Risikoplot. Dargestellt sind die relative Luftfeuchte über der Temperatur. Die Farbskala gibt an, wie oft der entsprechende thermodynamische Zustand vorgekommen ist. Im grünen Bereich werden keine Risiken erwartet.

Da sich die thermodynamischen Zustände links in Abb. 5a aber stark im oberen Bereich bewegen, ist mit erheblichem Schimmelrisiko zu rechnen. Rechts ist dagegen eine Kirche gezeigt, in der voraussichtlich nicht mit Schimmel zu rechnen ist.

Custos Aeris wird nun so erweitert, daß alle anderen zu überwachenden Größen erfasst und die einzelnen Risiken dann dem Benutzer gemeldet werden.

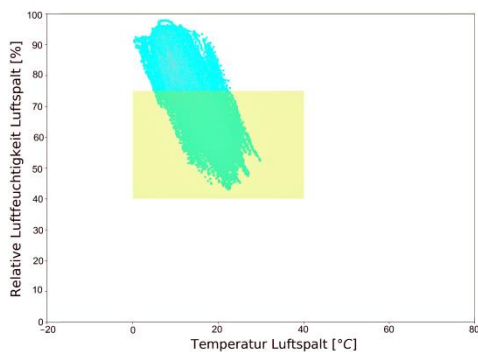


Abb. 5a. Risikoplot in einer Kirche mit hohem Schimmelrisiko.

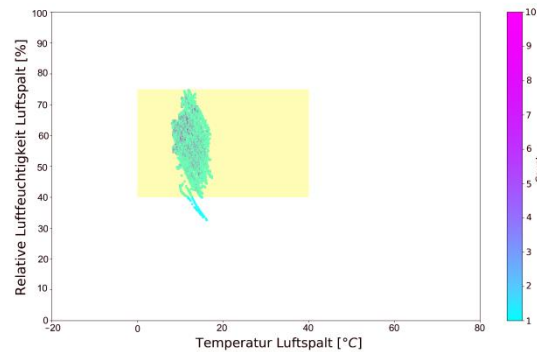


Abb. 5b. Risikoplot in einer Kirche mit geringem Risiko für Schimmelbildung.



## Die Risiken in der Zukunft durch Klimaerwärmung

Durch die Klimaerwärmung wird sich voraussichtlich die Lufttemperatur um ca. 5 Grad bis Ende des Jahrhunderts besonders im Norden Europas erhöhen /LEISSNER 2018/. Der Mittelmeerraum wird wesentlich heißer und trockener /LEISSNER 2018/. Die Niederschlagsmengen im Norden Europas werden deutlich zunehmen. Die klimatischen Änderungen sind so gewaltig, daß es zu vermehrtem Aufkommen von Schimmel kommen wird. Für das frühe Erkennen von Risiken für die historisch wertvollen Schutzverglasungen ist es mehr als empfehlenswert, Dauerüberwachungssysteme zu installieren.

### Forschungsbedarf

Bei der Durcharbeit vieler Literaturstellen für diese Publikation fiel auf, daß die Art der Sensoren und deren Anordnung bei unterschiedlichen Anwendungen unterschiedlich ausfällt. Eine Vergleichbarkeit der Messdaten und damit auch korrelierende Aussagen bei unterschiedlichen Objekten sind daher schwierig. Eine Normung von Messtechnik und Messpositionen wäre sehr hilfreich.

Für viele der vermutlich riskanten Parameter, die in der jetzigen Form nur mitgeschrieben werden, gibt es noch nicht hinreichend abgesicherte Grenzwerte. Hier liegt weiterer Forschungsbedarf vor, um die thermodynamischen Grenzparameter für die einzelnen Schadenmodelle zu erarbeiten.

### Anhang: Kurzdarstellung für potentielle Verbesserungsmaßnahmen

#### Abstand zwischen Schutzverglasung und Bleiverglasung und Größe der Ein- und Austrittsöffnungen

In Simulationen (/Oidtmann 1993/) zeigt sich, daß ab einer Belüftungsöffnung von ca 30mm bis 50mm und bei 40mm und 70mm Spaltabstand kaum noch Einflüsse auf die niedrigste Schutzglas Temperatur vorliegen. Ein ähnliches Verhalten ergibt sich auch für die Originalglas Temperaturen, die Spaltluft-Temperaturen und die Luftgeschwindigkeit im Spalt, wobei diese mit kleinerem Spaltabstand zunimmt.

#### Art der Belüftung

Es gibt nicht-belüftete, innen-belüftete, außen belüftete und mischbelüftete Systeme.

In ersten Untersuchungen /RÖMICH&FUCH 1993/, zeigte sich, daß nicht belüftete System für den Schutz der Bleiverglasung ungeeignet sind und die Korrosionsbelastung erhöhen. Außenbelüftete Systeme haben nur geringe Schutzwirkung und zeigen eine negative Belastung der Originalverglasung durch Luftschadstoffe und Stäube. Je nach Spaltabstand und Lufteintritts- und -austrittsöffnungen zeigen innen-belüftete System die besseren Ergebnisse. Mischbelüftete Systeme sind schwierig zu überschauen und führen auf jeden Fall schadstoffbelastete Außenluft in den Spalt ein. Daher ist hier Vorsicht geboten. In seiner Dissertation /OIDTMANN 1993/ gibt der Autor eine sehr gute Einführung in Schutzverglasungskonzepte. Auch wenn die Außenbelüftung wegen geringerem Kondensationsrisiko bei der aufsteigenden Luft physikalisch besser ist, kann es immer passieren, dass die Bleiverglasung im unteren Bereich stark abgekühlt wird und das Risiko für Kondensation der warmen, feuchten Kirchenluft auf der Innenseite der Bleiverglasung besteht. Bei der Innenbelüfteten Schutzverglasung tritt die warme, feuchte Luft oben ein und kühlt sich beim Herabfallen aufgrund der kalten Außentemperaturen ab. Hier ist also a-priori ein höheres Tauwasserrisiko vorhanden, allerdings bildet sich das Tauwasser auf der Schutzverglasung und nicht auf der Bleiverglasung. Daher ist dieses Konzept zu bevorzugen.

#### Art des Glasaufbaus bei der Schutzverglasung

Verbundsicherheitsglas hat sicherlich sehr gute Wirkung gegen Vandalismus. Problematisch ist es jedoch, wenn diese in Bleiruten eingefasst werden, denn hierdurch besteht das Risiko des Wassereintruchs an undichten Kanten. Die Bearbeitung von Verbundsicherheitsglas zu Rauten- oder Rechteckscheiben für Außenschutzverglasungen erfordert sehr große Erfahrung und eine präzise Vorgehensweise beim Zuschnitt des VSG. /TORGE 2011/.

#### Isolierglas

Bei einer Wärmeschutzverglasung mit innenbeschichteter Seite liegt die Glastemperatur des Schutzglases und die Lufttemperatur im Spalt höher als bei einfachem Floatglas. Dies führt dazu, daß Tauwasser am Floatglas bereits bei 4 Grad Außentemperatur einsetzt und bei ECOglas ab 2 Grad Außentemperatur /OIDTMANN 1994/. Insofern hat diese Art des Glases eine positive Wirkung. Aufgrund geringerer Temperaturunterschiede verlangsamt sich aber hier die Strömungsgeschwindigkeit. Vergleiche

chende Untersuchungen zum Thema Isolierglas wurden u.a. im Dom zu Xanten /SCHUBERT 2013/ durchgeführt. Um entsprechende Erkenntnisse in situ zu gewinnen, wurden vor je einem Fenster auf der Nord- und der Südseite des Domes verschiedene Varianten von außenliegenden Schutzverglasungen eingebaut und an diesen Modellfenstern zunächst über ein Jahr Luft- und Oberflächentemperaturen sowie relative Luftfeuchten gemessen. Auf der Grundlage der Messdaten wurde ein Vergleich der Verglasungen untereinander und mit einer als Referenz dienenden Einfachverglasung durchgeführt. Dabei konnte gezeigt werden, daß durch den Einbau der Isolierverglasung die Kondensatbildung auf der Glasmalerei fast vollständig verhindert wurde. Die Aufheizungs- und Abkühlungsprozesse auf der Glasmalerei verlaufen deutlich verlangsamt. Die Isolierverglasung mit Wärmeschutzbeschichtung hat optimale Ergebnisse geliefert /SCHUBERT 2013/. Die Lufttemperatur im Spalt wurde erhöht und die relative Feuchte verringert. Die Schwankungen von Lufttemperatur und relativer Feuchte wurden reduziert. Die Oberflächentemperaturen an der Schutzverglasung und an der Spaltseite der Glasmalerei wurden erhöht. Es verringert sich auch die Temperaturdifferenz der Oberflächen innerhalb des Domes.

### Beheizte oder nicht beheizte Kirche

In Simulationen und Messwerten /OIDTMANN 1994/ kann gezeigt werden, daß bei beheizten Kirchen die Möglichkeit einer Tauwasserbildung geringer ist. Die direkte Beheizung des Luftspaltes hat eine positive Wirkung auf die Absenkung der relativen Feuchte /TORGE 2011/ und /HÖR in BÖTTCHER 2016/.

### Staubdeposition

Die Untersuchungen zeigen, dass durch Staubdeposition auf Glasoberflächen mittelalterlicher Zusammensetzung unter Einfluss von Luftfeuchtigkeit und Temperatur Schäden entstehen können. Diese Schäden äußern sich in der Veränderung der Zusammensetzung der Glasoberfläche infolge von chemischen Reaktionen zwischen Staub, Luftfeuchtigkeit und Glas. Die aufgrund der relativen Luftfeuchtigkeit bedingte Anlagerung von Wasser an die Glasoberfläche führt bei sehr empfindlichen Gläsern bereits zu einer deutlich sichtbaren Auslaugung von Kalium und Calcium aus der Glasoberfläche /TORGE 2011/. Die für eine gut funktionierende Außenschutzverglasung notwendige Luftzirkulation im Spalt zwischen Original und Außenschutzverglasung ermöglicht den Transport von Staubpartikeln und Aerosolen /TORGE 2014/. Organische Verschmutzungen bilden in Kombination mit Feuchtigkeit, z. B. ablaufendem Kondensat, einen idealen Nährboden für die Ansiedlung und das Wachstum von Mikroorganismen wie Schimmelpilzen, Bakterien- und Hefekolonien. Diese können unter Umständen eine ernsthafte Gefährdung des Glasmaterials darstellen /SCHUMACHER 2010/.

### Literaturquellen

- Jonathan ASHLEY-SMITH, Andreas BURMESTER, Melaine BAUERNEIND *Climate for Collections: standards and uncertainties*, Archetype Publications, Ltd. in association with Doerner Institut, Munich, London, 2013.
- Keith BARLEY, "A History of Protective Glazing", in *Forum for the conservation of stained glass. The Art of Collaboration Stained Glass Conservation in the Twenty-first Century*, Harvey Miller Publishers, New York, 2010, s. 111-118.
- Peter BERKENKOPF, "Die Auswirkungen von Schutzverglasungen auf Konservierungskonzepte für historische Glasmalereien" in *ICOMOS, Hefte des Deutschen Nationalkomitees* Vol. 42, 2005 <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/article/view/20618> [accessed 2022].
- Wolfgang BÖTTCHER, Ulrike BRINKMANN, Susanne FISCHER, Alexandra FRITSCH, Oliver HAHN, Martha HÖR, Stefan MAY, Georg SIMON, Jörg SEELE, Jonas SCHILLER, Ronald SCHMIDT-VOLLUS, Wolfram STEPHAN, Wolfgang ANTAL, Christian MERKL, Markus NORDEN, Thomas HIENINGER, *Möglichkeiten einer Klimastabilisierung für durch anthropogene Umwelteinflüsse geschädigte Glasmalereibestände am Beispiel von St. Sebald in Nürnberg* BDU AZ-31770, Herausgegeben von St. Sebald, Nürnberg, 2016, <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-31770.pdf> [accessed 2022].
- Joost CAEN "Restauration van Glasramen" in *Glas in Lood – M.& L. cahier*, 1, Ministerie van de Vlaamse Gemeenschap, Bruxelles, 1992, p. 32-75.
- Tobit CURTEIS and Léonie SELIGER, *Conserving Stained Glass using Environmental Protective Glazing*, Historic England. Research Report Series no. 43-2017, Swindon, 2017. <https://research.historicengland.org.uk/Report.aspx?i=15635> [accessed 2022].
- Rainer DREWELLO, *Modellvorhaben schadstoffverhindernder Schutzmaßnahmen an den spätmittelalterlichen und frühneuzeitlichen national wertvollen Glasfenstern der Sebalduskirche in Nürnberg*, Evang.-Luth. Kirchengemeinde St. Sebald, Labor im GNM – DBU, Nürnberg, 2004.
- Dieter R. FUCHS, H. Potzelt, G. Tunker und H. Schmidt "Model Glass Test Sensors - a new concept to investigate and characterize external protective glazings", in *CVMA Newsletters*, núm. 41-42, 1988, [http://cvi.cvma-freiburg.de/documents/newsletter/CVMAnewsletter41\\_42.pdf](http://cvi.cvma-freiburg.de/documents/newsletter/CVMAnewsletter41_42.pdf) [accessed 2022].



- Dieter R. FUCHS, Helmut K. SCHMIDT, *Umweltbedingte Schädigungen an historischen Glasfenstern, Phänomene, Mechanismen, Konservierungskonzepte*, Saarländische Universitäts- und Landesbibliothek Sonstige Einrichtungen - INM Institut für Neue Materialien, Leibniz, 1988.
- Harald GARRECHT, Oliver HAHN, Kim KAPPES, Simone REEB, Susanne SCHEIBNER, Nicole STERZING, "Modellversuch zur Spalttemperierung an der Divi Blasii Kirche in Mühlhausen, Deutschland", in *Forum for the conservation of stained glass. The Art of Collaboration Stained Glass Conservation in the Twenty-first Century*, Harvey Miller Publishers, New York, 2010, s. 119-126.
- DBU, "Modellhafte Thermoschutzverglasung für Kirchenfenster mit innen-hinterlüfteter Bleiverglasung", in *Bereich: Projektdatenbank AZ 21979/01*, [https://www.dbu.de/projekt\\_21979/01\\_db\\_2848.html](https://www.dbu.de/projekt_21979/01_db_2848.html) [accessed 2022].
- Martha HÖR und Jörg SEELE, "Bauphysikalische Untersuchungen zur Gefährdung des Glasmalereibestandes in der Nürnberger Sebalduskirche, Möglichkeiten und Grenzen der Wirksamkeit von Außenschutzverglasungen", *ICOMOS Hefte des Deutschen Nationalkomitees* Bd. 42, 2005 <https://journals.ub.uni-heidelberg.de/index.php/icomoshefte/article/view/20619/14405> [accessed 2022].
- Bernhard A.H.G. JÜTTE, "Außenschutzverglasung. Meßergebnisse in der St. Janskirche zu Gouda" in *Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung*, Arbeitshefte des Bayerischen Landesamtes für Denkmalpflege XXXII, Munich, 1985, pp. 110–15.
- G. LAURIAT und L. G. S. "Modellierung von Luftströmen und Temperaturverteilungen in den Zwischenräumen von Außenschutzverglasung und Bleiverglasung", *Conservation commune d'un Patrimoine commun - Gemeinsames Erbe gemeinsam erhalten. Erstes Statuskolloquium des Deutschen Forschungsprogramms für die Erhaltung von Baudenkmalern, Karlsruhe, 1993*, Champs-sur-Marne, 1993.
- Johanna LEISSNER und Dieter R. FUCHS *Glassensorstudie zur Abschätzung der korrosiven Verhältnisse an Kirchenfenstern mit Außenschutzverglasung*, Fraunhofer Institut für Silicatiforschung, Würzburg, 1993.
- Johanna LEISSNER und Constanze FUHRMANN, "Kulturerbe und Klimawandel - sind wir an einem Wendepunkt? ", in *Cartaditalia IX*, 2018, pp. 220-234, <http://publica.fraunhofer.de/dokumente/N-487625.html> [accessed 2022].
- Stefan Josef Christoph OIDTMANN, *Entwicklung und klimatechnische Überprüfung einer technologisch und ästhetisch beispielhaften Aussenschutzverglasung*, Karlsruhe, 1993.
- Stefan Josef Christoph OIDTMANN, Johanna LEISSNER & Hannelore RÖMICH, 2000. "Schutzverglasungen", in *Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien* Mainz: Arnold Wolff (ed), Mainz, 2000, pp. 167–209.
- Ivo RAUCH, "Conservation et restauration des verrières anciennes introduction a la problématique", *Bulletin de la cathédrale de Strasbourg*, XXVI, Strasbourg, 2004, p. 127-136.
- Hannelore RÖMICH, Dieter R. FUCHS, *Konservierung historischer Glasfenster - internationale Untersuchungen neuer Methoden*, Fraunhofer-Institut für Silicatiforschung, Würzburg, 1993.
- Christoph SANDER, *Entwicklung und modellhafte Anwendung eines neuwertigen Sensorsystems zur Überwachung der nachhaltigen Wirksamkeit von Schutzverglasungen für durch anthropogene Umwelteinflüsse gefährdete Glasmalereien am Beispiel der Wiesenkirche in Soest*, Glasmalerei Peters, Paderborn, 2017, DBU Aktenzeichen 30751 / 45, <https://edocs.tib.eu/files/e01fn18/1023543664.pdf> [accessed 2022].
- Johannes SCHUBERT (dir.), *Entwicklung und modellhafte Erprobung von energetisch optimierten Schutzverglasungen im Xantener Dom*, Dombauhütte St. Viktor Verein zur Erhaltung des Xantener Domes - DBU AZ 27471-45, Xanten, 2013, <https://neu.xantener-dombauverein.de/wp-content/uploads/2020/09/2013-03-18-Abschlussberichts.pdf> [accessed 2022].
- Claudia SCHUMACHER M.A., *Die Verglasung der Evangelischen St. Georgskapelle zu Fuhlenhagen*, Büro Dr. Rauch, Koblenz, 2010, <http://www.schlossmacherjungk.de/files/26fuhl02.pdf> [accessed 2022].
- Klaus SEDLBAUER, *Vorhersage von Schimmelpilzbildung*, Fakultät Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Stuttgart (Dissertation), Stuttgart, 2001, [https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/dissertationen/ks\\_dissertation\\_tcm45-30724.pdf](https://www.ibp.fraunhofer.de/content/dam/ibp/ibp-neu/de/dokumente/dissertationen/ks_dissertation_tcm45-30724.pdf) [accessed 2022].
- Manfred TORGE, Michael Bücken und Ines Feldmann, *Modellhafte Evaluierung von Restaurierungs- und Konservierungsmaßnahmen an historischen Glasmalereien mit starken Schäden durch anthropogene Einflüsse. Abschlußbericht* Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung DBU Az 27312-45, Berlin, 2011, <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-27312.pdf> [accessed 2022]. Fraunhofer Irb Verlag, Stuttgart, 2012.
- Manfred TORGE, "Modellhafte Restaurierung und Schutz von schwer geschädigten Glasmalereien und Ornamentbleiverglasungen an bedeutenden sakralen Bauten in einer durch Umweltschadstoffe hoch belasteten Landschaftsregion Niederschlesiens. Abschlußbericht", Bundesanstalt für Materialforschung und prüfung DBU Az. 30204–45, Berlin, 2014, <https://www.dbu.de/OPAC/ab/DBU-Abschlussbericht-AZ-30204.pdf> [accessed 2022]. Fraunhofer Irb Verlag, Stuttgart, 2015



## 1.2

### The Inherited Condition: The Complex Methodology Required to Conserve the West Choir Windows of Naumburg Cathedral, Germany

Sarah Jarron, Jana Hildebrandt, Mayre Maquiné, and Emily Yates

#### *Der ererbte Zustand: die komplexe Methodik zur Erhaltung der Westchorfenster des Naumburger Doms, Deutschland – Zusammenfassung*

Während seiner Entstehungszeit zwischen 1241 und 1250 wurde der Westchor des Naumburger Doms mit fünf figurativen Fenstern ausgestattet. Der Westchor mit seinen berühmten Stifterfiguren stellt ein Gesamtkunstwerk dar und war maßgeblich für die Verleihung des UNESCO Weltkulturerbe-Titels im Jahr 2018.

Im Laufe der Jahrhunderte wurden die Fenster des Chors vielen Eingriffen unterzogen. Drei der fünf Fenster weisen einen großen Anteil von Glasmalerei aus der Entstehungszeit auf, ergänzt durch Glas aus Restaurierungsphasen des 19. und 20. Jhs. Zwei verlorene Fenster wurden im 19. Jh rekonstruiert und der originalen Gestaltung angeglichen.

#### *The Inherited Condition: The Complex Methodology Required to Conserve the West Choir Windows of Naumburg Cathedral, Germany – Abstract*

Over the centuries, the windows in the West Choir of Naumburg Cathedral have been exposed to many alterations. These figurative windows were originally installed between 1241 and 1250, during the Choir's construction. The entire ensemble or Gesamtkunstwerk was a key factor in the Cathedral gaining World Heritage status, in 2018.

Today, three of the five windows retain considerable expanses of original glazing, as well as 19th- and 20th-century additions from previous restorations. Two windows were entirely remade in the 19th century with sympathetic designs.

Jede Restaurierung hat sich signifikant auf den Zustand der Glasmalereien ausgewirkt. Während allen Ergänzungen ein historischer Wert zugesprochen werden kann, verursachen viele der angewendeten Techniken und eingebrachten Materialien heute eine restauratorische Herausforderung. Das Glas aus dem 19. Jh zeigt extremen Malschichtverlust und Craquelé des blauen und gelben Glases. Die Vorarbeiten an den Glasmalereien des 13. Jhs zur Durchführung des Jacobiverfahrens führten zu starker Glaskorrosion, fragiler Malschicht und Acrylatrückständen.

Dieser Artikel befasst sich neben der Restaurierungsgeschichte mit dem überkommenen Zustand der Fenster und den durchgeführten Restaurierungsmaßnahmen. Des Weiteren wird beschrieben, wie der Gesamteindruck des Westchors visuell harmonisiert wurde.

Each restoration has significantly impacted upon the current condition of the stained glass. Whilst, over time, all introduced materials can attain historic value, it is clear that many of the techniques and materials applied to the West Choir windows have created substantial conservation challenges. The 19th-century glass exhibits extreme paint loss and craquelé of the blue and yellow glasses. The 13th-century glass exhibits severe corrosion, fragile paint and acrylate residues as a result of preparations for Jacobi-plating in the 1940s.

This paper will describe the restoration history and the balanced methodology required to unify these windows, whilst addressing the urgent interventions needed for their conservation.

## Introduction

Naumburg Cathedral's West Choir has one of Germany's most extensive figurative window cycles from the High Middle Ages. These windows portray the victory of Christian faith over pagan traditions. Apostles and saints stand triumphant over their adversaries and personifications of virtues defeat vices. The medieval scheme also epitomises the *Zackenstil* or jagged style, which takes its name from the depiction of heavy folds in drapery, seen in the figure's heraldic clothing. This 13th-century aesthetic mixed French Gothic and Byzantine influences, with Naumburg at an intersection between these artistic movements. A narrow colour palette is combined with large figurative iconography on a monumental scale. Comparable in quality to the clerestory and transept windows of Chartres Cathedral, this glass undeniably has a strong identity and is instantly recognisable.

This scheme of five monumental windows remains a highly significant medieval work of art, despite now being a composite of interventions by the many generations of glass painters and conservators to work on them. Despite the 19th-century recreation of two windows, strong iconographic unity has been retained. However, the durability of these additions has created problems with the uniformity of tone and light across the Choir.

The last 150 years have witnessed three major restoration campaigns. Each successive team respected the quality of these windows and strove to ensure their interventions were ethical, harmonious and enduring. Unfortunately, each suffered a combination of poor execution, irreversible procedures, flawed