

---

**Kölner Beiträge zur Baugeschichte und Denkmalpflege  
Band 6**

# **Die Bartholomäuskapelle in Paderborn Geometrie, Konstruktion und Entwurf der Gewölbe und des Innenraums**

**Jost-Michael Broser**

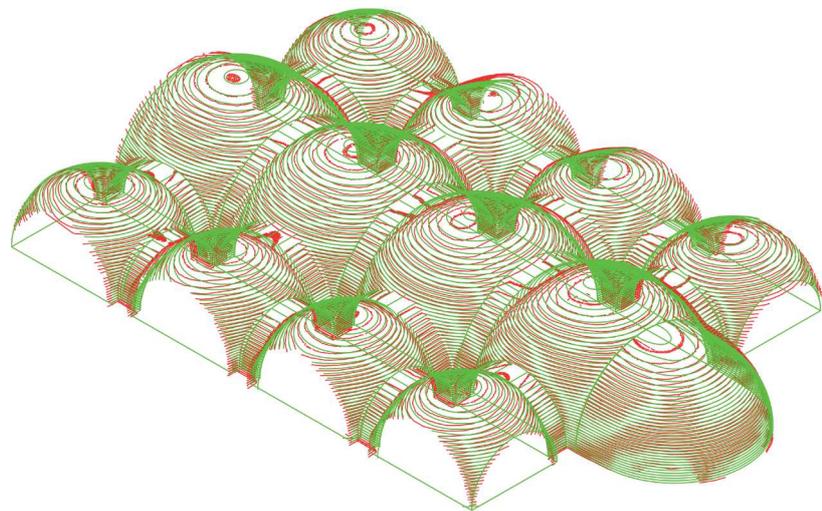
**Technology**  
**Arts Sciences**  
**TH Köln**

JOST-MICHAEL BROSER

# DIE BARTHOLOMÄUSKAPELLE IN PADERBORN

## GEOMETRIE, KONSTRUKTION UND ENTWURF DER GEWÖLBE UND DES INNENRAUMS

Technology  
Arts Sciences  
TH Köln



Kölner Beiträge zur Baugeschichte und Denkmalpflege  
Band 6

Jost-Michael Broser

**Die Bartholomäuskapelle in Paderborn  
Geometrie, Konstruktion und Entwurf der Gewölbe und des Innenraums**

Köln, März 2023

ISSN: 2700-953X

URN: urn:nbn:de:hbz:832-cos4-9988

DOI: 10.57684/COS-998

Die Reihe „Kölner Beiträge zur Baugeschichte und Denkmalpflege“ ist eine wissenschaftliche Schriftenreihe des Schwerpunktes Denkmalpflege an der Fakultät für Architektur der TH Köln. Sie dokumentiert die wissenschaftliche Praxis in den Arbeitsfeldern der Denkmalpflege, Baugeschichte und Kunstwissenschaften.

Die Verantwortung der Beiträge liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Herausgeber:

Prof. Dr. Norbert Schöndeling

Prof. Dr. Daniel Lohmann

Prof. Dr. Petra Sophia Zimmermann

Technische Hochschule Köln

Fakultät für Architektur

Betzdorfer Straße 2

50679 Köln

<http://www.th-koeln.de>

<http://akoeln.de>

Schriftleitung:

Prof. Dr. Daniel Lohmann

[daniel.lohmann@th-koeln.de](mailto:daniel.lohmann@th-koeln.de)

+49 221 8275 2828

Autor:

Dipl.-Ing. (FH) Jost-Michael Broser

[jost.broser@th-koeln.de](mailto:jost.broser@th-koeln.de)

Dieser Band wurde als elektronisches Dokument über Cologne Open Science publiziert, den Hochschulserver der Technischen Hochschule Köln. Abruf unter: <http://cos.bibl.th-koeln.de>

	Seite
Vorwort .....	1
Einleitung .....	2
Eine kurze Baugeschichte .....	3
Die Dokumentation .....	5
Deformationen und deren Ursachen.....	9
Geometrische Konstruktion .....	18
Maße und Proportionen.....	28
Betrachtungen über die Bauausführung der Gewölbe.....	34
Zusammenfassung und Ausblick .....	40
Abstract .....	40
Bibliographie .....	41
Quellen.....	44
Abbildungsnachweise .....	45

Der Innenraum der Bartholomäuskapelle in Paderborn stellt in vielerlei Hinsicht eine Besonderheit dar. Im frühen elften Jahrhundert erbaut, gilt sie als die erste Hallenkirche nördlich der Alpen. Ihr harmonischer, heute sehr authentisch überlieferter Innenraum wird maßgeblich durch die in unseren Breitengraden besonders seltene Form der Gewölbe bestimmt, für die die frühromanischen Baumeister zwölf Hängekuppeln einsetzten. Die Kunst des Wölbens hatte im frühen Mittelalter wieder an zentraler Bedeutung für sakrale Innenräume gewonnen, und im Dom zu Speyer sollte einige Jahrzehnte später wieder erstmals seit der Antike ein weitspannender, monumentaler Innenraum mit Gewölben überdeckt werden. Der einzigartige Innenraum der Bartholomäuskapelle existierte zu diesem Zeitpunkt bereits. Er beeindruckt bis heute nicht nur durch seine besondere Harmonie in der Proportion, sondern auch durch seine hervorragende Akustik.

Grund genug, die Architektur der Kapelle genauer zu erforschen. Hierzu unternimmt Jost Broser seit einiger Zeit in einem Forschungsverbund Untersuchungen zur Geometrie und Konstruktion der Kapelle. Er nutzt hierfür die Mittel und Methoden der historischen Bauforschung, wodurch in vorbildlicher Weise deren Systematik deutlich wird: Durch das akribische und präzise objektive Studium des Bauwerks selbst als wichtigste Quelle, wird es möglich, aus dem heutigen Ist-Zustand analytisch Schritt für Schritt die Architektur bis zu ihrer Bauidee hin zu ergründen. Hierzu fertigte der Autor in Zusammenarbeit mit Ekkehard Kandler ein detailliertes verformungsgetreues Bauaufmaß aller Teile der Kapelle an. Schon im ersten Schritt der Verformungsanalyse offenbarte sich in den schwereren Gewölben der Seitenschiffe eine erste neu entdeckte konstruktive Besonderheit, die Jost Broser überzeugend als Auflast interpretiert, und somit als wohl schon bauzeitlichen Versuch, den Gewölbeschub des Mittelschiffs zu neutralisieren. Weitere konstruktive Eigenschaften werden durch die Ergänzung des Bauaufmaßes um andere Primärquellen ergänzt: Historische Dokumente, die das Wissen über den heutigen Baubefund um nicht mehr sichtbare Bereiche ergänzen. Hier sind insbesondere die wertvollen Fotografien aus den Restaurierungsmaßnahmen der Nachkriegszeit zu erwähnen, durch die die Mauertechnik der Gewölbe greifbarer wird.

Die Verformungsanalyse bot nun die Grundlage, die ursprünglich geplante Geometrie zu erkennen und eine zeichnerische Rekonstruktion der Kapelle in ihrer Idealform anzufertigen. Dies ist nicht etwa als Basis für eine Reparatur oder bauliche Wieder-

herstellung zu verstehen, sondern vielmehr ein notwendiger Schritt, um über die Geometrie und Proportion des romanischen Ursprungsentwurfes nachzudenken. Es entsteht die Möglichkeit einer verlässlichen Maß- und Proportionsanalyse, die für Erklärungsmodelle und eine Einordnung in die Architekturtheorie des frühen Mittelalters taugt.

Der nun vorliegende Aufsatz stellt einen Zwischenstand von Jost Brosers umfassenden Überlegungen zur Geometrie, Entwurfsfigur und Konstruktion der Kapelle dar. Er bietet uns ein in sich überzeugendes Erklärungsmodell für eine mögliche euklidische Konstruktion der Grundgeometrie der Kapelle. Sie – oder eine vergleichbare – diente den Baumeistern zur Herstellung einer inneren mathematischen Ordnung, innerhalb derer die Einzelteile in ein möglichst ganzzahliges Verhältnis zueinander gesetzt wurden. Entsprechend der Überzeugung romanischer Baumeister war damit das Ziel verbunden, über die Proportion der Teile eine göttliche Harmonie und Schönheit für das Ganze zu erreichen. Die Übersetzung in ein praktikables Fußmaß auf der Baustelle war dann der pragmatische letzte Schritt, für den Jost Broser eine ebenso glaubwürdige Interpretation bietet.

Ihm gelingt es, mit klarer Sprache die komplexen Gedankengänge und Herleitungen präzise zu erklären. Sie erscheinen daher nachvollziehbar und überzeugend. In der konsequenten Verfolgung der analytischen Arbeitsschritte vom großen Ganzen bis ins Detail entsteht durch seine Studie zur Bartholomäuskapelle ein wertvoller Beitrag zur Ideengeschichte der Romanik.

Daniel Lohmann

Die Bartholomäuskapelle in Paderborn ist ein in mehrfacher Hinsicht außergewöhnliches Bauwerk. Die Ausbildung der Gewölbe des Innenraums verleiht ihr sogar ein Alleinstellungsmerkmal in der Architektur nördlich der Alpen. Die Kapelle wird auch als die älteste Hallenkirche Deutschlands bezeichnet<sup>1</sup>. Für die Bauzeit wird das frühere 11. Jahrhundert angenommen, eine eindeutige schriftliche Quelle für diese Datierung existiert jedoch nicht. Der äußere Eindruck wird zwar geprägt von Restaurierungsphasen des 19. und 20. Jahrhunderts, entspricht aber zu großen Teilen wohl dem originalen Erscheinungsbild.<sup>2</sup> Die nordwestliche Ecke wird heute teilweise von einem Museumsanbau verdeckt (Abb. 1). Eine Besonderheit oder gar „Einmaligkeit“ lässt sich hier nicht erkennen.

Völlig anders präsentiert sich das Innere. Der dreischiffig angelegte Raum wird überwölbt von zwölf Hängekuppeln (Abb. 2), der halbkreisförmige Annexbau der Apsis im Osten besitzt eine Kugelkuppel. Während Hängekuppeln in der Architektur nördlich der Alpen als Seltenheit zu bezeichnen sind, sind sie im Einflussbereich des Byzantinischen Reiches weit verbreitet. Tatsächlich existiert eine ins 11. Jahrhundert datierte Schriftquelle, die in Bezug auf die Erbauer der Kapelle von „operarios graecos“ spricht<sup>3</sup>, denn der Begriff „Byzanz“ taucht erst einige Zeit später in der Historie auf. Eine weitere Besonderheit ist die Akustik des Innenraums mit langen Nachhallzeiten, die sonst nur in wesentlich größeren Anlagen erreicht werden. Diese besondere Akustik erweckt auch heute noch immer wieder das Interesse von Musikern und gab den Anlass für das 3D-Laserscanning der Kapelle (TH Köln, Fakultät für Architektur, Institut für Energieeffiziente Architektur und Institut für Baugeschichte und Denkmalpflege). Untersucht werden sollte der Einfluss der Raumgeometrie auf die akustische Besonderheit. Lassen sich auch Rückschlüsse daraus ziehen, ob dies von den Erbauern bereits so beabsichtigt war? Ausgehend vom heutigen Bestand wurden die besonders im Gewölbebereich teilweise erheblichen Deformationen analysiert. Unter deren Berücksichtigung lassen sich Rückschlüsse auf die ursprüngliche Bauplanung und auf die Bauausführung ziehen, was ohne das 3D-Laserscanning kaum möglich wäre. Akustik und Geometrie

– diese Zusammenhänge in architektonischen Räumen sind hinlänglich bekannt. Schon die antiken Theater, noch dazu meist unter freiem Himmel errichtet, sind in ihrer baulichen Anordnung für ein gutes Verständnis der Stimmen der Darsteller ausgelegt.<sup>4</sup> Die Beschäftigung mit der Akustik bei entsprechenden Bauten zieht sich durch die gesamte Architekturgeschichte und hat in der heutigen Zeit einen vorläufigen Höchststand erreicht, indem über Computersimulationen versucht wird, die akustischen Bedingungen in einem noch zu bauenden Raum, z. B. einem Konzertsaal, vorauszusehen.<sup>5</sup>



Abb. 1  
Westfassade



Abb. 2  
Hängekuppeln im Kapelleninnenraum

1 FUCHS 1953: S. 581

2 HUYER 2018: S. 162

3 MIETKE 1991, S. 19 und BALZER 2018: S. 13

4 z.B. VON GERKAN/MÜLLER-WIENER 1961

5 z.B. Akustik-Planung Elbphilharmonie

Nach der Vita Meinweri (entstanden um 1165) erfolgte der Bau der Bartholomäuskapelle in der Amtszeit von Bischof Meinwerk, also irgendwann zwischen 1009 und 1036 durch „*graecos operarios*“ (siehe oben). Es wird kein genaues Datum für den Bau oder die Weihe erwähnt. Die in der Fachliteratur oft erwähnte Bauzeit „um 1017“ bezieht sich auf eine wahrscheinliche chronologische Reihenfolge der einzelnen Kapitel der Vita Meinweri in Bezug zu anderen dort erwähnten Jahreszahlen.<sup>1</sup>

Nach einer Urkunde von 1336 erfolgten durch eine Domherrenkurie einige Umbauten (Vermauerung der Fenster an der Südseite und Anordnung von zwei zusätzlichen Fenstern in der Apsis, auch Änderungen an der Nordseite?). „Die Kapelle war also damals in ein Wohnhaus eines Domherren eingekapselt und zwar so, dass im Süden, Westen und Norden die Wohngebäude hufeisenförmig die Kapelle umschlossen“.<sup>2</sup>

Seit Ende 1580 befand sich das Gebäude im Besitz der Jesuiten,<sup>3</sup> die es 1589 mit einem neuen Zelebrationsaltar ausstatteten.<sup>4</sup> Im Jahre 1603 erfolgte die Errichtung eines neuen Altares mit einer Statue der seligen Jungfrau, und ihr zur Seite standen die hl. Margareta und die hl. Kaiserin Kunigunde.<sup>5</sup> Das Dach der Kapelle war 1645 dringend renovierungsbedürftig und so stark von Regen und Schnee beschädigt, dass sogar der Einsturz drohte.<sup>6</sup> Im Oktober 1659 wurde eine Dachreparatur nicht oder nicht umfassend ausgeführt, 1689 kam es zu einer erneuten Aufforderung zur Dacherneuerung an die Jesuiten.<sup>7</sup>

1806 fand der vorest letzte Gottesdienst statt, 1806/07 wurde die Kapelle zu einem sogenannten Fleischmagazin. Mit nachlassender Intensität erfolgte dann bis 1812 wieder die Nutzung für Gottesdienste und 1813 nach der Requirierung durch die Behörden wieder als Fleischmagazin. 1818 erfolgte der Anbau eines Stalls an die Nordost-Ecke und alle Fenster der Kapelle wurden zugemauert.<sup>8</sup> 1810 könnte es eine Reparatur an der Südmauer sowie eine Dachausbesserung gegeben haben.<sup>9</sup>

Infolge der Erfassung der Denkmäler im Königreich Preußen, die im Rahmen der Auflistung für den Regierungsbezirk Minden 1822 erfolgte, kam es in den folgenden Jahren zu Reparaturarbeiten insbesondere im Dachbereich.<sup>10</sup> Einen direkten Anlass hierzu bot 1823 der Besuch des preußischen Kronprinzen.<sup>11</sup> Ab 1827 kam es zu ersten Aufräum- und Renovierungsarbeiten: Wegnahme des Schutts, Trockenlegung durch einen Graben, das Innere gereinigt und ausgeputzt, Ausgleich des unebenen Bruchsteinfußbodens mit einem Kalkguß, „wodurch die Tafeln der Säulenfüsse ein wenig von ihrer Höhe verloren“.<sup>12</sup>

Ab 1834 konnte die Kapelle wieder für Gottesdienste genutzt werden, mit einem neuen Altaraufsatz. 1835 erfolgte dann der Einbau von Scheiben für die seitlichen Apsisfenster und die Öffnung des mittleren, mit Backsteinen verschlossenen Apsisfensters.<sup>13</sup>

Weitere Reparatur- und Umbauarbeiten erfolgten von 1858 bis 1864: Ausflickung der Wände und Gewölbe, Neuverputzung, Ausbrechung des Fußbodens und Einbringung eines neuen Bodens aus Zinderguß, Einfügung großer Bogenfenster in den beiden mittleren Achsen der Nordwand und in den drei östlichen Achsen der Südwand, Öffnung der Fenster in der jeweiligen Ostwand der Seitenschiffe, Einbau von zehn neuen Fenstern mit Bleiverglasung, Erstellung eines neues Dachs über der Apsis und Reparatur des Satteldaches, Zumauerung der beiden seitlichen Apsisfenster, Entfernung des Putzes.<sup>14</sup>

1896 erfolgte der Abriss der angrenzenden Bebauung mit Ausnahme des Narthex. Die Kapelle stand also völlig frei, ausgenommen der untere Bereich der Westfassade. Danach kam es zu Verputzarbeiten an Teilen der Außenwände.<sup>15</sup>

Von 1907 bis 1909 erfolgten Umbaumaßnahmen, die vor allem das äußere Erscheinungsbild der Kapelle veränderten. An der Nord- und Südwand wurden die noch zugesetzten Fenster aufgebrochen und zu großen Rundbogenfenstern erweitert, an der Westwand zwei Dreiergruppen von Rundbogenfenstern im Giebfeld eingebaut und

1 MIETKE 1991: S. 19 und BALZER 2018: S. 13

2 SCHMALOR 2018: S. 110, nach FUCHS 1958: S. 12

3 HUYER 2018: S. 164 Anm. 1

4 WERZ 2018: S. 105

5 WERZ 2018: S. 106, nach SANDER 2011: S. 306f

6 WERZ 2018: S. 108

7 HUYER 2018: S. 164 Anm. 1

8 HUYER 2018: S. 140

9 HUYER 2018: S. 164 Anm. 4

10 HUYER 2018: S. 141

11 SCHMALOR 2018: S. 113

12 HUYER 2018, S. 142

13 HUYER 2018: S. 143

14 HUYER 2018: S. 144/145 und S. 167 Anm. 75

15 HUYER 2018: S. 146

an der Nordwand drei Strebepfeiler angebracht.<sup>16</sup> Ab ca. 1920 wurde die Kapelle wieder für Andachten genutzt. In diesem Zusammenhang wurde der Raum „von allem Unrat gereinigt, geputzt und verputzt, er wurde nicht nur frisch getüncht, sondern es wurden sogar auch - unter fachkundiger Aufsicht - die prachtvollen Säulen mit den edlen Kapitellen von falscher Ölfarbe gesäubert und aufs feinste herausgearbeitet“.<sup>17</sup> Der vorhandene Altar wurde 1923 durch einen neuen ersetzt, der 1926 eine Verschiebung um ca. 1m nach Westen erfuhr.<sup>18</sup> Im Herbst 1926 erfolgte dann der Rückbau des Altars in die Apsis.<sup>19</sup> Höchstwahrscheinlich stellt dies die heutige Situation dar. Um diese Zeit könnte auch der heute noch vorhandene Bodenbelag eingebracht worden sein, denn ein Foto von 1899 (Abb. 14) zeigt einen anderen, parallel zu den Wänden verlaufenden Plattenbelag in einem wohl einheitlichen quadratischen Format, während ein Foto von 1953 den heute noch existierenden, diagonal orientierten Plattenbelag mit unterschiedlichen Rechteck-Formaten darstellt (Abb. 15).

1955 begannen die vorerst letzten größeren Restaurierungsarbeiten an der Kapelle, ausgelöst wohl von Rissbildungen durch Explosionsdruck aus der Zeit des 2. Weltkriegs. Nach Entfernung des Putzes an den Gewölberissen stellte sich heraus, dass in einer früheren Restaurierungsphase der Verputz bis zu einer Fugentiefe von 5 bis 8cm Tiefe abgenommen worden war. Die Kriegsschäden erforderten eine erneute Entfernung des gesamten Innenputzes, was an der Nord- und Südwand zu der Entdeckung von Resten der kleineren und höher liegenden Rundbogenfenster führte. Nach weiteren Untersuchungen entschloss man sich, nach der statischen Sicherung durch eine Stahlbetonkonstruktion oberhalb der Gewölbe und dem Abriss der angefügten Strebepfeiler,<sup>20</sup> diese kleineren Fenster als höchstwahrscheinlich zur original Bau-substanz gehörend wieder herzustellen. An der Ostwand wurden die zugesetzten Fenster wieder freigelegt, ebenso an der Westwand die Nische innen über dem Eingang.<sup>21</sup> Im Herbst 1964 erfolgte dann noch der Einbau der heute noch vorhandenen Fenster. Im Zuge der Planung für das Museum

in der Kaiserpfalz erfolgte dann 1977 der Abriss des Narthex an der Westseite, 1978 wurde die heute noch vorhandene Bronzetür eingebaut.<sup>22</sup> Der Museums-Neubau führte zu einer Verdeckung der Nordwestecke und großer Teile der Nordwand an der Bartholomäuskapelle.

16 HUYER 2018: S. 151

17 HUYER 2018: S. 151, nach einem Beitrag von Elisabeth Mann, in: Westfälisches Volksblatt vom 23. Juni 1972; AMP, B.

18 HUYER 2018: S. 154

19 KOPP 2018: S. 126

20 BUSEN 1963: S. 273 - 279

21 BUSEN 1963: S. 289 - 295

22 HUYER 2018: S. 161

Eine hochgenaue Erfassung der Kubatur des Bauwerks bildet die Grundvoraussetzung aller hier vorgestellten Untersuchungen. Nach heutigem Stand der Technik ist dies am besten mit terrestrischem 3D-Laserscanning zu bewerkstelligen. Das Institut für Baugeschichte und Denkmalpflege an der Fakultät für Architektur verfügt zusammen mit dem Institut für Baubetrieb, Vermessung und Bauinformatik an der Fakultät für Bauingenieurwesen der Technischen Hochschule Köln über ein für diese Zwecke geeignetes Laserscanner-System. Hierbei werden, im Unterschied zu reflektorlos messenden Tachymetern, nicht einzelne Punkte angezielt und gemessen, sondern ausgewählte Bereiche bis zur Größe des den Scanner umgebenden Raumes erfasst. Jedem Messpunkt wird ein Horizontalwinkel, ein Vertikalwinkel und die Entfernung zum Scanner zugeordnet.

Das hier genutzte System (Abb. 3) misst maximal eine Million Punkte pro Sekunde und verfügt über eine hochwertige eingebaute HDR-Kamera zur Einfärbung der Punktwolken. Nach der Registrierung, d. h. der Verknüpfung der Punktwolken der einzelnen Gerätestandorte, liegen alle Messungen in einem gemeinsamen 3D-Koordinatensystem und bilden die Gebäudegeometrie hochgenau ab. Für komplexe, mehrfach gekrümmte und nachträglich verformte Geometrien wie die der Gewölbe in der Kapelle ist dies das zurzeit präziseste und effizienteste Messverfahren. Von den insgesamt 69 Gerätestandpunkten befinden sich 17 im überwölbten Innenraum (Abb. 4) und 25 in dem kleinteiligen Dachbereich, die restlichen Standorte dienten zur Erfassung der äußeren Gestalt der Kapelle. Die Vermessung mit dem 3D-Laserscanner erfolgte zu Beginn des Jahres 2016. Die nahezu vollständige Erfassung der Kapelle von innen und außen erforderte bisher keinerlei Nachmessungen. Ein virtuelles Abbild der Kapelle im Maßstab 1 zu 1 befindet sich somit auf dem Computer und kann für weitere Untersuchungen genutzt werden. So können Details hervorgehoben, Schnitte durch das Gebäude an beliebiger Stelle generiert und Ansichten als Bildpläne erzeugt werden.

Parallel erfolgte die Aufnahme der Außenansichten und von Teilbereichen im Inneren mit dem SfM (Structure from Motion)-Verfahren<sup>23</sup>. Während beim 3D-Laserscanning direkt am Objekt gemessen



Abb. 3  
Laserscannerstandort im Eingang

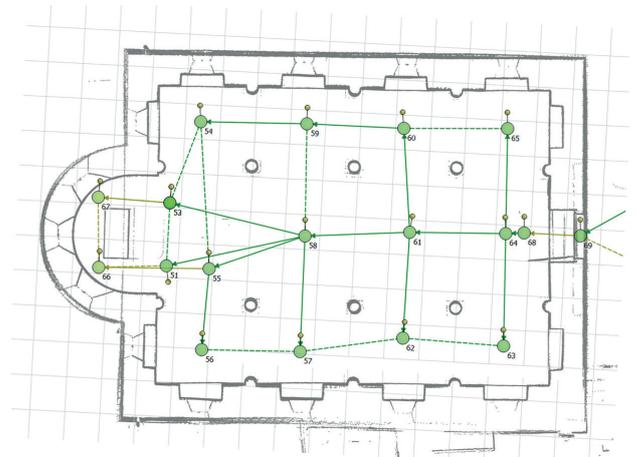


Abb. 4  
Laserscannerstandorte im Innenraum

sen wird, besteht die Dokumentation durch SfM aus Messungen in Fotos des Objektes, also indirekt (Abb. 5). Es wurden fast 1.000 Fotos erstellt und abschnittsweise ausgewertet, was zu hervorragenden Ergebnissen führte, besonders bei der Abbildungsqualität (Abb. 6). Diese ist in der Regel besser als bei 3D-Laserscanning-Systemen, während bei diesen die Stärke in der Genauigkeit der Oberflächenerfassung liegt. Für eine Gesamterfassung des überwölbten Innenraums erwies sich das SfM-Verfahren als ungeeignet.

23 Zu einer ausführlichen Beschreibung des SfM-Verfahrens siehe u.a. POMASKA 2016



Abb. 5  
Screenshot aus der SfM-Auswertesoftware mit Blick auf die West- und Südfassade. Die blauen Rechtecke zeigen die berechneten Standorte der einzelnen Fotos.

Eine erfolgreiche Auswertung setzt strukturierte Oberflächen voraus, was durch die Gleichförmigkeit der Wandflächen mit weißem Anstrich nicht gegeben ist. Die ornamentierten sechs Kapitelle ließen sich dagegen sehr gut erfassen.<sup>24</sup>

Die hier vorgestellten Ergebnisse bezüglich der Raumgeometrie basieren deshalb ausschließlich auf den Messungen des 3D-Laserscanner-Systems. Die Ergebnisse der beiden Messverfahren lassen sich auch kombinieren, so dass die jeweiligen Vorzüge das Ergebnis optimieren können.

Auf die Auswertemöglichkeiten der Laserscannermessungen soll hier noch etwas näher eingegangen werden. Allen „klassischen“ Anforderungen an Architekturpläne, wie das Erstellen von 2D-Darstellungen der Grundrisse, Schnitte und Ansichten, können diese Messdaten als Grundlage dienen. Für Grundrisse werden horizontale dünne Scheiben mit einer Dicke von wenigen Zentimetern, je nach Dichte der Messpunkte, aus der Punktwolke sozusagen ausgeschnitten, in ein CAD-Programm geladen und dort durchgezeichnet, also vektorisiert.<sup>25</sup> Bei den Schnitten geht man genauso vor, hier dann mit vertikalen Scheiben, und es lassen



Abb. 6  
Auswertung mit dem SfM-Verfahren: Ostfassade (oben), Südwestecke als Detail (unten)

24 Bei dem SfM-Verfahren muss der Maßstab des Objektes durch zusätzliche Messungen bestimmt werden, während die Aufnahme mit dem 3D-Laserscanner immer im Maßstab 1 zu 1 erfolgt.

25 Dies geschieht meist immer noch von Hand, da eine Anwendung derzeitiger Vektorisierungsprogramme noch viele Korrekturen erfordert.

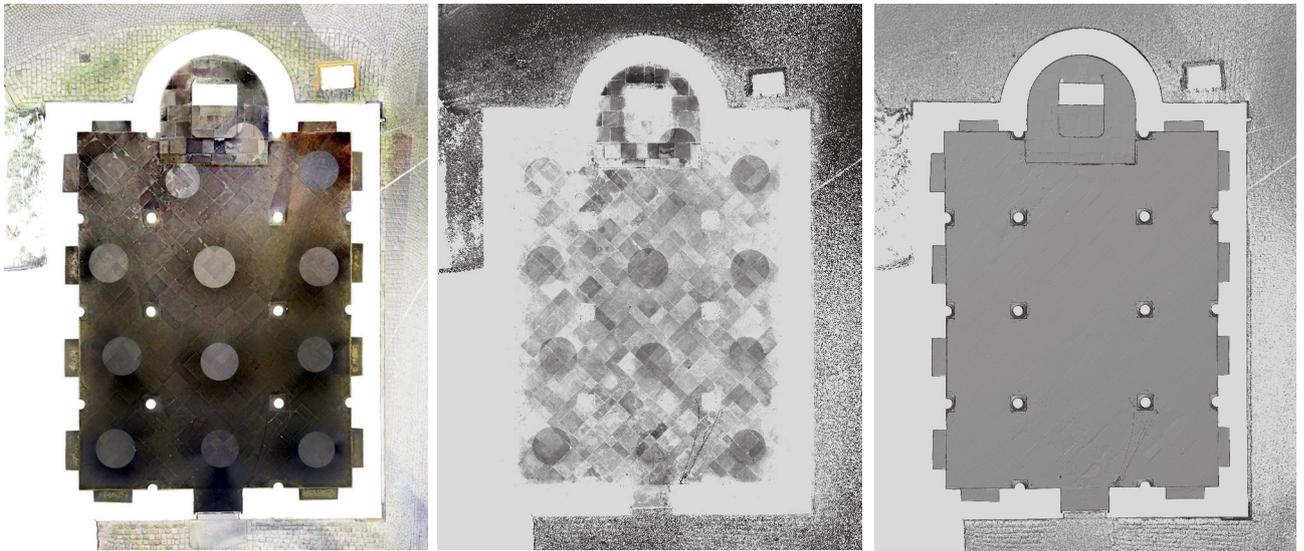


Abb. 7

Darstellung des Bodenbelags aus den Laserscannerdaten: Farbe (links), Reflexionsintensitäten (Mitte) und Spot-Ansicht (rechts). Die Kreise bezeichnen an den einzelnen Standpunkten den sogenannten Scanner-Schatten, den Bereich direkt unter dem Gerät, der konstruktionsbedingt nicht messbar ist, die Messwerte beziehen sich hier auf die anderen Standpunkte mit unterschiedlichen Belichtungen

sich bei Bedarf auch Scheiben in jeglicher Schräglage generieren. Hier wird einer der großen Vorteile dieses Messverfahrens deutlich. Während beim herkömmlichen Bauaufmaß die genaue Lage der Grundrisse und Schnitte vor dem Messvorgang festgelegt werden muss, kann dies hier im Nachhinein an beliebiger Stelle erfolgen, vorausgesetzt, das Bauwerk, oder zumindest der zu bearbeitende Bereich, ist nahezu vollständig mit dem Laserscanner erfasst worden.

Eine weitere Möglichkeit der Auswertung ist besonders für Ansichten geeignet, auch für die Wandansichten bei Schnitten und die Aufsicht auf Bodenbeläge. Hierbei werden Parallelprojektionen der Objekte direkt aus der Punktwolke erzeugt, sogenannte Orthofotos. In den Schnittdarstellungen und den Aufsichten von Bodenbelägen können diese auch mit den o. g. Schnitten aus der Punktwolke kombiniert werden. Das Ergebnis sind Pixelbilder in unterschiedlichen Darstellungsmöglichkeiten wie Farbe, Graustufen<sup>26</sup> und den sogenannten Spot-Ansichten, wobei eine vermaschte Oberfläche<sup>27</sup> von einem virtuellen Licht-Spot (daher der Name) angestrahlt und ein Schattenwurf erzeugt wird, was zu einer plastischen Flächendar-

stellung führt (Abb. 7).

Die Ergebnisse aus 3D-Laserscanning und SfM-Verfahren lassen sich auch sehr gut kombinieren. Da bei diesem Objekt die Laserscannerdaten vorliegen, lässt sich die Maßstabsbildung der SfM-Auswertungen hochgenau durchführen (Abb. 8).



Abb. 8

Kombination von SfM-Verfahren (Ansicht der Giebelinnenseite) und Laserscanning (hier als Spot-Ansicht).

26 Mit Graustufen ist hier die Darstellung der Intensität des vom Objekt reflektierten Lichts der einzelnen Messungen des Laserscanners gemeint

27 Als eine Ansammlung einzelner Punkte besitzt eine Punktwolke keine Oberfläche, diese entsteht erst durch das Erzeugen von Dreiecken zwischen benachbarten Punkten (Dreiecksvermaschung).

Die Anordnung der Gewölbe des Innenraums verleiht der Bartholomäuskapelle ein Alleinstellungsmerkmal in der zeitgenössischen Architektur nördlich der Alpen (s. o.) und erfährt hier eine besondere Betrachtung. Die zwölf Hängekuppeln sind in vier Joche und ein Hauptschiff mit zwei Seitenschiffen gegliedert. An der Ostseite ist im Hauptschiff ein Gewölbe in Form einer Apsiskalotte angesetzt. Für die geometrisch genaue Abbildung mehrfach gekrümmter Flächen wie jene dieser Gewölbe ist das 3D-Laserscanning die zur Zeit genaueste Messmethode. Unebenheiten im Bereich von wenigen Millimetern lassen sich so feststellen. Wie bei den schon erwähnten Spot-Ansichten kann die Punktwolke, welche mathematisch gesehen keine Fläche hat, über eine sogenannte Dreiecksvermaschung<sup>28</sup> mit Flächen versehen werden, eben lauter kleinen Dreiecken. Hierbei bekommen diese auch eine Farbe zugewiesen, welche aus einer Mischung der Farbwerte der Messpunkte besteht, welche die drei Eckpunkte des einzelnen Dreiecks bilden.

Nun stellt sich die Frage, wie die Gewölbeflächen am sinnvollsten dargestellt werden können. Als mehrfach gekrümmte Flächen lassen sie sich nicht in einer Ebene abwickeln, wie es z. B. bei einem Zylinder möglich ist. Naheliegend ist die schon erwähnte Orthogonalprojektion, die sich auch problemlos mit Grundriss- und Schnittdarstellungen verknüpfen lässt. Bei bemalten Gewölben und anderen Deckenformen sind sogenannte Untersichten üblich, da so der Eindruck eines die Decke von unten Betrachtenden erweckt wird. In diesem Fall erscheint dies aber eher ungünstig, da die Grundrisse dann sozusagen gespiegelt werden müssten. Somit werden hier alle grundrissbezogenen Gewölbedarstellungen in der Aufsicht<sup>29</sup> gezeigt, wenn nichts anderes erwähnt wird (Abb. 9). Eine Gewölbeaufsicht aus den Laserscannermessungen in der Darstellungsform der Reflexionsintensitäten zeigt deutlich die Rissbildungen im Verputz (Abb. 10). Trotz der umfangreichen Sicherungsmaßnahmen Anfang der sechziger Jahre des vorherigen Jahrhunderts treten also immer noch Bewegungen auf.

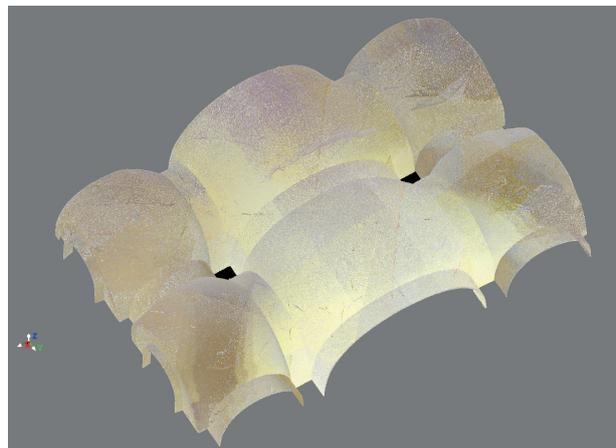


Abb. 9  
Schräg-Aufsicht auf die beiden mittleren Gewölbejoche

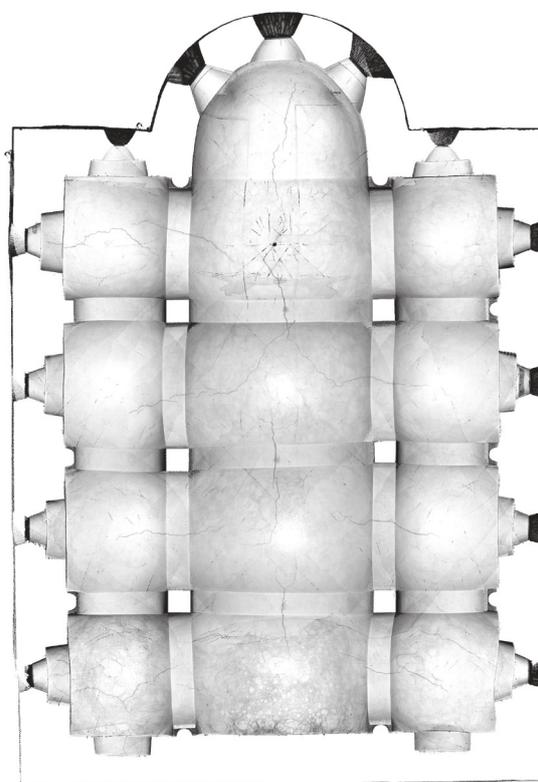


Abb. 10  
Rissbildungen im Verputz der Gewölbe (Darstellung der Reflexionsintensitäten der Laserscannermessungen)

28 Siehe Anm. 4

29 Für einen Betrachtenden stellt sich das Gewölbe so natürlich nie dar, die betrachtende Person bräuchte schon einen Röntgenblick durch das Baumaterial.

Anhand der Laserscanner-Daten lässt sich die Oberflächenform zwar sehr genau erfassen, jedoch ohne Unterscheidung in tatsächliche, unbeabsichtigte Deformationen oder bewusst oder aufgrund von Fehlern bei der Bauausführung aufgetretene „Anomalien“. Schiefstellungen von Wänden und Säulen sowie Absenkungen im Fußbodenbereich können genau bestimmt werden, sofern von einem lotrechten bzw. horizontalen Aufbau auszugehen ist. Schwieriger wird dies schon bei durchhängenden Gewölben und nicht horizontal errichteten Bauteilen. Rissbildung bietet natürlich immer einen guten Hinweis, jedoch darf im Umkehrschluss bei fehlender Rissbildung nicht auch auf fehlende Deformationen geschlossen werden. Risse können durch spätere Baumaßnahmen überdeckt und die entsprechenden Ursachen beseitigt worden sein, können sich aber immer noch in der Gebäudegeometrie zeigen.

Für die Feststellung von Deformationen als äußerst vorteilhaft erweist sich die Möglichkeit des HerauslöSENS von beliebig dicken Scheiben aus dem Laserscan, hier in horizontaler und vertikaler Richtung, an jeder benötigten Stelle der Gesamtpunktwolke der Laserscans. Die Dicke der Scheiben kann, je nach der Messauflösung an den Oberflächen und dem Darstellungszweck wenige Zentimeter bis mehrere Meter betragen (Abb. 7, 8 und 10). Abweichungen können so relativ oder quantitativ erfasst und visualisiert werden. Bei der Bartholomäuskapelle zeigte sich in den Querschnitten eine deutliche Neigung der Längswände im oberen Bereich nach außen, welcher die innen stehenden Säulen folgen, an der Nordseite etwas mehr als an der Südseite. Im Norden fällt das Gelände zu den Paderquellen hin ab, weshalb wohl die mittelalterlichen Baumeister die Wand hier auch etwas stärker als die Südwand ausgeführt haben. Der Gewölbeschub konnte jedoch durch die Außenwände nicht völlig neutralisiert werden. Für einen der Erbauungszeit entsprechenden romanischen Kirchenbau haben diese eine außerordentlich geringe Stärke,<sup>30</sup> eine weitere Besonderheit dieses Bauwerks. Neben den Schiefstellungen der aufragenden Bauteile treten auch deutliche Absenkungen auf, besonders im nordöstlichen Gebäudeteil. Nun befindet sich die Nordwand ja in Hanglage, und deren Kippung führte 1907 zur Errichtung dreier Strebebögen als Sicherheitsmaßnahme.<sup>31</sup> Im Zuge der 1955 begonnenen Sanierungsmaßnahmen wurden diese wieder entfernt und das gesamte Gewölbe mit einer aufgesetzten Stahlbetonkonstruktion gegen das seitliche Ausweichen gesichert.

Ein neu erstellter Querschnitt durch das südliche Seitenschiff und den angrenzenden Bereich des Mittelschiffs mit Blick in westlicher Richtung auf die mittlere Säulenreihe zeigt ein bemerkenswertes Detail der Gewölbekonstruktion. Es fällt sofort der Unterschied in den Gewölbestärken von Mittel- und Seitenschiff auf, was in nur einer der bekannten bisherigen Bestandserfassungen der Kapelle angedeutet wird<sup>32</sup>. Erwartungsgemäß hätte das Gewölbe mit der größeren Spannweite, also das des Mittelschiffs, auch eine größere Stärke als jene der deutlich kleineren Seitenschiffe haben sollen. Hier verhält es sich jedoch genau umgekehrt. Eine mögliche Erklärung wäre der Versuch der Baumeister, den Gewölbeschub an den Säulen zu neutralisieren, indem die Masse der Seitenschiffgewölbe erhöht wird und so die diagonalen Querkräfte durch eine höhere Auflast in die Senkrechte abgeleitet werden. Nach dem Vergleich der ausschlaggebenden Flächen ist dies auch annähernd gelungen (Abb. 11).

Das Ausweichen der Längswände in den oberen Bereichen lässt sich anhand der Messdaten genau quantifizieren. Wie schon erwähnt, ist hierfür mit ziemlicher Sicherheit der Gewölbeschub verantwortlich, den die

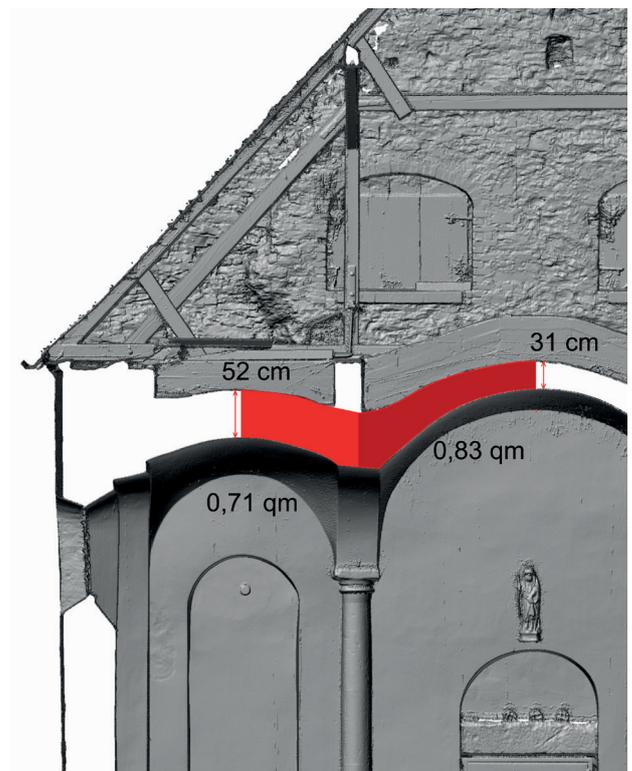


Abb. 11  
Für den Gewölbeschub an einer Säule relevante Flächen (direkt über dem Gewölbe ist die aufgesetzte Stahlbetonkonstruktion zu erkennen)

30 SEDLMAYR 1993: S. 120-124

31 BUSEN 1963: S. 276

32 HUYER 2018: S. 145 Abb. 7

Längswände, trotz der oben erwähnten vermeintlichen Gegenmaßnahme, in der ausgeführten Mauerstärke nicht ausreichend aufnehmen konnten. Die nördliche Außenwand zeigt mit 15 cm, bezogen auf eine Höhe von 6 m, die maximale Abweichung, was wohl mit der dortigen Hanglage zusammenhängt. Auch die Säulen im Inneren folgen diesen Verformungen. Hier liegt das Maximum an der mittleren nördlichen Säule bei 11,5 cm (Abb. 12). Die hieraus resultierende Senkung der Gewölbescheitel, besonders bei jenen im Mittelschiff, führte wiederholt in der Fachliteratur zu der irrigen Annahme, dass es sich um Korbgewölbe bzw. Korbbögen handelt. Eine graphische Annullierung der Deformation zeigt stattdessen die ursprüngliche geometrische Ausführung der Gewölbe und Bögen, nämlich auf der Basis von Halbkreisen (Abb. 13).

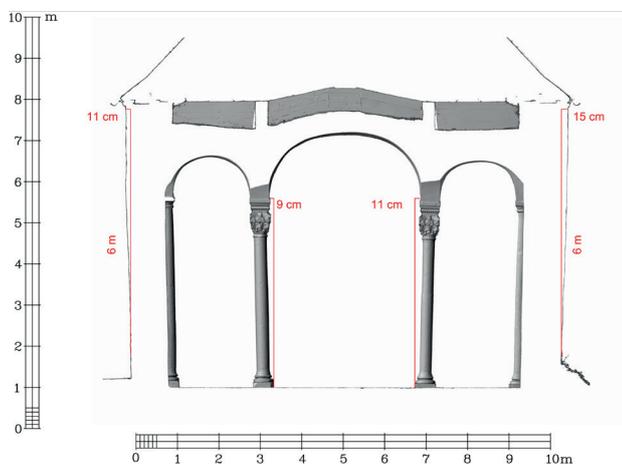


Abb. 12  
Deformationen durch den Gewölbeschub

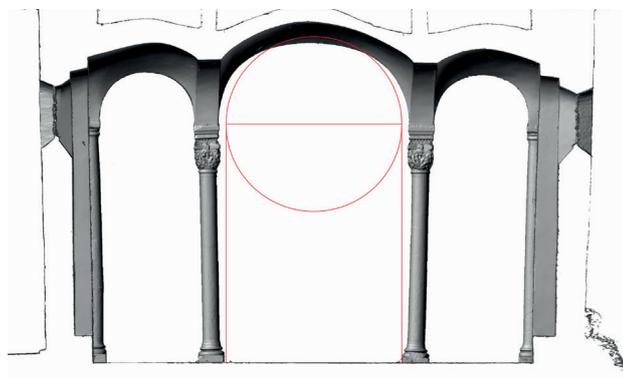


Abb. 13  
Ursprüngliche Ausbildung der Bögen der Gewölbe des Mittelschiffs, schematisiert in Rot dargestellt

Der heutige Fußboden aus diagonal verlegtem, großformatigem Naturstein hat relativ geringe Höhendifferenzen von maximal 3 cm. Die genaue Entstehungszeit dieses Fußbodens ist nicht bekannt. Es existieren allerdings Fotos des Innenraums von 1899, die einen völlig anderen, parallel zu den Wänden verlegten Plattenboden zeigen (Abb. 14), und ebensolche von 1953 mit der Darstellung des diagonal verlegten Bodens (Abb. 15).



Abb. 14  
Innenraum mit Blick auf den Altar, 1899. Der Plattenboden verläuft parallel zu den Wänden (Archiv Metropolitankapitel)

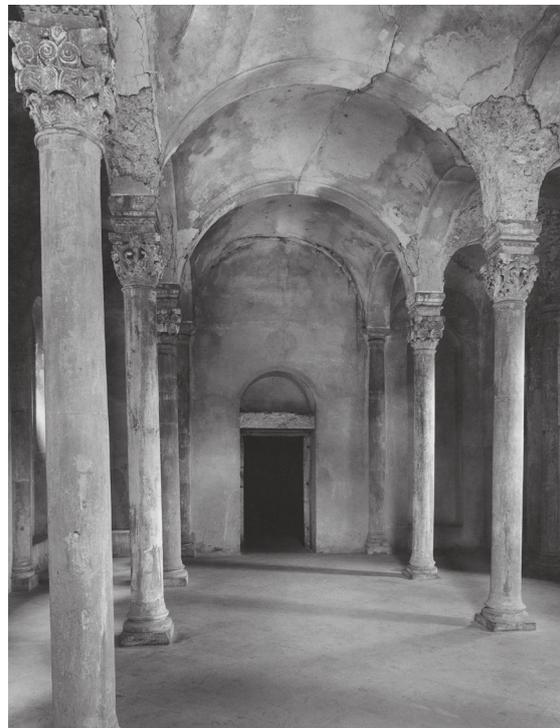


Abb. 15  
Innenraum mit Blick auf den Eingang, 1953. Der Plattenboden ist diagonal verlegt (LWL-Bildarchiv Münster)

Da der heutige Plattenboden somit keinesfalls in die Zeit der Erbauung zurückgeht, kann dieser auch nicht für die Beurteilung von Höhendifferenzen am Bauwerk herangezogen werden. Die Höhen der Basen und Kapitelle der Säulen und Halbsäulen bieten dagegen zuverlässige Anhaltspunkte für die Untersuchung von eventuellen Absenkungen, da sich diese mit größter Wahrscheinlichkeit heute noch in situ befinden. Ein Höhenvergleich lässt sich anhand der Laserscanner-Daten einwandfrei durchführen. Im Vergleich der Oberkanten der Basen liegt die westliche Halbsäule an der Südwand am höchsten und die östliche Halbsäule an der Nordwand am tiefsten, zusammen mit der benachbarten Innenraum-Säule. Die Differenz beträgt 10 cm, an den entsprechenden Kapitellen sogar 15 cm, so dass von einer Absenkung des Gebäudes über die Nordostecke von 10 bis 15 cm auszugehen ist (Abb. 16). Ähnliches lässt sich auch für die Deformation der Gewölbebögen in horizontaler Richtung feststellen. Hier befinden sich die größten Abweichungen an den Nordseiten der

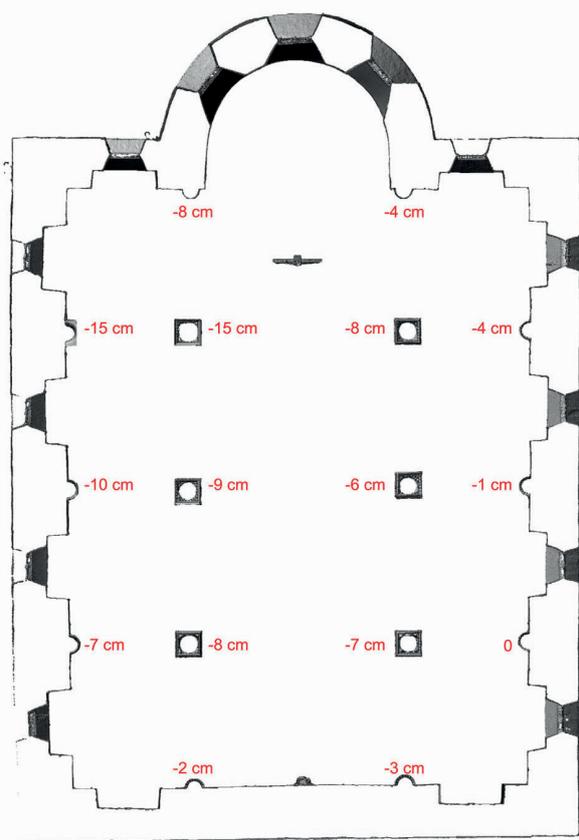


Abb. 16  
Differenzen in den Höhen der Abweichungen der Kapitell-Oberkanten

mittleren Gewölbe des Hauptschiffs (Abb. 17). Diese im Gewölbereich erheblichen Differenzen beziehen sich auf die Maße des Gebäudegrundrisses etwa in der Höhe des Fußbodens, wo eine, wenn überhaupt, nur geringe Verformung durch die statischen Gegebenheiten zu erwarten ist. Vorausgesetzt, die aufgehenden Wände sind senkrecht geplant und auch ausgeführt worden, erfordern die Kippungen der Säulen und Wände eine genauere Betrachtung des gesamten Gewölbes. Wie bereits erwähnt, besteht dieses aus der Apsiskalotte und zwölf Hängekuppeln auf rechteckigem Grundriss, jeweils vier im Mittelschiff und in den beiden Seitenschiffen, mit dazwischen angeordneten Bögen. Hängekuppeln stellen geometrisch betrachtet Halbkugeln dar, die an vier Seiten in vertikaler Richtung gekappt werden, dass eine quadratische oder rechteckige Form entsteht. Im Fall der Bartholomäuskapelle sind es Rechtecke mit der Besonderheit, dass die Gewölbejoche im Mittelschiff in Querrichtung angeordnet sind, jene in den Seitenschiffen dagegen in Längsrichtung (Abb. 18).

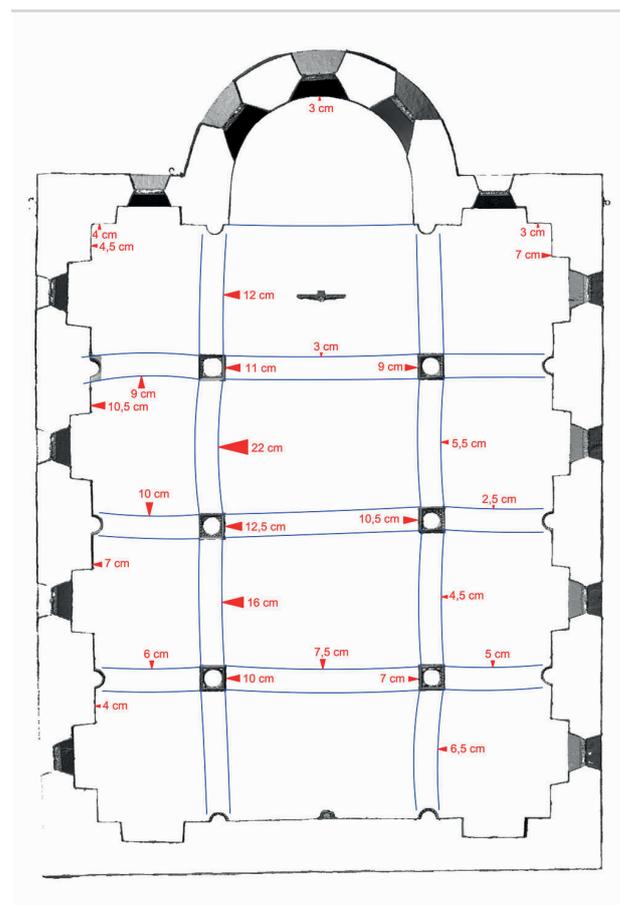


Abb. 17  
Horizontale Abweichungen der Gewölbebögen

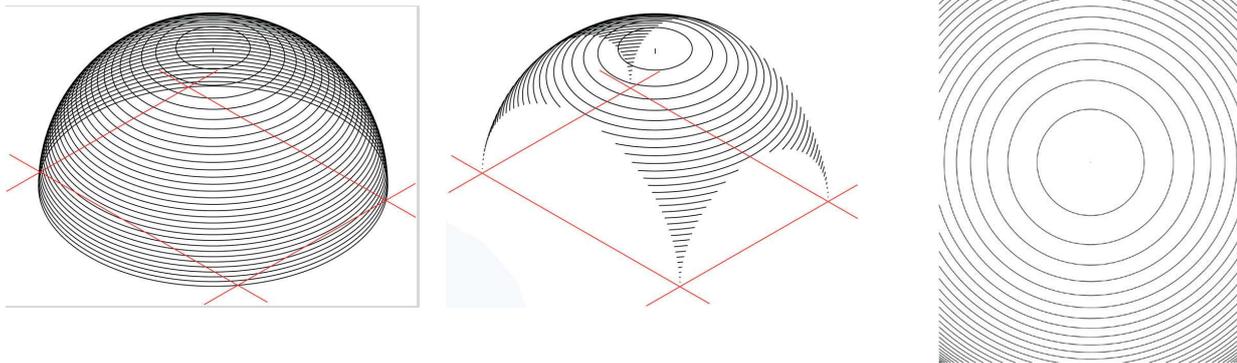


Abb. 18  
Hängekuppel über rechteckigem Grundriss: Halbkugel (links), Kappung an vier Seiten (Mitte) und Aufsicht (rechts)

Erfolgt eine Modellierung des Gewölbes anhand des entsprechenden Ausschnitts aus der Gesamtpunktwolke des Laserscans, lässt sich auch hierfür eine Deformationsanalyse durchführen, indem man in regelmäßigen Höhenabständen Horizontalschnitte anlegt und in der Aufsicht die Flächen zwischen den Linien farblich abstuft, hier von dunkelrot (oben) bis dunkelblau (unten), im Prinzip wie bei den Höhenlinien auf einer Landkarte. Unterschiede zwischen den einzelnen Hängekuppeln mit einem tendenziellen Verlauf der Deformationen sind deutlich zu erkennen (Abb. 19).

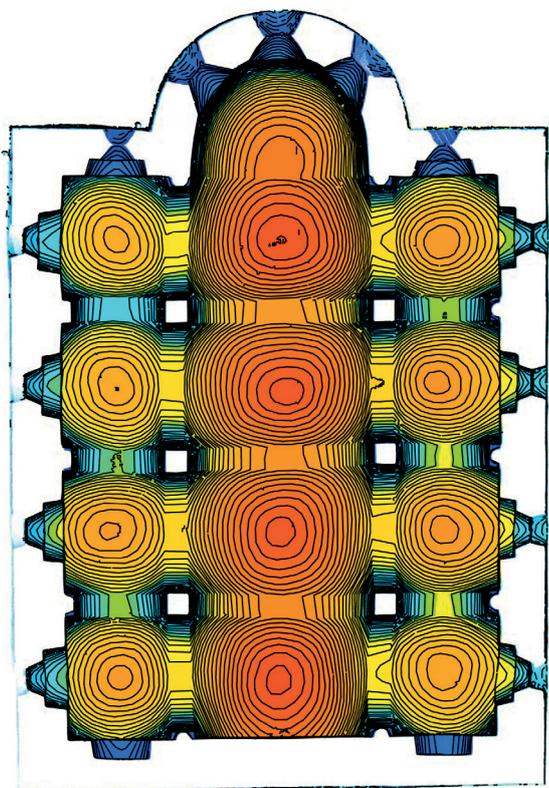


Abb. 19  
Darstellung mit den „Höhenlinien“ der zwölf Hängekuppeln und dem Apsisgewölbe mit den dazwischen angeordneten Bögen, von dunkelrot (oben) bis dunkelblau (unten)

Abweichungen aus der Senkrechten (Kippung) und auf eine horizontale Ebene bezogen (Absenkung) lassen sich, wie hier gezeigt, quantitativ sehr gut erfassen. Schwieriger ist dies bei den gekrümmten Flächen der Gewölbe, für die keine senkrechten oder horizontalen Flächen oder Linien als Referenzobjekte zur Verfügung stehen. Abgesehen von den Deformationen scheint es sich bei der Überwölbung des Innenraums um eine regelmäßige und streng geometrisch angeordnete Struktur zu handeln. Bei einer genaueren Betrachtung zeigen sich jedoch Unregelmäßigkeiten, die nichts mit den Deformationen zu tun haben, sondern baulich bedingt sind. Eine Unterscheidung von Deformationen und baulich bedingten Unregelmäßigkeiten lässt sich nur durch eine Betrachtung der Bauausführung im 11. Jahrhundert unter Berücksichtigung späterer Umbauten bewerkstelligen. Zur Klärung der ursprünglichen Lage und Form des Gewölbes ist es wiederum notwendig, sich den historischen Planungen bzw. Entwurfsideen möglichst anzunähern. Eine genaue Entschlüsselung wird nur in den wenigsten Fällen möglich sein. Um an dieser Stelle fortfahren zu können, benötigt es einen Vorgriff auf das nächste Kapitel, in welchem ausführlich eine mögliche Planung nach geometrischen Gesichtspunkten vorgestellt wird.

Für das Gewölbe ist zuerst die Anordnung der Hängekuppeln und der zwischen diesen angeordneten Bögen von Interesse. Wie schon bei der Betrachtung der schiefstehenden Säulen erkannt, handelt es sich bei letzteren um Kreisbögen (siehe Abb. 13) und bei den Hängekuppeln um Kugelsegmente aus halbkugelförmigen Kuppeln (siehe Abb. 18). Die genauen Maße ergeben sich jeweils aus der geometrischen Konstruktion, wie sie im nächsten Kapitel beschrieben wird, worauf sich die zwölf einzelnen Hängekuppeln und das Apsisgewölbe zusammenfügen lassen. Zu beachten sind die jeweiligen Wandanschlüsse. Während sich auf den Kapitellen der sechs freistehenden Säulen die vier jeweils angrenzenden Hängekuppeln „geometrisch sauber“ treffen,

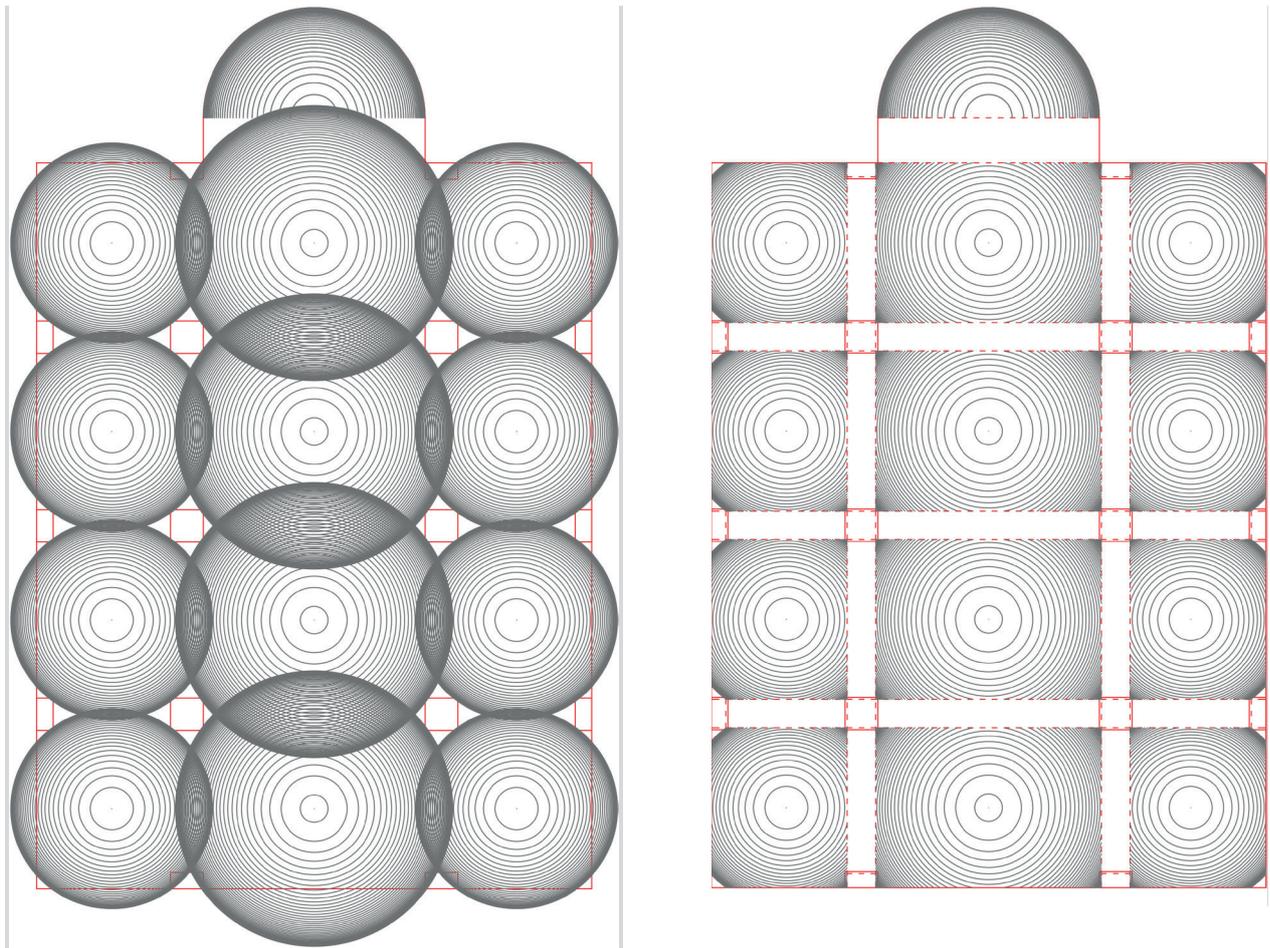


Abb. 20

Anordnung der einzelnen Gewölbe nach einer möglichen geometrischen Konstruktion als Kuppeln (rechts) und entsprechende der vorhandenen Hängekuppeln (links). Die Kapitelle und die Begrenzung des Innenraums sind rot dargestellt, rot –gestrichelt die Bögen.

bleiben bei den Längswänden an den Ecken und Halbsäulen Zwickel übrig. An der Ost- und Westwand sind die Halbsäulen sozusagen eingerückt, von der Geometrie her müssten die Hängekuppeln hier direkt in die Wand laufen (Abb. 20). Diese vor die Wand gesetzten Halbsäulen verkürzen die Spannweite der hier zwischen Mittel- und Seitenschiffen angeordneten Bögen im Vergleich zu jenen, die sich zwischen den freistehenden Säulen befinden. Diese konsequent benutzten geometrischen Abweichungen treten für den Besucher des Innenraums nicht in Erscheinung. Einem aufmerksamen Beobachter mag lediglich das Fehlen von Viertel-Säulen in den vier Raumecken auffallen, was den Innenraum jedoch großzügiger erscheinen lässt. Weder das Fehlen der Gurtbögen an den Längsseiten noch die Unterschiede in den Bogenspannweiten längs des Mittelschiffs stören den einheitlichen Eindruck der Gewölbestructur. Dies zeigt sich besonders deutlich bei der Betrachtung des Längsschnittes (Abb. 21).

An den Längsseiten stellt sich die Situation anders dar. Durch das Fehlen von Viertelsäulen in den Raumecken haben die Gewölbeansätze alle denselben Durchmesser, entsprechend den größeren der oben erwähnten

Bögen (Abb. 22). Nur die beiden mittleren Kuppeln des Mittelschiffs behalten somit ihre geometrisch bedingte Kugelform bei, alle anderen Hängekuppeln weichen davon ab.

Tatsächlich haben die mittelalterlichen Baumeister die geometrisch konstruierten Gewölbe entsprechend gleichmäßig verzogen, um die Unregelmäßigkeiten auszugleichen. An den Anschlüssen der Seitenschiffkuppeln an die Längswände fällt dies besonders auf. Eine Veränderung in der Kugelgeometrie machte die hier zu erwartenden Gurtbögen überflüssig. Ab der Kuppelmitte wurde die Krümmung zu den Wänden hin abgeflacht, um die gewünschte Schnittlinie zwischen Kuppel und Wand erreichen zu können (Abb. 23). Nach der geometrischen Konstruktion liegen die Mittelpunkte der den Seitenschiffen zugrundeliegenden Kugeln immer genau zwischen den Mittelpunkten der zugehörigen Seitenschiffbögen. Vervollständigt man letztere zu einem Kreis, lässt sich der „Kuppelverzug“ über einen Kreisbogen mit dem unteren Schnittpunkt dieses Kreises mit einer gedachten Senkrechten durch den Kugelmittelpunkt als Mittelpunkt geometrisch definieren.

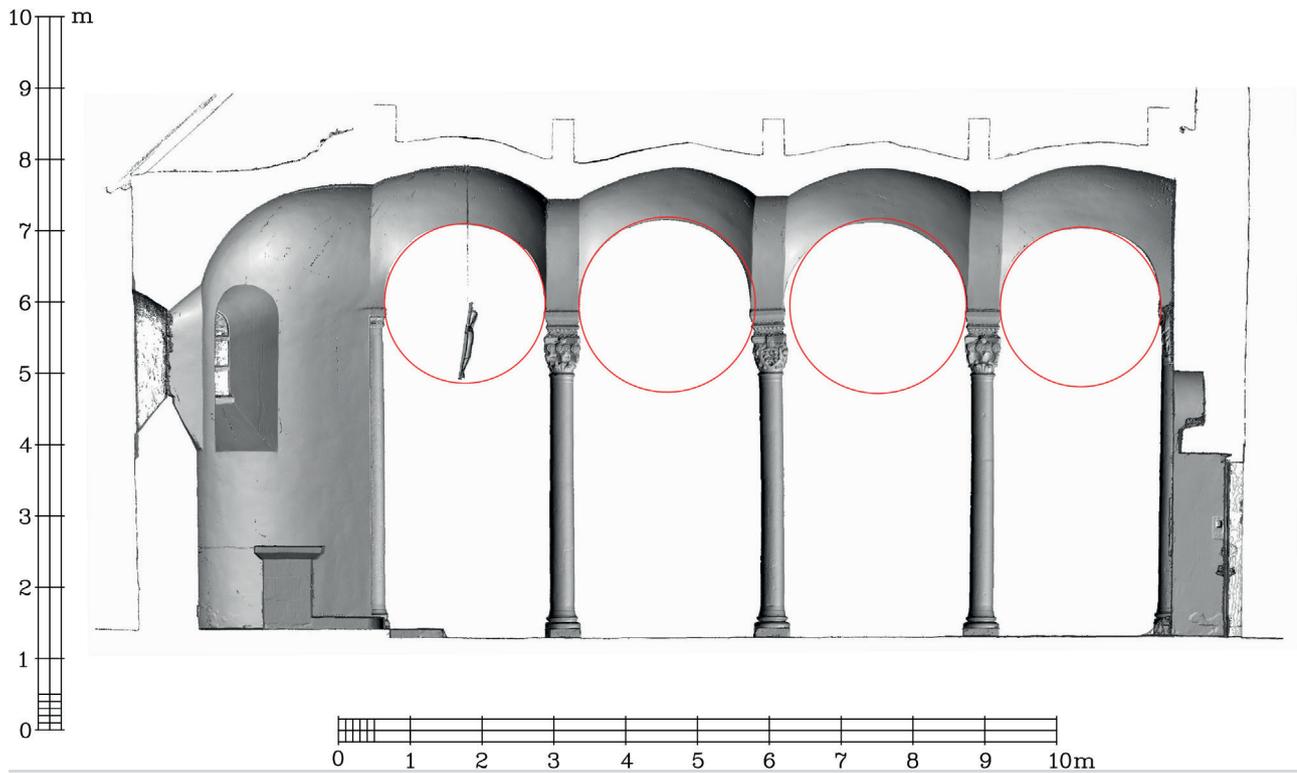


Abb. 21  
Längsschnitt durch das Mittelschiff, Blick nach Süden mit der Darstellung der unterschiedlichen Kreisdurchmesser der Bögen zu dem südlichen Seitenschiff (rot, Größe gemäß geometrischer Rekonstruktion)

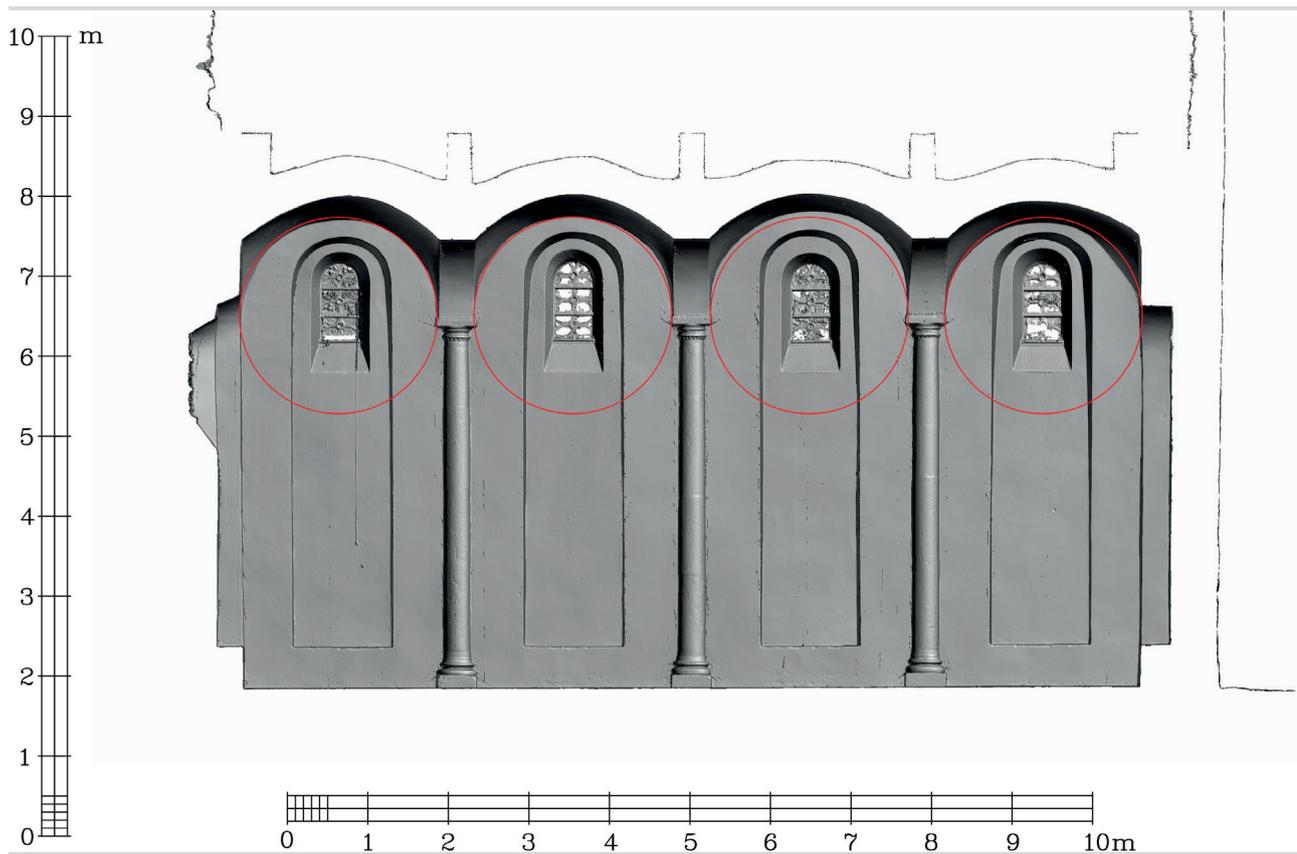


Abb. 22  
Längsschnitt durch das südliche Seitenschiff, Blick nach Süden mit der Darstellung der Kreisdurchmesser der Gewölbeansätze an der Außenwand (rot, Größe gemäß geometrischer Rekonstruktion)

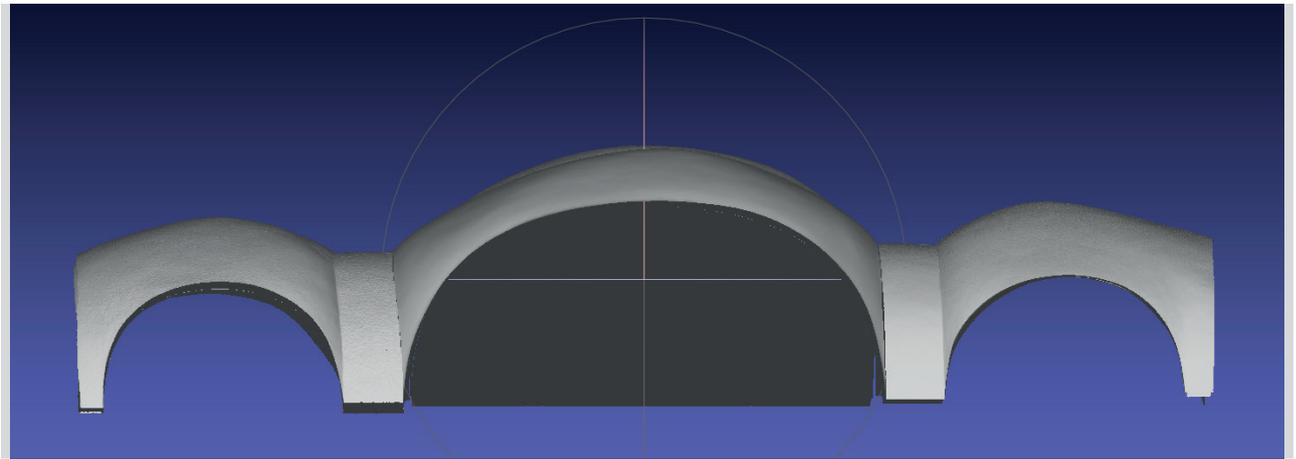


Abb. 23  
Querschnitt mittig drch das Gewölbe mit Blick nach Osten. Das Verziehen der Seitenschiffkuppeln zu dem Ansatz an die Längswänden hin ist deutlich zu erkennen (linke und rechte Seite)

Interessanterweise stehen die Radien von Bogen, Kugel und „Kugelverzug“ im Verhältnis 2 zu 5 zu 8. Es kommt hierbei im Schnittpunkt Längswand und „Kugelverzug“ zu einer Abweichung von 2,5 cm (Abb. 24).

Wie oben erwähnt hat sich nur bei den beiden mittleren Kuppeln des Mittelschiffs planungsbezogen die Kugelform erhalten, deren Durchmesser der Entfernung zwischen den Kämpferpunkten der schräg gegenüberliegenden Bögen zwischen den Mittelschiffkuppeln

entspricht (siehe Abb. 20).

Bei den Anschlüssen der Mittelschiffgewölbe an die Ost- bzw. Westwand tritt ein gewollter Verzug nur im Bereich der Anschlüsse an die Halbsäulen auf und verändert die Gewölbegeometrie nur geringfügig. Die im Bestand deutlich erkennbaren Unregelmäßigkeiten sind hier auf die oben erwähnten Deformationen zurückzuführen (Abb. 25).

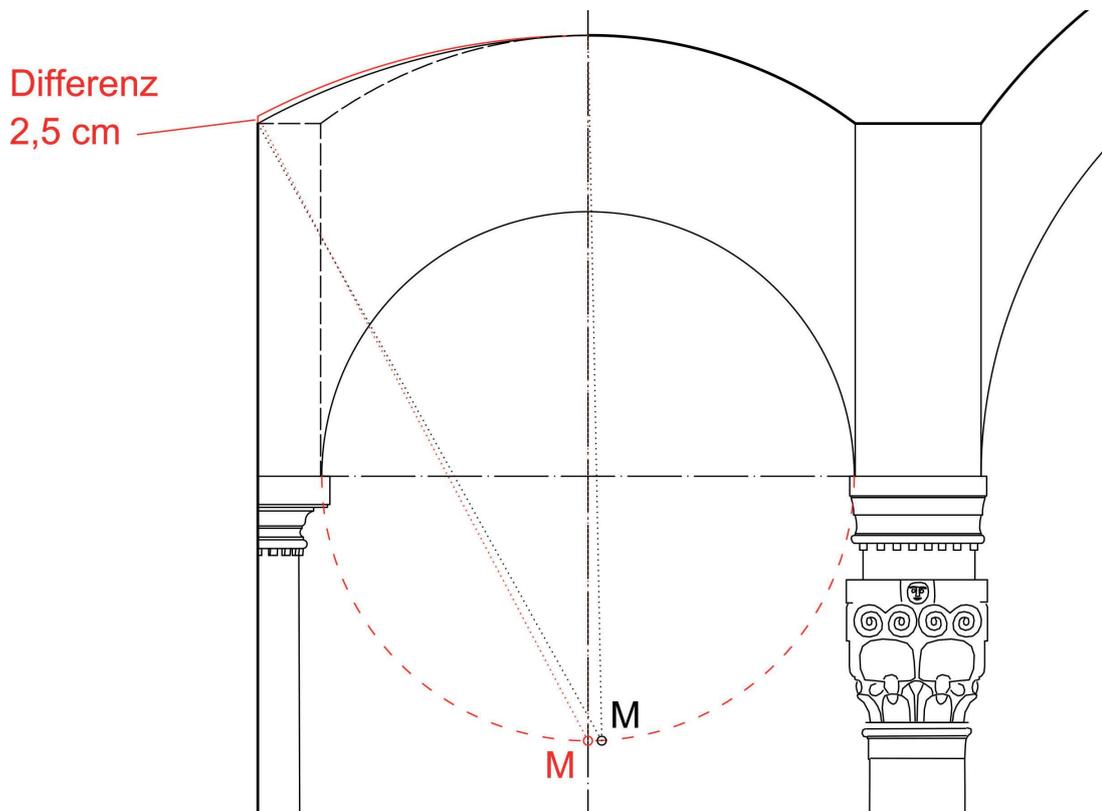


Abb. 24  
Zeichnung nach geometrischer Konstruktion. Bei reiner Kugelgeometrie der Hängeskuppel müsste sich ein Gurtbogen vor der Längswand befinden (schwarz-gestrichelt), bei einer „idealisierten“ Konstruktion des Verzug-Bogens um M (rot) entsteht an der Längswand eine Höhendifferenz von 2,5 cm gegenüber dem Bogen zum Mittelschiff (links über dem Kapitell), bei identischer Höhe der Mittelpunkt M (schwarz) etwas auf dem Kreis versetzt

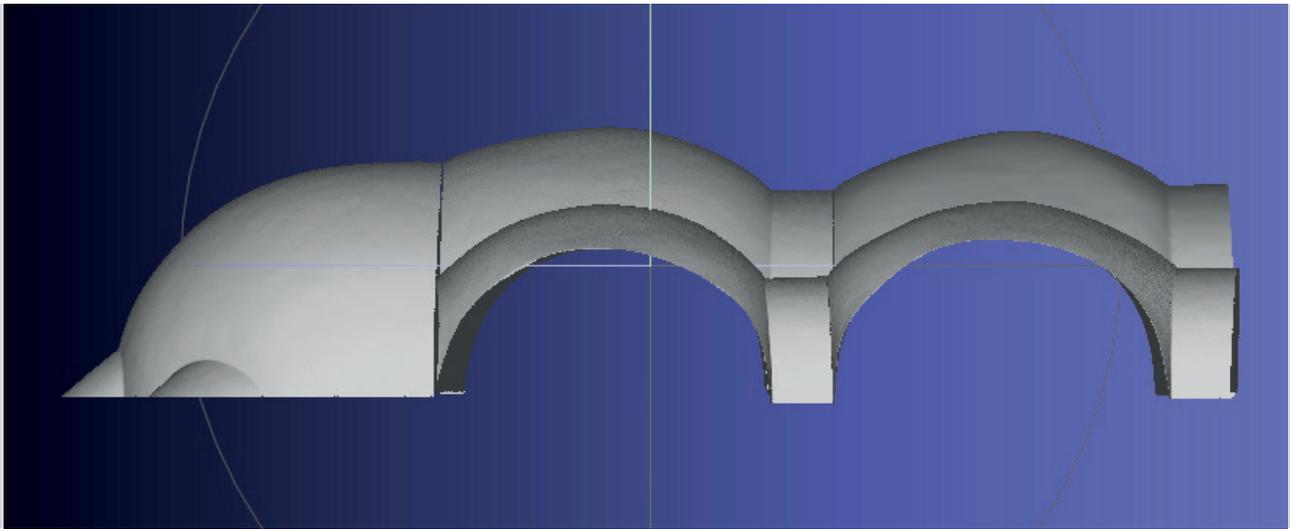


Abb. 25  
Blick von Norden auf das Gewölbe. Das Verziehen der Seitenschiffkuppeln zu dem Ansatz an die Längswänden hin ist deutlich zu erkennen (linke und rechte Seite)

Ein mittiger Querschnitt durch die westliche der beiden zentralen Kuppeln des Mittelschiffs bestätigt die bisherigen Beobachtungen bezüglich der Deformationen und zeigt deutlich die Absenkung des Kuppelscheitels durch das seitliche Ausweichen der Säulen, im Vergleich mit der ursprünglichen halbkugelförmigen Ausführung (Abb. 26).

Es bleibt noch die Suche nach möglichen auf die Abmessungen bezogenen Fehlern. Vergleicht man den Grundriss der Kapelle etwa in der Höhe des Ansatzes der Wandnischen mit Aufsicht auf die Basen der Säulen und Halbsäulen mit einer geometrischen Konstruktion, so zeigen sich Differenzen von maximal 5 cm. An den Wandecken kann dies zum Teil auch an der Ausführung des

heutigen Verputzes liegen, die Säulenbasen befinden sich mit größter Wahrscheinlichkeit in situ. Die festgestellte Absenkung des Gebäudes über die Nordostecke kann natürlich zu einer leichten Verschiebung im Fundamentbereich geführt haben (die genaue Ausführung der Fundamente ist nicht bekannt). Die Abweichungen an den Säulenbasen sind jedoch relativ gering und befinden sich zu einem großen Teil noch innerhalb heutiger Maßtoleranzen im Mauerwerksbau. Auffällig ist die Längendifferenz zwischen Süd- und Nordwand. Letztere ist im Vergleich zur geometrischen Konstruktion 3 cm länger, die Südwand dagegen 5 cm kürzer, es zeigt sich also eine Differenz von 8 cm (Abb. 27).

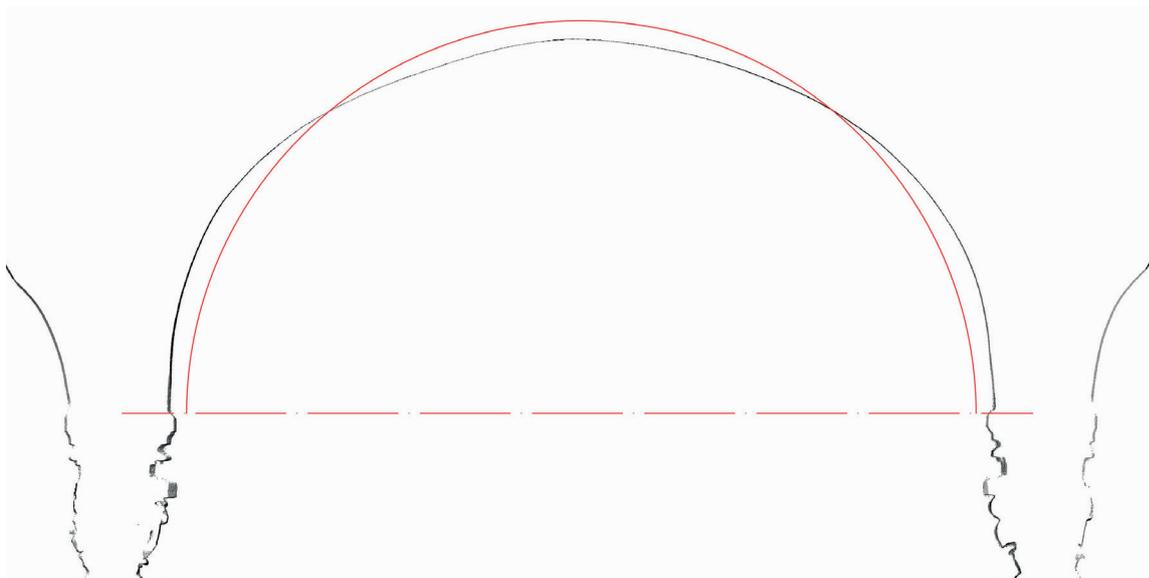


Abb. 26  
Querschnitt mittig durch die westliche der mittleren Kuppeln des Mittelschiffs entlang des Kugeldurchmessers (ursprüngliche Planung und Ausführung rot dargestellt, der heutige Bestand in schwarz)

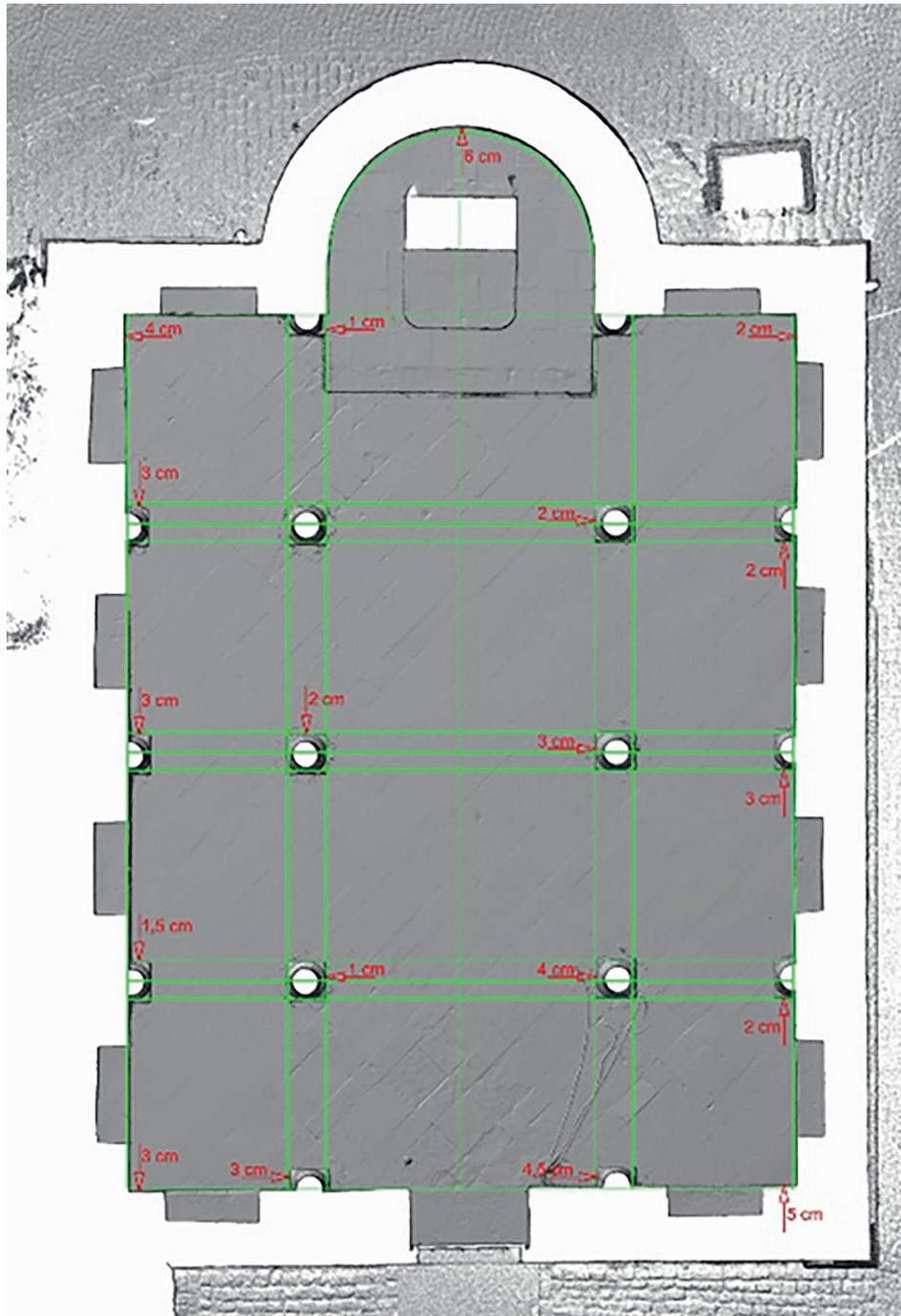


Abb. 27  
Abweichungen in der Lage der Säulenbasen und Wandecken von einer möglichen geometrischen Konstruktion

Um die Hintergründe einer auf geometrischen Grundlagen basierenden Planung verstehen zu können, erfordert es einen kurzen Exkurs in die Philosophie der griechischen Antike und deren Ausstrahlung auf das Christentum. Erschöpfend kann dies hier natürlich nicht behandelt werden, für Interessierte steht umfangreiche Fachliteratur zur Verfügung.<sup>33</sup> Es geht dabei um nichts Geringeres als um das Verständnis von der Welt, dem Makrokosmos und dem Mikrokosmos. Als Letzterer wurde der Mensch betrachtet, in Analogie zum Makrokosmos als gewollter Ordnung einer schöpferischen (göttlichen) Macht. Nach damaligem Verständnis wird alles von der kosmischen Musik gelenkt, mit der sich die „Musica humana“ in völligem Einklang befindet. Die Zahl steht über der Musik, geometrische Figuren symbolisieren die Vollkommenheit der göttlichen Schöpfung.<sup>34</sup> Die Proportion stellt das verbindende Band dar.<sup>35</sup> Bei Platon lassen sich noch viele diesbezügliche Textstellen finden, wie z. B. „Denn offenbar ist die Messkunst die Kenntnis des immer Seienden.“<sup>36</sup> Der bekannte Kirchenlehrer Augustinus von Hippo war stark vom Neuplatonismus beeinflusst: Die göttliche Ordnung ließe sich durch mathematische Methoden erkennen. Seine Deutung von in der Bibel angegebenen Zahlen steht dem pythagoreischen Zahlenverständnis sehr nahe, z.B. werden die 6 und die 10 als vollkommene Zahlen betrachtet.<sup>37</sup> Überhaupt erfuhr die mathematische Lehre des Pythagoras, hauptsächlich überliefert durch Platon und seine Schüler, im Mittelalter ein hohes Ansehen.<sup>38</sup> „Der Mathematik, insbesondere in ihrer angewandten Form als Geometria (...), kam fortan nach der platonischen Ideenlehre eine Mittlerfunktion zwischen den Welten zu.“<sup>39</sup>

Dem mittelalterlichen Baumeister war die praktische Geometrie vertraut, unter anderem diente sie zur Fundamenteinmessung auf dem Gelände.<sup>40</sup> In vielen, wenn auch meist späteren mittelalterlichen Quellen wird erwähnt, dass der Baumeister sein geplantes Werk „im Geiste hat“ und die Handwerker entsprechend anleitet.<sup>41</sup> Ähnliches wird auch schon bei Vitruv erwähnt.<sup>42</sup>

Aufgrund der teilweise erheblichen Deformationen lässt sich der bauliche Bestand für eine geometrische Rekonstruktion nicht eins zu eins nutzen. Die genaue Analyse dieser Deformationen im vorhergehenden Kapitel ermöglicht es überhaupt erst, den bauzeitlichen Zustand mit einer hohen Wahrscheinlichkeit rekonstruieren zu können, damit eine mögliche geometrisch fundierte „Planung“ und Bauausführung überhaupt gefunden werden kann. Baupläne auf Papier/Pergament tauchen in den westlichen Ländern und im islamischen Einflussbereich erst ab der Mitte des 13. Jahrhunderts auf, eine Ausnahme ist der berühmte Plan des Klosters von St. Gallen.<sup>43</sup> Für eine mögliche geometrische Konstruktion sind in erster Linie folgende Punkte zu berücksichtigen:

1. Unter der Annahme einer Anwendung der Geometrie in antiker Tradition wird die weitere Untersuchung nach einem Gebot erfolgen, das sowohl bei Euklid<sup>44</sup> (die älteste bekannte Euklid-Abschrift entstand 888 in Konstantinopel)<sup>45</sup> als auch bei Vitruv<sup>46</sup> Erwähnung findet. Gemeint ist der ausschließliche Gebrauch von Lineal (ohne Messeinteilung) und Zirkel (oder Stift, Seil und Nagel). Platon wird zugeschrieben, dies als „Grundbedingung“ für geometrische Konstruktionen besonders vertreten zu haben.<sup>47</sup>

2. Obwohl die genauen Maße der Bartholomäuskapelle nun bekannt sind, werden diese zunächst nicht berücksichtigt, um eine allgemeingültige Vorgehensweise im Sinne von Platon zu erreichen. Es erfolgt also zuerst eine maßstabsfreie Konstruktion.

3. Die so entstandene geometrische Konstruktion muss dafür geeignet gewesen sein, die Ausführung auf der Baustelle eindeutig festzulegen. Es gibt bisher keinerlei Hinweise darauf, dass die bauzeitlichen Handwerker mit Ausführungsplänen im heutigen Sinne gearbeitet haben, einige antike und mittelalterliche Gebäude zeigen allerdings verborgene Ritzzeichnungen auch von großen Bauteilen im Maßstab 1 zu 1,<sup>48</sup> die vermutlich deren Vorfertigung dienten.

4. Spätestens für die Bauausführung muss ein „Grundmaß“ festgelegt werden. Dabei kann es sich um das benutzte Längenmaß handeln, oder auch als Mo-

33 Eine detaillierte Ausführung findet sich bei JÜRGEN FREDEL: Maßästhetik, Hamburg 1998

34 GURJEWITSCH 1986: S. 43 f

35 PLATON: Timaios, 31 St.3 A bis 32 St.3 A

36 vgl. GESZNER 2020: S. 51

37 GERICKE 1990: S. 57

38 GESZNER 2020: S. 34

39 GESZNER 2020: S. 50

40 BINDING 2004: S. 69

41 ausführlich bei BINDING 2002: S. 73-99

42 VITRUV (Fensterbusch 1964): S. 299

43 KLUG 2020: S. 133-138

44 Buch I, die ersten drei Postulate

45 GERICKE 1990: S. 56

46 Erstes Buch Kapitel I, 4 und Kapitel II, 2

47 PLATON: Philebos, 51 St. 2 C

48 BINDING 2002: S. 73f

dul, um ein Vielfaches oder einen Teiler einer bekannten Längeneinheit. Dieses sollte sowohl ganzheitlich im Gebäude wie auch in kleinteiligen Bauteilen wiederzufinden sein.<sup>49</sup>

5. Weder Antike noch Mittelalter kannten Dezimalzahlen mit den heute gebräuchlichen Nachkommastellen, benutzt wurden neben den bevorzugten ganzen Zahlen stattdessen ganzzahlige Brüche wie  $\frac{1}{2}$ ,  $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{3}{4}$  usw., wenn diese auch zur Bauzeit nicht in arabischen Ziffern dargestellt wurden.<sup>50</sup> Für die Nutzung auf der Baustelle lässt sich eine Maßeinheit nur bis zu der Grenze aufspalten, deren Größe noch Sinn macht. Teilt man z. B. eine beliebiges Fuß-Maß durch 16, eine auf römischen Maßstäben oft festgestellte Einteilung,<sup>51</sup> so bekommt man ein Teilmaß mit einer Länge von etwa 2 Zentimetern, vergleichbar den heutigen Bautoleranzen für ein Gebäude dieser Größe.<sup>52</sup>

6. Es wird die Hypothese aufgestellt, dass die damaligen Bauleute mit Fertigmaßen gearbeitet haben, nicht mit Rohbaumaßen, wie heute allgemein üblich. Die Einbeziehung der Säulen mit ihren Kapitellen und Basen (die Säulenschäfte könnten auch verputzt gewesen sein)<sup>53</sup> in das Proportionssystem spricht dafür, wie noch gezeigt wird. Sicher lässt sich nicht sagen, dass die Oberfläche des originalen Putzes mit dem heutigen genau übereinstimmt, doch das verwendete Bruchsteinmaterial lässt sehr ähnliche Dimensionen vermuten, vorausgesetzt, der Innenraum verfügte über eine gerade Putzfläche und nicht lediglich über eine Schlämme. Die Praxis zeigt, dass es Sinn macht, beim Aufmauern einer Bruchsteinwand die Schnur, welche die Wandflucht bestimmt, mit ein paar Zentimetern Abstand anzulegen, damit vorstehende Abschnitte einzelner Steine diese nicht berühren. Die vielfältige Anwendung von harmonischen Proportionen, die nur im Fertigbau sichtbar und wahrnehmbar werden könnten, unterstützen diese These (siehe nächstes Kapitel).

7. Der Umgang mit irrationalen Zahlen ist anders zu betrachten als in der heutigen Zeit. In der Geometrie stellt dies kein Problem dar. So lässt sich beispielsweise die Diagonale eines Quadrats mit einer Seitenlänge von einer Maßeinheit einfach zeichnen, rechnerisch ergibt sich jedoch  $1^2 + 1^2 = 2$  und folglich  $\sqrt{2}$  als Länge der Diagonalen, eine irrationale Zahl, die in Brüchen als Nähe-

rungswerte sozusagen „rationalisiert“ wurde.<sup>54</sup>

8. Die Ungenauigkeiten beim Zeichnen von Hand sind zu beachten. CAD-Zeichnungen auf dem Computer verfügen über eine „gnadenlose“ Genauigkeit. Die damaligen Baumeister hatten die Schriften Euklids und anderer hauptsächlich griechischer Philosophen und Mathematiker sowie die römische Bautradition zur Verfügung. Gezeichnet wurde mit Zirkel und Lineal wohl meist auf Holzbrettern, Wachstafeln und Gipsböden.<sup>55</sup> Aus späteren Jahrhunderten sind figürliche Darstellungen überliefert, in denen mit dem Zirkel auf einer Art Reißbrett gezeichnet wird.<sup>56</sup> Es fällt nicht schwer sich vorzustellen, dass dabei die Genauigkeit des Computers nicht erreicht werden konnte. Auch bei den parallel zu den CAD-Zeichnungen hier mit Bleistift auf Papier erstellten Zeichnungen zeigten sich gewisse Unschärfen, je kleiner der Zeichenmaßstab, desto größer. Eine sehr gute Behandlung dieser Problematik erfolgte in Zusammenhang mit den Anfängen der photogrammetrischen Vermessung.<sup>57</sup>

Erste eigene Untersuchungen haben eine mögliche, auf dem Grundriss basierende geometrische Konstruktion ergeben.<sup>58</sup> Hier wird nun eine weitere Möglichkeit vorgestellt, welche sich besonders auf die Gewölbedecke bezieht. Die Unterschiede im Ergebnis bewegen sich im Bereich von nur wenigen Zentimetern, die Durchführung zeigt jedoch nach ersten identischen Schritten eine andere Vorgehensweise. Den Anfang bildet eine auf der Zeichenfläche gezogene Linie, welche die spätere Ost-West-Ausrichtung der Kapelle darstellt, im Folgenden Grundlinie genannt (Abb. 28, Schritt 1). (Im Vergleich mit der aktuellen Flurkarte zeigt sich, von der Apsis aus betrachtet, eine Schwenkung von  $10,65^\circ$  nach Süden.) Die Lage der Apsis im Osten wird mit einem Kreis festgelegt, hier Apsiskreis genannt, in der Zeichnung am oberen Ende der Grundlinie (Abb. 28, Schritt 2). Die Länge des Innenraums wird über drei weitere Kreise mit den Abmessungen des Apsiskreises bestimmt, welche entlang der Grundlinie angeordnet sind und sich tangieren (Abb. 28, Schritt 3). Dann wird eine zu dieser Grundlinie Senkrechte durch den Mittelpunkt des von Osten gesehen zweiten Kreises gezeichnet. Für die Konstruktion einer Senkrechten sind seit der Antike (höchstwahrscheinlich auch schon früher) mehrere Verfahren bekannt,<sup>59</sup> z. B. über zwei mit Zirkel (bzw. Schnur

49 NAREDI-RAINER 1999: S. 107 f  
50 GERICKE 1990: S. 77  
51 SPERLING 1999: S. 57  
52 DIN 18202  
53 BUSEN 1963: S. 300

54 FREDEL 1998: S. 166 f  
55 BINDING 1978: S. 43-45  
56 BINDING / NUSSBAUM 1978: S. 242, 247  
57 MEYDENBAUER 1912: S. 176-231  
58 BROSER 2018: S. 173-178  
59 EUKLID, Buch I.11

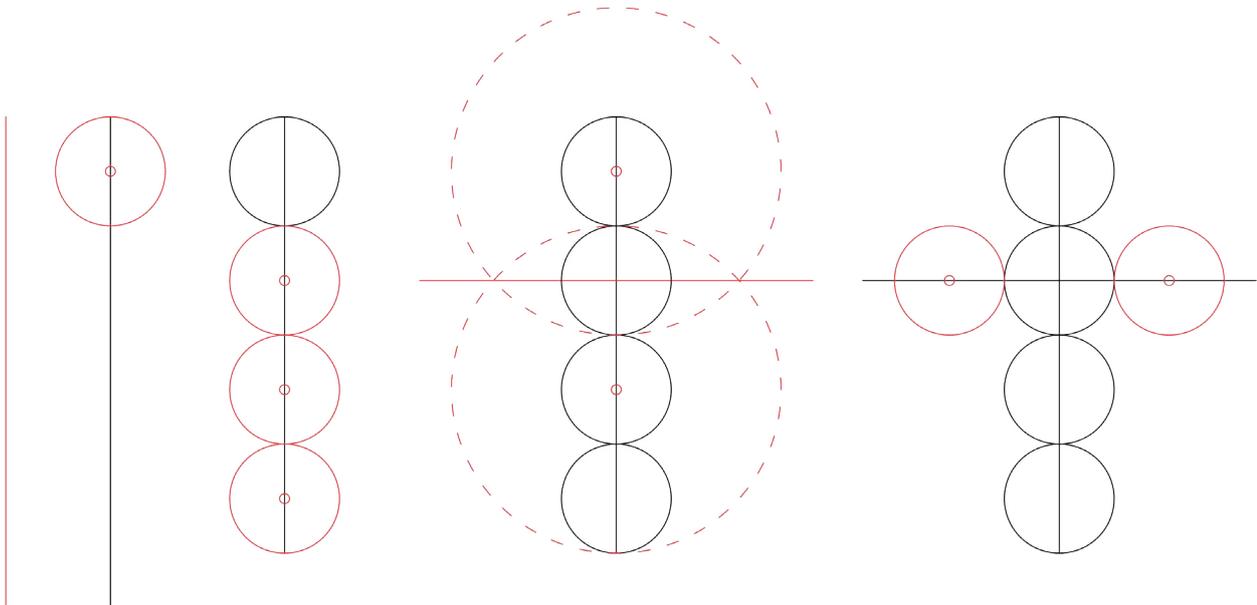


Abb. 28  
 Schritte 1 bis 5 (von links nach rechts), die bei einem Schritt hinzugefügten Teile sind in Rot dargestellt, die kleinen Kreise bezeichnen Kreismittelpunkte, für die Konstruktion notwendigen Hilfskreise und Hilfslinien sind gestrichelt

und Stock für große Kreise) erzeugte gleichgroße Kreise, deren Mittelpunkte sich auf der Grundlinie befinden. Durch die beiden Schnittpunkte der Kreise wird dann die Senkrechte gezogen. In den Zeichnungen werden für diese Konstruktionskreise meist schon vorhandene Mittelpunkte und Strecken benutzt, doch eigentlich ist die Kreisgröße beliebig, es muss nur praktikabel zu zeichnen sein (Abb. 28, Schritt 4).

Dasselbe Verfahren kann auch für die Halbierung von Strecken benutzt werden, wobei die Kreismittelpunkte an den beiden Enden der Strecke liegen und der Kreisradius größer als die Hälfte der Strecke sein muss. Entlang der so erstellten Senkrechten werden dann in der späteren Nord- und Südrichtung jeweils ein weiterer „Apsiskreis“ tangential zu dem auf der Grundlinie befindlichen Kreis angeordnet. Es ergibt sich die Figur

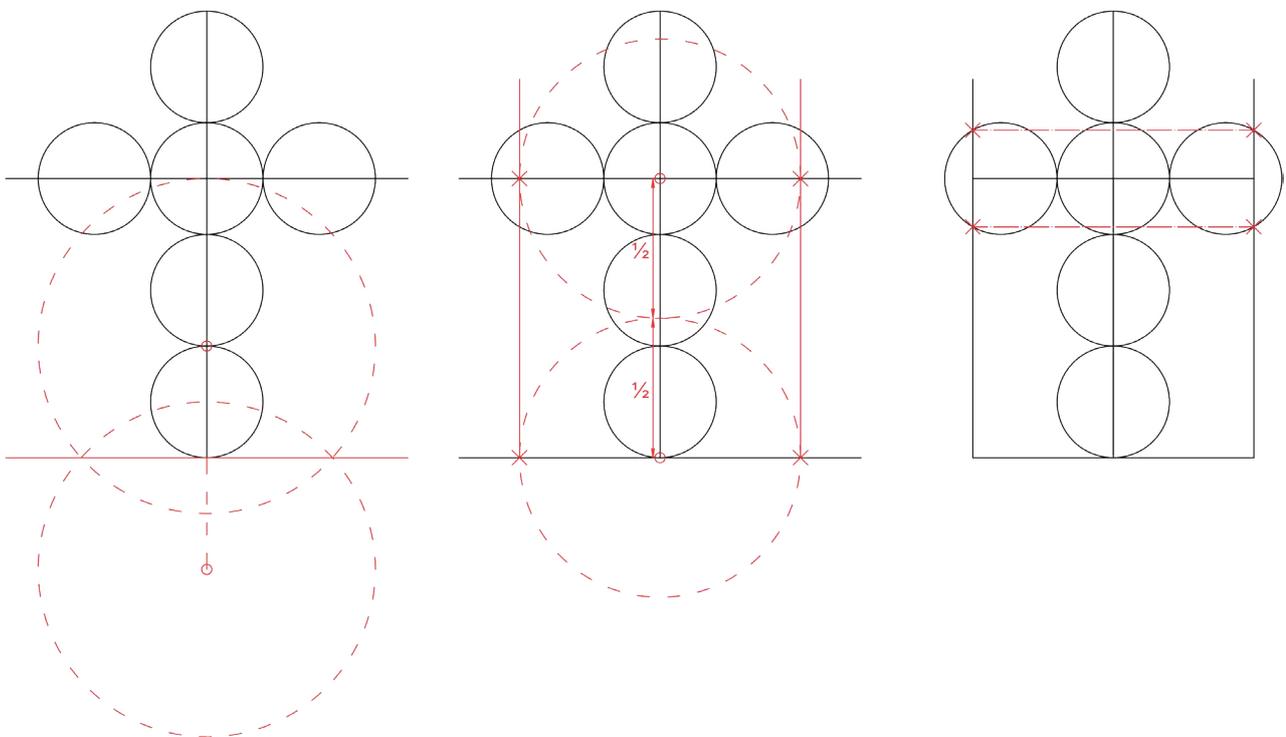


Abb. 29  
 Schritte 6 bis 8, wesentliche Schnittpunkte zwischen Linien und Kreisen mit Linien sind mit X bezeichnet

eines christlichen Kreuzes, augenscheinlich in den Proportionen, wie man diese von vielen Kreuzigungsbildern und Kruzifixen kennt. Den „Kopf“ des Kreuzes bildet die Apsis (Abb. 28, Schritt 5).

Auf gleiche Weise wie oben beschrieben lässt sich eine zur Grundlinie senkrechte Linie am westlichen Ende des Innenraums erstellen, welche die Innenseite der Westwand der Kapelle festlegt (Abb. 29, Schritt 6). Als Innenraumbreite wird der Abstand der beiden zur Grundlinie senkrechten Linien (Kreuzbalken und Innenseite Westwand) definiert. Zeichnerisch wird hierfür zuerst der Abstand zwischen den beiden Senkrechten auf der Grundlinie halbiert (siehe oben). Über zwei Kreise mit den Schnittpunkten Grundlinie-Kreuzbalken und Grundlinie-Innenseite Westwand als Mittelpunkte und der Hälfte des Abstands der beiden zur Grundlinie Senkrechten als Radius lässt sich diese Gebäudebreite übertragen und somit auch die Lage der Innenseiten der Längswände bestimmen. Es entsteht ein Quadrat mit der Kantenlänge von  $2\frac{1}{2}$  Apsiskreis-Durchmessern (Abb. 29, Schritt 7).

Es fehlt jetzt noch die östliche Begrenzung des Innenraums nördlich und südlich der Apsis. Zuvor erfolgt jedoch die Festlegung der Scheitel-Querachsen der zwölf den rechteckigen Bereich überspannenden Hängeskuppeln (Strich-Punkt-Linien, siehe auch Abb. 20). Die zwei östlichen Achsen sind durch die Schnittpunkte des nördlichen und südlichen „Apsiskreises“ mit den Innenseiten der Längswände schon definiert, die Positionen der beiden westlichen lassen sich einfach durch Zirkelschläge ermitteln (Abb. 29, Schritt 7).

Die zwei östlichen Scheitel-Querachsen werden durch die Schnittpunkte des nördlichen und südlichen „Apsis-

kreises“ mit den entsprechenden Innenseiten der Längswände definiert (Abb. 29, Schritt 8). Lassen sich alle bisherigen Konstruktionsschritte direkt auf den Durchmesser bzw. den Radius des Apsiskreises zurückführen, steht nun der Abstand zwischen den Scheitel-Querachsen in keinem erkennbaren Verhältnis zu diesen, wird aber gleichwohl über die „Apsiskreise“ bestimmt.

Die Positionen der beiden westlichen Scheitel-Querachsen lassen sich einfach durch Zirkelschläge ermitteln (Abb. 30, Schritt 9). In der geometrischen Konstruktion sind über diese auch die Querachsen der drei Stützenpaare definiert, nämlich genau mittig dazwischen. Der in den Abbildungen waagerechte Kreuzbalken wird zur östlichen Stützenachse, die restlichen lassen sich entsprechend mit den bisher angewandten Verfahren einfach konstruieren (Abb. 30, Schritt 10). Erst jetzt lässt sich die Länge der Nord- bzw. Südseite ermitteln und damit der östliche Abschluss des Innenraums erstellen, indem man den Schnittpunkt der Querachse der mittleren Stützenreihe mit einer Längswand als Mittelpunkt eines Kreises nimmt, dessen Radius aus der Entfernung bis zum jeweiligen Schnittpunkt der Westwand mit den Längswänden besteht (Abb. 30, Schritt 11).

In ost- und westlicher Richtung wird nun je eine Tangente an die vier mit ihren Mittelpunkten auf der Grundlinie befindlichen Kreise gelegt, also genau entlang der Apsisbreite, was die Lage der Säulenbasen, und damit auch der Kapitelle, in Querrichtung festlegt. Dies erfolgt allerdings nicht wie in der Querrichtung als Achsmaß, sondern als Ansatzlinie für die zum Mittelschiff zeigenden Kanten der Säulenbasen, was sich für die Ausführung auf der Baustelle als sehr günstig darstellt (Abb. 31, Schritt 12). Nun zeichnet sich deutlich die dreischiffige

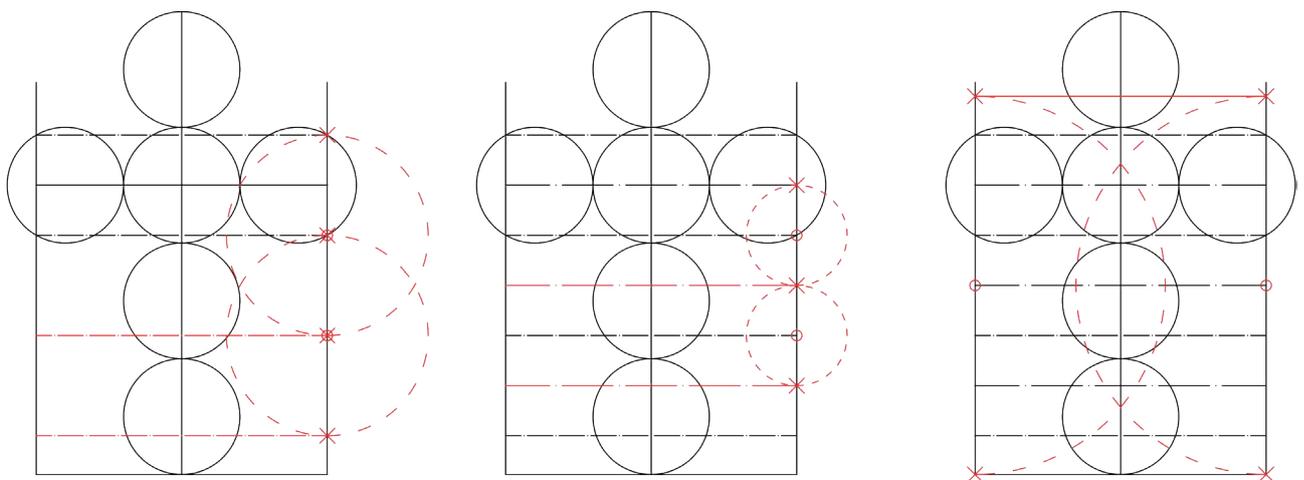


Abb. 30  
Schritte 9 bis 11

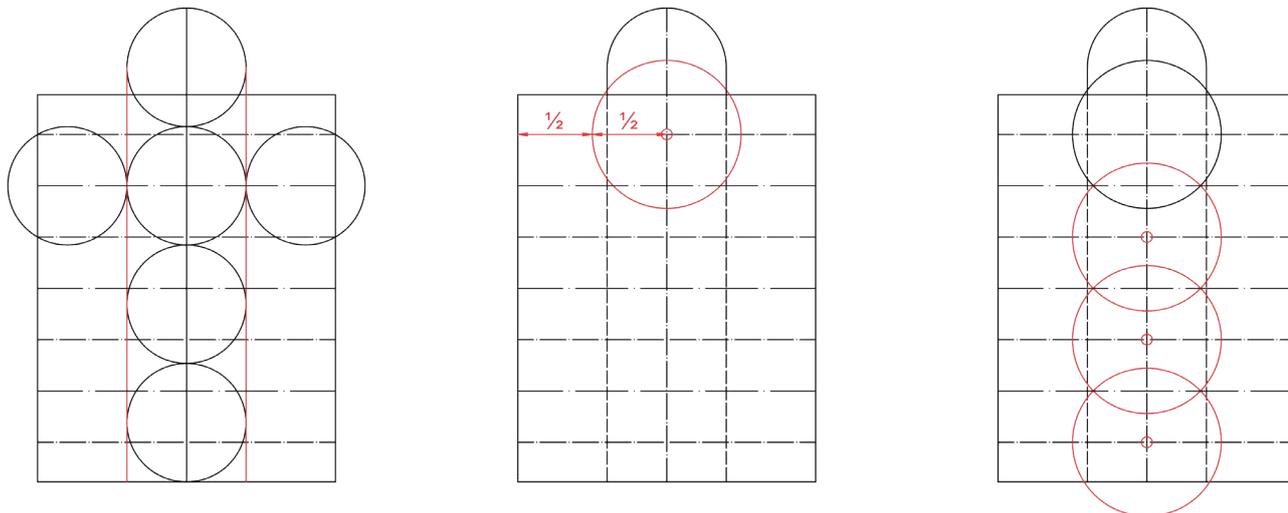


Abb. 31  
Schritte 12 bis 14

Anlage ab. Jedes Schiff nimmt vier Kuppeln auf, wobei im Hauptschiff die Scheitelpunkte der Kuppeln natürlich auf der Grundlinie liegen, welche ja die Mittelachse des Innenraums in Längsrichtung darstellt. Die Längsachsen der Kuppelscheitel in den Seitenschiffen dagegen fehlen noch (siehe auch Abb. 20). Der Durchmesser der Hängenkuppeln im Hauptschiff lässt sich wieder sehr einfach ableiten. Vom Gewölbemittelpunkt aus wird die Strecke zu einer Seitenwand halbiert und somit der Kuppelradius ermittelt (Abb. 31, Schritte 13 und 14). Der Durchmesser entspricht folglich der halben Breite des Innenraums. Bevor man die Lage der Kuppeln in den Seitenschiffen betrachten kann, muss zuerst die Breite der „Gurtbögen“ zwischen den einzelnen Gewölben be-

stimmt werden.<sup>60</sup> Auch dies lässt sich rein geometrisch lösen. Man zeichnet Kreise um die Schnittpunkte der Gewölbeseitellinien in Querrichtung mit den Tangenten aus Schritt 12 (siehe Abb. 30) mit dem Abstand zur Mittellinie als Radius. Es entstehen so Kreise wieder mit dem Durchmesser des „Apsiskreises“ (Abb. 32, Schritt 15), durch deren jeweilige Tangenten in Nord-Süd-Richtung die Breite der „Gurtbögen“ definiert wird (Abb. 32, Schritt 16).

Zieht man jetzt Kreise um die Schnittpunkte der Querachsen der Kuppeln mit den Innenseiten der Längswände und dem Radius bis zur nächsten „Gurtbogen“-Kan-

60 Die Gurtbögen bilden hier allerdings mit den Gewölben bauliche Einheiten, siehe BUSEN 1963: S. 295

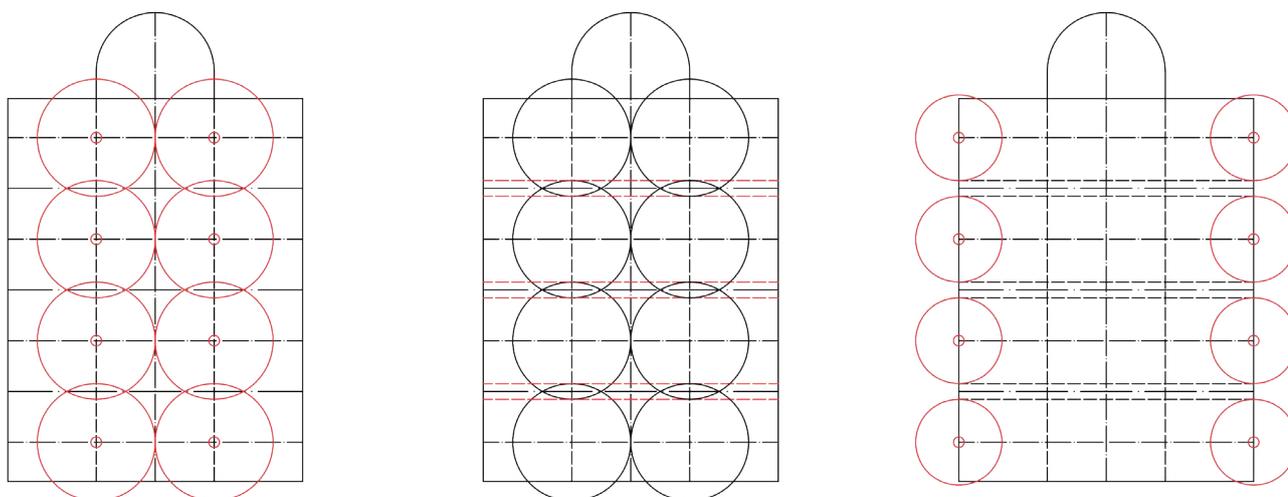


Abb. 32  
Schritte 15 bis 17

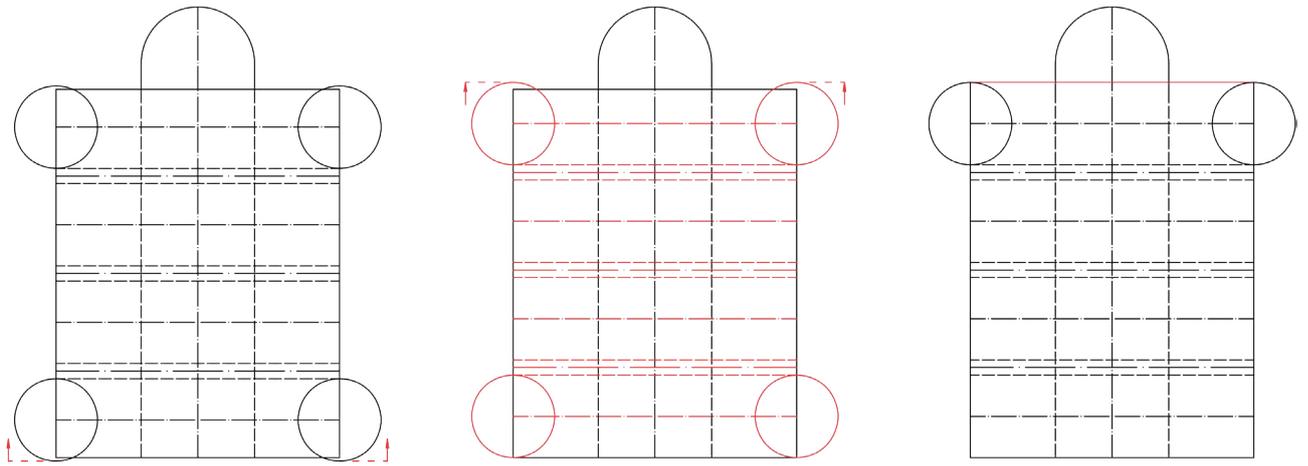


Abb. 33  
Korrektur bei den Längen der Längswände, Schritte 18 bis 20

te, so gehen der östliche und westliche Kreis über die Ost- bzw. Westwandinnenkanten hinaus (Abb. 32, Schritt 17). Nach Befund haben die Gewölbejoche in Querrichtung aber alle dieselbe Breite, es muss hier also eine Korrektur bei den Längen der Längswände erfolgen. Wird davon ausgegangen, dass die Gesamtlänge von vier Apsiskreis-Durchmessern erhalten bleiben soll, bleibt nur eine Verschiebung aller Querachsen Richtung Osten bis der westliche Gurtbogen den richtigen Abstand zur Westwand hat (Abb. 33, Schritte 18 und 19). Auf den Maßstab 1 zu 1 bezogen würde dies etwa 10 cm betragen. Die Lage der Ostwand kann dann entsprechend angepasst werden (Abb. 33, Schritt 20).

Nun zu den „Gurtbögen“ in Längsrichtung. Hierzu werden die Kuppeln des Mittelschiffs herangezogen. Nach Befund ist die Breite der Bögen etwas geringer als die

maximale Breite der Kapitelle (und damit auch der Basen) der Säulen und Halbsäulen. Betrachtet man nun die Übergänge der östlichen Kuppel-Halbkugel mit der Ostwand, so liegen diese tatsächlich etwas versetzt zu den Ansätzen der Apsis und damit den Konstruktionslinien für die Kapitelle bzw. Basen entlang der Apsisbreite. Diese Übergänge definieren die dem Mittelschiff zugewandten Seiten der „Gurtbögen“ (Abb. 34, Schritte 21 und 22). Deren Breite lässt sich über eine Kreiskonstruktion von den in Querrichtung verlaufenden Bögen übertragen (Abb. 33, Schritt 22). Über Kreise mit Mittelpunkten auf der halben Breite der Bögen lassen sich nun die genauen Lagen der Kapitelle/Basen der Säulen und Halbsäulen in Beziehung zu den „Gurtbögen“ ermitteln (Abb. 34, Schritt 23).

Erst jetzt kann die Bestimmung der genauen Lage der

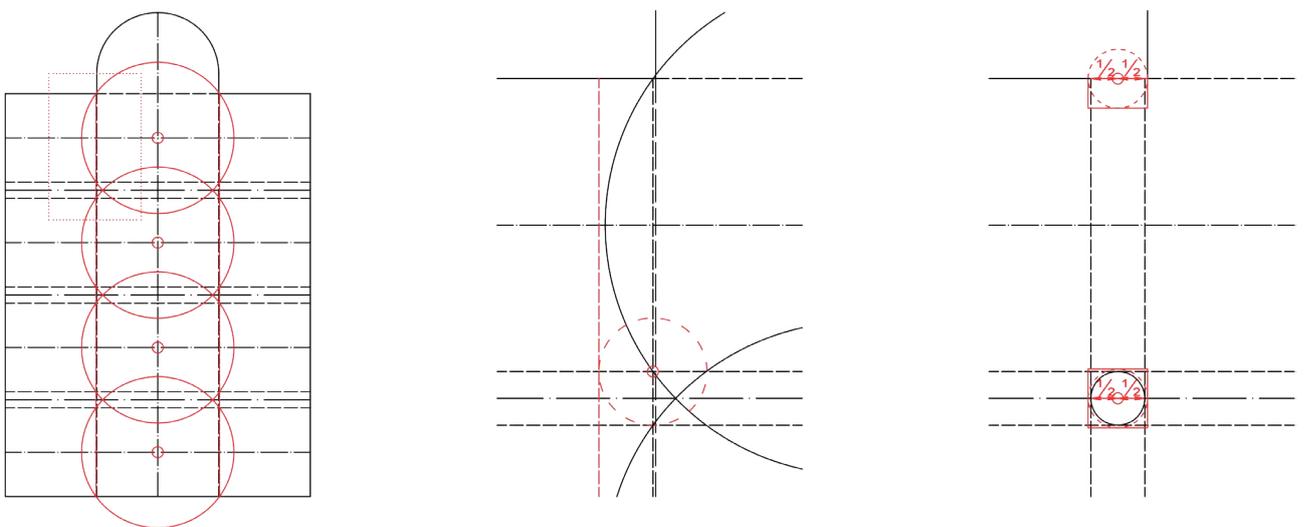


Abb. 34  
Schritt 21, gepunktetes Rechteck als Ausschnitt für Schritte 22 und 23

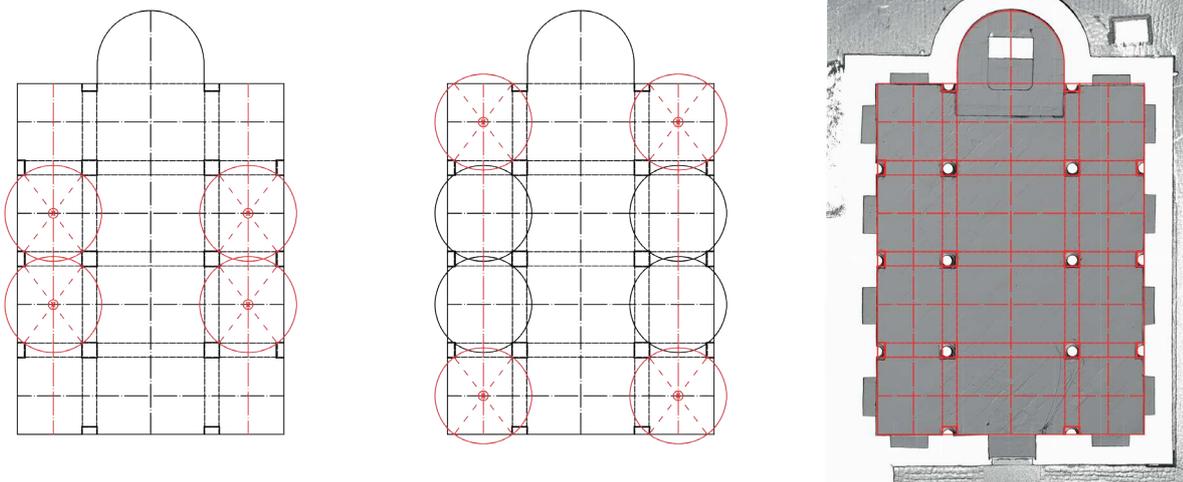


Abb. 35  
Schritte 24 und 25, geometrische Konstruktion im Grundriss des Baubestands

Kuppeln in den Seitenschiffen erfolgen. Zusätzlich zu den Querachsen der Kuppelscheitelpunkte steht nun die Lage der „Gurtbögen“ an allen Ecken der Säulenkapitelle als Bezug zur Verfügung. In den mittleren Abschnitten der Seitenschiffe lassen sich Linien von einem Ansatz der Bögen auf den Kapitellen der mittigen Säulen bis zu den entsprechenden diagonal gegenüberliegenden Stellen auf den Halbsäulen ziehen. Diese Linien entsprechen dem Durchmesser der Kuppel-Halbkugel, deren Mittelpunkt im Schnittpunkt mit der Querachse liegt (Abb. 35, Schritt 24). Der Kreisumfang geht somit durch alle vier Ansatzpunkte der Bögen.

Verfährt man entsprechend mit den Kuppeln an Ost- und Westwand, ergeben sich aus der Verkürzung der östlichen und westlichen Bogenjoche in Längsrichtung, der Anordnung der Halbsäulen an Ost- und Westwand und dem Fehlen von Viertelsäulen in den Raumecken Abweichungen in der Kugelgeometrie (Abb. 35, Schritt 25), wovon auch die übrigen Kuppeln der Seitenschiffe und die an Apsis und Westwand angrenzenden Gewölbe des Mittelschiffs betroffen sind. Im vorherigen Kapitel wurde darauf schon eingegangen. Nur die beiden mittleren Gewölbe des Mittelschiffs behalten ihre geometrische Form als Halbkugeln. Die geometrische Konstruktion lässt sich nun über einen Grundriss des Baubestands legen, die Wandnischen, der Zugang und auch die Fenster sind hier noch nicht berücksichtigt (Abb. 35). Somit ist nachgewiesen, dass der Grundriss mit dem Bezug auf ein einziges Maß, der Breite der Apsis, mit Zirkel und Lineal gezeichnet werden kann, wobei in dieser Variante die Gewölbestruktur die wesentliche Rolle spielt. Alle anderen Abmessungen beziehen sich hierauf, entsprechend den Vorgaben aus der antiken Geometrie. Als „Grundmodul“ könnte man also den Kreis mit dem Innendurchmesser der Apsis bezeichnen. Wirklich

erstaunlich ist, dass selbst ein so kleines Maß wie der Rücksprung der Bogenansätze auf den Kapitellen eindeutig über die Geometrie bestimmt werden kann.

Ebenso ist es möglich, eine geometrische Konstruktion des Grundrisses mit nur einer Zirkelöffnung zu erstellen, ein Verfahren, welches in der Architektur vom antiken Ägypten und Griechenland bis ins Mittelalter gebräuchlich war.<sup>61</sup> Die genaue Vorgehensweise bei der vom Verfasser gefundenen Variante soll hier nicht genauer erläutert werden, nur, dass ein Kreis mit dem Radius der Innenraumbreite der Kapelle benutzt wird. Zur Aufindung einiger Mittelpunkte der insgesamt 14 Kreise werden noch ein Quadrat und ein gleichseitiges Dreieck jeweils mit dem Kreisradius als Kantenlängen benötigt (Abb. 36). Die maximale maßliche Abweichung gegenüber der oben ausführlich vorgestellten Konstruktion beträgt nur 1,4 cm. In der textlichen Darstellung mag diese rein geometrische Vorgehensweise umständlich und kompliziert erscheinen, doch eigene Versuche mit Zirkel und Lineal auf Papier und auch am Computer haben gezeigt, dass eine innere aufeinander aufbauende Logik verfolgt wird. In weniger als zehn Minuten war der Entwurf bis zu diesem Stadium fertiggestellt.

Bisher sind sechs unterschiedliche geometrische Konstruktionen für den Innenraum der Kapelle vom Verfasser durchgeführt worden, welche sich in der Anfangssituation oder der Abfolge unterscheiden, teilweise aber auch gemeinsame Vorgehensweisen zeigen. Die Unterschiede im Ergebnis liegen im Wesentlichen in der Länge der Längswände. Der Befund zeigt, in Höhe der „Sitzbänke“ der Nischen, für die Nordwand eine Länge von 11,195 m und für die Südwand von 11,12 m an, also eine Differenz von 5,5 cm, wobei über die Dicke des heutigen Verput-

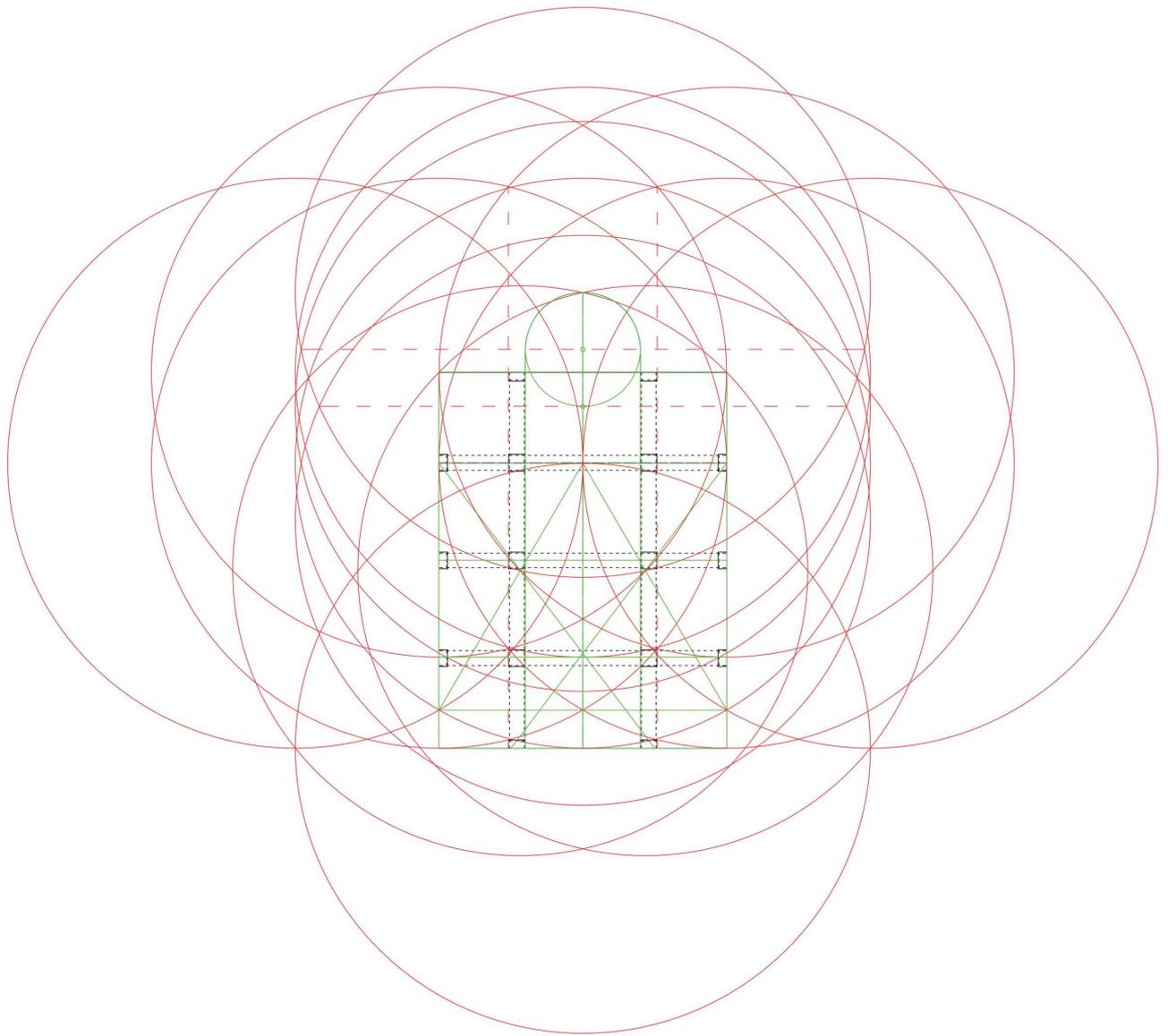


Abb. 36

Anordnung der 14 Kreise, die östliche der waagerechten gestrichelten roten Linien definiert den Mittelpunkt des Apsiskreises

zes keine Aussage getroffen werden kann. Bei den sechs Konstruktionen ist der niedrigste Wert für die Länge der Längswände 11,036 m, der höchste 11,246 m. Letzterer stammt von der hier beschriebenen geometrischen Konstruktion mit den Korrekturen (siehe oben). Es lässt sich unmöglich sagen, ob eine dieser Konstruktionen vom Baumeister benutzt wurde, womöglich war es auch eine völlig andere. Es soll hier nur gezeigt werden, dass eine Planung auf geometrischen Grundlagen mit unterschiedlichen Vorgehensweisen möglich war.

Querschnitt und Längsschnitt, also die Raumhöhen und die Lage der Nischen und Wandöffnungen, lassen sich ebenfalls rein geometrisch aus der Grundrisskonstruktion ermitteln. Beim in den Grundriss geklappten Querschnitt bildet die westliche Kante der Basen/Kapitelle der mittleren Säulenreihe den Fußboden, die Gewölbescheitel im östlichen Joch die Höhe die Kämpferlinie

der Gewölbe und die östliche Raumbegrenzung den Gewölbeansatz in den Scheitelpunkten der Bögen, was sich schon aus der Halbkreisform der Bögen ergibt. Die wesentlichen Raumhöhen sind somit festgelegt (Abb. 37). Der Scheitelpunkt des Bogens zur Apsis, welcher in das Gewölbe übergeht und somit nicht als deutlicher Triumphbogen ausgebildet ist, befindet sich genau im Mittelpunkt des Apsiskreises. Die Scheitelpunkte der Bögen der Apsisfenster liegen auf der Kämpferlinie, die unteren Fensteransätze in der Höhe des Apsisdurchmessers über dem Fußboden, woraus sich eine Fensterhöhe entsprechend dem halben Gewölbedurchmesser in Ost-West-Richtung ergibt. Diese Fenster sind allerdings nicht symmetrisch in der Apsis angeordnet, sondern das mittlere ist um knapp 7 cm nach Norden versetzt, ebenso die beiden übrigen. Die beiden Nischen der Ostwand sind nach Befund genau mittig

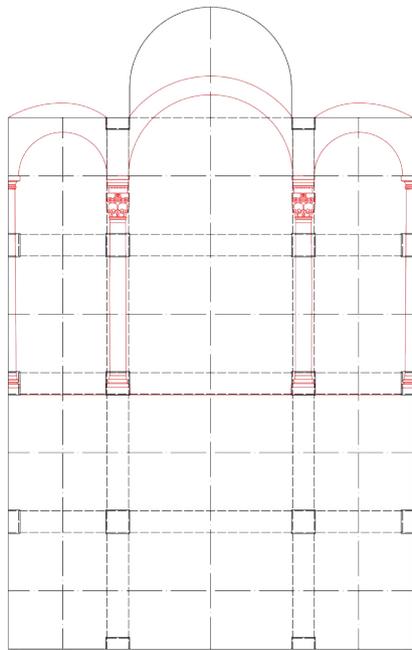


Abb. 37  
Querschnitt mit Festlegung der wesentlichen Raumhöhen

Alle Schnitte sind in den Grundriss der geometrischen Konstruktion geklappt

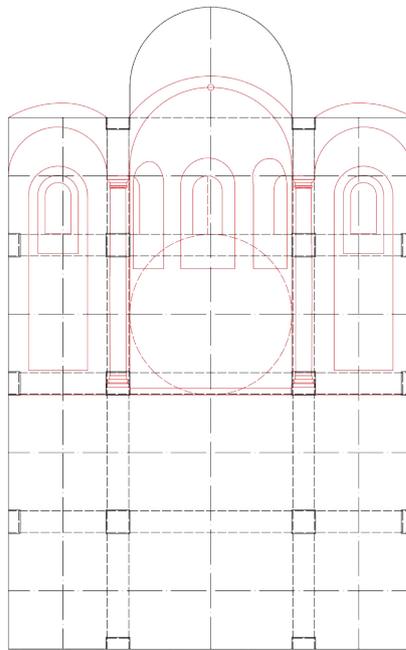


Abb. 38  
Querschnitt mit Innenansicht der Ostwand, der kleine rote Kreis zeigt den Mittelpunkt des Apsiskreises, der gestrichelte rote Kreis hat die Ausmaße des Apsiskreises

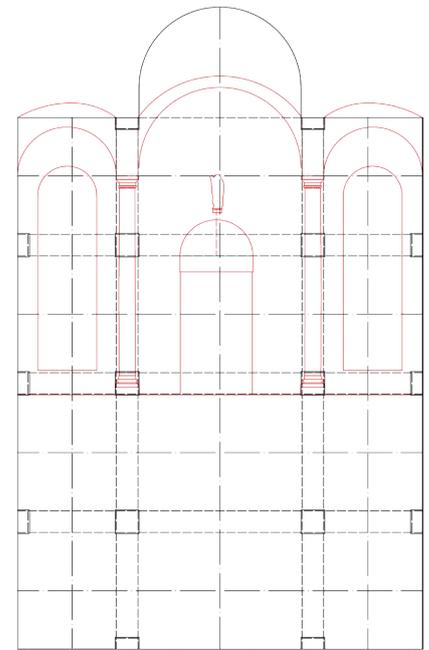


Abb. 39  
Querschnitt mit Innenansicht der Westwand, Ansatz der Bogennische über dem Eingang mit der Höhe des Achsmaßs eines Gewölbejoches, Kopf der darüber angebrachte Statue auf Kämpferhöhe

zwischen den Ihnen zugewandten Seiten der Schäfte der Halbsäulen und den Begrenzungen durch die Längswände angeordnet, was die aus optischen Gründen hier sinnvollste Symmetrie erzeugt (Abb. 38). Diese Anordnung entspricht jener an der Westwand. Anstelle des Chores befindet sich hier der rechteckige Eingang mit einem ca. 35 cm hohen Sturzstein, über dem sich eine halbkreisförmige Wandnische befindet, über der eine Statue angeordnet wurde. Diese Komposition ist ebenfalls nicht genau mittig angeordnet, sondern um 7cm nach Süden versetzt. Ob es sich hierbei um Absicht oder einen Messfehler handelt, lässt sich noch nicht sagen. Auf die Außenansicht bezogen wird die nicht symmetrische Lage des Eingangs noch durch die größere Dicke der Nordwand verstärkt, es wäre hier eher ein Versatz nach Norden zu vermuten gewesen (siehe Kapitel Deformationen). Bei einer der Ostseite entsprechenden Einfügung der Innenansicht der Westwand in die geometrische Grundrisskonstruktion zeigt sich, dass die halbkreisförmige Nische genau mit dem Maß der Breite eines Gewölbejochs (als Achsmaß) für die Höhe über dem Fußboden ansetzt. Der Kopf der Statue befindet sich genau in Kämpferhöhe, was im Grundriss der Scheitellinie des östlichen Gewölbejoches entspricht (Abb. 39). Bei den Querschnitten lässt sich deutlich der Verzug in der Gewölbegeometrie zu den Längswänden hin erkennen, welcher im vorherigen Kapitel behandelt wurde (siehe Abb. 23). Der Längsschnitt durch die Mittelachse des Innenraums zeigt zur Ost- und Westwand

hin ebenfalls Abweichungen in der Gewölbegeometrie. Hier liegt die Begründung allerdings nicht in der Anordnung der Halbsäulen, sondern einer Verschiebung des Scheitelpunktes des „Triumphbogens“ an der Apsis nach oben im Verhältnis zu den Bögen zwischen den Säulen des Mittelschiffs, was an der Westwand übernommen wird. Im Bestand ist dies deutlich zu erkennen, aufgrund der Deformationen lässt sich ein genauer Wert der Verschiebung nicht bestimmen (Abb. 40). In einer auf der geometrischen Konstruktion basierenden Schnittzeichnung ergibt sich ein Wert von ca. 14 cm (Abb. 41). Eine Notwendigkeit hierfür aus geometrischen oder praktischen Gründen ist nicht zu erkennen. Klappt man den Längsschnitt in die Grundrisskonstruktion, lassen sich entsprechend der Querschnitte wiederum Bezüge erkennen. Die Mittellinie des Innenraums schneidet die Kapitelle auf halber Höhe, die Scheitelpunkte der Bögen zu den Seitenschiffen liegen in Höhe der dem Mittelschiff zugewandten Seiten der Säulenbasen/Kapitelle und deren den Seitenschiffen zugewandten Seiten definieren den Ansatz der Gewölbescheitel des Mittelschiffs. Nur die Lage des Fußbodens mag nicht so recht dazu passen. Zu erwarten wäre dessen Bestimmung durch die Kante der Längswand, doch er liegt etwa 8 cm davor (Abb. 42).

Bei allen Fenstern stellt sich die Frage, wo noch Originalsubstanz vorhanden ist und wo es sich um Rekonstruktionen durch die Sanierungsarbeiten nach 1955 handelt. Bei den Apsisfenstern konnte wohl die ursprüngliche

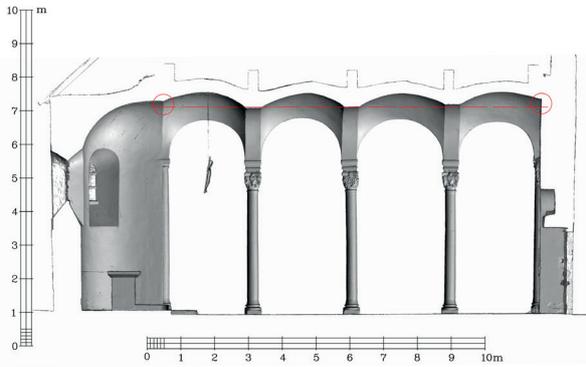


Abb. 40  
Längsschnitt des Baubestands durch das Mittelschiff mit Blick nach Süden, innerhalb der roten Kreise der Höhenversatz an der Ost- und Westwand

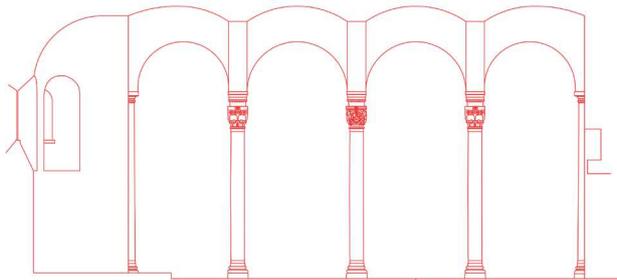


Abb. 41  
Schnittzeichnung auf der Grundlage der geometrischen Konstruktion

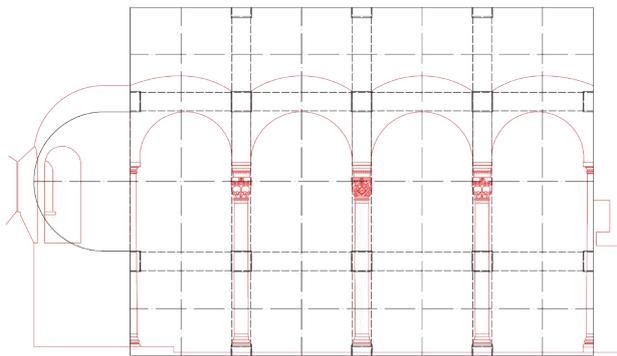


Abb. 42  
Höhenbestimmung der Kapitelle, der Scheitelpunkte der Bögen zu den Seitenschiffen und der Ansätze der Gewölbescheitel, Differenz bei der Höhe des Fußbodens

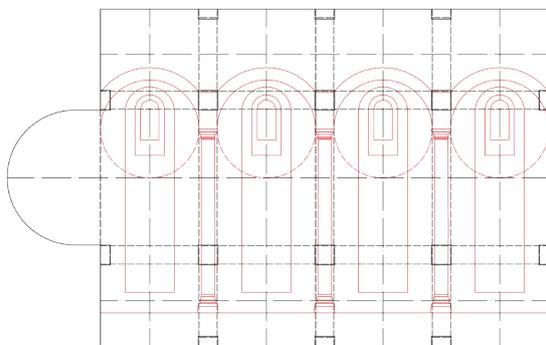


Abb. 43  
Längsschnitt mit Wandansicht durch das südliche Seitenschiff, die gestrichelten Halbkreise ergänzen die Halbkreise der Gewölbeansätze zu Kreisen, welche im Grundriss die Mittellinie des Innenraums tangieren

Größe ermittelt werden. Bei dem Ostfenster des nördlichen Seitenschiffs erfolgte eine Rekonstruktion nach dem noch vorhandenen Bogen und bei vier Fenstern der Seitenschiffe zeigten sich noch die oberen Bogenabschlüsse. Alles andere muss demnach als bauliche Rekonstruktion angenommen werden. Die Nischen an den Längswänden sind genau mittig unter den Gewölben angeordnet, in den beiden mittleren Jochen also auch genau zwischen den Schäften der Halbsäulen, im östlichen und westlichen Joch jedoch sind infolge der Eckausbildungen die Entfernungen der entsprechenden Nischenlaibungen zu den Wänden konsequenterweise etwas kürzer als jene zu den Schäften der Halbsäulen, etwa 6 cm. Klappt man die Ansichten der Längswände nun ebenfalls in die Grundrissgeometrie, so dass die von den Gewölbeansätzen an den Längswänden bestimmten Kreise unterhalb der Fenster die Mittellinie des Innenraums tangieren, wird die Höhe der Kämpfer der Bogenfenster durch den jeweiligen Abschluss der Gewölbe des Mittelschiffs definiert (Abb. 43). Die maßgeblichen Höhen für die Gewölbe wurden schon über die Querschnitte bestimmt, für den Fußboden gibt es bei dieser Anordnung keine direkte Entsprechung in der Grundrissgeometrie. Die genaue Höhenanordnung der Nischen lässt sich so über den Grundriss nicht festlegen, mit einer Höhe von etwa 51 cm über dem Fußboden lassen sich die Sohlbänke der Nischen gut als Sitzgelegenheiten nutzen.

War für die geometrische Konstruktion noch kein Maß in Form einer in irgendeiner Weise definierten Strecke notwendig, so ändert sich dies spätestens mit dem Beginn der Bauausführung. Es muss ein Bezugsmaß her, an dem sich alle am Bau Beteiligten orientieren können. War im antiken römischen Reich der sogenannte kapitolinische Fuß von 29,56 cm noch eine weitgehend standardisierte Längeneinheit für Bauaufgaben,<sup>62</sup> wenn auch mit Abweichungen in einzelnen Provinzen, so zeigte das Mittelalter eine große Maß-Vielfalt (mittelalterliche Vorgaben für Längenmaße sind vereinzelt noch an Kirchen, Rathäusern und Marktplätzen vorhanden),<sup>63</sup> welche zu großen Teilen in ihren Bezeichnungen, nicht aber in den Größen überliefert sind.<sup>64</sup>

62 PIPER 2017: S. 12-14, nach archäologischen Untersuchungen an römischen Bauten schwankt dieser zwischen 0,294 und 0,298 m, auch wird hier ein Byzantinischer Fuß mit 0,3213 m angegeben

63 z.B. am alten Rathaus in Regensburg

64 NAREDI-RAINER 1999: S. 104f

Wie lässt sich nun ein wahrscheinliches „Grundmaß“ ermitteln? Die in der Quelle erwähnte Herkunft der Bauleute aus dem Oströmischen Reich legt die Nutzung römischer Maße nahe. Busen allerdings gab als Grundmaß den karolingischen Fuß mit 33,3 cm an, der „halbiert, geviertelt und geachtelt wurde“<sup>65</sup> und zeigte dies an mehreren Längenbeispielen.<sup>66</sup> Die Überprüfung mit dem jetzt vorhandenen genauen Bauaufmaß ergab jedoch Differenzen im Bereich von etlichen Zentimetern. Stellt man sich eine Hierarchie der einzelnen Baubereiche vor, so steht der Chor, in dem später der Altar angeordnet wird, zweifellos an der Spitze der liturgischen Bedeutung.<sup>67</sup> Als dessen Hauptmaß kann der Durchmesser mit 3,38 m oder der Radius mit 1,69 m des ausgeführten Halbkreises betrachtet werden. Teilt man beispielsweise den Durchmesser durch den Wert des kapitolinischen Fußes, erhält man 11,43 Teile: Kein sehr überzeugender Wert. Umgekehrt betrachtet kann eine Teilung des Durchmessers in 10, 11 oder 12 Teile erfolgen, um im Bereich eines Fußmaßes bleiben zu können. Dies ergibt „Füße“ von 33,8 cm, 30,7 cm oder 28,2 cm Länge. Nach ausführlichen Maßvergleichen an den Grund- und Aufrissen schälte sich eine Längeneinheit von 30,7 cm als Grundmaß heraus, welches sich sehr genau mit den Maßen an der Kapelle vereinbaren lässt. Dies wird bei den weiteren Untersuchungen noch verdeutlicht. Erich Schilbach hat bei seinen Untersuchungen an der Irenenkirche in Istanbul aus dem 6. Jh. ein Fußmaß von 30,8 cm ermittelt.<sup>68</sup> Kurioserweise findet dieses Fußmaß eine fast genaue Entsprechung auf dem sogenannten Relief von Salamis, aufbewahrt im historischen Museum in Piräus, datiert auf das vierte Jahrhundert vor Christi Geburt. Es wird vermutet, dass die verschiedenen dort dargestellten Längenmaße Handwerkern unterschiedlicher Herkunft als Richtmaße dienten. Von den verschiedenen hierauf dargestellten Maßstäben zeigt eines die Form eines menschlichen Fußes, dessen Länge mit „ca. 306-306.5 mm“ angegeben wird.<sup>69</sup> Hier soll nicht behauptet werden, dass an der Bartholomäuskapelle tatsächlich eines dieser ca. 400 bzw. ca. 1400 Jahre älteren Fußmaß angewendet wurde, es wird lediglich die vorläufige Hypothese aufgestellt, dass es sich bei den 30,7 cm um ein Fußmaß (Modul oder Teiler eines größeren Moduls?) handeln könnte, mit der Begründung, dass dieses einfach sehr gut zu den Abmessungen der einzelnen Bauteile passt. Auf den Apsisdurchmesser bezogen

ergeben sich so 11 Fuß mit einem Rest von nur 3 mm. Auffällig ist die Zahl 11 als Teiler, eine 12 (die 12 Apostel, von denen Bartholomäus einer war) oder  $10 = 1+2+3+4$ : Pythagoreische Tetraktys<sup>70</sup> scheinen viel wahrscheinlicher. Die 11 lässt sich als Primzahl, zusammengesetzt aus der „vollkommenen Zahl“ 6 und der 5 als Hälfte der Tetraktys bezeichnen,<sup>71</sup> auch kann man den Radius mit 1,69 m als die Größe eines Menschen (Mikrokosmos – Makrokosmos) verstehen (in der Literatur findet man als Durchschnittsgröße für den mittelalterlichen Menschen Werte von 1,65 m bis 1,77 m), der Durchmesser bestände dann aus zwei Menschen-Größen. Ob etwas davon bei der Bauplanung eine Rolle spielte, bleibt offen. Bei dem Arbeiten mit Maßverhältnissen wie Quadratseite zu Quadratdiagonaler und Kreisdurchmesser zu Kreisumfang kommen Zahlen ins Spiel, welche die antiken Gelehrten „inkommensurabel“ nannten (heute bezeichnen wir solche Zahlen als irrational).<sup>72</sup> Im Bauwesen wurden von der Antike bis ins 19. Jh. Maßeinheiten in 11 Teile geteilt, um Näherungszahlen hierfür zu bekommen.<sup>73</sup> So hat ein Quadrat mit einer Kantenlänge von 11 Einheiten einen Umfang von 44 Einheiten, welcher angenähert dem Umfang eines Kreises mit einem Durchmesser von  $11 + 3 = 14$  Einheiten entspricht (genauer Wert 43,98).<sup>74</sup> Es lässt sich also von einer Quadratur des Kreises sprechen.<sup>75</sup> Hieraus folgt ein weiterer wichtiger Aspekt der Kreisgeometrie. Teilt man 44 durch 14 respektive 22 durch 7, ergibt sich ein sehr guter Näherungswert für die Kreiszahl  $\pi$ , nämlich 3,1429 ( $\pi=3,1416\dots$ ). Es könnten also rein praktische Gründe für eine Wahl dieses „Grundmaßes“ ausschlaggebend gewesen sein, um Bau-Planung und -Ausführung zu erleichtern. Konrad Hecht hat an der Michaelskapelle in Schienen aus dem 9. Jh. und der Martinskapelle in Judentenberg aus dem frühen 12. Jh. ebenfalls Apsisbreiten von 11 Fuß ermittelt, allerdings mit anderen Fußmaßen und keinen halbkreisförmigen, sondern rechteckigen Grundrissen.<sup>76</sup>

Wie lassen sich nun weitere Rückschlüsse auf die bei der Bauausführung benutzten Maße ziehen? Eine ausschließliche Betrachtung der heute vorhandenen Bausubstanz, welche zweifellos die wichtigste Quelle darstellt, erweist sich als problematisch, da erhebliche Deformationen vorliegen. Wie bereits erwähnt, spielte die Geometrie bei der zeitgenössischen Bauplanung

65 BUSEN 1963: S. 300  
 66 BUSEN 1963: S. 298  
 67 PRESAS I PUIG 1998: S. 130  
 68 PFEIFFER 1986: S. 461  
 69 WILSON JONES 2015

70 GESZNER 2020: S. 36  
 71 SPERLING 1999: S. 45  
 72 FRANK 1923: S. 46f  
 73 PFEIFFER 1986: S. 113 u. S. 289f  
 74 KAPPRAFF 1990: S. 5  
 75 WILLIAMS 2015: S. 683  
 76 HECHT 1979: S. 7-11

eine wesentliche Rolle, da hierin eine gottgewollte Ordnung gesehen wurde. Es wird also vorerst die hier vorgestellte geometrische Konstruktion betrachtet. Zuerst soll gezeigt werden, dass neben dem Apsiskreis mit 11 Fuß noch weitere Maße am Bauwerk auf das angenommene Fußmaß von 30,7 cm hinweisen. Die Länge des Innenraums inklusive Apsis beträgt vier Apsiskreise, also 44 Fuß, die lichte Breite des Innenraums  $27\frac{1}{2}$  Fuß, entsprechend dem Durchmesser von  $2\frac{1}{2}$  Apsiskreisen, der Durchmesser der Mittelschiffgewölbe  $13\frac{3}{4}$  Fuß, jener der Seitenschiffgewölbe 10 Fuß, die Bögen der Gewölbeansätze an den Längswänden und jene zwischen Mittelschiff und Seitenschiffen haben einen Durchmesser von 8 Fuß, die restlichen Bögen in den Seitenschiffen einen von 6 Fuß. Die Maße der Seitenschiffgewölbe 6 zu 8 zu 10 ergeben ein pythagoreisches Dreieck. Die lichten Längen der Längswände betragen  $36\frac{1}{2}$  Fuß (Abb. 44). Der Befund zeigt, dass sich auch die Wandstärken in Fußmaßen ausdrücken lassen. Mit  $2\frac{3}{4}$  Fuß entspricht die Stärke der die Apsis umschließenden Wand genau der Hälfte des Radius des Apsiskreises. Die übrigen Wände haben eine Stärke von 3 Fuß, wobei die Nordwand noch um  $\frac{1}{4}$  bis  $\frac{1}{2}$  Fuß verstärkt wurde, wohl aufgrund der Hanglage (siehe oben). Bemerkenswert dabei ist, dass die Tiefe der Nischen diese Verstärkung aufgreift, denn während die Nischen der Südwand eine Tiefe von etwa 1 Fuß haben (mit Schwankungen von bis zu 5 cm), haben die östliche und westliche Nische der Nordwand eine Tiefe von  $1\frac{1}{2}$  Fuß und die beiden mittleren von  $1\frac{1}{4}$  Fuß, mit Differenzen von nur wenigen Millimetern. Eine mögliche Erklärung könnte bei den Fenstern der Längswände liegen, denn so sind deren Außenlaibungen in etwa gleich, was zu einem gleichmäßigen Lichteinfall führt. In den Schnitten beträgt die Höhe der Kämpfer über Fußboden 15 Fuß, die Höhen der Scheitelpunkte der Gewölbe ergeben sich aus deren Radien plus der Kämpferhöhe. Die Nischen haben eine Breite von 4 Fuß, an der Ost- und Westwand eine Höhe von 14 Fuß und an der Nord- und Südwand eine Höhe von  $16\frac{3}{4}$  Fuß. Der Scheitelpunkt des „Triumphbogens“ befindet sich 21 Fuß, die Sohlbänke der Apsisfenster 11 Fuß über dem Fußboden (nicht über dem erhöhten Boden der Apsis), die Fensterhöhe beträgt 4 Fuß, die Scheitelpunkte der Fensterbögen befinden sich also genau in Kämpferhöhe. Bei den beiden Fenstern in der Ostwand liegen die Sohlbänke ebenfalls in einer Höhe von 11 Fuß, die Fensterhöhe beträgt jedoch  $3\frac{1}{2}$  Fuß. Die Sohlbänke der Seitenschiffenster befinden sich in einer Höhe von 14 Fuß, die Fensterhöhen betragen  $3\frac{1}{4}$  Fuß. Der Scheitelpunkt des Bogens über der Türöffnung befindet sich 12 Fuß über dem Fußboden. Bei einigen der hier angegebenen Maße kommt es zu Differenzen von maximal 3 cm, meist sind diese aber deutlich geringer. Bei Höhe und Breite der Türöffnung, den Durchmessern der Ansätze

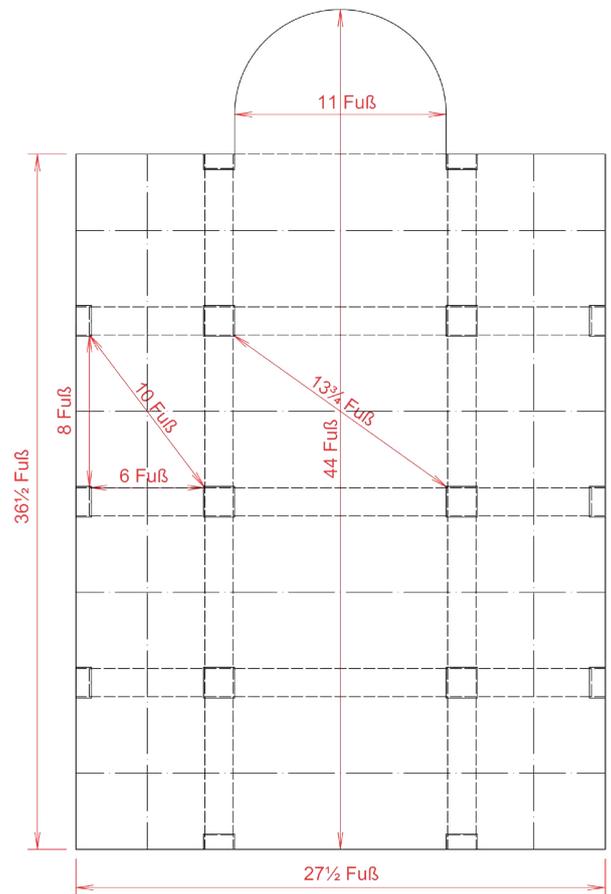


Abb. 44  
Fußmaße in der geometrischen Grundrisskonstruktion

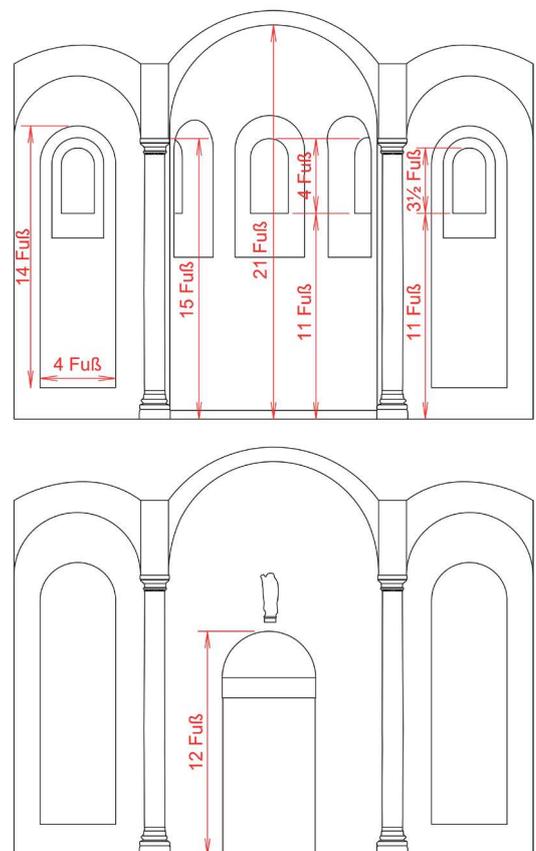


Abb. 45  
Fußmaße in den Querschnitten mit den Ansichten der Ost- (oben) und Westwand (unten)

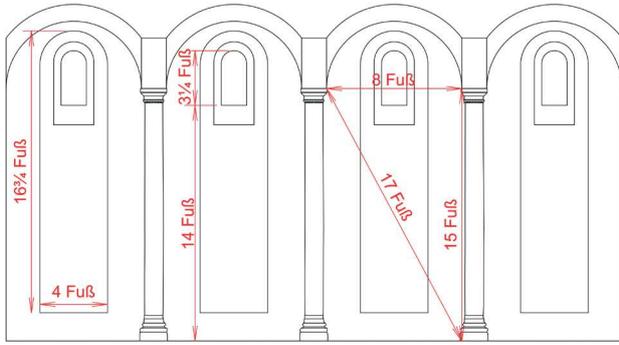


Abb. 46  
Fußmaße in den Längsschnitten durch die Seitenschiffe mit der jeweiligen Wandansicht

der Seitenschiffgewölbe an Ost- und Westwand sowie jener der drei Bögen des Mittelschiffs lassen sich keine eindeutigen Fußmaße erkennen. Die Bogenansätze bei Letzteren sind auf den Kapitellen einige Zentimeter eingerückt, während der Abstand der dem Mittelschiff zugewandten Kanten der Kapitelle ja genau dem Maß der Apsisbreite, also 11 Fuß entspricht. An den Längswänden der Seitenschiffe bilden die Kämpferhöhe und der Bogendurchmesser ein rechtwinkliges Dreieck, dessen Hypotenuse eine ganzzahlige Länge hat, nämlich 15 zu 8 zu 17 (Abb. 45 und 46).

In der geometrischen Konstruktion ergeben sich etliche sogenannte harmonikale Proportionen, also musikalische Harmonien, deren Entdeckung dem griechischen Philosophen und Mathematiker Pythagoras zugeschrieben wird.<sup>77</sup> So beträgt z.B. das Verhältnis der Gesamtlänge des Innenraums zur Innenraumbreite mit 44 zu 27½ Fuß, was 8 zu 5 entspricht, der kleinen Sexte. Der Apsisdurchmesser mit 11 Fuß verhält sich zur Gesamtlänge mit 44 Fuß wie 1 zu 4, der Doppeloktave, zur Innenraumbreite mit 27½ Fuß wie 2 zu 5, der Dezime, zum Durchmesser der Mittelschiffgewölbe mit 13¾ Fuß wie 4 zu 5, der Großen Terz, zur Breite eines Seitenschiffs (inklusive der Säulenbasis) mit 8¼ Fuß verhält sich der Apsisdurchmesser wie 3 zu 4, der Quarte, welche auch in dem Pythagoreischen Dreieck der Seitenschiffgewölbe vorkommt. Das Verhältnis zwischen Innenraumbreite und Länge der Seitenschiffe kommt der Quarte sehr nahe, denn rechnerisch sind die Seitenschiffe bei dieser geometrischen Konstruktion 5,1 cm zu kurz, bei der hier nur kurz vorgestellten Konstruktion mit den 14 Kreisen mit gleichem Radius sind es 11,4 cm. Der Durchmesser der Mittelschiffbögen mit keinem eindeutigen Fußmaß steht mit den Bögen zu den Seitenschiffen im genauen Verhältnis 7 zu 5, keine musikalische Proportion, sondern mit 1,4 einen praktikablen Näherungswert an  $\sqrt{2}=1,4142\dots$ , der Gewölbedurchmesser von 13¾ Fuß bildet mit den Bögen zu den Seitenschiffen das Verhält-

nis 55 zu 32, wiederum keine musikalische Proportion, sondern mit gerundet 1,72 einen guten Näherungswert für  $\sqrt{3}=1,7320\dots$  (Abb. 47). Auffällig ist das häufige Auftreten der Apsisbreite bei den unterschiedlichen Proportionen, was aber nicht zu verwundern braucht, denn schließlich ist deren Länge die Ausgangsstrecke für diese geometrische Konstruktion.

Auch in den Schnitten zeigen sich harmonikale Proportionen. Die lichte Höhe der Nischen in der Ost- und Westwand mit 14 Fuß verhält sich zur Höhe des Triumphbogens mit 21 Fuß wie 2 zu 3, der Quinte, die Kämpferhöhe mit 15 Fuß zur Höhe der Gewölbescheitel der Seitenschiffe mit 20 Fuß wie 3 zu 4, der Quarte. An der Westwand steht die Höhe des Scheitelpunkts des Bogens über der Tür mit 12 Fuß zur Kämpferhöhe mit 15 Fuß im Verhältnis 4 zu 5, der großen Terz, an den Längswänden verhält sich die Nischenbreite mit 4 Fuß zum Durchmesser der Nischenbögen mit 8 Fuß wie 1 zu 2, der Oktave, und besagter Bogendurchmesser zur Kämpferhöhe wie 8 zu 15, der großen Septime. Weit weniger offensichtlich zeigen sich Proportionen im Längsschnitt durch das Mittelschiff. Der Gesamtlänge von 44 Fuß steht nach der hier betrachteten geometrischen Konstruktion eine maximale Höhe von  $21\frac{7}{8}$

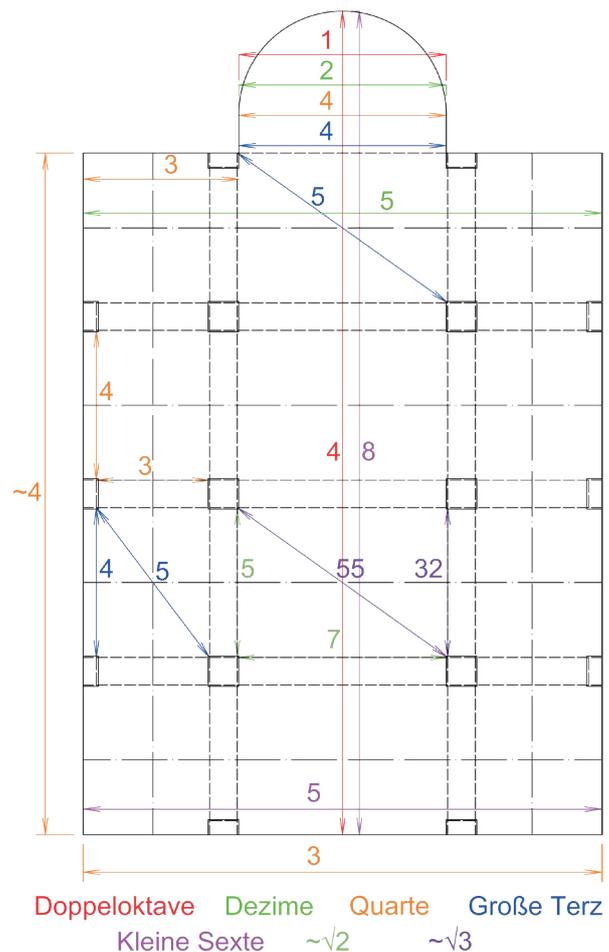


Abb. 47  
Harmonikale und Wurzel-Proportionen in der geometrischen Grundrisskonstruktion

Fuß gegenüber, die Proportion 2 zu 1 wird also knapp verfehlt, umgerechnet um 3,8 cm. Betrachtet man die schon erwähnte „gnadenlose“ Genauigkeit des Computers und die Ungenauigkeiten bei Handzeichnungen, so lässt sich mit ziemlicher Sicherheit annehmen, dass bei der Bauausführung für die Höhe der Scheitelpunkte der Gewölbe ein Maß von 22 Fuß angesetzt wurde, so dass maximale Raumhöhe und maximale Innenraumlänge im Verhältnis 1 zu 2 stehen, der Oktave. Auf die Höhe bezogen ergeben maximale Raumhöhe zur Sohlbankhöhe der Apsisfenster dasselbe Verhältnis. Die Breite der mittleren Bögen zu den Seitenschiffen bildet mit der Höhe der Apsisfenster ebenfalls das Verhältnis der Oktave. Eine weitere harmonikale Proportion zeigt das Verhältnis der Sohlbankhöhen der Apsisfenster mit 11 Fuß (Durchmesser Apsiskreis) zur Höhe der Scheitel der Bögen zwischen den Hauptschiffgewölben mit  $20 \frac{5}{8}$  Fuß, nämlich genau 8 zu 15, der Großen Septime. Die Höhe des Scheitelpunktes des Triumphbogens mit 21 Fuß zur Kämpferhöhe mit 15 Fuß ergibt mit 1,4 wieder einen praktikablen Näherungswert zu  $\sqrt{2}$  und die Höhe der Scheitelpunkte der Bögen zu den Seitenschiffen mit 19 Fuß zur Sohlbankhöhe der Apsisfenster mit 11 Fuß den Wert 1,73, wieder ein guter Näherungswert für  $\sqrt{3}$  (Abb. 48). Genau wie in der Grundrisskonstruktion stellt der Apsisdurchmesser, hier in Form der Sohlbankhöhe der Apsisfenster, wieder die häufigste Ausgangsstrecke der Proportionen dar.

Die Ausmaße der Kapitelle und Basen stellen hier einen Sonderfall dar. Es zeigen sich keine praktikablen Fußmaße, und doch lässt sich eine geometrische Konstruktion nachweisen. Hierbei wird jetzt das angenommene Fußmaß als Ausgangsmaß betrachtet. Auf einer geglätteten Oberfläche eines Sandsteinblocks entsprechender Größe, welche die obere Seite des Kapitells darstellt, auf der dann später die Gewölbe aufliegen, wird ein rechter Winkel mit der Schenkellänge von jeweils einem 1 Fuß als eine der vier Ecken des Kapitells markiert. Über die „Stetige Teilung“,<sup>78</sup> heute als „Goldener Schnitt“ bekannt, lässt sich ein Quadrat mit den Abmessungen des Kapitells erzeugen (Abb. 49). Hierfür wird eine Linie von der Spitze eines Schenkels (Schenkel 1) zur Mitte des anderen Schenkels (Schenkel 2) gezeichnet, um welche dann ein Kreis mit dem Durchmesser von 1 Fuß gezogen wird, der die zuvor gezeichnete Linie in einem Punkt schneidet. Der Abstand dieses Schnittpunktes zur Spitze von Schenkel 1 ergibt den Radius eines weiteren Kreises mit dem Mittelpunkt in der Spitze von Schenkel 1. Mit der Verlängerung von Schenkel 1 bis zum Umfang dieses Kreises ergibt sich die Kantenlänge des Kapitells, welche dann nur noch per Zirkelschlag auf Schenkel 2 übertragen und zu einem Quadrat vervollständigt wird.

Es handelt sich um eine sehr einfache Konstruktion, die mit rechtem Winkel, Fußmaß und Zirkel direkt am Stein durchgeführt werden kann. Im Aufriss, also den Seitenansichten der Kapitelle bildet dasselbe Quadrat den unteren Abschnitt. Die Bestimmung der wesentlichen Höhen erfolgt über Wurzelproportionen,<sup>79</sup> wobei die Quadratdiagonale ( $\sqrt{2}$ ) die Höhe einer Kante im oberen Kapitell-Abschnitt definiert und die Diagonale des so entstandenen Rechtecks ( $\sqrt{3}$ ) den oberen Abschluss der Kapitelle (Abb. 50), welche sich so als Würfelkapitelle mit

79 POPP 2005: S. 17f

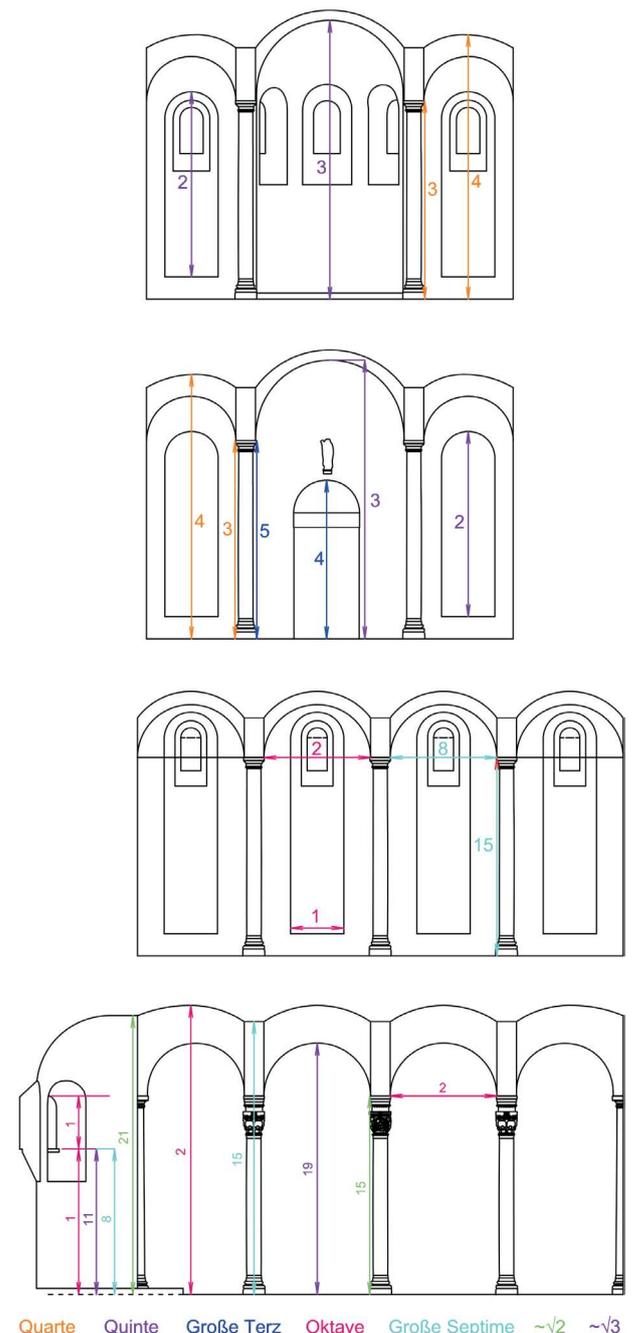


Abb. 48 Harmonikale und Wurzel-Proportionen in Schnitten und Wandansichten, Ostwand (oben), Westwand (Mitte oben), Süd-/Nordwand (Mitte unten), Längsschnitt Mittelschiff (unten)

Aufsatz bezeichnen lassen. Mit einer reicheren Ausbildung der Ornamente stechen die beiden mittleren Kapitelle hervor, die restlichen vier sind zwar gleichartig, doch die beiden östlichen detaillierter ausgebildet, was auch für die Ostseite der nordwestlichen Säule zutrifft, als ob die Steinmetze nicht rechtzeitig fertig geworden wären. Inwieweit die Ornamentierungen auch auf geometrischen Bezügen beruhen, bedarf einer gesonderten Untersuchung.

Die Rolle von geometrischer Konstruktion und Proportion wird in der umfangreichen entsprechenden Fachliteratur kontrovers diskutiert. Es geht dabei von der Maßstäblichkeit mittelalterlicher Bauzeichnungen<sup>80</sup> über das Auffinden der an Bauwerken verwendeten Grundmaße (Fuß, Elle, usw.) als Teil der metrologischen Forschung<sup>81</sup> bis hin zur Untersuchung von musikalischen Proportionen in der Architektur,<sup>82</sup> um nur einige Teilaspekte zu nennen. Edgar Wedepohl hat seinen Briefwechsel mit Armin von Gerkan veröffentlicht,<sup>83</sup> in dem die wesentlichen beiden Seiten verdeutlicht werden. Während ersterer die der Geometrie innewohnende Schönheit und Harmonie hervorhebt, lehnt letzterer deren bewusste Anwendung bei der Planung ganzer Gebäude entschieden ab. In der Kritik an Proportionsstudien taucht, mit Recht, immer wieder auf, dass hierfür von demselben Bauwerk unterschiedliche Plangrundlagen, also Bauaufnahmen, herangezogen werden. Diese unterscheiden sich teilweise erheblich in den angegebenen Maßen, so dass für eine vermutete Proportionierung die Plä-

ne herangezogen wurden, in welche diese am besten passte, eine natürlich unseriöse Vorgehensweise. Nur in den seltensten Fällen wurden Kontrollmaße am Bauwerk genommen oder gar eine neue Bauaufnahme erstellt.<sup>84</sup> Doch wie lässt sich entscheiden, ob eine Bauaufnahme ein Bauwerk mit exakten Maßen abbildet oder nicht? Dieses Problem besteht auch heute noch, und für die Vergangenheit sind nur die Messbild-Aufnahmen Meydenbauers als verlässlich zu betrachten.<sup>85</sup> Ein weiterer Kritikpunkt an einer Proportionierung, oder den „Proportionsfiguren“ als häufig genutzte Bezeichnung, besteht darin, dass abstrakte, oft irrationale Maße nur schwer auf der Baustelle umzusetzen sind. Hier müsse mit den zur Verfügung stehenden Messwerkzeugen gearbeitet werden.<sup>86</sup> Doch muss eine geometrisch erzeugte „Proportionsfigur“ bzw. die der Planung zu Grunde liegende geometrische Konstruktion überhaupt 1 zu 1 auf die Baustelle übertragen werden? Bei dem hier gezeigten Beispiel des Innenraums der Bartholomäuskapelle ist dies keineswegs der Fall, die geometrisch erzeugten Maße lassen sich ohne die geometrischen „Hilfs“-Konstruktionen mit Messlatte und Seil auf den Baugrund übertragen, sobald die Apsisbreite als Grundmaß festgelegt ist. Die Innenraumlänge kann dann als das Vierfache der Apsisbreite abgesteckt werden usw., rechte Winkel können entsprechend mit Schnurkreisen oder rechtwinkligen Holzdreiecken abgetragen werden. Konrad Hecht, einer der größten Kritiker von „Proportionsfiguren“, spricht den Baumeistern die Nutzung geometrischer Verfahren, des Grundmaßes und dessen

80 HECHT 1966

81 z. B. PFEIFFER 1986

82 HEINZ 2005

83 WEDEPOHL 1967: S. 284-297

84 HECHT 1969: S. 306-310

85 HECHT 1969: S. 308

86 HECHT 1971: S. 26-29

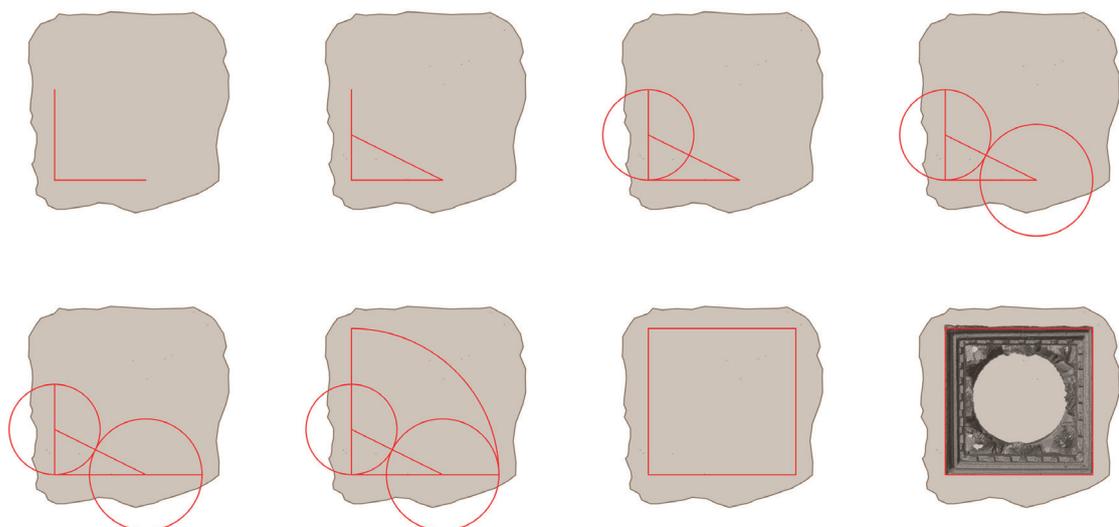


Abb. 49

Konstruktionsreihenfolge an der Aufsicht der Kapitelle nach der Stetigen Teilung, beginnend oben links, wobei der waagerechte Schenkel des Winkels hier als „Schenkel 1“, der senkrechte als „Schenkel 2“ bezeichnet wird, dann weiter fortlaufend von links nach rechts

Vielfaches bzw. Teiler davon zu (was nichts Anderes als Proportionierung bedeutet). Es wird jedoch zwischen (angewandter) Geometrie und Proportionsgeometrie unterschieden,<sup>87</sup> ohne diesen Unterschied allerdings zu verdeutlichen. Seine Schriften behandeln hauptsächlich die Entstehung gotischer Bauten, wohl auch weil die Quellen für frühere Zeiten sehr dünn gesät sind, doch lassen sich seine Ausführungen auch auf andere Stilepochen übertragen. Ein weiterer Diskussionspunkt ist die Maßstäblichkeit mittelalterlicher Baupläne. Mit Maßstab versehene Pläne tauchen erst im 15./16. Jh. auf, die älteren, bis ins 13. Jh. zurückgehenden zeigen keinen Maßstab und kaum einzelne Maße.<sup>88</sup> Für letztere gibt es Versuche, über Vergleichsmaße an den noch bestehenden Bauwerken nachträglich einen Maßstab zu implantieren.<sup>89</sup> Ob dies wirklich Sinn ergibt, sei in Frage gestellt. Für den Innenraum der Bartholomäuskapelle bedurfte es keiner mit einem Maßstab versehenen Plangrundlage, wie hier dargelegt wurde, die Anwendung von Geometrie und Proportion machte dies überflüssig. Es ist nicht davon auszugehen, dass es sich hier um einen Einzelfall handelt, doch um wirklich belastbare Aussagen zu Geometrie und Proportionierung eines historischen Bauwerks treffen zu können, dürfen nur Plangrundlagen auf der Grundlage einer möglichst vollständigen Erfassung mit 3D-Laserscanning oder photogrammetrischer Verfahren genutzt werden, da die Maßgenauigkeit sonst nicht gewährleistet werden kann. Den Kritiken an den bisherigen Proportionsanalysen ist somit Recht zu geben, allerdings lässt sich im

Umkehrschluss daraus nicht herleiten, dass es im Mittelalter keine proportionsbedingten Entwürfe gegeben hat. Ganz im Gegenteil, bei der Bedeutung, welche die Zeitgenossen der Geometrie, besonders den geometrischen Grundformen, und den Proportionen zukommen ließen,<sup>90</sup> wäre es unwahrscheinlich, keine geometrischen Planungen anzunehmen.

87 HECHT 1971: S. 37

88 BINDING 2017: S. 38

89 z. B. HECHT 1966: S. 256-265

90 PRESAS I PUIG 1998: S. 130 / BINDING 2004: S. 69-71

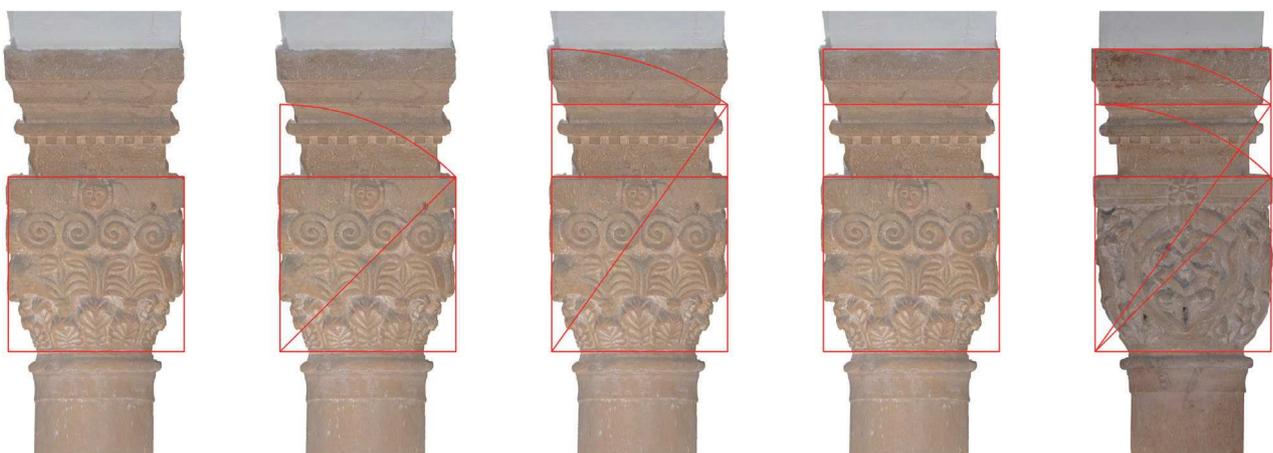


Abb. 50 Konstruktionsreihenfolge an einer Ansicht der östlichen und westlichen Kapitelle mit dem gleichen Quadrat wie bei der Aufsicht über den Wurzelproportionen  $\sqrt{2}$  (zweites Bild von links) und  $\sqrt{3}$  (drittes Bild von links), ganz rechts über einem der mittleren Kapitelle

## Betrachtungen über die Bauausführung der Gewölbe

Die Beschädigungen im 2. Weltkrieg erforderten umfangreiche Restaurierungsarbeiten, welche aber erst im Jahre 1955 begonnen werden konnten. Der gesamte Verputz der Gewölbe musste entfernt werden, wobei sich zeigte, dass dieser aus einer früheren Restaurierungsphase stammte. Der wohl ursprüngliche Verputz war dabei vollständig entfernt und die Fugen der Gewölbevermauerung aus Kalkstein und Tuff 5-8 cm tief ausgeschlagen worden.<sup>91</sup> Die Restaurierungsarbeiten erfolgten unter Aufsicht des damaligen Landeskonservators Herrmann Busen. In seiner hier mehrfach herangezogenen Veröffentlichung aus dem Jahre 1963 beschreibt er auch die nun sichtbaren Strukturen der Mauerwerkskonstruktion der Gewölbe. Es kam eine Schalung sparende Methode zur Anwendung, bei der diese soweit wie möglich als Krag-Gewölbe ausgeführt wurden. Busen schreibt, dass diese Bauart im holzarmen Syrien entwickelt und auch in Byzanz bei kleineren Gewölben angewendet wurde, ohne jedoch einen Beleg hierfür anzugeben.<sup>92</sup> Im Archiv des Metropolitankapitels in Paderborn ist eine zwar nicht vollständige, aber doch aussagekräftige Fotodokumentation der freigelegten Gewölbe von Theo Gockel vorhanden, welche jedes der 13 Gewölbe mit in der Regel 3 Aufnahmen aus unterschiedlichen Blickwinkeln zeigt, ebenso die beiden Gewölbe des westlichen Annex-Baus, der heute nicht mehr existiert. Die Fotos lassen sich über eine Nummerierung der Gewölbe (Abb. 51) oder die zugehörigen Bildunterschriften eindeutig zuweisen. Dem Gewölbe 10 lassen sich sogar 7 Fotos zuordnen, bei dem Gewölbe 13 sind es 6 Fotos. Die von Busen beschriebene teilweise Ausführung als Kraggewölbe lässt sich gut nachvollziehen, besonders deutlich zeigt sich dies am Gewölbe 8. Im unteren Bereich befinden sich auskragende Stein-schichten, auf denen Bogen und Gewölbe ansetzen (Abb. 52).

Für jedes Gewölbe existiert eine wohl möglichst orthogonal fotografierte Untersicht, woraus Rückschlüsse auf die Vermauerungstechnik gezogen werden können. Möchte man hieraus einen Deckenspiegel aller 13 Gewölbe erstellen, ergibt sich, neben der vorhandenen perspektivischen Verzerrung, die Schwierigkeit der genauen Orientierung und des Maßstabs, da in den Bildunterschriften Angaben hierzu fehlen. Das Wissen um die hier

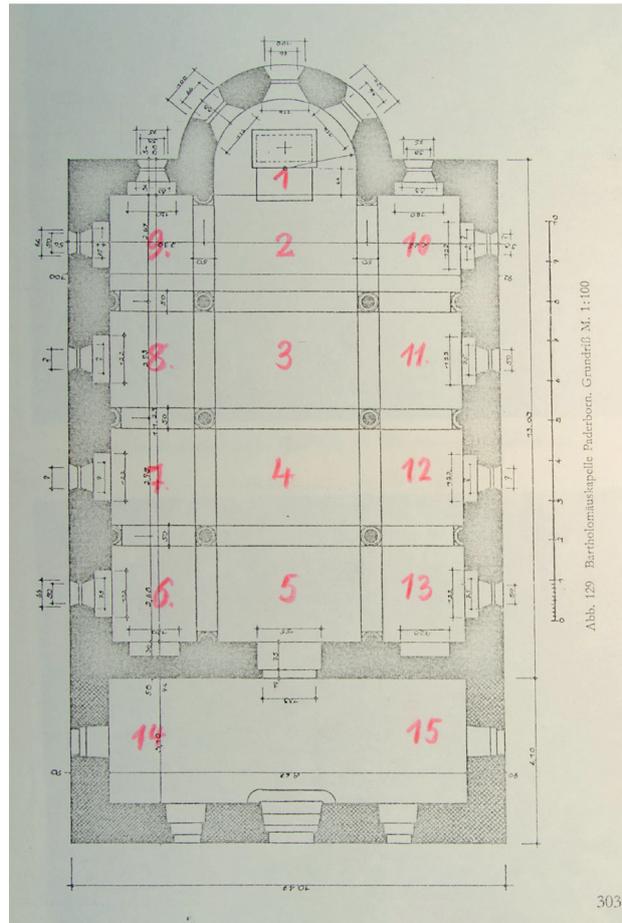


Abb. 51  
Bezeichnung der Gewölbe für die Zuordnung der Fotos



Abb. 52  
Gewölbe 8, Blick nach Westen (Ausschnitt)

91 BUSEN 1963: S. 273/274

92 BUSEN 1963: S. 295/296, Abb. 124

benutzte Kamera oder vielmehr das Negativformat und die Objektivbrennweite würde zu einer guten Annäherung führen. Die vorhandenen Papierabzüge haben ein Längen-/Seitenverhältnis von 3 zu 2, was für das 1955 gängige Kleinbildformat von 36x24 mm spricht. Weitere benutzte Negativformate haben andere Seitenverhältnisse.<sup>93</sup> Die übliche Objektivbrennweite der damaligen Kleinbildkameras betrug 50 mm, was in der Horizontalen einen Blickwinkel von ca. 40° und in der Vertikalen von ca. 27° ergibt. Es gab aber auch schon Kameras mit Wechselobjektiven, und z.B. ein Objektiv mit 35 mm Brennweite hat einen größeren Blickwinkel von ca. 54° bzw. ca. 38° bei nur geringer Verzeichnung,<sup>94</sup> was bei Architekturaufnahmen, insbesondere mit kurzen Objektabständen wie bei Innenraumaufnahmen von Vorteil ist. Der Abstand zwischen Kamera und Aufnahme-Objekt stellt einen weiteren Faktor für die Größe des Bild-Maßstabs dar. Einen wertvollen Hinweis hierzu liefert die in einigen Bildern gezeigte hölzerne Gerüstebene (Abb. 53). Über die bekannten Maße der Kapitelle lässt sich die Höhe auf ca. 75 cm unterhalb des Gewölbeansatzes abschätzen. Geht man von der Annahme aus, dass der Fotograf bei den Gewölbeuntersichten die Kamera möglichst horizontal ausrichten und einen möglichst großen Gewölbeausschnitt erfassen wollte, ist es für ihn sinnvoll, die Kamera mit der Objektivöffnung nach oben auf die Gerüstdielen zu legen. Oder sich selbst auf den Rücken zu legen, um noch durch den Sucher schauen zu können, was den Blickwinkel dann wieder etwas verkleinern würde. Unter dieser Voraussetzung kann nun versucht werden, die Brennweite des Objektivs zu bestimmen, wobei zuerst von dem möglichen Gebrauch eines 35mm- oder 50mm-Objektivs ausgegangen wird. Neben den Gewölbe-Untersichten lassen sich hierfür noch



Abb. 53  
Lage der Gerüstebene

weitere Fotos heranziehen, der Fotograf hat nämlich im Mittelschiff noch pro Gewölbe ein Foto in Richtung Norden und eins nach Süden aufgenommen, bei den Seitenschiffen jeweils nach Norden oder Süden und Osten oder Westen, wodurch sich die Untersichten orientieren lassen (Abb. 54). Sinnvolle Standpunkte hierfür wären jeweils unter jenen den Aufnahmeobjekten gegenüberliegenden Bögen. Für die Untersichten mit einer angenehmen direkt auf den Gerüstbohlen liegenden Kamera lässt sich dies in den Quer- und Längsschnitten mit eingetragener Gerüst-Ebene darstellen (Abb. 55), bei den übrigen Fotos im Grundriss, als

93 GRITTNER 1958: S. 281

94 GRITTNER 1958: S. 103-106

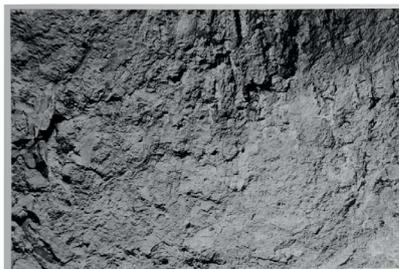


Abb. 54  
Fotos des westlichen Gewölbes des Mittelschiffs

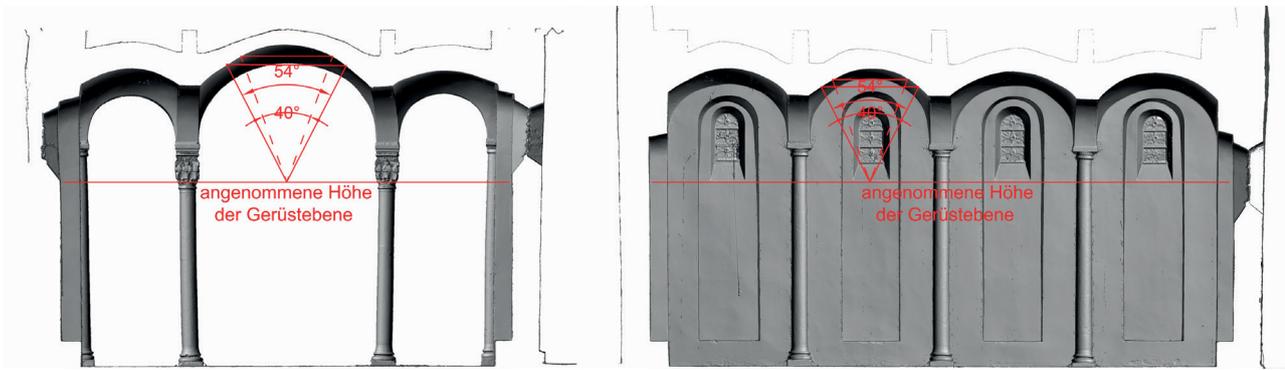


Abb. 55  
Mögliche Kamerapositionen im Mittelschiff (links) und nördlichem Seitenschiff (rechts)

Beispiel hier die Südseite des Mittelschiffs (Abb. 56). Die eingetragenen Blickwinkel zeigen, dass mit hoher Wahrscheinlichkeit ein 35mm-Objektiv benutzt wurde. Nun lassen sich auch die Gewölbe-Untersichten in angenäherter Lage und Größe im Grundriss platzieren, dargestellt hier als Aufsicht, wobei die perspektivische Verzerrung durch die Gewölbekrümmung zu beachten ist (Abb. 57). Nun lassen sich die Fugenverläufe teilweise nachzeichnen, wobei das heterogene Steinmaterial eine eindeutige Zuordnung erschwert. Die Gewölbevermauerung besteht aus Kalk- und Tuffsteinen (siehe oben), die sich anhand der Oberflächenstruktur meist gut unterscheiden lassen. Größere Exemplare sind annähernd quaderförmig mit einer Länge von etwa 25 bis 30 cm und einer Breite von 5 bis 10 cm, die meisten Steine sind jedoch deutlich kleiner und von unregelmäßiger Form. Die

Nachzeichnung kann somit nur als eine Interpretation des jeweiligen Betrachters angesehen werden. Trotzdem bietet das Gesamtbild klare Hinweise. In den Gewölben der Seitenschiffe, besonders deutlich im südlichen, treten meist annähernd kreis- bzw. halbkreisförmige Fugenbilder auf, während dies im Mittelschiff nur bei der Apsis und dem westlichen Gewölbe der Fall ist. Geht man nun davon aus, dass die Gewölbe ohne Schalung errichtet wurden, so lässt sich eine mögliche Bauabfolge rekonstruieren, welche auf der beabsichtigten Neutralisierung des Gewölbeschubs basiert. Die Eckgewölbe der Seitenschiffe und das Apsisgewölbe konnten den Anfang bilden, dann folgten die restlichen Seitenschiffgewölbe und das westliche Gewölbe des Mittelschiffs, und zum Schluss die übrigen drei Gewölbe des Mittelschiffs. Zum Auffangen der Schubkräfte mussten so nur die Kapi-

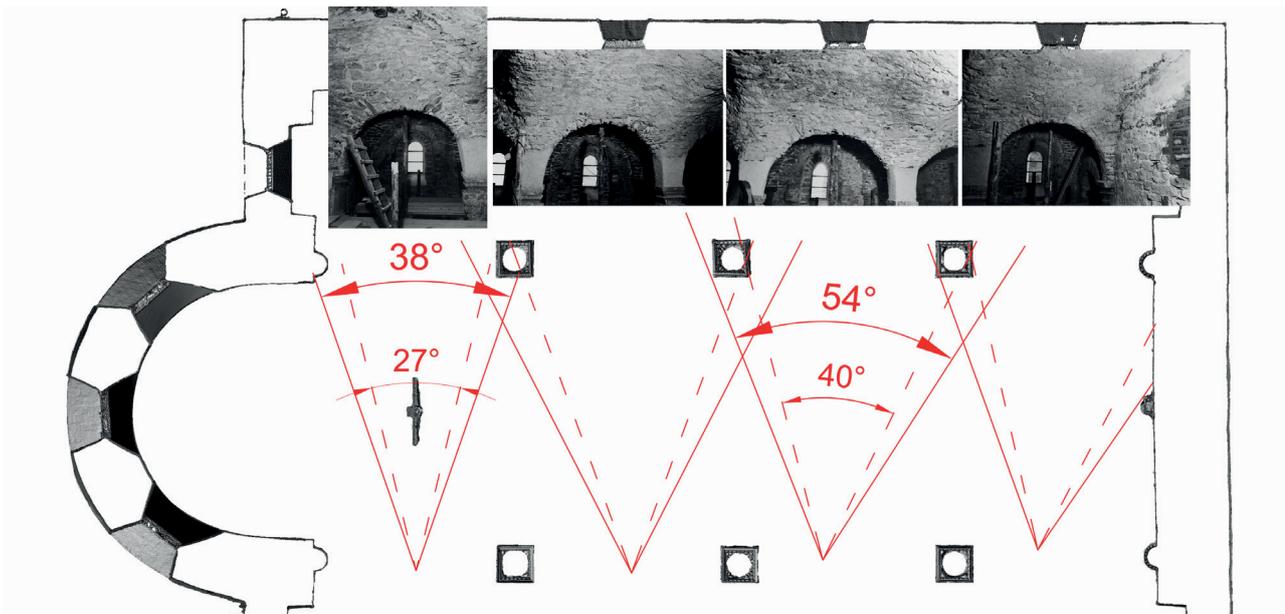


Abb. 56  
Mögliche Kamerapositionen für die Aufnahmen des nördlichen Teils des Mittelschiffs

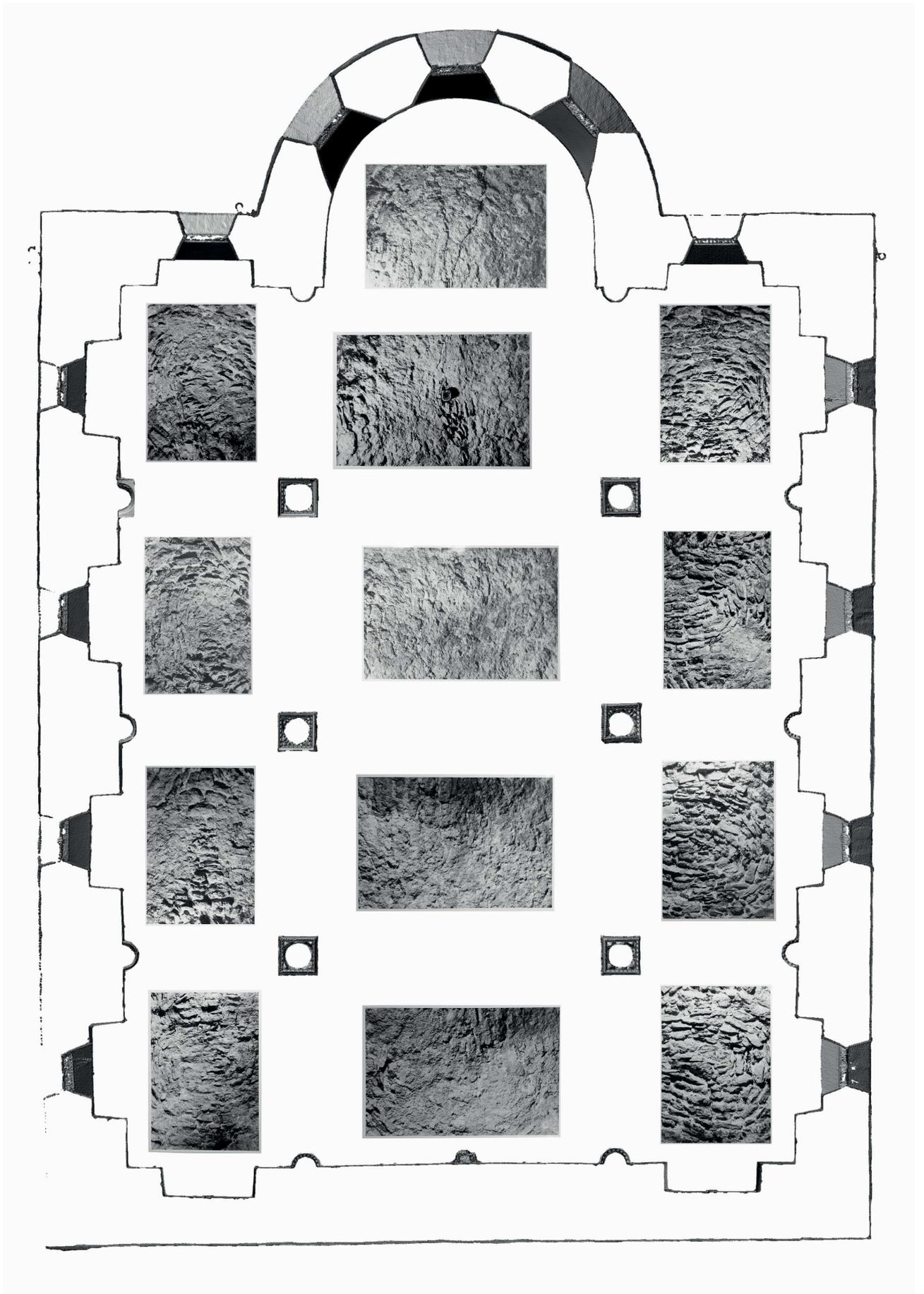


Abb. 57  
Fotos der Gewölbeuntersichtsichten dargestellt als Aufsichten (gespiegelt), annähernd lage- und maßstabgerecht

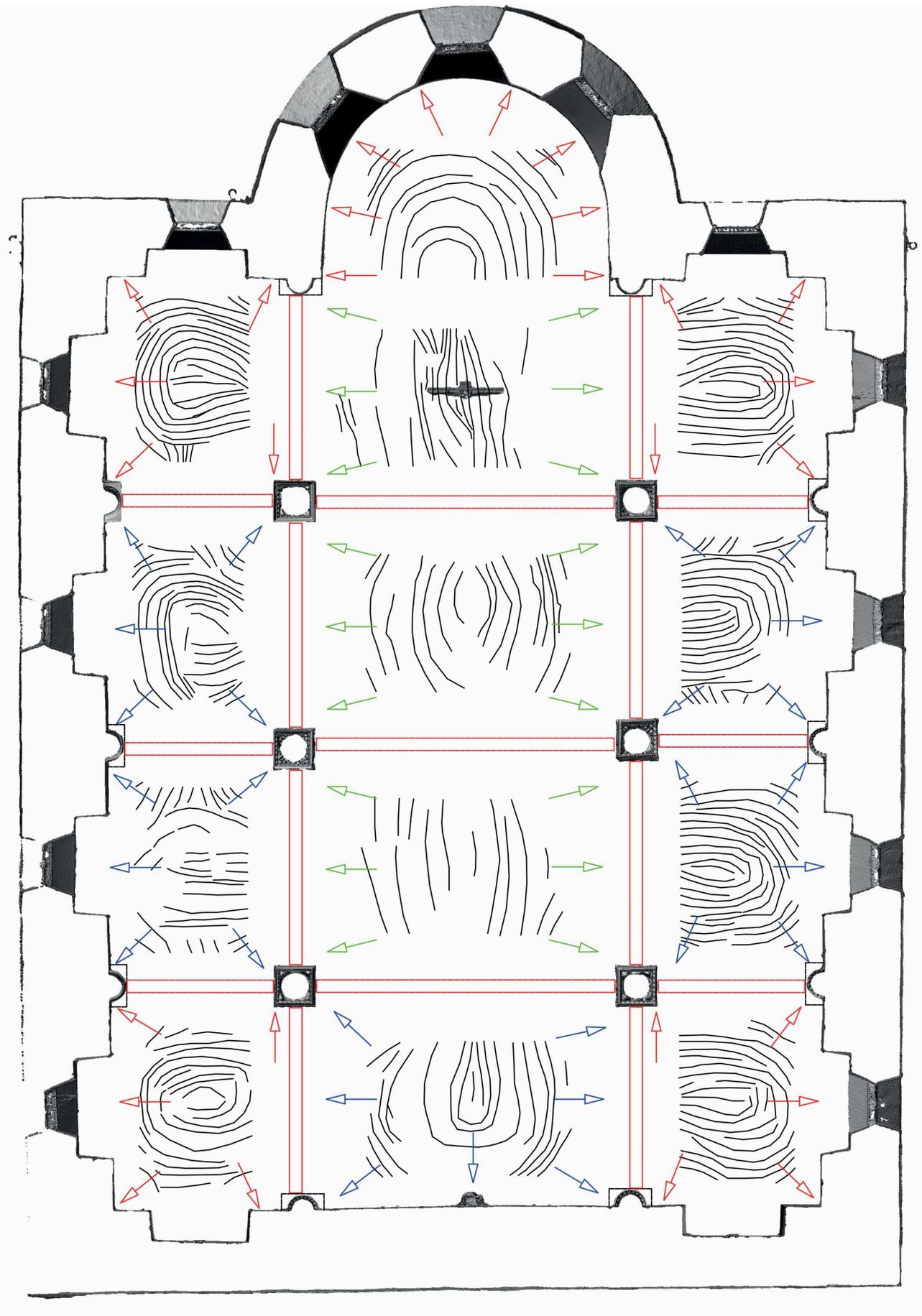


Abb. 58  
 Nachgezeichnetes Fugenbild. Die Pfeile (rot: erster Bauabschnitt, blau: zweiter und grün: dritter Bauabschnitt) zeigen den ungefähren Kräfteverlauf des Gewölbeschubs, die roten Rechtecke eine mögliche Aussteifung der Kapitelle

telle der freistehenden Säulen in Ostwest-Richtung stabilisiert werden, z.B. mit dazwischengesetzten Holzbalken. Dies könnte auch ebenso direkt in Nordsüd-Richtung ausgeführt worden sein (Abb. 58), denn für die Fertigstellung der Bögen lässt sich auf eine irgendwie geartete Unterkonstruktion kaum verzichten. So macht auch die größere Stärke der Seitenschiffgewölbe Sinn (siehe Abb. 11), deren größere Masse den Schub der Mittelschiffgewölbe schon während des Baus auffangen konnte.

Ein Modell-Versuch könnte weitere Hinweise auf die Arbeitsweise der damaligen Bauleute liefern. Das Modell hat den Maßstab 1 zu 10 und stellt den Abschnitt für das Gewölbe 13 dar (siehe Abb. 51), mit den abstrahierten Außenwänden in Schwarz. Die Höhe der Gerüstebene ist so gewählt, dass sich die Kapitelle gut auf den Säulen anbringen lassen. Eine Art Bock bezeichnet den Mittelpunkt der das Gewölbe definierenden Halbkugel und ist fest mit der Tragkonstruktion der Gerüstebene verbunden (Abb. 59). Sind die Kapitelle an ihren Plätzen, erfolgen die bereits erwähnten Aussteifungen (siehe Abb. 58), auf welchen die Mittelpunkte der „Gurtbögen“ markiert werden. Zum Hauptschiff hin muss der Mittelpunkt hier erhöht werden, da der Bogen einen kleineren Radius hat (siehe Abb. 41). Die beiden weiteren Aussteifungen für das Kapitell sind hier aus modellbaupraktischen Gründen nicht dargestellt, müssen aber als vorhanden betrachtet werden (Abb. 60). Mit T-förmigen Stützkonstruktionen von den Mittelpunkten aus werden die ausragenden Steinschichten in der genauen Position gehalten. Für die Erstellung der oberen Bereiche der Bögen könnte eine mit diesen Stützkonstruktionen fixierte runde Schalung oder ein Brett mit darauf gelegten Holzklötzen gedient haben. Dafür muss natürlich zuerst auch auf dem Kapitell die entsprechende Aufmauerung erstellt werden, was hier im Modell nicht dargestellt ist. Für die Bestimmung der Gewölbeform wird hier ein Stab mit der Länge des Radius der Gewölbe-Halbkugel benutzt, dessen eines Ende auf dem Bock mit dem markierten Mittelpunkt des Gewölbes gehalten wird, das andere an den gerade versetzten Stein (Abb. 61). Auf diese Weise kann die Gewölbeform bestimmt werden ohne eine aufwendige Verschalung erstellen zu müssen. Auch die Abweichungen von der Halbkugelform zu den Außenwänden hin stellte für die damaligen Bauleute kein Problem dar, der Übergang Gewölbe-Wand ist ja ebenfalls geometrisch definiert, was in den beiden vorherigen Kapiteln gezeigt wurde.



Abb. 59  
Modell im Maßstab 1 zu 10



Abb. 60  
Aussteifungen für das Kapitell mit Markierungen für die Mittelpunkte der „Gurtbögen“



Abb. 61  
Bestimmung der Gewölbeform

In dieser Untersuchung konnte gezeigt werden, dass die Kubatur des Innenraums der im frühen 11. Jh. erbauten Bartholomäuskapelle in Paderborn auf einer geometrischen Konstruktion beruht. Religiöse Bezüge mit Anleihen aus der Antike spielten bestimmt eine wesentliche Rolle, doch ansonsten ist hier die Geometrie keineswegs als Selbstzweck zu betrachten. Planung und Bauausführung wurden durch die Befolgung einer „geometrischen Logik“, enorm vereinfacht, Proportionen und Harmonien ergaben sich quasi von selbst. Die grundlegende Voraussetzung für alle hier aufgeführten Betrachtungen bildet die Dokumentation mit 3D-Laserscanning, welche einen hochgenauen verformungsgerechten „digitalen Zwilling“ am Computer erzeugt. Alle benötigten

Maße können so abgegriffen werden, ohne aufwendige Nachmessungen am Objekt durchführen zu müssen. Für das Auffinden einer belastbaren geometrischen Konstruktion bildet wiederum die Analyse der über die Jahrhunderte aufgetretenen Deformationen eine unabdingbare Voraussetzung, da sonst die baubedingten Unregelmäßigkeiten nicht erkannt werden können. Es bleibt abzuwarten, inwieweit die vielfältigen bisher erstellten Proportionsstudien an historischen Bauwerken einer mit 3D-Laserscanning oder photogrammetrischen Verfahren erstellten Bauaufnahme standhalten können. Offenbleiben muss noch die Auswirkung der Geometrie auf die besondere Akustik in der Bartholomäuskapelle, weitere diesbezügliche Untersuchungen sollen noch erfolgen.

### Abstract

During this scientific research it showed that the cubature of the interior of the Bartholomew's Chapel, built in Paderborn in the early 11th. century, bases on a strictly geometric construction. Of course religious references played a significant role during the building, as did references to the antique mathematicians and philosophers. But despite this geometry was not used just for its own sake. Planning and construction of the chapel were very much simplified by the use of a „logical geometry“, and the right proportions and harmonies fell into place by themselves. The basic thing necessary for all here given considerations is a documentation by 3D-Laserscanning which creates a perfect

„digital twin“, conformable to all deformations the building shows. All needed measurements can be obtained by the „digital twin“, a second measurement of the building in situ is not needed. On the other hand a diagnosis of the deformations according to time is essential to differentiate them from the irregularities which happened while building the chapel. It is still to see if the many studies of proportions on historical buildings that exist up to date are up to a survey by 3D-Laserscanning or photogrammetrical surveying. Still to see is also the effect of the geometry on the special acoustics in the Bartholomew's Chapel; further examinations are still to come.

- Balzer, Manfred (2018): „Erbauungszeit – Patrozinium – Funktionen. Die Bartholomäuskapelle nach den mittelalterlichen Schriftzeugnissen“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitankapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 12-21.
- Binding, Günther / Nussbaum, Norbert (1978): Der mittelalterliche Baubetrieb nördlich der Alpen in zeitgenössischen Darstellungen, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Binding, Günther/Linscheid-Burdich, Susanne (2002): Planen und Bauen im frühen und hohen Mittelalter, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Binding, Günther (2004): Meister der Baukunst, Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.
- Binding, Günther (2015): Bauvermessung und Proportion im frühen und hohen Mittelalter, Stuttgart: Anton Hiersemann KG.
- Binding, Günther (2017): „Bauwissen im Früh- und Hochmittelalter“, in: Wissensgeschichte der Architektur Band III: Vom Mittelalter bis zur Frühen Neuzeit, Jürgen Renn / Wilhelm Osthues / Herrmann Schlimme (Hrsg.), Edition Open Access, Berlin, S. 9-94
- Broser, Jost-Michael (2018): „Dokumentationsmethode durch Laserscanning und SfM-Verfahren bei der Vermessung der Bartholomäuskapelle“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitankapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 168-181
- Broser, Jost-Michael (2019): „1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn – Neue Erkenntnisse über die Bauhistorie durch 3D-Laserscanning“, in: Photogrammetrie Laserscanning Optische 3D-Messtechnik, Beiträge der Oldenburger 3D-Tage 2019, Thomas Luhmann / Christina Müller (Hrsg.), Berlin und Offenbach: Wichmann, S. 285-294
- Broser, Jost / Kandler, Ekkehard / Lieblang, Peter (2020): „Gewölbeanalysen in der Paderborner Bartholomäuskapelle. Ein Exkurs zur Bauforschung im Umfeld des Doms“, in: Die Paderborner Kathedrale als Kirchen-, Kunst-, und Lebensraum im europäischen Kontext, Norbert Börste/ Stefan Kopp/Jonas Miserre (Hrsg.), Paderborn: Verlag Paderborn, S. 176-186
- Busen, Herrmann (1963): „Die Bartholomäuskapelle in Paderborn“, in: Westfalen. Hefte für Geschichte, Kunst und Volkskunde 41, S. 273-312
- Cornwall, James E. (1979): Historische Kameras 1845-1970, Herrsching: vwi-Verlag.
- Frank, Erich (1923): Platon und die sogenannten Pythagoreer. Ein Kapitel aus der Geschichte des griechischen Geistes, Halle.
- Fredel, Jürgen (1998): Maßästhetik, Hamburg: Lit Verlag.
- Fuchs, Alois (1953): „Zur Forschung über die Bartholomäuskapelle in Paderborn“, in: Zwischen Wissenschaft und Politik / Festschrift für Georg Schreiber, hrsg. im Auftr. d. Görres-Gesellschaft von Johannes Spörl, München: Alber, S. 581-585
- Fuchs, Alois (1958): „Änderungen und Restaurationen an der Bartholomäuskapelle in Paderborn“, in: Alte und neue Kunst im Erzbistum Paderborn 8, Paderborn, S. 5-26
- Gai, Sveva (2018): „Die archäologischen Untersuchungen an der Bartholomäuskapelle. Erkenntnisse zur Lage, Funktion und Datierung“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitankapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 22-35
- Gericke, Helmut (1990): Mathematik im Abendland, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag.
- Geßner, Kerstin (2020): Die Vermessung des Kosmos, Köln: Böhlau Verlag.
- Giefers, Wilhelm Engelbert (1854): Drei merkwürdige Capellen Westfalens zu Paderborn, Externstein und Drüggelte, historisch-artistisch dargestellt, 2. vermehrte Aufl., Paderborn.
- Grittner, Richard (1958): Handbuch der Kamerakunde, München: Verlag Luitpold Lang.
- Gurjewitsch, Aron J. (1986): Das Weltbild des mittelalterlichen Menschen, München: Verlag C.H.Beck.
- Hecht, Konrad (1966): „Zur Maßstäblichkeit der mittelalterlicher Bauzeichnung“, in: Bonner Jahrbücher Band 166, Köln, S. 253-268

- Hecht, Konrad (1969): „Maß und Zahl in der gotischen Baukunst“, in: Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 21, S. 215-326
- Hecht, Konrad (1971): „Maß und Zahl in der gotischen Baukunst (Schluß)“, in: Abhandlungen der Braunschweigischen Wissenschaftlichen Gesellschaft Band 23, 1971/72, S. 25-236
- Hecht, Konrad (1979): „Fußmaß und Maßzahl in der frühmittelalterlichen Baukunst und Wandmalerei des Bodenseegebietes“, in: Schriften des Vereins für Geschichte des Bodensees und seiner Umgebung, 97. Heft 1979, Selbstverlag des Bodenseegeschichtsvereins, Friedrichshafen, S. 1-28
- Heinz, Werner (2005): „Musik in der Architektur“, Beihefte zur Mediaevistik, Peter Dinzelbacher (Hrsg.), Band 4, Europäischer Verlag der Wissenschaften, Frankfurt am Main.
- Huyer, Michael (2018): „Zur Restaurierungsgeschichte der Bartholomäuskapelle im 19. Und 20. Jahrhundert“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitantkapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag S. 140-167
- Junecke, Hans (1982): Die wohlbemessene Ordnung. Pythagoreische Proportionen in der historischen Architektur, Berlin.
- Kaplan, Ulrich (2018): „Bartholomäuskapelle – Provenienzanalyse der Naturbausteine“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitantkapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 196-205
- Kapraff, Jay (1990): „Connections - The Geometric Bridge between Art and Science, Singapore.
- Kapraff, Jay (2015): Musical Proportions at the Basic of Systems of Architectural Proportion both Ancient and Modern“, in: Architecture and Mathematics from Antiquity to the Future, Volume 1: Antiquity to the 1500s, Kim Williams/Michael J. Oswald (Hrsg.), Heidelberg/New York/Dordrecht/London, S. 549-565
- Klug, Sonja Ulrike (2020): Zauber des Zirkels – Die Frage nach den Bauplänen des Mittelalters, Oppenheim am Rhein: Nünnerich Asmus.
- Kopp, Stefan (2018): „Die Liturgische Bewegung in Paderborn und die gottesdienstliche Nutzung der Bartholomäuskapelle in den 1920er Jahren“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitantkapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 120-127
- Meydenbauer, Albrecht (1912): Handbuch der Messbildkunst in Anwendung auf Baudenkmäler- und Reise-Aufnahmen, Halle a. S.
- Mietke, Gabriele (1991): Die Bautätigkeit Bischof Meinwerks von Paderborn und die frühchristliche und byzantinische Architektur, Paderborner Studien 21, Paderborn: Ferdinand Schöningh.
- Naredi-Rainer, Paul von (1999): Architektur und Harmonie, Bonn: FLC/VG Bild-Kunst.
- Pfeiffer, Elisabeth (1986): Die alten längen- und Flächenmaße. Ihr Ursprung, geometrische Darstellung und arithmetische Werte, Band 2, Scripta Mercaturae Verlag St. Katharinen.
- Pieper, Jan/Schindler, Bruno (2017): Thron und Altar, Oktagon und Sechzehneck, Aachen – Berlin: Geymüller.
- Pomaska, Günter (2016): Bildbasierte 3D-Modellierung, Berlin und Offenbach: Wichmann.
- Popp, Roger (2005): Die Mittelmaße in der Architektur. Wesen, Bedeutung und Anwendung von der Antike bis zur Renaissance (Schriften zur Kunstgeschichte 11), Hamburg.
- Presas i Puig, Albert (1998): Praktische Geometrie und Kosmologie am Beispiel der Architektur, Münchener Universitätsschriften.
- Roggenkamp, Hans (1954): „Maß und Zahl“, in: Die Michaeliskirche in Hildesheim, Hartwig Beseler / Hans Roggenkamp, Berlin: Verlag Gebr. Mann, S. 121-158
- Sander, Johannes (2011): Geschichte des Jesuitenkollegs in Paderborn 1580-1659, hrsg. und übersetzt von Ludwig Kneißler, mit Anm. von Friedrich Gerhard Hohmann (Studien zur westfälischen Geschichte 64), Paderborn.
- Schmalor, Herrmann-Josef (2018): „Nutzungsgeschichte der Bartholomäuskapelle nach der Zeit der Jesuiten bis zum Anfang des 20. Jahrhunderts“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitantkapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 110-119
- Sedlmayr, Hans (1993): Die Entstehung der Kathedrale,

Freiburg: Verlag Herder.

Sperling, Gert (1999): Das Pantheon in Rom, Neuried: Ars Una.

Wedepohl, Edgar (1967): Eumetria - Das Glück der Proportionen, Verlag Richard Bach, Essen.

Werz, Joachim (2018): „Die Bartholomäuskapelle als multimedialer und –funktionaler Sakralraum für die Jesuiten (1580-1650)“, in: 1000 Jahre Bartholomäuskapelle in Paderborn, Norbert Börste / Stefan Kopp (Hrsg.), Metropolitankapitel Paderborn: Michael Imhof Verlag, S. 102-109

Williams, Kim (2015): Verrochio's Tomb slab for Cosimo de Medici: Designing with a Mathematical Vocabulary, in: Architecture and Mathematics from the Antiquity to the Future - Volume I: Antiquity to the 1500s, Williams,

Euklides: *Stoicheia* – Die Elemente des Euklid, ins Deutsche übertragen von Dr. phil. Rudolf Haller (2010), Edition Opera-Platonis.

Platon: *Philebos*, 51 St. 2 C, nach der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher, in: *Platons Werke*. Zweiten Teiles dritter Band, dritte Auflage, Berlin 1861, bearbeitet

Platon: *Politeia*, siebentes Buch 527, nach der Übersetzung von Friedrich Schleiermacher, Berlin 1987, vgl. GESZNER 2020: S. 51

Platon: *Timaios*, 31 St.3 A bis 32 St.3 A, nach der Übersetzung von Franz Susemihl, in: *Platon's Werke*, vierte Gruppe, sechstes und siebentes Bändchen, Stuttgart 1856, bearbeitet

Vitruv: *Zehn Bücher über Architektur*. Lateinisch und deutsch. Übersetzt und mit Anmerkungen versehen von Curt Fensterbusch (1964), Darmstadt: Wissenschaftliche Buchgesellschaft.

Marcus Vitruvius Pollio (Vitruv), *Zehn Bücher über Architektur*, übersetzt und erläutert von Jakob Prestel (1974), 3. Aufl., Baden-Baden.

Titel: Broser

Abb. 1-13: Broser

Abb. 14: Archiv des Metropolitankapitels Paderborn

Abb. 15: LWL-Denkmalpflege, Landschafts- und Baukultur in Westfalen, Bildarchiv Münster: 34 PB Bartholomäusk. H. Vössing 1953

Abb. 16-50: Broser

Abb. 51: Archiv des Metropolitankapitels Paderborn, Theo Gockel, Serie I

Abb. 52, 54: Archiv des Metropolitankapitels Paderborn, Theo Gockel, Serie II

Abb. 53: Archiv des Metropolitankapitels Paderborn, Theo Gockel, Serie III

Abb. 56, 57: Archiv des Metropolitankapitels Paderborn, Theo Gockel, Serie II, Bearbeitung Broser

Abb. 58-61: Broser