

AN DEN GRENZEN DER SPÄTANTIKEN BAUTECHNIK: DIE HAGIA SOPHIA KAISER JUSTINIANS

Zusammenfassung

Die Hagia Sophia in Istanbul ist eines der bau- und kulturgeschichtlich wichtigsten und aus Sicht des Bauingenieurs bemerkenswertesten Bauwerke der letzten 1500 Jahre.

Der nachfolgende Beitrag schildert die politischen Umstände, die zu der Erbauung dieses Bauwerks führten und stellt die beteiligten Akteure – Bauherr und Baumeister – vor. Die bereits während der Bauzeit auftretenden bautechnischen und baustatischen Schwierigkeiten werden erläutert und einer technischen Wertung unterzogen. Auf Grundlage der Bau- und Konstruktionsgeschichte wird das stetige Bemühen der Baumeister beschrieben, das Gebäude zu ertüchtigen und dieses in einen stabilen – seit nunmehr über 650 Jahre schadensfreien – Zustand zu versetzen.

Abstract

Istanbul's Hagia Sophia is one of the most important and remarkable buildings of the past 1 500 years in terms of architectural and cultural history as well as from a civil-engineering perspective.

The following article describes the political situation leading to the construction of this building portraying the parties – Owner and Builder – involved. Technical and structural challenges, which appeared already during early construction, are explained and technically evaluated. On the basis of the building's history the on-going endeavour of the builders to keep the building in a stable – yet 650 years free of failure – condition is being described.

Einleitung

Die Hagia Sophia in Istanbul, eines der architekturgeschichtlich bedeutendsten Bauwerke der letzten 1500 Jahre, war im Rahmen des von Herrn Professor Dr.-Ing. Fritz Wenzel geleiteten DFG-Projektes ›Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul‹ Gegenstand umfangreicher Forschungen.¹

Durch eine eingehende Untersuchung des Konstruktionsgefüges wurde der Blick auf die Geschichte des Gebäudes gerichtet, wie es sich über die Jahrhunderte und mehrere Teileinstürze hinweg bis zum heutigen Tag entwickelt hat. Neben der präzisen Bestimmung von Bauteilgeometrien, der Ermittlung von Gefüge- und Materialeigenschaften ließen sich auch die spezifischen geometrischen und strukturellen Eigenarten der verschiedenen Konstruktionsphasen erkennen und differenzieren. Damit stehen Kenntnisse zur Verfügung, welche nicht nur eine bessere technische Beurteilung des überlieferten Konstruktionsgefüges und eine Analyse von Lastfluss und Tragverhalten möglich machten, sondern auch zu neuen Einsichten in die Bau- und Konstruktionsgeschichte verhelfen.

Obleich der Fokus dieser Forschungen auf dem ingenieurwissenschaftlichen Aspekt des Bauwerks lag, wurde deutlich, dass ein ganzheitliches Verständnis nur unter Berücksichtigung der politischen und sozioökonomischen Umstände gelingen kann und diese den Bauprozess, die Bauwerksgeschichte und die Entwicklung in der Bautechnik ganz erheblich beeinflussten.

Bereits die Erbauung der Hagia Sophia, deren Entwurf und baulogistische Umsetzung einen absoluten Grenzbereich in der spätantiken Bautechnik kennzeichneten und nur aufgrund der machtpolitischen und religiösen Ambitionen des Kaisers zu realisieren waren, aber auch die Teileinstürze als Folge einer Überschreitung baustatischer Gesetzmäßigkeiten oder die verschiedenen Aufbauphasen, welche hinsichtlich ihrer handwerklichen Qualität als Spiegelbild der jeweiligen wirtschaftlichen Lage betrachtet werden können, sind hierbei nur einige der Gesichtspunkte, welche die enge Verflechtung von technischen, kulturellen und politischen Aspekten demonstrieren.

Der Beitrag unternimmt den Versuch, baukonstruktive Fakten, Beobachtungen und Analysen in Beziehung zu den politischen und wirtschaftlichen Randbedingungen und Zwängen zu setzen, denen die Baumeister der Erbauungszeit und der anschließenden Bauphasen unterworfen waren. Gleichzeitig wird am Beispiel eines der herausragenden Bauwerke der Architekturgeschichte der schmale Grat geschildert, der zwischen bautechnischem Erfolg und

¹ Duppel, Christoph: *Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul*. Karlsruhe 2010; ders.: *Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hagia Sophia in Istanbul – Teil 1: Das Konstruktionsgefüge*. In: *Bautechnik* 87 (2010), H. 11, S. 708–716; ders.: *Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hagia Sophia in Istanbul – Teil 2: Zum Tragverhalten*. In: *Bautechnik* 87 (2010), H. 12, S. 790–799; Wenzel, Fritz: *Investigations into the construction and repair history of the Hagia Sophia*. In: *Construction History* (2010), Vol. 25, S. 1–20.

Scheitern liegt, dessen Beschreiten jedoch für die Entwicklung der Bautechnik von entscheidender Bedeutung war.

Die Erbauung – Politische Umstände und Bauherr

Ihre weithin sichtbaren Abmessungen, die außerordentlich kurze Bauzeit und ein überwältigender Raumeindruck machen die Einzigartigkeit der Hagia Sophia in Istanbul in der Architekturgeschichte aus (Abb. 1). Ihre Erbauung in Form einer Kuppelbasilika symbolisiert die unlösbare Verbindung von politischer und geistiger Führung und demonstriert damit neben dem uneingeschränkten Machtanspruch Kaiser Justinians gar die Rolle des Kaisers als Stellvertreter Christi.

Als Bauernsohn geboren regierte Kaiser Justinian von 527 bis zu seinem Tode im Jahre 565 und gilt als einer der bedeutendsten Herrscher der Spätantike. Das Ziel verfolgend, ein christliches Reich aufzubauen,² entfaltete er unter Einsatz enormer Ressourcen eine sehr rege Bautätigkeit.

Das markanteste innenpolitische Ereignis bildete der sogenannte Nika-Aufstand in Konstantinopel im Jahre 532. Hierbei schlossen sich rivalisierende Zirkusparteien gegen den Kaiser zusammen und riefen – verärgert durch Justinians Bestrebungen, ihre Macht einzuschränken – einen Gegenkaiser aus. Dieser Aufstand wurde durch Truppen des Kaisers äußerst blutig niedergeschlagen. Es wird von 30 000 Toten und enormen Zerstörungen berichtet. Auch der Vorgängerbau der Hagia Sophia wurde in der Nacht vom 12. auf den 13. Januar 532 niedergebrannt.

Berichten zufolge soll bereits am 23. Februar 532 – also 40 Tage später – mit der Erbauung der Hagia Sophia begonnen worden sein. Dieser Akt ist somit als Demonstration der kaiserlichen Macht und Zeichen des Triumphes Justinians über die aristokratische Konkurrenz³ zu werten. Aufgrund dieses unmittelbaren Baubeginns existieren sogar Mutmaßungen, dass Pläne für den alles übertreffenden Kirchenbau bereits vor dem Aufstand vorhanden waren.

Die nachfolgenden Ausführungen zur Rolle des Kaisers, den Baumeistern und dem Bauprozess basieren insbesondere auf den Berichten des zeitgenössischen Geschichtsschreibers Prokopios von Caesarea, welche die ausführlichste und gebräuchlichste Quelle dieser Zeit bilden.

Prokopios von Caesarea (* um 500; † um 562), im Deutschen zumeist Prokop genannt, war ein spätantiker griechischer Historiker und gilt als der letzte große Geschichtsschreiber der Antike. Neben einem acht Bücher umfassenden Werk *Historien* zu den militärischen Auseinandersetzungen Kaiser Justinians verfasste Prokop mit *De Aedificiis* (Bauten)⁴ auch eine sechsbändige Abhandlung zu den umfassenden Bautätigkeiten des Kaisers. In Buch 1 zu den Baumaßnahmen in Konstantinopel nimmt die Beschreibung der Hagia Sophia und ihrer Erbauung eine zentrale Stellung ein.

2 Leppin, Hartmut: *Justinian. Das christliche Experiment*. Stuttgart 2011.

3 Ebd., S. 193.

4 Prokop: *Werke. Bauten*. Griech.-dt. Ed. Otto Veh. München 1977.



Abb. 1 Hagia Sophia, Istanbul

Es sei darauf hingewiesen, dass das Werk vermutlich in den Jahren 553–555 – und damit knapp 20 Jahre nach Fertigstellung der Hagia Sophia – entstand. Vor diesem Hintergrund sind gewisse Unschärfen in der Darstellung der Ereignisse denkbar, wobei die grundsätzliche Aussagekraft nicht in Frage gestellt wird.

Die Erbauung – Baumeister

Zur Verwirklichung seines ambitionierten Bauvorhabens benötigte der Kaiser Fachleute – das heißt Architekten und Baumeister –, welche das Gebäude planten und die Erstellung in technischer Hinsicht begleiteten. Seine Wahl fiel hierbei auf zwei äußerst qualifizierte, aus Kleinasien stammende Gelehrte und Mathematiker: Anthemios von Tralles und Isidoros von Milet.

Beim Studium der Schriften des Prokopios von Caesarea fällt auf, dass alle Großtaten auf dem Gebiet des Bauwesens als persönliche Leistung des Kaisers dargestellt wurden. Es wurde lobpreisend und wiederholt betont, wie kaiserliche Klugheit, Güte und Frömmigkeit doch alles so großartig und zweckmäßig einrichteten. Baumeister und sonstige Beteiligte wurden entweder stillschweigend übergangen oder mussten sich mit der bescheidenen Rolle ausführender Organe begnügen.

Eine Ausnahme machte Prokopios von Caesarea bei den Baumeistern der Hagia Sophia. Er betonte ganz bewusst deren besondere Qualifikation indem er schrieb:

»Der Kaiser nun scheute keine Ausgaben, er machte sich mit allem Eifer ans Werk und berief sämtliche Fachleute aus der ganzen Welt. Anthemios von Tralles, mit Abstand der glänzendste Ingenieur nicht nur der Gegenwart, sondern auch der Vergangenheit, unterstützte den kaiserlichen Eifer, indem er den Bauleuten ihre Aufgaben zuwies und die Pläne für die Schöpfung entwarf; mit ihm arbeitete Isidoros aus Milet, auch sonst ein kluger Kopf und wert, einem Kaiser Justinian zu dienen.«⁵

Anthemios von Tralles (* 474; † vor 558), auf den der Entwurf der Hagia Sophia zurückgehen soll, wurde als ausgezeichnete Mathematiker und Architekt beschrieben. Gemäß den Berichten des zeitgenössischen Historikers Agathias von Myrina war Anthemios von Tralles »[...] ausgezeichnet als Ingenieur, und brachte es zu Höchstleistungen in der Mathematikwissenschaft.«⁶ Neben der Kenntnis der geometrischen Konstruktion von Parabeln und Ellipsen soll Anthemios von Tralles auch Maschinen und Vorrichtungen ersonnen haben. Von seinen wissenschaftlichen Arbeiten ist heute nur noch ein Fragment über Brenn- und Hohlspiegel erhalten. Berichte lassen jedoch vermuten, dass er weitaus Bedeutenderes verfasst hat.

Isidoros von Milet (* 442; † 537), der sich vorwiegend der Ausführung des Bauwerkes widmete, zeichnete ebenfalls hohes handwerkliches und mathematisch-naturwissenschaftliches Können aus. Er unterrichtete Physik in Alexandria und Konstantinopel. Er schrieb Kommentare zu den »Gewölben« des Heron von Alexandria; auch sollen Texte des Mathematikers Archimedes von ihm bearbeitet worden sein.

Die beschriebenen Qualifikationen und Kenntnisse der Baumeister lassen unschwer erahnen, dass die beiden Gelehrten als herausragende Ingenieure ihrer Zeit galten und dem von Vitruv bereits im 1. Jahrhundert vor Christus in seinem Werk über die Baukunst *De architectura libri decem* geforderten Idealbild eines Baumeisters durchaus nahe kamen.

Die Erbauung – Entwurf

Der Entwurf der neuen Hagia Sophia hatte nichts mehr mit der zuvor existierenden Kirche zu tun.⁷ Die Raumkonzeption stellte eine Zusammenfassung und Steigerung sämtlicher Ideen dar, die im christlichen Sakralbau bisher Gestalt angenommen hatten. Basilika und Zentralkuppel verbanden sich zum Gebäudetyp der Kuppelbasilika und versinnbildlichten damit die Verbindung von kirchlicher und weltlicher Macht.

5 Ebd., S. 23.

6 Schneider, Alfons Maria: *Die Hagia Sophia zu Konstantinopel*. Berlin 1939.

7 Es wird von zwei Vorgängerbauten als Palast- und Hauptkirche der Stadt berichtet. Zunächst als »Megale ekklesia« (»Die große Kirche«) bezeichnet, tragen sie seit Anfang des 5. Jahrhunderts bereits den Namen »Hagia Sophia«. Die erste holzgedeckte Basilika, begonnen unter Kaiser Konstantin um 325, soll im Jahre 393 bei einem Volksauflauf in Brand gesteckt worden sein. Beim Nachfolgebau, eingeweiht im Jahre 415 unter Theodosius, soll es sich um eine fünfschiffige Basilika mit westlicher Vorhalle gehandelt haben.



Abb. 2 Blick vom Kuppelscheitel

Der Scheitel der Kuppel befindet sich 56 Meter über dem Fußbodenniveau der Kirche und überspannt diese mit einem Durchmesser von 34 Metern (Abb. 2). In Anbetracht dieser enormen Bauwerksdimensionen sei angemerkt, dass die antiken Baumeister in der Regel nur sehr behutsam und in überschaubar kleinen Schritten ihren durch erfolgreich ausgeführte Bauten gesicherten handwerklich-technischen Erfahrungsraum verließen und sich im Allgemeinen eng an bewährte Vorbilder hielten. Die Hagia Sophia stellte eine deutliche Ausnahme dar, da die Baumeister – angetrieben vom Ehrgeiz des Kaisers – sehr weit über damals durch Erfahrung gesicherte Maße hinausgingen.

Diese mangelnden Erfahrungswerte führten – wie im Weiteren gezeigt wird – im Bauprozess und darüber hinaus zu erheblichen Problemen.

Die Erbauung – Bauprozess und Statische Probleme

Zum eigentlichen Bauprozess und der bauphysikalischen Umsetzung gibt es nur wenige zeitgenössische Hinweise. Angeblich waren bis zu 10 000 Arbeiter im Einsatz, um die außerordentlich kurze Bauzeit zu realisieren. Es wird zwar vermutet, dass in byzantinischer Zeit technische Berichte oder Planunterlagen zu den Baumaßnahmen an der Hagia Sophia existierten,⁸ jedoch sind heute davon keine mehr vorhanden.

8 Mango, Cyril: *Byzantine writers on the fabric of Hagia Sophia*. In: Mark, Robert; Çakmak, Ahmet Ş. (Hg.): *Hagia Sophia from the age of Justinian to the present*. Cambridge 1992, S. 41–56.



Abb. 3 Der östliche Hauptbogen

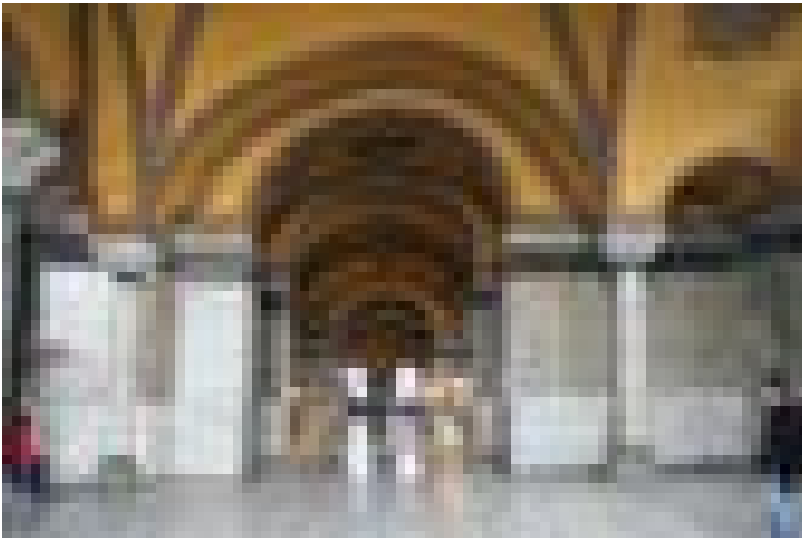


Abb. 4 Deformierter Bogen am nordöstlichen Hauptpfeiler im Galeriegeschoss

Vom Engagement des Kaisers wird berichtet, dass er nicht nur erhebliche finanzielle Mittel zur Verfügung stellte, sondern nahezu täglich die Baustelle besucht habe, um die Arbeiten zu kontrollieren und voranzutreiben.⁹

Prokopios von Caesarea schrieb hierzu:

»Doch nicht allein unter Einsatz von Geldmitteln errichtete sie der Kaiser, er förderte sie auch durch mühsames Planen und sonstige Seelenstärke [...].«¹⁰

Derartige Formulierungen und Berichte lassen erahnen, dass der Kaiser – über die Wahrnehmung seiner Bauherrenrolle hinaus – unmittelbar Einfluss auf den Bauprozess beziehungsweise die ›Lösung‹ baukonstruktiver beziehungsweise baustatischer Probleme nahm. Zwei Beispiele seien nachfolgend dargelegt.

Als erstes Beispiel zeigt Abbildung 3 den östlichen Hauptbogen. Er überspannt den Kirchenraum mit einer Spannweite von circa 31 Metern und lagert auf den mächtigen Hauptpfeilern. Die aus der Bogentragwirkung resultierenden Horizontalkräfte haben dazu geführt, dass Hauptpfeiler und die daran angrenzenden Bauteile eine deutlich sichtbare horizontale Verformung erfuhren (Abb. 4). Heute beträgt die Lotabweichung gegenüber der Vertikalen circa 50 Zentimeter.

Dass sich diese Deformationen zu einem großen Teil bereits während der Bauzeit – gegebenenfalls bereits infolge des Schubes des den Bogen stützenden Lehrgerüsts – einstellten, ist unstrittig.¹¹ Bereits Prokopios von Caesarea wies auf diese bautechnischen Schwierigkeiten hin, indem er schrieb:

»Einer der eben erwähnten Bogen [...] und zwar der östliche war auf beiden Seiten schon emporgewachsen, in der Mitte aber noch nicht ganz ausgeführt, sondern unvollendet. Da konnten die Pfeiler, auf denen das Bauwerk ruhte, die Größe der Last nicht mehr tragen, [...] und drohten bald einzustürzen. Anthemios und Isidoros und ihre Leute, über den bösen Zwischenfall tief beunruhigt, berichteten an den Kaiser und fühlten sich mit ihrer Kunst am Ende.«¹²

Diese Formulierung lässt erahnen, dass die überaus qualifizierten und über große Erfahrung verfügenden Baumeister die statische Problematik und Brisanz erkannten und dem Kaiser gegenüber ihre berechtigten Bedenken mit Nachdruck äußerten.

Letzterer ›löste‹ die geschilderte Problematik folgendermaßen:

9 Balfour, John Patrick Douglas (›Lord Kinross‹): *Hagia Sophia*. Wiesbaden 1976.

10 Prokop (Anm. 4), S. 31.

11 Mainstone, Rowland J.: *Hagia Sophia – Architecture, Structure and Liturgy of Justinian's Great Church*. London 1988, S. 89.

12 Prokop (Anm. 4), S. 31 ff.



Abb. 5 Schildwand unter nördlichem Hauptbogen

»Justinian aber befahl auf der Stelle, den Bogen fertig zu wölben; wer ihm diesen Gedanken eingegeben, weiß ich nicht, doch da er kein Ingenieur ist, war es vermutlich Gott.«¹³

Die beschriebene Reaktion des Kaisers zeigt, dass dieser die Bedenken seiner Baumeister nicht teilte und sich – vom Machstreben und religiösen Ehrgeiz getrieben, einen alles übertreffenden Kirchenbau zu erstellen – über die fachlichen Ratschläge und baustatischen Gesetzmäßigkeiten hinwegsetzte.

Als zweites Beispiel zeigt Abbildung 5 den nördlichen Hauptbogen. Im Gegensatz zur West- und Ostseite sind unter den Hauptbögen auf Nord- und Südseite Schildwände erstellt. Da der Bogen die Schildwände überspannt, erfüllten diese zunächst keine tragende sondern lediglich eine raumabschließende Funktion. Sofern sich der Hauptbogenseitel – wiederum infolge eines horizontalen Ausweichens seiner Auflager – absenkte, erfuhren die Schildwände jedoch durchaus eine Belastung und bekamen damit tragenden Charakter.

Hierzu berichtete Prokopios von Caesarea:

»[...] was nun die übrigen Bogen gen Süden und Norden anlangt, trug sich folgendes zu: Die [...]Schildwände...] standen schon und sie trugen bereits den Kirchenbau, da litten sämtliche Teile unter dieser Last, und die Säulen dort sonderten Steinsplitterchen ab, [...]. Und wiederum waren die Ingenieure über das Missgeschick ganz entmutigt, als sie dem Kaiser von ihren augenblicklichen Schwierigkeiten berichteten.«¹⁴

¹³ Ebd., S. 32.

¹⁴ Ebd., S. 33.

Und er schrieb weiter:

»Doch auch diesmal fand Justinian Abhilfe und zwar auf folgende Weise: Von den erwähnten betroffenen Teilen ließ er die obersten Lagen, soweit sie die Bogen berührten, sofort entfernen und erst viel später wieder aufsetzen, sobald die Feuchtigkeit des Baues ganz und gar daraus verschwunden war. Und die Ingenieure handelten danach, worauf das Werk bis heute sicher dasteht. Auch auf diese Art findet das kaiserliche Walten seine Bestätigung.«

Im Gegensatz zu dem oben beschriebenen Vorfall, war die beschriebene Maßnahme – das Einfügen einer Fuge zwischen lastabgebendem Bogen und nichttragender Schildwand – baukonstruktiv durchaus sinnvoll. Ob diese Maßnahme auf Anregung des Kaisers erfolgte, darf jedoch angezweifelt werden.

Am 27. Dezember 537 erhielt die Hagia Sophia ihre erste Weihe. Trotz der angedeuteten baukonstruktiven Probleme vollendeten die von Kaiser Justinian beauftragten Baumeister Anthemius von Tralles und Isidoros von Milet das Bauwerk nach der bemerkenswert kurzen Bauzeit von fünf Jahren und zehn Monaten.

Die Leistung der Baumeister ist umso höher einzuschätzen, als sie sich – wie im Folgenden noch gezeigt wird – bis an die Grenzen der in der Spätantike verfügbaren technischen Möglichkeiten wagten beziehungsweise wagen mussten, und damit eine der kühnsten Konstruktionen von Menschenhand schufen.

Technische Wertung und Ursachen des ersten Einsturzes

Die Ursachen der beschriebenen baukonstruktiven Schwierigkeiten sind in erster Linie in den spezifischen Eigenschaften der gewählten Bauart beziehungsweise der verwendeten Baustoffe zu suchen.

Hinsichtlich der Materialien verkörpert die Hagia Sophia die oströmische Bautradition des 6. Jahrhunderts.¹⁵ Das verwendete Mauerwerk besteht hierbei aus flachen, großflächigen Ziegeln mit Mörtelfugen, deren Höhe der Ziegelhöhe entspricht (Abb. 6). Der puzzolanhaltige Mörtel hat den Charakter eines hydraulischen Kalkes und ist mit entsprechend langen Abbindezeiten behaftet.

Insofern weist das »junge« byzantinische Mauerwerk – einerseits bestimmt durch den langsamen Abbindeprozess, andererseits durch die ungewöhnlich dicken Lagerfugen – eine sehr starke Tendenz zu plastischen Formänderungen auf.

Die oben beschriebenen Pfeilerauslenkungen, welche auf Kämpferhöhe der Hauptbögen in nördliche beziehungsweise südliche Richtung circa 50 Zentimeter betragen, lassen sich damit in hohem Maße auf ein plastisches Kriechen des jungen Mörtels zurückführen.

¹⁵ Duppel 2010 (Anm. 1), S. 80 ff.



Abb. 6 Mauerwerksstruktur im Bereich der Kuppelrippen

Vor dem Hintergrund des sehr raschen Baufortschritts konnte dieser eine nur begrenzte Festigkeit entwickeln und reagierte auf Belastungen – insbesondere als Folge des Gewölbeschubes – mit entsprechend großen Deformationen.

Hinweise, dass diese Verformungen sehr früh erfolgten und bereits während der Bauzeit Verstärkungsmaßnahmen durchgeführt wurden, lassen sich auch an der Baukonstruktion ablesen.

Bei der Untersuchung der Hauptpfeiler mittels geophysikalischer Erkundungsmethoden¹⁶ konnte nachgewiesen werden, dass der Hauptpfeilerquerschnitt im Mauerwerksverband ausgeführt wurde, die Mauerwerksvorlagen jedoch stumpf angefügt worden sind. Insofern liegt die Vermutung sehr nahe, dass die Mauerwerksvorlagen nachträglich ergänzt wurden und den Versuch der Baumeister darstellen, das Ausmaß der Pfeilerdeformation zu begrenzen.

Trotz dieser Verstärkungsmaßnahmen kam es im Jahre 558 – knapp 20 Jahre nach der Fertigstellung – zum Einsturz der sogenannten ›ersten‹ Kuppel.¹⁷ Als Auslöser dieses Einsturzes ist sicherlich eine Serie von Erdbeben zu nennen, wobei das zum Zeitpunkt des Einsturzes bereits erfolgte horizontale Ausweichen der Bogenaufleger, das im Hauptbogen einen baustatischen Grenzzustand erzeugte, die eigentliche Ursache bildete.

¹⁶ Ebd., S. 119 ff.

¹⁷ Die genaue geometrische Form und Ausbildung der bis zu diesem Zeitpunkt bestehenden, sogenannten ›ersten‹ Kuppel wird vielfach diskutiert. Durch historische Quellen belegt und damit als gesichert gilt jedoch, dass die ursprüngliche Kuppel um ca. 6–7 m niedriger und damit wesentlich flacher ausgebildet war als die heutige, s. Mango 1992 (Anm. 8); anhand dieser Maßangabe liegt es nahe, die Form der ›ersten‹ Kuppel als Außenkreis bzw. Stützkuppel zu identifizieren.

Wiederaufbau unter Justinian

Isidoros der Jüngere, der gleichnamige Neffe des Erbauers Isidoros von Milet, wurde mit den Aufbauarbeiten betraut. Er erstellte die sogenannte ›zweite‹ Kuppel und stattet diese mit einem geringeren Radius, jedoch höherem Scheitelpunkt aus. Noch unter der Regentschaft Kaiser Justinians erfuhr die Hagia Sophia am 24. Dezember 562 ihre zweite Weihe.

Diese bis heute existierende Kuppelform weist einen Innendurchmesser in Nord-Süd-Richtung von circa 34 Metern auf. In Ost-West-Richtung beträgt dieses Maß rund einen Meter weniger.

In den Bereichen der Bauteile des 6. Jahrhunderts zeichnet sich auf der Oberseite des Kuppelgesimses eine eingemeißelte Nut ab, welche entlang der Innenkanten der Rippen verläuft und damit zweifellos die durch Isidoros den Jüngeren gewählte Setzlinie der ›zweiten‹ Kuppel darstellt.¹⁸

Vermessungen dieser Setzlinie ergaben, dass diese die Form einer Ellipse mit einem Abstand der Brennpunkte von 2,59 Metern beschreibt.¹⁹ Die Existenz und geometrische Exaktheit der Setzlinie belegt, dass die durch Isidoros den Jüngeren entworfene Kuppel im Grundriss bereits eine elliptische Form hatte.

Auch dies ist als deutlicher Hinweis darauf zu werten, dass die Pfeilerneigung fast vollständig auf plastische Formänderung zurückzuführen ist, welche bei Erstellung der zweiten Kuppel bereits abgeklungen war und seither lediglich einen geringfügigen Zuwachs infolge einer nachfolgenden elastischen Pfeilverformung erhielt. Die zweite Kuppel wurde damit auf eine verformte, jedoch weitestgehend unbelastete Unterkonstruktion aufgesetzt.

Anschließende Bauphasen

Nach dem vollständigen Einsturz der ersten Kuppel und der Erstellung der zweiten Kuppel im Jahre 562 kam es zu zwei weiteren Teileinstürzen (Abb. 7).

Der erste Teileinsturz erfolgte im Jahre 989. Als Folge eines Erdbebens versagte der westliche Hauptbogen. Von diesem Einsturz ebenfalls betroffen waren die westliche Halbkuppel sowie das an den westlichen Hauptbogen grenzende Segment der Hauptkuppel. Der aus Armenien stammende Architekt Trdat leitete den bis in das Jahr 994 reichenden Wiederaufbau. Der Furcht vor einem erneuten Einsturz begegnete Trdat, indem er alle wieder aufgebauten Bauteile

¹⁸ Duppel 2010 (Anm. 1), S. 71 ff.

¹⁹ Sato, Tatsuki; Hidaka, Kenichiro.: *Deformation of the Upper Structure of Hagia Sophia*. In: Hagia Sophia Surveying Project Conference, Proceedings of the Conference. Tokyo 2001, S. 37–64.



Abb. 7 Die Bauphasen nach Errichtung der zweiten Kuppel bis heute

mit deutlich erhöhten Querschnitten ausstattete²⁰ und Fensteröffnungen in der Hauptkuppel verschloss.

Der zweite Teileinsturz erfolgte im Jahre 1346. Eine erneute Serie von Erdbeben bildete den Auslöser für den Einsturz des östlichen Hauptbogens, der östlichen Halbkuppel sowie des östlichen Segments der Hauptkuppel. Dank einer finanziellen Förderung aus Russland, jedoch unter erheblichen innenpolitischen Schwierigkeiten, wurde der Wiederaufbau durch die Architekten Astras und Giovanni Peralta im Jahre 1354 fertiggestellt.

Nach Abschluss der Aufbauarbeiten im 14. Jahrhundert sind keine Einstürze oder nennenswerte statisch-konstruktive Schädigungen mehr zu verzeichnen.

Als Grund für die geschilderten Einstürze sind die erwähnten Erdbeben zu nennen. Statische²¹ und dynamische Berechnungen²² weisen die Scheitel der Hauptbögen an West- und Ostseite als schwächste Stellen des Tragwerks aus (Abb. 8). Das Versagen dieser Punkte führte zu dem beschriebenen Schadensbild.

Die vergleichende Betrachtung des Bauegefüges zur Zeit Justinians mit der heutigen Gebäudestruktur verdeutlicht, dass die Hagia Sophia im Laufe der Jahrhunderte, über die genannten Teileinstürze hinaus, eine bewegte baugeschichtliche und baukonstruktive Entwicklung erfahren hat. Neben den vier Minaretten sind es insbesondere die mächtigen Strebepfeiler,

²⁰ Duppel 2010 (Anm. 1), S. 58 ff.

²¹ Ebd., S. 165 ff.

²² Almac, Umut; Schweizerhof, Karl; Blankenhorn, Gunther u. a.: *Structural behaviour of Hagia Sophia under dynamic loads*. Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics (VEESD 2013). Wien 2013.

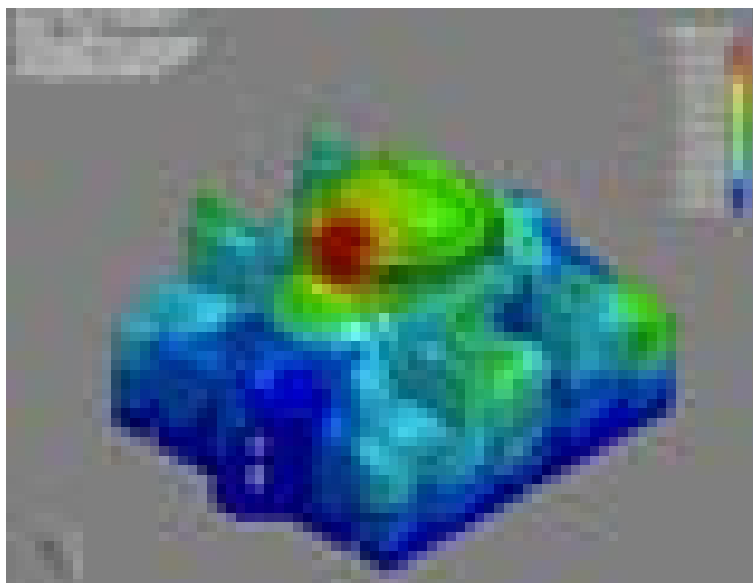


Abb. 8 Ergebnis der dynamischen Berechnung

die im Rahmen von Verstärkungs- oder Restaurierungsmaßnahmen ergänzt wurden, den ursprünglichen Gebäudekörper umfassend stützen und damit das heutige Erscheinungsbild ganz entscheidend prägen.

Die Bau- und Konstruktionsgeschichte der Hagia Sophia rekapitulierend wird deutlich, dass die Kirche Justinians ihre bauliche Homogenität verloren hat und heute – aufgrund von Einstürzen und Wiederaufbauten, Ergänzungen und Verstärkungen – von Irregularitäten und Diskontinuitäten gezeichnet ist. Die spezifischen Eigenarten und Ausprägungen der verschiedenen Bauphasen sind an vielen Stellen ablesbar und werden an der Hauptkuppel besonders deutlich: Hier treffen die drei Bau- und Wiederaufbauphasen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts auf engstem Raum zusammen.²³

Wenn man die statisch-konstruktive Ausbildung, sowie die handwerkliche Qualität der jeweiligen Aufbauphasen betrachtet, zeigt sich, dass diese als Spiegelbild der jeweiligen wirtschaftlichen Lage zu sehen sind.

Hierzu zwei kurze unkommentierte Beispiele:

Im Rahmen der zerstörungsfreien Bauaufnahme konnte festgestellt werden, dass alle Bauteile des 10. Jahrhunderts mit wesentlich größeren Querschnitten ausgebildet worden sind, als die früheren.²⁴ Das heißt, dass die Baumeister des 10. Jahrhunderts – über 400 Jahre nach der ersten

²³ Duppel 2010 (Anm. 1), S. 73 ff.

²⁴ Ebd., S. 59 ff.

Erbauung, aber vor dem Hintergrund des erfolgten Teileinsturzes – nicht erwogen hatten, die eingestürzten Bauteile in ihren ursprünglichen filigranen Dimensionen wieder herzustellen.

Im 14. Jahrhundert war – vor dem Hintergrund der sehr angespannten finanziellen Situation – ein deutlicher Verfall der handwerklichen Qualität zu verzeichnen: Dies zeigt sich einerseits in der mangelhaften Maßtreue der ergänzten Bauteile,²⁵ ganz offensichtlich jedoch auch in den Qualitäten der Mosaikoberflächen.

Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Zusammenfassend ist festzustellen, dass sich die Hagia Sophia nach ihrer Fertigstellung im Jahre 537 in einem statischen Grenzzustand befand, der einerseits durch eine sehr kurze Erbauungszeit in Verbindung mit den spezifischen Eigenarten des byzantinischen Mauerwerks, insbesondere aber durch die enormen Bauwerksdimensionen begründet war.

Die Baumeister waren sich des herrschenden baustatischen Grenzzustands durchaus bewusst und versuchten, auf die bereits während der Bauzeit aufgetretenen Deformationen durch zusätzliche konstruktive Verstärkungsmaßnahmen und ›Bedenkenanzeigen‹ zu reagieren. Das ehrgeizige Ziel verfolgend, einen alles übertreffenden Kirchenbau zu erstellen, ließ der Kaiser – auch unter gewisser Missachtung baustatischer Gesetzmäßigkeiten – das Gebäude dennoch vollenden.

Die weitere Geschichte des Gebäudes lehrt, dass die technischen Bedenken keinesfalls unbegründet waren. Es kam zu schweren Einstürzen und es dauerte letztendlich bis ins 14. Jahrhundert, bis sich ein stabiler Zustand eingestellt hatte.

Diese bewegte Baugeschichte des Gebäudes verdeutlicht, dass die Frage der Standsicherheit die Hagia Sophia seit Beginn ihrer Erbauung im Jahre 532 bis heute begleitet. Die Teileinstürze im 6., 10. und 14. Jahrhundert zeigen einerseits, dass die Grenzen der Tragfähigkeit des Gebäudes nicht nur erreicht, sondern – infolge statischer und insbesondere dynamischer Erdbebenlasten – überschritten wurden. Andererseits zeugen die nach jedem Einsturz unmittelbar anschließenden Aufbauphasen und die Stütz- und Verstärkungsmaßnahmen auch vom stetigen Bemühen der Baumeister, das Gebäude widerstandsfähiger zu machen und die Kräfte zu beherrschen. Diese sich über Jahrhunderte erstreckende ›Entwicklung‹ des Gebäudes und deren Einfluss auf das statische Gefüge führte schließlich zu einem Gleichgewichtszustand, welcher die Tragstruktur – trotz vorhandener Inhomogenitäten und deutlich sichtbarer Verformungen und Schiefstellungen – seit nunmehr über 650 Jahren weitestgehend schadensfrei hält.

In baukonstruktiver beziehungsweise bautechnikgeschichtlicher Hinsicht ist festzustellen, dass die Hagia Sophia einen absoluten Höhepunkt in der spätantiken Bautechnik bildete. Der in Form eines völlig neuen Gebäudetyps erfolgte Entwicklungssprung war so gewaltig, dass

25 Ebd., S. 64 ff.

es Jahrhunderte dauerte, bis ein vergleichbares Nachfolgebauwerk entstand beziehungsweise bis dessen Dimensionen erreicht wurden.

Monument des Christentums, Symbol der kaiserlichen Herrschaft und Zeugnis der Ingenieurskunst – die Hagia Sophia versinnbildlicht sicherlich alle drei Aspekte. Und sie zeigt den schmalen Grat, der zwischen bautechnischem Erfolg und Scheitern liegt, dessen Beschreiten jedoch damals wie heute für die Entwicklung der Bautechnik von entscheidender Bedeutung ist.