

# Monitoring

## Materialtechnik

In den letzten Jahren mussten an den Mörtelrezepturen von Andreas Walser immer wieder kleine Anpassungen vorgenommen werden. Dies, weil einzelne Bestandteile nicht mehr in der gleichen Qualität lieferbar waren. In intensiver Arbeit wurden durch Peter Völkle Ersatzkomponenten gefunden. Die angepassten Mörtel kamen bereits auf den Münsterbaustellen zum Einsatz und haben sich im Gebrauch bewährt. Die Münsterbauleitung gab nun Ende 2017 eine erneute wissenschaftliche Überprüfung der Mörtel, analog der Laboranalysen 2005,<sup>9</sup> in Auftrag. Die Resultate werden im Laufe des nächsten Jahres vorliegen.

Unseren Kontakten zur Kölner Dombauhütte ist zu verdanken, dass Peter Völkle 2017 auf einen seit einiger Zeit am Kölner Dom eingesetzten Steinfestiger<sup>10</sup> gestossen ist. Das Produkt auf Siliciumdioxid-Nanosol-Basis, welches ursprünglich für den Holzschutz sowie die Festigung von bemalter Keramik entwickelt wurde, bringt auch auf Sandstein einige Vorteile im Arbeitsablauf mit sich. Da am Berner Münster keine neuen nicht vorher eingehend geprüften Produkte zum Einsatz kommen, wurden auch hier Versuchsreihen in der Werkstatt und Musterflächen am Bau angelegt. In Rücksprache mit verschiedenen Forschungsanstalten in Deutschland sowie CSC Sàrl Fribourg konnte Ende 2017 für den vorgesehenen Arbeitsbereich grünes Licht erteilt werden.<sup>11</sup> Das Produkt kam am Fassadenabschnitt 85-90/245/311 Süd erstmals zur Anwendung und scheint sich bisher gut zu bewähren.

## Personensicherheit

Auch im Berichtsjahr wurde an kleinen und sinnvollen Verbesserungen der Sicherheit von Besuchern und Mitarbeitenden gearbeitet:  
Zum Schutz von Kindern auf dem Münsterturm und vor herunterfallenden Gegenständen wurden auf der Achteckgalerie innenliegende Schutzgitter angebracht. Die Brüstungen entsprechen nun den allgemein geltenden Sicherheitsanforderungen an Brüstungshöhe und Durchdringungen.<sup>12</sup>  
Die Absturzsicherungen an den Turmtreppenhäusern sind aktuell in Arbeit, die in den 2006-2008 restaurierten Treppentürmchen des Oktogons zur Verbesserung der Besuchersicherheit noch fehlenden Handläufe wurden bereits Ende 2016 montiert.

Bei den Dachausstiegen aus dem Hauptschiffestrich wurden bereits in den vergangenen Jahren Absturzgitter montiert. 2017 konnte endlich auch für die Dachdeckerzugänge der Seitenschiffe eine Lösung gefunden werden, welche die Galerien optisch nicht beeinträchtigt. Die neu montierten Fallschutzgitter sind eine in enger Zusammenarbeit zwischen der Münsterbauleitung, der Bauhütte und des beauftragten Stahlbauers entwickelte Speziallösung.

9 TB BMS 2005, Seiten 45-46

10 Feinchemie GmbH, FCS-Bericht Nr. 43/00 „VERWENDUNG VON SILICIUMDIOXID-NANOSOLEN ZUR SANDSTEINANSANIERUNG“, Sebnitz, den 17.12.2000 GMBU e.V. (Dr. Helfried Haufe)

11 CSC Sàrl, R.0003.22 – Analysekurzbericht BE – BERN, MÜNSTER, ANWENDUNG VON SEBOSIL ZUR FESTIGUNG, Fribourg 11.10.2017

12 SIA Norm 358 „Geländer und Brüstungen“



**Spezialentwicklung der Münsterbauleitung für die Verbesserung der Sicherheit für Dachdecker und MitarbeiterInnen der Münsterbauhütte oder des EWB (Energie Wasser Bern). Ohne Aufklappen der Schutzgitter vor den Brüstungen können die Dachaufstiege gar nicht mehr begangen werden. Das Begehen der Seiten- und Hochschiffgalerien ist für Unbefugte seit längerem verboten und erfolgt auf eigene Gefahr.**

## Überprüfung der Funktion der Schutzverglasungen an den Chorfenstern

Vom Gerüst im Chor wurde im letzten Jahr profitiert, um die Wirksamkeit der 2008-2009 angebrachten Schutzverglasungen an den Fenstern des 19. Jahrhunderts (Fenster 110 und 120 Süd) zu überprüfen. Die Resultate liegen nun vor und sind im nachfolgenden Bericht Stefan Trümpler und Sophie Wolf „Berner Münster. Klima-Monitoring an den Glasmalereien im Chor“ vom 8. Juni 2018 zusammengefasst:

### **Warum Klima-Monitoring an den Glasmalereien im Chor?**

*Die spätmittelalterlichen Glasmalereien im Chor des Berner Münsters zählen zu einem der besterhaltenen Glasmalereiensembles aus dieser Zeit. Eine Besonderheit dieser Werke sind die farbigen Kaltbmalungen und die rückseitigen Vorzeichnungen, die Aufschluss über den künstlerischen und technischen Schaffensprozess im späten Mittelalter geben.<sup>13</sup> Der gute Erhaltungszustand der Fenster ist einerseits der regelmässigen Wartung und Pflege sowie zurückhaltenden Restaurierungen im 19. und 20. Jahrhundert zuzuschreiben, andererseits dem frühen Einbau einer „isothermalen“ Schutzverglasung.<sup>14</sup> Insbesondere letzterem Umstand ist es zu verdanken, dass das Kondensationsrisiko auf den empfindlichen bemalten Innenseiten der Glasmalereien seit über 70 Jahren stark herabgesetzt ist und die Aussenseiten vor direkten Witterungseinflüssen geschützt sind.*

*Regelmässige Kontrollen und mehrere Bestandsaufnahmen (1987, 2008, 2017) haben gezeigt, dass der Zustand der spätmittelalterlichen Glasmalereifenster seit dem Einbau der Schutzverglasung unverändert geblieben ist, die Schutzverglasung somit also ihre Funktion zu erfüllen scheint. Ein Beweis für diese Hypothese ist der vergleichsweise schlechte Erhaltungszustand der Masswerkverglasungen und der beiden Südfenster aus dem 19. Jahrhundert, die erst rund 60 Jahre nach den mittelalterlichen Fenstern eine Schutzverglasung erhielten.<sup>15</sup> Trotz dieses positiven Befunds schien es an der Zeit, die Chorverglasung nun einmal als Ganzes einem „Klimacheck“ zu unterziehen, um einerseits die seit längerem bestehenden Verhältnisse und deren Auswirkung an den mittelalterlichen Glasmalereien zu verstehen und andererseits die Bedingungen an den neu geschützten Fenstern zu evaluieren. Insbesondere galt es zu eruieren, welche Faktoren das Klima an den Fenstern massgeblich beeinflussen und wo – aus klimatischer Sicht – langfristig die grössten Risiken für den Erhalt der Glasmalereien liegen. Zudem war uns wichtig abzuklären, ob die neue Schutzverglasung auf der Südseite klimatische Auswirkungen hat, die bisher nicht zum Tragen kamen, vor allem in Bezug auf die Erwärmung und deren Schadenpotential.*

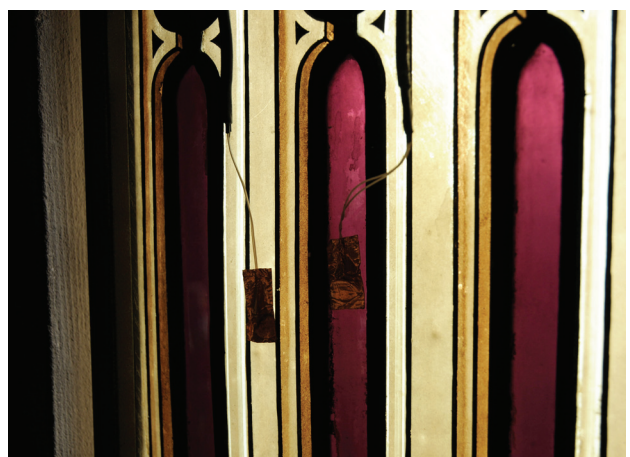
*Grundlage für diese Untersuchung bildete eine längere Klimamesskampagne, mittels derer die Klimaverläufe im Nahfeld der Glasmalereien und der Schutzverglasung und eventuelle Taupunktunterschreitungen auf den Glasoberflächen aufgezeichnet wurden.*

13 Stefan Trümpler und Sophie Wolf, Rückseitige Vorzeichnungen und Kaltbmalungen. Untersuchungen an den Chorfenstern des 15. Jahrhunderts im Berner Münster, Beitrag für die Schlusspublikation des Berner Münster Projekts (erscheint 2019).

14 Bei diesem System werden die gerahmten Glasmalereifelder ein paar Zentimeter in den Innenraum vorversetzt und an deren Stelle im Fensterfalz das Schutzfenster eingebaut. Die Glasmalereien sind somit beidseits vom Innenraumklima umgeben.

15 An diesen Glasmalereien haben sich innerhalb weniger Jahrzehnte Schäden entwickelt, die auf starke Klimaschwankungen und Kondensation auf der Glasoberfläche der Glasmalerei zurückzuführen sind.





- o.l. und. o.r.** Stefan Trümpler und Sophie Wolf von Vitrocentre Romont bei der Nachuntersuchung einzelner Scheiben aus den Chorfenstern, kurz vor dem Abbau des Gerüstes 2017.
- m.l.** Vorzeichnungen auf der Rückseite der Glasmalerei (Ausschnitt aus Feld I 5c, Passionsfenster, 230 Ost).
- m.r.** Originale gelbe Kaltbemalung auf der Vorderseite der Glasmalerei (Ausschnitt aus Feld nII 6c, Bibelfenster, 110 Nord).
- u.r.** Klimamessungen: Temperaturfühler auf der Glasmaleroberfläche (Stefanusfenster, sIII, 110 Süd).

**Bilder m. und u. sowie entsprechende Bildlegenden: Vitrocentre Romont.**



## **Messkonzept**

Die Messungen wurden im Auftrag der Münsterbauleitung von Ernst Baumann, Konsulent der Eidgenössischen Kommission für Denkmalpflege und Spezialist für Raumklimafragen in historischen Bauten in enger Zusammenarbeit mit Stefan Trümpler und Sophie Wolf vom Vitrocentre Romont geplant und durchgeführt. Sie erfolgten über einen Zeitraum von 9 Monaten (18.8.2016–18.5.2017) und umfassten eine Sommer- und eine Winterperiode sowie die Übergangszeiten im Herbst und Frühjahr. Über die Wintermonate (8.10.2016–18.5.2017) war die Kirche beheizt. An insgesamt sieben Messpositionen wurde im Messtakt von 30 Minuten die Temperatur gemessen; die relative Feuchte wurde an vier Stellen aufgezeichnet.

Um die klimatischen Bedingungen im Nahfeld der Fenster zu erfassen, wurden an drei Fenstern unterschiedlicher Exposition die Oberflächentemperaturen auf den Innenseiten des Schutzfensters und der Glasmalerei sowie die relative Feuchte und die Temperatur im Zwischenraum zwischen Schutzglas und Glasmalerei gemessen (Abb. Seite 77 oben, Positionen a–c). Zudem wurde an einer nach Süden orientierten Blankverglasung ohne Schutzfenster (sIV) die Oberflächentemperatur auf der Innenseite des Glases aufgezeichnet. Als Referenz für das Aussenklima wurde je ein Messgerät an der Nord- und Südfassade des Chors positioniert. Das Innenraumklima wurde bei der Kanzel gemessen. Die Taupunkttemperaturen auf den Glasoberflächen der Glasmalerei und des Schutzglases wurden aus den gemessenen Oberflächentemperaturen und der gemessenen relativen Luftfeuchte im Raum bzw. im Zwischenraum zwischen Schutzglas und Glasmalereifenster berechnet.

## **Die wichtigsten Ergebnisse in Kürze**

### **Aussenklima**

Im Messzeitraum wurde sowohl ein besonders heisser August wie auch der kälteste Januar seit rund 30 Jahren erfasst. Dieser Umstand kann insofern als glücklich bezeichnet werden, als dass im Messzeitraum Extremsituationen – mit entsprechender klimatischer Belastung für die Glasmalereien – aufgezeichnet wurden. An der Südfassade wurden im Sommer Lufttemperaturen von 46°C erreicht; an der Nordfassade lagen die Temperaturen bei maximal 28°C; im Winter fielen die Temperaturen auf -8°C (Südfassade) bzw. -7°C (Nordfassade). Die relative Luftfeuchte lag im Sommer im Mittel bei 67% und im Winter bei 73%.

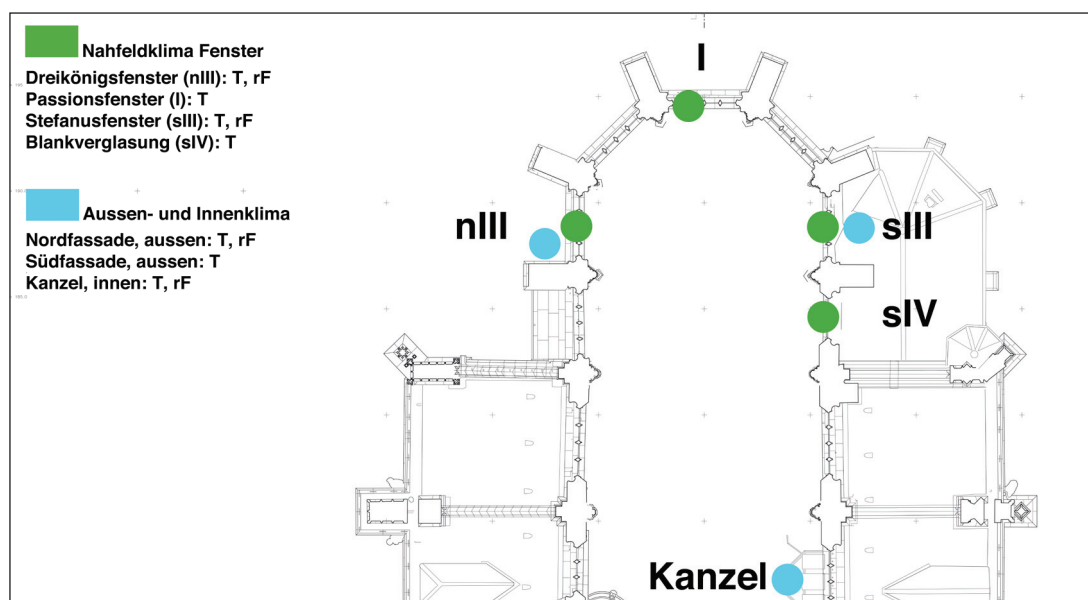
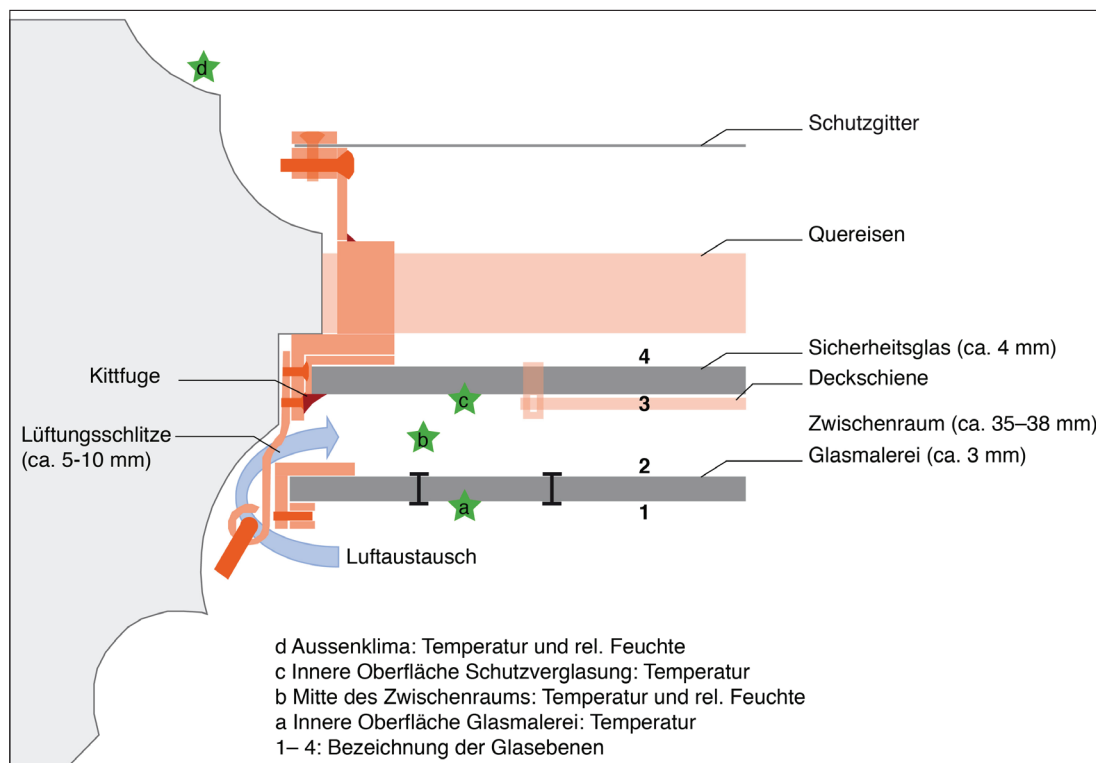
### **Innenraumklima**

Im Chorraum war das Klima aufgrund der Dämmwirkung des Baus und auch des Heizbetriebs erwartungsgemäss weitaus ausgeglichener als aussen: Im Sommer lag die Lufttemperatur in der Nähe der Kanzel durchschnittlich knapp 22°C und die relative Luftfeuchte bei 58%. Im Winter lagen die Werte im Mittel bei 15°C und 45%. Während des Heizbetriebs im Winter war die Schwankungsbreite der Temperatur- und Luftfeuchtwerte wegen der Absenkung der Innenraumtemperatur in der Nacht jedoch grösser als im Sommer.

### **Klima im Nahfeld der Fenster**

Die Temperatur- und Feuchteverläufe über die Sommer- und Winterperiode zeigen, dass das Klima im Nahfeld der Fenster wesentlich vom Aussenklima und

insbesondere von direkter Sonneneinstrahlung beeinflusst wird. Dies spiegelt sich in den starken Tag- und Nachtschwankungen in den Temperatur- und Feuchteverläufen wider, insbesondere im Winter. Am südwärts orientierten Fenster (sIII) sind die Schwankungen wegen direkter Sonnenwärme stärker als am nordseitigen Fenster (nIII). An Sonnentagen lagen am Südfenster die Temperaturen im Zwischenraum und auf der Glasmalereioberfläche über der Innenraumtemperatur; nachts fielen die Temperaturen wieder darunter.



o.  
u.

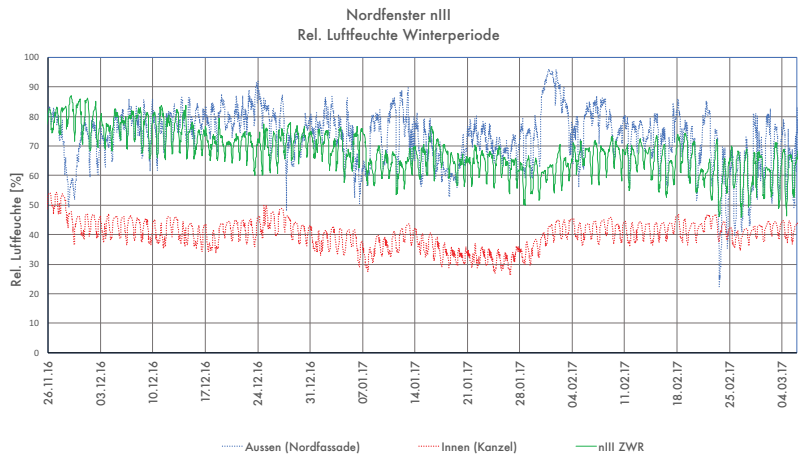
**Skizze des Verglasungssystems (Querschnitt) mit Lage der Messfühler.**

**Grundrissplan mit Messstellen für Temperatur (T) und relative Feuchte (rF). An insgesamt sieben Messpositionen wurde im Messtakt von 30 Minuten die Temperatur gemessen; die relative Feuchte wurde an vier Stellen aufgezeichnet.**

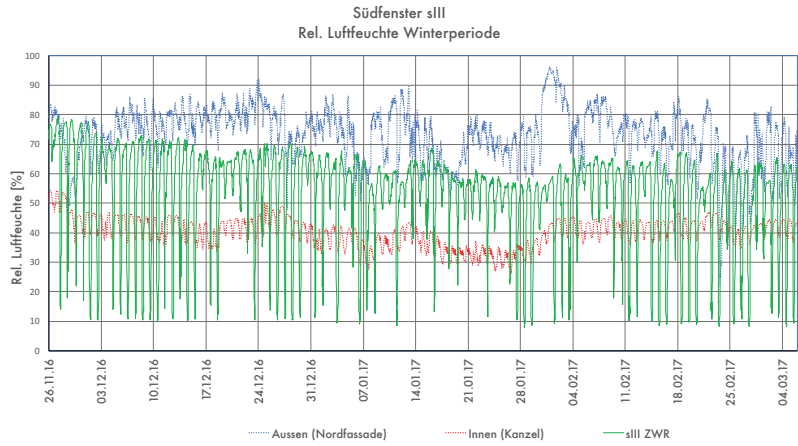
**Bilder: Vitrocentre Romont, Stefan Trümpler und Sophie Wolf.**



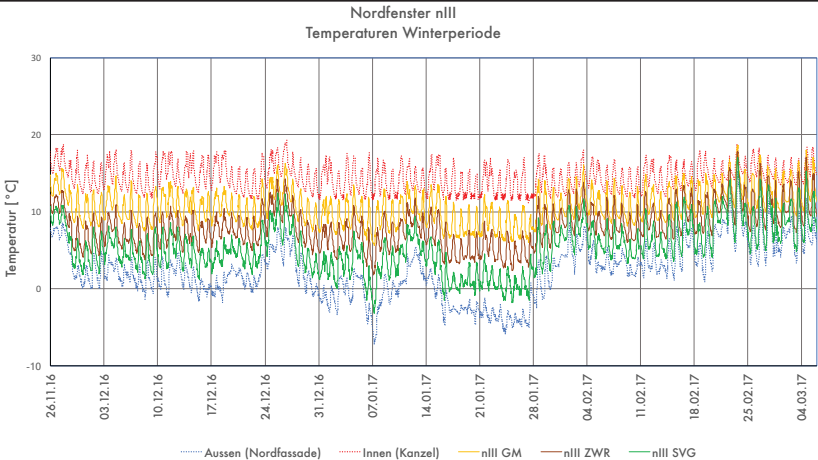
**Rel. Luftfeuchte in der Winterperiode 2016-2017 Nordfenster nIII (110 Nord)**



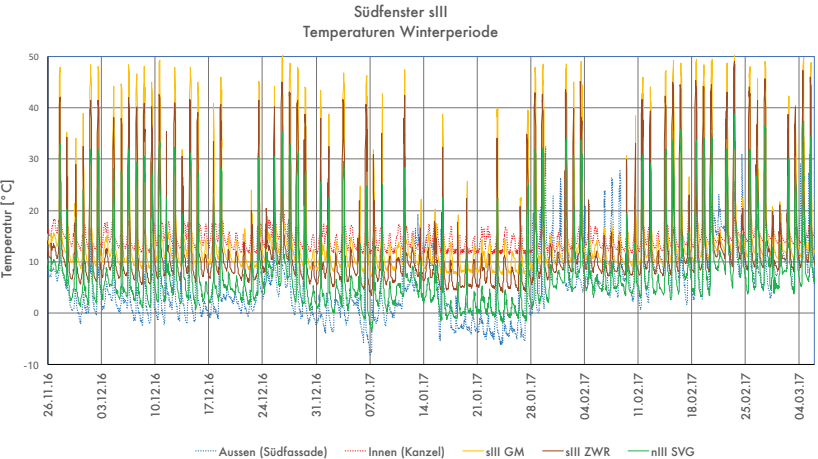
**Rel. Luftfeuchte in der Winterperiode 2016-2017 Südfenster sIII (110 Süd)**



**Temperaturen in der Winterperiode 2016-2017 Nordfenster nIII (110 Nord)**



**Temperaturen in der Winterperiode 2016-2017 Südfenster sIII (110 Süd)**



*Dies bedeutet, dass sich wegen des geringen Luftaustauschs im Zwischenraum die Glasflächen weniger schnell abkühlten als die Luft im Innenraum.*

*Auf der Glasoberfläche des Südfensters wurden im Sommer Temperaturen von bis zu 51°C erreicht; auch im Winter stiegen die Temperaturen dort an Sonnentagen auf über 30°C an. Am nordseitigen Fenster lag die Höchsttemperatur auf der Innenseite der Glasmalerei im Sommer bei 28°C, im Winter bei 22°C. Die Nullgradgrenze wurde im Winter nur an den Schutzgläsern und an der ungeschützten Blankverglasung unterschritten. Auf den Glasmaleroberflächen lagen die Tiefsttemperaturen im Winter bei 7°C (Südseite) und 6°C (Nordseite), also deutlich über dem Gefrierpunkt.*

*Da der Verlauf der relativen Luftfeuchte temperaturabhängig ist – je höher die Temperatur, desto niedriger die relative Luftfeuchte – wurden am Südfenster im Durchschnitt niedrigere relative Luftfeuchtwerte als am Nordfenster gemessen: Im Zwischenraum des Südfensters lag die relative Feuchte im Sommer bei durchschnittlich 56%, am Nordfenster bei 68%. Im Winter wurden am Südfenster im Mittel 57% und am Nordfenster 73% relative Feuchte gemessen.*

*Auch am Ostfenster schlug sich der Wärmeeintrag durch die Sonne deutlich im Temperatur- und Feuchteverlauf auf den Glasoberflächen der Glasmalerei nieder. Die Mittelwerte für Temperatur und relative Feuchte am Ostfenster (I) lagen aufgrund der „mittleren“ Sonnenexposition zwischen denjenigen des Süd (sIII)- und des Nordfensters (nIII).*

### **Kondensation auf den Oberflächen der Glasmalerei?**

*Den Berechnungen nach lagen die Temperaturen auf der Innenseite der geschützten Glasmalereien (nIII, sIII) im Messzeitraum immer oberhalb der berechneten Taupunkttemperaturen. Demnach gab es zu keinem Zeitpunkt Kondensation auf diesen Glasoberflächen. Die Taupunkttemperatur wurde nur auf der Innenseite des Schutzglases des Nordfensters (nIII) unterschritten. Dort kann es zeitweilig zu Kondensation gekommen sein. Bei Temperaturen unter der Nullgradgrenze mag sich auf diesen Glasoberflächen auch ein Frostfilm entwickelt haben.*

## **Faktoren, die das Nahfeldklima beeinflussen**

### **Aussenklima versus Heizbetrieb**

*Das Klima an den Glasmalereien im Chor wird wesentlich vom Aussenklima bestimmt. Direkte Sonneneinstrahlung beeinflusst das Nahfeldklima entscheidend und führt im Tagesverlauf zu grösseren kurzzeitigen Temperatur- und Feuchteschwankungen und Extremwerten, vor allem auf der sonnenexponierten Südseite des Chors (Temperaturen über 50°C und rel. Luftfeuchten unter 10%).*

*Im Winter wird der Einfluss des Aussenklimas durch den Heizbetrieb „geschwächt“, was insbesondere an den nordseitigen Fenstern zu einer Verringerung bzw. Dämpfung der Tag- und Nachtschwankungen führt.*



## Die Schutzverglasung

Die Messungen zeigen klar auf, dass die Schutzverglasung die klimatischen Erhaltungsbedingungen für die Glasmalereien verbessert: Das Schutzglas und das Luftpolster im knapp 4 cm tiefen Zwischenraum wirken dämmend und führen zur Reduktion der Tag- und Nachtschwankungen und der relativen Feuchte und zur Zunahme der Temperatur von aussen (Schutzglas) nach innen (Glasmalerei). Das Kondensationsrisiko auf der Glasmalerei wird dadurch stark vermindert. Bei derzeitigem Heizregime konnten Kondensation und Frost auf den Glasoberflächen sogar ganz vermieden werden.

Das Klima im Zwischenraum ist zwar nicht im eigentlichen Sinne "isothermal",<sup>16</sup> der Luftraum im Spalt besitzt jedoch eine ausreichende Puffer- bzw. Dämmwir-



kung gegen aussen. Den Wärmeeintrag durch direkte Sonneneinstrahlung vermag die Schutzverglasung hingegen nicht zu mindern; der geringe Luftaustausch im Zwischenraum schafft sogar einen leichten Wärmestau.

### **Langfristige Erhaltungsrisiken und zukünftige Massnahmen**

#### **Änderung des Heizkonzepts**

Bei derzeitigem Heizbetrieb ist das Klima im Winter wie auch im Sommer im Chorinnern recht ausgeglichen und nicht zu feucht, was grundsätzlich als positiv zu bewerten ist. Die stabile Temperatur und relative Feuchte wirkt sich günstig auf das Klima an der Innenseite der Glasmalerei und – in begrenzterem Umfang auch auf die klimatischen Bedingungen im Zwischenraum aus. Eine Beibehaltung des bestehenden Heizbetriebs ist daher sinnvoll. Je ausgeglichener das Innenklima, desto besser die Erhaltungsbedingungen für die Fenster!

Grundsätzlich ist davon auszugehen, dass ein Temperaturabfall im Innenraum – beispielsweise durch Senkung der Grundtemperatur oder Heizungsausfall – von einem Anstieg der relativen Luftfeuchte (auch an den Fenstern) begleitet würde und die Tag- Nachtschwankungen ausgeprägter ausfielen als bisher.

#### **Direkte Sonneneinstrahlung – IR-Schutz**

Die durch starke Sonneneinstrahlung ausgelösten Temperatur- und Feuchteschwankungen an den Südfenstern und auch am Ostfenster stellen längerfristig möglicherweise ein gewisses Risiko für den Erhalt der Fenster dar. Das Schutzglas lässt – wie die einfache Bleiverglasung auch – Wärmestrahlung (IR) ungehindert durch. Die starke und zyklische Aufheizung der Glasoberflächen kann – bedingt durch die unterschiedliche Wärmeausdehnung der verschiedenen Materialien – zu mechanischen Schäden am Bleinetz führen. Bisher wurden noch keine auffälligen Schäden an den Fenstern beobachtet. Die Situation muss jedoch im Auge behalten werden. Bei zukünftigen Massnahmen am Schutzglas sollte die Anbringung von IR-Filtern erwogen werden oder die Wärmeregulierung müsste über die Lüftung beeinflusst werden. Derzeitig gibt es allerdings noch keine befriedigenden Lösungen für einen dauerhaften und farbneutralen IR-Schutz.<sup>17</sup> Am System, das heisst am Grundprinzip wie auch an den Konstruktioneigenschaften (Einfachverglasung, Zwischenraumtiefe, Belüftungsart) muss und sollte unserer Ansicht nach nichts verändert werden. Um den Wärmestau im Zwischenraum zwischen Schutzglas und Glasmalerei zu mindern, wäre zu erwägen, die obere Entlüftung der Fensterbahnen etwas zu vergrössern bzw. die Abdeckungen über den Luftspalten zu entfernen.

16 In isothermalen Systemen müsste der Temperaturverlauf im Zwischenraum mit demjenigen des Innenraums übereinstimmen.

17 Die von der Glashütte Lamberts entwickelten (mundgeblasenen) IR-Schutzgläser haben gegenüber herkömmlichen IR-Schutzgläsern den Vorteil, dass ihre Wirkungsdauer unbegrenzt ist, da der IR-Schutz durch das Glas selbst gegeben ist. Für grössere Fensterflächen eignet sich das Glas kaum, da es nicht ganz farblos ist.