

Rainer Barthel

Instandsetzung des Chorscheitelfensters von St. Georg in Nördlingen

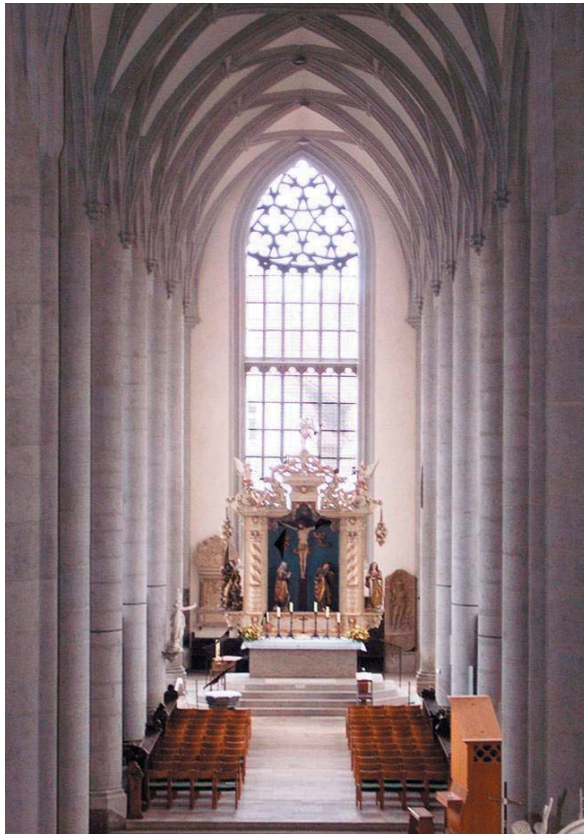


Abb. 1: St.Georg in Nördlingen, Chorscheitelfenster

ZUSAMMENFASSUNG

Das große axiale Maßwerkfenster des Chores von St. Georg in Nördlingen wurde im Jahr 2003 instand gesetzt. Das Maßwerk ist in allen seinen Teilen noch im Originalzustand aus der Bauzeit der Kirche zwischen 1427 und 1519 erhalten. Das Fenster ist ca. 12 m hoch und 3,60 m breit, besteht aus vertikalen Stäben aus Sandstein, horizontalen Stabeisen aus Schmiedeeisen und dem Maßwerk innerhalb des oberen Spitzbogens. Die Konstruktion und ihre Detailausbildungen sind von großer technischer Qualität und von hoher bautechnikgeschichtlicher Bedeutung.

Umfangreiche Schäden am Stein und an den Verbindungen konnten mit Hilfe einer detaillierten Deformations- und Schadensanalyse auf Bewegungen innerhalb der Chorwand zurückgeführt werden. Eine besondere Herausforderung war es, ein Tragmodell für die Abtragung der Windlasten zu entwickeln. Mit differenzierten statischen Berechnungen konnten die erforderlichen Sicherheiten nachgewiesen werden. Das daraus entwickelte und schließlich umgesetzte Instandsetzungskonzept sah vor, die Bewegungen der Chorwand durch horizontale Zuganker, die im Maßwerk nicht sichtbar sind, zu begrenzen und die steinerne Struktur und ihre Verbindungen so zu reparieren, dass die ursprüngliche Steifigkeit wieder hergestellt ist. Alle Maßnahmen am Stein wurden in situ ausgeführt und auf das notwendigste reduziert. Auf diese Weise konnten die Originalsubstanz und die Konstruktionsdetails weitgehend erhalten werden.



Abb. 2: Instandgesetztes Fenster

EINLEITUNG

Die Georgskirche in Nördlingen ist eine der letzten großen Hallenanlagen der Spätgotik. Der Entschluss zum Neubau an der Stelle einer älteren Kirche wurde im Jahr 1427 gefällt. 1519 ist der Bau im Wesentlichen abgeschlossen.¹ Die Länge des Mittelschiffes beträgt 93,50 m, seine Höhe 18,60 m. Der Bau ist sehr sorgfältig ausgeführt. Das hier zu behandelnde Fenster liegt in der Achse des Hauptschiffes und bildet den Abschluss des Chores nach Osten. Es ist ca. 12 m hoch und 3,68 m breit (Abb.2).

Das Maßwerk und die vertikalen Stäbe des Fensters zeigten umfangreiche Schäden und Verformungen. Nach der Einrüstung im Zuge der Instandsetzung der Umfassungswände wurden die Schäden augenfällig. Im Rahmen eines Gutachtens wurde von den Autoren ein Instandsetzungskonzept entwickelt, das nach Erstellung der statischen Berechnungen und der Ausführungsplanung im Jahr 2003 umgesetzt wurde.

BESTAND

Bauteile

Bis auf die Verglasung sind alle wesentlichen Teile des Fensters bauzeitlich. Die während der Ausführung gewonnenen Befunde bestätigen dies.

Die wesentlichen Teile sind:

- die Chorwand mit den Fenstergewänden, der Fensterbank und dem Bogen über dem Fenster
- der horizontale Riegel
- die vertikalen Stäbe
- das Maßwerk innerhalb des oberen Spitzbogens
- die horizontalen Stabeisen.

Die Chorwand ist ca. 1,60 m dick. Das Mauerwerk ist zweischalig und besteht aus Suevit. Die Fensterbank, die Fenstergewände und der Spitzbogen über dem Maßwerk sind Teil der Chorwand und bestehen aus demselben Material. Es wird allgemein angenommen, dass die Chorwand vollständig hergestellt war, bevor das Maßwerkfenster eingebaut wurde. Der horizontale Riegel ungefähr auf der halben Höhe des Fensters besteht aus dem unteren Maßwerk, das den Übergang zu den unteren Stäben bildet und einem oberen massiven Teil. Der Riegel setzt sich zusammen aus fünf Werkstücken aus Sandstein, die über vertikale, mit Blei ausgegossene Fugen gestoßen sind. An den Fenstergewänden band der Riegel nur wenige Zentimeter ein. Die Art der Verbindung zeigt, dass in den Fenstergewänden keine entsprechenden

Vorbereitungen getroffen worden waren. Es wird angenommen, dass man sich erst nach dem Aufführen der unteren Stäbe entschlossen hat, eine horizontale Versteifung in Form des Riegels einzubauen.

Die vertikalen Stäbe oberhalb und unterhalb des Riegels bestehen aus Sandstein. Es gibt jeweils zwei Hauptstäbe mit einer Querschnittstiefe von ca. 29 cm und Nebenstäbe mit einer Querschnittstiefe von 23 cm. Die Werkstücke sind zwischen 87 und 89 cm hoch und untereinander jeweils am Kreuzungspunkt mit den Stabeisen gestoßen.

Das obere Maßwerk besteht wie die Stäbe aus Sandstein. Die einzelnen Werkstücke sind verhältnismäßig groß, sie messen teilweise über zwei Meter (Abb.3).

Die Begrenzung des Maßwerks zu den unteren Stäben hin besteht aus dem „hängenden Bogen“. Entlang des Spitzbogens verläuft ein Randprofil, das Teil des Maßwerks ist. Dieses und das Profil des „hängenden Bogens“ haben eine Querschnittstiefe von 29 cm („altes Profil“). Sie entsprechen damit dem Profil der Hauptstäbe im unteren Teil des Fensters. Innerhalb des Maßwerks haben alle Profile eine Querschnittstiefe von 23cm („junges Profil“) und entsprechen damit dem Profil der Nebenstäbe.

Die Stabeisen aus geschmiedetem Eisen sind ca. 3,60 m lang und haben einen stehenden Querschnitt von 25 x 48 mm. Sie sind auf der Außenseite direkt vor der Glasebene angeordnet und durchdringen die Stäbe. An den Stabeisen sind zum Kircheninnenraum hin kleine Ösen angeschmiedet, an denen die Verglasung befestigt ist.

Verbindungen

Die vertikalen Stäbe sind untereinander immer dort gestoßen, wo ein horizontales Stabeisen durchläuft. Das Stabeisen greift zur Hälfte in den oberen, zur anderen Hälfte in den unteren Stein. Die Fugen zwischen Stein und Stabeisen sowie zwischen Stein und Stein sind verbleit. An einigen Fugen ist auffallend, dass oberer und unterer Stein scheinbar ohne Fugenmaterial direkt aufeinander stehen. Auf der Fensterbank und auf dem horizontalen Riegel stehen die Stäbe auf und sind verbleit.

Die horizontalen Stabeisen sind beidseitig in den Fenstergewänden gelagert. Sie binden ca. 3 cm in die Formsteine aus Suevit ein und sind dort verbleit.

Die Fugen im oberen Maßwerk sind alle verbleit und mit einem Eisenstab gesichert. Der Eisenstab ist in der Mitte des Querschnittes in Richtung der Längsachse des jeweiligen Formstückes angeordnet.

Er hat eine Länge von ca. 6 cm, einen Durchmesser von ca. 10 mm und eine geriffelte Oberfläche. Er greift jeweils zur Hälfte in die beiden Formstücke und ist insgesamt mit Blei vergossen.

Werkstoffe

Die Stäbe und das Maßwerk bestehen aus einem quarzitisch gebundenen Grünsandstein, wie er in den Brüchen am Main vorkommt. In der Planungsphase konnte kein Prüfkörper aus der steinernen Struktur entnommen werden. Zur Verfügung stand ein Stück Sandstein aus dem Maßwerk des Nachbarfensters, das bereits instand gesetzt worden war. Daraus konnten Probekörper mit 50 x 50 mm gewonnen werden. Die mittlere Druckfestigkeit wurde ermittelt zu $\beta_u = 41,65 \text{ N/mm}^2$.² Aus den vorhandenen Stabeisen konnten keine Proben entnommen werden. Die St. Georgsbauhütte stellte ein schmiedeeisernes Stabeisen eines Kirchenfensters aus etwa der gleichen Bauzeit zur Verfügung. An drei Proben aus diesem Material mit einer Länge von jeweils 100mm und einem Durchmesser von 8 mm wurden folgende Werte ermittelt: mittlere Festigkeit $f_{u,m} = 347 \text{ N/mm}^2$, mittlere Streckgrenze $f_{y,m} = 246 \text{ N/mm}^2$, kleinster Wert der Bruchdehnung $\epsilon_m = 10,3 \%$. Das Material erreicht somit Werte, die mit dem St33 der alten Norm DIN 17100 verglichen werden können, wobei allerdings die Bruchdehnung mit 10 % deutlich unter dem Sollwert von 18 % des St33 bleibt.³ Das Mauerwerk der Chorwand besteht aus Suevit. Dabei handelt es sich um einen Stein, der nur in der Gegend des Nördlinger Rieses vorkommt und durch den Meteoriteneinschlag und die dabei herrschenden Temperaturen entstanden ist. Der Stein hat viele und unregelmäßig große glasartige Einschlüsse und ist wenig witterungsbeständig.

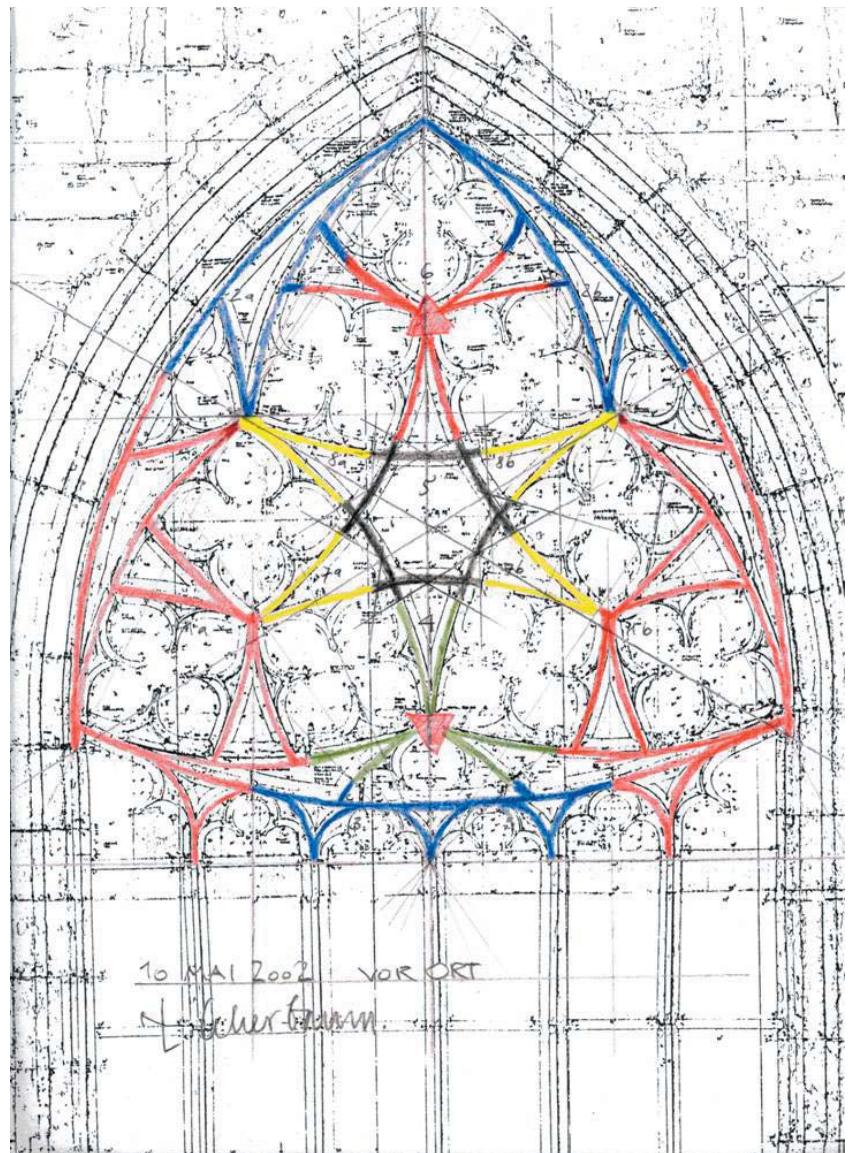


Abb. 3: Steinschnitt innerhalb des Maßwerkes. Jedes Werkstück ist mit einer Farbe angelegt (Michael Scherbaum)

SCHÄDEN UND SCHADENSURSACHEN

Chorwand

Die Chorwand zeigte im Bereich über dem Fenster von außen und von innen Risse. Die kräftigsten Risse verliefen rechts und links des Fensters, ausgehend ungefähr vom unteren Drittelpunkt des Spitzbogens schräg nach oben zur Mauerkrone. Sie nahmen nach oben zu und waren dort ca. 15 bis 20 mm stark. Vorhandene Rissmarken aus den Jahren 1997 und 1998 waren gerissen. Direkt über dem Fensterbogen lässt sich eine Absenkung der Mauerkrone von ca. 2 cm messen. Zwei

Steine des Fensterbogens direkt neben dem Scheitel waren leicht nach vorne herausgedreht. Die Risse und die Absenkung deuteten auf eine Aufweitung des Chores hin. Dadurch hat sich die Spannweite des Fensterbogens vergrößert. Die Risse zeigten den typischen Verlauf wie sie im Mauerwerk über einem Bogen, dessen Auflager horizontal nachgeben, entstehen. Die Risse haben ihren Ursprung dort, wo sich die unteren Gelenke des Bogens

einstellten. Der Scheitel senkte sich ab, das Mauerwerksgefüge über dem Scheitel wurde deshalb gestört. Die Ursache für diese Aufweitung des Chores waren horizontale, nach außen gerichtete Kräfte auf die Umfassungswände, welche zu einer geringfügigen Schrägstellung der Chorwände nach außen führte. Dementsprechend ist die Aufweitung an der Mauerkrone am größten und nimmt nach unten hin ab. Die horizontalen Kräfte,

die dies verursachten, resultieren aus den Gewölben und einem über einen längeren Zeitraum defekten Dachwerk. Eine weitere Ursache für Bewegungen innerhalb der Chorwand ist der Fensterbogen selbst, der unter der Auflast aus dem Dach einen Horizontalschub in der Wandebene erzeugt und auf diese Weise das Mauerwerk ebenfalls auseinander drückt.

Die Bewegungen innerhalb der Chorwand waren die Ursache für die meisten Schäden am Maßwerk. Im Hinblick auf die Standsicherheit des Gesamtgebäudes bedeuten sie keine offensichtliche Gefährdung. Ein Teil der Bewegungen kann sich schon bald nach der Errichtung des Gebäudes, zum Beispiel infolge von Fundamentsetzungen, eingestellt haben. Inzwischen war das Dach im Chorbereich instand gesetzt und die Horizontalkräfte des Daches wieder kurz geschlossen worden. Eine ganzheitliche Untersuchung der Umfassungswände und der Fundamente ist trotzdem angeraten, ist aber nicht Thema dieses Aufsatzes.

Fensterbank und Fenstergewände

Die Fensterbank und die Fenstergewände zeigten tief greifende Verwitterungsschäden. Die Fensterbank ist aufgrund des Wasseranfalls aus der Fensterfläche besonders stark davon betroffen. Einzelne Risse ließen das Wasser in das darunter liegende Mauerwerk eindringen.

Horizontaler Riegel

Der horizontale Riegel war im oberen Teil durch das hier anfallende Wasser ebenfalls stark verwittert (Abb.4). An den Anschlüssen an die Fenstergewände klappte jeweils ein Spalt von ca. 18 mm Breite. Der klammerförmige Anschluss an die Fenstergewände war beidseitig abgebrochen. Zwei Fugen innerhalb des Riegels klapften jeweils um ca. 2 mm. Die Addition der einzelnen Klaffungen ergab exakt den Betrag der Spannweitenvergrößerung wie sie auf dieser Höhe aus der Aufweitung des Chors resultierte.

Stabeisen

Die Stabeisen zeigten sehr wenig Rostbildung. Besonders im oberen Bereich des Fensters war festzustellen, dass sie aus den Anschlüssen an den Fenstergewänden horizontal herausgezogen worden waren und nur noch wenige Millimeter einbanden. Der

Grund hierfür liegt wiederum an der Vergrößerung des horizontalen Abstandes zwischen den Fenstergewänden. An vielen Anschlüssen war der Stein an den Anschlüssen ausgebrochen.

Stäbe

An fast allen Hauptstäben und bei mehreren Nebenstäben waren Abplatzungen an den Stößen festzustellen (Abb.5). Sie waren bis 4 cm tief und sind auf hohe Kantenpressungen zurückzuführen. Ein vertikales Aufspalten des Steins, wie es aufgrund der Lagerungsschichten innerhalb des Sandsteins an anderen Maßwerken beobachtet worden war, konnte an keinem der Stäbe festgestellt werden.

Maßwerk

Innerhalb des oberen Maßwerks gab es vielfältige Schädigungen:

- in Richtung der Achse eines Werkstückes auseinander gezogene Verbindungen (Abb.6)

- senkrecht zur Achse gegeneinander verschobene Werkstücke (Abb.7)
- einseitig klaffende Fugen infolge einer Rotation
- Brüche senkrecht zur Achse mit Klaffung infolge einer Zugkraft (Abb.7)
- Brüche senkrecht zur Achse mit gegenseitiger Verschiebung
- Brüche quer durch Knoten (Abb.6)
- Kantenabplatzungen (Abb.7)
- Aufspaltungen von Werkstücken über längere Abschnitte.

Eine genauere Deformationsanalyse ergab, dass die vielfältigen Schäden nicht zufällig verteilt waren, sondern streng regelmäßig waren und einem Bewegungsmechanismus folgten (Abb.8). Die horizontale Spannweite auf Höhe des Fensterbogenansatzes hatte sich um ca. 5 cm vergrößert. Gleichzeitig hatte sich die Bogenspitze um 20 mm gesenkt. Diese veränderte Randgeometrie wurde dem steinernen Maßwerk aufgezwungen. Sämtliche Schäden waren darauf zurückzuführen.

Das Schadensbild war nahezu symmetrisch zur Mittelachse des Fensters. Im oberen und mittleren Bereich des Maßwerks wurden die Fugen zwischen Elementen, die horizontal verlaufen und damit die beiden Bogenhälften miteinander verbinden, infolge der Spannweitenvergrößerung auseinander gezogen. Gleichzeitig senkte sich das Maßwerk in diesem Bereich entsprechend dem Bogenscheitel nach unten ab. Die seitlichen Anschlüsse an den Fensterbogen brachen und das Maßwerk scherte um ca. 20 mm nach unten ab. Eine gleichmäßige Absenkung des gesamten

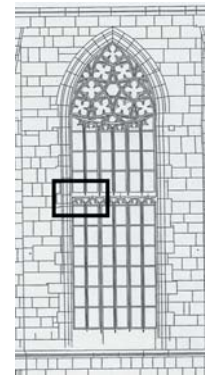


Abb. 4: Abgewitterter horizontaler Riegel mit Anschluss an Fenstergewand mit sichtbaren Klaffungen

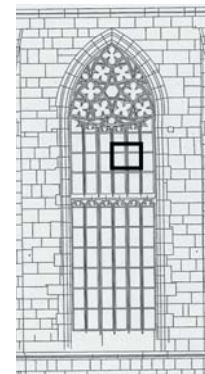


Abb. 5: Kantenabplatzung am Stab aus Sandstein

Maßwerks war aber nicht möglich, da die darunter stehenden Stäbe eine Absenkung nicht zulassen. Die Konstruktionsweise des Maßwerks erlaubte es nun, dass die vertikale Absenkung in eine horizontale Bewegung nach rechts und links umgelenkt werden konnte. Dies erfolgte durch die sprengwerkartige Struktur in der Mitte des Maßwerks direkt über den Stäben (Abb.9). Durch die Absenkung wurde der hängende Bogen nach rechts und links gedrückt. Dazwischen, im Bereich des „Zugbandes“ des Sprengwerkes, riss der Stein und es entstanden zwei Klaffungen von jeweils 25 mm. Dieser Betrag entspricht wieder der Spannweitenvergrößerung. Im Bereich der „Streben“ des Sprengwerkes entstanden Rotationen und Relativverschiebungen in der Struktur, die qualitativ und quantitativ präzise nachvollziehbar waren. Ohne die besondere Struktur des Maßwerks in Form des Sprengwerkes wären wesentlich mehr Schäden innerhalb des Maßwerks zu erwarten gewesen. Wäre eine Umwandlung der vertikalen Absenkung in eine horizontale Bewegung nicht möglich gewesen, hätte sich das gesamte Gewicht des Mauerwerks oberhalb des Fensterbogens auf das Maßwerk abgelastet. Dies hätte zu erheblichen Überlastungen der steinernen Struktur des Fensters geführt und hätte grobe Zerstörungen im Maßwerk und den Stäben verursacht. Die Frage liegt nahe, ob diese Maßwerkstruktur bewusst aufgrund von überlieferten Erfahrungen gewählt worden war. Eine Aufweitung des Chores und die damit einhergehenden Bewegungen sind eine typische Erscheinung innerhalb des Baugesüses eines solchen Bautyps und könnten deshalb von Anfang an berücksichtigt worden sein.



Abb. 6: Schäden im Maßwerk: gerissener Knoten, aufgegangene Fuge mit originaler Verbleiung und Dollen

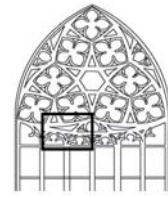


Abb. 7: Schäden im Maßwerk, oben: gegenseitige Verschiebungen und Abplatzungen, unten rechts: Bruch und Klaffung infolge Zugkraft

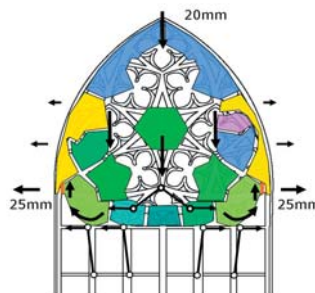


Abb. 8: Verformungsmechanismus des Maßwerks infolge Vergrößerung der Spannweite um 50mm und Absenkung des Bogenscheitels um 20mm

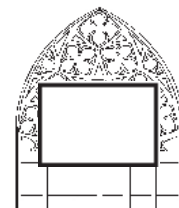
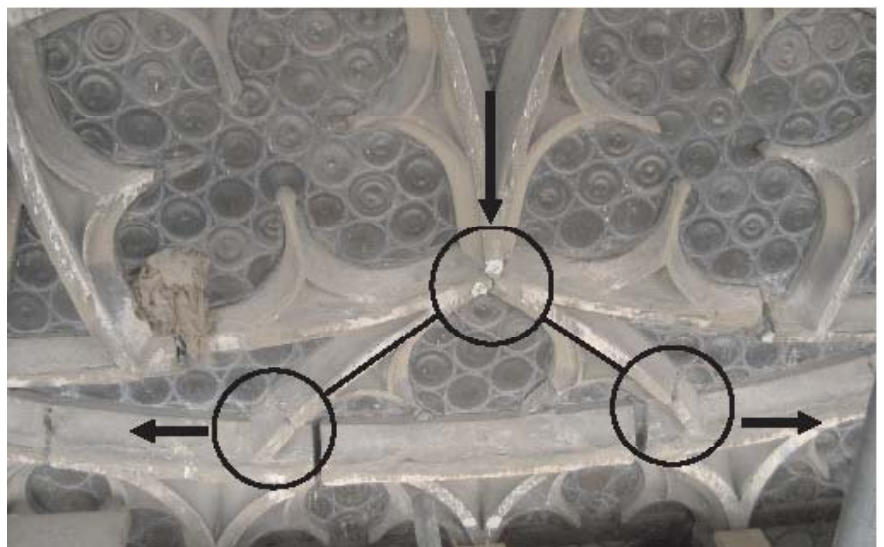


Abb.9 Die aufgezwungene Vertikalbewegung des Maßwerkes wurde in eine horizontale Verschiebung umgesetzt. Dadurch wurde der „hängende Bogen“ auseinander gezogen und zwei weit klaffende Brüche entstanden.

Statik

Lasten

Das Fenster hat planmäßig keine vertikalen Lasten aus den umgebenden Bauteilen abzuleiten, da davon auszugehen ist, dass zunächst die Chorwand erstellt worden war und dann das Fenster eingebaut wurde. Dies bedeutet aber auch, dass die steinerne Struktur keine stabilisierende Auflast erfährt. Sie hat lediglich ihr eigenes Gewicht zu tragen. Im Bereich des Maßwerks ist es sogar möglich, dass ein Teil der Eigenlasten zu den Seiten in die Fenstergewände abgetragen wird. Dies lässt sich schwer quantifizieren, so dass bei den statischen Berechnungen jeweils zwei Fälle zu unterscheiden waren: die volle Eigenlast und eine reduzierte Eigenlast. Die wesentlichen äußeren Belastungen sind der



Winddruck und der Windsog. Diese Lasten wurden mit den vollen Beträgen nach der heute geltenden Norm angesetzt, auch wenn eine gewisse Reduzierung mit der örtlichen Situation zu begründen gewesen wäre.

Statische Wirkung der Stabeisen

Es wird häufig behauptet, dass die horizontalen, schmiedeeisernen Stabeisen die Windlasten bei derartigen Fenstern aufnehmen würden. Dies ist im vorliegenden Fall eindeutig nicht der Fall, was eine einfache Berechnung zeigt: Nimmt man an, dass ein Windeisen als Einfeldträger über eine Spannweite von 3,60m zwischen den Fenstergewänden die anteiligen Windlasten alleine abträgt, so lässt sich zwar ein Spannungsnachweis führen, es ergibt sich aber eine Verformung von ca. 8 cm in Feldmitte. Eine solche Verformung ist für die viel steifere, steinerne Struktur viel zu groß. Die Verformung der Stäbe beträgt unter Windlast kaum mehr als einen Millimeter, wie die endgültige statische Berechnung zeigte. Es musste deshalb im Weiteren davon ausgegangen werden, dass die Stabeisen keinen wesentlichen Beitrag zur horizontalen Lastabtrag leisten. Vielmehr mussten die Hauptstäbe als horizontales Auflager für die Stabeisen angenommen werden. Die Stabeisen tragen zur Stabilisierung der Stäbe in Fensterebene bei. Ansonsten sind die Stabeisen während des Aufbauvorgangs von Bedeutung, solange sich die Struktur nicht zwischen den Auflagern verspannen kann. In diesem Zustand werden die Stäbe nur durch die Stabeisen horizontal gehalten.

Tragmodell

Aus Parameterstudien und überschlägigen Berechnungen wurde ein Tragmodell für den ungeschädigten Zustand entwickelt, das im Wesentlichen nur aus der steinernen Struktur besteht (Abb.10). Das Tragmodell wurde durch die endgültigen statischen Berechnungen bestätigt. Auch die statisch bedingten Schäden im geschädigten Zustand ließen sich mit Hilfe des Tragmodells erklären.

Die Struktur ist ringsum von starren Auflagern umgeben. Zwischen diesen Auflagern verspannt sich die Struktur, sobald eine Kraft senkrecht zur Fensterebene wirkt. Dabei wird vorausgesetzt, dass die Struktur einschließlich ihrer Verbindungen so steif ist, dass sich flache Bogenwirkungen einstellen können. Dazu müssen an den Auflagern und in den Fugen außer einer

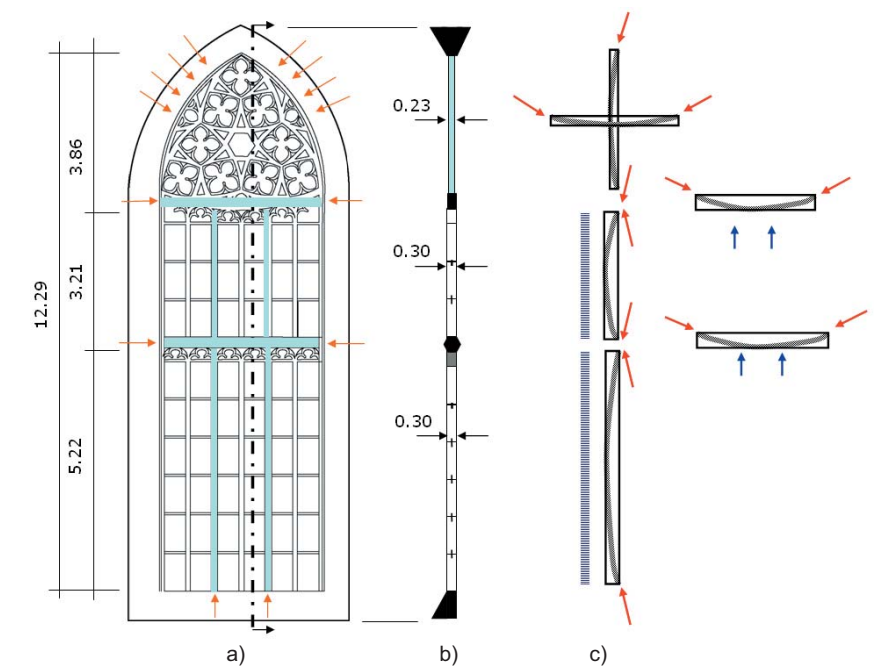


Abb. 10: Modell der Lastabtragung unter Windbelastung a) Ansicht mit Auflagerreaktionen b) Schnitt c) Tragwirkung über flache Bogenwirkungen

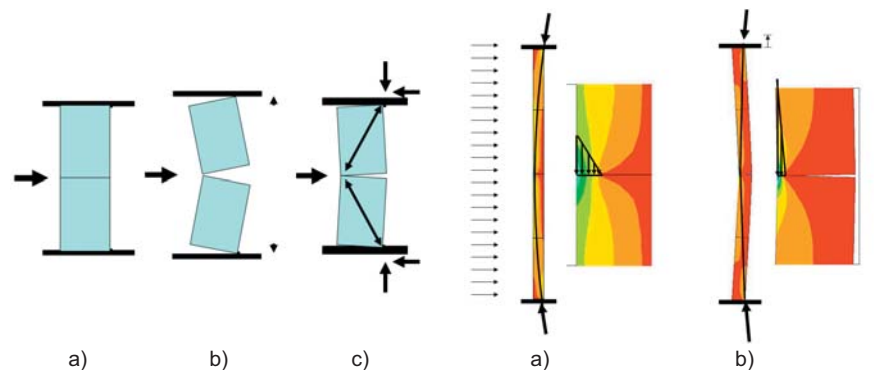


Abb.11: Tragprinzip: Blöcke zwischen steifen Auflagern a) Querbelastung b) nachgiebige Auflager c) steife Auflager

Abb. 12: Lastabtragung unter Windlast innerhalb eines Stabes und Kantenpressungen an der Fuge, Ergebnis einer FE-Berechnung a) mit starren Auflagern b) mit nachgiebigen Auflager und hohen Kantenpressungen

Normalkraft auch eine Querkraft über Reibung oder entsprechende konstruktive Vorkehrungen aufgenommen werden können. Die starren Auflager werden durch die Fenstergewände, die Teil der massiven Chorwand sind, gebildet. Abbildung 11 veranschaulicht das Grundprinzip: Die Blöcke verspreizen sich zwischen den Auflagern auch ohne Auflast oder Vorspannung, vorausgesetzt Gleiten in

den Fugen und an den Auflagern wird verhindert. Die steinerne Struktur besteht aus den Hauptstäben, dem horizontalen Riegel, den oberen Hauptstäben, und dem oberen Maßwerk. Die Nebenstäbe und die Stabeisen werden nicht berücksichtigt. Bei der Lastermittlung für die Hauptstäbe wird davon ausgegangen, dass die Stabeisen die anteiligen Windlasten der Nebenstäbe

auf die Hauptstäbe übertragen.

Mit diesem Tragmodell kann nachgewiesen werden, dass ein Gleichgewicht unter Windlast möglich ist und die Spannungen in zulässigen Dimensionen bleiben. Auflagerverschiebungen oder ein Nachgeben der Auflager führen aber sehr schnell zu großen Kantenpressungen (Abb.12).

Ein Ziel der Instandsetzung musste es deshalb sein, weitere Auflagerverschiebungen zu verhindern. Darüber hinaus wird eine weitere Sicherheitsbetrachtung angestellt: Ein unerkannter Riss oder eine Schwächung des Steins an einer stark beanspruchten Stelle könnte trotz sorgfältiger Untersuchung und Instandsetzung zu einem örtlichen Versagen führen. In einem solchen Fall sind die schmiedeeisernen Stabeisen von Bedeutung. Eine ausreichende Lagerung in den Fenstergewänden vorausgesetzt, würden sie einen Einsturz verhindern. Der Schaden würde auf einen lokalen Bereich begrenzt und Gefahr für Personen abgewendet werden.

Der geschädigte Zustand war charakterisiert durch große Auflagerverschiebungen. Die Struktur konnte sich somit nicht mehr ausreichend zwischen den Auflagern verspannen. Unter Windlast entstanden sehr große Kantenpressungen, was zu den Abplatzungen geführt hat. Die größten Abplatzungen wurden an den entsprechenden Stellen festgestellt, nämlich auf halber Höhe der Stäbe und an deren unteren Auflagern. In diesem Zustand haben die horizontalen Stabeisen noch größere Bewegungen verhindert, indem sie zum einen die Kräfte auf alle Stäbe verteilen und soweit noch möglich, Kräfte an die Fenstergewände abgaben. (Das Fenster konnte mit geringer Körperkraft horizontal um mehrere Zentimeter bewegt und in eine Schwingung mit sehr geringer Frequenz [ca. 1 Hz] versetzt werden.)

Andere in Erwägung gezogene Tragmodelle wurden nach entsprechenden Studien verworfen. Ein häufig diskutiertes Modell geht davon aus, die Stabeisen so im Mauerwerk zu verankern, dass sie zusätzlich zur Biege Wirkung über Zugkräfte Lasten abtragen können. Berechnungen zeigten, dass bei der gegebenen Situation die Durchbiegungen des Stabeisens trotzdem noch viel zu groß wären, als dass sie im Vergleich zu der steinernen Struktur nennenswert Lasten aufnehmen könnten. Zudem werden die Zugkräfte schnell sehr groß und lassen sich mit vertretbarem konstruktiven Aufwand nicht mehr verankern. Auch eine Vorspannung der Stabeisen ändert an diesem Ergebnis nichts Grundsätzliches.

Statische Berechnung

Die statische Berechnung und die Nachweise werden in einem gesonderten Aufsatz ausführlich dargestellt. An dieser Stelle wird ein Überblick über die getroffenen Annahmen gegeben und einige ausgewählte Ergebnisse vorgestellt. Die Berechnungen wurden mit der Methode der finiten Elemente durchgeführt. Die einzelnen Werkstücke der Hauptstäbe und des horizontalen Riegels wurden mit Hilfe von dreidimensionalen Volumenelementen idealisiert. Für den Stein wurde ein linear elastisches Material zugrunde gelegt, wobei der Einfluss des Elastizitätsmoduls durch eine obere und untere Grenzbetrachtung berücksichtigt wurde. In den Fugen wurden Kontaktelemente angeordnet, die Druck- und Schubkräfte, aber keine Zugkräfte übertragen können. Die Berechnungen erfolgten am ungeschädigten System, jedoch unter Berücksichtigung relevanter Verformungen. Es wurde die Lastfallkombination Eigenlast, Auflast und Winddruck mit den entsprechenden Teilsicherheitsfaktoren untersucht, wobei für die Eigenlast eine Grenzwertbetrachtung mit maximalem und minimalem Wert angestellt wurde. Die Berechnungen wurden unter Berücksichtigung großer Verschiebungen und großer Rotationen durchgeführt. Die Berechnungen sind damit nichtlinear und erfordern eine iterative Lösung. Das Maßwerk wurde nur stark vereinfacht idealisiert. Die Ergebnisse unterschiedlicher Idealisierungen des Maßwerks zeigten, dass die Beanspruchungen innerhalb des Maßwerks nicht groß sind. Der Grund hierfür ist, dass dort relativ viel Material vorhanden ist. Maßgebend sind die

Beanspruchungen in den Stäben und im horizontalen Riegel.

Die größten errechneten Spannungen sind erwartungsgemäß Kantenpressungen an den Fugen. Sie treten im unteren Hauptstab am Auflager bei Annahme der minimalen Auflast auf. Eine Gefahr des Ausknickens aus der Fensterebene gibt es bei den Stäben trotz ihrer Schlankheit nicht. Der horizontale Riegel wird bei dem gewählten Tragmodell am meisten beansprucht. Er nimmt die Querkräfte aus den Stäben auf und leitet sie über eine horizontale Bogenwirkung zu den Fenstergewänden. Es wurde nur der obere massive Teil des Riegels, nicht das Maßwerk, als statisch wirksam berücksichtigt. Die unter Windlast entstehenden horizontalen Auflagerkräfte sind recht groß. Die Sicherstellung möglichst starrer Auflager ist hier besonders wichtig.

Mit Hilfe zusätzlicher Parameterstudien wurde untersucht, wie sich ein geringfügiges Nachgeben der Auflager, wie es realistischer Weise trotz aller Vorkehrungen vorkommen kann, auf die Spannungen auswirkt. Dabei ergab sich, dass Verschiebungen von wenigen Millimetern noch erträglich sind, die Sicherheiten dann allerdings schnell abnehmen. Die Kantenpressungen können an der wirklichen Struktur wirksam begrenzt werden, indem die Fugen vollständig verbleit werden und das Blei durch seine Fließeigenschaften eine Begrenzung der Spannungen sicherstellt. Bei der quantitativen Erfassung der Wirkung verbleiteter Fugen auf die Kantenpressungen und die Spaltzugbeanspruchung im Stein gibt es allerdings noch erheblichen Forschungsbedarf.

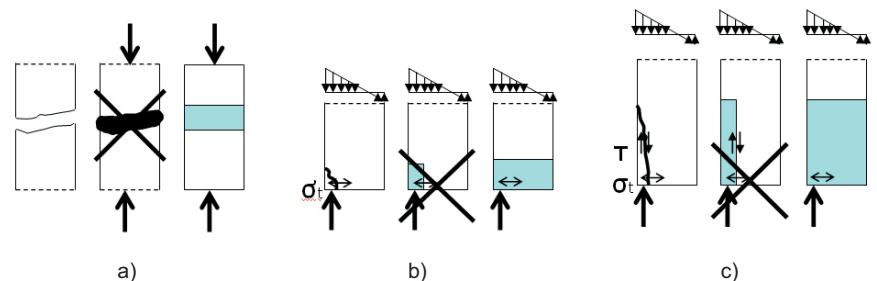


Abb. 13: Instandsetzung von Brüchen und Abplatzungen mit Pässstücken a) Brüche mit großen Klüften b) Kantenabplatzungen c) Abspaltungen

INSTANDSETZUNG

Konzept

Das Instandsetzungskonzept wurde abgeleitet aus der Analyse der Schadensursachen und der statischen Wirkungsweise. Einer weiteren Spannweitenvergrößerung des Fensterbogens, Hauptursache der Schäden, musste begegnet werden. Dazu wurden horizontale Zuganker in die Chorwand eingebaut. Die steinerne Struktur des Fensters, die Verbindungen und die Auflager an den Fenstergewänden mussten wieder kraftschlüssig hergestellt werden. Druckkräfte, insbesondere auch außermittige Druckkräfte, sowie Querkräfte müssen wieder übertragen werden können. Dabei wurde besonderer Wert gelegt auf die Herstellung der ursprünglichen Steifigkeit, insbesondere der Verbindungen (Abb.13). Die steinerne Struktur wurde nicht ausgebaut sondern in situ instand gesetzt. Dazu waren zahlreiche Baubehelfe und temporäre Stützmaßnahmen erforderlich. Die Verglasung musste bis auf wenige Felder ausgebaut werden, damit die Instandsetzungsarbeiten am Stein erfolgen konnten. Die Verglasung wurde restauriert und in ursprünglicher Weise wieder eingebaut.

Chorwand

In der Chorwand wurden zwei horizontale Zuganker aus Edelstahl eingebaut. Der untere Anker wurde innerhalb des horizontalen Riegels und durch das Mauerwerk der Chorwand geführt. Die Endverankerung erfolgte in einer Mauerwerksnische hinter den Strebepfeilern. Der Querzug im Bereich der Verankerung wurde durch eine Vernadelung mit jeweils vier Nadeln senkrecht zur Wand aufgenommen. Der Mauerwerksbereich, in dem die Anker liegen, wurde mit einer Injektion mit Trasskalk verfestigt. Der Anker wurde gegen das massive Mauerwerk und den horizontalen Riegel vorgespannt. Der zweite Anker wurde auf der Höhe des obersten Stabeisens eingebaut. Zunächst war vorgesehen, auf der Innenseite des Fensters ein Zugglied sichtbar zu führen. Obwohl es mit einem Durchmesser von 24 mm recht dünn hätte sein können, hätte es das Erscheinungsbild des Maßwerks insbesondere vom Innenraum her gestört. Die Struktur des Maßwerks zeichnet sich gegen das Licht scharf ab, so dass eine zusätzliche horizontale Linie das Bild empfindlich gestört hätte. Man entschloss

sich, das oberste vorhandene Stabeisen als Teil eines Zugankers zu verwenden. Dazu wurde es rechts und links über ein gefrästes Anschlussstück aus Edelstahl mit Stahlstäben verbunden, die wie unten durch das Mauerwerk der Chorwand geführt und in Nischen verankert wurden. Der so gebildete Anker wurde nicht vorgespannt sondern nur straff angespannt. Er wird erst dann beansprucht werden, wenn aus einem zurzeit nicht vorhersehbaren Grund wieder größere horizontale Verschiebungen entstehen sollten. Die Risse oberhalb des Fensters wurden verschlossen und mit Trasskalk verfüllt.

Fensterbank

Der stark verwitterte und teilweise gerissene äußere Teil der Fensterbank wurde durch neues Material aus Sandstein ersetzt. Aus statischer Sicht war diese Maßnahme nicht zwingend erforderlich, wurde aber aus restauratorischen Gründen getroffen. Damit wird das anfallende Wasser wieder planmäßig abgeleitet und ein Eindringen in das darunter liegende Mauerwerk verhindert.

Stabeisen

Entsprechend dem erläuterten Sicherheitskonzept waren die Auflager für die Stabeisen wieder herzustellen. Eine Instandsetzung des ausgebrochenen Steins z. B. mit Hilfe einer Vierung würde nicht ausreichen. Kleine Bewegungen der Stabeisen oder Durchbiegungen würden Kantenpressungen erzeugen und den Stein wieder ausbrechen lassen. Als Auflager für die Stabeisen wurden deshalb Edelstahlstäbe in die Fenstergewände eingebaut, die als kleine, im Stein eingespannte Kragarme wirken. Sie sind in 22 cm tiefen Bohrungen mit einem Durchmesser von 60 mm im Stein eingelassen und durch eine Verbleiung gelagert. Die Verbindung zu den Stabeisen erfolgt über eine Schraube. Um die originale Verbleiung der Stabeisen in den Fenstergewänden zu erhalten, sind die neuen Stahlstäbe und die Bohrung um einige Zentimeter nach innen versetzt angeordnet. Der dadurch entstehende Abstand zu den bestehenden Stabeisen wird durch ein Distanzstück überbrückt. Auch wird dadurch ein Konflikt mit der Verglasung, die direkt hinter dem Stabeisen verläuft, vermieden. Die Konstruktion ist von außen nicht zu sehen. Von innen ist sie zu erkennen, fällt aber nicht auf, da sie sich nicht gegen das Licht abzeichnet.

Riegel

Der untere Teil des Riegels mit dem Maßwerk konnte erhalten bleiben. Der stark verwitterte obere Teil des horizontalen Riegels musste abgearbeitet und durch verwitterungsbeständigeren Schönbrunner Sandstein ersetzt werden (Abb.14, 15). Durch diesen neuen Teil wurde der Zuganker geführt. Oberer und unterer Teil sind durch eine in den Stein eingearbeitete, durchgängige Nut schubfest miteinander verbunden, die Fuge wurde vermörtelt. Die senkrechten Fugen wurden verbleit. Der Riegel ist ein Haupttragelement. Die

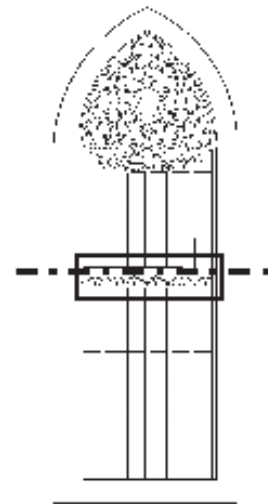


Abb.14: Horizontaler Riegel. Der obere Teil des Riegels musste durch verwitterungsbeständigeren Sandstein ersetzt werden



Abb.15: Horizontaler Riegel. Im neuen oberen Teil wird der Zuganker geführt

Auflagersituation in den Fenstergewänden ist von besonderer Bedeutung. Der obere neue Teil des Riegels wurde deshalb mit seinem Querschnitt bis in eine Nische geführt, die in das Mauerwerk eingearbeitet wurde. Die Fuge zum Mauerwerk wurde mit Trasskalk verpresst. Damit wurde ein relativ starres Auflager geschaffen, in das sich der Riegel horizontal verspannen kann. Der historische Befund des nachträglich angebrachten Riegels ging an dieser Stelle damit allerdings verloren. Man stand an dieser Stelle vor der Entscheidung, entweder ein nicht korrekt konstruiertes und weitgehend zerstörtes Originalteil zu ersetzen und damit zu verlieren, oder ein verstärkendes, dann sichtbares Konstruktionselement einzuführen. Letzteres wäre durch die dann erheblich gestörte formale Qualität des Fensters nicht akzeptabel gewesen.



Abb. 16: Durch Kantenabplatzung beschädigter Stab mit Verbleiung



Abb. 17: Instandsetzung mit neuem Passstück



Abb. 18: Mangelhafte originale Verbleiung



Abb. 19: Ingesägt und nachverbleite Fuge

Stäbe

Steine, deren Kanten infolge Kantenpressung stark abgeplatzt waren, mussten durch ein Formstück, das den gesamten Querschnitt ersetzt, repariert werden (Abb.16, 17). Die Kontaktfläche zwischen Formstück und Originalstein wurde mit Epoxydharz geklebt. Die Fuge zum darüber beziehungsweise darunter befindlichen Stein und zum dazwischen liegenden Stabeisen wurde wie ursprünglich wieder verbleit. Eine Reparatur mit Hilfe einer Vierung nur im Bereich der Abplatzung hätte die ursprüngliche Tragfähigkeit an dieser Stelle nicht wieder hergestellt. Gerade in dem Bereich, in dem Querspannungen im Stein die Abplatzungen verursachten, wäre eine Fuge geblieben. Zudem ist der Stein durch die Ausnehmung für die Stabeisen in diesem Bereich bereits geschwächt. Anfänglich musste davon ausgegangen werden, dass ein großer Teil der Steine innerhalb der Hauptstäbe auf diese Weise instand gesetzt werden musste, da sehr viele Steine durch Abplatzungen beschädigt waren. Aufgrund der Ergebnisse der

statischen Berechnungen konnten jedoch geringfügige Abplatzungen (bis zu einer Tiefe von ca. 15 mm) zugelassen werden. Damit konnte die Maßnahme beschränkt werden auf die Steine, die direkt auf der Fensterbank aufstehen, die auf dem horizontalen Riegel aufstehen und vier Steine der Hauptstäbe im Bereich oberhalb des Riegels. Zum Einbau der Formstücke mussten die einzelnen Steine allerdings ausgebaut werden. Die darüber stehenden Steine mussten dazu durch Baubehelfe gehalten werden.

Beim Ausbau der betreffenden Steine wurde festgestellt, dass die ursprüngliche Bleifuge mangelhaft ist. Das Blei hatte sich beim Gießen zwar im Bereich des Stabeisens aber nur über einen kleinen Teil der Fugenfläche verteilt (Abb.18). Insbesondere in die äußeren Bereiche der Fuge gelangte kein oder wenig Blei. Die Holzkeile zur Justierung der Steine waren noch vorhanden. Die Fuge war nachträglich von außen mit Mörtel verschmiert worden. Die neu herzustellenden Bleifugen an den ausgebauten Steinen wurden deshalb im Hinblick auf eine gleichmäßige Verfüllung mit besonderer Sorgfalt ausgeführt.

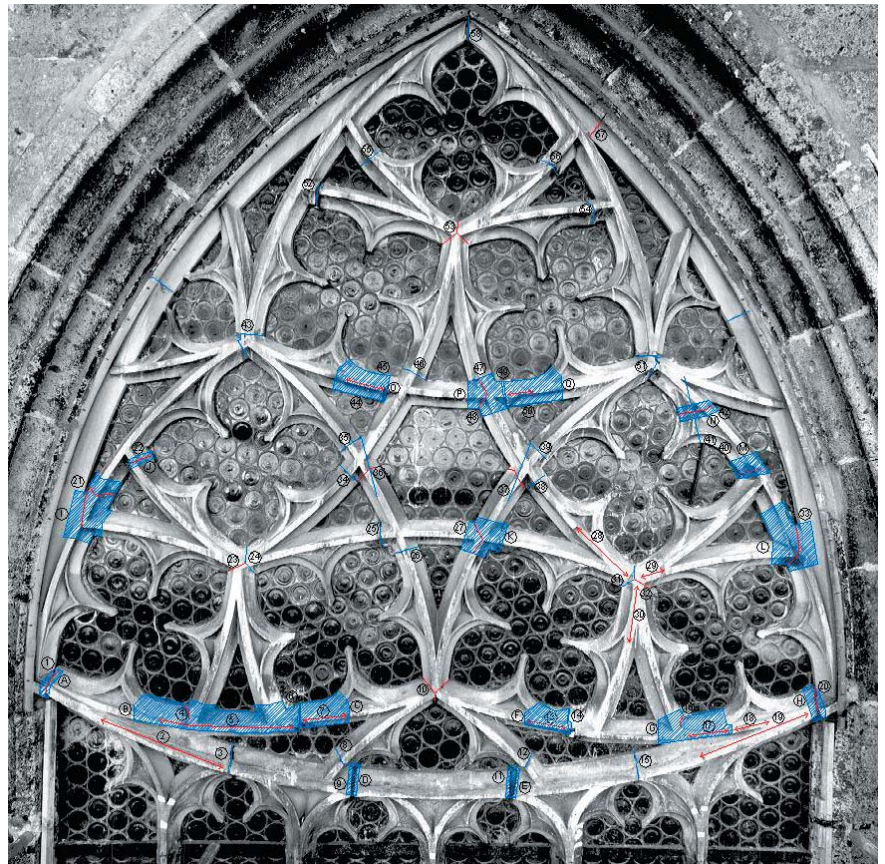


Abb. 20: Übersichtsplan der Maßnahmen im Maßwerk. Die blau schraffierten Bereiche sind zerstört und müssen durch Passstücke ersetzt werden.

Man musste davon ausgehen, dass an den nicht ausgebauten Steinen die Bleifugen ebenfalls mangelhaft sind. Die Beobachtung, dass einige Steine ohne jedes Fugenmaterial an den Außenkanten direkt aufeinander standen, deutete darauf hin. Man entschloss sich deshalb, an diesen Stellen, die Fugen mit einer Handsäge von außen vorsichtig einzusägen bis das Blei erreicht wurde. Anschließend wurde die freie Fuge von außen mit Blei gefüllt (Abb. 19). Die originale Bleifuge wurde somit im äußeren Bereich ergänzt. Dazu musste ein Nest aus Ton mit mehreren Eingussöffnungen rings um den Querschnitt modelliert werden.

Maßwerk

Auch innerhalb des Maßwerks musste eine ausreichende Steifigkeit der Struktur wieder hergestellt werden, um eine Verspannung zwischen den Fenstergewänden zu ermöglichen. Weit klaffende Brüche mussten deshalb mit Passstücken, die mit Epoxydharz verklebt wurden, überbrückt werden. Ein Ausstopfen mit Mörtel oder auch das Ausgießen mit Blei hätte nicht die erforderliche Steifigkeit gebracht. Beschädigte Verbindungen wurden wieder als Verbindung mit Verbleiung und Eisendollen hergestellt. Grundsätzlich wurden nur Flächen senkrecht zur Achse des Formstückes mit Epoxydharz geklebt. In der Klebefläche müssen damit nur Druckkräfte und keine,



Abb. 23



Abb. 25



Abb. 24



Abb. 26

Instandsetzung des Maßwerks:
 Abb. 23 Ersatz eines Bogenstücks ,
 Abb. 24 Reparatur eines Bruchs mit bleibender Verschiebung

Instandsetzung des Maßwerks
 Abb. 25 zwei Passstücke mit verbleiter Fuge,
 Abb. 26 Passstück mit sichtbar bleibender Verschiebung



Abb. 21 Baubeihilfe



Abb. 22 Baubeihilfe



Abb.27: Instandgesetztes Maßwerk. Die eingesetzten neuen Passstücke werden noch angearbeitet.

beziehungsweise nur geringe, Schubkräfte übertragen werden. Die Klebewirkung des Epoxydharzes wird somit nicht für die Kraftübertragung benötigt. Zudem wird dadurch die Größe der Klebefläche minimiert und der Feuchtigkeitstransport durch den Stein am wenigsten gestört. Nur im Bereich des hängenden Bogens musste ein größeres Passstück eingesetzt werden. Am Anschluss zum Mauerwerk war der Originalstein nicht nur gebrochen, sondern auch in Längsrichtung über eine längere Strecke aufgespalten. Insgesamt war der erforderliche Austausch an Originalsubstanz innerhalb des Maßwerks sehr gering. Alle Maßnahmen erfolgten in situ. Ausgebaut wurden nur Teile, die ersetzt werden mussten. Zahlreiche Baubehelfe mussten zur Stützung der verbleibenden Teile eingebaut und häufig umgesetzt werden (Abb.21, 22). Die Verschiebungen und Verdrehungen innerhalb des Maßwerks wurden nicht rückgängig gemacht. Die Verschiebungen und -verdrehungen sind somit auch im instand gesetzten Zustand in Form von Unstetigkeiten sichtbar. Dies betrifft die konstruktiven Fugen, aber auch die Passstücke, welche an den Brüchen eingesetzt wurden. Sie mussten mit den Unstetigkeiten, wie sie an den Brüchen entstanden waren, hergestellt werden (Abb.24, 26). Eine ausgleichende Formgebung hätte neu konstruiert werden müssen. Sehr große Unstetigkeiten wurden in einem letzten Arbeitsgang geringfügig angearbeitet und mit Mörtel ausgeglichen, so dass sich dort kein Wasser oder Schmutz ansammeln kann.

Nach Instandsetzung der Struktur wurden die Hauptstäbe zwischen horizontalem Riegel und Maßwerk mit Hilfe von hydraulischen Pressen mit jeweils 20kN nach oben und unten vorgespannt. Anschließend wurden die letzten, bis dahin noch offen gehaltenen Fugen in den Stäben verbleit und dann die Pressen ausgebaut. Drei Ziele wurden mit der Vorspannung verfolgt: Erstens sollte damit kontrolliert werden, ob die steinerne Struktur in sich kraftschlüssig ist und kein größerer Schlupf in den Verbindungen auftritt. Dies war nicht der Fall. Zweitens musste der Zustand, wie er nach dem Einbau des Fensters ursprünglich bestand, erst wieder hergestellt werden. Die steinerne Struktur wurde zum Ausbau einzelner Werkstücke an zahlreichen Stellen vertikal gestützt und damit vom Eigengewicht entlastet. Ein spannungsloser Einbau der neuen Teile hätte nach Eintreten der elastischen Dehnungen unter Eigengewicht zu klaffenden Fugen im oberen Bereich führen müssen. Drittens ist eine Vorspannung als Ersatz für eine Auflast die wirksamste Maßnahme, um Kantenpressungen unter



Abb.28: Stäbe aus Sandstein und Stabeisen nach der Instandsetzung



Abb.29 Michael Scherbaum, Restaurator und Steinmetz, mit dem Maßnahmeplan

Windlast klein zu halten, auch wenn sicherlich nicht gewährleistet werden kann, dass die Vorspannung in dieser Höhe dauerhaft erhalten bleibt.

Alle Instandsetzungsmaßnahmen wurden in Plänen vor der Ausführung dargestellt und beschrieben (Abb.20). Änderungen der Planung waren nur an einzelnen Stellen erforderlich, als sich neue Erkenntnisse beim Ausbau der beschädigten Teile ergaben. Die ausführlichen Voruntersuchungen und die detaillierte Abstimmung mit dem ausführenden Steinmetz haben sich gelohnt. Änderungen wurden in die Pläne übernommen, so dass eine lückenlose Dokumentation der Instandsetzungsmaßnahmen vorliegt.

BETEILIGTE

Bauherr und Auftraggeber war die Stadt Nördlingen, vertreten durch den Stadtbaumeister Herr Dipl.-Ing. Brethin und Herrn Dipl.-Ing. Palzer. Das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege war vertreten durch Herrn Dr. Bernt v. Hagen, mit dem das Instandsetzungskonzept diskutiert und im Einzelnen festgelegt wurde. Beratend wirkten mit Herr Prof. Dr.-Ing. Gert Mader und Herr Prof. Rolf Snethlage, beide ebenfalls vom Landesamt für Denkmalpflege.

Herr Michael Scherbaum, Leiter der St. Georgsbauhütte Nördlingen, hat sämtliche Instandsetzungsmaßnahmen ausgeführt (Abb.29). Er war nicht nur als Steinmetz tätig, er hat an dem Fenster auch die Rolle des Bauforschers und Restaurators wahrgenommen. Ihm ist nicht nur die hohe Qualität der handwerklichen Arbeiten zu verdanken. Dank seiner langjährigen Erfahrungen aus der Arbeit an der Georgskirche, den vielen von ihm durchgeführten Vorerkundungen und den detaillierten Planungsgesprächen im Vorfeld der Ausführungsarbeiten, wurden auch die Voraussetzungen für die ingenieurmäßigen Überlegungen geschaffen.

Die Planung erfolgte vom Ingenieurbüro Barthel & Maus, München, die Bearbeiter waren Helmut Maus, Matthias Jagfeld und Rainer Barthel.

ANMERKUNGEN

- 1 GEORG DEHIO, Handbuch der Deutschen Kunstdenkmäler, Berlin 1990.
- 2 Gutachten der Materialprüfanstalt der TU München, Sandstein von St. Georg Nördlingen, erstellt am 4.7.02.
- 3 Gutachten der Materialprüfanstalt der TU München, gotisches Schmiedeeisen, erstellt am 25.9.02.

ABBILDUNGSNACHWEIS

- 1 CH. KAISER
- 2, 4-7, 9, 14-19, 21-29 R. BARTHEL
- 3 M. SCHERBAUM
- 8, 10-13 BARTHEL&MAUS, BERATENDE INGENIEURE, MÜNCHEN
- 20 BARTHEL&MAUS, FOTO: U.FURTWÄNGLER