

Christoph Duppel

**Zerstörungsfreie Untersuchungen am Bauegefüge
der Hagia Sophia in Istanbul**



Der nachfolgende Aufsatz beruht auf dem durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekt „Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul“ [1]. Ausgehend von der Bau- und Schadensgeschichte des Bauwerks werden die Ergebnisse der zerstörungsfreien Erkundung seines Konstruktionsgefüges dargelegt und die Konsequenzen, welche sich aus den neuen Kenntnissen auf Lastfluss und Tragverhalten ergeben, diskutiert.

1 Die Bau- und Schadensgeschichte

Die Hagia Sophia in Istanbul muss nicht nur als das bedeutendste byzantinische Bauwerk gesehen werden, sondern ist mit Sicherheit eines der baugeschichtlich wichtigsten und ingenieurmäßig bemerkenswertesten Bauegefüge der letzten 1500 Jahre (Abb. 1).

Sie wurde unter der Regentschaft Kaiser Justinians in den Jahren 532 bis 537 durch die Baumeister Anthemios von Tralles und Isidoros von Milet in Form einer Kuppelbasilika errichtet. Während im Aufriss die monumentale Pendentifkuppel den Zentralbaucharakter hervorhebt, lässt der Grundriss des Bauwerks an eine dreischiffige Basilika denken.

Mehr als neun Jahrhunderte diente die Hagia Sophia als christliche Hauptkirche des byzantinischen Reiches und bot Raum sowohl für alle großen kirchlichen Handlungen als auch für die Krönungszeremonien der byzantinischen Kaiser. Nach der Eroberung Konstantinopels im Jahre 1453 erfolgte ein Wandel der Hagia Sophia zur Hauptmoschee des osmanischen Reiches, bevor sie 1934 zum Museum erklärt wurde. Neben der wechselvollen kulturgeschichtlichen Chronik weist die Hagia Sophia eine nicht minder bewegte, von Einstürzen, Wiederaufbauten, Ergänzungs- und Verstärkungsmaßnahmen geprägte Baugeschichte auf.

Bereits 20 Jahre nach ihrer Fertigstellung – im Jahre 558 – kam es zum Einsturz der sogenannten „ersten“ – zum damaligen Zeitpunkt wesentlich flacheren – Kuppel. Auslöser dieses Einsturzes bildete ein Erdbeben, wobei als eigentliche Ursache das Kriechen des jungen Mörtels und ein damit verbundenes horizontales Ausweichen der Hauptpfeiler zu nennen ist. Isidoros der Jüngere leitete die Aufbauarbeiten und gab der „zweiten“ Kuppel ihre heutige – gegenüber der ersten Kuppel ca. 6–7m höhere – Form (Abb. 2-a). Starke Erdbeben führten zu zwei weiteren großen Einstürzen. Der erste – im Jahr 989 – führte zum Zusammenbruch des westlichen Hauptbogens und der angrenzenden Teile der Hauptkuppel,



Abb. 1: Die Hagia Sophia in Istanbul

im Jahre 1346 kam es auf der gegenüberliegenden Ostseite zu einem vergleichbaren Schadensbild.

Als Konsequenz dieser Einstürze und der sich jeweils unmittelbar anschließenden Aufbauphasen entwickelte sich im Laufe der Jahrhunderte eine mehrteilige, aus Bauteilen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts zusammengesetzte und durch geometrische und strukturelle Inhomogenitäten geprägte Kuppel. Das heutige Erscheinungsbild der Hagia Sophia wird darüber hinaus durch eine Vielzahl von Verstärkungen und Ergänzungen bestimmt, welche die ursprüngliche Struktur korsettartig umgeben (Abb. 2-b).

2 Die Frage der Standsicherheit

Die bewegte Baugeschichte des Gebäudes verdeutlicht, dass die Frage der Standsicherheit die Hagia Sophia seit Beginn ihrer Erbauung im Jahre 532 bis heute begleitet. Die beschriebenen Teileinstürze zeigen einerseits, dass die Grenzen der Tragfähigkeit des Gebäudes nicht nur erreicht, sondern – infolge statischer und insbesondere dynamischer Erdbebenlasten – überschritten waren. Andererseits zeugen die nach jedem Einsturz unmittelbar anschließenden Aufbauphasen und die Abstütz- und Verstärkungsmaßnahmen auch vom stetigen Bemühen der Baumeister, das Gebäude widerstandsfähiger zu machen und die Kräfte zu beherrschen. Diese sich über Jahrhunderte erstreckende „Entwick-

lung“ 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.

Dennoch stellt sich im Hinblick auf die nähere Zukunft die Frage: Ist das Gefährdungspotential für die Hagia Sophia derart, dass mit Schäden zu rechnen ist, oder ist das Bauwerk in seiner heutigen Struktur in der Lage, auch kommenden Erdbebenbelastungen zu widerstehen? In den Worten des Ingenieurs ausgedrückt: Wie ist einerseits die Einwirkung auf das Bauwerk einzuschätzen und was kann zu dessen Widerstand, d.h. Tragfähigkeit ausgesagt werden?

2.1 Zur Frage der Einwirkungen – Die Erdbebengefahr

Unter Einwirkungen versteht man in der Statik die Gesamtheit der Kräfte und Belastungen, die auf ein Tragwerk einwirken. Im Falle der Hagia Sophia lassen sich die maßgeblichen Einwirkungen auf die ständige statische Eigengewichtslast und die außergewöhnliche dynamische Belastung im Falle eines Erdbebens reduzieren. Während sich die Eigengewichtslast – Kenntnisse über die Bauteilabmessungen sowie deren Materialeigenschaften vorausgesetzt – sehr genau bestimmen lässt, erweist sich die zuverlässige Vorhersage des Zeitpunk-

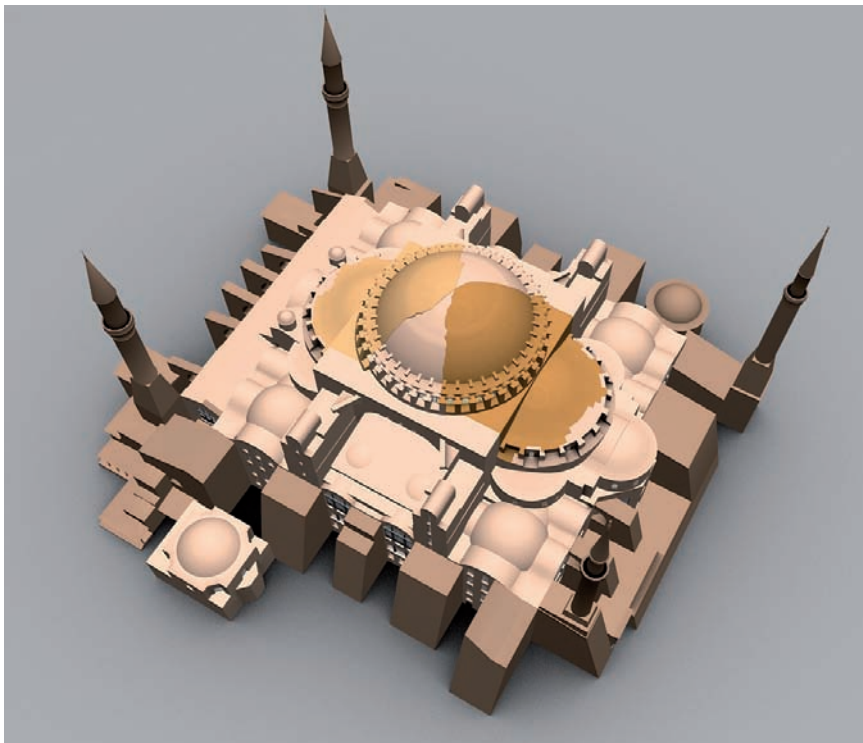
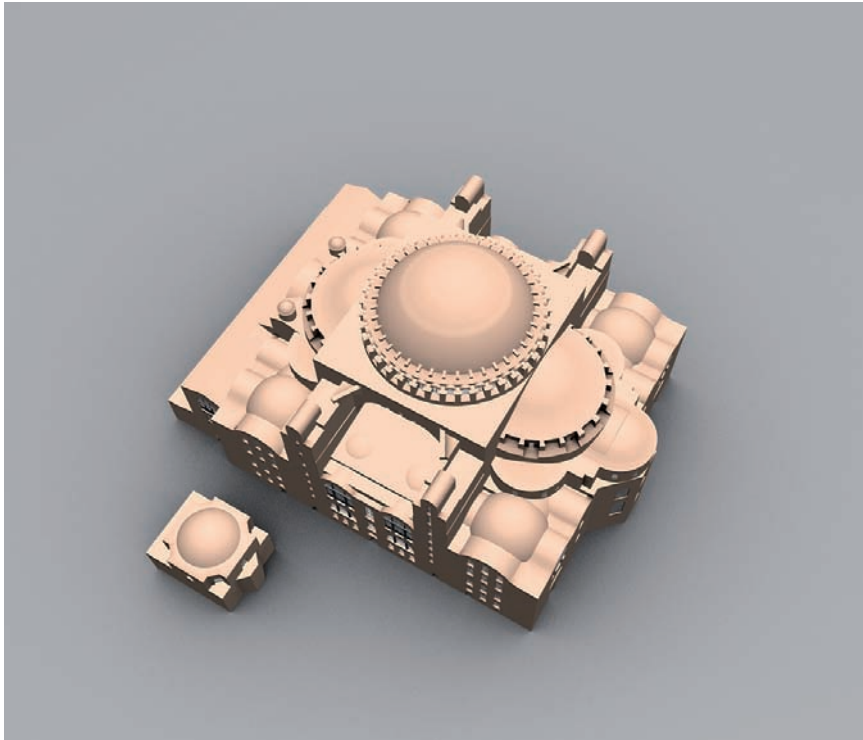


Abb. 2: (a) Die Hagia Sophia zur Zeit Justinians I.
(b) Die Hagia Sophia heute

tes sowie der Stärke und Richtung eines Erdbebens als nahezu unmöglich. Internationale Erdbebenexperten beschäftigen sich intensiv mit der Frage, ob und wann und, wenn ja, mit welcher Intensität ein Erdbeben Istanbul erschüttern wird. Gesicherte Einschätzungen lassen sich nicht vornehmen, es wird jedoch von einer Wahrscheinlichkeit von ca. 70% gesprochen, dass Istanbul innerhalb der nächsten 30 Jahre von einem starken Erdbeben heimgesucht wird [4]. Die Gefahr, welche sich daraus – nicht nur für die Hagia Sophia – herleiten lässt, ist beträchtlich.

2.2 Zur Frage der Tragfähigkeit – Das Bauwerksgefüge

Voraussetzung für die Einschätzung der Tragfähigkeit eines Bauwerks ist eine fundierte Zustandsanalyse und Bewertung der Bausubstanz. Hierzu zählt eine hinreichende Kenntnis der Geschichte des Bauwerks, seiner Abmessungen und Verformungen, der Gefüge und Materialien sowie seiner Schäden und deren Ursachen.

Die Kultur- und Baugeschichte der Hagia Sophia ist durch zeitgenössische Quellen dokumentiert. Die überwiegend von Historikern oder Reisenden verfassten Berichte basieren jedoch oftmals auf subjektiven Beobachtungen und schildern insbesondere die optische Wirkung dieses gewaltigen Bauwerks auf den Betrachter. Baukonstruktive Besonderheiten treten vor dem Hintergrund des Raumeindrucks oder auch der kunstvollen Innenausstattung – durchaus verständlich – in den Hintergrund.

Die Restaurierungsphase der Gebrüder Fossati in den Jahren 1847–1849 [5] und die Bauaufnahme durch Wilhelm Salzenberg [15] bedeuteten zwar erste Schritte einer modernen Untersuchung und systematischen Erfassung des Gebäudes, doch erst mit der Wandlung der Moschee in ein staatliches Museum im Jahre 1934 war es für Bauhistoriker, Architekten und Ingenieure verstärkt möglich, Untersuchungen vor Ort durchzuführen.

Aus einer Vielzahl von Berichten und Veröffentlichungen seien die Arbeiten zweier Wissenschaftler hervorgehoben, welche bis heute als Grundlage jeder weiteren Forschungstätigkeit zur baukonstruktiven Gebäudestruktur gesehen werden müssen.

- Der amerikanische Architekt und Bauforscher Robert L. Van Nice begann im Jahre 1937 mit der ersten modernen Vermessung und Aufnahme der Baustruktur der Hagia Sophia. Sein 1965 und 1986 erschienenes Tafelwerk „St. Sophia in Istanbul: An architectural survey“ [18] beinhaltet umfassende Planunterlagen in bewundernswerter Präzision und Detailtreue (Abb. 3).
- Als einer der besten Kenner der Hagia

Sophia und der Besonderheiten ihres Bauegefüges kann der Bauhistoriker und Ingenieur Rowland J. Mainstone bezeichnet werden. In seinem 1988 erschienen Buch „Hagia Sophia – Architecture, Structure and Liturgy of Justinian’s Great Church“ [10] stellt er sowohl eigene als auch Forschungsergebnisse anderer Wissenschaftler zusammen und schafft damit ein umfassendes Standardwerk zur Gebäudestruktur der Hagia Sophia (Abb. 4).

Zweifellos besitzen diese Forschungsarbeiten richtungsweisenden Charakter. Dennoch ist festzuhalten, dass sich die Untersuchungen auf eine optische Beurteilung der wenigen, von Mosaiken bzw. Putz unbedeckten und unmittelbar zugänglichen Bereiche beschränken mussten. Da Freilegungen, Bohrungen oder Probenentnahmen am tragenden Mauerwerk aufgrund der kunsthistorischen Bedeutung der Mosaik- und Marmoroberflächen nicht erlaubt waren, konnte das innere Konstruktionsgefüge und die Materialeigenschaften wenn überhaupt, nur ungenügend erkundet werden. Die Erlangung zuverlässiger Erkenntnisse gestaltete sich umso schwieriger, als die unmittelbare Zugänglichkeit – insbesondere der Kuppelschale oder Pendentifflächen – nicht gegeben war. Entsprechend dem nur lückenhaft vorhandenen Kenntnisstand über das innere Konstruktionsgefüge der Hagia Sophia waren die Voraussetzungen für die Einschätzung der Tragfähigkeit nach den bisherigen Untersuchungen nur beschränkt vorhanden bzw. mit Unsicherheiten behaftet. Wohlwissend um die von Inhomogenitäten und Diskontinuitäten geprägte und sich aus Bauteilen unterschiedlichster Bauphasen zusammensetzende Struktur, mussten damit die bisherigen Berechnungen zum statischen und dynamischen Tragverhalten der Hagia Sophia von stark idealisierten Bedingungen und Annahmen ausgehen.

2.3 Motivation und Intention der Forschungsarbeit

Die vorstehenden Erläuterungen zusammenfassend wird deutlich, dass die Frage der Standsicherheit der Hagia Sophia vor dem Hintergrund eines drohenden Erdbebens statisch nur angenähert und dynamisch überhaupt nicht zuverlässig gelöst werden kann, sofern nicht gesicherte Kenntnisse über das Bauwerksgefüge zur Verfügung stehen.

Die Notwendigkeit einer exakten Bauwerks erkundung wird aus diesem Grunde seit Jahren von Experten angemahnt und ist insbesondere in Rowland Mainstone’s Report „Present State of the Hagia Sophia Monument with Recommendations for its

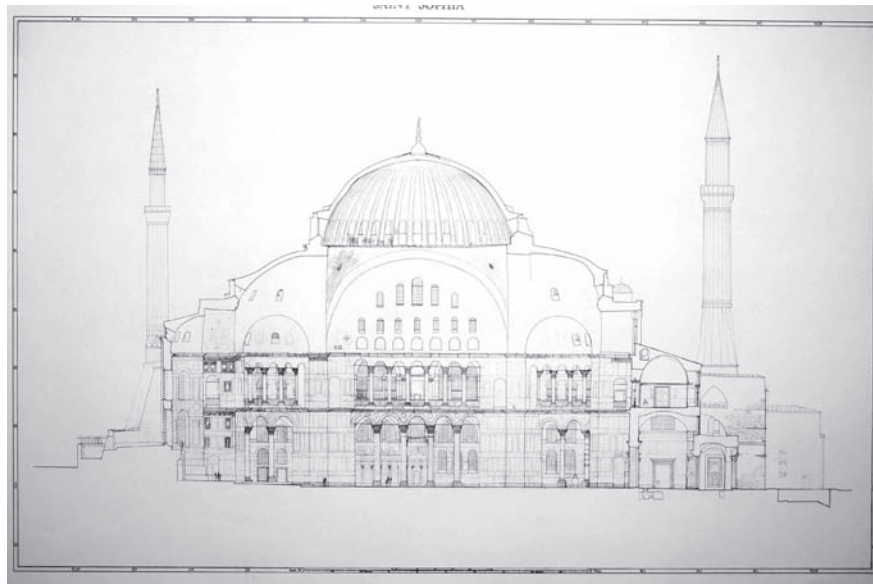


Abb. 3: Längsschnitt nach Van Nice [18]

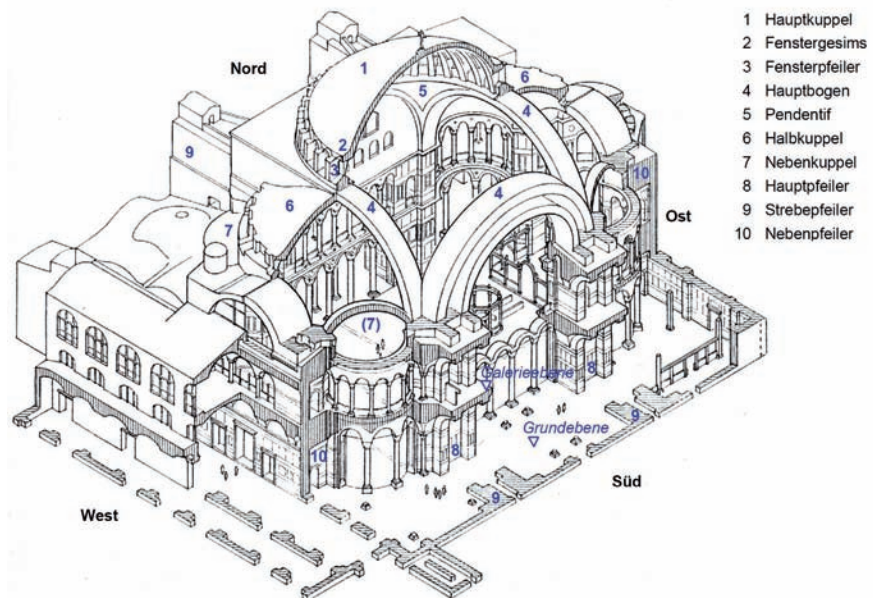


Abb. 4: Isometrie der Hagia Sophia nach Mainstone [10] mit Bauteilbezeichnung

Preservation and Restoration" [11] formuliert.

Dieser Notwendigkeit Rechnung tragend wurde im Jahre 2004 das Forschungsprojekt „Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul“ [1] ins Leben gerufen. Initiiert und geleitet durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Fritz Wenzel fand dieses Projekt maßgebliche Unterstützung durch die von der türkischen Regierung und der UNESCO eingesetzten Expertenkommission zur Sicherung der Hagia Sophia und durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG).

Ziel dieses Forschungsprojektes war die auf einer genauen Bauwerkserkundung beruhende Erweiterung und Ergänzung der Kenntnisse zum Konstruktionsgefüge der Hagia Sophia, um auf Grundlage exakter Daten eine Beurteilung des Tragverhaltens, wirklichkeitsnäher als es bisher möglich war, vorzunehmen, und für eine realistische Einschätzung der Standsicherheit, insbesondere im Falle eines Erdbebens, die erforderlichen Berechnungsparameter zur Verfügung zu stellen.

Anstoß und gleichzeitig wichtigste Voraussetzung zur Durchführung der Bauwerkserkundung bildete die in den vergangenen Jahren unter der Federführung des türkischen Kulturministeriums durchgeführte Sanierung und Sicherung der Kuppelmosaiken [13]. Die mit dieser Maßnahme verbundene segmentweise Einrüstung der Kuppel (Abb. 5) und der Pendentifs bot die einmalige Gelegenheit der unmittelbaren Zugänglichkeit dieser Bauteile und eröffnete damit die Chance, aus nächster Nähe ein verlässliches Bild von deren heutigem Zustand zu erlangen und geometrische bzw. materielle Irregularitäten und Diskontinuitäten zu erfassen.

Ausgehend von einer Voruntersuchung im Jahre 2002 [20] wurden – entsprechend dem Fortschritt der Restaurierungsarbeiten – 2004 [21] und 2005 drei weitere mehrwöchige Messkampagnen durchgeführt, in deren Rahmen drei der vier Kuppelquadranten, die Pendentifs mit Hauptbögen und die Hauptpfeiler erkundet wurden. Zentrales Hilfsmittel bildete der Einsatz von zerstörungsfreien geophysikalischen Untersuchungsverfahren. Diese ließen aussagekräftige flächendeckende Erkenntnisse über Querschnittsdicken sowie die innere Gefügestruktur erwarten, ohne die sensiblen, kunsthistorisch bedeutsamen Oberflächen durch Freilegungen oder sonstige zerstörende Eingriffe zu schädigen. Die Durchführung der Messungen erfolgte in Zusammenarbeit mit der Firma GGU [6], Karlsruhe, welche mit modernster Geräteausstattung und langjähriger Erfahrung in der Anwendung geophysikali-



Abb. 5: Innenraum der Hagia Sophia mit Gerüststellung im Südost-Quadranten der Hauptkuppel

scher Verfahren zur Erkundung historischer Gebäude die größtmögliche Aussagekraft der Messungen gewährleisten.

3 Die zerstörungsfreien Untersuchungsmethoden

Zerstörungsfreie Untersuchungsmethoden ermöglichen die Erkundung der inneren Gefügestruktur eines Bauteils, ohne dieses oder dessen Oberfläche zu schädigen. Im Gegensatz zu den zerstörenden, direkten Prüfverfahren wie beispielsweise Freilegungen, Bohrkernentnahmen oder endoskopische Untersuchungen handelt es sich bei den zerstörungsfreien Messverfahren im Allgemeinen um indirekte Methoden. Dies bedeutet, dass zerstörungsfreie Messungen meist nicht die unmittelbare Aussage über die relevanten Eigenschaften erbringen, sondern einen mit diesen mehr oder weniger stark korrelierenden, physikalischen Messwert. Insbesondere im Rahmen der Arbeiten des Sonderforschungsbereichs 315 der Universität Karlsruhe (TH), wurden in den vergangenen Jahren grundlegende Forschungen zum Einsatz zerstörungsfreier Verfahren an historischem Mauerwerk durchgeführt [8], [14].

Zur Erkundung des Mauerwerksgefüges der Hagia Sophia wurde insbesondere das Radarverfahren und die Mikroseismik eingesetzt.

3.1 Das Radarverfahren

Beim Radarverfahren erfolgt eine flächige Erkundung historischen Mauerwerks mit Hilfe elektromagnetischer Wellen [6, 7, 8, 19].

Abbildung 6-a zeigt das Funktionsprinzip des Verfahrens bei gängiger Reflexionsanordnung: Die an der Bauteiloberfläche entlang einer definierten Messlinie bewegte Sendeantenne strahlt die vom Radargerät kontinuierlich erzeugten Impulse in das Mauerwerk ab. Diese Wellen bewegen sich mit einer materialspezifischen Wellengeschwindigkeit fort, bis sie an den Übergängen zwischen Materialien mit unterschiedlichen elektrischen Eigenschaften teils reflektiert, teils transmittiert werden. Diese Grenzflächen zwischen Materialien unterschiedlicher Beschaffenheit werden als Schichtgrenzen bezeichnet. Die reflektierten und durch Absorption geschwächten Wellen werden an der Bauteiloberfläche von der Empfangsantenne aufgenommen und in Abhängigkeit ihrer Signalamplituden und Laufzeiten in sogenannten Radargrammen (Abb. 6-b) als Reflektoren dargestellt. Aufgrund der annähernd linearen Weg-Zeit-Beziehung kann unter Zugrundelegung einer materialspezifischen Wellengeschwindigkeit der Reflektorabstand aus der Laufzeit berechnet werden. Die Laufzeitachse des Radargramms lässt sich damit in eine Tiefenachse überführen und ermöglicht die Darstellung von Materialwechseln, Mehrschaligkeiten, vorhandenen Hohlräumen oder metallischen Einlagerungen im Mauerwerk. Darüber hinaus lassen sich Aussagen zum Feuchte- und Salzgehalt im untersuchten Bauteil treffen.

3.2 Die Mikroseismik

Die mikroseismische Erkundungsmethode [6, 14, 19] beruht auf der Ausbreitung und Erfassung mechanischer Wellen im Medium. Die Wellen werden an der Bauteiloberfläche durch Impulsquellen wie z. B. Hammerschlag erzeugt, durchlaufen die Konstruktion und werden von einem oder mehreren Schwingungsaufnehmern, den Geophonen, registriert. Die Laufzeit der Kompressionswelle zwischen Sender und Aufnehmer wird gemessen und in einem sogenannten Seismogramm dargestellt. Die aus diesem Wert errechnete Wellengeschwindigkeit gibt Aufschluss über mechanische Eigenschaften des durchschallten Materials, aber auch über Inhomogenitäten wie Fehlstellen, offene Stoßfugen oder Klüfte. Es lassen sich somit Bereiche mit unterschiedlichen Materialien bzw. Strukturen differenzieren.

4 Die Erkundung des Konstruktionsgefüges

4.1 Die Erkundung der Hauptkuppel

Die Hauptkuppel der Hagia Sophia bildet mit einem leicht elliptischen Durchmesser von 33 m bzw. 34 m und einer Scheitelhöhe von 56 m zweifellos das herausragende, den inneren Raumeindruck ebenso wie das äußere Erscheinungsbild dominierende Gebäudeelement (Abb. 1, 5, 7). Gegenüber den Kuppelbauten der Römer, die kontinuierlich von einer zylindrischen Wand getragen wurden, ist die Kuppel der Hagia Sophia über einem quadratischen, durch vier Hauptpfeiler und mächtige Hauptbögen eingefassten Grundriss erstellt und bildet damit die erste monumentale Pendentivkuppel in der Architekturgeschichte. Wie kaum ein anderes Bauwerk verkörpert die Hagia Sophia die oströmische oder byzantinische Bautradition des 6. Jahrhunderts. Entsprechend wurde die Hauptkuppel aus dem für diese Epoche charakteristischen Mauerwerk mit großen, flachen Ziegeln und dicken Mörtelfugen erstellt. Sie wird von 40 Rippen durchzogen. Diese entspringen den sich an der Außenseite abzeichnenden, zwischen den Fensteröffnungen liegenden Fensterpfeilern am Kuppelfuß und verlieren sich in Richtung des Kuppelscheitels. Die Mauerung der aus der Kuppelfläche herausragenden Rippen ist in das dazwischenliegende Mauerwerk integriert, die beiden Elemente bilden damit eine homogene und statisch zusammenwirkende Einheit.

Die Innenseiten der Kuppel sind mit Mosaiken oder Putzflächen besetzt bzw. – im scheidelnahen Kalligraphiebereich – mit Blattgold belegt. Auf der Kuppelaußenseite ist eine Bleideckung aufgebracht.

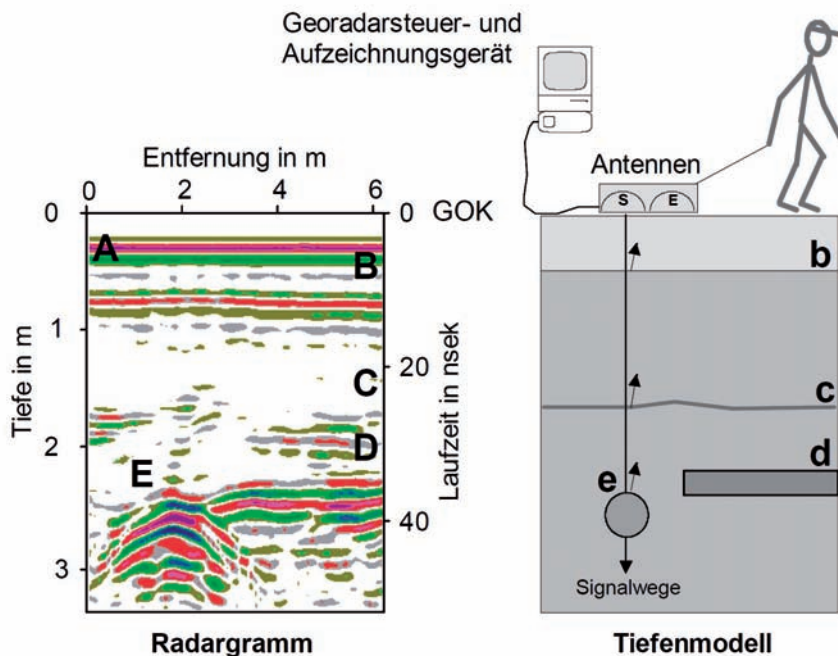
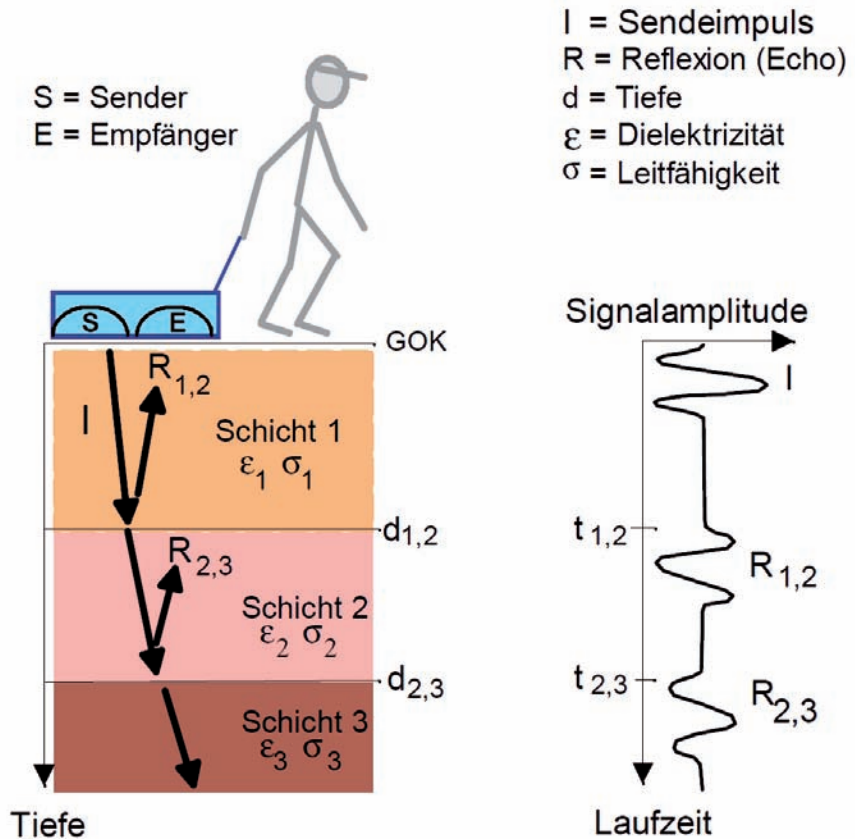


Abb. 6: (a) Funktionsprinzip des Radarverfahrens bei Reflexionsanordnung, aus [6] (b) Messdatendarstellung in Form von Radargrammen, aus [6]

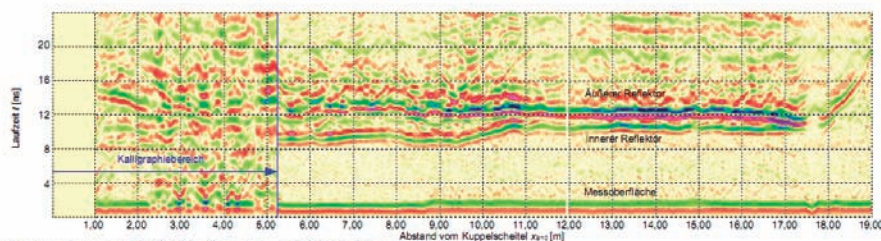


Abb. 7: Blick in die Hauptkuppel

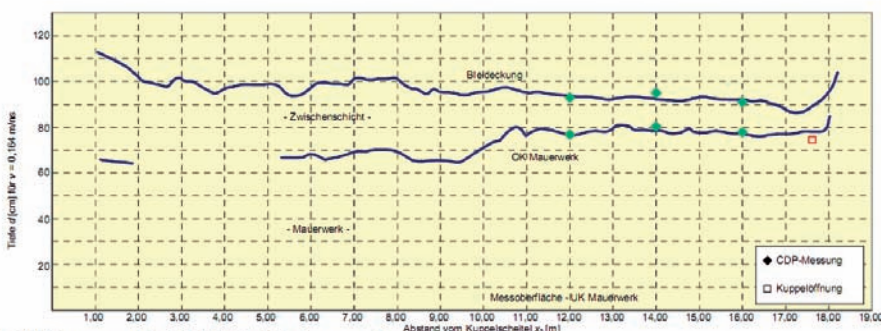
4.1.1 Die Querschnittsdicken

Die Ermittlung der – bisher nicht hinreichend dokumentierten – Querschnitts-abmessungen der Kuppel bildete eines der zentralen Themen im Rahmen der Bestandserkundung. Hierbei waren Fragen zur Dicke der tragenden Mauerwerksschale im Rippen- und Feldbereich, des Querschnittverlaufs und insbesondere auch der geometrischen Unterschiede der drei verschiedenen Bauphasen zu bewerten. Unter Einsatz des Radarverfahrens ließen sich die angeführten Querschnitts-abmessungen eindeutig bestimmen. Abbildung 8 zeigt exemplarisch ein Radargramm, aufgenommen im Bereich der im 6. Jahrhundert erstellten Bauteile. Die Radarantenne wurde hierbei vom Kuppelscheitel bis zur Oberkante der Fensteröffnung herabgeführt. Die maßgebenden Reflektoren bzw. Schichtgrenzen – sie stellen die Oberkante des Mauerwerks bzw. die Bleideckung dar – zeichnen sich deutlich ab. Lediglich im scheinbaren Kalligraphiebereich ergibt sich aufgrund der – von elektromagnetischen Wellen nicht zu durchdringenden – Blattgoldauflage ein etwas diffuses Bild. Zwischen den einzelnen Bauphasen sind Unterschiede im Verlauf der Reflektoren sowie in der Gefügestruktur zu erkennen. Auch lassen sich deutliche, bislang nicht erfasste Maßunterschiede feststellen:

- Die Kuppelschale des 6. Jahrhunderts (Abb. 9) besitzt keine konstante Dicke. Ausgehend von ca. 60 cm im Bereich des Scheitels zeigt sich eine Querschnittszunahme auf ca. 80 cm. Zwischen der Oberkante Mauerwerk und der Bleideckung lässt sich partiell die Existenz einer Ausgleichsschicht nachweisen.
- Die im 10. Jahrhundert erstellten Kuppelbauteile (Abb. 10) weisen mit Maßen von ca. 72 bis ca. 95 cm ebenfalls keine konstante Querschnittsdicke auf, sind jedoch gegenüber dem 6. Jahrhundert 12–15 cm dicker ausgebildet.
- Für das 14. Jahrhundert (Abb. 11) lassen sich keine Querschnittsänderungen erkennen. Die Kuppelschale ist mit einer konstanten Dicke von ca. 80 cm erstellt, und erweist sich damit gegenüber der vorhergehenden Bauphase wieder dünner.



a: Radargramm der 900-MHz-Antenne, Feld 9/10, Messreihe B_MKS



b: Schichtgrenzenverlauf, Feld 9/10, Kalibrierungspunkte

Abb. 8: Ergebnisse einer Radarmessung im Bereich der Kuppelschale des 6. Jahrhunderts

4.1.2 Verformungstreue Kuppelquerschnitte

Bei näherer Betrachtung der inneren Kuppelkontur wird deutlich, dass diese geprägt ist von Deformationen und geometrischen Irregularitäten (Abb. 12). Ihre Beschreibung als ideale Kugelform ist daher eine allgemein übliche, jedoch stark vereinfachte Annäherung an die tatsächlichen geometri-

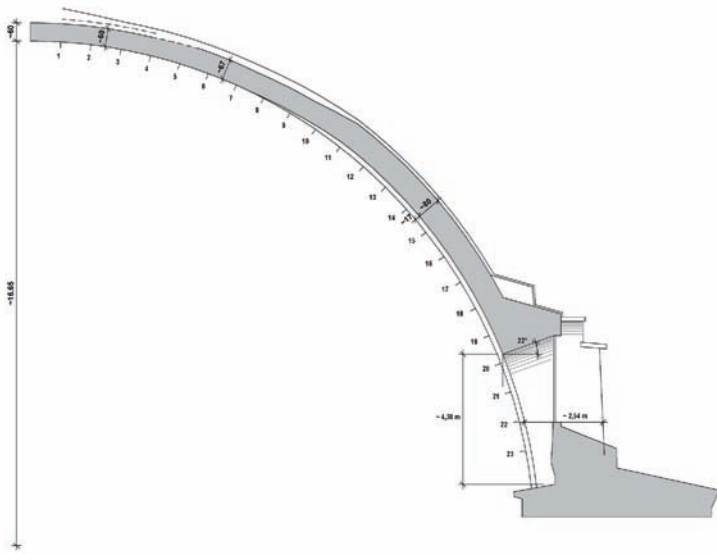


Abb. 9: Der idealisierte Kuppelschnitt der Bauphase des 6. Jahrhunderts

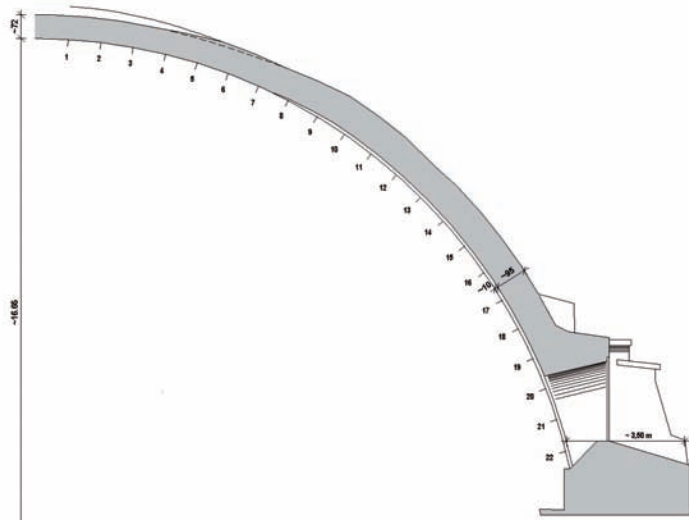


Abb. 10: Der idealisierte Kuppelschnitt der Bauphase des 10. Jahrhunderts

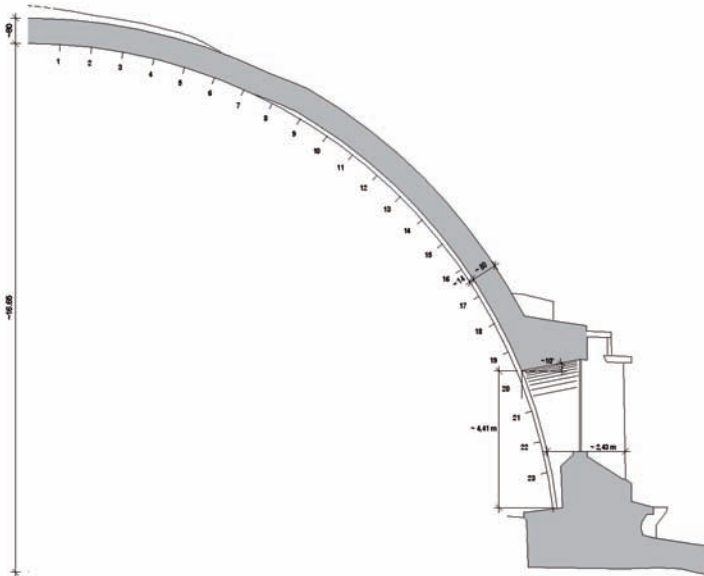


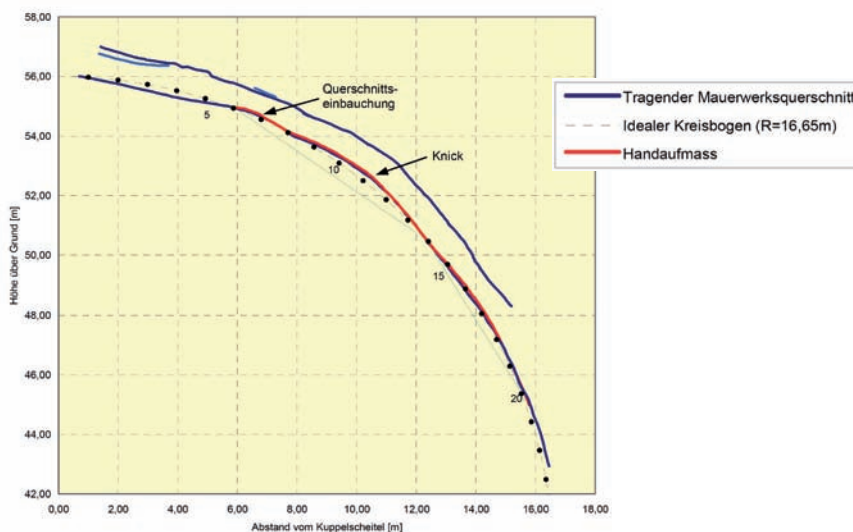
Abb. 11: Der idealisierte Kuppelschnitt der Bauphase des 14. Jahrhunderts



Abb. 12: Deformation der Rippen



Abb. 13: Bruchkante zwischen den Bauteilen des 14. und 6. Jahrhunderts



schen Verhältnisse.
Die verformungstreu Bauteilaufnahme und Darstellung gelang, indem eine zur Verfügung stehende photogrammetrische Vermessung der Kuppelinnenseite [16] mit den aus den Radarmessungen gewonnenen Rippen- und Schalendicken ergänzt und zu einem vollständigen, geometrisch exakten – d.h. verformungstreuen – Modell der Kuppel gefügt wurde (Abb. 14).

4.1.3 Die Lage der Bruchkanten

Die als Bruchkanten definierten Nahtstellen zwischen den Bauphasen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts separieren die Kuppel in Bauteile unterschiedlicher geometrischer und struktureller Ausbildung. Die Bedeutung genauerer Kenntnisse zu Lage, Verlauf und Beschaffenheit der Bruchkanten liegt damit einerseits in ihrer baugeschichtlichen Aussage, andererseits sind dies elementare Parameter zu einer wirklichkeitsnahen Bewertung des Tragverhaltens der heute mehrteiligen Kuppel. Der Verlauf der Bruchkanten zeichnet sich lokal an der Kuppelinnenseite ab (Abb. 13). Aufgrund bauphasenspezifisch unterschiedlicher Materialcharakteristiken gelang auch ihre radartechnische Ortung und ermöglichte dadurch eine Erweiterung und Präzisierung des Kenntnisstandes hinsichtlich des Bruchkantenverlaufs. Exemplarisch zeigt Abbildung 15 ein mit konstantem Abstand vom Kuppelscheitel in Ringrichtung gemessenes Radargramm. Zunächst ist der für das 6. Jahrhundert charakteristische Doppelreflektor erkennbar, bevor ein abrupter optischer Wechsel die Lage der Bruchkante kennzeichnet. Durch die Ermittlung der Bereichsgrenzen in allen gemessenen Horizontalprofilen und einer angenäherten linearen Interpolation in den Zwischenbereichen ließ sich der Bruchkantenverlauf sehr exakt bestimmen. Abbildung 16 zeigt zusammenfassend die Geometrie der Hauptkuppel mit Schalenstärken und Bruchkantenverlauf. In Kombination mit der verformungstreuen Bauaufnahme steht fortan ein genaues geometrisches Kuppelmodell zur Verfügung. Auf den Erkenntnissen zum Bruchkantenverlauf basiert auch die exakte Bestimmung und Darstellung der Einsturzsituationen (Abb. 2-b), welche sich nun exakt nachzeichnen und – sowohl in baugeschichtlicher als auch statisch-konstruktiver Hinsicht – bewerten lassen.

Abb. 14: Verformungstreuer Querschnitt der Rippe 1 (14. Jahrhundert)

4.1.4 Das Mauerwerksgefüge

Die Kuppel der Hagia Sophia ist, wie nahezu das gesamte Gebäude, aus Ziegelmauerwerk errichtet. Charakteristisch für die byzantinische Bauweise sind flache, großflächige Ziegel mit einem Ziegel/Fugenverhältnis von 1:1. Die Höhe der Ziegel bzw. der Mörtelfugen beträgt ca. 4 cm. Dies war an wenigen Stellen direkt ablesbar (Abb. 17), und ließ sich auch mit Hilfe von hochauflösenden Radarantennen und einer Zeitscheibenberechnung darstellen. Auch die Einbindetiefe und ein existierender Mauerwerksverband konnte radartechnisch nachgewiesen werden. Ein ganzer Ziegel weist demnach ein – in byzantinischer Zeit überwiegend anzutreffendes – Seitenmaß von ca. 32–37 cm auf. Entsprechend des vorhandenen Mauerwerksverbandes lassen sich alle ermittelten Querschnittsdicken auf ein Vielfaches von ganzen bzw. halben Ziegeln zurückführen.

4.1.5 Die Materialeigenschaften

Über das Ziegelmauerwerk ist in historischen Quellen oftmals von der Verwendung eines besonders leichten Materials zu lesen. Eine ausführliche Literaturrecherche erbrachte jedoch keine Bestätigung hierfür. Es ist von einem Eigengewicht des Ziegelmauerwerks von 16–18 kN/m³ auszugehen. Über den verwendeten Mörtel wird berichtet, dass dieser puzzolane Eigenschaften besitzt, er durchläuft einen langen Abbindeprozess – ist daher entsprechend kriechanfällig – die dann erreichte Zugfestigkeit erweist sich aber höher als bei normalen Kalkmörteln.

Mit dem Ziel, Rückschlüsse auf den dynamischen Elastizitätsmodul zu ziehen, wurde mit Hilfe mikroseismischer Verfahren die Kompressionswellengeschwindigkeit im Kuppelmauerwerk ermittelt. Die Messung erfolgte in refraktionsseismischer Anordnung und wurde bei einer Geophonauslage von 11 m in Rippenlängsrichtung durchgeführt. Die Signalanregung erfolgte durch Hammerschlag (Abb. 18).

Als Ergebnis der Refraktionstomographischen Analyse sind in Abbildung 20 die gemessenen Wellengeschwindigkeiten sowie ihre Verteilung über die Messstrecke dargestellt. Es zeigt sich, dass zwischen den Bauphasen deutliche Unterschiede bestehen: Während sich bei den Rippen des 14. Jahrhunderts die Wellengeschwindigkeit relativ einheitlich um einen Mittelwert bei $v_p = 1650$ m/s bewegt, beträgt der Mittelwert der Wellengeschwindigkeit bei den Rippen des 6. Jahrhunderts $v_p = 1100$ m/s und ist deutlichen Schwankungen unterworfen. Aus diesen Werten ließ sich für die Bauphase des 6. Jahrhunderts ein mittlerer dynamischer Elastizitätsmodul von $E_{dyn} = 2200$ N/mm², für diejenige des

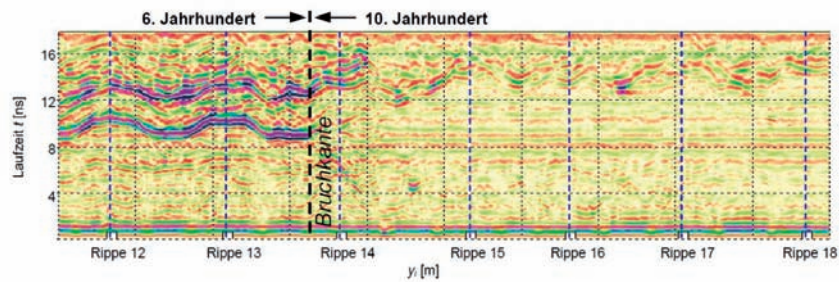


Abb. 15: Radartechnische Lagebestimmung der Bruchkante zwischen den Bauteilen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts

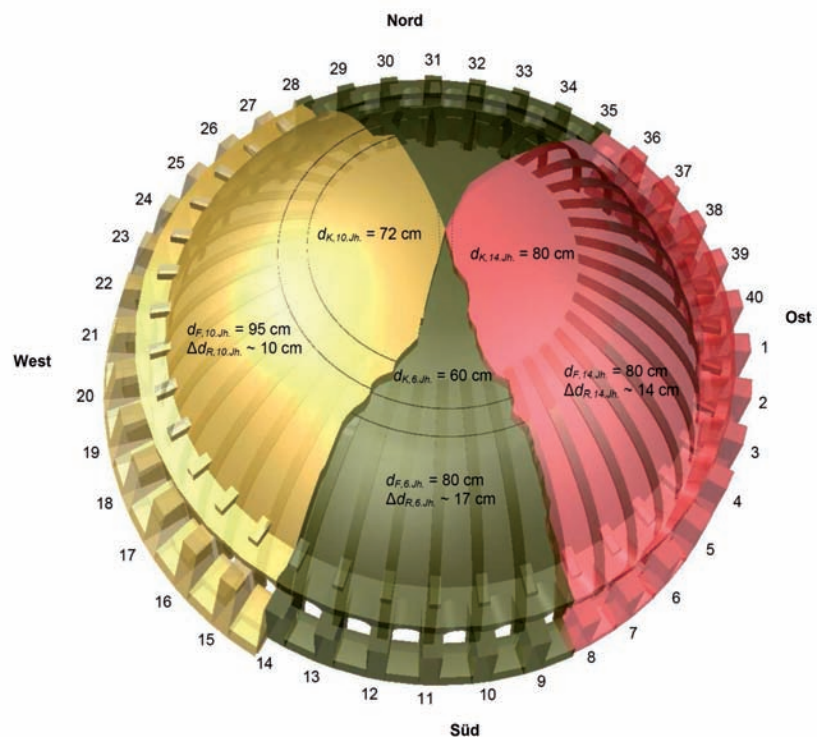


Abb. 16: Die Kuppel der Hagia Sophia mit Bruchkantenverlauf, Schalendicken und Rippendicken der Bauteile des 6., 10. und 14. Jahrhunderts



Abb. 17: Mauerwerkstruktur einer Rippe des 14. Jahrhunderts (Rippe 7)

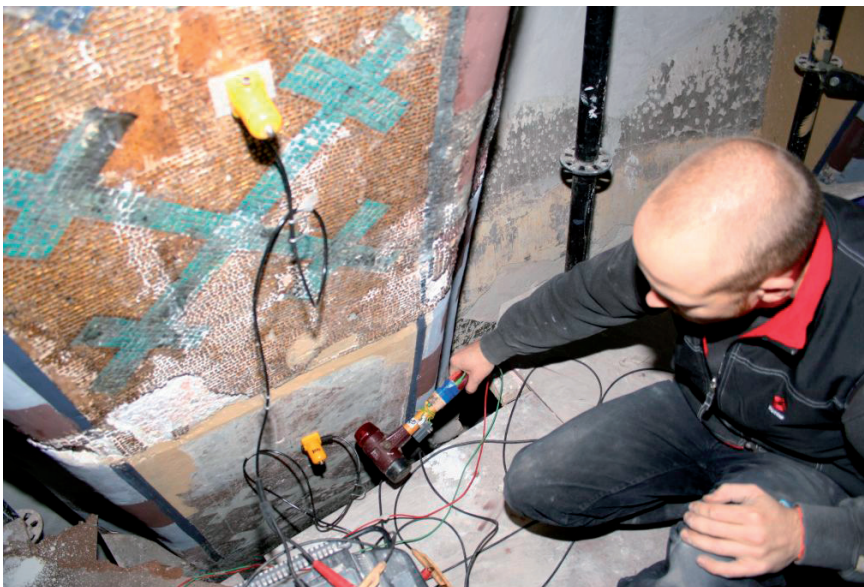


Abb. 18: Geophonauslage und Wellenerregung an einer Kuppelrippe

14. Jahrhunderts von $E_{\text{dyn}} = 4900 \text{ N/mm}^2$ abschätzen. Entsprechend können auch hinsichtlich der Festigkeitsverhältnisse für die Bauteile des 14. Jahrhunderts höhere Werte unterstellt werden.

4.1.6 Die Existenz eines Ringankers

Die Existenz eines Ringankers wäre für das Tragverhalten bzw. der Tragfähigkeit der Kuppel ein entscheidender Faktor.

Historisch war ein hölzerner Ringanker vorhanden der durch die Fensteröffnungen der Fensterpfeiler zeichnen sich noch deutlich ab (Abb. 19). Oftmals wird auch über die Existenz von nachträglich angebrachten stählernen Reifen gesprochen. Weder die Lage und Beschaffenheit noch der Zustand etwaiger Zugglieder ist jedoch hinreichend dokumentiert.

Die Auswertung aller im Kuppelbereich durchgeführten Radarmessungen – sie erfolgten insbesondere auch im Hinblick auf die Detektierung umlaufender Ringanker – erbrachte keine Hinweise auf deren Existenz. Auch vor dem Hintergrund der Frage, ob das nachträgliche Aufbringen eines umlaufenden Ringes kraftschlüssig – und damit statisch wirksam – hätte erfolgen können, gehen daher die weiteren Betrachtungen davon aus, dass kein Ringanker vorhanden ist.

4.1.7 Die Feuchteverhältnisse

Anhand der vollflächig durchgeführten Radarmessungen ließ sich auch eine Beurteilung der Feuchte- bzw. Salzkonzentrationen im Mauerwerk vornehmen.

Abbildung 21 zeigt eine Zeitscheibenberechnung des Südost-Quadranten. Eine derartige Auswertung der Radardaten umfasst alle im Untersuchungsbereich durchgeführten Messstrecken und zeigt – quasi als Schnitt parallel zur Messoberfläche – die für ein vorgegebenes Laufzeitintervall – welches eine bestimmte Bauteiltiefe widerspiegelt – aufsummierte Amplitudenstärke. Die Darstellung erfolgt für ein Laufzeitintervall von $t = 0\text{--}2 \text{ ns}$, welches den Oberflächenbereich bis ca. 10 cm Tiefe umfasst.

Aufgrund deutlicher Unterschiede in der Signalamplitude (bzw. des Absorptionsverhaltens) lassen sich Bereiche unterschiedlicher Oberflächen bzw. oberflächennaher Materialeigenschaften lokalisieren.

Während gewisse Abgrenzungen auf die bauphasenspezifisch unterschiedlichen Materialeigenschaften hindeuten (vertikale Abgrenzung von Bereich 5, 6 und 7 bei Rippe 9 entspricht dem Bruchkantenverlauf) oder sich auf unterschiedliche Oberflächeneigenschaften (z. B. Bereich 4: Mosaiken, Bereich 3: Putzoberfläche) zurückführen lassen, weist die Grenzante

zwischen Bereich 2 und 3 auf die Lage des vermuteten Feuchtehorizonts hin. Die durch eine starke Absorption hervorgerufene Signalschwächung in Bereich 2 lässt sich zweifelsfrei auf den erhöhten Feuchtegehalt zurückführen. Der Feuchtehorizont stellt sich im Abstand von ca. 17 m vom Kuppel-scheitel ein.

4.2 Die Erkundung der Pendentifs

Der durch Pendentifs und Hauptbögen (Abb. 22) realisierte Kuppelunterbau bildet das geometrische Bindeglied zwischen Hauptkuppel und Hauptpfeilern und damit die klassische Übergangskonstruktion von quadratischem Gebäudegrundriss zu kreisrunder Kuppelbasis. Die Geometrie der Pendentifs ergibt sich zu sphärischen Dreiecken, welche einen Kugelradius von ca. 22 m aufweisen.

Entsprechend der dargelegten Bau-geschichte waren auch die Pendentifs von Einstürzen betroffen und bestehen infolgedessen aus Teilen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts. Trotz teilweise sichtbarer Verformungen und Irregularitäten ist die Lage und der Verlauf der Bruchkanten, ebenso wie der baukonstruktive Aufbau, nur sehr ungenau dokumentiert.

Flächendeckend durchgeführte Radarmessungen dienten der Erkundung des Aufbaus und der inneren Gefügestruktur der Pendentifs. In Analogie zu den Messungen an der Kuppelschale galt es, charakteristische geometrische und strukturelle Konstruktionsmerkmale zu erkennen, diese den jeweiligen Bauphasen zuzuordnen und eine Aussage zur Lage und Beschaffenheit der Bruchkanten zu treffen.

Abbildung 23 zeigt exemplarisch die Auswertung der Radarmessungen am Südwest-Pendentif in Form einer Zeitscheibendarstellung. Es zeichnet sich eine strukturelle Grenz-kante ab. Die Änderung der Reflexionsstärke aufgrund unterschiedlicher Materialeigenschaften ist hierbei als deutlicher Hinweis auf die Lage der Bruchkante zwischen den Bauteilen des 6. und des 10. Jahrhunderts zu werten. Die für den Kuppelbereich ermittelte Bruchkantenlage findet damit im Pendentif ihren stetigen Fortsatz. In zwei Höhenlagen sind leicht geneigte horizontale Bänder starker Reflexionen zu erkennen. Diese enden an der beschriebenen Grenz-kante und weisen auf einen lokalen, als Marmoreinschub identifizierten Materialwechsel im Pendentifbereich des 10. Jahrhunderts hin. Auch die Pendentifs wurden aus dem bereits für die Kuppel beschriebenen, charakteristischen byzantinischen Mauerwerk mit flachen Ziegeln und hohen Lagerfugen ausgeführt. Die Vermauerung erfolgte im Verband, die Ziegellagen weisen eine auf die Pendentiffäche orthogonal



Abb. 19: Fensterpfeiler mit den Durchdringungen eines ehem. hölzernen Ringankers

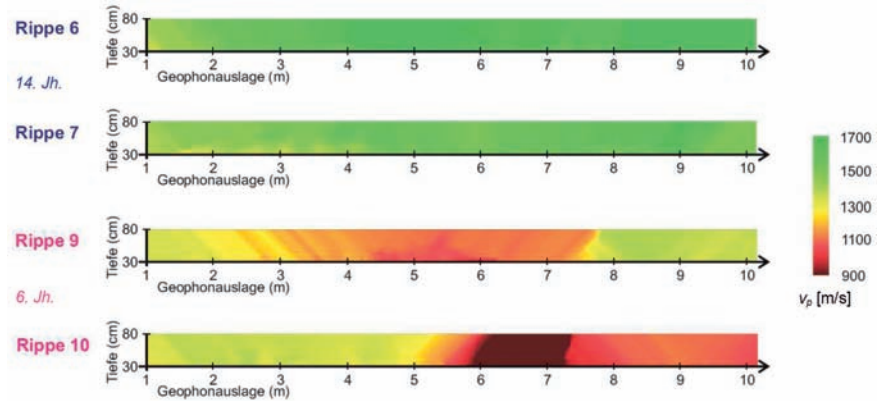


Abb. 20: Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit in Längsrichtung der Rippen

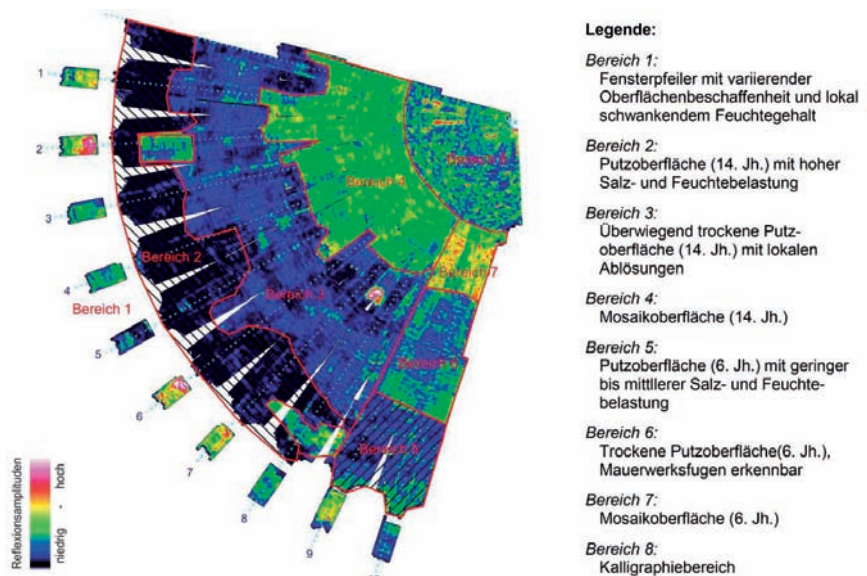


Abb. 21: Südost-Quadrant: Zeitscheibenberechnung, Oberflächenzone bis ~10 cm Tiefe



Abb. 22: Pendentifs und Hauptbogen auf der Westseite

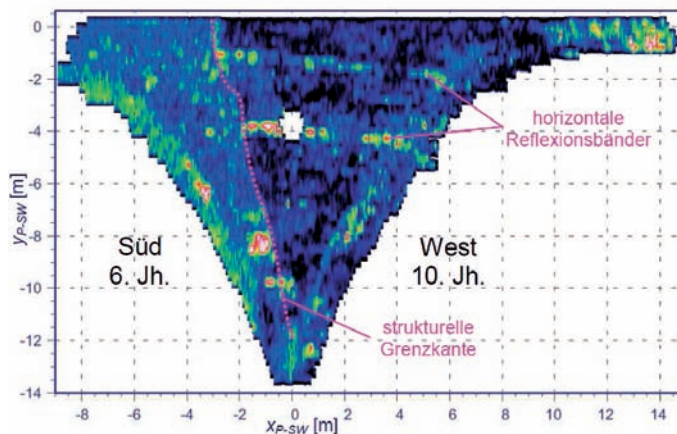


Abb. 23: Ergebnis der Radarmessungen am südwestlichen Pendentif in Form einer Zeitscheibenberechnung

Abb. 24: Der nordwestliche Hauptpfeiler

stehende Neigung auf. Bezüglich der Materialeigenschaften wurden keine eigenen Untersuchungen durchgeführt. Die optische Beurteilung lässt es jedoch als unwahrscheinlich erachten, dass sich die an den Pendentifs verwendeten Materialien wesentlich von denen der Kuppelbauteile der entsprechenden Bauphasen unterscheiden.

4.3 Die Erkundung der Hauptbögen

Die Hauptbögen entstammen auf der Nord- und Südseite dem 6. Jahrhundert, der westliche Bogen wurde im 10. Jahrhundert erstellt, der östliche im 14. Jahrhundert. Sie überspannen das Kirchenschiff mit einer Spannweite von 31 m. Ihre äußere Geometrie ist weitestgehend dokumentiert [10], [18] und konnte durch eigene Messungen bestätigt werden. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Mauerwerksgefüge dem der Hauptkuppel entspricht, wobei von der Verwendung von doppelt großen Ziegelsteine (ähnlich den römischen Bipedales) mit Seitenlängen von bis zu 70 cm berichtet wird.

4.4 Die Erkundung der Hauptpfeiler

Die Hauptpfeiler bilden, gemeinsam mit den im Norden und Süden angegliederten Strebepfeilern und den am östlichen und westlichen Ende des Kirchenschiffs gelegenen Nebenpfeilern, die maßgeblichen Tragglieder zur Aufnahme von Vertikal- und Horizontallasten und – aufgrund ihrer Dimensionen – die optisch dominierenden Bauteile im Gebäudeinnern (Abb. 24). Sie erstrecken sich über die Grund- und Galerieebene nach oben bis zu den Auflagerepunkten der Hauptbögen bei einer Höhe von ca. 23 m und weisen im Grundriss eine Querschnittsfläche von rund 55 m² auf. Die nahezu vollflächig mit Marmorplatten verschiedener farblicher Schattierungen verkleideten Hauptpfeiler wurden aus großformatigen Natursteinquadern (Granit und Kalkstein) erstellt und bilden damit einen baukonstruktiven Kontrast zum üblicherweise verwendeten Ziegelmauerwerk. Trotz sichtbarer horizontaler Verformungen, die insbesondere auf das Kriechverhalten des jungen Mörtels zurückzuführen sind, waren die Hauptpfeiler nie von einem Einsturz betroffen. Sie entstammen damit der Erbauungsphase des 6. Jahrhunderts und entsprechen noch heute ihrer ursprünglichen Form. Die Erkundung der inneren Struktur der Natursteinpfeiler erfolgte unter Einsatz von radartechnischen und mikroseismischen Verfahren. Hierbei sollte insbesondere der Frage nachgegangen werden, ob sich der Aufbau ihrer Querschnitte als homogene Einheit darstellt oder ob Anzeichen auf Mehrschaligkeiten, Materialwechsel

und einen – oftmals vermuteten – Kern verminderter Festigkeit bestehen. Darüber hinaus bildete, neben der Gewinnung von Kenntnissen über den Mauerwerksverband und eventuelle Störbereiche oder Metallteile im Querschnittsinnern, auch eine Aussage zum Feuchte- bzw. Salzgehalt ein zentrales Erkundungsziel.

Die durchgeführten Radarmessungen in Reflexionsanordnung erbrachten in der Grundebene maßgebende Reflektoren bis in eine Tiefe von ca. 1,50 m. Ein tieferes Eindringen und damit Hinweise auf Strukturen im Pfeilerkern wurde durch einen erhöhten Feuchtegehalt verwehrt. Im Galeriegeschoss ließ sich die Erkundungstiefe lokal bis auf ca. 2,50 m steigern und ermöglichte eine nahezu vollständige radartechnische Durchdringung des Pfeilerquerschnitts.

Als Ergebnis der radartechnischen Analyse sind Lage und Intensität der maßgebenden Reflektoren exemplarisch für den nordöstlichen Hauptpfeiler in Abbildung 25 dargestellt. Die Reflektoren kennzeichnen die Stoßfugen des Quadermauerwerks der ersten, teilweise auch zweiten Schale. Es zeichnen sich Einbindetiefen zwischen 40 cm und 90 cm ab. Jede Messebene weist unterschiedliche Einbindetiefen der Quader auf, ein vorhandener Mauerwerksverband findet damit seine messtechnische Bestätigung.

Eine Besonderheit bildet der Anschlussbereich der nördlichen Pfeilervorlagen: Eine durchgehende Reflexion verdeutlicht, dass die Pfeilervorlagen keinen Verbund zum Pfeilerquerschnitt aufweisen und gegebenenfalls auf die spätere Ergänzung im Rahmen einer Verstärkungsmaßnahme hindeuten.

Die Erkundungen zum Steifigkeitsverhalten der Hauptpfeiler erfolgten auf Grundlage der Ermittlung mechanischer Wellengeschwindigkeiten im Pfeilermauerwerk und einer daraus resultierenden Abschätzung des dynamischen Elastizitätsmoduls.

Die Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeiten über den Pfeilerquerschnitt als Ergebnis einer tomographischen Mikroseismikmessung ist in Abbildung 26 dargestellt. Die im Wesentlichen gleichmäßige Verteilung mit dominierenden Wellengeschwindigkeiten um 2500 m/s zeigt, dass das Pfeilermauerwerk nicht, wie verschiedentlich vermutet, Struktur- oder Gesteinswechsel aufweist, sondern solide durchgemauert ist. Aus der Größe der Wellengeschwindigkeit ließ sich wiederum ein dynamischer Elastizitätsmodul abschätzen, dieser liegt bei 15200 N/mm².

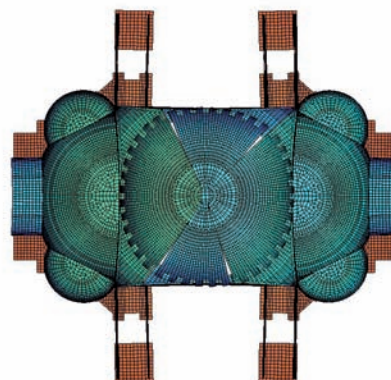
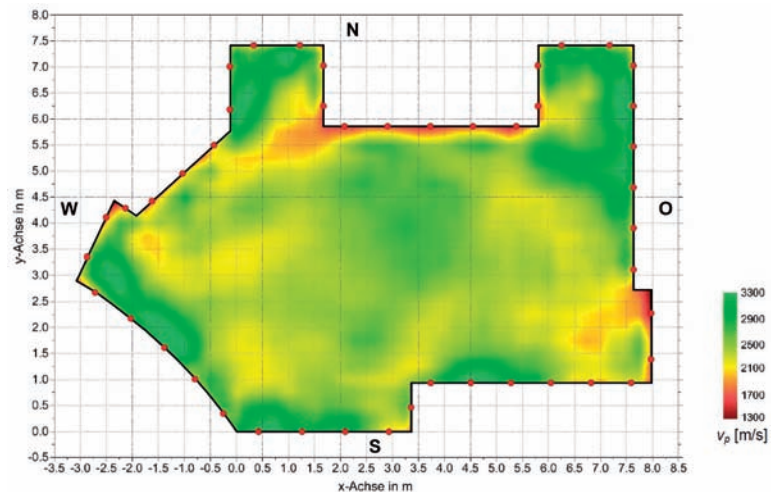
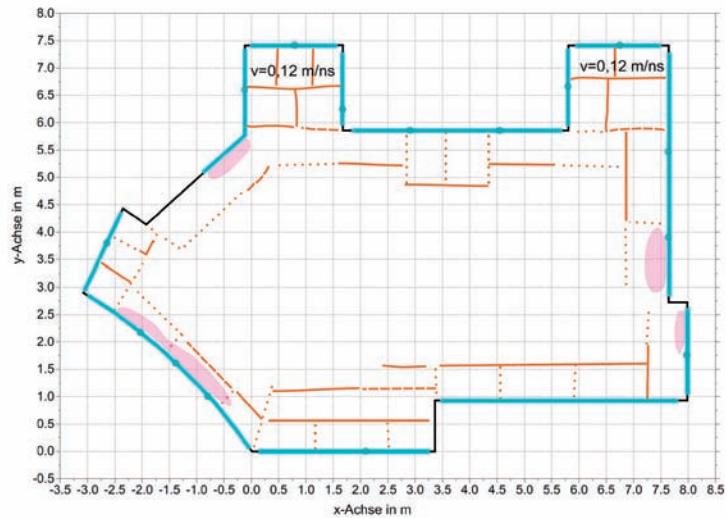


Abb. 25: Ergebnisse der Radarmessungen am nordöstlichen Hauptpfeiler

Abb. 26: Verteilung der Kompressionswellengeschwindigkeit im nordöstlichen Hauptpfeiler

Abb. 27: FE-Modellierung des primären Tragsystems: Elastische Verformungsfigur (Draufsicht)

5 Zum Tragverhalten der Hagia Sophia

Mit den zerstörungsfreien Bauwerksuntersuchungen konnte der vorhandene Kenntnisstand deutlich erweitert und ein erheblicher Beitrag zur besseren Kenntnis des Konstruktionsgefüges der Hagia Sophia geleistet werden. Neben dem Zugewinn an baugeschichtlichen Gebäudedaten bieten die neuen Erkenntnisse zur geometrischen, strukturellen und materialspezifischen Bauwerksbeschaffenheit ein wesentlich konkreteres Bild der tatsächlichen Verhältnisse und bilden damit einen grundlegenden Schritt in Richtung einer wirklichkeitsnahen, statt der notwendigerweise vielfach idealisierten Einschätzung des Tragverhaltens. Ziel des zweiten Teils des Forschungsprojektes war daher die Entwicklung von Berechnungsmodellen, welche den Einfluss der neu gewonnenen Kenntnisse hinsichtlich des Lastflusses und des Tragverhaltens unter statischer Belastung veranschaulichen, dem Vergleich mit tatsächlich am Gebäude angetroffenen Schäden und Verformungen dienen und schließlich als Vorstudien zu einem in Kooperation mit dem Institut für Mechanik des Karlsruher Institut für Technologie (KIT) erstellten, detailgetreuen numerischen Modell für dynamische Analysen herangezogen werden.

5.1 Einflüsse auf das Tragverhalten

Es wurde gezeigt, dass insbesondere die Kuppel in ihrem heutigen, mehrteiligen Aufbau, aber auch die Pendentifs und die Hauptbögen von den unterschiedlichen Ausführungsmerkmalen und -qualitäten der Bauphasen des 6., 10. und 14. Jahrhunderts geprägt sind.

Damit wird deutlich, dass die den bisherigen Berechnungen (u.a. [3], [9], [12], [17]) zugrunde liegenden geometrisch und strukturell „idealen“ Bedingungen die tatsächlichen Verhältnisse nicht mit hinreichender Genauigkeit beschreiben und das Tragverhalten der Hagia Sophia maßgeblich durch die nachfolgend ausgeführten Faktoren bestimmt wird.

- Die Mehrteiligkeit der Kuppel: Die Hauptkuppel setzt sich aus vier zeitlich unabhängig erstellten Segmenten zusammen. Einer einteiligen und kontinuierlich erstellten Pendentifkuppel ist daher die mehrteilige, in drei eigenständigen Bauphasen entstandene Kuppelkonstruktion der Hagia Sophia gegenüberzustellen. Die Einschätzung ihres Tragverhaltens verlangt einerseits die Betrachtung des statischen Zusammenwirkens der vier Kuppelsegmente, andererseits ist – im Rahmen einer Analyse ihrer statisch-konstruktiven Entwicklungsgeschichte – den Einflüssen der Teil-

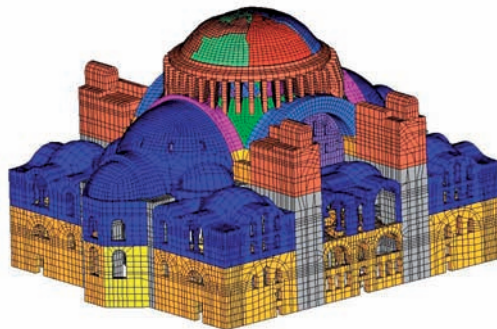
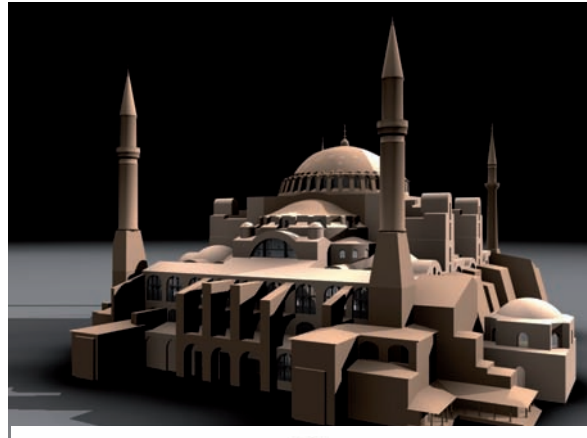


Abb. 28: Visualisierung der Gesamtanlage
Abb. 29: FE-Modellierung des Gesamtgebäudes (Arbeitsmodell) [Quelle: Institut für Mechanik, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)]

leinstürze und den damit verbundenen Zwischenzuständen des Lastflusses Rechnung zu tragen.

- Die geometrischen Irregularitäten: Die Kuppel der Hagia Sophia ist geprägt von einer Vielzahl geometrischer Irregularitäten und Diskontinuitäten. Neben erheblichen, sich insbesondere an den Bruchkanten deutlich abzeichnenden Deformationen der Kuppelinnenseite konnten Querschnittsänderungen innerhalb und deutliche Versprünge zwischen den Bauteilen der unterschiedlichen Bauphasen erkannt werden. Diese geometrischen Differenzen gegenüber einer Kuppelschale mit idealer Kugelform und konstanter Schalendicke sind bei der Ermittlung des Lastflusses zu berücksichtigen und ihr Einfluss auf das Tragverhalten zu bewerten.
- Die materialtechnischen Irregularitäten: Das Ziegel- und Natursteinmauerwerk weist bauphasenspezifisch unterschiedliche Material- und Steifigkeitseigenschaften auf. Diese inhomogenen Verhältnisse sind hinsichtlich ihrer Auswirkungen auf Verformung und Kraftfluss zu beurteilen.
- Die Steifigkeit des Kuppelunterbaus: Die Frage der vertikalen und horizontalen Steifigkeiten des aus Hauptbö-

gen, Pendentifs und Hauptpfeilern bestehenden Unterbaues bildet einen zentralen Punkt beim Lastabtrag einer Pendentifkuppel. Der ursprüngliche, bis heute unveränderte Grundriss weist aufgrund seiner Kombination aus Lang- und Zentralbau einen achssymmetrischen Aufbau auf. Ergänzend beeinflusst werden die Steifigkeitsverhältnisse der heutigen Gebäudestruktur durch die im Lauf der Jahrhunderte erfolgten Teileinstürze, Wiederaufbauten und Ergänzungsmaßnahmen. Unterschiedliche Material- und Querschnitseigenschaften der Hauptbögen an West- und Ostseite, der Bruchkantenverlauf durch die Pendentifs und deren geometrische Ausbildung sowie die an den Außenseiten ergänzten mächtigen Strebepfeiler lassen erhebliche Abweichungen von den punktsymmetrischen Stützverhältnissen einer idealen Pendentifkuppel erahnen.

5.2 Studien und Berechnungen

Die durchgeführten Studien und Berechnungen basierten auf einer schrittweisen Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse. Betrachtungen am Teilsystem Kuppel erbrachten Kenntnisse zum Spannungsverlauf und zum Stabilitätsverhalten der

verformten Kuppelschale. Um die unterschiedlichen Steifigkeitsverhältnisse des Kuppelunterbaus und das Tragverhalten des kompletten Gebäudes zu beurteilen wurde dann ein umfassendes numerisches Modell des primären Tragsystems erstellt (Abb. 27). Dieses Berechnungsmodell berücksichtigt die Mehrteiligkeit der Kuppel, die tatsächlichen Querschnittsdicken und die tatsächlichen Materialeigenschaften. Entsprechend der Bauwerksgeschichte wurden fünf maßgebliche Bauzustände untersucht und statisch bewertet. Die in [1] umfassend dokumentierten Berechnungen geben den tatsächlichen, am Gebäude beobachteten Verformungszustand qualitativ gut wieder, hinsichtlich des errechneten Lastflusses und der Spannungszustände kann damit auch quantitativ von einer guten Annäherung an die tatsächlichen Verhältnisse ausgegangen werden.

5.3 Ergebnisse der statischen Analyse

Die maßgeblichen Erkenntnisse lassen sich folgendermaßen zusammenfassen:

- Entsprechend der Steifigkeit des Unterbaus stellt sich in der Hauptkuppel ein zu den Pendentifs gerichteter Lastfluss ein. Die aus Eigengewicht resultierenden Meridianspannungen befinden sich auf einem für das Mauerwerk geringem Niveau und unterschreiten – als Folge der Betrachtung der tatsächlichen Kuppelquerschnitte – die Werte von früheren Berechnungen.
- Das Tragverhalten der heute mehrteiligen Kuppel gleicht dem eines Klostergewölbes: Es ergibt sich aus einer Bogenwirkung der vier Kuppelsegmente, welche sich lediglich im Bereich des Kuppelscheitels gegeneinander lehnen. Trotz des Verlustes einer geschlossenen Schalenwirkung und des Ausschlusses von Ringzugkräften konnte eine ausreichende Sicherheit gegen ein Stabilitätsversagen der verformten Kuppel nachgewiesen werden.
- Damit lässt sich belegen, dass sowohl die Ursache vergangener Kuppelinstürze als auch eine aktuelle Gefährdung der Kuppel einzig in einem Nachgeben oder Versagen ihrer, insbesondere im Falle dynamischer Erdbebenlasten eine hohe Beanspruchung aufweisende Unterkonstruktion zu suchen ist.
- In der durch Pendentifs und Hauptbögen gebildeten Unterkonstruktion konnten die Scheitel der Hauptbögen als besonders schwache bzw. hochbeanspruchte Stellen ausgewiesen und insoweit die Einschätzung von Vergleichsrechnungen bestätigt werden. Das Versagen dieser Punkte

ist auch als Ursache der Einstürze in der Vergangenheit zu sehen, Hinweise auf eine aktuelle Überlastung konnten jedoch nicht erkannt werden.

- Die Deformationen und Lotabweichungen der Hauptpfeiler lassen sich anhand der Berechnungen in qualitativer Form erklären. Die Größenordnung der tatsächlichen Verformungen bestätigt jedoch eindeutig, dass der überwiegende Anteil auf plastische Kriechverformungen des jungen Mörtels zurückzuführen ist.
- Das Spannungsniveau im Natursteinmauerwerk der Hauptpfeiler erweist sich als gering. Die Bodenpressungen erscheinen – unter der Voraussetzung einer einheitlichen Gründung aller Tragglieder auf gewachsenem Grund – als unkritisch.
- Aus den durchgeführten Berechnungen ergibt sich die Schlussfolgerung, dass die heute existierende Gebäudestruktur im statischen Fall keinesfalls der Gefahr eines Versagens ausgesetzt ist. Auch zeugen nunmehr 662 Jahre mit ihren Erdbebenschütterungen und ohne nennenswerte Schäden von Standsicherheit und bestätigen den optischen Eindruck, dass sich die heutige Hagia Sophia mit all ihren Ergänzungen widerstandsfähiger erweist als zu Zeiten ihrer Erbauung (vgl. Abb. 2-a, b).
- Damit stehen Berechnungen zur Verfügung, welche auf der Grundlage tatsächlicher Geometrien, Materialeigenschaften und unter Berücksichtigung der Teileinstürze und Wiederaufbauten das Tragverhalten der Hagia Sophia unter statischer Belastung beschreiben und Basis der anschließenden Untersuchung des Bauwerksverhaltens unter dynamischen Belastungen darstellen.

5.4 Ausblick auf die dynamische Analyse

Inwiefern sehr starke Beben eine Gefahr für die Hagia Sophia bilden, – und damit sei ein kurzer Ausblick auf ein derzeit noch in Bearbeitung befindliches Anschlussprojekt gegeben – wird ein noch deutlich genaueres numerisches Gebäudemodell erbringen. Die Grundlagen hierfür wurden im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojektes geschaffen und in einem detaillierten, alle An- und Umbauten umfassenden CAD-Modell vereint (Abb. 28). Die Vernetzung der verformten Gebäudegeometrie (Abb. 29) erfolgt derzeit durch das Institut für Mechanik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT). Die nachfolgenden Berechnungen werden dann das nicht-lineare Verhalten von Mauerwerk berücksichtigen und nach entsprechender Validierung für

dynamische Erdbebenlasten erfolgen. Ziel dieser Berechnung wird nicht sein, das Gebäude mit fiktiven Erdbebenlasten zu beaufschlagen und auf deren Grundlage Versteifungsmaßnahmen zu entwerfen. Stattdessen soll die Frage beantwortet werden, warum in den letzten 650 Jahren – trotz verschiedener starker Beben – keine größeren Schäden am Bauegefüge der Hagia Sophia aufgetreten sind. In diesem Zusammenhang spielt mit Sicherheit die Nachgiebigkeit und Flexibilität des Gebäudes eine ganz entscheidende Rolle.

Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojektes „Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul“ [1] konnten mit Hilfe zerstörungsfreier Untersuchungsmethoden umfassende Kenntnisse zum Konstruktionsgefüge der Hagia Sophia erlangt werden. Neben der Erkundung geometrischer und materialspezifischer Eigenarten der verschiedenen Bauphasen ließ sich die Bauwerks- und Reparaturgeschichte nachzeichnen und damit ein Zugewinn an bauwerksgeschichtlich relevanten Erkenntnissen erzielen.

Mit den erlangten neuen Kenntnissen zum Konstruktionsgefüge der Hagia Sophia ist eine entscheidend neue Ausgangslage für eine realitätsnahe Bestimmung des Lastflusses und eine Beurteilung des Tragverhaltens der heutigen Gebäudestruktur gegeben. Gegenüber den stark vereinfachten Annahmen bisheriger Analysen ließen sich differenziertere Randbedingungen definieren und zutreffendere Berechnungsansätze formulieren. Erstmals konnten auch die am Bauwerk festgestellten geometrischen und materiellen Irregularitäten und Diskontinuitäten, der Zeitversatz der Teileinstürze bzw. Wiederaufbauten und die ermittelten Materialkennwerte Berücksichtigung finden.

Die durchgeführten Studien und statischen Analysen geben die tatsächlichen, am Bauegefüge ablesbaren Deformationen gut wieder. Dementsprechend ließen sich auch hinsichtlich des Lastflusses, den Spannungszuständen und dem Stabilitätsverhalten zuverlässige Aussagen treffen. Im weiteren Verlauf der Untersuchungen werden die gewonnenen Erkenntnisse – sowohl zum Konstruktionsgefüge als auch zum Tragverhalten – Grundlage bilden, um die Frage der Erdbebengefährdung – auch etwaiger Verstärkungsmaßnahmen – mit einer der der kultur- und baugeschichtlichen Bedeutung des Gebäudes entsprechender Zuverlässigkeit und im Sinne des denkmalpflegerisch erwünschten Bewahrens von Integrität und Identität des Bauwerks vorzunehmen.

Literaturverzeichnis

1. Duppel, C.: Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul. Karlsruhe 2010
2. Duppel, C.: Untersuchungen zum Konstruktionsgefüge und Tragverhalten der Hagia Sophia in Istanbul. In: Erhalten historisch bedeutsamer Bauwerke: Fritz Wenzel zum 80. Geburtstag, hrsg. von Rainer Barthel, München 2010, S.175–182
3. Durukal, E.; Erdik, M.; Çakmak, A.Ş.: Assessment of the earthquake performance of Hagia Sophia. In: Studies in Ancient Structures, Proceedings of the International Conference, Yildiz Technical University, Istanbul 1997, S. 407–415
4. Erdik, M.; Demircioglu, M.; Sesetyan, K.; Durukal, E.; Siyahi, B.: Earthquake hazard in Marmara Region, Turkey. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 24 (2004), S. 605–631
5. Fossati, C.: Die Hagia Sophia. Nach dem Tafelwerk von 1852. Erläutert und mit einem Nachwort von Urs Peschlow. Dortmund 1980
6. GGU Gesellschaft für geophysikalische Untersuchungen mbH: Informationsmappe mit Dienstleistungsübersicht, Verfahrensbeispielen, Fallbeispielen. Auflage 3ac, Karlsruhe 2004
7. Kahle, M.; Illich, B.: Einsatz des Radarverfahrens zur Erkundung von Struktur und Zustand historischen Mauerwerks. Bautechnik 69 (1992), Heft 7, S. 342–353
8. Kahle, M.: Verfahren zur Erkundung des Gefügestandes von Mauerwerk, insbesondere an historischen Bauten. Aus Forschung und Lehre, Heft 28, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe 1995
9. Kato, S.; Aoki, T.; Hidaka, K.; Nakamura, H.: Finite-Element modelling of the first and second domes of Hagia Sophia. In: Hagia Sophia from the age of Justinian to the present, edited by R. Mark and A.Ş. Çakmak, Cambridge 1992, S. 103–119
10. Mainstone, R.J.: Hagia Sophia – Architecture, Structure and Liturgy of Justinian’s Great Church. London 1988
11. Mainstone, R.J.: Present State of the Hagia Sophia Monument with Recommendations for its Preservation and Restoration. UNESCO, Paris 1996
12. Mark, R.; Westagard, A.: The First Dome of the Hagia Sophia: Myth vs. Technology. In: Domes from Antiquity to the Present, Proceedings of IASS - MSU Symposium, Istanbul, 1988, S. 163–172
13. Ozil, R.: The Conservation of the Dome Mosaics of Hagia Sophia. In: Light on Top of the Black Hill, Studies presented to Halet Çambel, edited by G. Arsebük, Istanbul 1998, S. 543–553
14. Patitz, G.: Erkundung mehrschaligen Mauerwerks mit mechanischen Wellen. Aus Forschung und Lehre, Heft 35, Institut für Tragkonstruktionen, Universität Karlsruhe 1998
15. Salzenberg, W.: Alt-christliche Baudenkmale von Constantinopel vom V. bis XII. Jahrhundert. Berlin 1854
16. Sato, T.; Hidaka, K.: Deformation of the Upper Structure of Hagia Sophia. In: Hagia Sophia Surveying Project Conference, Proceedings of the Conference. Tokyo 2001, S. 37–64
17. Thode, D.: Untersuchungen zur Lastabtragung in spätantiken Kuppelbauten. Herausgegeben von der Koldewey-Gesellschaft, Darmstadt 1975
18. Van Nice, R.L.: St. Sophia in Istanbul: an architectural survey. Dumbarton Oaks Washington, 1965 und 1986
19. Wenzel, F.; Kleinmanns, J. (Hrsg.): Historisches Mauerwerk: Untersuchen, Bewerten und Instandsetzen. Sonderforschungsbereich 315, Universität Karlsruhe 2000
20. Wenzel, F.; Illich, B.; Duppel, C.: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Baugefüge der Hagia Sophia in Istanbul. In: Ingenieurbaukunst in Deutschland Jahrbuch 2003/2004, hrsg. von der Bundesingenieurkammer, Hamburg 2003, S. 166–171
21. Wenzel, F.; Duppel, C.: Engineering Studies on the Main Dome and the Main Pillars of the Hagia Sophia in Istanbul. In: Structure and Extreme Events, IABSE Symposium Lisbon 2005, Zürich 2005, S. 340–341

Angaben zum Autor

Dr.-Ing. Christoph Duppel, geb. 1969; Studium des Bauingenieurwesens an der Universität Karlsruhe (TH), 1997 Diplom; Seit 1998 Ingenieur Tätigkeit im BfB Büro für Baukonstruktionen, Wenzel Frese Pörtner Haller, Karlsruhe; 2004 – 2009 Wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Tragkonstruktionen der Universität Karlsruhe (TH) bei Prof. Dr.-Ing. Fritz Wenzel; Bearbeitung des DFG-Projektes „Ingenieurwissenschaftliche Untersuchungen an der Hauptkuppel und den Hauptpfeilern der Hagia Sophia in Istanbul“, 2009 Promotion zu diesem Thema

