

Kapitel 12

Untersuchungsprogramm

12.1 Vergleich der heutigen Hagia Sophia mit dem Bauzustand von 562

Mehlika Inanici hat eine umfangreiche Untersuchung des Tageslichts im heutigen Gebäude publiziert, die sich für einen Vergleich mit der Beleuchtung im hier rekonstruierten ursprünglichen Bauzustand anbietet.¹ Durch den Vergleich ihrer Ergebnisse mit denen einer passend konfigurierten Simulation kann man die Auswirkungen der außenliegenden Stützkonstruktionen, der zugesetzten Fenster, verstellten Raumdurchbrüche und sonstiger Veränderungen am Bau untersuchen.

Inanici hat auf der Basis von Leuchtdichten arbeitet, die sie aus HDR-Aufnahmen des Innenraums gewonnen hat, die an mehreren Tagen über den Tagesverlauf aufgenommen wurden. Zeitgleich entstehen HDR-Aufnahmen des Himmels. Zudem hat sie zu jedem Zeitpunkt Beleuchtungsstärken im Inneren der Hagia Sophia gemessen und die Sonneneinstrahlung außerhalb des Gebäudes.²

Für den Angestrebten Vergleich hat ihre auf Leuchtdichten basierende Methode zwar Einschränkungen für die Beurteilung der Lichtverteilung im Raum, lässt aber die Beurteilung von optischen Effekten wie dem Glanz der Materialien zu. Vor allem erlauben die von ihr veröffentlichten Daten einen quantitativen Vergleich des heutigen Bauzustandes mit der Rekonstruktion des Bauzustandes von 562. Sie zeigt die Leuchtdichten in der Fehlfarbenendarstellung einer Fisheyaufnahme nahe der Raummitte unter der Kuppel (Tafel 6). Außerdem dokumentiert sie die Eigenschaften des Himmels für die Uhrzeit der Aufnahme (Abbildung 12.1) und die *global horizontal illuminance* zu diesem Zeitpunkt (24. September um 13:00 Uhr EEST).³ In der gleichen Tabelle gibt sie auch eine Beleuchtungsstärke für die Mitte des Innenraumes zu dieser Uhrzeit an.

Das erlaubt es, ein passendes Himmelsmodell für die Simulation mittels gensky zu erstellen. Passend zur Aufnahme des Himmels wird ein CIE sunny sky gewählt und für die Uhrzeit

¹ Inanici 2014.

² In Gegensatz zu vielen anderen Beiträgen berücksichtigt sie die Dynamik des Tageslichts und deren Bedeutung für die Wahrnehmung des Baus.

³ Inanici 2014, S. 172.

eingestellt. Auf der Aufnahme ist erkennbar, dass der Himmel durch Dunst und wahrscheinlich auch Staub getrübt ist. Eine passende Einstellung für diese Trübung (*turbidity factor*), der Parameter `-t 4.5`, wird durch Versuche ermittelt. Die Abbildung 12.1 zeigt einen Vergleich der Leuchtdichten des Himmelsmodells mit ihrer Aufnahme. Die *global horizontal illuminance* des Modells lässt sich wie in Listing 12.1 berechnen.⁴

```
$ echo 0 0 1 0 0 1 \  
| rtrace -h -w -I -ab 1 -ad 4096 -as 1024 inanici_sky.oct \  
| rcalc -e '$1=179*(.265*$1+.67*$2+.065*$3)'
```

Listing 12.1: Berechnung der *global horizontal illuminance*

Durch den Vergleich der GHI und der Leuchtdichten am Himmel kann man das Modell überprüfen und die Abweichung bestimmen (Tabelle 12.1).

Tabelle 12.1: Vergleich der von Inanici gemessenen und der berechneten *Global Horizontal Irradiance (GHI)* für den 24.9. 13:00 Uhr EEST

	GHI
Messung Inanici (Fig. 17)	86.500 lx
Modell	76.488 lx
Abweichung	13 %

12.2 Darstellung der Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten

Für die folgenden Teile des Untersuchungsprogramms werden jeweils Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten berechnet und in Fehlfarben dargestellt. Mithilfe der Leuchtdichten wird der Raumeindruck mittels Tone Mapping visualisiert. Dafür werden jeweils die gleichen Grundrisse, Schnittansichten und Perspektiven berechnet.

Die Lichtverteilung wird in folgenden Parallelprojektionen berechnet:

- Grundriss Erdgeschoss
- Grundriss Galerie
- Deckenspiegel Erdgeschoss
- Deckenspiegel Galerie
- Schnitt nach Osten
- Schnitt nach Westen

⁴ Vergl. Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 357.

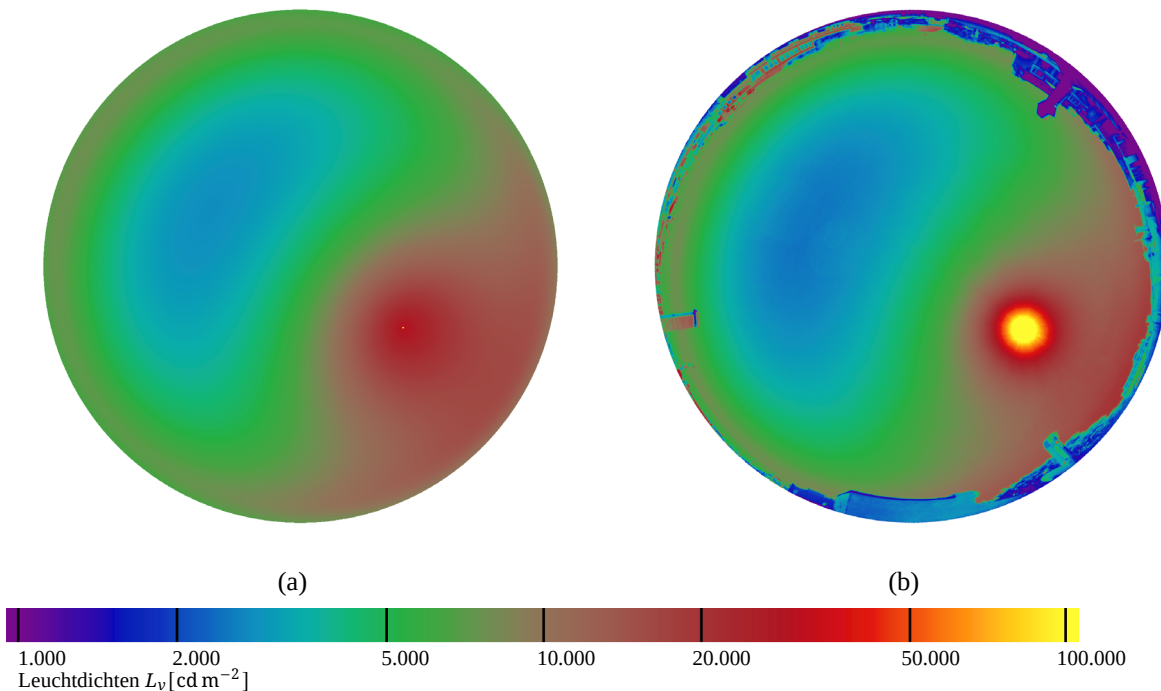


Abbildung 12.1: Leuchtdichten des Himmelsmodells für die Berechnung des Vergleichs zwischen dem heutigen Bauzustand und dem des Jahres 562. Die Darstellung zeigt den Himmel so gedreht, dass die Bildachse der Gebäudeachse entspricht und damit Tafel 6 (a). Inanicis Aufnahme des Himmels kurz nach der Aufnahme im Inneren (13:00 Uhr EEST). Die Sonne erscheint durch die Aufnahmetechnik stark vergrößert (b). Quelle (b): Inanici 2014, S. 172.

- Schnitt nach Norden
- Schnitt nach Süden
- Fisheye-Aufnahme aus der Raummitte als Übersicht der Lichtverteilung auf den Wänden

Für markante Orte wird die Beleuchtungsstärke in den Darstellungen angegeben. Die Darstellungen erlauben die Analyse der Hierarchie von Hauptraum, Seitenschiffen bzw. Galerien und dem Altarraum mit der Apsis.

Leuchtdichten sind im Kontext dieser Untersuchung nur in perspektivischen Darstellungen sinnvoll. Die aus ihnen generierten Tone-Mapping-Bilder reproduzieren den visuellen Eindruck der Helligkeiten und Kontraste an den gegebenen Standpunkten. Es wurde versucht, den Innenraum mit den Galerien und Seitenschiffen so umfassend mit möglichst wenigen markanten Perspektiven zu zeigen, um den Katalog überschaubar zu halten. Die Raummitte mit den Einbauten wurde aus mehreren Perspektiven gezeigt, um die Orientierung zu erleichtern. Eine Fisheye-Aufnahme aus der Raummitte dient der Übersicht. Es wurden vorwiegend Standorte gewählt, die den Eingang oder Zugang zu einem der Raumteile repräsentieren:

- Blick aus dem Hauptschiff nach Osten auf Ambo, Altarraum und Apsis
- Blick aus dem Hauptschiff nach Westen auf Ambo und Eingangswand
- Blick von der nördlichen Galerie auf Ambo, Altarraum und Apsis
- Blick in die nördliche Galerie
- Blick in das südliche Seitenschiff
- Blick in die westliche Galerie
- Fisheye-Aufnahme aus der Raummitte
- Fisheye-Aufnahme zur Dokumentation des Himmelsmodells

Augpunkte und Bildwinkel wurden so gewählt, dass sie wichtige Eigenschaften des menschlichen Gesichtsfelds berücksichtigen:

- Der Augpunkt liegt immer 1,65 m über jeweiligen Bodenniveau.
- Der natürliche Augpunkt liegt unterhalb der Raummitte. Der Blick richtet sich folglich eher nach oben. Die Aufnahmen wurden deshalb meist etwas geshiftet, d. h. der Horizont liegt etwas unterhalb der Bildmitte.
- Die Bildwinkel wurden so gewählt, dass sie einem nicht übertrieben starken Weitwinkel (Brennweite etwa $f = 21$ mm, horizontaler Bildwinkel etwa 90°) entsprechen. Sie umfassen den Bereich des Gesichtsfeldes, den das Auge ohne Kopfbewegung abtastet (sekundäres Innenfeld) und der daher großen Einfluss auf die lokale Helligkeitsadaption hat. Das ist folglich der Bereich, den man scharf sehen kann. Auch ein Großteil des primären Umfeldes, in dem störende Helligkeiten die Adaption beeinflussen und das die Farbwahrnehmung begrenzt, wird von den Bildwinkeln eingeschlossen.⁵ So kann das Tone-Mapping-Verfahren wichtige Bereiche des Gesichtsfeldes erfassen.

12.3 Beleuchtung bei bedecktem und sonnigem Himmel

Es folgt ein Vergleich der Beleuchtung bei klarem (CIE *clear sky*) und bedecktem (CIE *overcast sky*) Himmel, jeweils für den Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern, zu den gleichen Zeiten wie innerhalb der später beschriebenen Tagesverläufe. So sollen der Einfluss direkten Sonnenlichts und der Bewölkung auf die Beleuchtung des Baus und die Helligkeitswahrnehmung in Inneren untersucht werden.

12.4 Einfluss der Verglasung auf die Innenraumbeleuchtung

Um den Einfluss der Verglasung auf die Innenraumbeleuchtung zu untersuchen, wurden für den Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern Berechnungen mit klarem Glas durchgeführt,

⁵ Bartenbach und Witting 2009, S. 102, 181 f.

die mit den Berechnungen des gefitteten Materialmodell der Bonner Probe verglichen werden können. Dieser Vergleich wiederholt die Herangehensweise einer dieser Arbeit vorangegangenen Konferenzpublikation.⁶ Dort wurde allerdings das Modell eines klaren Himmels und eine morgendliche Lichtsituation zu Ostern zu Grunde gelegt.⁷ Zudem wurden gegenüber der Publikation die Materialmodelle – insbesondere das Goldmosaik – verbessert und die Gebäudegeometrie überarbeitet.

12.5 Einfluss des Marmorbodens auf die indirekte Beleuchtung

Um den Einfluss des Marmorbodens zu analysieren, wurden zum Vergleich Berechnungen durchgeführt, bei denen der Boden in allen Räumen einen minimalen vollkommen diffusen Reflexionsgrad von lediglich 1 % aufweist. Auch diese Berechnungen wurden am Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern durchgeführt.

12.6 Einfluss des Glasmosaiks auf die indirekte Beleuchtung

Auf die gleiche Weise wurde der Einfluss des Goldmosaiks untersucht. Auch hier wurde am Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern eine Berechnung mit einem minimalen vollkommen diffusen Reflexionsgrad von lediglich 1 % für das Goldmosaik durchgeführt.

12.7 Anteile der Fenstergruppen an der Innenraumbeleuchtung

Um die Anteile der Fenster an der Beleuchtung zu untersuchen, wurden sie zu Gruppen zusammengefasst. Bei Berechnungen für den Weihnachtsmorgen und mittags zu Ostern war jeweils nur die folgende Fenstergruppe geöffnet, die anderen Fenster waren mit einem lichtundurchlässigem Material mit mittleren Reflexionsgrad (25 %) verschlossen:

- Apsis und Apsiskuppel
- Kuppel
- Galerien und Seitenschiffe
- Tympanonwände
- Halbkuppeln und Konchen
- Thermenfenster in der Westwand

⁶ Noback, Grobe und Lang 2021.

⁷ Drei Stunden nach Sonnenaufgang bei einem abweichenden Osterdatum (6.4.).

12.8 Die Beleuchtung im Tages- und Jahresverlauf

Um die Dynamik des Sonnen- und Himmelslichts im Tages- und Jahresverlauf zu untersuchen, wurde das Himmelsmodell für eine Reihe von Stunden an drei Tagen im Jahr konfiguriert: Weihnachten (Wintersonnenwende), Ostern und der Johannistag (Sommersonnenwende). Die Uhrzeiten wurden als Temporalstunden festgelegt.

12.8.1 Teilung des Tages in Temporalstunden

Wir teilen heute den Zeitraum von Mittag bis zum nächsten Mittag in zweimal 12 Stunden. Diese gleich langen Äquinoktialstunden erlangen praktische Bedeutung erst mit der Verbreitung von Uhrwerken im ausgehenden Mittelalter. Zuvor war es üblich, den Tag von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang in 12 Temporalstunden zu teilen. Abhängig von der Jahreszeit sind diese Temporalstunden unterschiedlich lang: im Sommer länger und im Winter kürzer. Diese Art der Zeitrechnung ist immer eine Ortszeit, also abhängig von der geografischen Länge.

An dieser Stundenrechnung haben sich alle regelmäßigen Ereignisse im Tagesverlauf orientiert, so auch die über den Tag verteilten christlichen Messen, welche z. B. die aus dem 6. Jh. stammende Benediktsregel nennt: Laudes, Prim, Terz, Sext, Non, Vesper.⁸ Das Komplet (vor der Nachtruhe) und die Nachtwache (Vigil, 8. Nachtstunde) können nur bei künstlicher Beleuchtung stattfinden. Das Kathedraloffizium kennt (am Tage) grundsätzlich die gleichen Stundengebete.

Für die Lichtverhältnisse in der Kirche zu bestimmten Tageszeiten hat der Unterschied zwischen Temporal- und Äquinoktialstunden unmittelbare Bedeutung: So kommt das Licht zu einer morgendlichen Messe nach den Temporalstunden im Jahresverlauf aus einem größeren Bereich an Azimutwinkeln. Lichtkonzepte die über das ganze Jahr hinweg funktionieren sollen, müssen folglich eine gewisse »Robustheit« gegenüber solchen Richtungsänderungen haben. Dafür findet z. B. die Laudes immer zu Sonnenaufgang statt.⁹

12.8.2 Sonnenstände zu Weihnachten, Ostern und am Johannistag

Weihnachten 562, der Tag der 2. Einweihung der Hagia Sophia, fand nach dem julianischen Kalender am 25. Dezember statt. Dieser Kalender zeigte aber im Jahr 562 schon eine Abweichung zum astronomischen Jahr, sodass die Einweihung nach dem heutigen gregorianischen Kalender an einem 27. Dezember stattfand. Ostern fällt im folgenden Jahr 563 nach der alexandrinischen Berechnung auf einen ungewöhnlich frühen Termin, den 25. März. Daher wurde auf das Jahr 564 ausgewichen. In diesem Jahr liegt Ostern näher an den häufigeren Terminen und fällt auf den 13. April des julianischen Kalenders.¹⁰ Nach dem gregorianischen Kalender umgerechnet

⁸ Salzburger Äbtekonzferenz 1992, Kapitel 16,5.

⁹ Gavril 2014 zeigt Sonnenstandsdiagramme mit Grundriss und Schnitt der Hagia Sophia, spricht aber von unterschiedlichen Höhenwinkeln und optimierter Ausrichtung für das morgendliche und abendliche Licht in Bezug auf Äquinoktialstunden.

¹⁰ Die römische Osterberechnung weicht in diesem Jahr nicht ab. Lietzmann und Aland 1984, S. 27.

ist das der 15. April. Der Johannistag liegt ein halbes Jahr vor Weihnachten und fällt folglich mit der Sommersonnenwende zusammen. Nach dem gregorianischem Kalender ist das für das Jahr 564 der 26. Juni.

Für diese Tage (27.12., 15.4. und 26.6.) kann man die Uhrzeiten für Sonnenaufgang und -untergang berechnen und durch gleichmäßige Teilung auch die Uhrzeiten der Temporalstunden. In Tabelle 12.2, Tabelle 12.3 und Tabelle 12.4 ist das mit dem Programm gensky¹¹ erfolgt, in diesem Fall in der wahren Sonnenzeit.¹² Zusätzlich wurde für Ostern und den Johannistag der Zeitpunkt bestimmt, an dem die Sonne aus Osten parallel zur Längsachse des Gebäudes einfällt. Mit diesen Daten wurden die Himmelsmodelle konfiguriert.

Tabelle 12.2: Weihnachten 562 (27.12. nach dem gregorianischem Kalender): wahre Stunden und Sonnenstand (Azimuth von Süden)

Stunde	wahre Sonnenzeit	Altitude	Azimuth
Sonnenaufgang, Laudes	7:29 Uhr	0,1°	-58,2°
Prim (Erste Stunde)	8:14 Uhr	7°	-50,4°
Terz (Dritte Stunde)	9:45 Uhr	18,4°	-32,5°
Mittag, Sext (Sechste Stunde)	12:00 Uhr	25,6°	0°
Non (Neunte Stunde)	14:15 Uhr	18,4°	32,5°
Vesper (Letzte Stunde)	15:46 Uhr	7°	50,4°
Sonnenuntergang	16:31 Uhr	0,1°	58,2°

¹¹ berechnet man mit anderen Programmen z.B. <https://www.sonnenverlauf.de/#/41.0082,28.9784,10/1924.04.06/12:06/1/0> ergeben sich Abweichungen um einige Minuten, was hier nicht weiter verfolgt werden kann, aber untersucht werden sollte, wenn man auf präzise Sonnenstandswinkel angewiesen ist.

¹² Auch Wahre Ortszeit (WOZ) oder Local Solar Time (LST), im Gegensatz zur Standard Ortszeit, die an eine Zeitzone angepasst ist und die die Abweichungen der elliptischen Erdbahn und parallelen Verschiebung der schief stehenden Erdachse mittels der Zeitgleichung korrigiert.

Tabelle 12.3: Ostern 564 (15.4. nach dem gregorianischem Kalender): wahre Stunden und Sonnenstand (Azimuth von Süden)

Stunde	wahre Sonnenzeit	Altitude	Azimuth
Sonnenaufgang, Laudes	5:27 Uhr	0°	-102,4°
Prim (Erste Stunde)	6:33 Uhr	12,3°	-91,7°
Terz (Dritte Stunde)	8:44 Uhr	36,5°	-67,9°
Mittag, Sext (Sechste Stunde)	12:00 Uhr	58,3°	0°
Non (Neunte Stunde)	15:17 Uhr	36,3°	68,1°
Vesper (Letzte Stunde)	17:28 Uhr	12,1°	91,9°
Sonnenuntergang	18:33 Uhr	0°	102,4°
Sonne in Längsachse	9:26 Uhr	43,6°	-58°

Tabelle 12.4: Johannistag 564 (Sommersonnenwende, 26.6. nach dem gregorianischem Kalender): wahre Stunden und Sonnenstand (Azimuth von Süden)

Stunde	wahre Sonnenzeit	Altitude	Azimuth
Sonnenaufgang, Laudes	4:32 Uhr	0,1°	-121,7°
Prim (Erste Stunde)	5:47 Uhr	12,8°	-110°
Terz (Dritte Stunde)	8:16 Uhr	40,4°	-87,2°
Mittag, Sext (Sechste Stunde)	12:00 Uhr	72,4°	0°
Non (Neunte Stunde)	15:44 Uhr	40,4°	87,2°
Vesper (Letzte Stunde)	18:13 Uhr	12,8°	110°
Sonnenuntergang	19:28 Uhr	0,1°	121,7°
Sonne in Längsachse	10:19 Uhr	62,5°	-58°