

Bauphysikalische Untersuchungen zur Gefährdung des Glasmalereibestandes in der Nürnberger Sebalduskirche.

Möglichkeiten und Grenzen der Wirksamkeit von Außenschutzverglasungen

1. Einleitung

Mittelalterliche Glasmalereien sind seit ihrer Entstehungszeit in ihrem Bestand durch unterschiedlichste Einflüsse gefährdet. In den vergangenen Jahrhunderten waren es neben „normalen“ eigenschaftsbedingten Alterungsvorgängen der Glasmalereien und damit zusammenhängenden klimatischen Einflüssen mutwillige Zerstörungen oder unterbliebene beziehungsweise unsachgemäße Restaurierungen, die zum Teil irreparable Schäden zur Folge hatten. Seit Beginn des 20. Jahrhunderts führte eine ständig stärkere Umweltbelastung zu einer bis dahin nicht gekannten Schadensdynamik.¹ Aus heutiger Sicht trug auch die Anwendung ungeeigneter Restaurierungs- und Konservierungsmittel zu einer Verstärkung bekannter oder zum Entstehen neuer Schadensphänomene bei (Abb. 1, 4, 10).

Die dringend notwendigen Bemühungen zum Bestandserhalt lassen dann den größten Erfolg erwarten, wenn von Anbeginn eine Teamarbeit zwischen Glasrestaurator, Naturwissenschaftler und Architekt bzw. Bauphysiker möglich ist.

Dem Restaurator obliegt dabei ausgehend von der Kenntnis der Restaurierungsgeschichte sowohl die Zustandsüberprüfung und Zustandsdokumentation als auch die Konzipierung und Ausführung konservatorischer Maßnahmen. Zur Klärung der Ursachen für festgestellte Schadensphänomene wie auch zur Bewertung des Verhaltens verwendeter und geplanter Materialien bedient er sich der Hilfe des Naturwissenschaftlers. Die Erfassung und Bewertung der bauphysikalisch/raum- und außenklimatischen Einflüsse in ihrer Bedeutung für das Auftreten von Schadensphänomenen wie auch das Aufzeigen möglicher technischer Wege zum besseren Substanzschutz ist Aufgabe des Architekten und Bauphysikers.

Die größte Nachhaltigkeit ist dann zu erwarten, wenn auf der Grundlage dieser ganzheitlichen Voruntersuchungen ein gemeinsames Maßnahmekonzept zur Verbesserung des Substanzschutzes entwickelt werden kann.

2. Gefährdungen von Glasmalereien aus bauphysikalisch-klimatischer Sicht

Beanspruchungen und Auswirkungen

Die Beanspruchungen, denen die Glasmalereien ausgesetzt sind, lassen sich, beschränkt man sich auf eine allgemeine Benennung, rasch aufzählen:

- Klimatische Beanspruchungen durch Außen- und Innenklima,
- Luftverunreinigungen (Schadgase, Schadstoffe, Staub, Kerzenruß),
- mikrobielle Beanspruchungen (Schimmelpilze, Bakterien).

Die Frage nach den Auswirkungen der Beanspruchungen erfordert eine nochmals differenziertere Betrachtung, sie setzt naturwissenschaftliche Untersuchungsergebnisse über die Eigenschaften historischer Gläser sowie verwendeter Restaurierungs- und Konservierungsmittel, die Kenntnis von Schadensphänomenen und Schadensmechanismen voraus.

Aus bauphysikalischer Sicht müssen hinsichtlich des möglichen Schädigungspotentials für die Glasmalereien weitere objektspezifische Faktoren einbezogen werden. Dies sind beispielsweise: Standortbedingungen, Baukörpergestaltung und Bauweise, Nutzungseinflüsse.

In dem komplexen Zusammenspiel von Materialeigenschaften und Beanspruchungen spielen bauphysikalisch-raumklimatische Aspekte eine wesentliche Rolle. So sind die Extremwerte, die Schwankungen und die Häufigkeit des Auftretens von Lufttemperatur und relativer Luftfeuchte von wesentlicher Bedeutung für chemische Reaktionen, Alterungs- und Ermüdungserscheinungen an den Glasmalereien und dem auch durch restauratorisch-konservatorische Eingriffe veränderten Aufbau. Das Mikroklima im Bereich der Glasmalereien bestimmt die Bedingungen für das Wachstum von Schimmelpilzen oder Bakterien. Von Bedeutung sind die „Folgen“ der Klimaeinflüsse: das Auftreten von Tauwasser, Reif- oder Eisbildung an Oberflächen, luftströmungsbedingte Staub- und Schmutzverfrachtungen.

Jede zum Substanzerhalt oder zumindest zur Verlangsamung von Schadensprozessen vorgesehene Maßnahme zwingt damit auch zur Auseinandersetzung mit den am jeweiligen Objekt im Jahresgang vorhandenen klimatischen Randbedingungen und der Bewertung ihres möglicherweise schädigenden Einflusses als Ausgangspunkt für Überlegungen zum „technischen Beitrag“ für den Substanzerhalt.

3. Anwendung von Schutzverglasungen

3.1. Allgemeines

Außenschutzverglasungen zum Schutz von Glasmalereien vor mechanischen Beschädigungen, für den Wärmeschutz oder später verstärkt zum Schutz vor Umwelteinflüssen sind seit dem 19. Jahrhundert bekannt. Nach dem Ende des 2. Weltkriegs fanden Schutzverglasungen in Form unterschiedlicher Konstruktionssysteme und Belüftungsvarianten immer stärkere Anwendung. In Deutschland hat sich dabei die „isothermale Schutzverglasung“ durchgesetzt. Bei der Untersuchung zur Eignung von Schutzverglasungen und ihrer konstruktiven Gestaltung hat sich Oidtmann¹ herausragende Verdienste erworben. Basierend auf umfangreichen Messungen und Untersuchungen in der Praxis wie unter Laborbedingungen wurden allgemeingültige Gestaltungsempfehlungen zur Optimierung der Geometrie von Luftspaltbreiten sowie zur Größe der Belüftungsöffnungen formuliert, die in den vergangenen Jahren

¹ Die Industrialisierung und der zunehmende Autoverkehr in den 1970er und 80er Jahren hat die Schadensprozesse deutlich beschleunigt.



Abb. 1. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sIX (sog. Paumgärtner-Fenster), Scheibe 2b: Maria mit Kind aus einer Epiphanieszene.

Praxiseingang und Praxisbestätigung fanden. Daneben existieren jedoch noch weitere Lösungen, teils ohne Anordnung von Belüftungsöffnungen oder mit nahezu abstandsloser Zuordnung von Schutzverglasung und Glasmalerei.

Bei einer Überprüfung von ausgeführten Schutzverglasungssystemen muss man allerdings auch feststellen, dass – je nach Ausführungsart und herrschenden Randbedingungen – mit der Wirkung einer Schutzverglasung allein nicht in jedem Falle solche Mikroklimaverhältnisse gesichert werden können, die dem restauratorisch angestrebten „Optimalzustand“ hinreichend nahe kommen.

So führte die Überprüfung der Schutzverglasungssysteme an den Nürnberger Kirchen beispielsweise zu dem Ergebnis, dass bei den ausgeführten Lösungen weiterhin folgende Auswirkungen zu erkennen sind:

- Verschmutzungen/Staubablagerungen an Schutzverglasung und Glasmalereien,
- Temperatur- und Luftfeuchtebeanspruchungen in substanzgefährdender/substanzschädigender Größenordnung,
- Tauwasserbildung an Schutzverglasung, teils auch an Glasmalereien.

Zudem wurde festgestellt, dass es trotz deutlicher Abweichungen von den allgemein als vorteilhaft angesehenen geometrischen Verhältnissen hinsichtlich Spalttiefe oder Größe der Belüftungsöffnungen Fälle gibt, die keine gravierenden negativen Auswirkungen zeigen. Beispielsweise trifft das auf die Schutzverglasungssysteme in der Frauenkirche München oder in der St. Lorenzkirche Nürnberg zu.

3. 2. Schutzverglasungssysteme an Nürnberger Kirchen

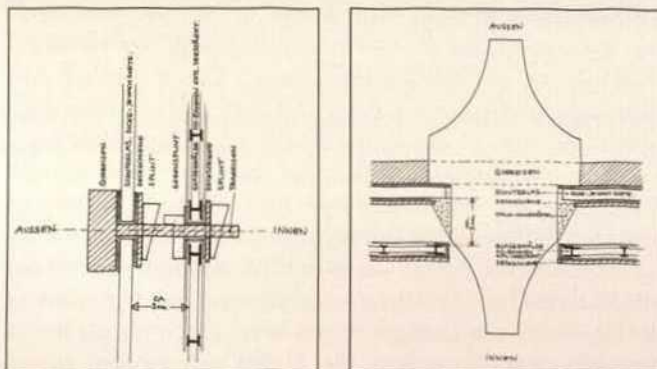
Die mittelalterlichen Glasfenster der Nürnberger Pfarrkirchen St. Lorenz und St. Sebald gehörten Mitte der Fünfziger Jahre zu den ersten Glasfenstern Deutschlands, die mit einer Schutzverglasung versehen wurden.

St. Sebald

Bereits 1956 erhielten die meisten Fenster in St. Sebald eine Schutzverglasung, bei der die einzelnen historischen Glasmalerei-Felder ohne Abstand oder Hinterlüftung vor eine Schutzglasscheibe montiert wurden. Im Rahmen einer umfangreichen Maßnahme 1985–1992 wurde der Abstand auf 3–4cm vergrößert und eine Belüftung des Spaltes gewährleistet (Abb. 2a-b).

Die Anforderungen, welche die historischen Glasmalereien an das klimatische Umfeld stellen, werden trotz der Optimierung der Schutzverglasung nach derzeitigem Wissensstand

Abb. 2a-b. Nürnberg, St. Sebald: Längsschnitt (a) und Querschnitt (b) durch das Schutzglassystem (Zeichnung: Werkstatt Gustav van Treeck, München).



² Die Trocknungsspuren der Kondenswasserabläufe auf den historischen Glasfenstern wurden im Rahmen eines DBU-Projektes kartiert: DBU-Projekt „Beurteilung zurückliegender Erhaltungsmaßnahmen an den Glasmalereifenstern des 14.–16. Jahrhunderts in der Kirche St. Sebald in Nürnberg.“

³ Ausführung nach Empfehlungen auf Grundlage der Dissertation von Stefan OIDTMANN (s. Lit.).

Abb. 4. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sIX (sog. Paumgärtner-Fenster), Scheibe 2c: zwei Könige aus einer Epiphanieszene.

augenscheinlich nicht erfüllt. Eindeutige Anzeichen für eine hohe Feuchtebelastung sind massive Ablaufspuren von Kondenswasser an allen Glasfenstern,² frische Korrosion und neue Lockerungen neben zuvor gefestigten Malschichtschollen. Glaskorrosion unterwandert bemalte Oberflächen und führt ebenfalls zu Malschichtverlusten (Abb. 3, 5).

Ein weiteres Indiz für ungünstige Klimabedingungen sind Trocknungsränder und Salzausblühungen um die Bleiruten und mikrobieller Befall (Algen und Schimmelpilz). Vereinzelt waren an den historischen Glasfenstern sowie an der Innenseite der Schutzglasscheibe Schimmelpilz-Hyphen und Algenbewuchs zu erkennen.

St. Lorenz

Die Schutzverglasung in St. Lorenz entspricht bei den meisten Fenstern noch dem Stand von 1956, die einzelnen Glasmalefelder sind also nahezu ohne Hinterlüftung vor die Schutzverglasung gesetzt. Der vertikale Luftwechsel ist in diesen Fällen noch zusätzlich durch horizontal eingebaute L-Profile reduziert.

Trotz der vermeintlich ungünstigen Einbausituation zeigten sich bei einer Durchsicht aller Chorfenster im Sommer 2003 keine Ablaufspuren von Kondenswasser auf den Originalen. Auch war die Korrosion an den Rückseiten innerhalb von 30 bis 35 Jahren seit der letzten Restaurierung kaum fortgeschritten. Malschichtverluste auf der Vorderseite insbesondere des Chormittelfensters sind vermutlich auf alte Festigungsmittel zurückzuführen, die sehr empfindlich auf hohe Temperaturen reagieren.

Frauenkirche

Die Glasfenster der Frauenkirche in Nürnberg konzentrieren sich auf drei Chorfenster und ein Langhausfenster.

Die Schutzverglasung ist wie in St. Sebald seit etwa 17 Jahren auf dem derzeitigen Stand der Technik.³ Trotzdem waren beim Ausbau aller Fenster 2002 großflächig Ablaufspuren von Kondenswasser auf den Originalen, eine weit überdurchschnittliche Verschmutzung sowie massiver Schimmelbefall an der Innenseite der Schutzverglasung zu verzeichnen (Abb. 6, 7a).

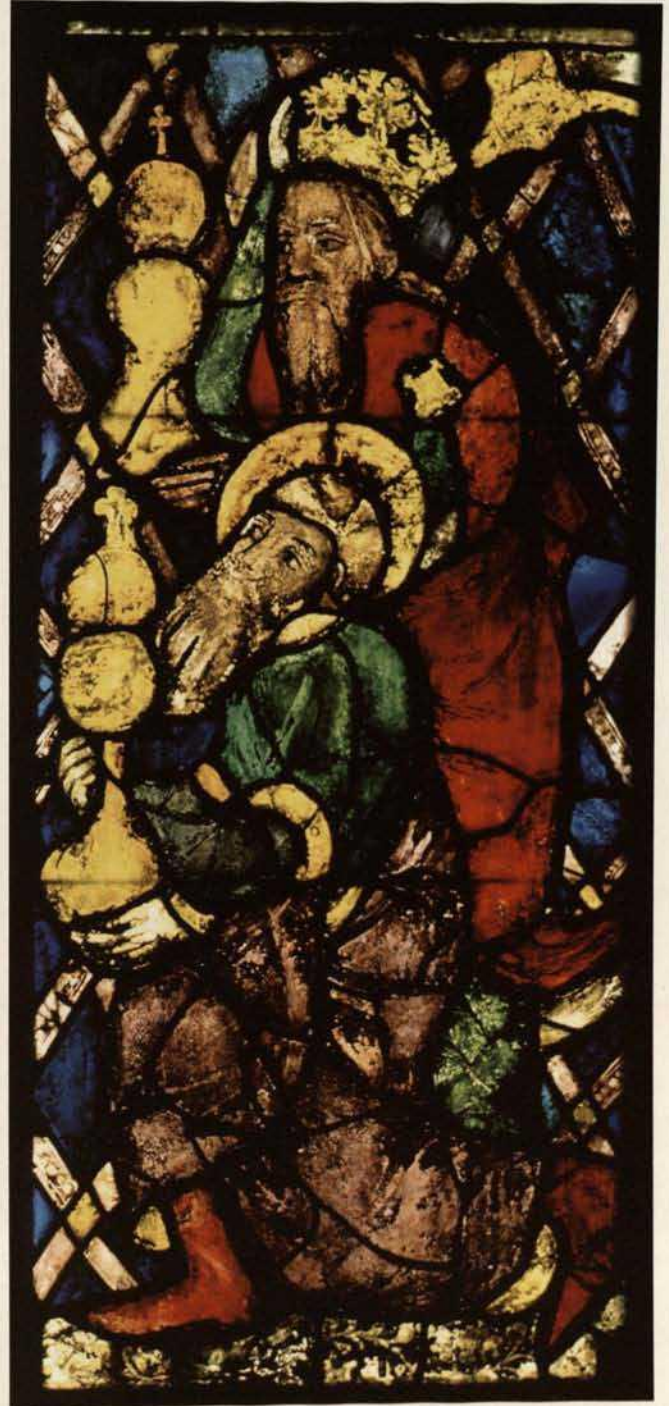
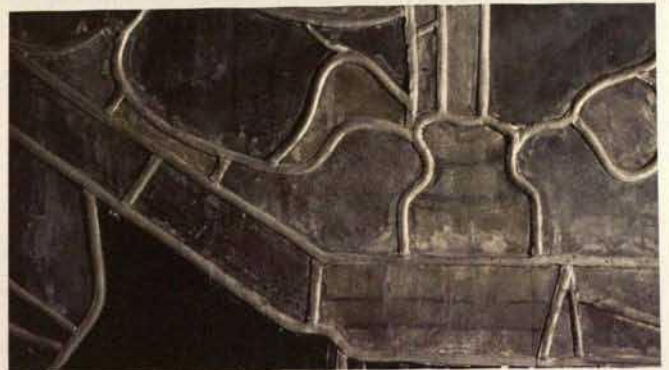


Abb. 5. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nVI (Mendel-Fenster), Detail: Kondenswasserabläufe auf der Vorderseite der historischen Verglasung.

Abb. 3. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Fürer-Fenster), Detail: Nachwachsen der Glaskorrosion infolge der Kondenswasserbelastung.



Die Ursachen für diese aus restauratorischer Sicht ungünstigen und teilweise überraschenden Befunde wurden durch langfristige Klimamessungen an allen drei Kirchen untersucht. Auf Grundlage dieser Messungen sollte anschließend ein auf die jeweilige Kirche zugeschnittenes Konzept zur Verbesserung der Klimasituation an den betroffenen Fenstern entwickelt werden.

4. Untersuchungen und Maßnahmen zur Verbesserung des Substanzschutzes

4.1. Restauratorisch-konservatorische Maßnahmen

4.1.1. Allgemeine Schadensprozesse bei historischen Glasmalereien

Glasgemälde sind Teil der Wand, und somit waren diese über Jahrhunderte allen schädigenden Einflüssen wie Witterung und Vandalismus ausgesetzt. Mittelalterliche Gläser sind, bedingt durch ihre Zusammensetzung, wesentlich weniger widerstandsfähig gegen Umwelteinflüsse als moderne Gläser. Der größte Feind aller Glasgemälde ist Feuchtigkeit in Kombination mit Schadgasen, insbesondere Schwefelverbindungen. Kondenswasser und Regen bilden mit diesen Schadgasen ein saures Milieu auf der Glasoberfläche. Auslaugungs- und Auflösungsprozesse führen im Laufe der Jahrhunderte zur Ausbildung dichter, undurchsichtiger Gips- oder Syngenitkrusten insbesondere auf der Außenseite der Fenster. Aber auch die Innenseiten der Fenster werden bei häufig auftretendem Kondenswasser durch Glaskorrosion und andere Schadensmechanismen, die zu Bemalungsverlusten führen, angegriffen.

In Deutschland sind daher nahezu alle mittelalterlichen Fenster mit einer Schutzverglasung versehen, um die Originale der Bewitterung zu entziehen. Dadurch haben sich die Schadensprozesse deutlich verlangsamt, die Bildung von Kondenswasser konnte jedoch durch diese Maßnahme nicht in allen Fällen verhindert werden.⁴ Auch wurden bereits in den Fünfziger Jahren bei der erstmaligen Durchführung dieser Maßnahme in Nürnberg Bedenken geäußert, die Südseitenfenster könnten sich durch Sonneneinstrahlung zu stark aufheizen.⁵

Im Rahmen einer Kontrolluntersuchung der Glasgemälde in St. Sebald waren im Jahre 2001 auch tatsächlich neue Schäden in Form von Malschichtlockerungen und frischer Glaskorrosion



Abb. 6. Nürnberg, Frauenkirche: massive Kondenswasserabläufe an den Rückseiten der historischen Verglasung.



Abb. 7a-b. Nürnberg, Frauenkirche: Glaskorrosion durch Schimmelpilze an sehr widerstandsfähigen Renaissance-Gläsern (a) und Einbau einer Schutzverglasung mit Isolierglas (b).

zu beobachten. Durch eine sehr umfangreiche Analyse der Oberflächen durch Chemiker und Mikrobiologen wurden neben den klimatischen Ursachen auch Schadensauslöser in den Glasgemälden selbst identifiziert.

4.1.2. Spezielle Problematik der Glasgemälde in St. Sebald

Die historische Verglasung der Sebalduskirche umfasst eine Fläche von etwa 250m² Glasmalerei aus vier Jahrhunderten (Abb. 24, 26). Dieser umfangreiche Bestand lässt sich in etwa drei Kategorien unterteilen. Kategorie 1 bilden die stark vorgeschädigten, korrosionsanfälligen, umfangreich restaurierten Fenster des 14. Jahrhunderts. Fenster dieser Kategorie finden sich fast ausschließlich auf der Südseite des Chores (Abb. 11b, 17).

In Kategorie 2 sind ebenfalls Fenster des 14. Jahrhunderts zusammengefasst. Diese befinden sich hauptsächlich auf der Nordseite des Chores. Die Fenster der Kategorie 2 wurden in den letzten Jahrhunderten weniger restauriert und sind weniger stark korrodiert. In dieser Kategorie ist die Wechselbeanspruchung weniger problematisch, aber hohe Feuchtigkeit (auch nur hohe Luftfeuchtigkeit) führen zu verstärkter Glaskorrosion und in Folge dessen auch zu umfangreichen Malschichtverlusten (Abb. 10, 11a).

⁴ Eine Überprüfung der Wirksamkeit vorangegangener Schutzmaßnahmen fand erstmals im Rahmen eines Wartungsvertrages mit Prof. Dr. Peter van Treeck im Anschluss an die Restaurierung aller Chorfenster 1986–1992 in St. Sebald statt.

⁵ Schriftwechsel zwischen den damals beteiligten Denkmalpflegern, Architekten und Restauratoren im Archiv der Lorenzkirche Nürnberg.

⁶ Analysen durch Prof. Dr. Rainer Drewello und Dipl.-Biol. Ursula Drewello im Rahmen des DBU-Projektes.

⁷ Nachgewiesen durch Dipl.-Biol. Ursula Drewello im Rahmen des DBU-Projektes.

⁸ Häufig wechselnde Klimabedingungen und eine relative Feuchte über 70% sind optimale Bedingungen für Schimmelpilzwachstum.

⁹ Naturwissenschaftliche Untersuchungen zum langfristigen Einfluss von unterschiedlichen Klimafaktoren auf Originalgläser mit Bemalung wurden bisher nicht durchgeführt; einige grundlegende Auswirkungen hoher relativer Feuchte oder Temperaturen finden sich bei KÜHN, FITZ, NEWTON – DAVISON.

Kategorie 3 bilden die recht harten Gläser der Dürerzeit. Sie befinden sich hauptsächlich auf der Ostseite des Chores (Abb. 12). Diese sind gegenüber Klimaschwankungen wesentlich widerstandsfähiger, und es sind meist ausschließlich die sehr differenzierten Malschichten gefährdet. Feuchtigkeit führt in diesen Fällen zu Malschichtkorrosion und mikrobiellem Bewuchs. Ablaufendes Kondenswasser und lange einwirkende Feuchtigkeit fördern Verschmutzung und führen mittelfristig zur Ausbildung harter, spröder Krusten auf der empfindlichen Bemalung.

Die Glasfenster der Sebalduskirche in Nürnberg sind zusätzlich zu der „normalen“ Schadensentwicklung bei historischen Glasmalereien durch umfangreiche Restaurierungsmaßnahmen stark beeinträchtigt. Sie wurden über mehr als fünf Jahrhunderte mit allen Mitteln, die der jeweiligen Zeit zur Verfügung standen restauriert, gefestigt und beschichtet. Insbesondere die vielfachen Festigungsversuche und Übermalungen mit organischen Materialien wie Kasein, Ölfarbe, Asphaltlack, Naturharzen und Kunstharzen stellen eine große Herausforderung für Restauratoren, Chemiker und Klimaspezialisten dar.⁶ Das Resultat dieser Restaurierungsmaßnahmen sind sehr heterogene Oberflächen, welche heute nahezu schwarze, undurchsichtige Häutchen bilden. Die Vorderseiten dieser Fenster sind ein regelrechtes Verbundsystem aus Korrosionsprodukten, Gelschicht, Glasmalschichten, Kaltübermalungen und Festigungsmitteln (Abb. 8a-b).

Diese vorangegangenen Restaurierungen sind irreversibel und die Optionen für weitere Maßnahmen aus restauratorischer Sicht äußerst begrenzt. Folglich kommt in diesen Fällen dem Umfeld und den präventiven Maßnahmen besondere Bedeutung zu. Die korrodierten, gefestigten Oberflächen bestehen in der Regel aus einer Kombination organischer und anorganischer Bestandteile. Dieses Paket aus Salzen und verschiedenen Bindemitteln reagiert besonders empfindlich auf häufige Wechsel von Feuchtigkeit und Austrocknung, hohe Temperaturen oder Frost. Es kommt zum „Arbeiten“ der verschiedenen Festigungs- und Bindemittel und zum Auskristallisieren oder Nachwachsen von Korrosion unter den organischen Filmen. Diese Schadensprozesse führen insbesondere an den Südfenstern der Kategorie 1 zur Ausbildung nahezu undurchsichtiger „Häutchen“ und schließlich zu Verlusten an Bemalung und originaler Oberfläche. Die besondere Gefährdung der Südfenster ist sicher

auch auf die extremen Klimabedingungen durch stärkere Aufheizung und Austrocknung infolge von Sonneneinstrahlung zurückzuführen (Abb. 9a-b).

Die Glaszusammensetzung der Fenster des 14. Jahrhunderts und insbesondere die der Sebaldscheiben ist darüber hinaus generell sehr empfindlich. Selbst konstant hohe Luftfeuchtigkeit oder hohe Temperaturen führen bei diesen Gläsern zu neuen Schäden.

Eine weitere Gefährdung der Glasgemälde ergibt sich durch einen ehemals sehr aktiven Schimmelpilzbefall auf der Innenseite der Fenster.⁷ Ein Stoffwechselprodukt dieser Schimmelpilze ist Oxalsäure, welche die Glasoberfläche massiv angreift. Bei günstigen Klimabedingungen für die Pilze können diese bedingt durch das große Nährstoffangebot in Form der organischen Beschichtungen jederzeit wieder aktiv werden.⁸ Eine intensive Kontrolle des Klimas und die Vermeidung von Tauwasserbildung auf den Originalen ist daher unerlässlich, um die Glasgemälde von St. Sebald vor weiterem Verfall zu bewahren.

4. 1.3. Restauratorisches Vorgehen

Wenn man die Wirksamkeit von Schutzverglasungen für Glasgemälde beurteilen will, muss zunächst festgelegt werden, welche Anforderungen Glasmalereien an Temperatur und relative Feuchte stellen. Grenzwerte oder Klimakorridore müssen für jedes Objekt individuell festgelegt werden. Glasfenster reagieren je nach Glassorte, künstlerischer Technik, Restaurierungsgeschichte und Oberflächenbeschaffenheit in unterschiedlichem Maße auf physikalische oder chemische Einflüsse.⁹

Für den Restaurator sind Anzeichen für ungünstige Klimabedingungen am Objekt selbst zu beobachten: frische Korrosionsprodukte oder Malschichtlockerungen deuten auf ungünstige Umgebungsbedingungen hin. Darüber hinaus sind Kondenswasserabläufe, Salzausblühungen um die Bleie oder biogener Bewuchs eindeutige Hinweise auf eine hohe Feuchtebelastung.

Wesentlicher erster Schritt ist deshalb die Überprüfung des Erhaltungszustands der Glasgemälde. Diese Arbeit umfasst sowohl die Erfassung und Bewertung von Schadensphänomenen als auch eine Beurteilung der Wirksamkeit früherer Erhaltungsmaßnahmen (Verwendung von Reinigungsmitteln, Festi-



Abb. 8a-b. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sV (Schürstab-Fenster), Detail im Auflicht: originale Oberfläche größtenteils erhalten, aber eingebettet in dichte Korrosionskrusten (a); und im Durchlicht: Bemalung durch starke „Verbräunung“ der Korrosionskrusten kaum noch lesbar (b).



Abb. 9a-b. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sVI (Behaim-Fenster), Details mit Schadensbild der sog. „Häutchenbildung“: schichtartiges Abblättern der originalen Oberfläche (a) und in Verbindung mit Blasenbildung an Oberflächen mit originaler Bemalung (b).



Abb. 10. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Führer-Fenster), Scheibe 5b, Detail: adorierende Stifterin.

gungen usw.). Wesentliche Hilfe dabei bietet die Kenntnis der Restaurierungsgeschichte, der Materialeigenschaften und die Beurteilung der Auswirkungen von Klima- und Umwelteinflüssen. Ausgehend davon formuliert der Glasrestaurator die Fragestellungen an seine Team-Kollegen, wie zum Beispiel:

- Welche Materialeigenschaften sind vorhanden und wie wirken sie sich schädigend oder substanzerhaltend aus?
- Was sind die Ursachen für erkannte Schadensphänomene, und mit welcher Dynamik schreiten diese fort?
- Welche Zielvorstellungen zu den Umgebungsbedingungen sind aus der Sicht des Substanzschutzes anzustreben?
- Welche mikroklimatischen Bedingungen sind an den Glasgemälden vorhanden, welche Rolle spielen die Einflüsse aus Nutzung und Außenklima?
- Wie sind die Einbaubedingungen des Systems Glasgemälde/Schutzverglasung zu beurteilen?
- Welche Verbesserungsmöglichkeiten sind gegeben?

Im Rahmen der restauratorischen Untersuchungen wurden hinsichtlich Zustand und Schäden der Glasmalereien in der Sebalduskirche beispielsweise festgestellt:

- fortschreitende Glaskorrosion
- „Verbräunung“
- „Häutchenbildung“
- Krakelierung/Risse in der Malschicht

- Lockerungen/Ablösung von Malschichten/Malschichtverlust
- Ablaufspuren von Kondenswasser vorderseitig und rückseitig
- Staub- und Rußauflagerungen
- Biogener Befall.

Als Schadensursachen ergaben sich im Wesentlichen folgende Faktoren:

- Chemische Zusammensetzung des Glases
- Herstellungsprozeß und Künstlerische Technik¹⁰
- unterlassene Instandhaltung¹¹
- unsachgemäße Behandlung
- Umwelteinflüsse (Klima, Schadstoffe, mikroorganischer Befall).

Ausgehend von diesen Untersuchungsergebnissen wurde versucht, einen „optimalen“ Klimakorridor aus restauratorischer Sicht zu definieren:

- Lufttemperatur: 12°C bis 25°C (unter Beachtung der Differenz außen – innen).
- Relative Luftfeuchtigkeit: 45% bis 60% (unter Beachtung von Glasart und Schadstoffkonzentration).
- Temperatur- und Luftfeuchtewechsel: Größenordnung sowie Häufigkeit von Schwankungen möglichst minimal.
- Keine Tauwasserbildung an der Glasmalerei.

Eine Antwort im Hinblick auf die tatsächlich auftretenden Bedingungen sollten die entsprechenden Messungen geben.

4. 2. Mess- und Untersuchungsprogramm

Ausgehend von dem Ergebnis der restauratorischen Voruntersuchungen erfolgte zunächst der Versuch, einen prinzipiellen Zusammenhang von klimatischen Einflüssen und ihren Auswirkungen auf die Glasmalereien herzustellen. Das Ergebnis ist in der folgenden Tabelle dargestellt (Tab. 1).

Art der Klimaeinwirkung	Auswirkung auf die Glasmalereien
Niedrige Temperaturen Frosteinwirkung	Austrocknung/Versprödung/Schrumpfung der Gelschicht
Häufige Frost-Tau-Wechsel	Mechanische Schäden an der Gelschicht, Risse, Krustenbildung
Hohe Temperaturen	Austrocknung der Gelschicht, Schäden an Festigungsmitteln, Förderung der Glaskorrosion
Temperaturwechselbeanspruchung	Reißen der Gelschicht, Krakelierung, Verstärkung der Glaskorrosion, Ablösungen
Hohe relative Luftfeuchtigkeit	Schäden an der Malschicht, Begünstigung von biogenem Befall
Geringe relative Luftfeuchtigkeit	Austrocknung und Schrumpfung der Gelschicht, Versprödung
Luftfeuchtewechselbeanspruchung	Reißen der Gelschicht, Verstärkung der Glaskorrosion
Tauwasser am Originalglas	Auslaugung, Kalk- und Salzablagerungen, Gefährdung der Bemalung
Staub- und Schmutzbelastung	Kein direktes Schadenspotential, aber Nährboden für mikrobiellen Befall

Tab. 1. Schematische Darstellung des Zusammenhangs von Klimaeinwirkung und Schadensbildern an der Glasmalerei.

¹⁰ Als besonders problematisch erwies sich ein erster, sehr dünn vertriebener, glasmalerischer Überzug unter allen anderen Malschichten. Diese kupfergefärbte Glasmalfarbe ist vermutlich nicht ausreichend mit der Glasoberfläche verschmolzen.

¹¹ Zu Beginn des 19. Jahrhunderts müssen sich die Fenster laut MAYER in sehr schlechtem Zustand befunden haben.

Aus diesen Zusammenhängen ergaben sich die zu erfassenden Meßgrößen:

- Klimabedingungen außen und in der Kirche (Lufttemperatur, relative Feuchte)
- Auswirkungen kirchlicher Veranstaltungen
- Extremwerte und Häufigkeitsverteilung der Klimabedingungen am System Schutzverglasung/Glasmalerei (Lufttemperatur, relative Feuchte, Luftströmungen, Temperatur- und Feuchteverteilungen)
- Lokale Klimaunterschiede (horizontal, vertikal)
- Oberflächentemperaturen
- Tauwasserbildung und Frosttemperaturen an der Verglasung
- Luftströmungen im Spalt.

Die Messungen erfolgten in Form von Vertikalprofilen in unterschiedlichen Höhenstufen und als Horizontalprofile, insbesondere für die Oberflächentemperaturverhältnisse. Gemessen wurde jeweils an einer Lanzette auf der Nord- und Südseite. Die Messzeiträume umfassten überwiegend einen Jahreszyklus.

4. 3. Baulich-technische Möglichkeiten

Ein wesentliches Ergebnis der naturwissenschaftlichen Untersuchungen zum Ablauf von Schadensmechanismen und der Rolle von Klimafaktoren ist: Die Möglichkeiten zur Verbesserung des Bestandsschutzes müssen sowohl die winterlichen als auch die sommerlichen Beanspruchungen berücksichtigen.

Die Ergebnisse der umfangreichen messtechnischen Untersuchungen relativieren den Einfluss des Innenklimas und der Nutzung auf das Mikroklima am System Glasmalerei/Schutzverglasung. Selbstverständlich wirkt sich das Raumklima auf die Bedingungen am Fenster aus, nur wird sein Einfluss mit abnehmender Höhe der Lufttemperatur immer stärker durch den Einfluss des Außenklimas zurückgedrängt. Zudem darf es wohl zu Recht als Illusion angesehen werden, die Forderung



Abb. 12. Nürnberg, St. Sebald, Chormittelfenster, Detail: widerstandsfähige Gläser der Dürerzeit mit teilweise sehr gut erhaltenen Malschichten.



Abb. 11a-b. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nVI (Mendel-Fenster), Scheibe 2c, Begegnung an der goldenen Pforte: weniger Glaskorrosion als auf der Südseite, aber nahezu kompletter Malschichtverlust (a); Fenster sV (Schürstab-Fenster), Scheibe 3b, Beweinung Christi: umfangreiche Malschichtverluste und stark korrodierte Oberflächen (b).

einer Anhebung der Raumtemperaturen als Mittel zum Substanzschutz der Glasmalereien würde allgemeine Akzeptanz finden – schon die damit verbundene Heizkostenerhöhung setzt hier deutliche Grenzen.

Wenn man diese Einstellung (zwangsläufig) akzeptiert, so bleibt noch die Frage nach den Auswirkungen kirchlicher Nutzung auf Veränderung – sprich zeitweilige Verschlechterung – der klimatischen Verhältnisse an der Glasmalerei. Wie die Messergebnisse belegen, kann dieser Einfluss als im Vergleich zu den Außenklimaeinwirkungen durchaus untergeordnet beurteilt und somit für praktische Belange vernachlässigt werden.

Die Auswertung der in verschiedenen Kirchen durchgeführten Klimamessungen ergab durchweg Verhältnisse an der Schutzverglasung, die weit entfernt von Ideen im Sinne des definierten „optimalen“ Klimakorridors lagen. So wurde beispielsweise festgestellt:

- langfristig hohe relative Luftfeuchtigkeit im Spalt (Abb. 13),
- Tauwasserbildung an der Schutzverglasung und an der Glasmalerei,
- hohe sommerliche Temperaturen (Abb. 15) bzw. Frosttemperaturen im Winter, verbunden mit Eis- oder Reifbildung,
- intensive und rasche Temperatur- sowie Luftfeuchtwchselbeanspruchungen (Abb. 14).

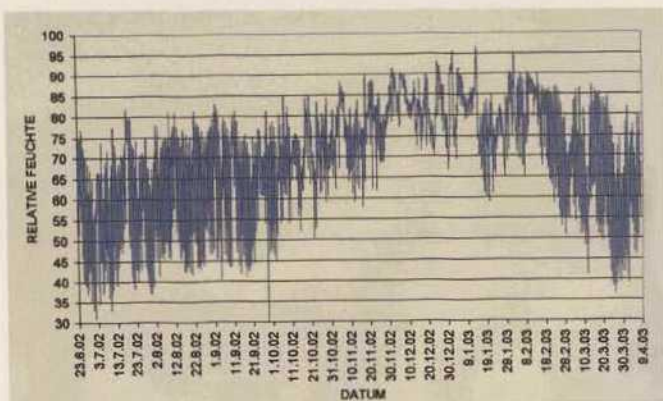


Abb. 13. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Führer-Fenster), Messung im Spalt: Schwankungen der relativen Feuchte an der Glasmalerei im Jahresgang.

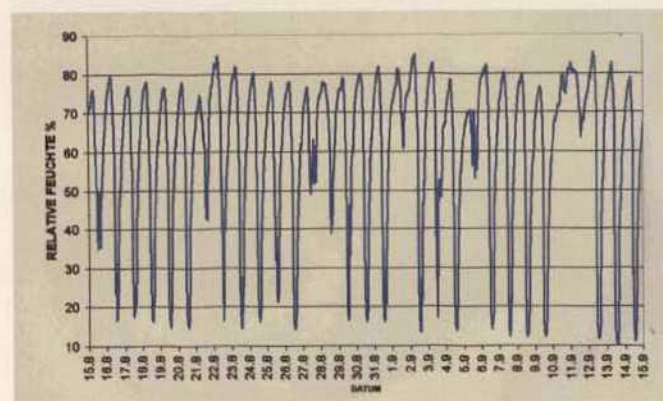


Abb. 14. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sVI (Behaim-Fenster), Messung an der Glasmalereirückseite: Luftfeuchteschwankungen im Sommer (August – September 2003).

Der daraus resultierende dringend notwendige Handlungsbedarf zur Verbesserung der klimatischen Verhältnisse führt zu Überlegungen hinsichtlich des zur Verfügung stehenden Instrumentariums:

4. 3.1. „Optimierung“ des Konstruktionssystems

Ganzjährig wirksam und damit als Grundvoraussetzung anzusehen ist eine den konkreten Gegebenheiten in der jeweiligen Kirche angepasste Optimierung der geometrischen Verhältnisse von Luftspaltbreite und Größe der Belüftungsöffnungen der Schutzverglasung. Mit einer „Optimierung“ der geometrischen Verhältnisse der Außenschutzverglasung lassen sich substanzschädigende klimatische Bedingungen wie hohe relative Luftfeuchtigkeit und Tauwasserausfall zwar vermindern, aber nicht vermeiden – auch hier gibt es Grenzen der Leistungsfähigkeit. Zudem sind den damit verbundenen Eingriffen in die Bausubstanz in Einzelfällen auch formale oder technische Grenzen gesetzt.

Oidtmann hat bereits in seiner Dissertationsschrift die Zusammenhänge von Fensterhöhe, Spalttiefe, Belüftungsöffnungen und Luftdurchsatz umfassend theoretisch und praktisch im Hinblick auf die Problematik der Tauwasserbildung untersucht.¹² Daraus wurden Empfehlungen für die Dimensionierung von Spalttiefe und Belüftungsöffnungen abgeleitet, die bei

¹² OIDIMANN, 1994.

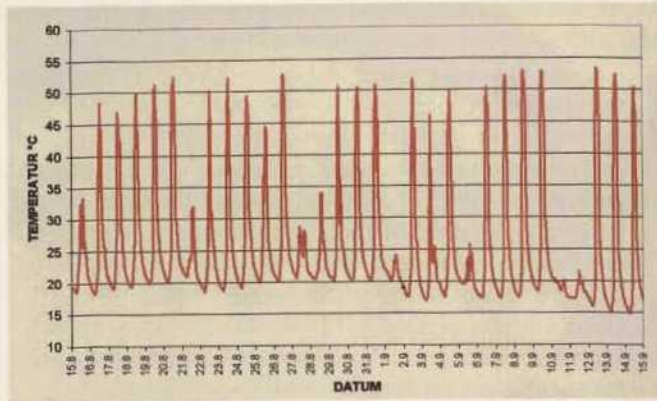


Abb. 15. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sVI (Behaim-Fenster), Messung an der Glasmalereirückseite: Lufttemperaturschwankungen im Sommer (August – September 2003).

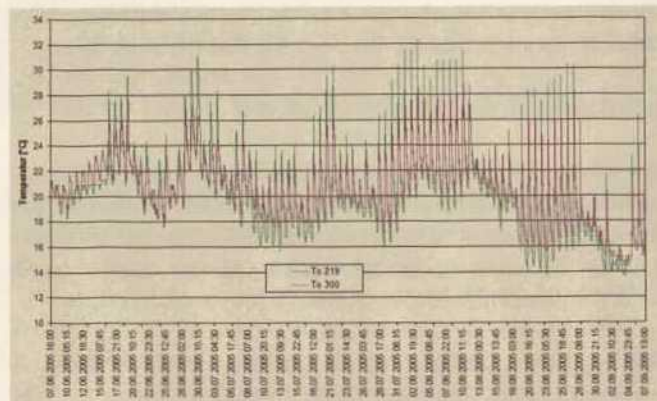


Abb. 16. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sV (To 219) und sVI (To 300): Vergleich der Oberflächentemperaturen auf der Spaltseite der Glasmalerei nach Einbau der neuen Schutzverglasung im Fenster sVI (Juni – September 2005).

entsprechender Anwendung zu einer wesentlichen Verbesserung des Substanzschutzes führen können.

4. 3.2. Reduzierung der Klimabelastungen im Winter

Negative Auswirkungen auf die Glasmalereien resultieren aus

- Taupunktunterschreitungen und Tauwasserausfall, nicht nur an der Schutzverglasung, sondern auch an der Spaltseite, zum Teil auch an der Raumseite der Glasmalereien.
- Langzeitig hohe relative Feuchte im Luftspalt und damit auch an der Spaltseite der Glasmalereien. In Verbindung mit Frosttemperaturen kann dies Reif- oder Eisbildung am Glas zur Folge haben.
- Häufiger auftretende tageszeitliche Schwankungen der Mikroklimaverhältnisse (Temperatur- und Luftfeuchte-wechselbeanspruchungen), nochmals verstärkt bei zeitweiliger Sonneneinstrahlung.

Entscheidender „Wirkfaktor“ ist die Außenlufttemperatur. Ihre Größe bestimmt nachhaltig, was am Fenster hinsichtlich Temperaturen, Oberflächentemperaturen, Luftfeuchte, Tauwasserausfall, Reif- oder Eisbildung passiert.

Eine belastungsmindernde Wirkung wird durch die Anhebung der raumseitigen Temperaturen erzielt. Da die Anhebung der Raumlufttemperaturen in der Kirche in der Regel sowohl von den technischen Voraussetzungen her, wie auch aus der

Sicht der Heizkosten ausscheidet, verbleiben nur zwei weitere Möglichkeiten:

- Abschwächung des Außentemperatureinflusses durch Anwendung einer Schutzverglasung mit deutlich besserem Wärmedurchgangskoeffizienten (U_V -Wert) der Verglasung – also statt Einfachverglasung Verwendung von Isolierglas (Abb. 7b),
- zusätzlicher Wärmeeintrag direkt an der Schutzverglasung – also „Spalttemperierung“ (Abb. 25b).

4. 3.3. Reduzierung der Klimabeanspruchungen im Sommer

Unter sommerlichen Bedingungen stellt sich aufgrund der Außentemperaturen und der solaren Zustrahlung, insbesondere bei direkter Sonneneinstrahlung, folgende Situation ein:

- bei direkter Sonneneinstrahlung treten im Luftspalt und damit auch an der Spalt- und Raumseite der Glasmalerei sehr hohe Temperaturen auf (Abb. 19),
- diese hohen Temperaturen bewirken einen „Absturz“ der relativen Feuchte im Spalt auf minimale Werte (Abb. 14),
- wiederum primär bei direkter Sonneneinstrahlung kommt es zu extremen und teils mehrfach täglich auftretenden Schwankungen von Lufttemperatur und relativer Feuchte.

Als „Gegenmittel“ stehen prinzipiell zur Verfügung:

- die Reduzierung des Strahlungswärmeeintrags – also Sonnenschutzmaßnahme (temporärer außen liegender Sonnenschutz oder Sonnenschutzverglasung; Abb. 16),
- die möglichst rasche Abführung der eingetragenen Wärme – also Erhöhung der Luftgeschwindigkeit im Spalt.

5. Ergebnisse praktischer Untersuchungen zur Verbesserung des Substanzschutzes

Ausgehend von umfangreichen restauratorischen und naturwissenschaftlichen Voruntersuchungen sowie bauphysikalischen Messungen und Berechnungen wurden die durch bautechnische Veränderungen am Schutzverglasungssystem erreichbaren Effekte messtechnisch überprüft. Ausgeführt wurden dazu:

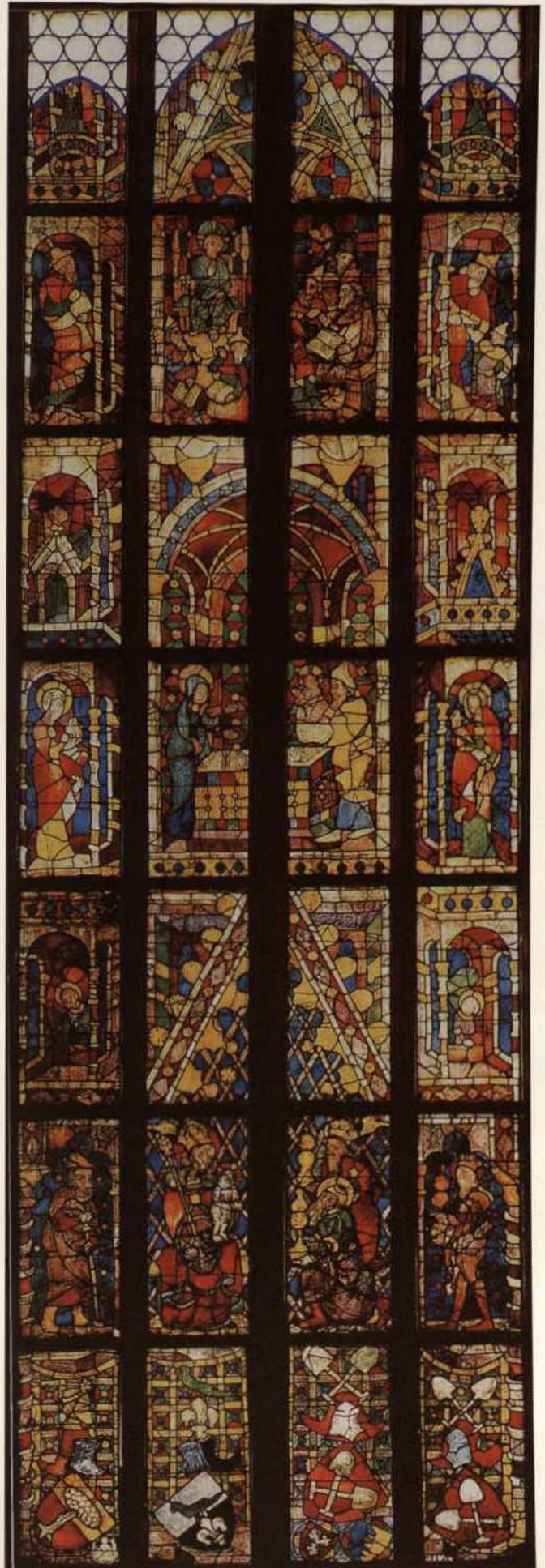
- Die „Optimierung“ der geometrischen Parameter an der Schutzverglasung (Belüftungsöffnungen, Spalttiefe), Nürnberg: St. Sebald.
- Der Einbau einer Isolierverglasung als Schutzverglasung (Nürnberg: Frauenkirche, Abb. 7b).
- Der Einbau einer Spalttemperierung (Nürnberg: Frauenkirche und St. Sebald, Abb. 25b).
- Die Anbringung einer Sonnenschutzfolie und der Einbau von Sonnenschutzverglasung (Nürnberg: St. Sebald, Abb. 16, 25a).

Die bisher vorliegenden Ergebnisse seien im Folgenden vorgestellt.

5. 1. „Optimierung“ der geometrischen Parameter

Die Schutzverglasung in St. Sebald entspricht in ihrer Lösung nicht den Bedingungen, die an eine möglichst gut wirksame

Abb. 17. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sIX (sog. Paumgärtner-Fenster): Anbetung der Könige, Darstellung im Tempel und der 12-jährige Jesus unter den Schriftgelehrten.



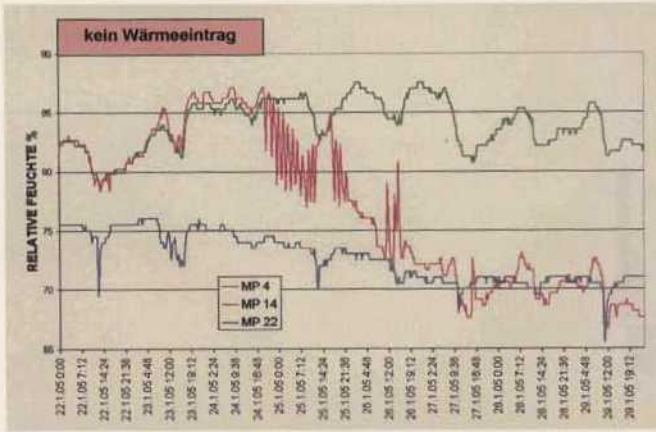


Abb. 18. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Führer-Fenster): Vergleich der relativen Feuchte im Spalt von Lanzette b (ohne Veränderung der Spaltgeometrie: MP 4) und von Lanzette c (nach „Optimierung“ der Spaltgeometrie: MP 14), jeweils ohne Wärmeeintrag (Januar 2005).

Spaltbelüftung gestellt werden. Die Parameter (freier Querschnitt) sind hier:

- Belüftungsöffnung unten: 1,5cm (Luftumlenkung infolge Kondensatauffangrinne)
- Belüftungsöffnung oben 3,5cm
- Spalttiefe 3 bis 3,5cm.

Zur Verbesserung wurden an einer Lanzette folgende konstruktiven Veränderungen vorgenommen: der Abstand zwischen Schutzverglasung und Glasmalerei wurde vergrößert, die Kondensatrinne wurde entfernt. Dies führte zu einer Vergrößerung der freien Querschnitte:

- Belüftungsöffnung unten: 4,5cm
- Belüftungsöffnung oben 4,5 bis 6,5cm,
- Spalttiefe 4,5cm.

Zur Überprüfung der damit erreichbaren Effekte erfolgte von November 2004 bis April 2005 am Fenster nIV die Messung von Lufttemperatur und relativer Feuchtigkeit (Vertikalprofil in unterschiedlichen Höhenstufen), Oberflächentemperaturen (Horizontalprofil: Schutzverglasung, Glasmalerei Spalt- und Raumseite) sowie Luftgeschwindigkeit sowohl an der Lanzette

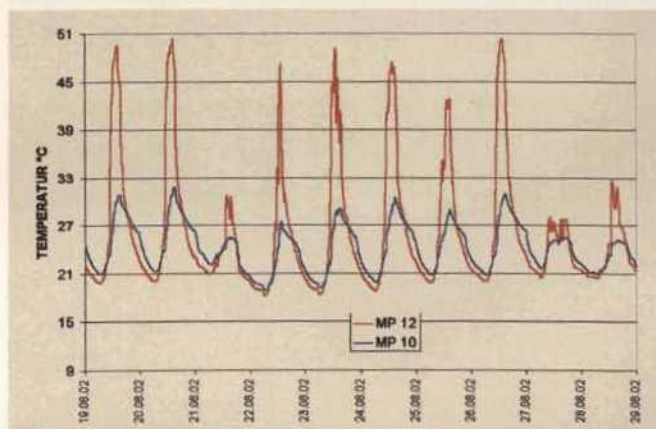


Abb. 19. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sVI (Behaim-Fenster), Vergleich der Amplituden zweier Temperatur-Messpunkte: unten (ohne direkte Sonneneinstrahlung: MP 10) und oben (mit direkter Sonneneinstrahlung: MP 12).

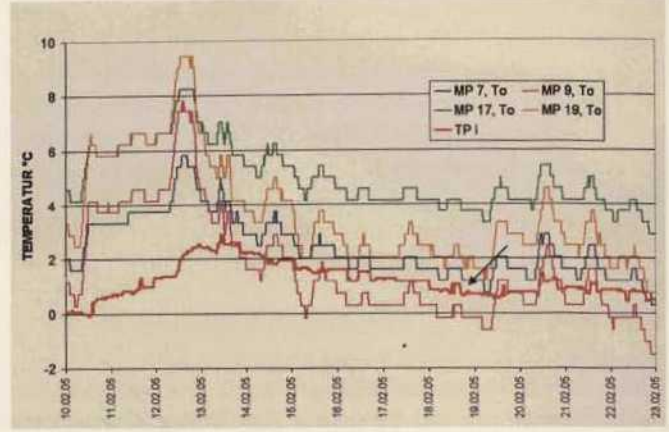


Abb. 20. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Führer-Fenster): Vergleich der Tauwassergefährdung: Tauwasserausfall an der Schutzverglasung (MP 9) und an der Spaltseite der Glasmalerei (MP 7) auch nach „Optimierung“ der Spaltgeometrie.

mit als auch an der benachbarten Lanzette ohne Veränderung von Spalttiefe und Belüftungsöffnungen. Weiterhin wurden begleitend Außen- und Innenklima gemessen.

Die Ergebnisse lauten:

Auch nach Veränderung der Spaltgeometrie kommt es im Luftspalt bei niedrigen Außentemperaturen (ab etwa -3°C , bei Raumtemperaturen von $+3^{\circ}\text{C}$) zu Werten $<0^{\circ}\text{C}$, eine signifikante Temperaturerhöhung im Luftspalt ist im Gegensatz zum Vorzustand nicht gegeben. Bei etwa vergleichbaren Außen- und Raumklimabedingungen zeigen sich für die Lufttemperaturen im Spalt vor und nach der Verbesserung der geometrischen Bedingungen keine signifikanten Veränderungen. Ebenso kommt es auch nach Veränderung der Spaltgeometrie häufig zu Luftfeuchtwerten $>80\%$, wobei sich die bekannte vertikale Staffelung einstellt: Bis etwa in Höhe Reihe 6 sind die Werte annähernd gleich, in größerer Höhe der Lanzette ist die Luftfeuchte circa 10% niedriger, liegt aber immer noch häufig über 75% (Abb. 18).

Sowohl an der Schutzverglasung als auch an der Außenseite der Glasmalereien treten weiterhin Minustemperaturen auf. Ebenso kommt es auch nach Veränderung der Spaltgeometrie weiterhin zur Taupunktunterschreitung und zu Tauwasserausfall an der Schutzverglasung (Abb. 20).

Bei sehr niedrigen Außenlufttemperaturen tritt Taupunktunterschreitung und Tauwasserausfall an der Glasmalereischeibe auf. Außerdem kommt es durch die Verbesserung der geometrischen Bedingungen zu keinen nachhaltigen Veränderungen der Oberflächentemperatur beziehungsweise der Tauwassergefährdung an der Schutzverglasung und an der Außenseite der Glasmalereischeibe.

Zusammenfassend heißt das:

- Eine Verbesserung der Spaltgeometrie (Vergrößerung von Spalttiefe sowie unterer und oberer Belüftungsöffnung) führt unter den klimatischen Verhältnissen der Sebaldskirche Nürnberg nicht zu einem gewünschten Entlastungseffekt hinsichtlich Reduzierung der relativen Luftfeuchtigkeit im Spalt sowie Minimierung von Zeiten mit Tauwasserbildung an der Schutzverglasung und an der Glasmalerei.

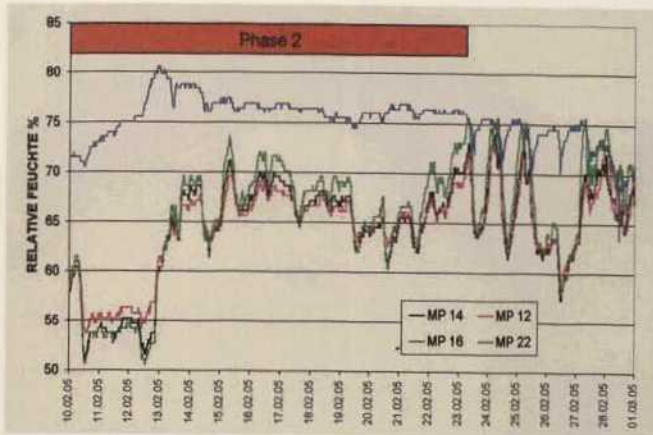


Abb. 21. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Furer-Fenster), Absenkung der relativen Feuchte im Spalt durch Wärmeeintrag (Phase 2): In unterschiedlichen Höhen gemessene Werte (MP 12, 14, 16) in Gegenustellung mit den Luftfeuchtwerten in der Kirche (MP 22).

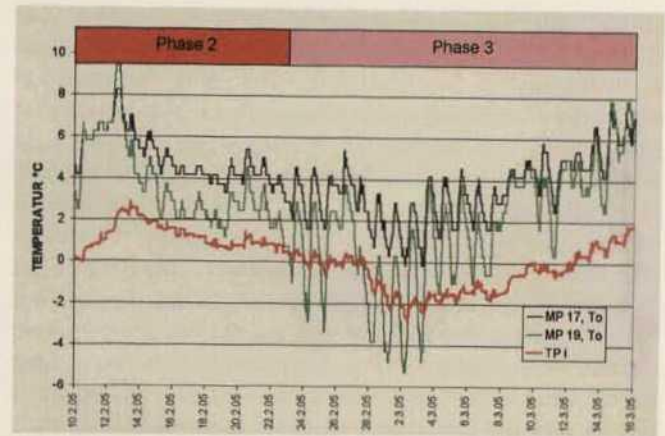


Abb. 22. Nürnberg, St. Sebald, Fenster nIV (sog. Furer-Fenster), messtechnischer Nachweis nach Verlegung eines elektrischen Heizkabels: keine Tauwasserfuhrung an der Glasmalerei bei Temperierung des Luftspalts (MP 17).

B. Wie der Ergebnisvergleich der Messungen mit Lanzette b (Originalzustand) zeigt, ergeben sich durch die Verbesserung der Spaltgeometrie bei Lanzette c keinerlei relevante Ergebnisse, die den Aufwand einer Änderung gegenüber den jetzigen Bedingungen rechtfertigen. Als einzige Ausnahme sei die Gestaltung der unteren Belüftungsöffnung benannt: durch die Kondensatrinne ist nicht nur der lichte Querschnitt der Belüftungsöffnung mit 1,5 cm äußerst gering, sondern diese Lösung bedingt auch eine zweifache Luftumlenkung. Damit tritt hier eine wesentliche Behinderung auf, dieser Detailpunkt muss geändert werden.

- Reduzierung der Frostgefahrung: Temperaturen $\leq 0^\circ\text{C}$ an der Spaltseite bei Schutzverglasung als Einfachglas 181 Stunden, bei Isolierglasvariante 42 Stunden
- Temperaturen von $\leq 0^\circ\text{C}$ treten unter den Raumlufttemperaturen der Frauenkirche Nürnberg bei der Schutzverglasung als Einfachglas ab einer uenlufttemperatur von -3°C , bei Isolierglas ab -8°C auf.

5. 2.2. Temperierung des Luftspalts

An der Frauenkirche Nürnberg wurde in Verbindung mit der oben beschriebenen Erprobung der Wirksamkeit einer Isolierverglasung in einer Lanzette die Prüfung der mit Temperierung des Luftspalts erreichbaren Effekte vorgenommen. Die dort erzielten positiven Ergebnisse führten zu der Entscheidung, zunächst einen weiteren „Test“ in Form einer Einfachlsung an einer Lanzette des Fensters nIV in St. Sebald durchzuführen. Dazu wurde in den beiden unteren Reihen ein elektrisches Heizkabel in einer Gesamtlänge von 6m mit einer Wärmeabgabe von 40W/m, gesamt 240W, eingebaut und der Effekt im Winter 2003/2004 gemessen. Messtechnisch nachweisbar war, dass bereits durch diesen moderaten Wärmeeintrag eine Tempe-

5. 2. Reduzierung der Klimabelastungen im Winter

5. 2.1. Einsatz von Isolierverglasung

An der **Frauenkirche in Nürnberg** wurde im Dezember 2002 an einem Fenster (nII) die vorhandene Einfachverglasung mit einem Wärmedurchgangskoeffizienten $U_V = 5,8 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ durch eine Isolierverglasung mit $U_V = 3,0 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ ersetzt. Die Abmessungen von Spalttiefe (3–4cm) und Größe der Belüftungsöffnungen (3–4cm) wurden unverändert belassen. Die begleitende Messung erreichbarer Effekte erfolgte vergleichend für die veränderte Situation am Fenster nII und am Originalzustand (benachbartes Fenster I).

Durch den Einbau der Isolierverglasung wurden im Vergleich zum Originalzustand folgende Effekte erzielt:

- Erhöhung der Lufttemperatur im Spalt um 2°C , Reduzierung der Schwankungen der Lufttemperatur um 10K,
- Verringerung der relativen Feuchte um 10%, Reduzierung der Tagesschwankungen der relativen Feuchte ebenfalls um circa 10%
- Erhöhung der Oberflächentemperaturen an der Schutzverglasung um bis zu 4 K und an der Spaltseite Glasmalerei um bis zu 2 K,
- Reduzierung von Zeiten mit Tauwasserbildung: Im Originalzustand (Einfachverglasung) 244 Stunden Tauwasseranfall an der Schutzverglasung und 13 Stunden auf der Spaltseite der Glasmalerei, bei Isolierverglasung 37 Stunden Tauwasseranfall an der Schutzverglasung, auf der Spaltseite der Glasmalerei kein Tauwasser.

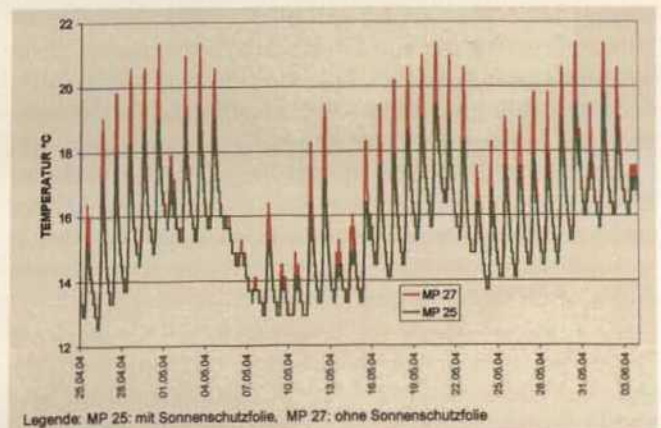


Abb. 23. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sVI (Behaim-Fenster), Vergleich der Oberflächentemperaturen an der Glasmalerei: Werte auf der Spaltseite ohne (MP 27) und mit Sonnenschutzfolie (MP 25; April – Juni 2004).

raturerhöhung/Luftfeuchteabsenkung im Spalt erreicht wurde, durch die eine Tauwasserbildung an der Glasmalerei ausgeschlossen und die Tauwassergefährdung an der Schutzverglasung deutlich reduziert wurde. Dieses erneute positive Resultat führte zu der Entscheidung, im November 2004 an einer Lanzette des Fensters nIV eine Spalttemperierung als Dauerlösung einzubauen, deren Wirksamkeit wie auch die Verbrauchskosten im Winterhalbjahr 2004/2005 gemessen wurden. Als technische Lösung wurde ein selbstregulierendes Heizband (Produkt: Defromat, Typ KD 2X, Abmessungen 6x14mm, schwarz) mit einer umgebungstemperaturabhängigen Nennheizleistung von circa 25W/m eingebaut. Das Kabel wurde mäanderförmig über die gesamte Höhe der Lanzette verlegt. Die Gesamtlänge beträgt 16m, das entspricht einer Gesamtheizleistung von circa 400W bzw. 0,4kWh. Zur Regelung wurde ein elektronischer Temperaturregler (Produkt: Defromat, Typ THSE 1 R, Schaltleistung 1,5kW) eingebaut. Die sehr ungünstigen Bedingungen hinsichtlich Größe der Belüftungsöffnungen (unten 1,5cm, oben maximal 3,5cm) und Spalttiefe (maximal 3,5cm) wurden nicht verändert.

Es konnten folgende **Ergebnisse** nachgewiesen werden:

Bei Wärmeeintrag in den Spalt stellen sich über die gesamte Höhe der Lanzette nahezu gleiche Lufttemperaturen ein. Die Lufttemperaturen in der Kirche lagen bei teilweise nur +2°C. Erst ab Außentemperaturen von <-5°C kam es auch im Luftspalt zu Temperaturen von 0°C und weniger.

Die relative Feuchte der Luft in der Kirche lag während der Messzeit überwiegend zwischen 70% bis 80%, im Spalt betrug sie mit wenigen Ausnahmen <70%. Wiederum gibt es in Lanzettenhöhe nur geringe Abweichungen der sich einstellenden relativen Feuchte. Insofern entsteht hier ein deutlicher Entlastungseffekt (Abb. 21).

An der Schutzverglasung tritt Tauwasserbildung während der Thermostateinstellung auf maximale Leistung (Wärmeeintrag über die gesamte Spalthöhe von circa 16m 400W) nicht auf. Allerdings lagen in dieser Zeitspanne die niedrigsten Außentemperaturen nur bei -2°C. Das Ergebnis lautet auch hier: durch den Wärmeeintrag in den Luftspalt wird Tauwasserbildung auf der Rückseite der Glasmalerei vermieden, an der Schutzverglasung tritt Tauwasserbildung erst bei Außenlufttemperaturen von <-2°C auf (Abb. 22).

Durch die Spalttemperierung kann ein deutlicher Entlastungseffekt erzielt werden. Dabei ist allerdings eine bestimmte Mindesttemperatur im Spalt notwendig. Aus Kostengründen empfiehlt sich in St. Sebald eine Thermostateinstellung auf einen Wert von +10°C.

Die positiven Effekte einer Spalttemperierung sind so lange wirksam, wie dies die Umgebungsbedingungen erlauben. Bei Spalttemperaturen von beispielsweise >10°C ist auch aus Betriebskostengründen eine Grenze gegeben. In Anbetracht der auch bei höheren Lufttemperaturen in der Kirche gleichzeitig vorhandenen Luftfeuchtwerte von >70% wird diese Situation etwa ab Ende März eintreten.

Die Betriebskosten für die Temperierung sind zwangsläufig von der aus Gründen des Substanzschutzes erforderlichen Zeitdauer des Wärmeeintrags abhängig. Während der durchgeführten Untersuchungen betrug der Stromverbrauch für die Temperierung einer Lanzette im Zeitraum 11.11.04 bis 13.04.05 insgesamt etwa 420kWh.

¹³ Gewählt wurde ein Produkt Climaplust 4S von Saint Gobain.



Abb. 24. Nürnberg, St. Sebald, Blick in den Hallenchor.

5. 3. Reduzierung der Klimabeanspruchungen im Sommer

Die möglichst rasche Abführung des Strahlungswärmeeintrags in den Belüftungsspalt und die damit verbundene Erhöhung von Luft- und Oberflächentemperaturen erfordert den Einsatz technischer Hilfsmittel zur Erhöhung der Luftgeschwindigkeit bzw. des Luftvolumenstroms. Eine derartige Lösung ist aus vielerlei Gründen undiskutabel, deshalb soll nicht weiter darauf eingegangen werden. Nach verschiedenen Recherchen stellte sich ebenfalls rasch heraus, dass ein temporärer außen liegender Sonnenschutz zur Reduzierung des Strahlungswärmeeintrags nicht nur aus denkmalpflegerischen, sondern auch aus technischen Gründen unter den an der Sebalduskirche Nürnberg gegebenen Randbedingungen ausscheidet.

Es verblieben damit nur die Möglichkeiten, die positiven – wie auch die negativen – Effekte einer Sonnenschutzfolie sowie einer Sonnenschutzverglasung zu untersuchen.

5. 3.1. Sonnenschutzfolie

Obwohl bereits anfängliche Bedenken bezüglich der formalen Akzeptanz und der thermischen Entlastungswirkung bestanden, wurde entschieden, diese Lösung praktisch zu prüfen, um eindeutige Fakten als Beurteilungsgrundlage zu erhalten. Eingesetzt wurde an einer Lanzette des Fensters s V eine außenseitig angebrachte Sonnenschutzfolie, für die herstellereitig als technische Parameter benannt wurden: Reflexion 20%, Absorption 54%, Transmission 26% und Reduzierung der Sonnenenergie bis zu 66%. Vergleichend erfolgten Messungen an einer Lanzette mit und ohne Sonnenschutzfolie (Abb. 25a).

Die Messergebnisse belegten für den Frühjahrszeitraum April/Mai bei noch moderaten Außenklimabedingungen, dass es beim Einsatz der Sonnenschutzfolie an der Spaltseite der Glasmalereischeiben zu einer Reduzierung der Oberflächentemperatur um bis zu 20% kam, gleichzeitig wurden die Tagesschwankungen der Oberflächentemperaturen um etwa 10 K reduziert. Die relative Feuchte der Spaltluft schwankte im Tagesgang weiterhin noch in einer Größenordnung teils >60%, gemessen wurden Werte zwischen 12% und 80%.



Abb. 25a-b. Nürnberg, St. Sebald, Fenster sV und nIV: Reflexionswirkung einer außen angebrachten Sonnenschutzfolie (a) und Verlegung eines elektrischen Heizkabels zur Spalttemperierung (b).

Noch stärker als durch die angegebenen technischen Daten der Folie erwartet kam es zu inakzeptablen Veränderungen des inneren (Abdunkelung und schlechtere Erlebarkeit der Glasmalereien) wie auch des äußeren Erscheinungsbildes (extremer Spiegelungseffekt). Aus diesem Ergebnis heraus war klar, dass die Verwendung von Sonnenschutzfolien als Mittel zur Reduzierung sommerlicher Belastungen an den Glasmalereifenstern eindeutig abgelehnt werden muss (Abb. 23).

5. 3.2. Sonnenschutzverglasung

In Anbetracht der aus Gründen des Substanzerhalts zwingend notwendigen thermischen Entlastung im Sommer gingen die weiteren Überlegungen in Richtung des Einbaus von Sonnenschutzglas als Schutzverglasung. Es musste dabei eine technische Lösung gefunden werden, die hinsichtlich ihrer Eigenschaften günstige Voraussetzungen bezüglich Energie-durchlassgrad und weiterer Eigenschaften hat.¹³

Zunächst erfolgte unter Zuhilfenahme früherer Messergebnisse eine thermische Simulationsrechnung der durch den Einsatz des Sonnenschutzglases erreichbaren Effekte. Die messtechnische Überprüfung wird im Sommer 2005 durchgeführt. Dazu wurde an einem Fenster (sVI) komplett die Sonnenschutzverglasung eingebaut. Ergänzend wurde nur die Kondensatauffangrinne entfernt. Die begleitende Messung wird wiederum sowohl an einer Lanzette mit Sonnenschutzverglasung als auch an der Originalsituation mit Einfachverglasung (Fenster sV) durchgeführt. Über die erreichten Ergebnisse kann zum Jahresende 2005 berichtet werden (vgl. Abb. 16).

6. Zusammenfassung

Die Wirksamkeit einer Außenschutzverglasung als Mittel zum Substanzschutz wird neben den Außenklimaverhältnissen, den Standortbedingungen und den baulichen Gegebenheiten einer Kirche von den klimatischen Verhältnissen in der Kirche mitbestimmt. So liegen beispielsweise die winterlichen Temperaturen in der Sebalduskirche Nürnberg auf einem durchweg sehr niedrigen Niveau. Dies prägt die Situation maßgeblich und schränkt

die Übertragbarkeit der Ergebnisse der winterlichen Situation auf Kirchenräume mit deutlich höheren Lufttemperaturen nachhaltig ein.

Vorangestellt sei, dass die Außenschutzverglasung selbstverständlich einen wesentlichen Beitrag zum Substanzschutz leistet, allerdings sind ihrer „Leistungsfähigkeit“ eben zwangsläufig Grenzen gesetzt.

So ist es mit einer Außenschutzverglasung als Einfachglas bzw. im konkreten Fall aus 9mm Verbundglas (4mm Optiwhite innen und 4,5mm Goetheglas außen, mit Gießharz vergossen) unter den klimatischen Bedingungen von St. Sebald weder möglich, eine Tauwasser- oder Frostbeanspruchung der Originalgläser **grundsätzlich** zu vermeiden, noch solche Grenzwerte von Lufttemperatur und relativer Feuchte einzuhalten, die aus der Sicht des Substanzschutzes als Zielgrößen formuliert werden. Es sei nochmals betont, dass dies jedoch nicht an der Art der ausgeführten Schutzverglasung, sondern an den „natürlichen Leistungsgrenzen“ selbst liegt. Ebenso kommt es unter sommerlichen Bedingungen zu Spalt- und damit auch Oberflächentemperaturen an der Glasmalerei von bis zu $>50^{\circ}\text{C}$, wie zu selbst kurzzeitigen (Tagesgang!) Luftfeuchteschwankungen zwischen 10% und 80%.

Die in der Praxis eingeführten „Dimensionierungsgrundsätze“ für eine Schutzverglasung (Spalttiefe, Größe der Belüftungsöffnungen) haben sich sicherlich bewährt, nur darf der Einfluss einer Variation geometrischer Parameter auf ihre Wirksamkeit nicht überschätzt werden. Vielmehr spielen hier eben auch die speziellen Verhältnisse der Kirche eine wesentliche Rolle. Letztlich sind einer Veränderung der Geometrie ohnehin oftmals sehr enge bauliche und formale Grenzen gesetzt. Die Möglichkeiten einer „Optimierung“ der Spaltgeometrie sind nicht in jedem konkreten Fall gegeben.

Allerdings darf nicht übersehen werden, dass auch die derzeit überschaubaren technischen Möglichkeiten zur Verbesserung der Wirksamkeit einer Schutzverglasung sehr rasch an Grenzen der technischen Machbarkeit wie der formalen und denkmalpflegerischen Akzeptanz stoßen.

Möglichkeiten und Grenzen einer Klimastabilisierung

Grundsätzlich gilt:

Mit einer „Optimierung“ der geometrischen Verhältnisse der Außenschutzverglasung lassen sich substanzschädigende klimatische Bedingungen, Frosteinwirkung und Tauwasserausfall zwar vermindern, aber nicht vermeiden – auch Schutzverglasungen haben ihre Grenzen der Leistungsfähigkeit.

Mit dem jetzigen „Instrumentarium“ ist zwar eine Annäherung an einen aus restauratorischer Sicht „optimalen Klimakorridor“ und weitere Zielgrößen möglich:

- Lufttemperatur: 12°C bis 25°C (unter Beachtung der Differenz außen – innen),
 - relative Luftfeuchtigkeit: 45% bis 60% (unter Beachtung von Glasart und Schadstoffkonzentration),
 - Temperatur- und Luftfeuchtwechsel: Größenordnung sowie Häufigkeit von Schwankungen möglichst minimal,
 - keine Tauwasserbildung an der Glasmalerei,
- keinesfalls aber kann dessen vollumfängliche Einhaltung erreicht werden.

Im **Winterzustand** können durch Anwendung von Isolierglas als Außenschutzverglasung, alternativ durch moderate Temperierung, deutliche Entlastungseffekte erzielt werden. Dieser Nachweis wurde eindeutig erbracht.

Ungleich problematischer ist die Möglichkeit, im **Sommerzustand** Überwärmungen und damit verbundene Belastungen zu vermindern: Der Versuch mittels Sonnenschutzfolien hat sich als unbrauchbar erwiesen, eine Sonnenschutzverglasung in der zumutbaren technischen und formalen Lösung wird zwar eine (durchaus auch deutliche) thermische Entlastung, jedoch keinen ausreichenden Effekt im Sinne der Einhaltung eines „optimalen Klimakorridors“ erbringen. Es muss also jeweils im Einzelfall eine bestmögliche „Kompromisslösung“ gefunden werden.

Als ein möglicher Lösungsweg werden partielle Verbesserungen an besonders substanzgefährdeten bzw. schützenswerten Fenstern erachtet.

Abschließend sei noch ein Hinweis auf die Übertragbarkeit der Ergebnisse gestattet: Die Komplexität der Randbedingungen und Einflüsse erlaubt keine unmittelbare Übertragung auf andere Objekte, zu unterschiedlich sind beispielsweise folgende Faktoren:

Am Originalglas:

- Glaszusammensetzung,
- Bemalung/Maltechnik,
- Oberflächenbeschaffenheit,
- Vorschädigung/aktueller Zustand,
- Restaurierungsgeschichte, Konservierungsmittel (Festigung, Beschichtung)....

Am Bauwerk:

- Standort- und Klimafaktoren,
- Baukörpergestaltung,
- Nutzungsbedingungen....

Aus diesem Grund muss für jedes Einzelobjekt mit Hilfe eines geeigneten „Voruntersuchungsinstrumentariums“ in gemeinschaftlicher Zusammenarbeit von Restauratoren, Naturwissenschaftlern, Kunsthistorikern, Architekten die entsprechende Entscheidungsgrundlage erarbeitet werden.

Summary

Investigations of Climatic Dangers to the Painted Glass in St. Sebald's Church in Nuremberg. Possibilities and Limitations of the Effectiveness of Exterior Protective Glazing

With a surface area of about 250 m² of superb paintings dating from four centuries, the stained glass in St. Sebald in Nuremberg presents a special challenge to preservationists, climate specialists and restorers.

Because they date from various periods, are made of different materials and have been subjected over the years to a turbulent restoration history, these glass windows make very different demands on the climatic and environmental conditions. The rather "hard" glass dating from the Dürer period is much more resistant to climatic fluctuations than the badly damaged and corrosion-prone glass from the 14th century. The fronts of these windows today are a virtual network of corrosion products, gel layers, glass painting layers, cold overpaintings and consolidation agents. Such a bundle of organic and inorganic components

reacts particularly sensitively to frequent changes in moisture and drying and to high temperatures or frost. The various consolidation and binding agents begin to "work" and there is crystallizing or further corrosion. This leads within a short time to losses of paint and original surfaces. Generally only the highly differentiated paint layers are affected on the glass paintings dating from the Dürer period and later. In these cases moisture leads to corrosion of the paint layer and microbiological growth. Run-off condensation and the long-time effects of moisture foster soiling and lead over the medium term to the accumulation of hard, brittle crusts on the sensitive painting.

Thus the climatic conditions for the windows from the 14th century should be kept as stable as possible, with few fluctuations and rather low temperatures. The windows from the late 15th century or later are endangered more by moisture and biogenic attack.

Within the framework of a research project under the German Federal Foundation for the Environment (DBU), regular monitoring of the glass paintings and detailed climatic measurements have shown that these requirements are not being met – despite the protective glazing which was installed in 1956 and brought up to the latest standards in 1985.

Exterior protective glazing has been employed for many decades as a means to protect medieval glass paintings from damages caused by environmental factors. The protective glazings that have been used for this purpose differ in their construction and in the design of their ventilation systems. Diverse studies of the effects of protective glazing systems have been carried out in the past and recommendations have been made to optimize the geometric parameters. However, a recent comparative study of the development of damages on medieval glass paintings in various churches demonstrates that in general practice no significant correlation exists between the type of protective glazing system and the degree of damage on glass paintings. It could be determined that the physical state of the glass paintings is substantially influenced not only by exterior climatic factors but also by surrounding construction-related conditions and by indoor climatic conditions. Knowledge of the climatic conditions and their effects (temperature and humidity extremes, frequency and extent of climatic fluctuations, danger from condensation moisture and frost) is critical for the design and "optimization" of a protective glazing system. Parallel to this, it is necessary to analyze the correlation between climatic factors and damage to glass paintings; the goal should be a definition of the limits within which it is possible to ensure at least a delay in the deterioration process. Such an analysis should also serve as the foundation for decisions concerning the necessity of efforts to further improve protection of the historic fabric.

Extensive scientific and restoration studies focusing on improved protection of medieval glass paintings have been carried out over the past three years in three churches in Nuremberg (St. Lawrence, the Church of Our Lady, and St. Sebald) and in the Church of Our Lady in Munich. Following a restoration-oriented survey and documentation of the as-is condition and the damages, long-term measurements relating to the physical state of the windows were carried out and chemical and microbiological analyses were conducted.

Based on the results of the measurements it was possible to make a quantitative judgement of the glass paintings in terms of their construction physics and to assess the dangers resulting from their condition. In all the churches in the study it became apparent that despite existing protective glazing systems it is

not possible to **fundamentally** avoid stress on the original glass from condensation or frost, nor is it possible to adhere to the limits set for the air temperature and the relative humidity in the ventilation slit (based on optimal values established from the standpoint of materials protection). Damage-producing climatic conditions, the effects of frost and the precipitation of condense water can be diminished but not avoided by an "optimization" of the geometric conditions: protective glazing systems have their limitations in performance. Based on this realization, the effectiveness of various solutions to improve the climatic conditions on the windows for winter and summer circumstances was tested. Comparative tests were made of the effects achievable by altering the geometry of the slit and changing the ventilation openings; through the use of insulating glass; by controlling the temperature of the air slit; and by measures to protect against the sun. In the meantime the first results which promise to be successful have been achieved in St. Sebald.



Abb. 26. Nürnberg, St. Sebald, Ostchor von Südosten.

Literaturverzeichnis

DBU-Projekt „Beurteilung zurückliegender Erhaltungsmaßnahmen an den Glasmalereifenstern des 14.–16. Jahrhunderts in der Kirche St. Sebald in Nürnberg (AZ.: 18251–45).
 Stefan FITZ – Gottfried FRENZEL, Die Einwirkung von Luftverunreinigungen auf ausgewählte Kunstwerke mittelalterlicher Glasmalerei. Forschungsbericht 10608002. Bundesministerium des Inneren, Berlin 1984.
 Gottfried FRENZEL, Die Farbverglasung aus St. Lorenz, Augsburg 1968.
 Gottfried FRENZEL, Historischer Abriß der Glasgemälde restaurierung in Nürnberg, in: Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Bd. 32), München 1984, S. 94–101.
 Eva FRODL-KRAFT, Die Glasmalerei – Entwicklung, Technik, Eigenart, Wien – München 1970.
 D. R. FUCHS, Glassensor-Untersuchungen zur Laserbehandlung historischer Glasmalereien. BMFT-Verbundprojekt BAU 5026/C4.1994.
 Friedrich W. HOFFMANN, Die Sebalduskirche in Nürnberg, Wien 1912.
 Hermann KÜHN, Erhaltung und Pflege von Kunstwerken und Antiquitäten, München 1981.
 Hannelore MARSCHNER, Untersuchungen zur Verwitterung und Konservierung mittelalterlicher Glasmalerei, in: Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Bd. 32), München 1984, S. 44–55.
 Moritz Maximilian MAYER, Die Kirche des heiligen Sebaldus (Nürnberg's Merkwürdigkeiten und Kunstschätze, Heft 1), Nürnberg 1831.
 Wolfgang MÜLLER – Manfred TORGE – Detlef KRUSCHKE – Karin ADAM, Sicherung, Konservierung und Restaurierung historischer Glasmalereien. Forschungsbericht 217 der BAM, Berlin 1997.
 Wolfgang MÜLLER – Manfred TORGE – Karin ADAM – Hannelore RÖMICH – Rudolf WEISSMANN – Rainer DREWELLO, Naturwissenschaft im Dienst der Restaurierung, in: Restaurierung und Konservierung historischer Glasmalereien, Mainz 2000.
 Wolfgang MÜLLER – Manfred TORGE, Korrosion und Konservierung historischer Glasmalereien. Abschlußbericht, Förderkennzeichen: 524-30L101 B/4 (BMFT-Projekt), Zentralinstitut für Anorganische Chemie, Berlin 1991.
 Wolfgang MÜLLER, Verbräunte mittelalterliche Glasmalereien, Leipzig 2002.
 Roy NEWTON – Sandra DAVISON, Conservation of Glass, London 1989.
 Roy NEWTON, Glass Deterioration and Preservation – some Open Questions, in: Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Bd. 32), München 1984, S. 42f.

Roy NEWTON, The durability of Glass – a review, in: Glass technology 26, 1985, S. 21–38.

Stefan OIDTMANN, Die Schutzverglasung, eine wirksame Schutzmaßnahme gegen die Korrosion an wertvollen Glasmalereien. Diss. Eindhoven 1994, Aachen 1994.

Hartmut SCHOLZ, Die mittelalterlichen Glasmalereien in Mittelfranken und Nürnberg extra muros (Corpus Vitrearum Medii Aevi, Deutschland Bd. X, 1), Berlin 2002.

Hartmut SCHOLZ, Entwurf und Ausführung. Werkstattpraxis in der Nürnberger Glasmalerei der Dürerzeit (CVMA Deutschland, Studien I), Berlin 1991.

Hartmut SCHOLZ, Nürnberg, St. Sebald, in: Glasmalerei im Kontext, Bildprogramme und Raumfunktion. XXII. Internationales Colloquium des Corpus Vitrearum in Nürnberg und Regensburg 2004, Freiburg i.Br. 2004, S. 100–111.

Manfred SCHREINER, Über die Verwitterung der grünen Scheiben in mittelalterlichen Glasgemälden, in: Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Bd. 32), München 1984, S. 60–65.

Jörg SEELE, DBU-Modellvorhaben schadstoffverhindernder Schutzmaßnahmen an den spätmittelalterlichen und frühneuzeitlichen national wertvollen Glasfenstern der Sebalduskirche in Nürnberg, Projektteil: Raumklimatisch/bauphysikalische Bedingungen und daraus resultierende Gefährdungen für den Glasmalereibestand, Untersuchungsbericht des IGS München, München 2003 (Ms. masch.).

Jörg SEELE, Untersuchung der Wirksamkeit bautechnischer Maßnahmen zur Reduzierung substanzschädigender klimatischer Einflüsse an den Glasmalereien, Untersuchungsbericht des IGS München, München 2004 (Ms. masch.).

Sebastian STROBL, Glastechnik des Mittelalters, Stuttgart 1990.

Peter van TREECK, Zur historischen Entwicklung, zum heutigen Bestand und Zustand der Glasmalerei des 19. Jahrhunderts und ihren Restaurierungsproblemen, in: Glaskonservierung. Historische Glasfenster und ihre Erhaltung (Arbeitshefte des Bayerischen Landesamts für Denkmalpflege, Bd. 32), München 1984, S. 23–33.

Rolf WIHR, Restaurieren von Keramik und Glas, München 1977.

Abbildungsnachweis

Abb. 1, 2a-b, 4, 11a-b, 17: Dr. Peter van Treeck, München; Abb. 3, 5–6, 7a, 8–10, 12, 24, 25a, 26: Martha Hör, Nürnberg; Abb. 7b, 13–16, 18–23, 25b: IGS München – Schliersee (Dr. Jörg Seele).