

Rainer Barthel, Helmut Maus, Matthias Jagdfeld, Christian Kayser

**Untersuchung und Instandsetzung des Langhaus-Regelquerschnittes am
Hohen Dom zu Augsburg**



Abb. 1: Innenansicht des Langhauses, Blick zum Ostchor



Abb. 2: Blick nach Osten in Langhaus und Seitenschiffe des Domes

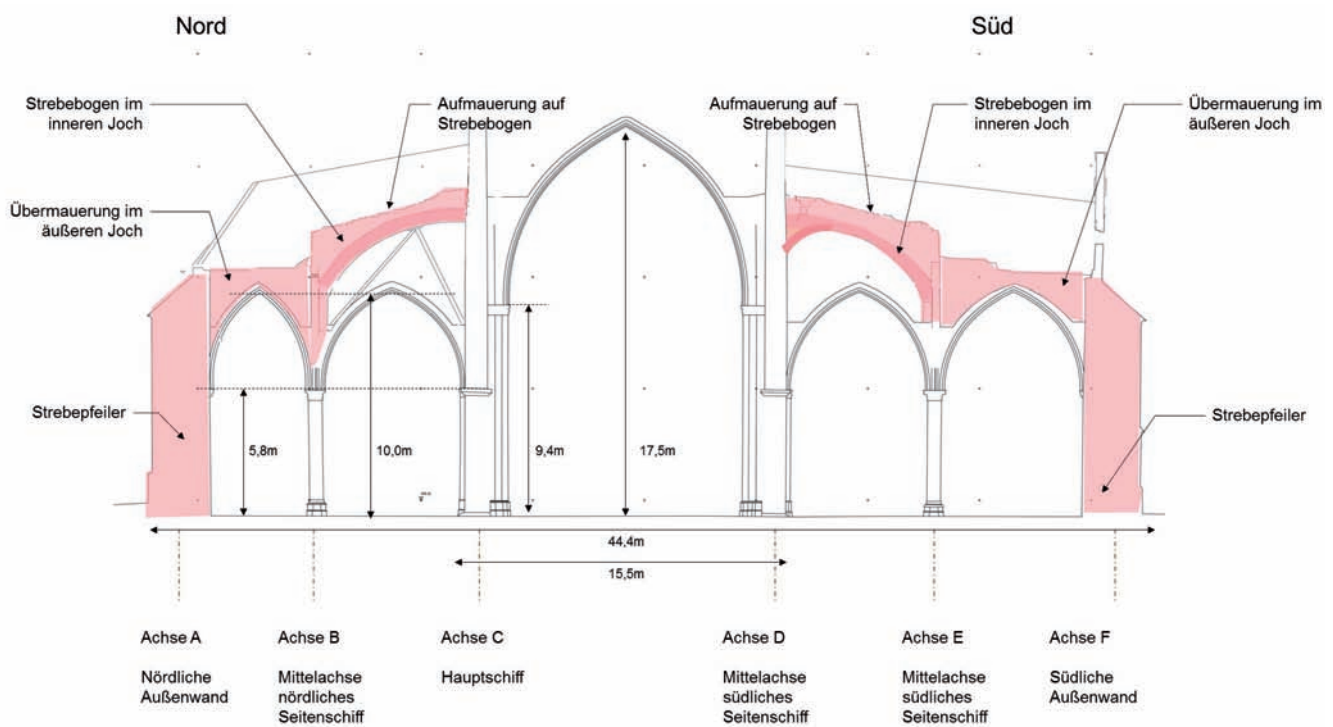


Abb. 3: Querschnitt durch das Langhaus mit den Seitenschiffen, Blick nach Osten, mit Benennung der Bauteile (Aufmaß: VB Blume, Garching)

Der Augsburger Dom „Mariae Himmelfahrt“ (Abb. 1 und 2) zählt mit einer Gesamtlänge von ca. 120m und einer Querhausbreite von 40m zu den größten mitteleuropäischen Kathedralen. Seine ältesten Bauteile datieren mindestens bis in das 11. Jahrhundert zurück¹; seine heutige komplexe und vielteilige Gestalt entstand durch die schrittweise Erweiterung des ottonischen Kernbaus. Trotz der Bombardierung Augsburgs im Zweiten Weltkrieg blieben die etwa fünfzehn unterschiedlichen, zwischen 1178 und 1720 entstandenen Dachkonstruktionen des Domes erhalten.

Zwischen 2003 und 2010 wurden sämtliche Dachwerke des Domes wie auch die Wölb- und Strebekonstruktion des Langhauses schrittweise instand gesetzt. Konzeption und Ausführung lagen Barthel & Maus, Beratende Ingenieure², München; Bauherr war das Staatliche Bauamt Augsburg als Vertreter des Bistums. Die Baumaßnahmen wurden durch eine Reihe von Fachuntersuchungen begleitet: beteiligt waren unter anderem Reinhold Winkler (Bauforschung), Porst & Zenger – Diplomrestauratoren GbR (Befunduntersuchung und -sicherung) und die Linsinger ZT GmbH (Photogrammetrische Vermessung). Die denkmalfachliche Betreuung erfolgte durch das Bayerische Landesamt für Denkmalpflege, vertreten durch Markus Weis, Thomas Aumüller und Bernhard Herrmann.

Einen wesentlichen Schwerpunkt der Instandsetzungsmaßnahmen bildete die Untersuchung und Instandsetzung des Regelquerschnittes am fünfschiffigen Langhaus des Domes. Ziel war, durch eine gründliche Bewertung der Instandsetzungsgeschichte, die Aufnahme aller Risse und Verformungen und die Durchführung eines langjährigen Mess- und Monitoring-Programmes die Grundlagen für einen möglichst präzisen, zurückhaltenden Eingriff zur Sicherung des wertvollen Bestandes zu schaffen. Die Voruntersuchungen begannen bereits 2004; die eigentliche Baumaßnahme wurde 2008 konzipiert und 2009 umgesetzt.

1. Bestand - Übersicht

Das fünfschiffige Langhaus des Domes erstreckt sich zwischen dem ottonischen³ Westquerhaus und dem mächtigen spätgotischen Hochchor (ca. 1356-1431). Es besitzt neun Wölbjoche bei einer Gesamtlänge ca. 51,5m in Ost-West-Richtung und eine Breite von ca. 40,5m (Außenseite Außenmauern ohne Strebepfeiler) auf (vgl. Abb. 3). Die lichte Breite des Mittelschiffes beträgt ca. 12,5m, die lichte Breite der beiden südlichen Seitenschiffe sowie des inneren nördlichen Seitenschiffes jeweils



Abb. 4: Blick auf die unter den Pultdächern der Seitenschiffdachwerke verborgenen Strebebögen (hier: Südseite)

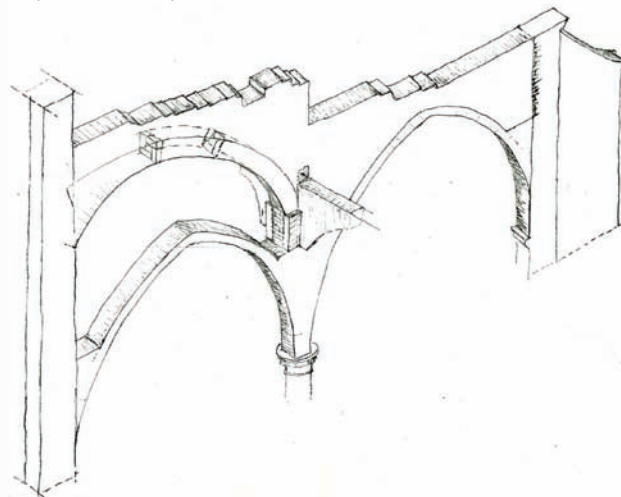


Abb. 5: Schematische Axonometrie des Strebewerks (hier: Südseite mit den charakteristischen Ausrundungen am Hochschiff)

ca. 6,5m. Das äußere nördliche Seitenschiff ist mit einer lichten Breite von nur 4,6m deutlich schmaler. In der östlichen Achse wird der Raum der äußeren Seitenschiffe von den beiden romanischen Domtürmen eingenommen.

Das Mittelschiff besitzt eine Scheitelhöhe von ca. 17m; die Seitenschiffe schließen mit einer Scheitelhöhe von je ca. 10m als zweischiffige Hallen an.

Zur Aufnahme des Horizontalschubs der Hauptschiffgewölbe wurden unter den Dachwerken der Seitenschiffe von außen nicht sichtbare Strebewerke (Abb. 4) errichtet. Diese setzen sich aus folgenden Bestandteilen zusammen (Abb. 5):

- den Strebebögen zwischen Obergaden des Mittelschiffes und der Säulenreihe zwischen den Seitenschiffen

- der Übermauerung der Scheidbögen über den äußeren Seitenschiffen
- den Strebepfeilern an den Außenmauern der Seitenschiffe.

Die Mauern des Mittelschiffes und die Arkadenpfeiler bestehen aus Kalktuffquadern, die Dienste und Säulen der Seitenschiffe sind aus grauem Lechbrucker Sandstein gefertigt. Die Gewölbe aller Schiffe, die Außenwände der Seitenschiffe, die Pfeilervorlagen der Hauptschiffpfeiler und die Strebebögen sind aus Ziegeln gemauert. Die Fundamente binden gemäß den Ergebnissen von Erkundungsbohrungen ca. 4m ein. Auf der Nordseiten stehen sie teilweise auf römischen Mauern auf. Auf der Südseite wurde dicht gelagert Kies angetroffen.

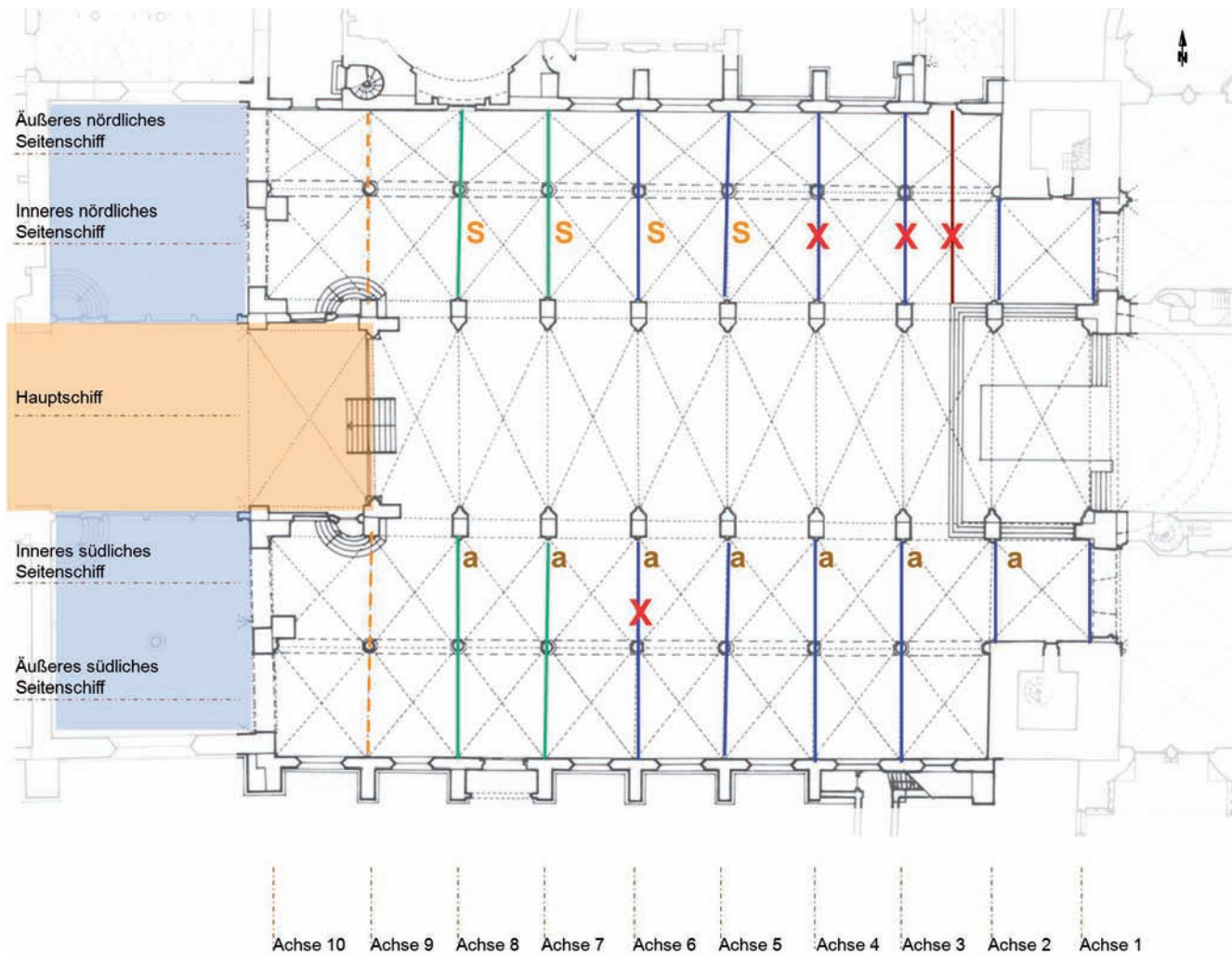


Abb. 6: Grundriss Langhaus, Übersicht über den Zustand der Strebebögen zum Zeitpunkt der Untersuchungen (2004-08): orange gestrichelte Linie: Strebebögen nie gebaut, grüne Linie: Bögen mit dünnerem Querschnitt (1 Stein), blau Linie: Bögen mit stärkerem Querschnitt (1,5 Steine), „a“: Ausrundung am Ansatz an das Hauptschiff, „S“: A-Bock, Stützkonstruktion, „X“: Bogen eingestürzt / abgebaut

2. Baugeschichte - Übersicht⁴

Die gotische Erneuerung des ottonischen Baus begann als Teilumbau mit dem Neubau des Westchores und der anschließenden Einwölbung von Westchor, Vierung und westlichem Langhausjoch unter dem Domkustos Konrad von Randegg. Die Maßnahme war 1334 (Weiheinschrift auf den alten Triumphbögen, heute oberhalb der Gewölbezone) abgeschlossen. Die Wölbung schließt nach Osten hin zu den ehemals ungewölbten Abschnitten mit zwei strebepfeilerartigen Pfeilervorlagen zur Aufnahme des Gewölbeschubes im Innenraum des Langhauses ab.

Direkt im Anschluss an den Umbau des Westchores, vermutlich bereits 1335, entschlossen sich der Domkustos Konrad von Randegg und das Domkapitel zur Einwölbung des Querhauses. Die weitgespannten Kreuzgewölbe wurden mit außen an den

ottonischen Mauern angesetzten Strebepfeilern abgestützt; diese sind bis heute im Innenraum der Seitenschiffe erhalten geblieben.

Nach dem schrittweisen Ausbau von Chor und Querhaus erfolgte im anschließenden Jahrzehnt bis etwa 1345 der groß angelegte Ausbau auch des ottonischen Langschiffes (vgl. Abb. 6): Hierbei wurde das alte, flach gedeckte Hauptschiff eingewölbt, und an Stelle der einfachen Seitenschiffe wurden die beiden zweischiffigen Hallen errichtet. Die neuen Gewölbe wurden unterhalb der Zerrbalkenlage des älteren romanischen Dachwerks eingebaut, die somit bis heute erhalten blieb⁵.

Bei der Erweiterung des Domes zur fünfschiffigen Anlage ergaben sich allerdings gewisse Zwangspunkte durch den angrenzenden älteren Baubestand: Auf der Südseite, zum ehemaligen Domfriedhof hin,

bestand „Baufreiheit“ zur Errichtung zweier gleich breiter Seitenschiffe. Auf der Nordseite hingegen begrenzten die anschließenden Bauten der Domklausur und des Kreuzganges den einer Erweiterung zur Verfügung stehenden Raum. Dem Bau des äußeren Seitenschiffes wurde der südliche Kreuzgangflügel geopfert; die ehemals an den Kreuzgang anschließenden Kapellenbauten sollten jedoch erhalten bleiben – das neue äußere nördliche Seitenschiff besitzt damit nur die Breite des ehemaligen Kreuzgangflügels und ist deutlich schmaler als das „innere“ Seitenschiff der Nordseite sowie die beiden Seitenschiffe der Südseite.

Die Errichtung eines Strebesystems zur Stützung der mächtigen Hauptschiffgewölbe bildet einen wichtigen Bestandteil der Baumaßnahme⁶. In den Sargwänden der Außenmauern sind von Anfang an War-

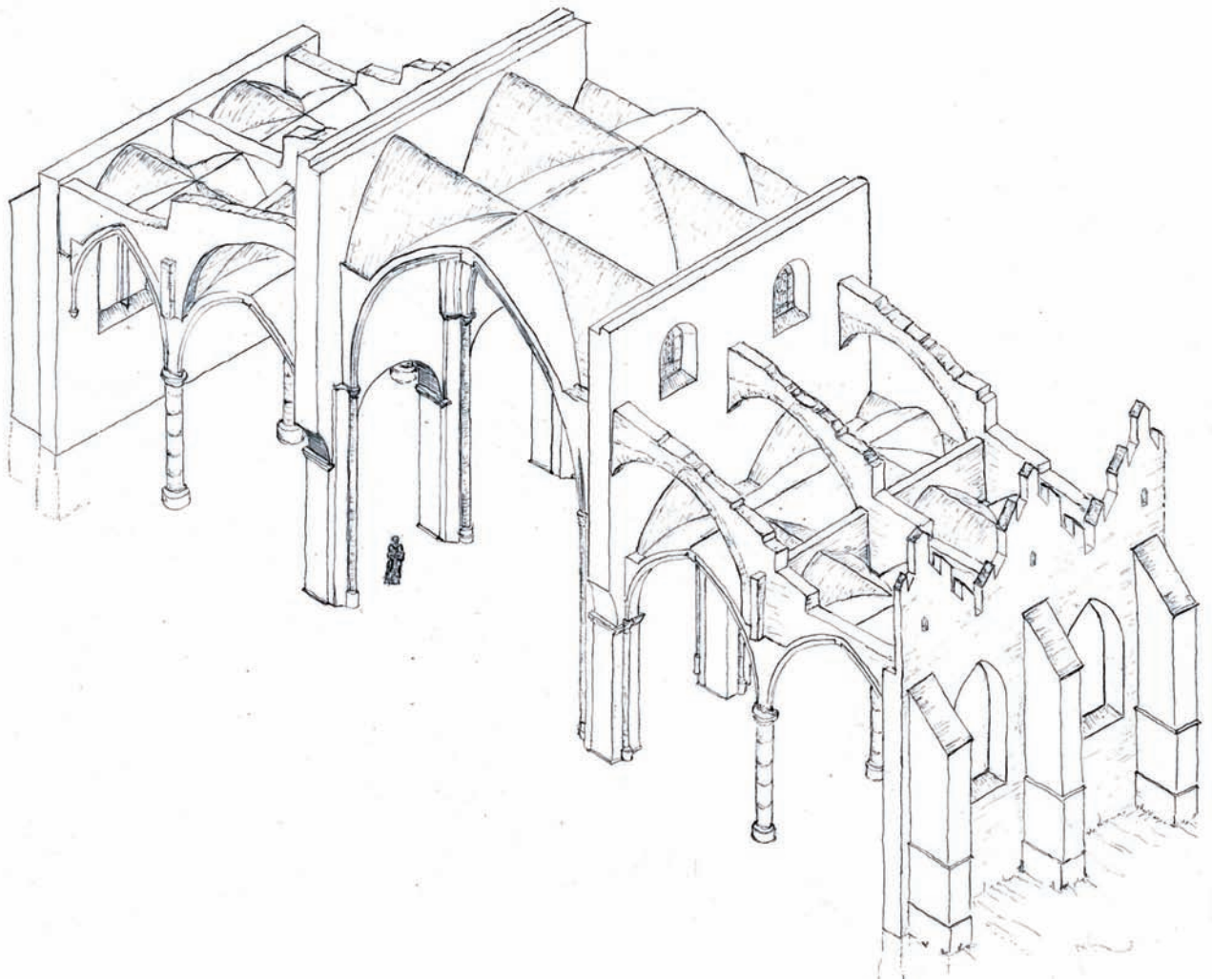


Abb. 7: Schematische Axonometrie des Langhauses (Blick von Südwesten) ohne Dachkonstruktionen

testeinverzahnungen zum Anschluss der Übermauerung des äußeren Seitenschiffes angelegt. Über den die beiden Seitenschiffe trennenden Säulen sitzt jeweils oberhalb der Gewölbe eine pfeilerartige Aufmauerung, die als Zwischenaufleger der Strebebogenkonstruktion dient. Dieses „Grundgerüst“, also die Auflager für das anschließend zu errichtende Strebewerk, bestehen in den acht östlichen Achsen des Langhauses, nicht jedoch in der westlichen Scheidbogenachse. Der Verzicht auf ein Strebewerk in der westlichen Achse (Achse 09) erklärt sich aus der bereits beschriebenen Abfolge der Bauabschnitte: der Westchor war bereits in dem vorhergehenden Bauabschnitt von 1334 eingewölbt worden und somit bereits seit einigen Jahren auch ohne Strebebögen stabil. Durch den Einbau der stützenden Pfeilern im Innenraum ist die Spannweite

der Wölbung in dem Westjoch deutlich gegenüber der im erst anschließend eingewölbten Langhaus verengt (ca. 10m gegenüber 12,5m!); der so entstandene massive Mauerquerschnitt aus dem alten ottonischen Obergaden und dem innen vorgesetzten Pfeiler wurde als ausreichend zur Aufnahme des Gewölbeschubs in diesem Joch angesehen.

Alle östlich anschließenden Joche des Langhauses besitzen dagegen ein „vollständiges“ Strebewerk (vgl. Abb. 7). Die Befunde lassen die Hypothese einer sukzessiven Errichtung der Strebebögen von Westen nach Osten zu, bei gleichzeitiger Arbeit auf der Nord- und Südseite des Domes. Die neue Langhauswölbung konnte damit im Anschluss an das ältere Westjoch errichtet werden. Diese Baufolge belegen auch die Ausführungsdetails (vgl. Abb. 6): Die beiden ersten Strebebögen

von Westen (Achsen 07-08) unterscheiden sich in ihrer Ausprägung von den im Osten anschließenden: Der Querschnitt des eigentlichen Bogens ist aus drei Ziegeln zusammengesetzt, jeweils zwei parallel liegenden Ziegeln und einem quer an die Stirnen angesetzten stehenden Format. Je Schicht wird diese Figuration gespiegelt. Auffällig ist, dass der so entstandene Bogenquerschnitt mit einer Breite von 1,5 Steinen - etwa 57cm - gegenüber den bestehenden, nur steinstarken Pfeilervorlagen am Zwischenaufleger deutlich massiver ausgebildet ist. Um die Differenz zwischen beiden Abschnitten auszugleichen, sind den Pfeilervorlagen zum inneren Seitenschiff hin an beiden Flanken je eine Lage Ziegel vorgemauert. Der Befund findet sich sowohl auf der Nord- wie auf der Südseite des Domes. Die Mauertechnik der sechs östlichen Strebebögen (Achsen 01 – 06) unter-



Abb. 8: Darstellung des Strebewerks und möglicher Instandsetzungsmaßnahmen von Dombaumeister J. Schmitz (um 1925, Archiv des Staatl. Bauamtes Augsburg)

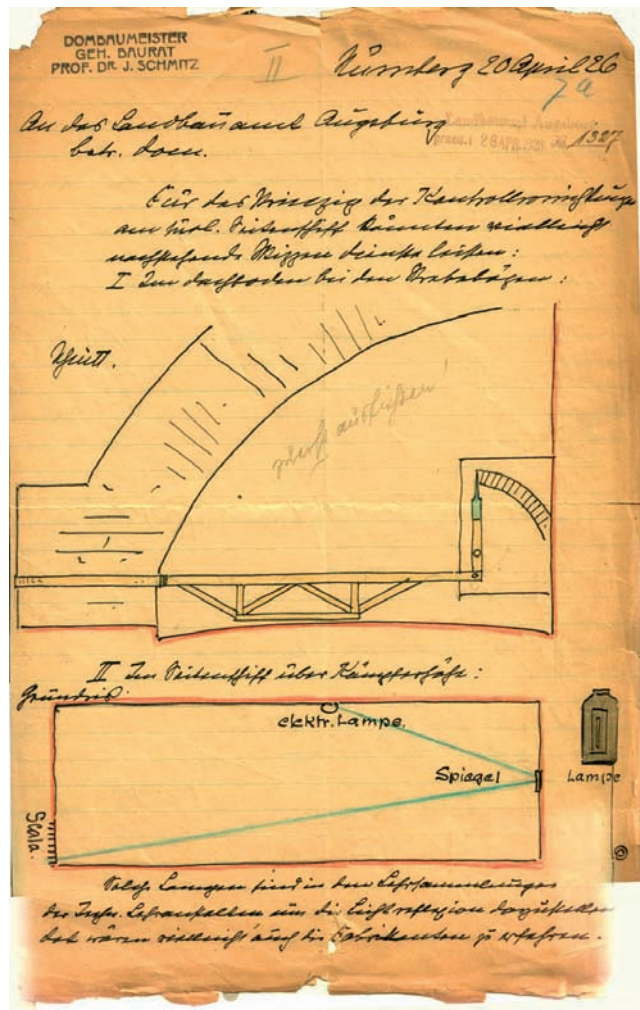


Abb. 9: Konstruktionsskizzen für unterschiedliche „Monitoring“-Maßnahmen von Dombaumeister Schmitz (20.4.1926, Archiv des Staatl. Bauamtes Augsburg)

scheidet sich von der oben beschriebenen. Die ersten beiden, nur eine Steinlage hohen Strebebögen wurden augenscheinlich als unzureichend eingestuft, alle folgenden Bogenquerschnitte besitzen eine Höhe und Breite von je ca. 57cm, also anderthalb Ziegelformaten. Im Querschnitt bestehen sie je aus vier drehsinnig angeordneten Vollziegeln und einem quadratischen, halbierten Ziegelstück in der Mitte. Diese Formation „rotiert“ in jeder Lage um 90°.

Für die Ansatzpunkte aller Strebebögen ist an der Hochschiffwand das romanische Mauerwerk ausgenommen. Teilweise laufen die Bögen in die - zuvor mit Ziegeln vermauerten - Fensteröffnungen des romanischen Baus. Da die Fensteröffnungen nicht mit den Arkadenachsen korrespondierten, „verschwanden“ sie bei der sich an der Arkadenfolge orientierenden Einwölbung hinter den mächtigen Gewölbekappen. Die heutigen, „romanisierenden“ Rundbogen-

fenster sind tatsächlich im Zuge der gotischen Einwölbung des Domes unter Kustos von Randegg in die Obergadenwand eingebrochen worden⁷. Bei den beiden östlichen Strebebögen (Achsen 01 und 02) wurde auf eine vorbereitende Pfeilervorlage am „Zwischenaufleger“ verzichtet, sie setzen direkt am Mauerwerk der Domtürme an.

Die Errichtung der Strebebögen erfolgte zugleich mit den gotischen Umbaumaßnahmen des romanischen Domes und war demnach wohl um 1343⁸ abgeschlossen. Die Ziegelwand zwischen Turm und Langhaus am östlichen Ende der Seitenschifftrakte stellt damit die ehemalige Außenwand der Dachwerke vor Bau des Ostchores dar. Bei dem anschließenden Bau der neuen Choranlage wurde die Ziegelwand verstärkt, die Baufuge zwischen den beiden Wandabschnitten ist in den ehemaligen Tür- / Fensteröffnungen noch nachweisbar.

3. Schadens- und Instandsetzungsgeschichte

Die häufigen Umbauten der Dachwerke auf der Nordseite führten dazu, dass hier sukzessiv Teile der neuen Dachkonstruktionen auf die Strebebögen abgesetzt wurden. Hier sind insbesondere die beiden 1414(d) errichteten Pultdächer an den Türmen zu nennen, die vollständig auf den beiden Strebebögen in Achse 01 und 02 aufsitzen. Spätere Verstärkungen wie etwa die stehende Stuhlkonstruktion im westlichen Pultdach der Nordseite von 1798(d) wurden ebenfalls auf die Strebebögen abgesetzt. Die Dachwerke auf der Südseite erfuhren dagegen um 1590(d) eine durchgreifende Erneuerung, die möglicherweise mit den Wiederherstellungsarbeiten im Dominernen durch Fürstbischof von Gemmingen⁹ zusammenhängt. Bei diesen Arbeiten wurden die Reste der gotischen Dachwerke beseitigt und durch einheitlich konstruierte

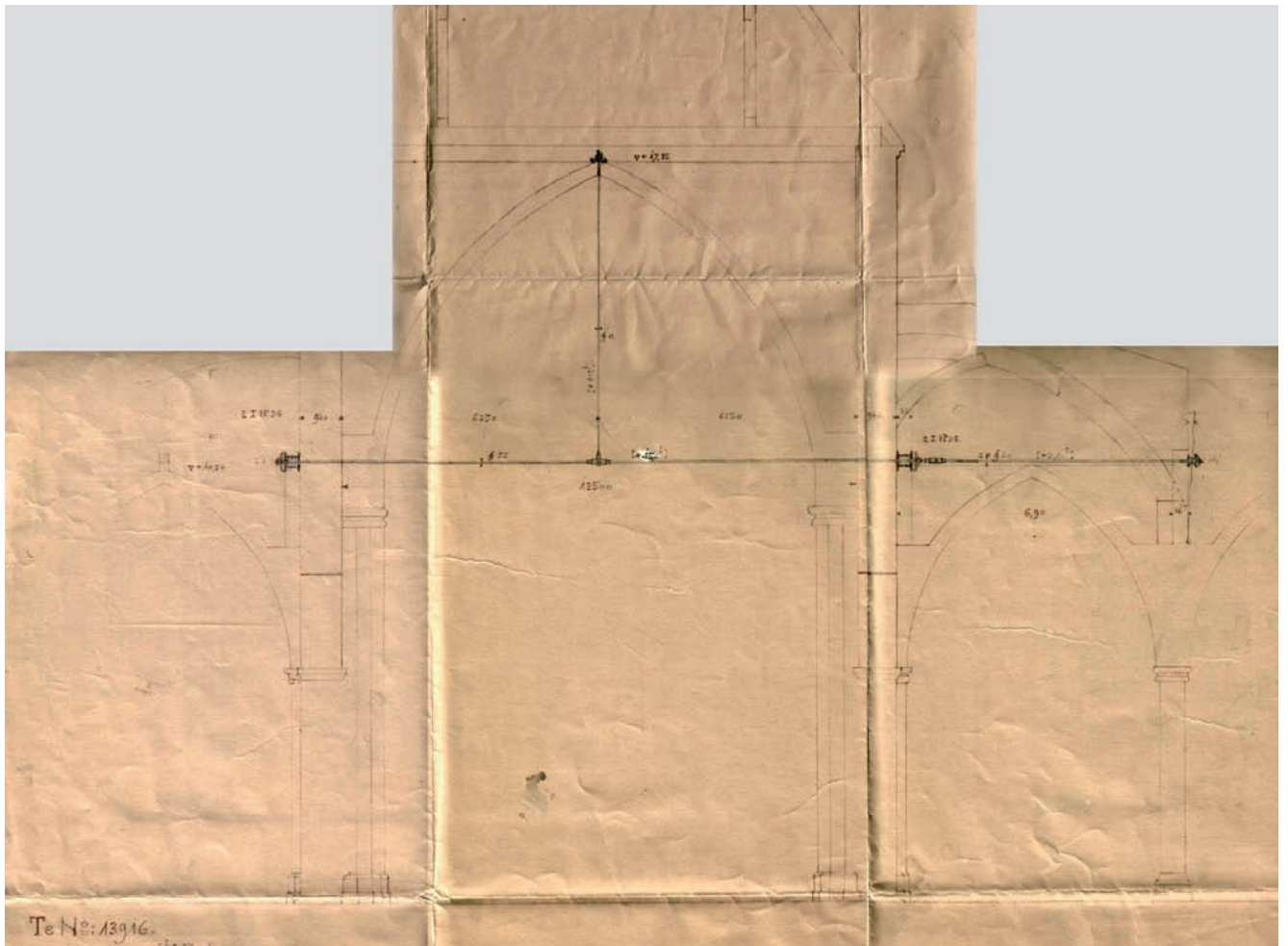


Abb. 10: Planunterlage zur „Verschlauderung“ des Langhausquerschnittes, MAN Augsburg, (21.3.1927, Archiv des Staatl. Bauamtes Augsburg)

Satteldächer ersetzt. Kennzeichnend für die Streb Bögen der Südseite ist die Einfügung von voutenartigen, gemauerten Ausrundungen unterhalb der Bögen am Ansatz an die Obergadenwand. Für den Ansatz dieser gemauerten Verstärkung wurde ein Stück des Bogenprofils ausgenommen. In wie weit diese Unterstützungen ebenfalls mit der durchgängigen Erneuerung der Dachwerke auf der Südseite im ausgehenden 16. Jahrhundert in Verbindung zu bringen sind, bedarf noch abschließender Klärung.¹⁰ Der einzige Bogen, dem diese Form der Unterstützung fehlt, ist der östliche Bogen zwischen Turm und Langhaus in Achse 01. Auf der Nordseite fehlen Stützmaßnahmen wie die Ausrundungen auf der Südseite. Hier wurden stattdessen alle Bögen von Achse 03 bis 08 mit hölzernen Böcken unterstützt. Diese Stützböcke bestehen jeweils aus einem massiveren Stempel auf der „Langhausseite“ sowie einem dünneren

Stempel, der am Fuß des Zwischenauflegers ansetzt. Der stärkere Spries auf der Innenseite sitzt an der Langhauswand in einer in das romanische Mauerwerk gebrochenen Mauertasche.

Der beschriebene Einbau der Ausrundungen auf der Südseite wie auch die Unterstützung der Bögen durch Holzkonstruktionen auf der Nordseite deuten darauf hin, dass bereits frühzeitig Schäden in Form von Rissen und Verformungen an den Streb Bögen auftraten bzw. der Bestand der Strebkonstruktionen als einsturzgefährdet angesehen wurde.

Um 1920, unter Leitung des damaligen Dombaumeisters Prof. Schmitz, erstmalig eine gründliche Untersuchung der Schäden mit anschließender Instandsetzungsplanung durchgeführt (Abb. 8-10). Hierbei sollte das – als unzureichend angesehen – Strebssystem¹¹ durch zusätzliche Maßnahmen ertüchtigt werden. Dombau-

meister Schmitz selbst sprach sich für eine gänzliche Abtragung der Streb Bögen aus.¹² Als mögliche Instandsetzungsmaßnahmen wurden sowohl eine Ertüchtigung der Gründung wie auch der Einbau eines komplexen Zugankersystems zwischen den Gewölben der einzelnen Schiffe diskutiert. Von einer Nachgründung wurde schließlich Abstand genommen, da nicht sicher schien, ob dies tatsächlich einen Effekt auf den Gesamtquerschnitt des Domes haben würde¹³. Der Ansatz einer Verschlauderung wurde in den folgenden Jahren intensiv weiter verfolgt; von der MAN wurden bereits Detailzeichnungen der Anschlüsse und Ankerköpfe erstellt. (Abb. 10) Hierbei war eine jochweise Verspannung der Mittelschiffwände im Inneren des Domes vorgesehen, mit einer zusätzlichen Abhängung vom Gewölbescheitel. Die Schlaudern durch das Mittelschiff sollten mit Rücksichtnahme auf die „einheitliche architektonische



Abb. 11: Hölzerne Stützkonstruktion im südlichen Seitenschiffdach (Achse 6S) als Substitut für den fehlenden Strebebogen

Wirkung des Dominierenen¹⁴ jeweils ostseitig der Pfeiler angeordnet werden, mit zusätzlichen Mauerauflagern auf der Außenseite der Hochschiffwände. Zusätzlich sollten die Seitenschiffe mit der Hochschiffwand verschlaudert werden.¹⁵ Die Kosten für die Fertigung der Zuganker hätten sich auf 6.800,- RM belaufen.

Von den vorgeschlagenen Sicherungsmaßnahmen wurde nur der Zuganker über dem „Triumphbogen“ zwischen dem „Altbau“ des Langhauses und dem anschließenden hohen Ostchor durchgeführt.

Die für das Langhaus geplanten Maßnahmen kamen nie zur Ausführung, da sie in Hinblick auf Kosten und Aufwand immer wieder zugunsten eines „Monitoring“ der Schäden¹⁶ aufgeschoben wurden. Für die Überwachung der Bewegungen in den verschiedenen Bauteilen wurde von Seiten des Dombaumeisters eine Reihe von innovativen Vorschlägen gemacht (Abb. 9). Hierbei wurde u.a. eine optische Messvorrichtung, bestehend aus oberhalb der Kämpferlinie befestigten, über einen Spiegel auf eine Skala strahlende Lampe vorgeschlagen, eine Messvorrichtung (hergestellt „wenn möglich, von bayerischen Fabrikanten“), die in Zusammenarbeit mit der TH München entwickelt werden sollte.¹⁷ Diese Messeinrichtung wäre „zu einem selbstregistrierenden Apparat“ ausbaubar vermittels eines mit einem „Uhrwerk drehbaren Filmstreifen“.

Als Alternativen für diese schließlich als „zu kompliziert“ gewertete Einrichtung wurde sowohl die einfache Anbringung eines Lotes mit Messskala an den Bögen sowie die

Einrichtung einer „mechanischen Kontrollvorrichtung mit Zeiger“¹⁸ zur Messung der Relativbewegungen zwischen Hauptschiffwand und „Zwischenaufleger“ vorgeschlagen. Die „mechanische Kontrollvorrichtung“ wurde schließlich tatsächlich ausgeführt, ist aber nicht erhalten. Zusätzlich wurden sämtliche Strebebögen und Übermauerungen mit „Putzbändern“ auf gesamter Länge versehen, die, in der Wirkung heutigen Gipsmarken vergleichbar, Rissbildungen anzeigen sollten.

Die beschlossenen Überprüfungen dieser Messeinrichtungen wurden anfangs tatsächlich wie geplant durchgeführt. Die weiteren geplanten Stabilisierungsmaßnahmen unterblieben jedoch. Es ist anzunehmen, dass spätestens mit Beginn des 2. Weltkrieges auch die Überprüfung der Relativbewegungen in den Seitenschiffdächern ein Ende fand.

Neue Gipsmarken wurden erst mehr als ein halbes Jahrhundert später - 1991- angebracht.

In Folge der Schäden und der unterbliebenen Instandsetzungsmaßnahmen kam es schließlich zum Verlust einzelner Strebebögen. In wie weit diese auf Grund starker Schäden zurückgebaut wurden oder einstürzten, ist heute nicht mehr eindeutig belegbar. Mit Blick auf den erforderlichen Aufwand scheint allerdings der gezielte Abbau der ja zumindest nordseitig bereits mit Stützen gesicherten Bögen als weniger wahrscheinlich. Es ist nicht auszuschließen, dass die Erschütterungen der Bombardierung Augsburgs im 2. Weltkrieg den Fort-

schritt der Schäden bis hin zum Einsturz beschleunigten.

Zumindest Ende der zwanziger Jahre scheint das Strebesystem noch vollständig vorhanden, wenngleich bereits schadhafte gewesen zu sein: Aus dem Untersuchungsprotokoll des Augsburgers Dombaumeisters vom 29. 12.1926 lässt sich schließen, dass zu diesem Zeitpunkt die Bögen noch bestanden, allerdings „vier Bögen [der Südseite] Haarrisse“ zeigen. Zudem wies gerade der „vierte Bogen“ – also Achse 06 – „in der Mitte einen durchgehenden kleinen Riss [auf] der sich nach unten öffnet, ein Zeichen dass sich der Bogen durchgesackt hat“.

Eben dieser Bogen (06 Süd) fehlte zu Beginn der rezenten Untersuchungen, er war durch eine aufwändige Holzkonstruktion ersetzt worden (Abb. 11). Bei zwei weiteren Bögen der Südseite war Bogenmauerwerk zusätzlich mit schmiedeeisernen Schlaudern am Dachwerk „aufgehängt“.

Die Protokolle der Zwanziger Jahre machen keine Aussagen zum Zustand der Strebebögen auf der Nordseite; dies lässt den Schluss zu, dass sie gleichfalls noch vollständig vorhanden waren. In den folgenden Jahrzehnten stürzten die Bögen in den Achsen 03 und 04 ein oder wurden abgetragen; sie wurden durch räumliche hölzerne Sprengwerke unter den Dachflächen ersetzt.

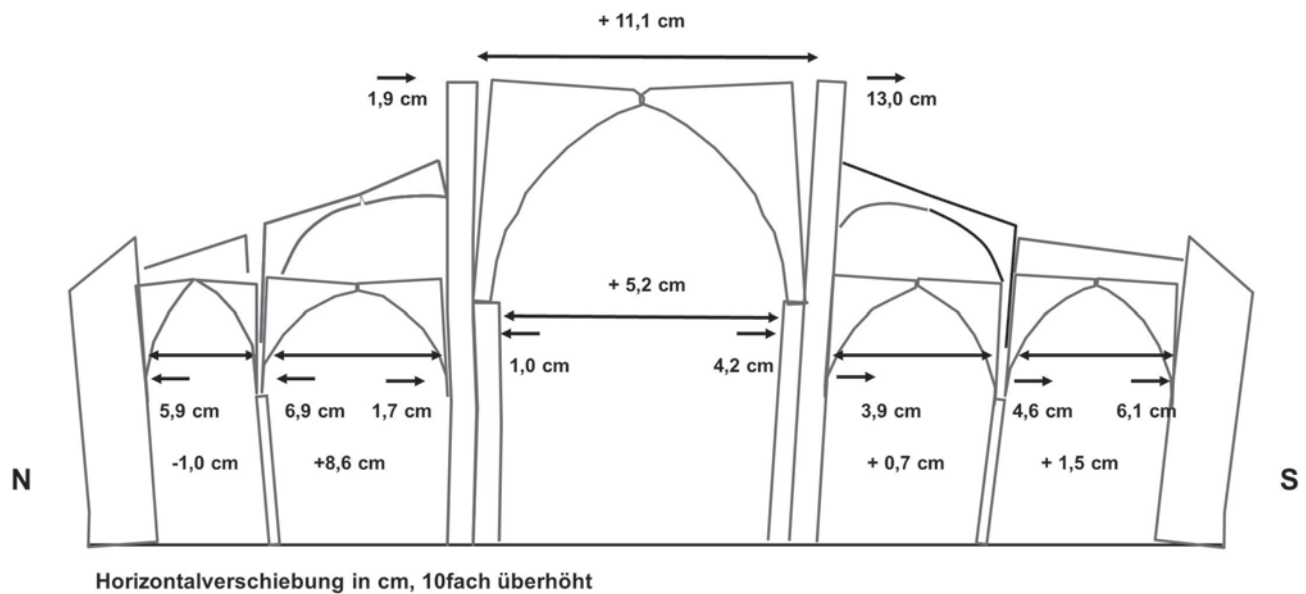


Abb. 12: Übersicht über die tatsächlich am Regelquerschnitt des Langhauses gemessenen Verformungen



Abb. 13: Strebebogen der Nordseite, typischer, nach oben V-förmig aufgehender Riss am Ansatz des Bogens an die Hochschiffmauer

4. Verformungen und Schäden zum Zeitpunkt der Untersuchungen

Von den insgesamt 16 bauzeitlichen Strebebögen – acht auf der Nordseite und acht auf der Südseite – bestanden 2004 noch sieben Stück auf der Südseite und sechs Stück auf der Nordseite. Auch die erhaltenen Bögen wiesen Risse und Verformungen auf. Das Rissbild war bei den Bögen beider Seiten ähnlich, die Schäden jedoch auf der Nordseite deutlich stärker ausgeprägt: Die Bögen auf der Nordseite zeigten im Anschluss an die Hochschiffwand einen deutlichen, sich nach oben öffnenden Riss. Unterseitig standen die Ziegel auf der Unterkante; nach oben hin erreichten die Risse eine Breite von bis zu fünf Millimeter (Abb. 13).

Etwas oberhalb der Bogenmitte wiesen die Bögen unterseitig einen ungefähr senkrecht zur Bogenneigung verlaufenden Riss auf. Das Mauerwerk der Bogenübermauerung war gleichfalls gerissen; die Lagerfugen verliefen nicht mehr waagrecht, sondern von beiden Seiten zur Bogenmitte hin abfallend (vgl. Abb. 22). Der Bogenverlauf entsprach in diesem Bereich nicht mehr dem ursprünglichen Kreissegment, sondern zeigte einen deutlichen Knick. Dieser war bei den beiden Bögen mit kleinerem Querschnitt in Achse 07 und 08 besonders ausgeprägt.

Ein weiterer vertikaler, sich nach oben öffnender Riss setzte am Übergang zwischen dem Bogen und der Übermauerung oberhalb des Zwischenaufagers.

Die Rissbildung in den Strebebögen der Südseite war prinzipiell vergleichbar, die

Rissbreiten jedoch kleiner.

Am Gewölbe des Hauptschiffes hatten sich die Fugen zwischen den Schildkappen der Langhausgewölbe und der Obergadenwand um ca. 2 cm geöffnet. Auf der zum letzten Mal Ende der 1980er Jahre restaurierten Gewölbeunterseite waren keine neuen Risse aufgetreten.

Zusätzlich zur Aufnahme aller Risse wurde eine tachymetrische Vermessung des Gesamtquerschnittes¹⁹ in mehreren Achsen durchgeführt, um die absoluten Verformungen der Mauern zu bestimmen. Es zeigte sich dabei, dass die Säulen der Seitenschiffe durchgängig eine Neigung nach außen von ca. 4-6cm (Südseite) bzw. ca. 6-7,5cm (Nordseite) auf 4,5m Höhe aufweisen (Abb. 12). Die Strebepfeiler sowie die Außenwänden zeigen eine vergleichbare Schrägstellung. Ausgehend von der Annahme zum Zeitpunkt der Einwölbung senkrecht stehender Pfeiler und Wände, hat sich die Spannweite des Hauptschiffes um ca. 5 cm vergrößert. Die beiden südlichen Seitenschiffe sind jeweils ca. 1 cm breiter geworden. Die Spannweite des inneren nördlichen Seitenschiffs ist um 8,6 cm angewachsen, die Spannweite des äußeren nördlichen Seitenschiffs hat dagegen ca. 1 cm abgenommen.

Die vorhandenen Verformungen stehen in guter qualitativer Übereinstimmung mit dem vorgefundenen Rissbild.

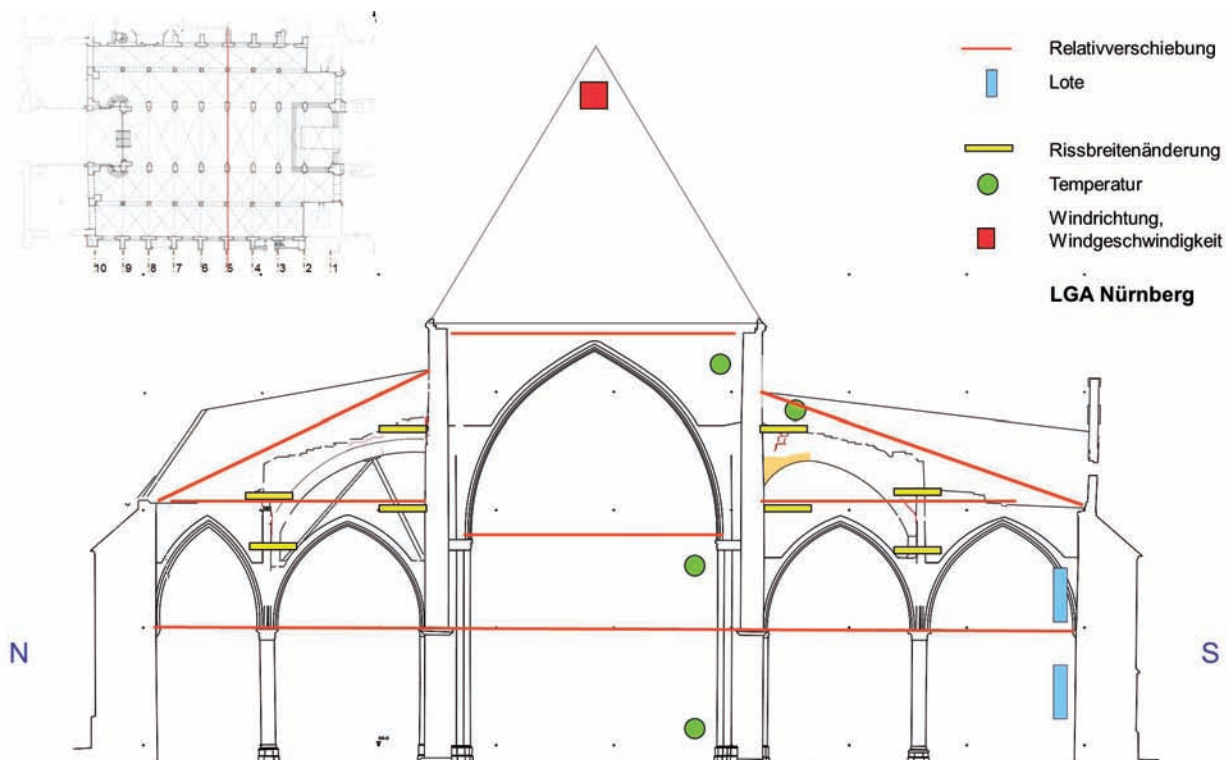


Abb. 14: Übersicht über die in Zusammenarbeit mit der LGA Nürnberg umgesetzten Monitoringsysteme

5. Monitoring

Zur Beurteilung der Standsicherheit sowohl der Strebebögen als auch des Gesamtquerschnitts waren Informationen über Veränderungen der Verformungen insbesondere über eine eventuelle Zunahme der Pfeilerneigungen erforderlich. Daher wurde zusammen mit dem Bauherrn und den Denkmal-Fachbehörden beschlossen, in einer repräsentativen Achse des Langhauses ein Messsystem zu installieren, das die Relativverschiebungen wichtiger Querschnittspunkte sowie deren Absolutverformungen über einen längeren Messzeitraum dokumentiert. Zur Installation des Messsystems wurde die Achse 5 gewählt, weil hier der Langhausquerschnitt weder auf der Südseite noch auf der Nordseite durch Anbauten wesentlich verändert wurde. Die Konzeption und die Installation erfolgte 2004 durch die LGA Bautechnik GmbH Abt. BBMT-Bauüberwachung in Nürnberg und wurde im Februar 2005 in Betrieb genommen (Abb. 14). Mit insgesamt 13 Seilzug-wegaufnehmern wurden Relativverschiebungen gemessen, die messtechnische Anbindung an den Baugrund erfolgt mittels zwei an der nördlichen Außenwand

installierten Loten. Zusätzlich wurden die Breiten von je zwei markanter Risse auf der Nord- und der Südseite überwacht, sowie die Temperaturen im Innenraum, im Dachraum des Hauptdaches und auf der Außenseite der nördlichen Obergadenwand aufgezeichnet.

Mit den Messungen sollte u.A. festgestellt werden, ob:

1. der Verformungsmechanismus inzwischen zur Ruhe gekommen ist und keine Gefahr darstellt.
2. die vorhandenen Verformungen von Klimaeinflüssen abhängen, aber positive und negative Vorzeichen haben und nicht akkumulieren. In diesem Fall wären die Schäden am Strebwerk auf Zwängungen zurückzuführen, die zwar für die Strebepfeiler selbst, aber nicht für das Gesamtsystem eine Gefahr darstellen.
3. die Verformungen größer werden und eine zunehmende Schrägstellung der Seitenschiffwände und Säulen festzustellen ist. In diesem Fall kann in Abhängigkeit der zeitlichen Entwicklung beurteilt werden, ob und wann eine Gefährdung für die Standsicherheit zu erwarten ist.

Die Auswertungen der Messungen zeigte, dass ein deutlicher Zusammenhang zwischen den jahreszeitlichen Temperaturschwankungen und den Bewegungen des Baukörpers besteht:

Mit der sommerlichen Zunahme der Temperaturen gegenüber der Nullmessung im Winter vergrößern sich auch die Verschiebungen gegenüber dem Ausgangszustand. Es war besonders zu erkennen, dass der nördliche Strebebogen im Sommer eine Verschiebung nach oben erfährt und sich im Winter wieder nach unten bewegt. Diese Tatsache deckte sich mit der Beobachtung, dass die unter den Bögen des nördlichen Seitenschiffes eingebauten A-Böcke im Winter belastet sind und im Sommer dagegen keine Lasten aufnehmen. Nach einer mehrjährigen Messphase zeigte sich, dass die jahreszeitlichen Verformungen nicht wieder vollständig zurückgehen (Abb. 15). Eine vollständige Bewertung der Verformungen und des Einflusses der durchgeführten Maßnahmen (s.u.) wird jedoch erst zukünftig nach einem langjährigen Messzyklus möglich sein.

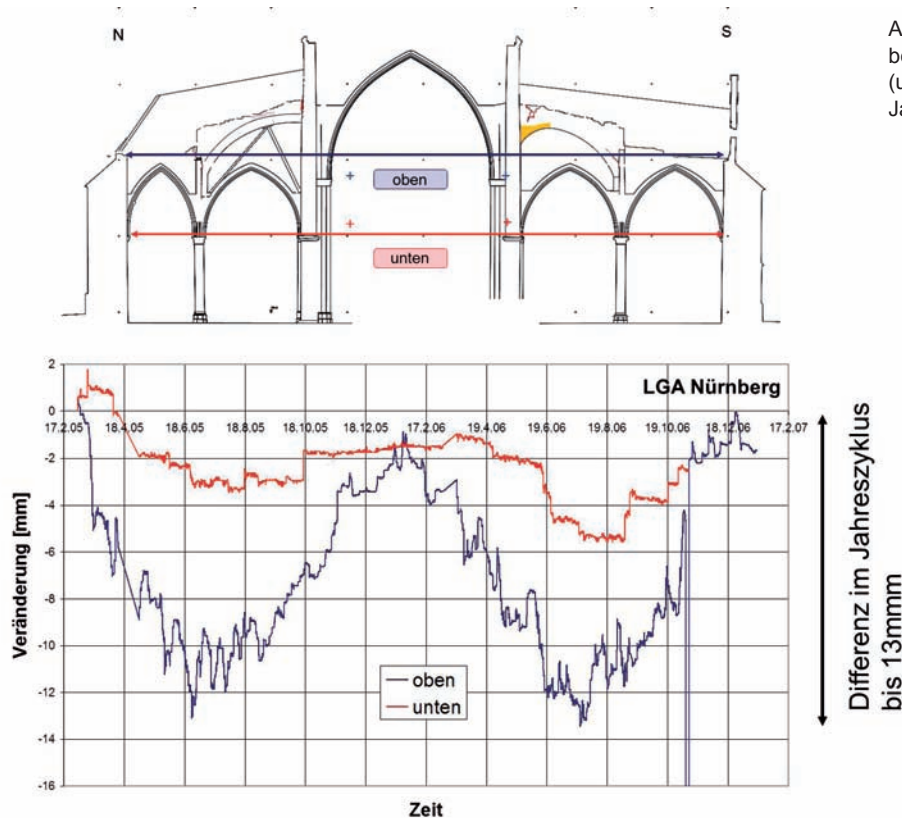


Abb. 15: Messprotokoll für die Bauwerksbewegungen am Gesamtquerschnitt (unten und oben) im Verlauf von zwei Jahren

6. Statische Berechnungen

Zur Ermittlung der Schadensursache und zur Bewertung der derzeitigen Standsicherheit des Regelquerschnittes wurden statische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode durchgeführt. Man entschloss sich, alle Bauteile des Querschnitts in einem Modell abzubilden. Ziel dabei konnte es nicht sein, die Spannungen an jeder Stelle genau festzustellen. Vielmehr wurde angestrebt, das prinzipielle Tragverhalten unter verschiedenen Belastungen und Randbedingungen zu simulieren und die Größenordnungen der Spannungen festzustellen.

6.1 Modellierung der Geometrie und der Verbindungen

Bei der Modellerstellung wurde die unverformte Geometrie zugrunde gelegt, d.h. Wände und Pfeiler stehen senkrecht und die Spannweiten der Gewölbe entsprechen den Säulen- und Wandabständen im Grundriss. Im unbelasteten Zustand weisen die Gewölbe des Rechenmodells keine Risse auf und alle Baufugen sind geschlossen.

Unter der Voraussetzung von entsprechen-

den Symmetriebedingungen wurden die Berechnungen für einen Streifen mit der Breite eines halben Gewölbefeldes des Regelquerschnittes durchgeführt. Der untersuchte Querschnitt lässt sich in folgende einzelne Bauteile gliedern:

- Romanische Hauptschiffwand aus Kalktuffquadermauerwerk
- Gotische Pfeilervorlagen im Mittelschiff aus Ziegelmauerwerk
- Gewölbe über dem Hauptschiff aus Ziegelmauerwerk, Rippen und Dienste aus Lechbrucker Sandstein (Werksteinmauerwerk)
- Gewölbe über den nördlichen und südlichen Seitenschiffen aus Ziegelmauerwerk, Rippen und Dienste aus Lechbrucker Sandstein (Werksteinmauerwerk)
- Pfeiler in den Seitenschiffen aus Lechbrucker Sandstein (Werksteinmauerwerk)
- Außenwände und Strebepfeiler aus Ziegelmauerwerk
- Strebewände und Übermauerungen aus Ziegelmauerwerk

Die Bauteile wurden zunächst unabhängig voneinander geometrisch abgebildet und mit Volumenelementen vernetzt (Abb. 16). Anschließend wurden die Bauteile in einem Rechenmodell zusammengefügt und durch Kontaktelemente miteinander verbunden. Entsprechend der Ausführung der in der Realität vorhandenen Verbindung, wurden den Kontaktelementen unterschiedliche Eigenschaften zugewiesen:

- Im Verband gemauerte Bauteile wurden starr miteinander verbunden, d.h. die Verbindung kann Druck-, Zug- und Schubkräfte in allen Richtungen übertragen
- Baufugen: Baufugen wie z.B. zwischen Pfeilerkopf und Gewölbe oder Pfeilerfuß und Fundament werden unverschieblich abgebildet, d.h. dass hier zwar keine Zugkräfte, jedoch Druck- und Reibungskräfte (Schub) übertragen werden. Da in diesen Fugen die Druckkräfte so groß sind, dass die maximalen Reibungskräfte nicht erreicht werden, wurden hier unverschiebliche Verbindungen hergestellt.

Baufugen in denen keine großen Druckkräfte vorhanden sind, werden reibungsfrei modelliert, d.h. hier können nur Druckkräfte, jedoch keine Zug- und Schubkräfte übertragen werden.

Maße und Bauart der Fundamente waren zur Zeit der Berechnungen unbekannt. Sie wurden daher nicht mit abgebildet. Zwischen der Pfeilerunterkante und dem als starr angenommenen Untergrund wurde - wie oben erwähnt - mit Kontaktelementen eine Baufuge modelliert. Nachgiebigkeiten der Fundamente können dadurch berücksichtigt werden, dass dieser Baufuge eine definierte Federsteifigkeit einer elastischen Bettung zugewiesen wird. Die Verdrehung der Außenwände wurde dadurch modelliert, dass ihrer Unterkante eine definierte Starrkörperverdrehung zugewiesen wurde, d.h. der starr modellierte Untergrund wurde auf der Außenseite soweit abgesenkt, dass sich am Wandkopf die gewünschte Horizontalauslenkung ergab.

Die Obergadenwände sind durch die Zerrbalken des Daches miteinander verbunden. Solange die Reibungskräfte, die aus der Dachlast entstehen, nicht überschritten werden, müssen sich die nördliche und südliche Obergadenwand horizontal in Querrichtung gleich bewegen. Das Aufmaß zeigt zwar eine Vergrößerung des Abstandes um ca. 12 cm, Vergleichsberechnungen ohne Kopplung der beiden Obergadenwände ergaben jedoch unrealistisch große Verschiebungen bei Windbelastung. Daher wurden die Zerrbalken im Rechenmodell durch eine starre Kopplung der Wandköpfe in Querrichtung berücksichtigt. Im Gegenzug wurde der sichtbare Spalt (ca. 1 - 2 cm) zwischen der Schildkappe des Hauptschiffgewölbes und den Obergadenwänden durch das Setzen entsprechender Parameter bei den Kontaktelementen berücksichtigt.

Das Rechenmodell besteht aus ca. 25.000 Volumenelementen und ca. 7.000 Kontaktelementen. Das zu lösende Gleichungssystem besitzt ca. 80.000 Unbekannte (Freiheitsgrade).

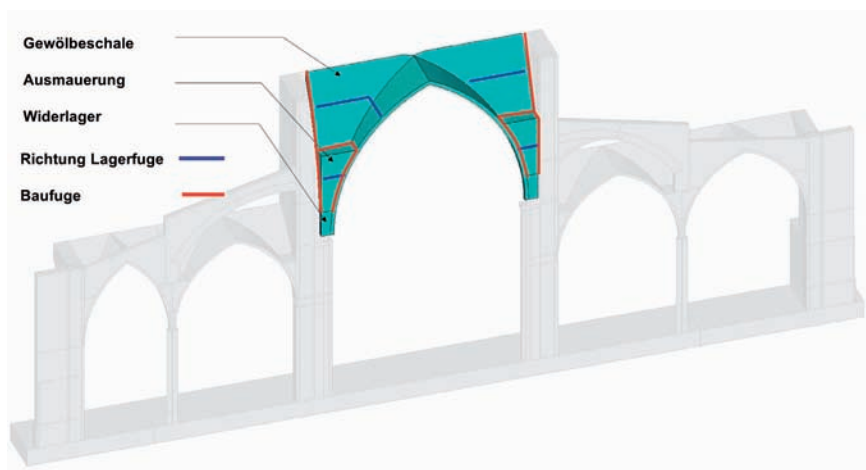
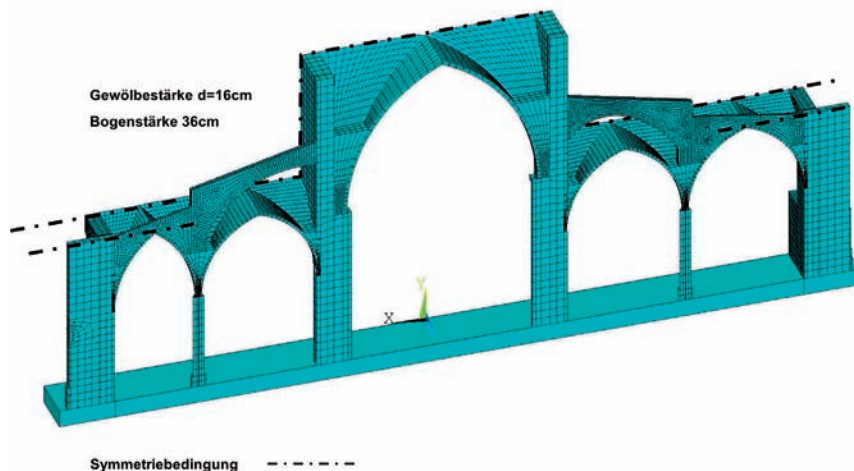


Abb. 16: oben: Übersicht, Finite-Elemente-Modell des Langhausquerschnitts, unten: Einzelelement Hauptschiffgewölbe aus dem Finite-Elemente-Modell des Langhausquerschnitts

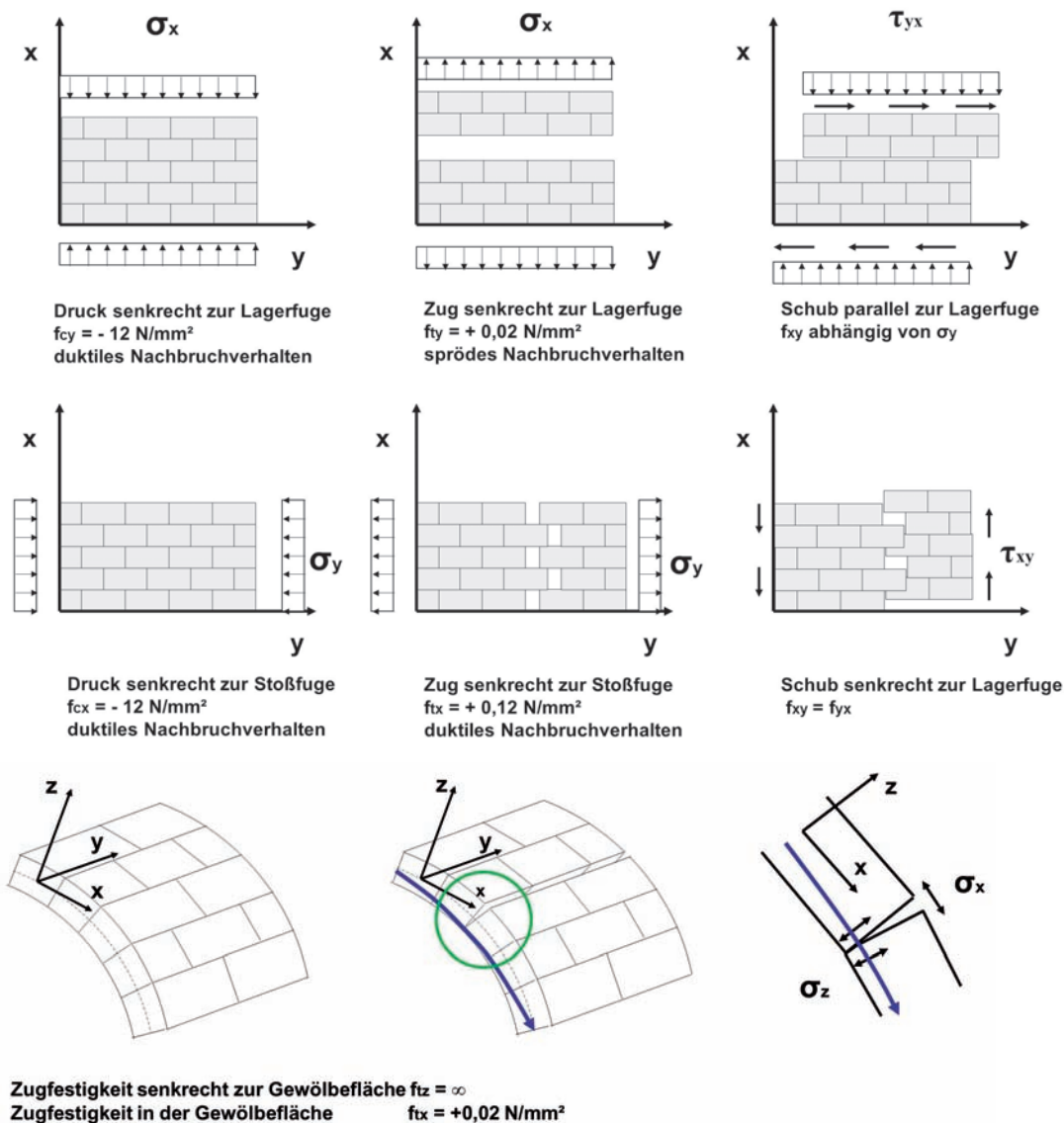


Abb. 17: Materialmodell zur Belastung von Mauerwerk (nach Jagfeld 2000)

6.2 Modellierung des Materialverhaltens von Mauerwerk

Mauerwerk wird in Lagen aus Stein und Mörtel erstellt. Es weist daher, anders als Beton und Stahl, ein deutlich gerichtetes Materialverhalten auf, d.h. die mechanischen Eigenschaften unterscheiden sich hinsichtlich der Belastungsrichtung – Wirkungsrichtung der Kraft senkrecht oder parallel zur Lagerfuge – und der Beanspruchungsart – Druck, Zug, Schub. Um realistische Aussagen über Schadensursachen und zur Größe von Spannungen treffen zu können, muss ein Rechenmodell berücksichtigen, dass die Zugfestigkeiten von Mauerwerk senkrecht zur Lagerfugen nahezu null und auch für Beanspruchungen

parallel zu den Lagerfugen nur sehr gering ist (abb. 17).

Bei den durchgeführten Berechnungen wurde das Materialmodell aus der Dissertation von Jagfeld²⁰ verwendet. Das speziell für Mauerwerk entwickelte Materialmodell ermöglicht es, Festigkeiten richtungsabhängig zu definieren und unterschiedliche Festigkeiten im Druck und Zugbereich zu berücksichtigen. Für Schubbeanspruchungen wird das Mohr'sche Reibungsgesetz berücksichtigt, das zusätzlich um einen quadratischen Term erweitert wurde. Die den Berechnungen zugrunde gelegten Materialwerte sind:

- Zugfestigkeit senkrecht zur Lagerfuge: $0,02 \text{ N/mm}^2$

- Zugfestigkeit senkrecht zur Stoßfuge: $0,08 \text{ N/mm}^2$
- Haftscherfestigkeit: $0,02 \text{ N/mm}^2$
- Reibzahl: $0,04$ für Scheibenschub und $0,06$ für Plattenschub

Versagen durch Überschreiten der Druckfestigkeit wurde bei der Berechnung nicht berücksichtigt. Vielmehr wurden nach Abschluss der Berechnung die ermittelten Druckspannungen mit den zulässigen Werten verglichen. Dieses Vorgehen war möglich, da die Druckspannungen im Allgemeinen nur geringe Werte annahmen und an keiner Stelle Druckfestigkeiten überschritten wurden.

6.3 Modellierung vorhandener Risse

Mit dem oben beschriebenen Materialmodell kann die Rissbildung in Mauerwerk nachvollzogen werden. Die Berechnung benötigt jedoch erhebliche Rechenzeit. Um Rechenzeit zu sparen ist es sinnvoll, markante, ausgeprägte Risse direkt im Strukturmodell zu berücksichtigen.

In einigen Fällen der beschriebenen Risse handelt es sich um Baufugen zwischen einzelnen Bauteilen, die sich durch die Bewegungen des Bauwerks geöffnet haben. Als Beispiel dafür seien die klaffende Fuge zwischen dem Strebebogen und der Obergadenwand sowie die Klaffungen zwischen Obergadenwand und den Schildkappen der Hauptschiffgewölbe genannt. Diese Baufugen wurden bei der Modellerstellung berücksichtigt.

An der Unterseite der Strebebögen sind ungefähr in der Mitte der inneren Seitenschiffe klaffende Risse vorhanden. Diese Risse werden dadurch berücksichtigt, dass die Strebebögen an dieser Stelle geteilt werden. Wie bei den Baufugen wird die Verbindung zwischen beiden Teilen über Kontaktelemente so hergestellt, dass Druck- und Schub-, jedoch keine Zugkräfte übertragen werden können. Die Lage der Risse ist somit vorgegeben und ist nicht Ergebnis der Berechnung.

6.4 Lasten

Folgende Lasten wirken auf die Struktur:

- Eigengewicht der Bauteile
- Windlasten
- Fundamentverdrehungen

Das Eigengewicht wird direkt durch das Volumen der Bauteile und die Eingabe der Dichte und der Erdbeschleunigung berücksichtigt. Die Lasten der Seitenschiffdächer sind im Verhältnis zum Eigengewicht des Mauerwerkbaus gering und werden vernachlässigt. Die Lasten aus dem Hauptdach sind aus den statischen Berechnungen des Dachwerks bekannt und werden für die vorliegende Berechnung übernommen. Die Windlasten werden näherungsweise als auf die Außen- und die Obergadenwände wirkende horizontalgerichtete Flächenlasten berücksichtigt. Die Größe der Last wird entsprechend DIN1055 aus dem nach der Höhe gestaffelten Staudruck und den Druckbeiwerten ermittelt.

Folgende Lastfälle untersucht (Abb. 18-29):

- Eigengewicht
- Eigengewicht + Windlasten von Norden
- Eigengewicht + Windlasten von Süden
- Eigengewicht + vorgegebene Verdrehung der Außenwände (Auslenkung 2 cm, 10 cm)

- Eigengewicht + vorgegebene Verdrehung der Außenwände mit elastischer Lagerung der Pfeiler
- Eigengewicht + vorgegebene Verdrehung der Außenwände + Windlasten (Nord und Süd)

Weiter wurden Parameterstudien zum Einfluss der berücksichtigten Zugfestigkeiten, hinsichtlich der nachgiebigen Lagerung der Fundamente und der Kopplung der Obergadenwände durch die Zerrbalken durchgeführt.

6.5 Modellgröße und Berechnung

Das gesamte Rechenmodell bestand aus ca. 27000 achtknotigen Volumenelementen und ca. 10000 Kontaktelementen. Bei einer Gesamtzahl von 50000 Knoten besitzt das Modell 150000 Freiheitsgrade. Weil das Materialverhalten von Mauerwerk und das Öffnen und Schließen von Baufugen berücksichtigt werden sollte, war eine nicht-lineare Berechnung erforderlich. Die Lasten werden dabei in Laststufen aufgebracht und für jede Laststufe eine iterative Lösung des Gleichungssystems nach der Newton-Raphson-Methode durchgeführt. Für einen typischen Lösungslauf (Aufbringen des Eigengewichtes, Aufbringen der Verdrehung der Wandpfeiler, Aufbringen der Windlast) waren ca. 20 h Rechenzeit auf einem PC (CPU mit 4000MHz) erforderlich.

6.6. Ergebnisse

Im Lastfall Eigengewicht errechnet sich ein Spannungszustand, der als ausgeglichen bezeichnet werden kann. Die Spannungsgrößen sind überall unter den zulässigen Werten, auch in den Pfeilern. Es gibt keine Rissbildungen, die über die im Modell bereits berücksichtigten Baufugen, wie zum Beispiel zwischen Hochschiffwand und Schildkappen des Mittelschiffgewölbes hinausgehen.

Auch die horizontalen Verformungen sind im Allgemeinen klein. Eine Ausnahme bildet das nördliche Seitenschiff. Die größten horizontalen Verschiebungen treten am Kopf der Mittelsäule des nördlichen Seitenschiffes auf. Die Verschiebung nach Norden ist dort mit ca. 5,5 mm mehr als doppelt so groß wie die Verschiebung der Mittelsäule im südlichen Seitenschiff nach Süden (ca. 2 mm). Die Verschiebung der nördlichen Mittelsäule ist auch nahezu doppelt so groß wie die Verschiebung des Wandkopfs der nördlichen Außenwand nach außen (ebenfalls ca. 2 mm).

Der Grund für diese Auffälligkeit liegt in den unterschiedlichen Spannweiten des inneren und des äußeren Seitenschiffgewölbes und den damit unterschiedlichen Horizontalschüben. Das innere Gewölbe hat eine deutlich größere Spannweite, so

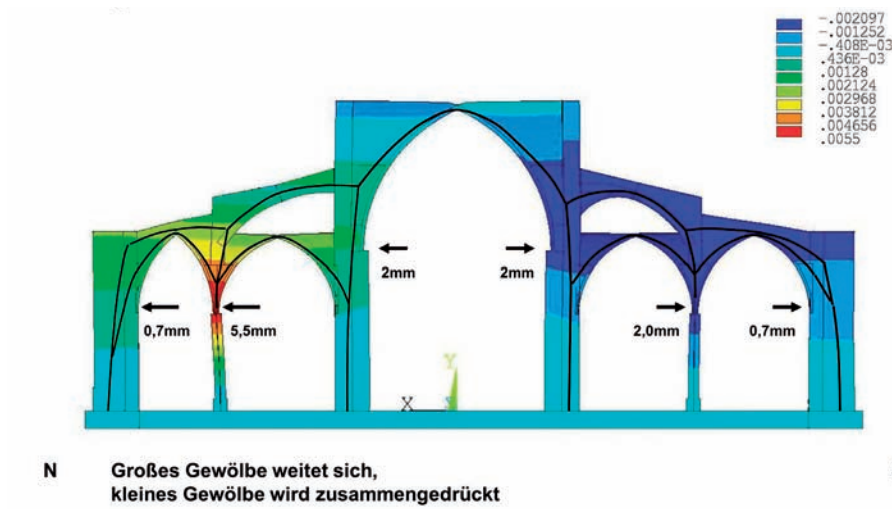


Abb. 18: Ergebnisse der statischen Berechnungen mit eingezeichneter Stützlinie zur Verdeutlichung des Lastflusses beim Lastfall Eigengewicht

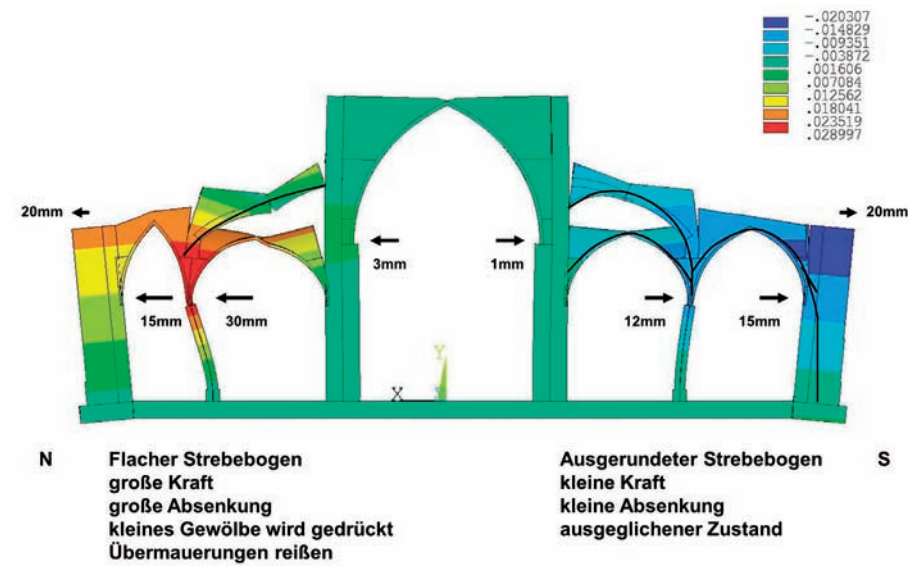


Abb. 19: Ergebnisse der statischen Berechnungen: Verformungen beim Lastfall Eigengewicht mit Fundamentverdrehungen

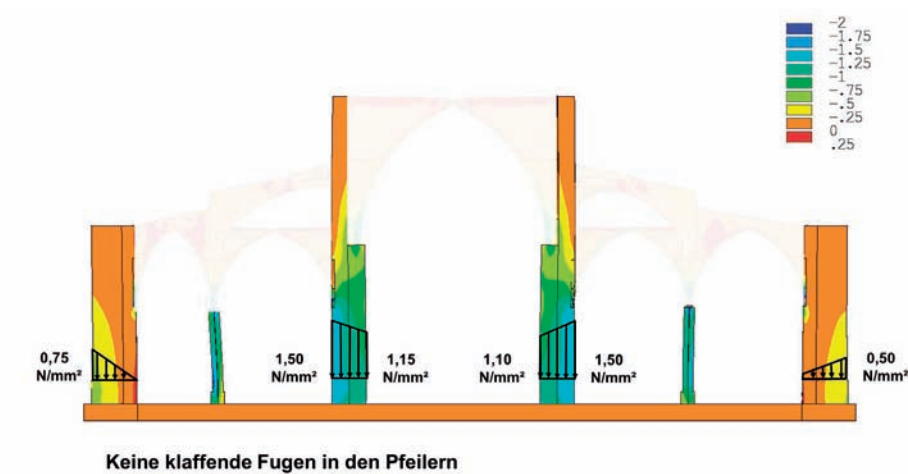


Abb. 20: Ergebnisse der statischen Berechnungen: Druckspannungen in Wänden und Pfeilern beim Lastfall Eigengewicht

dass eine nach außen wirkende Resultierende auf die Mittelsäule übrig bleibt. Die Mittelsäule des Seitenschiffs wird solange nach außen gedrückt, bis das Gewölbe des äußeren Seitenschiffs die notwendige Gegenkraft aufbringen kann. Die Spannweite des inneren Gewölbes nimmt zu, das äußere Seitenschiffgewölbe wird zusammengedrückt. Auf der Südseite sind die Spannweiten des inneren und des äußeren Seitenschiffgewölbes nahezu gleich groß, dort sind der Lastfluss und die Verformungen ausgeglichen.

In den Strebebögen im Norden und im Süden bildet sich jeweils eine Stützlinie aus, die an der Obergadenwand nahezu horizontal startet. Oberhalb der Mittelpfeiler wird der Horizontalanteil der Strebenkraft von der Übermauerung über dem äußeren Seitenschiff auf die außenliegenden Wände mit den Strebepfeilern übertragen. Der Lastfluss ist in Form einer Stützlinie in Abb. 18 qualitativ dargestellt.

Im Lastfall Eigengewicht und Verdrehung der Außenwände entsteht eine Spannweitenvergrößerung für den Gesamtquerschnitt entsprechend der Vorgabe von insgesamt 40mm. Es bildet sich ein Bewegungsmechanismus, der zur Öffnung von Baufugen und zu klaffenden Risse führt, wie er in basilikalischen Gewölbebauten üblich ist. Damit geht eine Reduktion der Gewölbeschübe einher. Die Spannungen in den äußeren Strebepfeilern werden deutlich kleiner. Die Kantenpressungen nehmen dort um gut ein Drittel ab. Dabei ist zu beobachten, dass die Hauptpfeiler unter den Mittelschiffgewölben so steif sind, dass sie einen großen Teil des Gewölbeschubes aus den Mittelschiffgewölben aufnehmen. Dabei entstehen unter den gegebenen Auflasten keine großen Kantenpressungen.

Darüber hinaus sind allerdings folgende Besonderheiten festzustellen:

- Die beiden Strebebögen reagieren auffallend empfindlich auf diese Spannweitenvergrößerung. Es bilden sich große Absenkungen und Rissbildungen, die Übermauerungen reißen auf. Der Grund hierfür ist die Geometrie der Strebebögen. Berücksichtigt man die Auflagersituation der Strebebögen, erkennt man, dass es sich um sehr flache Bögen handelt. Das obere Auflager des Bogens an der Hochschiffwand ist vertikal unverschieblich, das untere Auflager ist wegen der Übermauerung sehr hoch. Der Dreigelenkmechanismus, der sich aufgrund der Spannweitenvergrößerung einstellt, hat damit eine sehr geringe Stichhöhe.
- Die Situation im nördlichen Seitenschiff (Abb. 21, 22), die charakterisiert

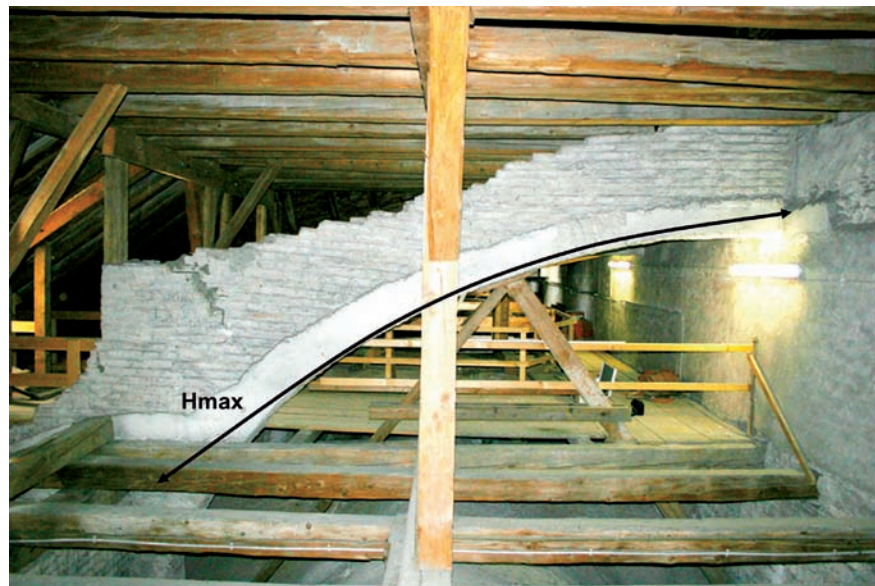


Abb. 21: Strebebogen der Nordseite, Stützlinienverlauf mit maximalem Horizontalschub

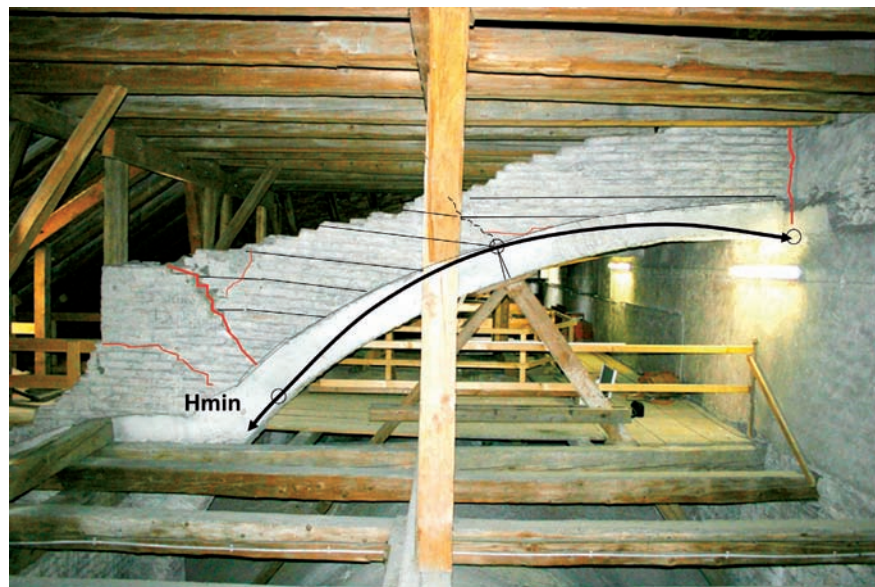


Abb. 22: Strebebogen der Nordseite, Stützlinienverlauf mit minimalem Horizontalschub. Die Rissbildungen im Bogenverlauf und die Verformungen der Steinlagen der Übermauerung sind markiert.



Abb. 23: Strebebogen der Südseite, Stützlinienverlauf mit minimalem und maximalem Horizontalschub ohne Berücksichtigung der Ausrundung



Abb. 24: Strebebogen der Südseite, Stützlinienverlauf mit minimalem Horizontalschub unter Berücksichtigung der Ausrundung

wird durch die ungleichen Gewölbespannweiten geprägt sich in diesem Lastfall weiter aus. Die tiefen Risse in der Übermauerung, die aufgrund der Spannweitenvergrößerung entstehen, führen dazu, dass der Horizontalschub aus dem Strebebogen nicht mehr in der Übermauerung nach außen geführt werden kann. Der Horizontalschub wirkt damit weiter unten in den Gewölbekesseln und führt zu großen Horizontalverschiebungen. Das äußere Gewölbe wird weiter zusammengedrückt, das innere erfährt eine zusätzliche Spannweitenvergrößerung. Die Spannungen sind dabei noch nicht unzulässig groß, auch wenn das überhöht dargestellt Verformungsbild dies vermuten lässt.

- Des Weiteren ist festzustellen, dass sich die Ausrundung der Strebebögen im Anschluss an die Hochschiffwand, wie im abgebildeten Modell auf der südlichen Seite dargestellt, überaus positiv auswirkt (Abb. 23, 24). Es kann sich dadurch eine sehr steile Stützlinie einstellen. Dies hat zur Folge, dass der Horizontalschub aus dem Strebebogen sich bei einer Spannweitenvergrößerung stark reduziert. Die Verformungen und die Risse bleiben wesentlich kleiner.

Im Lastfall Eigengewicht und Verdrehung der Außenwände und Wind von Süden, öffnen sich die klaffenden Fugen auf der Südseite weiter. Auf der Nordseite dagegen schließen sich die Fugen wieder. Das äußere nördliche Seitenschiff wird weiter zusammengedrückt, bis die Fugen in der Übermauerung wieder geschlossen sind, und die Übermauerung wieder einen Teil der Horizontalkräfte übernehmen und auf die Strebepfeiler abtragen kann. In der romanischen Obergadenwand wird in diesem Lastfall eine geringfügige Spannungsüberschreitung ermittelt. Der nördliche Strebebogen stützt die Obergadenwand und ist für die Lastabtragung erforderlich.

Insgesamt konnte im Rahmen der getroffenen Randbedingungen ein in sich schlüssiges Tragverhalten aus den statischen Berechnungen hergeleitet werden.

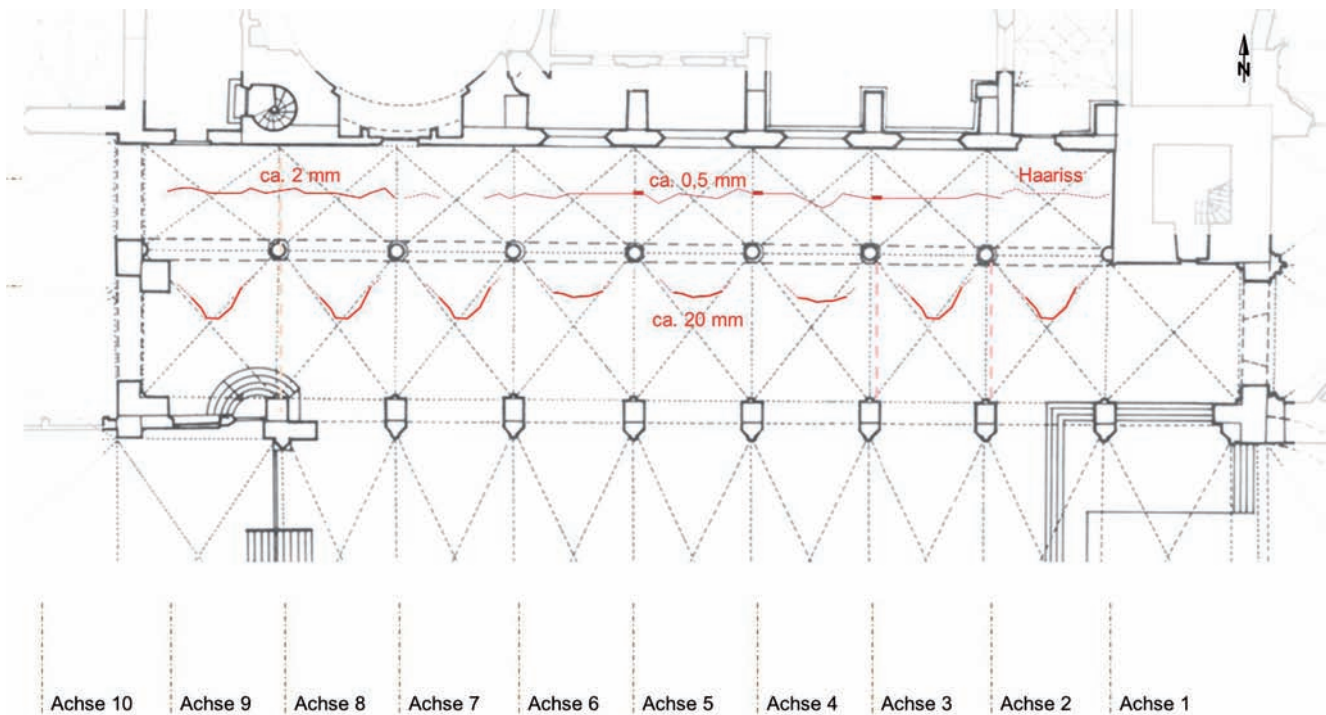


Abb. 25: Nördliche Seitenschiffe, Rissaufnahme auf der Gewölbeoberseite

7. Vergleich der Berechnungsergebnisse mit der Realität, Schadensursachen und Beurteilung der Situation

Das aus den statischen Berechnungen hergeleitete theoretische Tragmodell musste mit den realen Phänomenen am Bauwerk verglichen und verifiziert bzw. relativiert werden. Dies geschah nicht in zwei getrennten, zeitlich nacheinander ablaufenden Arbeitsschritten, sondern iterativ. Der große Einfluss der unterschiedlichen Spannweiten im nördlichen Seitenschiff im Zusammenhang mit dem dortigen Strebebogen und deren besonders negative Wirkung im Falle einer Vergrößerung der Gesamtspannweite wurden erst durch die statischen Berechnungen deutlich. Nach Vorliegen der ersten diesbezüglichen Ergebnisse der statischen Berechnungen wurde nochmals gezielt nach entsprechenden Rissbildern in den betroffenen Gewölben gesucht.

Auf der Unterseite der nördlichen Seitenschiffgewölbe zeichneten sich keinerlei Risse ab. Die inneren Gewölbe müssten entsprechend dem theoretischen Modell auf der Unterseite die typischen Risse aufweisen wie sie bei einer Vergrößerung der Spannweite entstehen. Die innere Raumschale wurde in den achtziger Jahren des 20. Jahrhunderts überarbeitet, sodass davon ausgegangen werden kann, dass zumindest seit dieser Zeit keine nennens-

werten neuen Verformungen aufgetreten sind.

Auf der Oberseite der Gewölbe, die mit einer Mörtelschicht bedeckt ist, waren zunächst auch keine Risse sichtbar. Nach einer erneuten gründlichen Reinigung wurden allerdings entlang der Scheitel der äußeren Seitenschiffgewölbe dünne Haarrisse entdeckt (Abb. 25). Ihre Position und ihr Verlauf stimmt mit der Erkenntnis überein, dass diese Gewölbe zusammengedrückt werden, somit nach oben ausweichen und sich damit auf der Oberseite entlang der Längsscheitel ein durchgehender Biegeriss öffnet. An den inneren Gewölben konnten in den Schildkappen Abrisse von den Schildwänden beziehungsweise von den Anschlüssen zu den äußeren Gewölben erkannt werden. Diese entsprechen der Erkenntnis, dass diese Gewölbe einer Vergrößerung der Spannweite ausgesetzt sind. Diese Risse waren aber sehr dünn und standen in keinem Verhältnis zu den großen Schäden an den Strebebögen. Man entschloss sich, die Mörtelschicht entlang der entdeckten Risse abschnittsweise zu öffnen. Jetzt erkannte man, dass die Risse früher einmal mehrere Zentimeter weit klafften. Sie waren mit Ziegelstücken und Mörtel verfüllt, bevor die Mörtelschicht aufgebracht wurde. Mit dieser Entdeckung konnte der prinzipielle Tragmechanismus, wie er im theoretischen Modell entwickelt wurde voll umfänglich am

Bauwerk nachvollzogen werden.

Eine quantitative Analyse der Rissbreiten und der Schrägstellungen der Pfeiler ergab ebenfalls ein in sich schlüssiges Modell. Die gesamte Spannweitenvergrößerung über den betrachteten Querschnitt beträgt ca. 12cm und resultiert aus den Horizontalverschiebungen der äußeren Strebepfeiler von jeweils 6cm auf der Höhe der Gewölbeanfänger. Auf der Südseite verteilen sich diese 6cm auf die beiden Seitenschiffgewölbe und das Hauptschiffgewölbe, wobei dem Hauptschiffgewölbe der größte Anteil zukommt. Die Spannweitenvergrößerungen der Seitenschiffgewölbe mit 0,7cm und 1,5cm sind verhältnismäßig klein. Auf der Nordseite hatte das innere Seitenschiffgewölbe eine Spannweitenvergrößerung von 8,6cm zu verkraften. Die entsprechenden Rissbreiten sind auf der Oberseite nachzuvollziehen. Das äußere Seitenschiffgewölbe wurde um 1cm zusammengedrückt. Für den Strebebogen auf der Nordseite sind wegen seiner Geometrie 8,6cm Spannweitenvergrößerung sehr viel und ausreichend, tiefe Risse an den Auflagern zur Hochschiffwand und in der Übermauerung zu verursachen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden:

- Die Verformungen an Gewölbe und Pfeilern sowie die Rissbreiten an den Gewölben sind verhältnismäßig klein. Auch die Spannweitenvergrößerung

am inneren Seitenschiffgewölbe von 8,6cm ist nur innerhalb der Struktur relativ groß, absolut gesehen ist dies im Vergleich mit vielen anderen Gewölbebauten noch nicht ungewöhnlich und statisch nicht bedenklich.

- Mit einer beschleunigten Zunahme der Verformungen ist zurzeit nicht zu rechnen. Seit ca. 30 Jahren sind auf der Unterseite der Gewölbe keine neuen Risse aufgegangen und auf der Oberseite sind nur Haarrisse entstanden.
- Die Spannungen sind im jetzigen Zustand in den Gewölben, Pfeilern und Strebepfeilern nicht zu hoch.
- Die Strebebögen sind für den Lastfall Wind erforderlich
- Die noch vorhandenen Strebebögen sind im vorgefundenen Zustand nicht mehr standsicher und nicht mehr funktionsfähig.

Ursache für die Schrägstellungen der äußeren Strebepfeiler sind die Fundamentverdrehungen infolge des Horizontalschubes aus den Gewölben. Die Schrägstellungen führten zu den beschriebenen Spannweitenvergrößerungen. Diese Spannweitenvergrößerungen hätten noch keine gefährdende Wirkung auf die Gesamtstruktur, wenn die Strebebögen nicht besonders empfindlich darauf reagieren würden und die nördlichen Seitenschiffgewölbe ungleiche Stützweiten hätten. Diese beiden konstruktiven Besonderheiten sind somit als die eigentlichen Ursachen der Schäden anzusehen.

Die angestrebten Ziele einer Sicherung und Instandsetzungsmaßnahme waren somit:

- Wiederherstellung der fehlenden Strebebögen und Sicherstellung der Tragfähigkeit der noch vorhandenen. Sie sind für die Abtragung der Windkräfte erforderlich.
- Ermöglichung einer Übertragung von Horizontalkräften aus den Strebebögen bis in die äußeren Strebepfeiler.
- Reduktion der Empfindlichkeit der Strebebögen gegenüber weiteren möglichen Auflagerverschiebungen.
- Ermöglichung eines Ausgleiches der Horizontalkräfte zwischen den beiden nördlichen Seitenschiffgewölben sowie den Horizontalkräften aus dem Strebebogen.

Eine Nachgründung wird zum jetzigen Zeitpunkt nicht als erforderlich betrachtet. Die Verformungen vergrößerten sich über längere Zeiträume nachweislich nicht. Es kann davon ausgegangen werden, dass der bei weitem größte Anteil der Fundamentverdrehungen unmittelbar nach dem Einbau der Gewölbe entstanden ist. Da die Fundamentsituation allerdings nicht

vollständig ermittelt werden konnte und deshalb kein vollständiger Tragfähigkeitsnachweis geführt werden konnte, wird ein langfristiges Monitoring gefordert. Eine Fundamentverstärkung, wie sie in den zwanziger Jahren des 20. Jahrhunderts schon diskutiert wurde, würde sich zudem insbesondere auf der Nordseite wegen den zahlreichen Anbauten als äußerst komplex und aufwändig gestalten.

Der Einbau von Zuganker zur Aufnahme des Horizontalschubes der Gewölbe wäre nur dann sinnvoll, wenn die Zuganker im Mittelschiff und in den Seitenschiffen angeordnet würden. Sie müssten an jedem Zwischenaufleger verankert werden, um Differenzkräfte einleiten zu können. Damit wären alle Einflüsse aus den Horizontalschüben unterbunden. Die Strebebögen müssten allerdings trotzdem funktionsfähig sein, um eine horizontale Stützung für den Lastfall Wind bereitzustellen. Zuganker unter den Mittelschiffgewölben wären bei den gegebenen Raumproportionen besonders störend. Das Mittelschiff wirkt bereits jetzt recht gedrungen, was daran liegt, dass die Gewölbe unter den Zerrbalken aus ottonischer Zeit eingezogen wurden. Der Raum wurde damit wesentlich niedriger als der ursprüngliche Raum. Das Schadensbild und die Ergebnisse aus den Berechnungen rechtfertigten eine solche Lösung nicht. Die Zugankerlösung wäre zudem eine sehr pauschale und undifferenzierte Lösung gewesen. Ein Behebung der lokalen Probleme an den Strebebögen und den nördlichen Seitenschiffgewölben wurde deshalb der Vorzug gegeben.

8. Ausgeführte Sicherungs- und Instandsetzungsmaßnahmen

Die Sicherungs- und Instandsetzungsmaßnahmen wurden in enger Zusammenarbeit mit den Vertretern der Landesdenkmalpflege konzipiert.

Die ausgeführten Maßnahmen lassen sich in reine „Reparaturmaßnahmen“, also Maßnahmen zur Wiederherstellung des schadensfreien historischen Bestandes, und „Subsidiärmaßnahmen“, Ergänzungen und Verstärkungen, unterteilen.

Die Reparaturmaßnahmen sind: Die drei eingestürzten Strebebögen wurden neu aufgemauert (Abb. 26, 29). Die Wiederherstellung erfolgte dabei in enger Anlehnung an den Bestand; es wurden vom Bauherrn sogar passende Handschlagziegel in dem für Augsburg typischen Großformat von 35x16x8cm bereitgestellt, die im historischen Verband auf einer hölzernen Lehrschalung vermauert wurden. Diese Form der Wiederherstellung bildete somit auch einen interessanten Fall von „experi-

menteller Archäologie“. Es bleibt allerdings der mögliche Einwand unzureichender Ablesbarkeit der neu errichteten Bögen gegenüber dem Altbestand, also einer Art „Detailhistorismus“.

Zusätzlich zur Erneuerung der zerstörten Strebebögen wurden die stark verformten, mittig „durchgesackten“ Strebebögen in den Achsen 07 und 08 der Nordseite zurückverformt. Es handelt sich um die beiden mit einem dünneren Bogenquerschnitt ausgeführten Bögen. Für die Rückverformung wurden die Bögen gleichfalls mit hölzernen Lehrschalungen unterstützt und diese dann mittig angehoben. Es ergaben sich durch dieses Verfahren naturgemäß deutliche Risse und klaffende Fugen im Mauerwerk, die ausgemauert und kraftschlüssig injiziert wurden.

Die Risse in den Gewölbeübermauerungen wurden kraftschlüssig injiziert, sodass eine Übertragung von Horizontalkräften aus den Strebebögen über die äußeren Seitenschiffgewölbe bis in die Strebepfeiler wieder möglich ist.

Subsidiäre Maßnahmen sind:

Zur Reduktion der Empfindlichkeit der Strebebögen gegenüber weiteren möglichen Auflagerverschiebungen wurde bei allen Strebebögen der Nordseite am Auflager an der Obergadenwand eine gemauerte Ausrundung hinzugefügt (Abb. 27, 29). Die Ausrundung wurde nach dem Vorbild der auf der Südseite bereits im Zuge einer historischen Sicherungs- und Instandsetzungsmaßnahme (s.o.) eingefügten Ausrundungen erstellt. Die Stichhöhe des Strebebogens wird dadurch erheblich vergrößert. Er ist somit weit weniger empfindlich gegenüber Spannweitenvergrößerungen und die Stützlinie kann sich an die Situation anpassen. Im Lastfall Wind können sich zur Stützung der Obergadenwand sehr flache Stützlinien mit großer Horizontalkraft einstellen, im Falle einer Entlastung und einer Spannweitenvergrößerung kann sich aber auch eine sehr steile Stützlinie einstellen und die Horizontalkraft kann sich auf ein Minimum reduzieren. Einem Abrutschen an der Obergadenwand im Falle einer Entlastung wird durch eine Ausnehmung in der Hochschiffwand entgegengewirkt. Zur Ermöglichung eines Ausgleiches der Horizontalkräfte zwischen den beiden nördlichen Seitenschiffgewölben wurden zwei Lösungen diskutiert: Es wäre prinzipiell denkbar, innerhalb des Kircheninnenraumes, oberhalb der Gewölbekämpfer, ein Druckelement einzuführen, das den Horizontalschub aus den inneren Gewölben direkt zu den Strebepfeilern weitergeben könnte. Ein solches Element wäre allerdings im Innenraum der Kirche deutlich sichtbar.

Als Alternative wurde daher eine zweite Variante entwickelt und schließlich auch ausgeführt. Direkt über dem Gewölbescheitel wurden Biegeelemente aus Stahlbeton eingebaut (Abb. 28, 30). Diese Elemente verlaufen beidseits der historischen Gewölbeübermauerung und sind von dem Ziegelmauerwerk durch eine Trennschicht geschieden. Die Betonbalken wurden an den beiden Enden, also über der Säulenreihe zwischen den beiden Seitenschiffen und den Außenmauern, mit vertikalen Mauerrankern nach unten verankert. Dadurch wird verhindert, dass sich der Gewölbescheitel infolge von Horizontalkräften auf Kämpferhöhe nach oben verformen kann. So werden die äußeren Gewölbe in die Lage versetzt, ohne große Verformungen und weitere Schäden Horizontalkräfte auf die Außenwand zu übertragen.

9. Résumé

Das Konstruktionssystem des Augsburger Dom-Langhauses bildet mit seinem komplexen Bestand aus ottonischem Hochschiff, gotischem Ausbau, verdecktem Strebewerk und mittelalterlichen Dachkonstruktionen ein bedeutendes bau- und baukonstruktionsgeschichtliches Zeugnis. Auch die historischen Instandsetzungsmaßnahmen bilden einen integralen Bestandteil des Denkmals. Der besondere Wert und die Komplexität des Gefüges verpflichteten zu einer behutsamen, nachhaltigen Herangehensweise bei aktuellen Sicherungs- und Instandsetzungsmaßnahmen. Durch ein mehrjähriges Monitoringprojekt, eine gründliche Aufnahme der Baukonstruktion und aller Schäden sowie durch eine realitätsnahe Modellierung des Gefüges als statisches System war es möglich, die Eingriffe schließlich zu minimieren. Bei den schließlich verwirklichten Maßnahmen handelt es sich um eine Kombination aus reinen Reparaturen des gestörten Bestandes, und einzelnen Hinzufügungen zur Ertüchtigung der Gesamtstruktur.

Die Effektivität und der geringe Umfang der Maßnahme belegen eindrucksvoll, dass eine profunde, zunächst möglicherweise als übertrieben aufwändig erscheinende Voruntersuchung des Bestandes schließlich nicht nur helfen kann, die Eingriffe in die bauzeitliche Substanz zurückhaltend zu gestalten, sondern auch die Maßnahmen selbst ökonomisch durchzuführen.



Abb. 26: Rekonstruktion eines Strebebogens (hier: Südseite) nach Bestandsvorbild



Abb. 27: zusätzlich eingebrachte Ausrundungen am Ansatz an die Hochschiffmauer bei allen Strebebögen der Nordseite



Abb. 28: Blick auf die neuen Stahlbetonbalken seitlich der Übermauerung über dem Gewölbescheitel des äußeren nördlichen Seitenschiffes

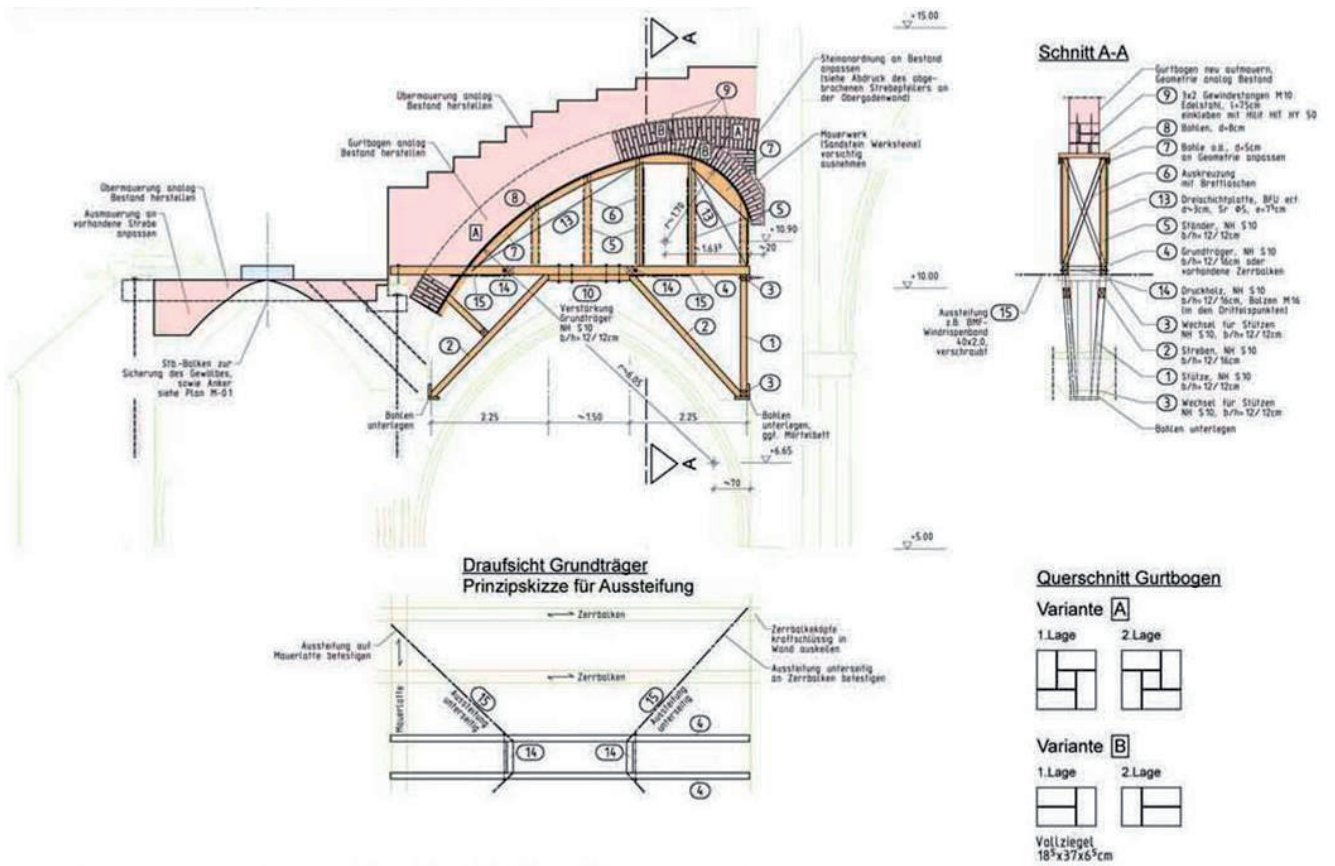


Abb. 29: Detail- und Ausführungsplan für die Wiederherstellung der zerstörten Strebepfeiler mit zusätzlicher Ausrundung am Ansatz an die Hochschiffmauer

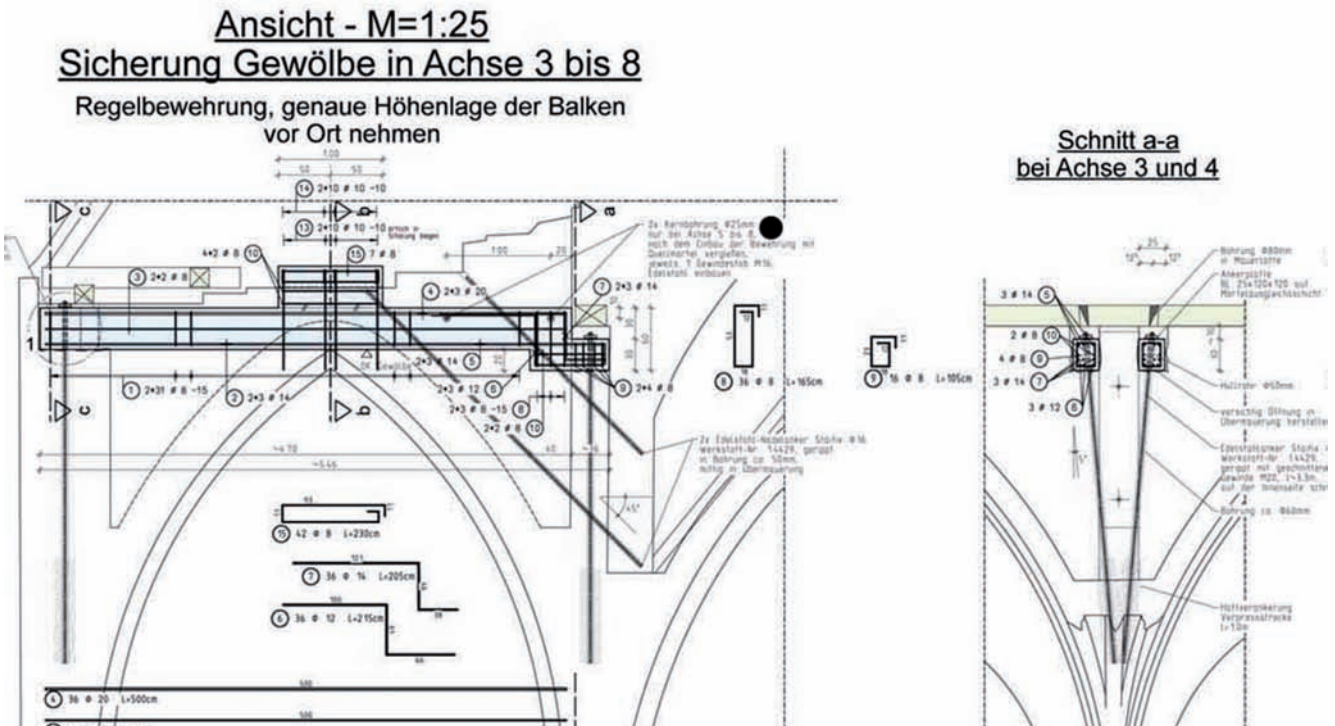


Abb. 30: Detail- und Ausführungsplan für die Sicherungskonstruktion über dem äußeren nördlichen Seitenschiff

Anmerkungen

1. Vgl. Sahler, Hildegard; Winkler, Reinhold: Der Augsburger Dom in ottonischer Zeit. Neue Erkenntnisse zur Datierung des ottonischen Neubaus und seiner Stellung in der Architekturgeschichte, in: *architectura – Zeitschrift für Geschichte der Baukunst* 1/2011, 13-26
2. Beteiligt waren neben den Verfassern Michael Löffler, Katharine Renhof und Norbert Burger.
3. Aktuelle dendrochronologische Datierung des Kernbaus vor 1006, vgl. Sahler, Hildegard; Winkler, Reinhold: *Bauforschung im Dachwerk des Augsburger Doms*, in: *Kunstchronik* 6/2011
4. Die beste Zusammenfassung des Forschungsstandes vor den aktuellen Untersuchungen bietet Chevalley, Denis: *Der Dom zu Augsburg*, München, 1995. Eine ausführliche Darstellung der aktuellen Ergebnisse erscheint im *Jahrbuch der bayerischen Denkmalpflege* 63/64-2009/10 (voraussichtlich München 2012). Darin auch der vollständige, den vorliegenden Aufsatz ergänzende Aufsatz zur Baugeschichte der ersten gotischen Bauphase am Dom zwischen 1320 und 1350 von Christian Kayser.
5. Später – die Maßnahme ist leider bisher nicht datierbar – wurden zur Unterstützung der Zerrbalken im Feld kleine Mauerpfeiler aus Ziegeln zwischen der Balkenunterseite und dem Gewölbescheitel eingebaut und die Zerrbalken damit auf die Gewölbe abgestützt.
6. Im Rahmen der dendrochronologischen Untersuchungen der Konstruktionshölzer durch das Büro Gschwind konnten zumindest einzelne Teile des Seitenschiffdachwerkes auf der Nordseite dieser Bauphase zugewiesen werden. Die heutigen Pult- und Walm-dächer entstanden allerdings erst im Verlauf des 15. Jahrhunderts.
7. Haas, Walter: Die alten Obergadenfenster des Augsburger Domes : der ursprüngliche Ort der „Prophetenfenster“, In: *Jahrbuch der bayerischen Denkmalpflege*, 28.1970/71(1973), 101-108
8. Vermuteter Baubeginn am Ostchor – das Nordportal ist inschriftlich auf 1343 datiert.
9. Chevalley 1995, 144
10. Ihr Einbau erfolgte zumindest nicht im Rahmen der „Instandsetzungen der 20er Jahre: „Sie [die Untermauerungen] wurden deshalb in früherer Zeit durch kleine Gegenbogen vom Mittelschiff her gestützt.“ Protokoll Dombaumeister Schmitz, Archiv Staatsbauamt Augsburg, 26.01.1926
11. Nähere Untersuchungen ergaben ferner, dass die ganze aus dem 14. Jahrhundert stammende Konstruktion der Seitenschiffe als mangelhaft und verfehlt bezeichnet werden muss“. Besprechungsprotokoll Dombaumeister Schmitz, Archiv Staatsbauamt Augsburg, 26.01.1926
12. Ebd.
13. Ebd.: „Nach Ansicht des Herrn Geheimrat Hager [des betreuenden Statikers] dürfte von einer Verstärkung abgesehen werden, weil die Wirkung, die man sich von einer Verbreiterung versprechen kann, in keinem Verhältnis steht zu den mit diesen Arbeiten verbundenen Gefahren und Kosten“
14. MAN, Erläuterungsbericht zu den Verschläuderungen vom 2. Mai
15. ebd., sowie Angebot zur Lieferung und Ausführung der Verschläuderung vom 30. April 1927
16. 22.05. 1926, Protokoll: „Es wurde deshalb beschlossen, zunächst durch genaue Messungen und Beobachtungen festzustellen, ob die Bewegungen an der Außenmauer und an den Zwischensäulen [...] noch andauern oder ob sie zur Ruhe gekommen sind.“
17. Schreiben an die TH München, 19.06.1926, sowie Schreiben an das Landbauamt Augsburg, 20. 05. 1926
18. ebd. sowie Protokoll 29.12.1926
19. Aufmaß Vermessungsbüro Hans-Jörg Blume, Garching
20. Jagfeld, Matthias; *Tragverhalten und Berechnung gemauerter Gewölbe bei großen Auflagerverschiebungen*; München / Aachen; 2000