

Kapitel 13

Ergebnisse und Diskussion

13.1 Übersicht über die Forschungsergebnisse

13.1.1 Rekonstruktionsmodell und Simulationsumgebung

Ein wesentlicher Teil dieser Arbeit ist in das Simulationsmodell und die Simulationsumgebung eingeflossen. Die Neuerungen und Überarbeitungen am Modell sind Teil des Rekonstruktionsprozesses in Kapitel 4. Neben vielen Korrekturen gehören dazu:

- Die Rekonstruktion der Kuppel von 562 (Abbildung 4.18).
- Die Rekonstruktion der außenliegenden verschattenden Bauteile einschließlich der Volumenmodelle der Treppen und Rampen und der Gebäude der unmittelbaren Umgebung: Skeuophylakion und Baptisterium (Abbildung 4.19).
- Die Modellierung der noch zur Bauzeit hinzugefügten verstärkenden Bauteilen zwischen den Haupt- und Stützfeilern in Seitenschiffen und Galerien (Tafel 1).
- Die systematische Aufarbeitung der Marmorausstattung, wie sie auf Tafel 2 bis Tafel 5 dokumentiert ist. Dazu gehört die Rekonstruktion der Vergoldung
- Die systematisch überarbeiteten Materialmodelle für Marmor, Glas und Goldmosaik. Dazu gehört auch ihre Verknüpfung mit dem geometrischen Modell, u. a. durch Überarbeitung der Gewölbe.
- Die Überarbeitung und Erweiterung der zur Steuerung der Simulation notwendigen Software.

Damit lassen sich die Ergebnisse reproduzieren und das Darmstädter Modell steht als Forschungsumgebung zur nachhaltigen interdisziplinären Nutzung zur Verfügung.

13.1.2 Simulationsergebnisse

Die Ergebnisse des Untersuchungsprogramms erschließen sich in einer Reihe von Vergleichen. Die Tafeln des Anhangs sind daher so angelegt, dass sie nebeneinandergelegt werden können. Dabei sind die Berechnungsergebnisse einer Beleuchtungssituation oder Variante des Modells

auf jeweils zwei Blättern zusammengefasst. Das erste zeigt Leuchtdichten ausgewählter Perspektiven in Fehlfarben und als für den Druck optimierte Annäherungen an die menschliche Wahrnehmung (Tone Mapping). Die zweite Tafel zeigt vorwiegend Beleuchtungsstärken in Grundrissen, Deckenspiegeln und Schnitten, dazu eine Fisheye-Aufnahme aus der Raummitte als Übersicht in Leuchtdichten, Beleuchtungsstärken und Tone Mapping und sowie eine Wiedergabe der Leuchtdichten des zugehörigen Himmelsmodells als Fisheye-Aufnahme mit gleicher Ausrichtung (Westen ist daher unten und Süden links). In der zugehörigen Datenpublikation¹ finden sich diese Darstellungen in höherer Auflösung. Hier wurden die Tone-Mapping-Bilder für die Bildschirmdarstellung optimiert.

Diese Ergebnisse liegen der Auswertung zugrunde, sollen aber auch die unabhängige Interpretation durch andere Forscher ermöglichen. In der Datenpublikation finden sich die Rohdaten der Berechnung einschließlich der Einstellungsdateien und Softwareanpassungen für die Simulationsumgebung.

Die einzelnen Tafeln zeigen:

- Tafel 6, Tafel 97 und Tafel 98 zeigen die Beleuchtung der Hagia Sophia im Bauzustand von 562 zum Vergleich mit dem heutigen Bauzustand wie von Inanici dokumentiert.²
- Tafel 7 bis Tafel 28 zeigen einen Vergleich der Beleuchtung bei bedecktem und sonnigem Himmel, jeweils am Weihnachtsmorgen und zu Mittag an Ostern.
- Tafel 61 bis Tafel 64 zeigen den Einfluss der Verglasung auf die Innenraumbeleuchtung mit einer klaren Verglasung, ebenfalls für den Weihnachtsmorgen und zu Mittag an Ostern. Diese dienen der Gegenüberstellung zu den anderen Ergebnissen, denen die Messungen am Bonner Fensterglasfund zugrunde liegt (Tafel 11 bis Tafel 12 und Tafel 35 bis Tafel 36).
- Tafel 93 bis Tafel 96 dienen der Untersuchung des Einflusses des Marmorbodens auf die indirekte Beleuchtung. Das Bodenmaterial in diesem Modell hat einen minimalen Reflexionsgrad und kann mit den jeweils passenden Berechnungsergebnissen zu Weihnachten und Ostern verglichen werden (Tafel 11 bis Tafel 12 und Tafel 35 bis Tafel 36).
- Tafel 89 bis Tafel 92 dienen der Untersuchung des Einflusses des Glasmosaiks auf die indirekte Beleuchtung. Das Gewölbematerial in diesem Modell hat einen minimalen Reflexionsgrad und kann mit den jeweils passenden Berechnungsergebnissen zu Weihnachten und Ostern verglichen werden (Tafel 11 bis Tafel 12 und Tafel 35 bis Tafel 36).
- Tafel 65 bis Tafel 84 zeigen die Anteile der Fenstergruppen an der Innenraumbeleuchtung und ihren Effekten, auch hier für den Weihnachtsmorgen und zu Mittag an Ostern.
- Abgeschlossen werden die Berechnungen mit Tafel 11 bis Tafel 58, welche die Beleuchtung im Tagesverlauf zu Weihnachten (Tafel 11 bis Tafel 24), Ostern (Tafel 29 bis Tafel 42) und am Johannistag (Tafel 45 bis Tafel 58) zeigen.

¹ <https://doi.org/10.11588/data/TONJFH>.

² Inanici 2014, S. 172.

13.2 Vergleich der heutigen Hagia Sophia mit dem Bauzustand von 562

13.2.1 Helligkeit im Gebäude

Der Vergleich der Beleuchtung des rekonstruierten Bauzustandes von 562 mit dem heutigen Zustand zeigt deutliche Unterschiede. Die Beleuchtungsstärken auf dem Boden unterscheiden sich signifikant. Der berechnete Wert ist etwa fünfmal so hoch wie der, den man aus Inanici's Grafik ablesen kann (Tabelle 13.1).³ Das ist sehr viel größer als die Abweichung zwischen den gemessenen und unter dem Himmelsmodell berechneten Beleuchtungsstärken (Tabelle 12.1). Es war ursprünglich offenbar viel heller im Gebäude.

Tabelle 13.1: Vergleich der von Inanici gemessenen und der berechneten Beleuchtungsstärke in der Mitte des Innenraums für den 24.9. 13:00 Uhr EEST

	E_v
Messung Inanici	48 lx
Modell	280 lx

13.2.2 Vergleich der Leuchtdichten

Vergleicht man die Leuchtdichten der beiden Fisheye-Aufnahmen (Tafel 6) miteinander, fällt als erstes der Unterschied bei den Fenstern auf. Durch die im ursprünglichen Zustand offenen Fenster der Seitenschiffe fällt viel Licht ein. Heute sind viele Fenster geschlossen, durch die heute noch offenen fällt weniger Licht ein, besonders deutlich im Norden. Das ist wohl auf die außenliegenden verstärkenden Bauteile und die veränderte Umgebung zurückzuführen, die zusätzlich Himmelslicht abhalten. Weiter oben fallen die veränderten Fenster der Tympanonwände auf. In den Gewölben fallen einige heute geschlossene Fenster ins Auge. Die Apsiskuppel ist aus dieser Perspektive heute zum Teil durch den Leuchter verdeckt im ursprünglichen Zustand die unteren Fenster durch den Ambo, sodass man hier keine Veränderungen sehen kann.

Die nächsten signifikanten Unterschiede kann man in den Gewölben ausmachen, am drastischsten in den Untersichten in den Seitenschiffen und Galerien. Diese weisen sehr helle glänzende Reflexionen mit hohen Leuchtdichten auf. Auch die Halbtonne am Westfenster ist deutlich heller. Gleiches gilt auch für die kleinen Tonnengewölbe über den Fenstern in der Kuppel. Der Kranz der Fenster zeichnet sich dadurch deutlicher ab. Ähnliches sieht man auch in den anderen Fenstern in den Gewölben des Hauptraums. Auch die Pendentifs sind deutlich heller.

Zusätzlich sind im Ursprungszustand in der Kuppel und auch in den anderen Gewölben große helle Flecken sichtbar, offenbar Spiegelungen anderer heller Bereiche im Gebäude. In der

³ Inanici 2014, S. 192, Fig. 17.

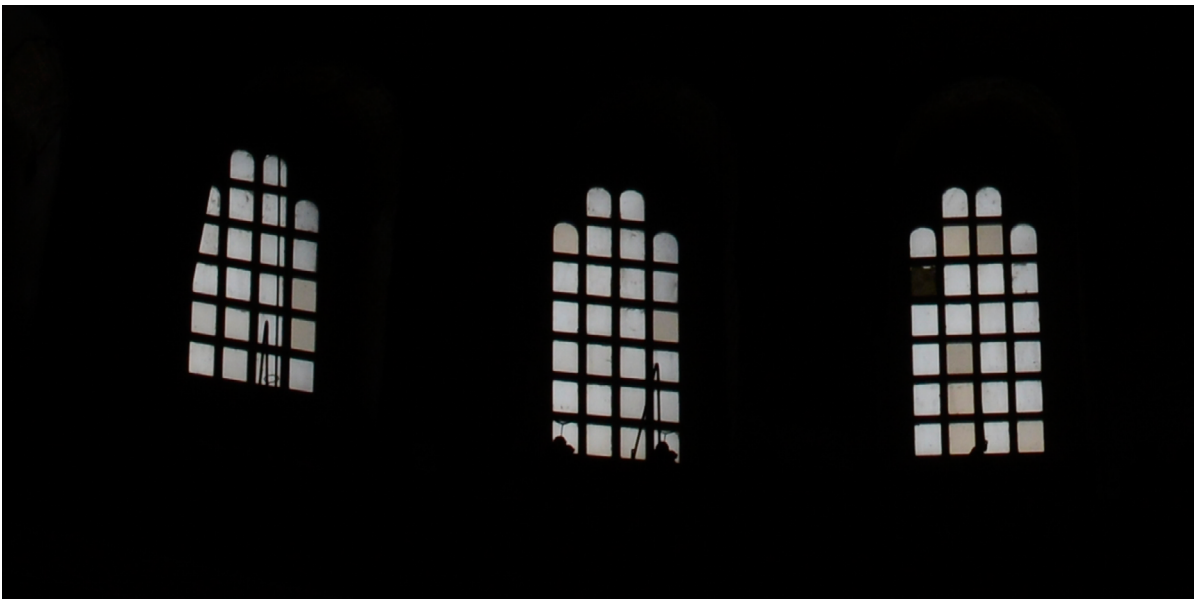


Abbildung 13.1: Die heutige transluzente Verglasung in der Kuppel. Auch auf der dunklen Aufnahme zeichnen sich keinerlei außenliegende Bauteile ab. Das einfallende Licht wird diffus gestreut. Direktes Sonnenlicht kann keine Flecken auf dem Boden verursachen. Zustand 2015.

Kuppel könnte man aufgrund der Geometrie vermuten, dass der helle Fleck im Westen die Apsis und der im Norden die südliche Tympanonwand spiegelt. Es gibt aber auch Bereiche, die weniger Licht in die Raummitte reflektierten, so z. B. die südliche Tympanonwand. Dadurch steigen die Kontraste innerhalb des Goldmosaiks, was den Erwartungen entspricht.

Auch die Wände des Hauptraums zeigen deutliche Unterschiede. Zunächst fällt auf, das im Ursprungszustand offenbar direktes Sonnenlicht aus den Kuppelfenstern den nordwestlichen Hauptpfeiler trifft. Im heutigen Zustand ist die Wand zwar insgesamt heller als die anderen Wände des Hauptraums, aber kein Lichtfleck zu erkennen. Das kann man nicht durch die im relevanten Bereich nur leicht veränderte Geometrie der Kuppel erklären. Vermutlich ist das in der Kuppel in jüngerer Zeit eingesetzte Glas die Ursache. Dieses scheint eine Art Milchglas zu sein, jedenfalls zeichnen sich in Aufnahmen nicht einmal grob Umrisse angrenzender außenliegender Bauteile ab (Abbildung 13.1).

Die anderen marmorverkleideten Wände zeigen im ursprünglichen Zustand höhere Leuchtdichten. Besonders deutlich wird das an den südlich gelegenen Wänden. Innerhalb der Wände ist der Kontrast höher, dunkle Materialien wie der *marmor celticum* unterscheiden deutlicher von den helleren. Im Gegensatz dazu treten die beiden Kranzgesimse heute deutlicher (dunkler) hervor. Dafür wiesen die Kranzgesimse und die anderen ursprünglich vergoldeten Bauteile früher kleine besonders helle Reflexionen auf. Besonders in den À-jour-Arbeiten im Erdgeschoss spiegeln sich die Fenster.

13.2.3 Gesamtwirkung des Innenraums

Insgesamt grenzt sich heute ein hellerer Innenraum besonders im Norden von den dunkleren Seitenschiffen ab. Im ursprünglichen Zustand fallen dagegen besonders die hellen Fenster und Gewölbeuntersichten der Seitenschiffe ins Auge. Als Raumgrenze wirken eher die Fenster und Wände in den Seitenschiffen. Insgesamt war die Lichtszene deutlich heller und kontrastreicher. Man kann im Vergleich der Leuchtdichten deutlich erkennen, wie stark das heute nicht mehr großflächig sichtbare Goldmosaik und der verschwundene Glanz der Marmorausstattung den Raumeindruck verändern, ganz zu schweigen von den verschlossenen und verstellten Fenstern.

13.3 Beleuchtung bei bedecktem und sonnigem Himmel

Vergleicht man die Beleuchtung unter dem Modell eines bedeckten Himmels mit der unter einem klaren Himmel mit direktem Sonnenlicht, kann man Rückschlüsse auf die Wirkung der auf dem Boden entstehenden Flecken direkten Lichts ziehen, aber auch auf die unterschiedliche diffuse Beleuchtung aufgrund dieser gegensätzlichen Zustände des Wetters. Zunächst sollte man aber zur Kenntnis nehmen, wie sich die Leuchtdichteverteilung am künstlichen Himmel ändert (Tafel 10l, Tafel 8l, Tafel 28l und Tafel 26l).

13.3.1 Leuchtdichteverteilung am Himmel und die Helligkeit im Inneren

Am Weihnachtsmorgen sind die Leuchtdichten der beiden Modelle am Zenit ähnlich, der klare Himmel wird aber zum Horizont hin deutlich heller, besonders nahe der aufgehenden Sonne. So erreicht zusätzlich zum direkten Licht der Sonne auch mehr diffuses Licht durch die Fenster in den Außenwänden den Innenraum. Bei bedecktem Himmel ist es im Innenraum sehr dunkel: Der Boden in der Raummitte erhält nur 3,6 lx. Die Leuchtdichten im Hauptraum bleiben im Bereich des mesopischen Sehens, Farben können also nur bedingt differenziert werden. Dem gegenüber liegen die Beleuchtungsstärken bei klarem Himmel bei 49 lx auf dem Boden. Die Leuchtdichten liegen nun im Bereich des photopischen Sehens, erlauben also das Farbsehen. Unabhängig von den Effekten des direkten Lichts, die später beschrieben werden, trennt der Einfluss des Wetters die beiden Beleuchtungssituationen also durch eine *Sehschwelle*.

Höhere Sonnenstände wie zum Mittag an Ostern führen zu qualitativ anderen Unterschieden der Leuchtverteilung am Himmelsmodell. Das vom Horizont herrührende diffuse Licht ist nun in beiden Modellen ähnlich und nimmt bei bedecktem Himmel zum Zenit hin *zu*, bei klarem Himmel aber *ab*. Dafür ist der Himmel rund um die Sonne sehr viel heller, die diffuse Beleuchtung ist also nach der Sonne hin ausgerichtet. Die quantitativen Unterschiede der Beleuchtungsstärken bzw. Leuchtdichten im Innenraum sind spürbar, aber qualitativ weniger dramatisch als am Weihnachtsmorgen. Es ist die Verteilung dieser Quantitäten und die vom direkten Licht bewirkten Effekte, die den Raum unterschiedlich wirken lassen. Allerdings lassen sich die Einflüsse des direkten Lichts nicht immer von der geänderten Verteilung des diffusen Himmelslichts unterscheiden.

13.3.2 Verteilung der Beleuchtungsstärken

In den Beleuchtungsstärken zeigen sich bei klarem Himmel größere Unterschiede als bei bedecktem Himmel. Am Mittag zu Ostern sind die südlichen Seitenschiffe und Galerien bei klarem Himmel deutlich heller als die nördlichen. Letztere sind sogar etwas dunkler als bei bedecktem Himmel, der im Norden und Süden zu sehr ähnlichen Helligkeiten führt. Ursache ist unter anderem das Sonnenlicht, das durch die Fenster einfällt und helle Flecken auf dem Boden hervorruft. Im Hauptraum fällt direktes Sonnenlicht durch die Kuppel in die Nähe des nord-westlichen Pfeilers. Man kann auch Flecken von Fenstern der östlichen Halbkuppel und der Halbkuppel über der südöstlichen Konche erkennen. Ein Fleck nahe dem Eingang rührt von einem Fenster in der südwestlichen Konche her. Es zeigen sich noch weitere Flecken, deren Herkunft jedoch nicht klar ist – vielleicht Reflexionen an einer der Wände. Durch die südliche Tympanonwand fällt kein direktes Sonnenlicht, die außenliegenden Bögen und Pfeiler schirmen die Sonne offenbar ab.

13.3.3 Leuchtdichten und Helligkeitswahrnehmung

Auf den Tone-Mapping-Bildern fällt auf, dass bei klarem Himmel geringere Blendung auftritt. Die Leuchtdichten innerhalb der Fenster sind etwas geringer und die Leuchtdichten im Bereich der Wände und Gewölbe sind deutlich höher. Der Kontrast zu den Fenstern ist also geringer. Durch die geringere Blendung sind viele Details (Fensterrahmen, Kranzgesimse, Ä-jour-Arbeiten) deutlicher zu erkennen. Zusätzlich ist der Kontrast innerhalb der Gewölbe und Wände gestiegen, vor allem die Leuchtdichten der Reflexionen im Mosaik und in den vergoldeten Bauteilen.

So erscheinen die Gewölbe im nördlichen Seitenschiff und in der darüber liegenden Galerie an vielen Stellen kontrastreicher (Tafel 27h vs. Tafel 25h). Die Leuchtdichten vor allem der helleren Partien sind angestiegen. Ähnliches ist in den Gewölben über dem Hauptraum und der Apsis zu beobachten: die hellen Partien treten deutlicher hervor, der Kontrast nimmt zu. Hier sind aber auch die Leuchtdichten der dunkleren Partien höher.

In den Kapitellen zeigen sich zusätzliche Reflexionen, die in den Kolonnaden zu den Seitenschiffen mit dem Lichtfleck am Boden korrelieren. Auch die größer gewordene Reflexion in der Kuppel über der Apsis korreliert mit dem direkten Licht, das den Boden der Apsis erhellt. Solche Zusammenhänge lassen sich im heutigen Gebäude noch im Narthex zeigen, in dem das Goldmosaik in seiner Gesamtheit erhalten ist (Abbildung 13.2).

Die Zunahme der Leuchtdichten in den Schattenbereichen der Gewölbe im Hauptraum lässt vermuten, dass die Lichtflecke auf dem Boden auch eine relevante Quelle für zusätzliches diffuses Licht sind. Allerdings kann das nicht klar von der veränderten Leuchtdichteverteilung des Himmelsmodells hin zum Horizont unterschieden werden, durch die mehr Licht durch die Fenster in den Außenwänden fällt. Ausnahmen sind die Tonnengewölbe, die direkt an die Kolonnaden der Galerie anschließen. Diese werden offensichtlich durch den großen Lichtfleck nahe dem nordwestlichen Hauptpfeiler heller. Klar erkennbar ist auch die Aufhellung der Schattenpartien an den nördlichen Teilen der Pfeilervorlagen und Gewölbe auf den Bildern

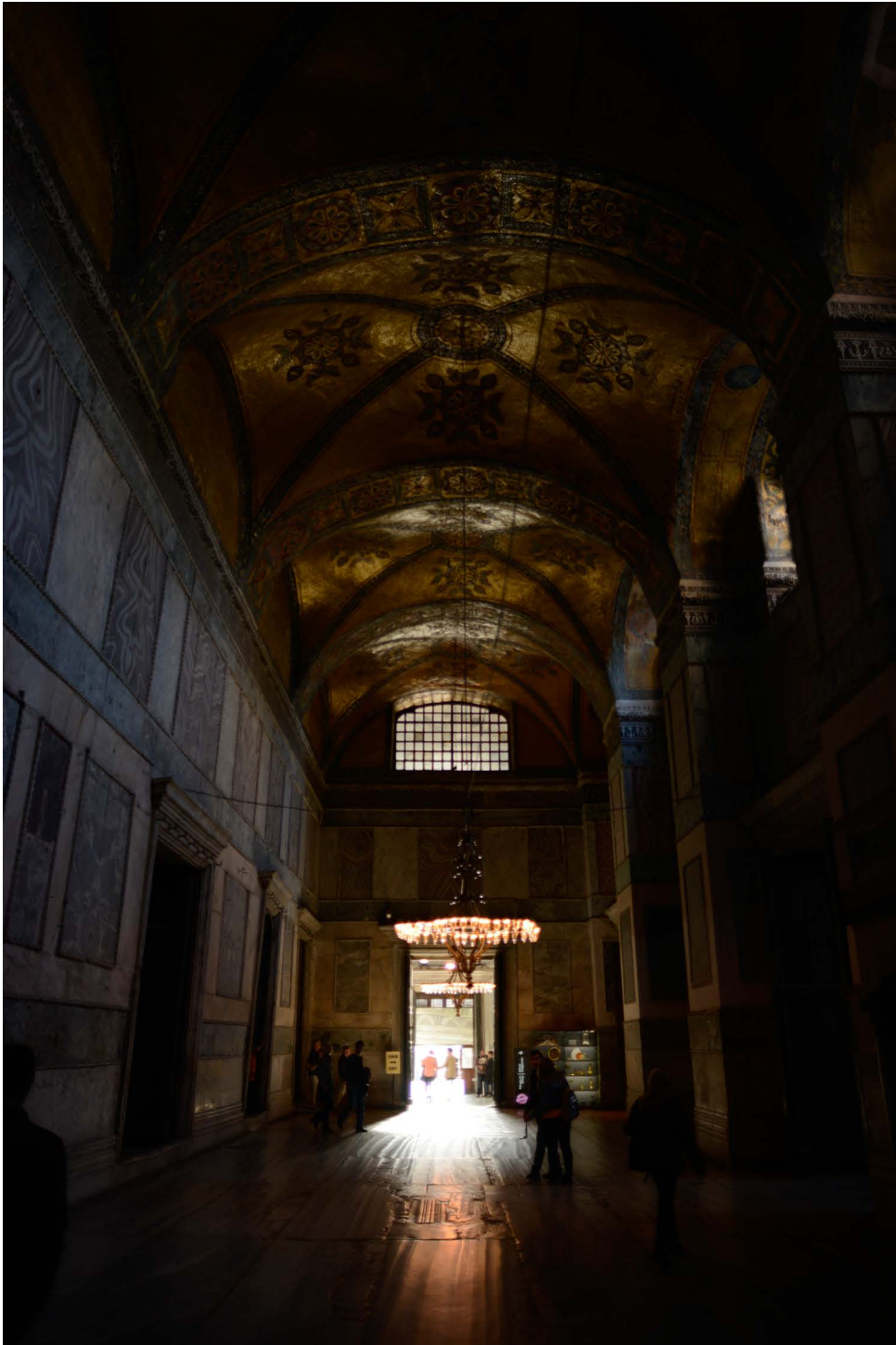


Abbildung 13.2: Narthex: Lichtflecke auf dem Boden spiegeln sich im Goldmosaik. In den Simulationen zeigt sich dieser Effekt auch im Goldmosaik über dem Hauptraum des Gebäudes. Zustand 2015.

im südlichen Seitenschiff (Tafel 27c vs. Tafel 25c). Diese kann man gut mit dem direkten Sonnenlicht in Beziehung setzen, das den Boden nahe den Fenstern erreicht (Tafel 26f).

Noch ein weiterer Effekt zeigt sich von der nordwestlichen Galerie. Lenkt man seinen Blick auf die gegenüberliegenden Galerien im Süden, bemerkt man bei klarem Himmel und hohem Sonnenstand zusätzliche Blendung durch die höheren Leuchtdichten des Himmels nahe dem Horizont. Allerdings scheint durch die zusätzliche diffuse Reflexion direkten Lichts auf dem Boden, welche durch die Schrankenplatten verdeckt wird, nun der gesamte Raum der Galerien aufzuleuchten. Das kann man besonders gut in einem Vergleich der Leuchtdichten rund um die Kolonnaden in der Mitte nachvollziehen: Bei bedecktem Himmel sind die Säulen und Schranken ähnlich hell oder heller als die Gewölbe und Wände dahinter. Auszunehmen sind nur die Fenster und ihre glänzenden Reflexionen auf den angrenzenden Wänden und Gewölbeflächen. Bei klarem Himmel sind dagegen alle Flächen der Gewölbe und Wände im mittleren Raumsegment der Galerien wenigstens ähnlich hell, zumeist aber deutlich heller als die Säulen und Schranken davor: Eine klare Umkehrung der Lichtverhältnisse.

13.3.4 Kontraste und plastische Wirkung der Wanddekoration

Die Wände im Hauptraum zeigen bei direkter Beleuchtung einen goldenen Farbton, offenbar stammt ein nennenswerter Anteil des zusätzlichen diffusen Lichts von den Gewölben.⁴

Die Musterung und der Farbkontrast des Marmors sind bei klarem Himmel deutlicher wahrzunehmen. Die Wände zeigen zudem ein stärkeres Spiel von Licht und Schatten und wirken dadurch plastischer. Werden die Lichtszenen bei bedecktem Himmel klar von den Fenstern dominiert, so treten nun die Wände viel deutlicher in Erscheinung und geben dem Raum architektonische Struktur: Der Raum scheint mehr Tiefe zu haben. Ganz besonders tritt unter dem Einfluss der direkten Beleuchtung der Altarraum und die Apsis hervor. Die kostbar gestalteten seitlichen Wände heben sich vom Hauptraum ab. Die Rundung der Apsiswand und ihre kontrastreiche Marmorgestaltung treten wirksam in Erscheinung. Die zusätzlichen Reflexionen in den Gewölben darüber halten diesen Raum zusammen. Im Hauptraum sieht man nur wenig direktes Licht, z. B. in den Fensterwandungen. Besonders ausgewogen erscheint das Verhältnis von diffuser Beleuchtung zu den Glanzeffekten auf den Marmorplatten und den vergoldeten Bauteilen. Wirken die Reflexionen bei diffuser Beleuchtung teilweise irritierend, verstärken sie unter direktem Licht die räumliche Wirkung.

Die Bedeutung der Reflexionen der Fenster nimmt bei direktem Licht an vielen Stellen ab. Gut sieht man das an der Reflexion des großen Thermenfensters am nordwestlichen Hauptpfeiler (Tafel 27i vs. Tafel 25i). Dominiert diese Reflexion bei bedecktem Himmel die Wand im Obergeschoss zu Lasten der Farben und Muster des Marmors, wirkt sie bei klarem Himmel wie ein zusätzlicher subtiler Effekt.

⁴ Man sollte allerdings in Erinnerung behalten, dass die Bilder die Farbadaption des menschlichen Sehapparates nicht berücksichtigen (Larson, Rushmeier und Piatko 1997, S. 305). Diese müsste auch die Farben des Himmels und der Sonne im Modell einbeziehen (Hosek und Wilkie 2012).

Die Reflexionen der Fenster auf dem Boden, die bei bedecktem Himmel die Dominanz der Fenster in den Szenen nochmals bekräftigen, bekommen durch das direkte Licht visuelle Konkurrenz durch die Lichtflecken, die höhere Leuchtdichten aufweisen. Besonders deutlich wird das bei einem Blick von der Galerie (Tafel 27g vs. Tafel 25g). Hier zeigt sich auf dem Boden nahe den Einbauten und in den Seitenschiffen ein deutlich komplexeres Spiel der Beleuchtung.

13.3.5 Einfluss und Dynamik der Bewölkung

Zusammenfassend kann man schon aufgrund des Vergleichs von klarem und bedecktem Himmel feststellen, dass die Bewölkung einen entscheidenden Einfluss auf die Beleuchtung und die Raumwirkung hat. Die effektvollen Materialien – Goldmosaik und Marmordekoration – profitieren vom klaren Himmel und dem direkten Sonnenlicht. Morgens führt der bedeckte Himmel zu einer unzureichenden Beleuchtung durch Tageslicht, die durch die Blendung besonders bedrückend wirkt.

Neben diesen beiden, relativ weit auseinander liegenden Bewölkungsarten gibt es aber viele weitere. Verschiedene Formen der Bewölkung, Dunst etc. kombinieren sich zu stark oder nur subtil unterschiedlichen Situationen. Diese können mit dem vorliegenden Himmelsmodell nur bedingt reproduziert werden. Aufgrund der vorliegenden Ergebnisse kann man dennoch schließen, dass auch diese in der Wahrnehmung zu unterscheidbaren Lichtszenen führen.

Aber noch einen weiteren Aspekt der Beleuchtung kann man aus dem vorliegenden Vergleich erschließen: Ziehen Wolken über den Himmel, kann man davon ausgehen, dass zwischen diesen beiden Arten der Beleuchtung gleichsam hin und her geschaltet bzw. dynamisch überblendet wird. Sowohl die absolute Helligkeit als auch die Verteilung und Intensität der Reflexionen und Kontraste wird dabei schwanken. Beides verändert den architektonischen Charakter des Raums. Durch eine solche kurzfristige Dynamik wird die Aufmerksamkeit eines Beobachters permanent stimuliert und von immer wieder neuen Effekten in seinem Blickfeld angezogen. Die Wahrnehmung der oben aufgezeigten Effekte wird dadurch noch verstärkt.

13.4 Einfluss der Verglasung auf die Innenraumbeleuchtung

Dieser und die folgenden Abschnitte setzen sich mit dem Einfluss der Materialien auf den Innenraum auseinander. Bei der Verglasung interessiert, wie sich die Streueigenschaften des gemessenen Fensterglasfundes aus Bonn auf die Beleuchtung auswirken. Als Vergleich dient ein klares Glas. Da nicht sicher ist, wie stark die Glaskorrosion zur gemessenen Streuung beiträgt, lässt sich durch den Vergleich auch die Bandbreite der Materialwirkung einschätzen.

Als Himmelsmodell wird beide Male der *intermediate sky* herangezogen (Tafel 12l, Tafel 62l, Tafel 36l und Tafel 64l).

In einem Tagungsbeitrag konnte schon gezeigt werden, dass sich die Streuungscharakteristik des gemessenen Fensterglases auf die Form der Lichtflecken auswirkt.⁵ Klar begrenzte Pro-

⁵ Noback, Grobe und Lang 2021.

jektionen der Fenster und klar ablesbare Schatten der Fensterunterteilungen stehen größeren, weich auslaufenden Flecken gegenüber, in denen nur auf direkt an die Fenster angrenzenden Flächen Schatten der Fenstersprossen erkennbar sind. Bei zunehmender Distanz überlagern sich die Flecken der Fenster einer Gruppe zu einer zusammenhängenden hellen Fläche (Abbildung 8.13 und Abbildung 8.14). Das zeigen auch die Ergebnisse dieser Arbeit, hinsichtlich des Sonnenaufgangs am Weihnachtsmorgen. Kann man bei klarem Glas die einzelnen Fenster und den Schatten des Ziboriums klar auf der Westwand erkennen (Tafel 11i, erhellt das streuende Glasmodell gleichmäßig die gesamte Westwand (Tafel 61i). Das Ergebnis führt zu einer kolossalen Veränderung in der Wahrnehmung der Architektur.

Aber auch das Sonnenlicht, das durch die Fenster der Kuppel am Ostermittag auf den Boden nahe des nordwestlichen Hauptpfeilers fällt, wird durch die Streuung zu einer weich abgegrenzten hellen Fläche zusammengezogen. Die Wirkung, welche die unterschiedliche Gestalt der hellen Flecke auf dem Boden auf die Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung anderer Bauteile hat, ist gegenüber den Ergebnissen in der Tagungspublikation (Abbildung 8.15) eher subtil (Tafel 35h und Tafel 63h). Dort konnte man reichere Abstufungen in den Halbschatten und eine plastischere Wirkung der Kapitelle erkennen. In den hier vorliegenden Bildern wirken lediglich manche Reflexionen in den Gewölben durch die Streuung etwas weicher und die Schatten etwas weniger tief. Wahrscheinlich wirkt sich die Wahl unterschiedlicher Himmelsmodelle auf diesen Effekt aus. Die Wirkung der Kapitelle wird durch die Vergoldung vollkommen verändert. Von einer plastischen Wirkung im Sinne von Helligkeitsverläufen kann man nicht sprechen, der dreidimensionale Eindruck entsteht durch die Veränderung des Glanzes in Abhängigkeit von der Richtung der Oberfläche in Bezug auf die Fenster und indirekte Lichtquellen. So beeinflusst auch die Form naher Lichtflecke die Verteilung der glänzenden Flächen auf den Kapitellen.

Eine zusätzliche Blendung durch das Aufleuchten der Fensterscheiben durch gestreutes Licht ist beim gewählten Himmelsmodell nur bei Blickrichtungen nahe dem Einfallswinkel der Sonne zu erkennen: deutlich zu Weihnachten im südlichen Seitenschiff (Tafel 35c vs. Tafel 63c) und in der nördlichen Galerie (Tafel 35b vs. Tafel 63b).

Zusammenfassend kann man feststellen, dass die Streuung in den Fenstergläsern am stärksten die Form der Lichtflecken auf dem Boden beeinflusst. Daraus resultiert eine subtile Wirkung auf die Wahrnehmung des Goldmosaiks. Im überarbeiteten Modell führt die Vergoldung plastischer Bauteile zu einem geringeren Einfluss der Streuung auf die Wirkung plastischer Bauteile. Der im Vergleich zur Tagungspublikation weniger klare Himmel reduziert die Wirkung der Streuung. Insgesamt zeigt sich so, wie bedeutsam das Zusammenspiel der verschiedenen Materialien ist und dass die Dynamik des Tageslichts Teil dieses Spiels ist.

13.5 Einfluss des Marmorbodens auf die indirekte Beleuchtung

Die vorausgegangenen Abschnitte der Auswertung haben bereits gezeigt, dass Licht, welches vom marmornen Boden reflektiert wird, einen Einfluss auf die indirekte Beleuchtung und damit

auf die Helligkeit anderer Oberflächen und den Kontrast im Gebäude hat. Für den folgenden Vergleich wurde ein minimaler Reflexionsgrad für den Boden gewählt. Die Simulationsergebnisse können mit denen verglichen werden, die das gemessene Materialmodell als Grundlage haben (Tafel 11 und Tafel 12 vs. Tafel 93 und Tafel 94 bzw. Tafel 35 und Tafel 36 vs. Tafel 95 und Tafel 96).

Die Beleuchtungsstärken am Weihnachtsmorgen zeigen an den Gewölben des Hauptraums einen deutlichen Rückgang um ein Viertel bis ein Drittel für das Material mit dem minimalen Reflexionsgrad. Ähnliches gilt für die Seitenschiffe, stärker ist der Rückgang in den Galerien. Bei beiden sind die Schatten stärker betroffen. Geringer fallen die Unterschiede an den Wänden des Hauptraumes aus, zwischen einem Fünftel und einem Zehntel, nur sehr geringe Unterschiede zeigen sich in den hellen Partien von Apsis und Altarraum und auf der Westwand.

Mittags zu Ostern zeigt sich ein ähnlicher Rückgang der Beleuchtungsstärken in den Gewölben des Hauptraumes. Anders ist das Bild in Seitenschiffen und Galerien: Ist der Rückgang in den nördlichen Seitenschiffen und in der westlichen Galerie noch annähernd vergleichbar, ist er in den südlichen Seitenschiffen, wo direktes Licht auf den Boden fällt, deutlich stärker. In den Galerien zeigt sich, dass Bereiche der Gewölbe, die offenbar kein Licht von den Fenstern erhalten, besonders stark betroffen sind. Hier fallen die Leuchtdichten zum Teil *auf* ein Fünftel bis ein Zehntel. Die Wände des Hauptraumes sind wiederum weniger betroffen. Die Unterschiede in den dunkleren Bereichen liegen etwa bei einem Fünftel, in den helleren bei einem Zehntel. Das gilt auch für die Apsis und die Westwand.

Nicht unerwartet ist die größere Wirkung der vom Boden ausgehenden Anteile an der diffusen Beleuchtung auf die dunkleren Partien, die wenig oder kein Licht aus den Fenstern erhalten. Flecken von Sonnenlicht, die sich bei höheren Sonnenständen auf dem Boden bilden, erklären die Unterschiede gegenüber der Beleuchtung durch das fast horizontal einfallende morgendliche Sonnenlicht, das den Boden nur über Umwege erreicht.

In den Leuchtdichten zeigt sich zu Weihnachten, dass einige Reflexionen in den Gewölben des Hauptraumes offensichtlich vom Boden herrühren: Beim Blick nach Osten in der Halbkuppel und über den Konchen. Gleiches sieht man im Westen. In den Seitenschiffen und Galerien sieht man den Abfall dunklerer Partien auch in den Leuchtdichten. Die Leuchtdichten der Wände verändern sich wenig, allerdings zeigen die Unterseiten der Kranzgesimse einen deutlichen Helligkeitsabfall. Zu Ostern verändern sich vorwiegend die Bereiche in den Gewölben des Hauptraumes, die geringere Leuchtdichten aufweisen.

Eine Analyse der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung mittels Tone Mapping ist nicht möglich. Durch den nun viel dunkleren Boden verschiebt sich die Gewichtung im Histogramm so stark, dass einige dunkle Partien in den Gewölben hier heller erscheinen als bei reflektierendem Boden. Außerdem nimmt die Blendung zu.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die vom Boden ausgehende indirekte Beleuchtung am stärksten die dunkleren Raumbereiche in den Seitenschiffen und Galerien beeinflusst. Insgesamt trägt es vor allem zur Beleuchtung des Gewölbes bei. Damit ist der Boden auch für einen Teil der Glanzeffekte im Goldmosaik verantwortlich. Diese Effekte werden bei hohen Sonnenständen durch die Flecken direkten Sonnenlichts auf dem Boden verstärkt.

13.6 Einfluss des Goldmosaiks auf die indirekte Beleuchtung

Wie beim Boden lässt sich auch der Einfluss des Goldmosaiks auf die indirekte Beleuchtung durch einen Vergleich untersuchen. Dabei wird die Simulation mit einem Materialmodell des Goldmosaiks wiederholt, bei dem ein minimaler Reflexionsgrad eingestellt wurde (Tafel 11 und Tafel 12 vs. Tafel 89 und Tafel 90 bzw. Tafel 35 und Tafel 36 vs. Tafel 91 und Tafel 92).

Auf dem Boden und den Marmorwänden führt der minimale Reflexionsgrad zu einer Verringerung der Beleuchtungsstärken zumeist von einem Viertel bis zu einem Drittel. Diese Reduktion ist den verschiedenen Teilen des Gebäudes ähnlich: Die helleren Partien z. B. der Wände des Hauptraumes weisen eine geringe Reduktion von etwa einem Fünftel auf, an wenigen Stellen wie in der Apsis nur ein Zehntel. Diese Oberflächen erhalten viel Himmelslicht von den Fenstern. Die Reduktion ist an Stellen, die kein oder wenig Licht von den Fenstern erhalten – wie zwischen den Haupt- und Stützpfeilern in den Seitenschiffen und Galerien – deutlich stärker, hier halbieren sich die Werte. Der Weihnachtsmorgen und der Mittag zu Ostern unterscheiden sich in der Reduktion nur wenig, offensichtliche Ausnahme ist die Westwand am Weihnachtsmorgen, die im direkten Sonnenlicht der Apsisfenster liegt.

In den Leuchtdichten nehmen auf den Bildern mit den minimalen Reflexionseinstellungen die Kontraste zwischen helleren und dunkleren Partien zu, so zeichnen sich die Kanten aneinanderstoßender Wände oft klarer ab. Auch hier bemerkt man das insgesamt veränderte Helligkeitsniveau.

Das Goldmosaik leistet einen relevanten Beitrag zur gesamten, insbesondere aber zur diffusen Beleuchtung, reduziert also die Kontraste im Gebäude und zu den hellen Fenstern. Ein Einfluss auf die Farbe der Beleuchtung, wie weiter oben bemerkt, erscheint plausibel. Im Gegensatz zum Boden, der stärker auf die Seitenschiffe und Galerien wirkt als auf den Hauptraum, ist diese Wirkung im gesamten Gebäude ähnlich und funktioniert auch bei den untersuchten Sonnenständen annähernd gleich. Das Goldmosaik verteilt das Licht dabei gleichmäßig im Gebäude, für eine gerichtete oder konzentrierende Lichtlenkung lässt sich kein Hinweis finden.

Wie bei der vorangegangenen Untersuchung bezüglich des Bodens ist eine Analyse der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung mittels Tone Mapping durch die starke Verschiebung der Gewichtung im Histogramm nicht möglich.

13.6.1 Fehler bei der Berechnung der Beleuchtungsstärken im Zusammenhang mit dem Materialmodell für das Goldmosaik

Die Simulation mit minimalem Reflexionsgrad für das Goldmosaik offenbart ein Problem bei der Berechnung der Beleuchtungsstärken. Diese zeigen in den Gewölben unplausible Werte. Diese sind *höher* als bei der Simulation mit dem stark reflektierenden Materialmodell, obwohl dem System Licht entzogen wird. Die anderen Oberflächen sind wie zu erwarten dunkler. Auch in anderen Ergebnissen wie z. B. auf Tafel 84j ist gut zu erkennen, dass das Goldmosaik deutlich geringere Beleuchtungsstärken aufweist als die direkt darunter anschließenden Wände, welche sehr ähnlich beleuchtet werden. Das Materialmodell einer Oberfläche selbst sollte

keinen Einfluss auf die Beleuchtungsstärken haben. Die offenbar fehlerhaften Werte finden sich nur beim Goldmosaik, die anderen Oberflächen zeigen plausible Werte. Die Berechnung der Leuchtdichten und die Simulation als solches sind nicht beeinflusst. Die Beleuchtungsstärken auf den Gewölben wurden folglich von der Analyse ausgeschlossen.

13.7 Anteile der Fenstergruppen an der Innenraumbeleuchtung

Tafel 65 bis Tafel 84 zeigen die Beleuchtung des Raums durch einzelne Fenstergruppen am Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern, also einen sehr flachen Sonnenstand aus Osten und einen relativ hohen Sonnenstand aus dem Süden.

13.7.1 Anteile der Fenstergruppen an den Beleuchtungsstärken

Tabelle 13.2 zeigt eine Übersicht der Anteile an der Gesamtbeleuchtung in der Mitte des Innenraumes unter der Kuppel und auf dem Altar. Der Altar wird zu beiden Zeiten fast ausschließlich durch die sechs Fenster der Apsis und die Fenster in der Apsiskuppel beleuchtet. Sie leisten auch fast den gesamten Beitrag zur Beleuchtung des Bodens und der Wände des Altarraumes (Tafel 12 vs. Tafel 66 und Tafel 36 vs. Tafel 68). Sie heben so diesen Bereich insgesamt gegenüber dem Innenraum hervor.

Die Raummitte erhält ihr Licht an beiden Tagen zu großen Teilen aus den Fenstern in den Galerien und Seitenschiffen. Diese stellen durch ihre Größe und Anzahl eine Art Grundbeleuchtung dar. Dazu kann man auch die Fenster der Kuppel sowie der Halbkuppel und Konchen zählen, deren Anteile in der gleichen Größenordnung bleiben und zusammen einen ähnlichen Anteil an der Beleuchtung des Innenraumes haben. Die anderen Anteile schwanken mit dem Sonnenstand. Am Weihnachtsmorgen kommt viel Licht aus der Apsis, zu Ostern mittags viel Licht von der südlichen Tympanonwand und dem Fenster im Westen.

Tabelle 13.3 zeigt die Anteile der Fenster an der Beleuchtung der oberen Wand des Hauptpfeilers im Süd-Osten und der Westwand oberhalb der Kaisertür. Obwohl am Weihnachtsmorgen das direkte Licht aus dem Osten einfällt, stellen die Fenster der Galerien und Seitenschiffe den größten Anteil an der Beleuchtung des Pfeilers. Wie erwartet leisten auch die Fenster der Apsis einen großen Beitrag. Von den Fenstern des Hauptraums tragen vor allem die Fenster in den Tympanonwänden zur Beleuchtung bei. Mittags zu Ostern ist der Anteil der Fenster der Apsis am höchsten, obwohl kein direktes Licht den Pfeiler erreicht. Wieder folgen die Fenster der Galerien und Seitenschiffe und der Tympanonwände.

Die Westwand ist am Weihnachtsmorgen fast ausschließlich durch direktes Sonnenlicht aus den Fenstern der Apsis beleuchtet. Mittags zu Ostern leisten die Fenster der Galerien und Seitenschiffe, der Apsis und der Kuppel ähnlich große Beiträge diffusen und indirekten Lichts.

Tabelle 13.4 zeigt die Anteile der Fenster an der Beleuchtung der westlichen Galerie (Mitte) und der unteren Wand des nord-westlichen Hauptpfeilers. Am Weihnachtsmorgen wird die

Tabelle 13.2: Anteile der einzelnen Fenstergruppen an der Beleuchtungsstärke (E_v) in der Raummitte unter der Kuppel und auf dem Altar am Weihnachtsmorgen und mittags an Ostern

Fenstergruppe	Raummitte				Altar			
	Weihnachten		Ostern		Weihnachten		Ostern	
	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%
Apsis & Apsiskuppel	2,2	21,9	5,9	6,9	37	87,8	331	92,5
Kuppel	1,2	11,9	13	15,1	1,3	3,1	6	1,7
Galerien & Seitenschiffe	3,5	34,8	33	38,4	2,8	6,6	10	2,8
Tympanonwände	0,7	7,3	11	12,8	0,2	0,5	3	0,8
Halbkuppeln & Konchen	1,5	14,9	12	14	0,5	1,3	4,6	1,3
Westwand	0,9	9,2	11	12,8	0,3	0,7	3,4	0,9
Summe	10,1		85,9		42,1		358	

westliche Galerie vor allem durch die eigenen Fenster beleuchtet, allerdings trägt auch direktes Sonnenlicht aus der Apsis bei. Mittags zu Ostern ist es offenbar fast ausschließlich Licht aus den eigenen Fenstern, das die Galerie erhellt.

Der Pfeiler im Nord-Westen wird am Weihnachtsmorgen zu etwa je einem Drittel aus den Fenstern der Apsis und der Galerien und Seitenschiffe beleuchtet. Das übrige Drittel tragen die anderen Fenster in ähnlich großen Anteilen bei. Mittags zu Ostern stammt der größte Anteil der Beleuchtung aus den Fenstern der Galerien und Seitenschiffe. Unter den restlichen stehen die Tympanonwände und die Kuppel hervor. Das Licht von den Tympanonwänden ist diffuses Himmelslicht. Die Sonne wird von den großen außenliegenden Bögen abgehalten. Das Licht aus der Kuppel wurde vom Boden des Hauptraums reflektiert. Ein großer Lichtfleck liegt nahe der Pfeilerwand.

Tabelle 13.5 zeigt die Anteile der Fenster an der Beleuchtung in der Mitte des nördlichen Seitenschiffs und in der Galerie darüber. Am Weihnachtsmorgen sind es im Seitenschiff die eigenen Fenster, die den größten Beitrag zu Beleuchtung stellen. In der Galerie darüber wird es durch Licht, das durch die östlichen Fenster der Galerie einfällt ergänzt.

Auch mittags zu Ostern stellen die eigenen Fenster den größten Anteil an der Beleuchtung des Seitenschiffs. Etwas Licht erreicht aus dem Osten der Seitenschiffe den Raum. Aber auch die Fenster in den Tympanonwänden tragen einen nennenswerten Anteil bei, diffuses Himmelslicht. Die Galerie darüber wird offenbar aus ähnlicher Weise beleuchtet.

Zusammenfassung

In den Beleuchtungsstärken kann man erkennen, dass die Beleuchtung des Altarraums mit der Apsis im ursprünglichen Zustand des Baus unabhängig von den Fenstern im Hauptraum und in den Galerien und Seitenschiffen funktioniert. Die Wände und der Boden des Hauptraums werden aus mehreren mit dem Sonnenstand wechselnden Quellen beleuchtet. Die Seitenschiffe und die Apsis tragen einen großen Teil zur diffusen und indirekten Beleuchtung des Hauptraums bei.

Tabelle 13.3: Anteile der einzelnen Fenstergruppen an der Beleuchtungsstärke (E_v) auf der oberen Wand des süd-östlichen Hauptpfeilers und auf der Westwand oberhalb der Kaisertür am Weihnachtsmorgen und mittags an Ostern

Fenstergruppe	Pfeiler Süd-Osten				Westwand			
	Weihnachten		Ostern		Weihnachten		Ostern	
	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%
Apsis & Apsiskuppel	5,6	29,6	38	40,1	130	95,7	14	27,2
Kuppel	1,5	7,9	7,7	8,1	1,9	1,4	12	23,3
Galerien & Seitenschiffe	7,9	41,7	22	23,2	2,7	2,0	15	29,1
Tympanonwände	2,0	10,6	15	15,8	0,29	0,2	3,6	7,0
Halbkuppeln & Konchen	1,6	8,4	7,8	8,2	0,78	0,6	5,1	10,0
Westwand	0,34	1,8	4,2	4,4	0,15	0,1	1,8	3,5
Summe	18,94		94,7		135,82		51,5	

Die Seitenschiffe und Galerien leiten deutlich mehr Licht in den Hauptraum weiter, als sie aus ihm empfangen. Ihre Beleuchtung wird durch diffuses Himmelslicht und direktes Sonnenlicht aus den eigenen Fenstern bestimmt.

13.7.2 Analyse der Reflexionen anhand der Leuchtdichten

In den Fehlfarbandarstellungen der Leuchtdichten kann man die Anteile der Fenster an den spiegelnden Reflexionen im Goldmosaik, den Wänden und am Boden untersuchen. Diese spiegelnden Reflexionen haben nach dem Himmel in den Fenstern die höchsten Leuchtdichten, sind folglich auffällige Bereiche in der Helligkeitsverteilung, die sich dem Auge darbietet. Für Wahrnehmung der Materialien mit hohem spekularem Reflexionsgrad – Goldmosaik und die silbernen und vergoldeten Bauteile – sind sie von ganz besonderer Bedeutung.

Um diese Reflexionen zu analysieren, sollen in den drei Ansichten des Hauptraums die auffälligsten herausgegriffen werden. Legt man die Fehlfarbandarstellungen nebeneinander, fällt auf, dass zu Weihnachten und Ostern viele Reflexionen an den gleichen Stellen auftreten. Zu Ostern weisen sie höhere Werte auf und sind deshalb besser zu erkennen. Offenbar spielt der Sonnenstand eine untergeordnete Rolle für ihre Verteilung. Sie werden im Folgenden gemeinsam beschrieben und auch Ausnahmen gezeigt. An den Wänden und am Boden lassen sich diese spiegelnden Reflexionen oft nicht von der diffusen Reflexion an den Oberflächen unterscheiden, die dort aufgrund der Materialeigenschaften einen deutlich höheren Anteil am Gesamtreflexionsgrad hat ⁶

⁶ In den Simulationsergebnissen kann man – besonders in den Seitenschiffen und Galerien – einige Lücken im Modell entdecken, durch die Tageslicht ins Innere dringt (z. B. Tafel 68c). Diese Lücken führen auch zu den zufällig verteilten Flecken, die sich in diesen Ergebnissen an vielen Stellen befinden. Diese Lücken sind zum Teil auf Fehler bei der Modellierung zurückzuführen, zum Teil entstehen sie als Rundungsfehler beim Skalieren kleinteiliger Geometrie innerhalb des Datenaustauschs zwischen den CAD-Systemen und dem Radiance-

Tabelle 13.4: Anteile der einzelnen Fenstergruppen an der Beleuchtungsstärke (E_v) auf dem Boden in der Mitte der westlichen Galerie und auf der unteren Wand des nord-westlichen Hauptpfeilers am Weihnachtsmorgen und mittags an Ostern

Fenstergruppe	Westgalerie				Pfeiler Nord-West			
	Weihnachten		Ostern		Weihnachten		Ostern	
	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%
Apsis & Apsiskuppel	7,1	35,8	1,1	0,7	4,1	31,3	8,5	8,0
Kuppel	0,63	3,2	3,3	2,2	1,1	8,4	15	14,1
Galerien & Seitenschiffe	12	60,4	146	96,4	4,9	37,5	41	38,6
Tympanonwände	0,04	0,2	0,44	0,3	1,3	9,9	22	20,6
Halbkuppeln & Konchen	0,07	0,4	0,44	0,3	1,0	7,6	11	10,3
Westwand	0,02	0,1	0,24	0,2	0,68	5,2	9,2	8,6
Summe	19,86		151,52		13,08		106,7	

Blick aus der Galerie

Tafel 65j bis Tafel 83j zeigen den Blick aus der Galerie im Nordwesten. Von den Fenstern der Apsis stammen Reflexionen in der Apsiskuppel, der Halbtonne über dem Altarraum und der östlichen Halbkuppel. Diese dehnen sich auf die Wände darunter aus, zeigen aber zusätzlich diffuse Beleuchtung. Auch auf dem süd-westlichen Pendentif und auf der westlichen Halbkuppel kann man Reflexionen aus der Apsis erkennen. Alle lassen sich genauso auf den Darstellungen erkennen, bei denen der Boden nur einen minimalen Reflexionsgrad aufweist (Tafel 93j bis Tafel 95j), offenbar handelt es sich um Licht von außen. Dieses muss zumindest Teilweise von der Umgebung reflektiert worden sein, denn es kann, wenn man die Lichtstrahlen in Gedanken zurückverfolgt, nicht vom Himmel stammen. Auch auf dem Boden finden sich Reflexionen der Apsisfenster. In der süd-westlichen Konche gibt es zu Weihnachten und Ostern unterschiedliche Reflexionen auf den Wänden und in der Kuppel, die offenbar von direktem Licht stammen, das auf die Westwand, bzw. den Boden fällt.

Die Fenster der Kuppel werden in dieser selbst und in der nördlichen Tympanonwand reflektiert. Nur zu Ostern zeigt sich eine weitere Reflexion auf dem nord-östlichen Pendentif, die vom Lichtfleck der Kuppel auf dem Boden des Hauptraums stammt. Auf dem nord-westlichen Hauptpfeiler sieht man weitere Reflexionen in den unteren Bereichen der vergoldeten Rahmungen (Tafel 69j und Tafel 71j).

Die Fenster der südlichen Seitenschiffe spiegeln sich im Boden. Zu Weihnachten stechen im Hauptraum sonst nur die Reflexionen im Ziborium heraus. Zu Ostern zeigen sich zusätzliche Reflexionen in den Halbkuppeln, den Pendentifs und den Kuppeln der Konchen, die von den Fenstern der Seitenschiffe und Galerien herrühren (Tafel 85j und Tafel 87j).

Modell (Erkennbar an Fehlermeldung bei der Konvertierung, z. B.: warning - self-intersecting face with 8 vertices).

Tabelle 13.5: Anteile der einzelnen Fenstergruppen an der Beleuchtungsstärke (E_v) auf dem Boden in der Mitte der nördlichen Galerie und auf dem Boden in der Mitte des nördlichen Seitenschiffs am Weihnachtsmorgen und mittags an Ostern

Fenstergruppe	Galerie Norden				Seitenschiff Norden			
	Weihnachten		Ostern		Weihnachten		Ostern	
	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%	E_v [lx]	%
Apsis & Apsiskuppel	0,13	0,5	0,68	0,6	0,33	2,0	1,3	1,1
Kuppel	0,33	1,2	4,8	4,4	0,33	2,0	6,4	5,4
Galerien & Seitenschiffe	26	94,1	86	79,6	15	89,6	92	78,1
Tympanonwände	0,92	3,3	14	13,0	0,71	4,2	13	11,0
Halbkuppeln & Konchen	0,21	0,8	2,2	2,0	0,32	1,9	4,5	3,8
Westwand	0,03	0,1	0,34	0,3	0,06	0,4	0,63	0,5
Summe	27,62		108,02		16,75		117,83	

Licht von den Fenstern der nördlichen Tympanonwand wird in der westlichen Hälfte der südlichen Tympanonwand reflektiert und in der Halbkuppel westlich davon. Ostern zeigen sich Reflexionen in der Kuppel der nord-östlichen Konche, in den Pendentifs und in der Kuppel deutlicher, die zu Weihnachten schlecht erkennbar sind (Tafel 77j und Tafel 79j).

Reflexionen von den Fenstern in den Halbkuppeln und Konchenkuppeln lassen sich – zu Ostern deutlicher – in den Kuppeln der Konchen, den Halbkuppeln und auf der östlichen Seite der Tympanonwand im Norden erkennen (Tafel 73j und Tafel 75j).

Auch Reflexionen des großen Thermenfensters im Westen lassen sich nur zu Ostern deutlich in der nordwestlichen Konche und am Übergang der Apsiskuppel zur Halbtonne über dem Altarraum erkennen (Tafel 81j und Tafel 83j).

Blick nach Osten auf die Apsis

Tafel 65k bis Tafel 83k zeigen den Blick nach Osten auf die Einbauten und die Apsis. Licht aus den Apsisfenstern führt zu Reflexionen in der Apsiskuppel, der Halbtonne über dem Altarraum, auf dem Boden und in der östlichen Halbkuppel (Tafel 65k und Tafel 67k). Die Reflexion in der Halbkuppel stammt offenbar vom Boden (Tafel 93k und Tafel 95k).

Zu Weihnachten erkennt man Reflexionen vom Licht aus den Kuppelfenstern nur in der nördlichen Tympanonwand, zu Ostern verteilt an vielen Stellen auf den Wänden und Gewölben des Hauptraums. Auch das Dach des Ziboriums reflektiert Licht aus der Kuppel (Tafel 69k und Tafel 71k).

Reflexionen von Licht aus den Seitenschiffen und Galerien erkennt man an Weihnachten im Hauptraum an den Einbauten. Zu Ostern treten die Reflexionen in der östlichen Halbkuppel und in den Konchenkuppeln klarer hervor. Auf dem Boden zeigen sich Reflexionen von Fenstern in den nördlichen Seitenschiffen (Tafel 85k und Tafel 87k).

In den Opus-sectile-Arbeiten über den Kolonnaden der Galerie wird Licht von den Fenstern in den Tympanonwänden reflektiert. Auch die Säulenschäfte werden durch Reflexionen betont. In der östlichen Halbkuppel, dem nord-östlichen Pendentif, den Konchenkuppeln im Osten und dem nord-östlichem Nebenpfeiler sieht man weitere Reflexionen (Tafel 77k und Tafel 79k).

Reflexionen der Fenster in den Halbkuppeln und den Kuppeln der Konchen sieht man in der östlichen Halbkuppel, den östlichen Konchenkuppeln und an den Wänden. Besonders prominent in den *À-jour*-Arbeiten über den Kolonnaden der Seitenschiffe im Norden (Tafel 73k und Tafel 75k).

Das Thermenfenster im Westen wird in den Wänden und Kuppeln der Konchen im Osten und in der Apsis reflektiert. Auch im nord-östlichen Pendentif und in der östlichen Halbkuppel erkennt man Reflexionen (Tafel 81k und Tafel 83k).

Blick nach Westen

Tafel 65l bis Tafel 83l zeigen den Blick nach Westen auf den Eingang. Reflexionen der Apsisfenster sieht man auf den Einbauten und den Säulen der Kolonnaden. Auch auf der Westwand, in den westlichen Konchenkuppeln, auf der Wand in der süd-westlichen Konche, in der westlichen Halbkuppel und dem nordwestlichen Pendentif erkennt man Reflexionen (Tafel 65l und Tafel 67l).

Licht aus der Kuppel führt auf den Wänden und den Kuppeln der westlichen Konchen und auf der Westwand jeweils nahe dem Kranzgesims zu Reflexionen. Auch im nord-westlichen Pendentif und der nördlichen Tympanonwand sieht man Reflexionen. In der Halbkuppel kommt zu Ostern in der westlichen Halbkuppel die Reflexion eines Sonnenlichtflecks auf dem Boden des Hauptraumes hinzu (Tafel 69l und Tafel 71l).

Auf den Kuppeln der westlichen Konchen, dem nordöstlichen Pendentif und der westlichen Halbkuppel zeichnen sich Reflexionen von Licht aus den Fenstern der Galerien und Seitenschiffe ab (Tafel 85l und Tafel 87l). Die in der Halbkuppel werden von Licht gebildet, das offenbar am Boden reflektiert wurde (Tafel 95j).

Licht, das aus den Fenstern in den Tympanonwänden stammt, führt zu Reflexionen im nord-westlichen Pendentif, in den Kuppeln der westlichen Konchen, auf der Wand des nord-östlichen Nebenpfeilers und in der westlichen Halbkuppel darüber. Die Säulenschäfte in den Kolonnaden der Galerie werden von Reflexionen dieser Fenster betont (Tafel 77l und Tafel 79l).

In den *À-jour*-Arbeiten über den Kolonnaden der Seitenschiffe im Norden wird Licht aus einem der Fenster der Halbkuppeln oder der Konchenkuppeln reflektiert. Auch in den westlichen Konchenkuppeln sieht man Reflexionen. Am Weihnachtsmorgen kommen Reflexionen in den Opus-sectile-Arbeiten in den Konchen hinzu und mittags zu Ostern eine Reflexion in der westlichen Halbkuppel (Tafel 73l und Tafel 75l).

Vom großen Thermenfenster im Westen her rühren Reflexionen in der Halbtonne über diesem Fenster und weitere im nördlichen Teil der westlichen Halbkuppel, auf der Wand des nord-westlichen Hauptpfeilers und auch auf dem, im Bild angeschnittenen, Hauptpfeiler im Süd-Osten (Tafel 81l und Tafel 83l).

Zusammenfassung

Die spiegelnden Reflexionen in Wänden und Gewölben rühren von vielen Fenstern her. Auf den Blicken nach Osten dominieren Reflexionen aus Fenstern der Apsis, der Tympanonwände und der Kuppel durch Intensität und Größe. Auf dem Blick nach Westen das große Thermenfenster. Licht aus den Fenstern in den Halbkuppeln und den Konchenkuppeln führt zu kleineren, aber zum Teil ebenfalls intensiven Reflexionen. Die Reflexionen auf dem Boden stammen von den Apsisfenstern und den Fenstern der Seitenschiffe.

Teils lässt sich schließen, dass ein Fleck von direktem Sonnenlicht zu Reflexionen in den Gewölben führt. Bei einigen Reflexionen in den Gewölben ist klar, dass sie aus der Umgebung des Gebäudes stammen müssen. Die Gestaltung der Umgebung – heller oder dunkler Boden, Schatten durch Bewuchs und Gebäude etc. – kann diese folglich beeinflusst haben.

13.8 Die Beleuchtung im Tages- und Jahresverlauf

13.8.1 Dynamische und konstante Elemente der Beleuchtung

Die Dynamik der Beleuchtung durch die Sonne im Tages- und Jahresverlauf kann man erschließen, wenn man die Ergebnisse der Simulation (Tafel 11 bis Tafel 58) auf zweierlei Weise gegenüberstellt. Zum einen kann man sie über die Stunden eines Tages miteinander vergleichen. Zum anderen kann man die Ergebnisse für eine bestimmte Stunde an allen drei untersuchten Tagen miteinander vergleichen. Beides mal zeigen sich große Gemeinsamkeiten aber auch bedeutende Unterschiede. Ein solcher Vergleich wird im Folgenden anhand der Tone-Mapping-Bilder des Blicks nach Osten auf die liturgischen Einbauten und die Apsis unternommen und durch Untersuchung der Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken ergänzt.

Fenster

Vergleicht man den Helligkeitseindruck auf den Tone-Mapping-Bilder des Blicks nach Osten der verschiedenen Stunden am Weihnachtstag miteinander, stechen als gemeinsames Muster die Fenster in der Apsis, in den Wänden nach Osten, in den Gewölben und in den südlichen Seitenschiffen (Tafel 11j bis Tafel 23j) hervor. Diese dominieren die Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung zu allen Tageszeiten. Legt man die Bilder von Ostern und dem Johannistag daneben, bestätigt sich dieser Eindruck (Tafel 45j bis Tafel 41j und Tafel 11j bis Tafel 57j). Die Wirkung wird verstärkt durch Reflexionen der Fenster der Apsis und der Seitenschiffe auf dem Boden, die ebenfalls in der Leuchtdichte-Verteilung hervorstehten.

Im Gegenlicht der Fenster erscheint der Rest des Raums dunkler und seine architektonische Struktur ist schwerer zu erkennen, wie z. B. in den nord-östlichen Konchen. Die Analyse der Leuchtdichten zeigt, dass die Fenster immer einen großen Kontrast zum Rest der Szene aufweisen. Vormittags ist dieser Kontrast so groß, dass er zu einer Streuung von Licht im Auge führt, welche die dunklere Umgebung überstrahlt. Nachmittags geht der Kontrast etwas zurück.

Die von den Fenstern vorgegebene Grundstruktur verändert sich durch eine Bewegung im Raum nur wenig, so lange der Blick nach Osten auf die liturgischen Einbauten beibehalten wird. Aber auch in den Seitenschiffen und Galerien wiederholt sich dieser Eindruck und ein Blick in die Gegenrichtung wird in der Helligkeitswahrnehmung ebenfalls von den Fenstern dominiert.

Helle Reflexionen und direktes Sonnenlicht

Diese Grundstruktur wird durch zwei etwa gleich starke Elemente kontrastiert: Zum einen die hellen Reflexionen im Goldmosaik und in den vergoldeten und silbernen Bauteilen. Zum anderen das einfallende direkte Sonnenlicht.

Im Blick nach Osten fallen vor allen die Reflexionen in den Unterseiten der Gewölbe im nördlichen Seitenschiff und der Galerie darüber ins Auge, weil sie größere Flächen des Bildes einnehmen. Ihre Intensität ist einer gewissen Dynamik unterworfen, insbesondere sind sie morgens und abends schwächer. Trotzdem sind sie konstante Elemente der Beleuchtung über den Tagesverlauf hinweg, aber auch an den anderen Tagen im Jahr. An vielen anderen Stellen der Szene finden sich weitere Reflexionen, von denen einzelne, von direktem Sonnenlicht hervorgerufen, die Leuchtdichten der Fenster übertreffen. An den Fenstern der Halbkuppeln und der Konchen treten die vom Himmel und der Sonne beleuchteten Fensterwandungen deutlich hervor.

Das direkte Sonnenlicht ist das dynamischste Element der Beleuchtung und bringt oftmals überraschende Situationen hervor. Durch die Veränderung des Azimutwinkels fällt es zu jeder Stunde aus einem anderen Winkel und damit durch andere Fenster ins Gebäude. Im Sommer ist der dieser Winkelbereich größer als im Winter, sodass das Sonnenlicht morgens auch durch Fenster im nördlichen Seitenschiff und der nördlichen Galerie einfällt. Abends fällt es im Sommer auch durch die Fenster im Westen ein.

Das direkte Sonnenlicht ruft helle Flecken und Streifen auf dem Boden, den Wänden und den Einbauten hervor. Durch Streuung im Glas werden diese Flecken größer und weicher begrenzt. Sie wandern mit dem Stand der Sonne und können die Helligkeitsverteilung in der Szene stark verändern und dadurch verschiedene Elemente der Architektur hervorheben. Fallen sie auf das Goldmosaik, rufen sie ein eindrucksvolles Glitzern hervor. Wird das Auge direkt von der Sonne getroffen, bewirkt es eine starke Blendung. Durch die große Anzahl und Fläche der Fenster kann man das häufig beobachten.

Licht aus der Kuppel fällt bei winterlich niedrigen Sonnenständen vor allem auf die Halbkuppeln und Pendentifs, aber auch auf die nördliche Tympanonwand. Die Fenster in den Halbkuppeln und den Tympanonwände erleuchten die nördlichen und westlichen Wände. Auch aus den südlichen Seitenschiffen und Galerien dringt direktes Licht bei den niedrigen Sonnenständen bis tief in den Hauptraum. Aus dem südlichen Seitenschiff fällt das Licht zumeist auf den Boden und die Einbauten, aus der Galerie fällt es zumeist auf die nördlichen Wände und reicht mitunter bis in das nördliche Seitenschiff. Die nördlichen und westlichen Teile der Wände des Hauptraums sind zumeist heller beleuchtet als die östlichen und südlichen.

Die höheren Sonnenstände an Ostern und am Johannistag lassen das direkte Sonnenlicht zumeist auf den Boden fallen. Das Licht der großflächigen Fenster der Seitenschiffe und Galerien bleibt so in diesen selbst »gefangen«.

Diffuses und indirektes Licht

Bei höheren Sonnenständen tritt eine weitere Wirkung des Sonnenlichts stärker hervor, nämlich eine Veränderung der Intensität und Richtungsverteilung der indirekten diffusen Beleuchtung des Hauptraumes durch die Seitenschiffe und Galerien. Trotzdem ist die diffuse Beleuchtung ein strukturell konstantes Element, denn sie speist sich zum größeren Teil aus dem diffusen Licht des Himmels, das durch die vielen Fenster fast alle Oberflächen des Innenraums erhellt. Diese Komponente wird in ihrer Verteilung durch die Anordnung dieser Fenster bestimmt, wenn auch die Intensität der Leuchtdichte des Himmels variiert. Die zweite Komponente ist das Himmels- und Sonnenlicht, welches besonders vom Boden und den Gewölben reflektiert wird.

Das diffuse Licht, durch diese Zusammensetzung im Raum mehr oder weniger gleichmäßig verteilt, ist Gegenstück im Beleuchtungscontrast zu den Fenstern und den anderen besonders hellen Elementen der Beleuchtung. Ist es, wie in den Morgen- und Abendstunden, im Verhältnis geringer, steigt der Contrast und damit die Blendung. Der Raum erscheint dunkler. Nimmt sein Anteil durch Reflexionen direkten Sonnenlichts im Boden zu, sinkt der Contrast, die Blendung geht zurück und der Raum erscheint insgesamt heller. Das kann im Vergleich der Helligkeits- und Contrastwirkung zu Ostern und am Johannistag mit der weihnachtlichen Beleuchtung gut erkennen.

Das diffuse Licht bestimmt auch die Wirkung der Farb- und Helligkeitskontraste innerhalb der Marmordekoration. So kommen z. B. die Platten aus Marmor celticum und Porphyr mit den vergoldeten Rahmungen mittags zu Weihnachten besonders gut zur Geltung (Tafel 11). Bei Sonnenaufgang und -untergang ist es teils so dunkel, dass die Farben kaum zu erkennen sind, denn die Leuchtdichten liegen noch im mesopischem Bereich.

Reflexionen in den großen Gewölben über dem Hauptraum

Die letzte wichtige Komponente der Beleuchtung kann man im Goldmosaik der Gewölbe über dem Hauptraum beobachten. Hier spiegeln sich die Fenster und führen zu weich begrenzten, glitzernden Reflexionen. Durch die besondere Perspektive auf die hochliegenden Gewölbe ist es oft der Boden der Umgebung, der sich hier spiegelt. Damit ist auch diese Komponente strukturell durch die Anordnung der Fenster bestimmt und in dieser Hinsicht über den Tages- und Jahresverlauf konstant. Sie verändert aber mit dem Standpunkt. In ihrer Intensität sind diese Reflexionen vom Sonnenstand abhängig, mit den höheren Sonnenständen mittags und im Sommer werden sie intensiver.

Dynamik und Konstanz in den Beleuchtungsstärken

In den Beleuchtungsstärken lassen sich gut die Veränderungen der diffusen Beleuchtung, aber auch die Bewegung der durch das direkte Sonnenlicht bewirkten Lichtflecke nachvollziehen. Auch hier zeigen sich konstante Strukturen, wie die Beleuchtung durch das Himmelslicht mittels der vielen Fenster und eine von der Bewegung der Sonne vorgegebene Dynamik. Man erkennt das im Winter tiefer in den Raum eindringende direkte Sonnenlicht. In den Seitenschiffen und Galerien folgt die Helligkeitsverteilung der Sonne, die Raummitte ist davon weniger beeinflusst.

Man kann noch eine weitere konstante Eigenschaft in den Beleuchtungsstärken erkennen: eine Hierarchie zwischen dem Altarraum und der Raummitte. Die diffuse Beleuchtung des Altarraums ist immer deutlich höher. Auf Abbildung 13.3 ist zu sehen, wie die Beleuchtung beider Raumabschnitte morgens an Weihnachten, zu Ostern und am Johannistag zunimmt, über den Tag eher konstant bleibt, um abends wieder abzufallen. Der Verlauf der Kurven wird nur durchbrochen, wenn direktes Sonnenlicht auf einen der Orte fällt. Interessant ist die niedrigere Beleuchtungsstärke am Mittag des Johannistages. Die Sonne steht dann so hoch, dass kaum noch direktes Licht in den Innenraum und auf den Altar fällt.

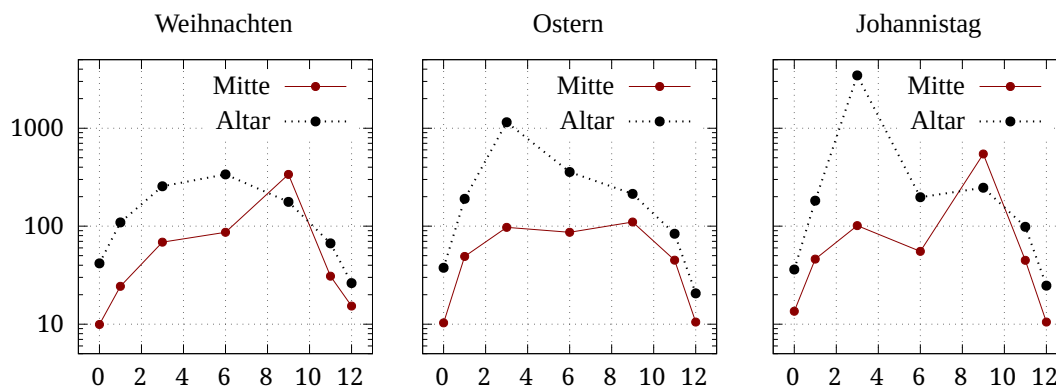


Abbildung 13.3: Tagesverlauf (Temporalstunden) der Beleuchtungsstärken (E_v [lx]) zu Weihnachten, zu Ostern und am Johannistag in der Raummitte und auf dem Altar. Der Altarbereich ist deutlich heller als die Raummitte. Diese Ordnung wird nur durchbrochen, wenn Flecke von direktem Sonnenlicht in die Raummitte fallen.

Beleuchtung der Kuppel

Aus dem Hauptraum betrachtet bleibt die Beleuchtung der Kuppel über den Tagesverlauf sehr ähnlich. Die absolute Helligkeit variiert, aber die Fensterwandungen treten deutlich hervor und bestimmen den Eindruck. Dieser Charakter wird auch durch direktes Tageslicht nicht beeinträchtigt. Lichtflecken werden häufig durch das Gesims verdeckt. Die konstante Beleuchtung des Fensterkranzes hebt die Kuppel vom Rest des Gewölbes ab, wie eine »in den Lüften

schwebenden Kugel«. ⁷ Paulus hebt die »Wölbungen heller Fenster« ⁸ hervor und vergleicht den Bereich der Fenster, in denen die Kuppel nur auf den Rippen zu ruhen scheint mit einem Kamm. ⁹ Die obere Kuppelschale zeigt Reflexionen der großen Lichtquellen des Hauptraumes: die Fenster der beiden Tympanonwände, die Apsisfenster und das Thermenfenster im Westen. Diese Reflexionen speisen sich aus Licht, das von der Umgebung des Gebäudes reflektiert wurde. Sie werden mit höheren Sonnenständen intensiver.

13.8.2 Licht am Weihnachtsmorgen

Ausrichtung auf die aufgehende Sonne

Die Beleuchtung der Hagia Sophia am Weihnachtsmorgen ist außergewöhnlich und weicht eindrucksvoll von den anderen untersuchten Sonnenständen im weiteren Verlauf des Tages und über das Jahr hinweg ab (Tafel 11 und Tafel 12). Grund ist die besondere Ausrichtung des Gebäudes auf den Ort des Sonnenaufgangs zur Wintersonnenwende. ¹⁰

Die Hagia Sophia des 6. Jh. weicht, wie schon der Vorgängerbau, in ihrer Ausrichtung von den Nachbargebäuden ab. Orientiert man sich an der Ausrichtung des ergrabenen Portikus dieses Vorgängerbaus, präzisiert der Neubau diese Ausrichtung noch um etwa 3° gegen den Uhrzeigersinn. ¹¹ So ergibt sich eine Längsachse, die genau auf Ort des Sonnenaufgangs zur Wintersonnenwende am Horizont zielt.

Durch diese besondere Ausrichtung fällt am Weihnachtsmorgen – bei klarem Himmel – direktes Sonnenlicht parallel zu dieser Achse und darüber hinaus fast *horizontal* ein. So reicht das Licht von Osten tief ins Gebäude hinein und fällt auf die gegenüberliegenden Wände im Westen. Im Hauptschiff illuminieren die Fenster der Apsis die Westwand oberhalb des Eingangs. Die Seitenschiffe und Galerien werden längs durchflutet, im Obergeschoss fällt Licht aus dem Osten bis in die westliche Galerie. In der Kuppel bildet sich im Westen ein großer Lichtfleck. Der Boden des Hauptraums, der Ambo und die Solea liegen – bedingt durch die Höhe der Fenster – hingegen im Dunklen.

Durch diese besondere Tageslichtsituation entstehen interessante Reflexionen. Das versilberte pyramidenförmige Dach des rekonstruierten Ziboriums lenkt Licht in Richtung der Halbkuppel der Apsis. Heute befindet sich dort eine Darstellung der Maria mit dem Kind aus der Mitte des 9. Jh. Diese Darstellung hat wohl Vorgänger aus dem 6. Jh. gehabt. Eine Inschrift in der Apsis weist das Mosaik als Wiederherstellung von Werken aus, die im Ikonoklasmus zerstört worden sind. ¹² Durch den oktogonalen Grundriss dieses Dachs fällt auch in die Halbkuppeln der Konchen Licht. Man möchte zunächst an einen Zufall im geometrischen Modell denken, die

⁷ Vers 496.

⁸ Vers 510.

⁹ Vers 500.

¹⁰ Schibille 2009; Gavril 2014; Inanici 2014.

¹¹ Mainstone 1988, S. 136, vergl. auch seine Abb. 165; Schibille 2009.

¹² Mango 1962, S. 82.

Gestalt dieses Daches ist jedoch bei Paulus ausreichend genau beschrieben,¹³ um sie anhand zahlreicher zeitgleicher Stücke rekonstruieren zu können.¹⁴ Die Position des Ziboriums steht durch die erhaltene Marmorgestaltung im Altarraum weitgehend fest.¹⁵ Offen bleiben der genaue Neigungswinkel und die genaue Größe des Daches. Es gibt also gewisse Spielräume, die man genauer untersuchen könnte. Die Rekonstruktion ist aber insgesamt plausibel und der Effekt passt gut zu den katoptrischen Experimenten der Antike und des Ingenieurs Anthemius.¹⁶

In Richtung der Längsachse steht die Sonne im Osten auch an anderen Tagen im Jahr, allerdings später – zwischen der 3. und 4. Stunde zu Ostern und zwischen der 4. und 5. Stunde zur Sommersonnenwende – und in einem immer höheren Winkel (Tafel 43 bis Tafel 60). Eine herausragende Beleuchtungssituation wie zu Weihnachten ergibt sich aber nicht.

Auf dem Boden der östlichen Konche erkennt man einen weiteren, halbmondförmigen Lichtreflex, der auch die westlichen Wände der Konchen und den Boden vor dem Altar einschließt. Schatten lassen darauf schließen, dass dieser von den mit Goldmosaik überzogenen Bögen über den Säulen im Obergeschoss der Konchen herrührt, die direktes Licht aus nach Osten orientierten Fenstern erhalten.

Es ist möglich, dass der Vorgängerbau eine ähnliche Beleuchtung aufgewiesen hat. Die Abweichung in der Ausrichtung in der beschriebenen Größenordnung ist im Zeitrahmen einer Messe wahrscheinlich von geringer Bedeutung, denn einen solchen Winkel überstreicht die Sonne innerhalb einer Viertelstunde. Für die Lichtwirkung sollte man im Auge behalten, dass sie nur bei klarem Himmel auftritt. Bei bedecktem Himmel (Tafel 9 und Tafel 10) ist sie nicht zu beobachten. Eine weitere Bedingung ist, dass zwischen der Kirche und dem Ort des Sonnenaufgangs am Horizont nicht Gebäude den Weg des Lichts verstellen. Die antike Umgebung in diesem Bereich ist nicht völlig geklärt, es gibt aber bisher keinen Beleg für solche Gebäude. Ein Hinweis dafür, dass der Blick frei war, könnte das in dieser Richtung bald abfallende Gelände sein.

Eine letzte Bedingung ist, dass auch tatsächlich eine Messe zu dieser Stunde stattgefunden hat. Dies ist nach den Stundenbüchern wahrscheinlich. Der Einzug zur Wiedereinweihung der Hagia Sophia 562 hat jedenfalls zur »Morgenröte des Festtages«¹⁷ stattgefunden. Den Einziehenden wird das »knarrende« Tor den Zugang zu einem phänomenalen Raum geöffnet haben.¹⁸

Die Helligkeit im Innenraum

Der Raum, der die Einziehenden erwartet hat, wird durch das Tageslicht in großen Bereichen nur schwach erhellt: 10 lx werden in der Mitte des Hauptschiffes erreicht. In den Seitenschiffen

¹³ Procopius Caesariensis und Paulus Silentarius 1977, Vers 725ff.

¹⁴ Stichel 2010, S. 37.

¹⁵ Stichel 2010, S. 30 ff.

¹⁶ Eine Anekdote beschreibt, wie Anthemius einen Nachbarn und Rivalen mit einem Hohlspiegel Licht ins Haus lenkt und ihn blendet: Darmstaedter 1933, S. 481. Vergl. auch Svenshon, Noback und Grobe 2019.

¹⁷ Procopius Caesariensis und Paulus Silentarius 1977, Vers 320.

¹⁸ Vers 325.

sind es 6 – 22 lx. In den Galerien ist es mit 13 – 38 lx etwa doppelt so hell (Tafel 12). Die korrespondierenden Leuchtdichten im Hauptraum sind dem mesopischen Bereich des Sehens zugeordnet: Farben an den nicht direkt angestrahlten Oberflächen sind nur bedingt zu erkennen. Wo allerdings das Licht der aufgehenden Sonne hinfällt, werden 100 lx leicht überschritten. In der Apsiskuppel erreicht das reflektierte Licht nochmals höhere Werte. Die Oberflächen des Altarraums und der Apsis sind mit 30 – 61 lx deutlich heller als der Rest des Innenraumes, der Ambo liegt dagegen im Dunkeln. Die Verteilung der Beleuchtungsstärken ist also von großen Kontrasten geprägt.

Eine Messe ohne künstliche Lichtquellen wie Öllampen und Kerzen ist schwer vorstellbar. Die Quelle erwähnt Kerzen, in den Händen der Einziehenden.¹⁹ Ergänzt man die von Paulus beschriebene abendliche künstliche Beleuchtung,²⁰ darf man sich den Raum zusätzlich durch zahllose Lichtquellen erhellt vorstellen: von der Kuppel herab hängen silberne Leuchter mit Öllampen, die Wände und Gewölbe werden durch weitere erhellt, auf den Chorschranken und auf dem Ambo²¹ befinden sich silberne baumartige Leuchter etc. Die Helligkeit des Raums ergibt sich aus beiden Teilen der Beleuchtung, das künstliche Licht kann mit dem Tageslicht gut konkurrieren.

Helligkeiten und Kontraste in den Leuchtdichten

Der Altarraum und die Apsis-Fenster bilden sich in den Leuchtdichten deutlich ab. Die Lichtreflexe in den Kuppeln der Apsis und den Konchen konkurrieren mit den Leuchtdichten des Himmels, der durch die Fenster sichtbar ist. Im Westen fällt der erleuchtete Bereich der Eingangswand auf. Auf den restlichen Wänden sieht man besonders in den vergoldeten *À-jour*-Arbeiten Reflexionen der Fenster. Die Kuppel und die Halbkuppeln bleiben in den Leuchtdichten zurück, nur ihre Fenster stechen heraus. In der Kuppel bildet sich durch Reflexionen der Fenster der Tympanonwände, des großen Fensters im Westen und der Apsis ein dunkler Bereich in Form eines Andreaskreuzes. Von den östlichen Teilen des Innenraumes ist ein heller Fleck des von Osten einfallenden Sonnenlichts deutlich sichtbar.

Die Fisheye-Aufnahme offenbart eine doppelte Symmetrie der Lichtszene am Weihnachtsmorgen (Tafel 12h). Durch die präzise Ausrichtung werden die Räume und Einbauten nördlich und südlich der Längsachse gleich beleuchtet. Durch den flachen Einfallswinkel fällt das Sonnenlicht im Hauptraum auf die Eingangswand, die dadurch ähnlich hell wie der Altarraum erscheint. Damit entsteht eine Symmetrie westlich und östlich der Querachse. Kontrastiert wird diese Ordnung durch die Lichtreflexe, die sich mit dem Standpunkt ändern.

Zusammenfassung

Die Ausrichtung verbindet das Gebäude mit der Wintersonnenwende und damit mit dem Weihnachtsfest. Paulus schmückt seinen Text mit einer Beschreibung der Sternzeichen aus,

¹⁹ Vers 345.

²⁰ Vers 806ff.

²¹ Ambon, Vers 195.

die vor der Eröffnung durchlaufen wurden und betont, dass sich als Zeitpunkt der Einweihung das Weihnachtifest »ziemt«. ²² In der Beleuchtung wird dieser Zusammenhang erfahrbar. Die Umlenkung des horizontal einfallenden Lichts in die Kuppeln der Apsis und der Konchen fügt sich gut in beide Aspekte dieses Zusammenhangs: sie nutzt die im Jahresverlauf einmalige geometrische Beziehung für einen visuellen Effekt.

13.8.3 Der restliche Tagesverlauf zu Weihnachten

Die Beleuchtung im weiteren Verlauf des Weihnachtstages zeigt eine weniger klare Ordnung als zu Sonnenaufgang (Tafel 13 bis Tafel 24). Das allgemeine Beleuchtungsniveau ist schon zur ersten Stunde deutlich höher: 24 lx werden in der Raummitte erreicht, 109 lx auf dem Altar. Das ist mehr als eine Verdopplung und die korrespondierenden Leuchtdichten liegen, zumindest im Innenraum, überall im Bereich des photopischen Sehens, Farben sind also klar zu erkennen. Altarraum und Apsis sind immer noch deutlich heller als das Hauptschiff. Die Eingangswand wird immer noch aus dem Osten erleuchtet, allerdings fällt nun zum Teil Licht aus Fenstern in den östlichen Wänden der Galerien und Seitenschiffe auf die Eingangswand. Die Reflexionen vom Dach des Ziboriums in der Apsiskuppel sind nach Norden gewandert, die Effekte in den östlichen Konchen sind verschwunden. Die Blendung durch das Gegenlicht der Fenster und heller Reflexionen hat abgenommen, ist aber immer noch wirksam. Insgesamt sind die Kontraste weniger stark und fallen bis zum Mittag weiter ab.

Am späten Vormittag und zur Mittagszeit fällt Sonnenlicht auch auf den Boden des Hauptraums. Zur neunten Stunde fällt es annähernd parallel zur Nord-Südachse des Gebäudes in die Raummitte (Tafel 19 und Tafel 20). Dabei wird der Ambo hell erleuchtet, ebenso der Boden im südlichen Teil des Hauptraums. Die Säulen der Kolonnaden und Konchen werfen deutliche Schatten. Der Altarraum erhält ebenfalls Licht von der Seite, die Apsis wird aber weiterhin durch ihre eigenen Fenster beleuchtet. Die nördlichen Wände erhalten viel Licht von der südlichen Tympanonwand und den Fenstern der Halbkuppeln und Konchen-Kuppeln. Die nördliche Tympanonwand erhält Licht aus der Kuppel. Das südliche Seitenschiff und die südliche Galerie werden durch direktes Licht aus ihren Fenstern hell erleuchtet, dabei verdeckt im Westen das Baptisterium erkennbar die unteren Fenster. Die nördlichen Seitenschiffe erhalten Licht aus der südlichen Galerie, die Mitte der nördlichen Galerie von den Tympanonwänden. Die westliche Galerie und die östlichen und westlichen Kompartimente der nördlichen Galerie hingegen erhalten kein direktes Sonnenlicht, sondern werden durch diffuses Himmelslicht aus den eigenen Fenstern beleuchtet.

Innerhalb der letzten Stunde kommt das Licht der untergehenden Sonne von Südwesten. Das absolute Beleuchtungsniveau zu diesem Zeitpunkt ist im Hauptraum etwas höher als am Morgen, der Altarraum etwas dunkler. Der Altarbereich bleibt trotz der Sonnenrichtung heller als die Raummitte. Der Ambo erhält zu Anfang direktes Licht aus dem südlichen Seitenschiff, bei Sonnenuntergang fällt er ins Dunkel. Die Leuchtdichten von den Wandflächen des Innenraumes

²² Vers 330.

sind zu Anfang noch im Bereich des photopischen Sehens, fallen aber dann wieder in den Bereich des mesopischen Sehens.

Direktes Sonnenlicht bleibt den unteren Raumteilen, dem südlichen Seitenschiff sowie der südlichen und westlichen Galerie vorbehalten. In den Gewölben und der Kuppel finden sich besonders im Nordosten helle Lichtflecken. Der Helligkeitseindruck ist wieder stark durch die Fenster und deren Reflexionen geprägt.

Paulus schreibt, dass die abendliche Messe durch unzählige Öllampen erleuchtet wurde.²³ Das Niveau der Beleuchtung durch Tageslicht und die beschriebene Anzahl und Verteilung der Lampen und Leuchter lässt vermuten, dass das verbliebene Tageslicht zu dieser Uhrzeit durch die künstliche Beleuchtung wesentlich ergänzt wurde.

13.8.4 Der Tagesverlauf zu Ostern

Das Osterfest liegt im Jahresverlauf nach der frühjährlichen Tagundnachtgleiche, dem Equinox um den 21. März. Seit dem Konzil von Nicäa (325) gilt als Osterdatum der erste Sonntag nach dem ersten Vollmond nach diesem Datum. Es schwankt daher zwischen dem 22. März und dem 25. April (gregorianischer Kalender). Die Berücksichtigung eines bestimmten Einfalls von Sonnenlicht für die liturgischen Abläufe zu einem bestimmten Tageszeitpunkt ist folglich von vornherein erschwert. Es gibt bei Paulus und Prokop außer der »allabendlichen« Messe, keinen Hinweis auf einen besonderen Zeitpunkt für den gottesdienstlichen Tagesverlauf zu Ostern (Tafel 29 bis Tafel 42).

Bei Sonnenaufgang ist das allgemeine Beleuchtungsniveau mit dem des Weihnachtsfests vergleichbar, das Farbsehen ist auch am Ostermorgen beeinträchtigt. Die Richtung (Azimut), aus der das Licht einfällt, liegt nun allerdings im Nordosten, etwa 45° von der Hauptachse gegen den Uhrzeigersinn gedreht. Dadurch ist die Lichtverteilung im Gebäude deutlich anders als zu Weihnachten. In den süd-westlichen Teilen des Erdgeschosses ist es deutlich dunkler als zu Weihnachten. Im nördlichen Seitenschiff ist das östlichste Raumkompartiment dunkler als die anderen, offenbar werfen das Skeuophylakion und das Treppenhaus Schatten. Sonst sind die östlichen Raumteile deutlich heller als die übrigen, besonders in den Galerien ist das zu erkennen.

Das horizontal einfallende Sonnenlicht aus den Apsisfenstern beleuchtet den süd-östlichen Hauptpfeiler und die süd-östliche Konche. Reflexionen in den Halbkuppeln der Apsis und der Konchen wie zu Weihnachten sind nicht zu erkennen. Das Licht aus den Fenstern der Gewölbe, der Tympanonwand und der Kuppel fällt nicht auf Bereiche, die besonders hervorstechen.

In den Leuchtdichten zeigt sich im Vergleich zu Weihnachten eine weniger starke Blendung durch die Fenster und deren Reflexionen im Boden. Sie nimmt nach den Morgenstunden weiter ab. Die Beleuchtung des süd-östlichen Hauptpfeilers führt zu hellen Reflexionen.

Auch zu Ostern quert die Sonne auf ihrem Weg die Längsachse des Gebäudes. Dies geschieht zwischen der 3. und der 4. Stunde. Da der Sonnenstand nun schon recht hoch ist, fällt das Sonnenlicht durch die östlichen Fenster vor allem in die östlichen Raumteile. Das Licht aus

²³ Vers 806ff.

den Fenstern der Gewölbe fällt westlich der Raummitte und Licht aus der Kuppel nahe dem Eingang auf den Boden. Der Altar erhält direktes Sonnenlicht aus den nahen Apsisfenstern, die Beleuchtungsstärke erreicht hier 3843 lx.

Durch die höheren Azimutwinkel entstehen gegenüber Weihnachten neue Varianten der Verteilung von Lichtflecken und Streifen. So gelangt zu manchen Stunden Sonnenlicht aus der Kuppel bis auf den Boden des Hauptraums, dafür nur selten aus den Fenstern der Seitenschiffe und Galerien. Auch in diese dringt es weniger tief ein. Das Beleuchtungsniveau in der Raummitte und im Altarraum ist ähnlich wie zur Weihnachtszeit (Abbildung 13.3).

In der letzten Stunde und beim Sonnenuntergang fällt Sonnenlicht durch das große Fenster im Westen auf die nördliche Tympanonwand und die Gewölbe im Osten. Die oberen Teile der nördlichen Wände des Hauptraumes werden, besonders im Osten, durch die Fenster in der Galerie im Süden und Westen beleuchtet. Beides führt zu Reflexionen im Goldmosaik der Gewölbe und auf den Wänden.

13.8.5 Der Tagesverlauf am Johannistag

Bei Sonnenaufgang ist wie an den anderen Tagen das Licht so schwach, dass die Farbwahrnehmung beeinträchtigt ist. Die Fenster nach Osten blenden am Johannistag nicht, dafür aber Sonnenlicht, das in flachem Winkel durch das südliche Seitenschiff einfällt. Der Hauptpfeiler im Süd-Westen wird hell erleuchtet. Auch im Verlauf des Vormittags ist die Szene durch das Gegenlicht geprägt. Das direkte Sonnenlicht erhellt erst die süd-westliche Konche und dann die Eingangswand im Westen.

Mittags stellt sich eine Situation mit wenig Blendung und wenigen Flecken durch das Sonnenlicht ein. Durch den hohen Sonnenstand erreicht das Licht nur den Boden der Seitenschiffe und Galerien nahe den jeweiligen Fenstern (Tafel 45 bis Tafel 58). Durch die Kuppelfenster fällt es so steil ein, dass es nur einen schmalen Streifen auf dem Kranzgesims bildet.

Nachmittags erreicht das Sonnenlicht aus dem Fenster der Westwand und den westlichen Gewölben den nord-westlichen Pfeiler und den Boden. Es stellt sich eine für die Architektur der Wände und Einbauten sehr vorteilhafte Mischung aus direkter und diffuser Beleuchtung ein.

Zum Sonnenuntergang ergibt sich eine neue einmalige Lichtsituation. Das Licht fällt an diesem Tag parallel zur Hauptachse vom Westen ein. Dadurch wird der obere Teil der Apsis durch das Thermenfenster der Westwand und durch die Fenster der westlichen Galerie hell erleuchtet. Licht aus den Fenstern der westlichen Galerie fällt bis auf die östlichen Wände der nördlichen und südlichen Galerien. Im Erdgeschoss wird das Licht durch den Narthex blockiert.²⁴ So ist es in der Raummitte nicht besonders hell, der Ambo bleibt im Dunkeln und der Altarraum nur durch die Apsisfenster und indirektes Licht beleuchtet. Ob diese besondere Lichtsituation, die in einem astronomischen Zusammenhang mit der Ausrichtung auf die aufgehende Sonne zur Wintersonnenwende steht, eine Bedeutung in der Liturgie hatte, ist nicht nachgewiesen.

²⁴ Bei geöffneten Türen könnte aber in der Mitte ebenfalls Licht bis in den Hauptraum fallen.

13.8.6 Zusammenfassung

Gegenüber der besonderen Beleuchtung am Weihnachtsmorgen ist die Beleuchtung im weiteren Tagesverlauf zu Weihnachten, an Ostern und am Johannistag eher durch ein kontinuierliches Spiel der dynamischen und konstanten Elemente geprägt. Zeitpunkte, bei denen eine bestimmte Beleuchtung eine ähnliche Rolle für die Liturgie und die Architektur spielen könnte, sind nicht aufgefallen. Lediglich der Abend der Sommersonnenwende hat ein solches Potential. Die höheren Sonnenstände an Ostern und im Sommer lassen die Architektur der Wände wegen der geringeren Blendung und stärker indirekten Beleuchtung stärker hervortreten, aber die Szene ist insgesamt weniger spektakulär.