

Kapitel 1

Einleitung

Das Ziel jeder strukturalistischen Tätigkeit [...] besteht darin, ein Objekt derart zu rekonstruieren, dass in dieser Rekonstruktion zutage tritt, nach welchen Regeln es funktioniert[...]. Die Struktur ist in Wahrheit also nur ein Simulacrum des Objekts, aber ein gezieltes, interessiertes Simulacrum, da das imitierte Objekt etwas zum Vorschein bringt, das im natürlichen Objekt unsichtbar oder, wenn man lieber will, unverständlich blieb.

— Roland Barthes, *Die strukturalistische Tätigkeit*.

1.1 Übersicht und Struktur der Arbeit

Die Tageslichtsimulation verlorener Gebäudezustände ist eine Methode, die zwar gelegentlich zur Untersuchung historischer Gebäude herangezogen und in vielen Computervisualisierungen unreflektiert angewandt wird, die aber als eigenständiges Thema noch keine umfassende Auseinandersetzung erfahren hat. Dabei kann sie Bedeutendes zur Baugeschichte und zur Rekonstruktion historischer Lichtkonzepte beitragen, indem sie verlorene Lichtphänomene überhaupt erst *sichtbar* macht.

Die vorliegende Arbeit versucht eine vertiefende Auseinandersetzung, indem sie die Übertragung von Fragestellungen und Methoden der Tageslichtsimulation moderner Gebäude in das Feld der historischen Bauforschung untersucht und an einem Bauzustand der Hagia Sophia in exemplarischer Weise anwendet. Hierzu werden nach einer Einführung in das Thema zunächst die theoretischen Grundlagen für ihre Anwendung in der historischen Bauforschung erarbeitet. Die beispielhafte Durchführung wird durch Hypothesen und Forschungsziele gesteuert, die sich neben der Analyse der Beleuchtung des exemplarischen Baus, auf die Eignung der übertragenen Methoden richten. Die Anwendung beginnt mit einer Rekonstruktion des Gebäudes und seiner Innenraumausstattung im 6. Jh. Danach werden für die wichtigsten Materialien – Marmor, Fensterglas und Glasmosaik – Messungen durchgeführt und Modelle ihres lichttechnischen Verhaltens entwickelt. Nach der Auswahl geeigneter Berechnungs- und Auswertungsmethoden wird ein Untersuchungsprogramm aufgestellt, das den Einfluss einzelner Materialien und Fenstergruppen auf die Beleuchtung und deren Veränderung über den Tages- und Jahresverlauf bei unterschiedlicher Bewölkung zum Inhalt hat. Die Ergebnisse sind im Anhang auf Tafeln

dokumentiert und werden in Bezug auf die Hypothesen und Forschungsziele diskutiert. Im Fazit wird die Eignung der Methoden bewertet und Schlussfolgerungen für das Lichtkonzept der Hagia Sophia gezogen. Schließlich wird ein Ausblick auf die Chancen der Tageslichtsimulation in der Bauforschung gegeben und zukünftige Forschungsfelder definiert.

Tageslichtsimulation ist eine auf physikalischen, geometrischen, astronomischen und die Atmosphäre betreffenden *Modellen* basierende Methode zur Berechnung von natürlicher Beleuchtung. Sie wird zumeist an modernen Gebäuden exerziert, um deren Energieeffizienz und die Arbeitsplatzergonomie zu verbessern. Sie kann für ein *noch nicht* existierendes Gebäude sowohl quantitative als auch qualitative Daten für dessen Planung ermitteln. Im Kontext der Baugeschichte existiert das Gebaute bereits *nicht mehr*, oder nicht mehr in dem Zustand, der untersucht werden soll. Für diesen lassen sich in vergleichbarer Weise quantitative und qualitative Daten ermitteln. Beide Anwendungen legen ein *Gebäudemodell* zu Grunde. Wird innerhalb der Planung der vorgesehene Bau vorweggenommen, muss der historische Bauzustand zunächst rekonstruiert werden. Daher besteht eine *Abhängigkeit* zu dieser Rekonstruktion, was die Genauigkeit der Ergebnisse betrifft. Es wird sich zeigen, dass auch die Modellierung der Materialeigenschaften einen Bezug zur Rekonstruktion historischer Zustände hat.

Die Anwendung ingenieurwissenschaftlicher Verfahren zur Lösung baugeschichtlicher Fragestellungen, die Notwendigkeit der Rekonstruktion, das Einbeziehen archäologischer Funde, die architekturgeschichtlich angeleitete Interpretation der gewonnenen Daten etc. erfordern ein *interdisziplinäres* Verständnis der Methode und erzwingen eine gewisse Breite der vorliegenden Arbeit. Gleichzeitig bedingt die Übertragung einer etablierten Methode in ein anderes Anwendungsfeld eine Veränderung der Fragestellungen und Probleme und damit eine Veränderung der Methode selbst. Um beiden Aspekten gerecht zu werden, entsteht am Anfang ein theoretisches Gerüst, mit dem sich das Thema weiter erschließen lässt. Dieses manifestiert sich in einem Ablaufdiagramm (Abbildung 2.2), das die bauforscherische Erweiterung in die Methode integriert. Es schreitet von der empirischen Basis und den Quellen über Rekonstruktion, Materialmodellierung und Simulation zu Auswertung und Analyse fort. Auf diese Weise lassen sich Arbeitsphasen ausweisen, mit denen sich die Verantwortlichkeiten und Methoden der einzelnen Disziplinen voneinander abgrenzen lassen und an deren Übergängen ein interdisziplinärer Austausch stattfinden muss.

Die im Titel implizierte Einschränkung auf die Beleuchtung durch Tageslicht ist vom Standpunkt der Architektur aus betrachtet willkürlich. Künstliche Beleuchtung, insbesondere die Modellierung historischer Lichtquellen, hat aber methodische Herausforderungen, die nur eine begrenzte Schnittmenge mit denen der Tageslichtsimulation bilden. Die Arbeit wird daher den einen Aspekt vertiefen und Grundlagen erarbeiten, die später vielleicht auch für den anderen übernommen werden können. Die Vertiefung entlang eines Beispiels schließt in ähnlicher Weise bestimmte Aspekte der Beleuchtung von näherer Betrachtung aus. Bei einem Sakralbau wie der Hagia Sophia rücken die symbolischen, inszenatorischen und ästhetischen Aspekte von Beleuchtung in den Vordergrund, praktische, wirtschaftliche und soziale Aspekte aber in den Hintergrund. Auch diese bedürfen zukünftiger Ergänzung. Die prototypische Herangehensweise ist mit der Hoffnung verbunden, die technischen Eigenheiten, Unsicherheiten und Probleme, die

sich aus der Übertragung der Methode in die Bauforschung ergeben, im Detail herauszuarbeiten und damit auch für andere Bauten fassbar zu machen.

Diese Arbeit greift auf ein Modell der Hagia Sophia und eine Simulationsumgebung zurück, die der Verfasser gemeinsam mit anderen seit der 1990er Jahren an der Technischen Universität Darmstadt entwickelt hat. Sie beruht ferner auf Erfahrungen mit Tageslichtsimulationen und lichttechnischen Messungen, die der Verfasser während eines Forschungsaufenthalts an der Hochschule Luzern von 2014–16 gewonnen hat. Dort entstand für einen Forschungsantrag zu historischen Materialien mit komplexen lichttechnischen Eigenschaften auch einiges an konzeptionellen Vorarbeiten. Im Rahmen einer Forschungskoooperation der Technischen Universität Darmstadt mit der Hochschule Luzern zum Streuverhalten von römischem Fensterglas wurden diese an einem wichtigen Material konkretisiert. Diese methodischen Grundlagen vertieft und erweitert die Arbeit und ergänzt sie insbesondere um eine Überarbeitung des Gebäudemodells, eine Rekonstruktion der Marmorverkleidung und ein parametrisches Materialmodell für das goldene Glasmosaik. Auf dieser Basis wendet sie die Methoden an und gewinnt umfangreiche Ergebnisse in Bezug auf die Tageslichtbeleuchtung der Hagia Sophia im 6. Jh.

1.2 Baubeschreibung der Hagia Sophia

Das Gebäude, das als Beispiel erhalten muss, ist seit 1931 ein Museum¹ und blickt auf eine über 1400 Jahre währende Baugeschichte zurück. Es steht in prominenter Lage an der Spitze einer Landzunge in der Altstadt Istanbuls, dem früheren Konstantinopel. Vor der Umwidmung war sie eine bedeutende Moschee in der Hauptstadt des Osmanischen Reiches und Vorbild für die anderen großen Moscheen Istanbuls. Vor der Eroberung Konstantinopels 1453 durch das Heer des osmanischen Sultans Mehmed II. war sie die Krönungskirche der byzantinischen Kaiser und die Kathedrale des ökumenischen Patriarchats von Konstantinopel, somit Zentrum der griechisch-orthodoxen Kirche. Dieses Patriarchat geht noch auf die fünf gleichberechtigten Patriarchate der Alten Kirche zurück. Auch zu ihrer Erbauung war sie daher ein einflussreiches Zentrum christlichen Glaubens und zugleich die Kirche des römischen Kaisers Justinian.

Der heutige Bau entspricht in seinen Grundzügen noch denen der Zeit seiner Errichtung (Abbildung 1.1).² Seine äußere Form leitet sich aus der Geometrie des Innenraums und den notwendigen Stützkonstruktionen ab (Abbildung 1.2). Im Erdgeschoss befindet sich in der Mitte ein überwölbter länglicher Hauptraum, der im Norden und Süden von Seitenschiffen begleitet wird, die ebenfalls mit Gewölben ausgestattet sind. Im Osten befindet sich in der Verlängerung des Hauptraums der Altarraum mit einer Apsis, im Westen schließen sich zwei Vorhallen, der Narthex und der Exonarthex an. Über letztere werden der Hauptraum und die Seitenschiffe durch neun monumentale Türen erschlossen. In den Seitenschiffen finden sich weitere, weniger eindrucksvolle Zugänge, einschließlich eines mit einer Vorhalle versehenen Eingangs im Südosten, der eine überdachte Verbindung zum kaiserlichen Palast hatte. Im

¹ Im Kontext der politischen Entwicklung in jüngster Zeit ist sie nun wieder zu einer Moschee geworden.

² Vergl. die Baubeschreibung bei Mainstone 1988, S. 21 ff.

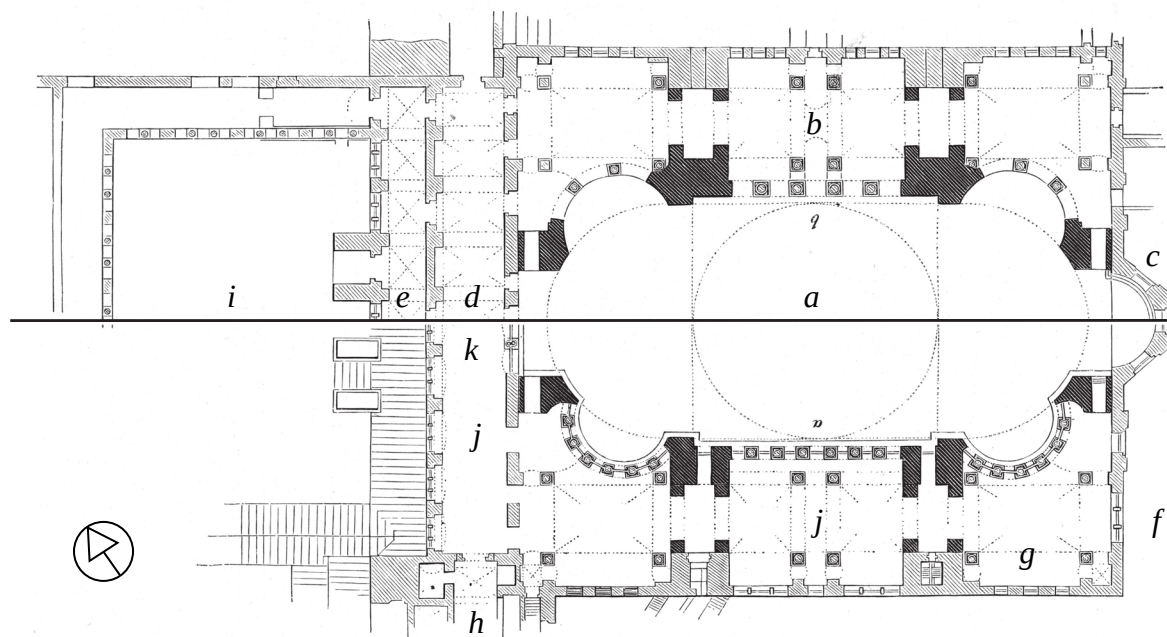


Abbildung 1.1: *Bauliche Gliederung im Erd- (oben) und Galeriegeschoß (unten): Hauptraum oder Naos (a), Seitenschiffe (b), Altarraum mit Apsis (c), Narthex (d), Exonarthex (e), Eingang vom Palast (f), Aufenthaltsbereich des Kaisers (g, im Erdgeschoß), Eingang von der Stadt (h), Hof (i), Galerien (j), Aufenthaltsbereich der Kaiserin (k). Nach Lübke und Semrau 1908.*

Südosten befand sich ein abgetrennter Aufenthaltsbereich für den Kaiser. Im Südwesten hat der Narthex einen direkten Zugang von der Stadt, weitere fünf Türen verbinden ihn mit dem Exonarthex. Vor diesem lag ein von Säulenhallen umgebener Hof in dem sich die Gemeinde vor einem Einzug versammeln und über drei Türen in den Exonarthex eintreten konnte. In den Hallen befanden sich zwei weitere Türen. Herausgehoben ist vom Hof aus der Eintritt in den Innenraum über die Gebäudeachse: die drei aufeinander folgenden Türen liegen in der Achse, während die anderen versetzt angeordnet. Die axialen Türen zum Narthex und Hauptraum sind jeweils größer und durch eine reichere Dekoration ausgezeichnet (Abbildung 5.1). An den Ecken des Gebäudes liegen Treppen oder Rampen, die das Obergeschoss erschließen. Dieses besteht aus drei überwölbten Galerien im Westen, Norden und Süden, die über dem Narthex und den Seitenschiffen liegen. In der westlichen Galerie befindet sich hinter den Kolonnaden zum Innenraum ein durch farbige Bodenplatten gefasster Bereich, der oft als Aufenthaltsbereich der Kaiserin interpretiert wird.

Die längliche Form des Hauptraums ergibt sich aus einer Kuppelkonstruktion, die sich im Grundriss klar abzeichnet und deren Ausgangspunkt ein Quadrat von 99 byzantischer Fuß (bzf) (31 m) Seitenlänge ist.³ Die Oberflächen des Innenraums ergeben sich aus der Verschneidung

³ Die Quellen schreiben 100 byzantischer Fuß (bzf). Svenshon 2010 begründet die Hypothese, dass der geometrischen Konstruktion ein Maß von 99 byzantischer Fuß (bzf) zugrunde liegt. Ein Trick der praktischen Mathematik,



Abbildung 1.2: Außenansicht der Hagia Sophia von Südosten. Die oberhalb der Galerien liegenden Bögen und Stützpfeiler auf der Südseite sind links der Bildmitte in ihrer Größe deutlich zu erkennen. Quelle: Arild Vågen (https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Hagia_Sophia_Mars_2013.jpg), „Hagia Sophia Mars 2013“, umgewandelt in Graustufen, <https://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/legalcode>.

von sphärischen Raumvolumen, die konstruktive Masse des Gebäudes tritt im Innenraum nicht in Erscheinung. Der Raum ist insofern reine Geometrie (Abbildung 1.4). In der Mitte der Konstruktion thront über allem eine zentrale Kuppel. Ihr Durchmesser vergrößert das Maß des Grundquadrates um 6 Fuß und ist als Rippenkuppel ausgebildet, an deren Fuß sich 40 Fenster befinden. Sie scheint auf vier Pendentifs zu ruhen. Die Oberflächen der Pendentifs ergeben sich aus einer Kugel, deren Diagonalen die Ecken des Grundquadrates verbinden. Das statische Rückgrat der Gewölbekonstruktion sind jedoch vier kräftige, halbkreisförmige Bögen, die an die Pendentifkonstruktion anschließen. Diese Bögen gehen in Ost-West-Richtung ohne Absatz in die Halbkuppeln über und verschwinden so vor dem Auge des Betrachters. In Nord-Südrichtung ist nur ein kleiner Teil der Bögen als Rücksprung zu den Tympanonwänden hin sichtbar, der größte Teil liegt außen hinter diesen Wänden. Diese Bögen werden von massiven Hauptpfeilern getragen, die wiederum durch hohe Stützpfeiler gesichert werden. Die beiden Teile dieser Konstruktion sind durch Bögen im Erd- und Obergeschoss, sowie im Außenraum verbunden.

durch den sich einfacher rechnen lässt. Daraus ergibt sich das in dieser Arbeit im folgenden angenommene Maß von 0,3131 m für den byzantischer Fuß (bzf) und die nachfolgend beschriebenen Einzelmaße.

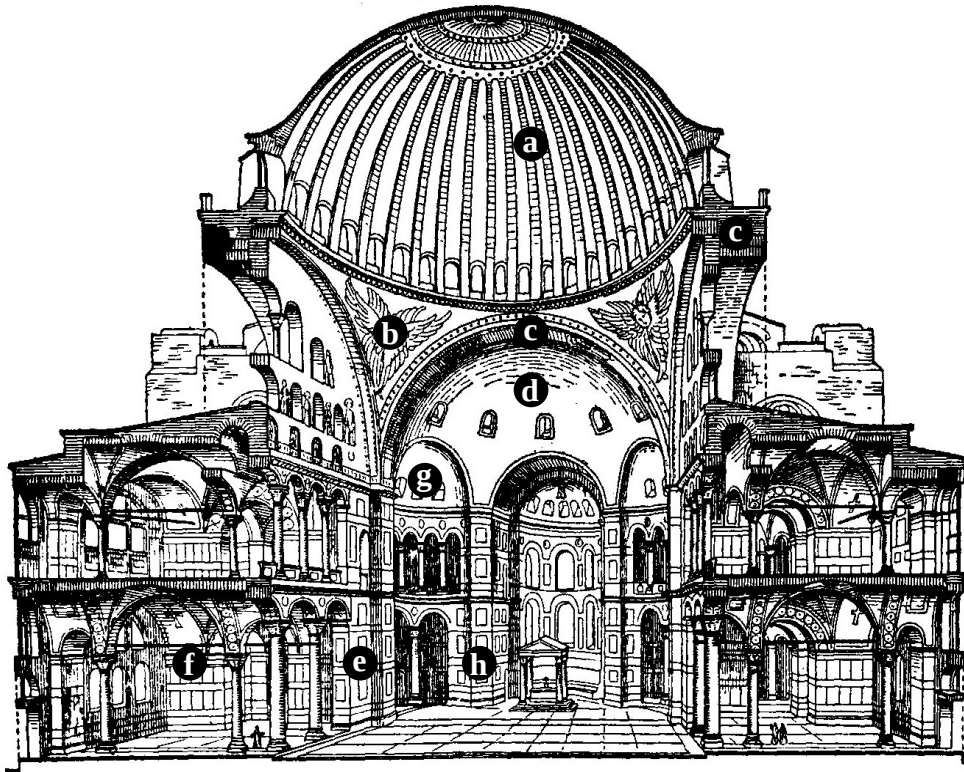


Abbildung 1.3: Elemente der Tragkonstruktion: Kuppel (a), Pendetifs (b), Bögen (c), Halbkuppeln (d), Hauptpfeiler (e), Stützpfeiler (f), Halbkuppeln der Konchen (g), Nebempfeiler (h). Quelle: *Encyclopædia Britannica*, 1911, S. 408.

Zum Innenraum hin tritt diese Konstruktion nur durch eine Wandfläche in Erscheinung, die durch einen Vorsprung und im Obergeschoss durch eine Öffnung weiter gegliedert wird. Ihre eigentliche Masse wird in den Seitenschiffe und Galerien geschickt verborgen (Abbildung 1.3 und Abbildung 1.2).

Die beiden Halbkuppeln des Hauptraums haben einen Durchmesser von 99 byzantischer Fuß (bzf). Sie lösen sich unten auf in jeweils zwei kleinere Halbkuppeln oberhalb der Konchen mit einem Durchmesser von 40 Fuß und eine halbtönenförmige Verlängerung des Hauptraums. Im Osten bildet diese Verlängerung den Altarraum und wird durch die Halbkuppel der Apsis abgeschlossen. Im Westen endet die Halbtonne flach mit einem großen Thermenfenster oberhalb der Eingangswand mit den monumentalen Türen (Abbildung 5.1). Nördlich und südlich dieser Halbtonnen verbergen sich vier Nebempfeiler, die niedriger, aber fast ebenso massiv wie die Hauptpfeiler sind. Sie tragen die Halbtonnen und stützen die Halbkuppeln. Sie sind in Erd- und Obergeschoss zum Altarraum und zum Eingangsbereich hin durchbrochen. Zur Raummitte hin treten sie nur durch eine schmale, gebogene Wand in Erscheinung. Die Anordnung der Konchen basiert geometrisch auf einer Achteckkonstruktion, aus dessen Streckenteilungen die



Abbildung 1.4: Innenraum der Hagia Sophia mit Blick auf die Apsis. Der Innenraum entsteht durch die Verschneidung von sphärischen Raumvolumen. Tragende Teile wie die großen Pfeiler zeichnen sich im Innenraum nicht ab. Die Marmordekoration ist flach gehalten, ohne eine Tektonik zu betonen. Quelle: Gurlitt 1907 Tafel 8.f.

Koordinaten ihrer Mittelpunkte festgelegt werden. Auf diese Weise ergibt sich der Grundriss des Hauptraums aus der Gewölbekonstruktion.⁴

Die Wände des Innenraumes ergeben sich aus der unteren Umrisslinie der Gewölbe. Wie bei den Gewölben weicht die statisch notwendige Baumasse dem geometrisch gebildeten Raum. Zu den Seitenschiffen und Galerien hin sind die Wände reichlich durchbrochen. Daraus ergeben sich die Säulenstellungen der Konchen und der Kolonnaden nördlich und südlich unter der Kuppel. Diese tragen eine vergleichsweise geringe Last, weshalb der Übergang zu den Seitenschiffen und Galerien offen gestaltet werden kann. Das erlaubt auch einen Versatz der Säulenstellungen im Erd- und Obergeschoss, der mit der tektonischen Strenge bricht und die Kolonnaden leichter wirken lässt. Die Seitenschiffe und Galerien sind durch ein eigenständiges System von ineinander greifenden Kuppel- und Tonnenabschnitten überwölbt, das die Bögen zwischen den Haupt- und Stützpfeilern geschickt integriert. Der eigentliche Raumabschluss des Innenraums wird durch die reichlich befensterten Außenwände der Seitenschiffe und Galerien definiert.

Alle Wände des Innenraums und des Narthex sind mit kostbaren Marmorarbeiten überzogen. Auch der Boden besteht aus großen Marmorplatten. Sämtliche Gewölbe dieser Räume waren mit einem goldenen Glasmosaik überzogen⁵ (Abbildung 9.3). Zur Ausstattung des Innenraums gehörten eine Reihe liturgisch wichtiger Einbauten (Abbildung 4.2). Im Rund der Apsis befand sich ein mehrstufiges Synthronon auf dem die kirchlichen Würdenträger Platz nahmen, davor der Altar, der mit einem Ziborium überdacht war. Durch die Chorschranken wurde der etwas erhöhte Altarraum in Richtung der Raummitte erweitert. Diese Erhöhung wurde in der Solea fortgesetzt, die den Altarbereich mit einem Synthronon (Kanzel) verband. Diese liturgische Ausstattung ist heute verloren.

1.3 Errichtung der Hagia Sophia

Der konkrete Anlass für die Errichtung der Hagia Sophia war der Verlust des Vorgängerbaus, einer Basilika gleichen Namens und gleicher Funktion.⁶ Diese ging mit großen Teilen der Stadt während des Nika-Aufstandes 532 in Flammen auf. Der Aufstand war der Höhepunkt einer Auseinandersetzung Justinians mit den sogenannten Zirkusparteien und zumindest Teilen der Senatorenschaft, den er nach anfänglichem Zögern mit aller Härte niederschlagen ließ.⁷ Der Neubau wurde bereits 537 eingeweiht – eine Meisterleistung spätantiker Bautechnik und Organisationskunst. Es darf allerdings vermutet werden, dass die Pläne schon parat lagen.⁸ Über Mittel konnte Justinian reichlich verfügen, bot der gescheiterte Aufstand Gelegenheit seine

⁴ Svenshon 2010, S. 83 ff.

⁵ Procopius Caesariensis und Paulus Silentarius 1977, S. 29

⁶ Vergl. Mainstone 1988, S. 134, 145 ff.

⁷ Pfeilschifter 2014, S. 49 f.

⁸ Meier 2004, S. 52.

politischen Gegner zu enteignen. Durch einen unverhofften Sieg gegen die Vandalen fiel im zusätzlich deren umfangliche Staatskasse in die Hände.⁹

Mit dem Bau beauftragte Justinian zwei Architekten – Anthemios von Tralleis und Isidor von Milet. Beide haben sich in ihrer Zeit als Wissenschaftler ausgezeichnet und Traktate verfasst, die in Fragmenten überliefert sind. Anthemios von Tralleis scheint zunächst die Bauleitung innegehabt und sich insbesondere um die Fundamente gekümmert haben.¹⁰ Er hat sich unter anderem mit Brennspiegel (Parabeln) beschäftigt und erörtert dabei Methoden für die Beleuchtung mittels geschickter Reflexion von Sonnenlicht.¹¹

Isidor von Milet, der zweite Baumeister, hat einen Kommentar zu Heron von Alexandrias Werk »Über Gewölbe« geschrieben. Dieses fragmentarisch in Herons Stereometrika überlieferte Werk enthält viele Beispiele praktischer Mathematik, also Lösungen, mit denen man überschlägig Probleme des Bauens – wie der Bestimmung von Massen und Volumen – lösen kann und dabei im Rahmen zulässiger Fehler bleibt. Mit den heronischen Verfahren lässt sich die geometrische Konstruktion des Grundrisses der Hagia Sophia gut nachvollziehen.¹² Isidor fasst darüber hinaus das Werk des Archimedes zusammen. Damit erlangt auch er zumindest theoretische Kenntnisse der geometrischer Optik.¹³

Es ist davon auszugehen, dass den Baumeistern der Hagia Sophia das Wissen ihrer Zeit zur Verfügung stand, sowohl bezogen auf die theoretischen Grundlagen als auch in der praktischen Anwendung im Bauwesen. Man kann sie sich vielleicht am besten in der Rolle von Bauingenieuren vorstellen, die in der Lage sind, komplexe bauliche Probleme mit wissenschaftlichen Methoden zu lösen.

Der Neubau der Hagia Sophia wird als Inszenierung der kaiserlichen Macht verstanden. Monogramme auf den großen Kapitellen und auf dem Altar weisen Kaiser Justinian und seine Frau Theodora als Stifter aus.¹⁴ Seit dem Dreikaiseredikt 380 ist das Christentum im römischen Reich Staatsreligion. Das Volk erwartet vom Kaiser neben Gerechtigkeit und materiellem Schutz, dass er Vorbild ist. Dazu gehört der rechte Glaube und ein christlicher Lebenswandel. Der Kaiser nimmt in dieser Zeit nicht nur am Gottesdienst teil, er ist selbst in das Zeremoniell eingebunden. So zieht er gemeinsam mit dem Patriarchen in die Kirche ein.¹⁵ Auch beim Friedenskuss – der gegenseitigen Vergebung der Schuld – spielt er eine wichtige Rolle.¹⁶ Im Laufe des Gottesdienstes tritt er sogar an den Altar heran.¹⁷ Dort breitet er Tücher aus, stellt Gefäße auf und räuchert schließlich den Altarraum.¹⁸ Die enge Verbindung kaiserlicher und

⁹ Meier 2004, S. 64.

¹⁰ Procopius Caesariensis und Paulus Silentarius 1977, S. 321 Ekphrais Vers 270.

¹¹ Heath 1921; Jabi und Potamianos 2007.

¹² Svenshon 2010.

¹³ Sambursky 1958.

¹⁴ Mainstone 1988, S. 42.

¹⁵ Mainstone 1988, S. 219.

¹⁶ Stichel 2010, S. 48

¹⁷ Mainstone 1988, S. 231.

¹⁸ Stichel 2010, S. 41.

göttlicher Macht und die Verbindung von Reich und dem kirchlich geregelten Glauben ist die Botschaft dieser Inszenierung und damit der für sie erbauten, alles dagewesene übertreffenden Kirche.

Der Bau erscheint als Teil einer politischen Reform am Beginn der Herrschaft Justinians. In dieser Zeit gelingt es ihm – als letztem – einen großen Teil der verlorenen Gebiete des römischen Reichs zurückzuerobern (Tafel 21). Zugleich schafft er mit dem Codex Iustinianus eine verbindliche Gesetzessammlung und fügt dieser noch weitere Gesetzeswerke hinzu. Er versucht die Belange des Glaubens, vor allem den Streit mit den Monophysiten abschließend zu regeln. Die Wiederherstellung des römischen Reiches ist also zugleich eine Erneuerung der inneren Ordnung. Die göttliche Gnade sieht er als eigentliche Basis seiner Macht:

Von Gott eingesetzt, lenken wir unser Reich, welches uns von der himmlischen Majestät übergeben worden ist, führen Kriege glücklich zu Ende, zieren den Frieden und erhalten den Bestand des Gemeinwesens. Und so richten wir unser Herz auf dem Beistand des allmächtigen Gottes, daß wir weder auf Waffen vertrauen noch auf unsere Soldaten noch auf Feldherren noch auf unser eigenes Können, sondern unsere Hoffnung allein in die Vorsehung der Dreifaltigkeit setzen.¹⁹

Das Christentum durchdringt in dieser Zeit die ganze Gesellschaft. Justinian sieht es als seine Aufgabe an, das orthodoxe Christentum durchzusetzen. Dabei ist sein Ziel die Bekehrung von Nichtgläubigen. Diese Paganen wurden schon zuvor aus dem öffentlichen Leben verdrängt, jetzt geht man auch gesetzlich gegen sie vor. So ergeht das Verbot in Athen Philosophie und Astronomie zu lehren. Dies versetzt der platonischen Akademie den Todesstoß.²⁰ Auch Häretiker werden verfolgt, Synagogen in Kirche umgewandelt:

Wir dulden nicht, daß Juden, Heiden, Donatisten, Arianer und irgendwelche anderen Häretiker ihre Höhlen haben oder irgend etwas gleichsam nach kirchlichem Ritus tun, da es völlig absurd ist, gottlosen Menschen zu erlauben, Gottesdienste abzuhalten.²¹

Das beginnende byzantinische Reich ist eindeutig christlich-orthodoxer Natur und die Hagia Sophia dafür ein Symbol.

1.4 Metaphysik des Lichts und die Kunst der Beleuchtung

In einem politisch und religiös aufgeladenen Kontext wie beim Bau der Hagia Sophia kann man Licht nicht bloß unter praktischen oder rein gestalterischen Aspekten betrachten – die physische Beleuchtung bekommt schon durch ihre inszenatorischen Möglichkeiten eine politische und

¹⁹ Justinian, Digesta, de conceptione digestorum I, Anfang zitiert nach Pfeilschifter 2014, S. 209.

²⁰ Meier 2004, S. 39.

²¹ Justinian, Novelle 37,8 zitiert nach Pfeilschifter 2014, S. 213.

soziale Dimension. Die damit einhergehende ideologische und religiöse Interpretation der Beleuchtung bei Gestaltung und Rezeption des Gebauten provoziert die Frage nach einer zugrundeliegenden Metaphysik des Lichts. Das Verhältnis der Lichtsimulation zu solchen Aspekten bedarf einer Klärung.

Licht ist Voraussetzung menschlicher Existenz schlechthin. Ohne den Tag-Nacht-Rhythmus der Sonne und den Zyklus der Jahreszeiten ist irdisches Leben nicht denkbar. Mit der Abhängigkeit von Mensch und Natur vom Licht der Sonne muss sich jede geordnete Sicht auf die Welt auseinandersetzen. Licht ist darüber hinaus das bevorzugte Medium menschlicher Wahrnehmung und steht in unserer Sprache fast synonym mit Erkenntnis. Daher erweitern kosmologische und epistemologische Diskurse zum Sein des Lichts von jeher dessen physische Dimension.²²

Die Literatur versteht die Beleuchtung der Hagia Sophia zumeist vor dem Hintergrund einer christlich-neoplatonisch geprägten Metaphysik des Lichts, die sich anhand der Schriften eines vermutlich zeitgleichen anonymen Autors zeigen lässt, der als Pseudo-Dionysius Areopagita bezeichnet wird. Als Neoplatonismus versteht man die systematisierende Weiterentwicklung der Gedankenwelt Platons (428/427 – 348/347 v. Chr.) beginnend mit der Philosophie Plotins (205 – 250 n. Chr.).²³ Die neoplatonische Schule hatte Einfluss auf Kirchenväter wie Augustinus und ist dadurch bis in die Neuzeit von großer Bedeutung.²⁴

Diesen Hypothesen nachzugehen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen.²⁵ Stattdessen sollen einige Hinweise gegeben werden, an welche Vorstellungen gebildete Rezipienten des Lichts und der Beleuchtung der Hagia Sophia zur Bauzeit anknüpfen konnten.

1.5 Licht als Analogie des Guten

Platon verwendet an vielen Stellen seiner Dialoge Worte und Bilder, die vom Sehen und vom Licht abgeleitet sind, wenn es um Einsicht und Erkenntnis geht. Im *Staat*, in dem das Gute (Agathon) als Ziel der Staatsführung im Mittelpunkt steht, wird in zwei Gleichnissen – dem Sonnen- und dem Höhlengleichnis²⁶ – das Licht als *Analogie des Guten* vorgestellt.

Für Platon besteht die wahrnehmbare – empirische – Welt aus Werden und Verfall unterworfenen Materie, die ihre Struktur – oder ihr *Sein* – durch immerwährende transzendente *Ideen* in einem Schöpfungsakt erhält.²⁷ Das Sein – oder das Wahre – ist daher eng mit dem Guten und damit auch mit dem Schönen verknüpft.²⁸ Die Ideen sind also keine Produkte des menschlichen Geistes, sie können lediglich erkannt werden.

²² Einen Überblick gibt: Sloterdijk 1994.

²³ Vergl. Büttner 2006, S. 13–60, 177–194.

²⁴ Simson 1982, S. 81 ff.

²⁵ Einen Versuch hat Schibille unter Einbeziehung umfangreicher Literatur unternommen: Schibille 2014a.

²⁶ Platon, *Politeia* VI 507b–509c. Das Höhlengleichnis wird hier nicht weiter erläutert.

²⁷ Platon, *Timaios* 27c. ff.

²⁸ Platon, *Symposion* 201d–212c.

Im Gegensatz zu den anderen Sinnen, mit denen wir laut Platon die Umwelt unvermittelt wahrnehmen, benötigt der Gesichtssinn die Sonne, welche die Welt erleuchtet und damit sichtbar macht. Das Vermögen des Auges zu sehen erklärt Platon dadurch, dass es selbst sonnenartig ist.²⁹ Blicken wir ins Dunkle, hilft uns dieses Sehvermögen aber nicht, die Welt zu erkennen. Unseren Augen wohnt nur dann Sehkraft inne, wenn wir sie auf Gegenstände richten, die von der Sonne beleuchtet werden.

Genauso kann die Seele das Wahre und Gute erkennen, da sie selbst Anteil an ihm hat. Allerdings nur wenn sie »[...] fest gerichtet ist auf das, worauf das Licht der Wahrheit und des Seienden fällt, dann erfaßt und erkennt sie es und scheint im Besitze der Vernunft zu sein; wenn aber auf das mit Finsternis Gemischte, das Entstehende und Vergehende, dann fällt sie dem bloßen Meinen anheim [...].«³⁰ Wie das Licht von der Sonne geht die Kraft der Erkenntnis von dem Guten an sich – der transzendentalen Idee des Guten – aus.³¹ Mit der Ausrichtung auf das Wahre und Gute ist das Bemühen gemeint, eigene Veranlagungen mittels Bildung zu entwickeln, genauer mit dem Studium der Arithmetik, Geometrie, Astronomie und Musik.³²

Für das neoplatonische Verständnis des Lichts ist darüber hinaus von Bedeutung, dass durch dieses Gleichnis nicht nur das Gute erklärt wird, sondern durch die Analogie zugleich die Wesensverwandtschaft des Lichts mit dem Guten offenbar wird. Licht als Metapher und die Reflexion über das Sein des Lichts erhält so eine eigenständige Kraft der Erkenntnis im Sinne der *Erleuchtung*, die für die christlichen Neoplatoniker eine religiöse Bedeutung hat.³³

1.6 Lichtsimulation und Interpretation

Für eine Kunst- oder Architekturgeschichte der Beleuchtung stellt sich die Frage nach konkretem Programm und künstlerischen Aussagen, die sich aus den erkennbaren Lichtphänomenen rekonstruieren lassen. Für die Lichtsimulation im engeren Sinne ist zu klären, inwieweit sie dazu beitragen kann, beruht sie doch auf Methoden der Naturwissenschaften, denen eine ganz andere Erkenntnistheorie zu Grunde liegt. Die Vorstellung, dass sich Hypothesen lediglich empirisch falsifizieren lassen – und nur solche falsifizierbaren Hypothesen legitim sind – steht der Ideenwelt Platons und Plotins fast diametral gegenüber. Das erzwingt eine methodische Klarstellung: Metaphysik, Mystik und Politik des Lichts werden weder durch Anschauung noch durch Verfahren wie die Lichtsimulation allein greifbar. Die Ergebnisse der Simulation bedürfen einer nachfolgenden Interpretation und Auseinandersetzung mit den Quellen. Die Lichtsimulation kann auf Grund der empirischen Basis Daten für die Interpretation liefern, insbesondere kann sie Phänomene der Beleuchtung umfassend zeigen und künstlerische Mittel herausarbeiten. Bevor die Interpretation in Angriff genommen wird, gilt es allerdings, eine

²⁹ Platon, *Politeia* VI 508b.

³⁰ Platon, *Politeia* VI 508d; zitiert nach Platon 1988.

³¹ Platon, *Politeia* VI 509c.

³² D. h. des Quadriviums, vergl. Svenshon 2020; Platon, *Politeia* VII, 524a-531d.

³³ Beierwaltes 1977, S. 78 ff.

weitere Hürde zu überwinden: die Lücke zwischen der berechenbaren Beleuchtung einer Szene und deren Wahrnehmung.

1.7 Visuelle Wahrnehmung

Die menschliche Wahrnehmung von Architektur und Beleuchtung ist ein komplexer Untersuchungsgegenstand. Er schließt physiologische, psychologische und kulturelle Aspekte ein. Das physikalische Phänomen Licht führt unter den Bedingungen der Physiologie des Auges zu optischen Reizen, die vom Wahrnehmungsapparat zu einem mentalen Bild der Umwelt verarbeitet werden. Die Wahrnehmungspsychologie³⁴ versteht diesen Vorgang als eine aktive Suche, die von einem biologischen Bedürfnis nach Information gesteuert wird.³⁵ Da die Augen nur in einem kleinen Bereich im Zentrum der Netzhaut scharf sehen und nur dort Farben gut unterscheiden können,³⁶ bewegen sie sich permanent. Die Peripherie der Netzhaut nimmt gleichzeitig Änderungen in der Umgebung wahr, die später in den Fokus genommen werden. In den Reizen sucht der Apparat so nach Mustern, die der mit bekannten Gegenständen assoziieren kann. Er orientiert sich dabei am Kontext³⁷ und verbindet diesen mit Erwartungen, die das Gedächtnis beisteuert.³⁸ Das Ungewohnte erweckt Neugier, Irrelevantes wird von der Wahrnehmung ausgeschlossen.³⁹ Die Aufmerksamkeit, die ein Reiz in diesem Prozess erfährt, verhält sich dabei nicht proportional zu seiner Größe, sondern ist abhängig von seiner Relevanz.⁴⁰

Die Reize und Muster auf der Netzhaut werden vom Wahrnehmungsapparat als dreidimensionale Gegenstände interpretiert. Dabei wirken sogenannte *constancies*:⁴¹

- *Shape constancy*. Ein Teller, der auf einem Bild als verzerrtes Oval zu sehen ist, wird als kreisrund verstanden, die Straße, die in einer Kurve hinter Bäumen verschwindet, als fortgesetzt. Ein sphärischer Helligkeitsverlauf wird als Oberfläche einer Kugel interpretiert. Ob diese Kugelform konkav oder konvex ist, ergibt sich aus der unbewußten Rekonstruktion der Lichttrichtung. Auch Glanzpunkte und Reflexionen helfen, Formen zu erkennen.
- *Size constancy*. Bäume in verschiedenen Entfernungen erscheinen gleich groß, auch wenn sie im projizierten Bild unterschiedliche Abmessungen haben.
- *Color constancy*. Ein Blatt Papier erscheint im Tageslicht so weiß wie bei Lampenlicht.
- *Brightness constancy*. Einem kubischen Objekt wird eine einheitliche Helligkeit zugeordnet, auch wenn seine Seiten unterschiedlich viel Licht erhalten.

³⁴ Gibson 1950; Lam 1992.

³⁵ Lam 1992, S. 5.

³⁶ Bartenbach und Witting 2009, S. 99 f.

³⁷ Lam 1992, S. 33.

³⁸ Lam 1992, S. 34.

³⁹ Lam 1992, S. 32.

⁴⁰ Lam 1992, S. 33.

⁴¹ Lam 1992, S. 42 f.

Für die Lichtsimulation relevant ist die Erkenntnis, dass die Hell-/Dunkel-Werte und Farbinformationen, die sie liefern kann, die Basis für die Arbeit des Sehapparates und damit für das Formverständnis ist. Zugleich ist die resultierende Gestalt eines Gegenstands oder einer räumlichen Struktur bezüglich Helligkeit und Farbe von den wahrgenommenen Reizen und damit den berechneten Daten gedanklich zu unterscheiden. Architektur und ihre Wirkung beziehen sich auf die *Gestalt* von Objekten und Räumen, nicht auf die wahrgenommenen Reize oder Informationen im physikalischen Sinn. Der Interpretation ist eine wahrnehmungspsychologische Analyse voranzustellen, im Besonderen gilt das für die Interpretation von Helligkeit und Kontrast.

1.8 Photometrie

Für die Untersuchung und Planung von Beleuchtung ist Empfindung von Helligkeit und Kontrast von großer Bedeutung.⁴² *Licht* in diesem Sinne meint den vom menschlichen Auge wahrnehmbaren Teil des elektromagnetischen Spektrums. Die photometrischen Einheiten die für solche Untersuchungen genutzt werden, leiten sich auf diese Weise aus korrespondierenden radiometrischen Einheiten ab. Für die verschiedenen Wellenlängen innerhalb des sichtbaren Spektrums ist das Auge unterschiedlich empfindlich, unterschiedliche Wellenlängen werden folglich unterschiedlich hell wahrgenommen.⁴³ Die jeweilige Empfindlichkeit lässt sich nicht physikalisch messen und ist für verschiedene Bereiche der Netzhaut unterschiedlich. Außerdem unterscheidet sich das Sehen am Tage vom Dunkelsehen in der Nacht. Die Umrechnung radiometrischer in photometrische Einheiten geschieht daher mittels einer Norm,⁴⁴ welche eine Kurve ($V(\lambda)$) und einen Maximalwert (K_m) zugrunde legt, um das photometrische Strahlungsäquivalent ($K(\lambda)$) für die jeweilige Wellenlänge (λ) zu ermitteln:

$$K(\lambda) = K_m \cdot V(\lambda), \quad K_m = 683 \frac{\text{lm}}{\text{W}}. \quad (1.1)$$

Beides wurde empirisch durch Versuche in den zwanziger Jahren des letzten Jahrhunderts ermittelt, bei denen normalsichtige Probanden die Helligkeit von Farbflächen regulieren sollten, bis sie ihnen gleich hell erschienen. Die Größe der Farbflächen wurde so gewählt, dass sie mit 2° Blickwinkel den Bereich abdecken, in denen die Sehschärfe am größten ist und Farben am besten unterschieden werden. Man spricht vom 2° -Standardbeobachter. So lässt sich die Strahlungsleistung einer monochromatischen Lichtquelle in den Lichtstrom umrechnen, der in der Lichttechnik benötigt wird:

$$\Phi_v = K_m \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e. \quad (1.2)$$

⁴² Vergl. Bartenbach und Witting 2009, insb. S. 78–93.

⁴³ Die spektrale Zusammensetzung bestimmt neben dem Helligkeitsempfinden (Photometrie) auch die Farbwahrnehmung (Farbmetrik).

⁴⁴ CIE 018.2-1983 1983.

Bei den meisten Lichtquellen – die nicht monochromatisch sind – muss über das Spektrum integriert werden:

$$\Phi_v = K_m \int V(\lambda) \frac{d\Phi_e(\lambda)}{d\lambda} d\lambda . \quad (1.3)$$

In der Simulation wird die spektrale Charakteristik von Lichtquellen oder reflektiertem Licht meist auf drei Farbkanäle reduziert. Eine Norm⁴⁵ definiert dazu den XYZ-Farbraum, mit Empfindlichkeitskurven für Rot (X), Grün (Y), und Blau (Z) (Abbildung 1.5).

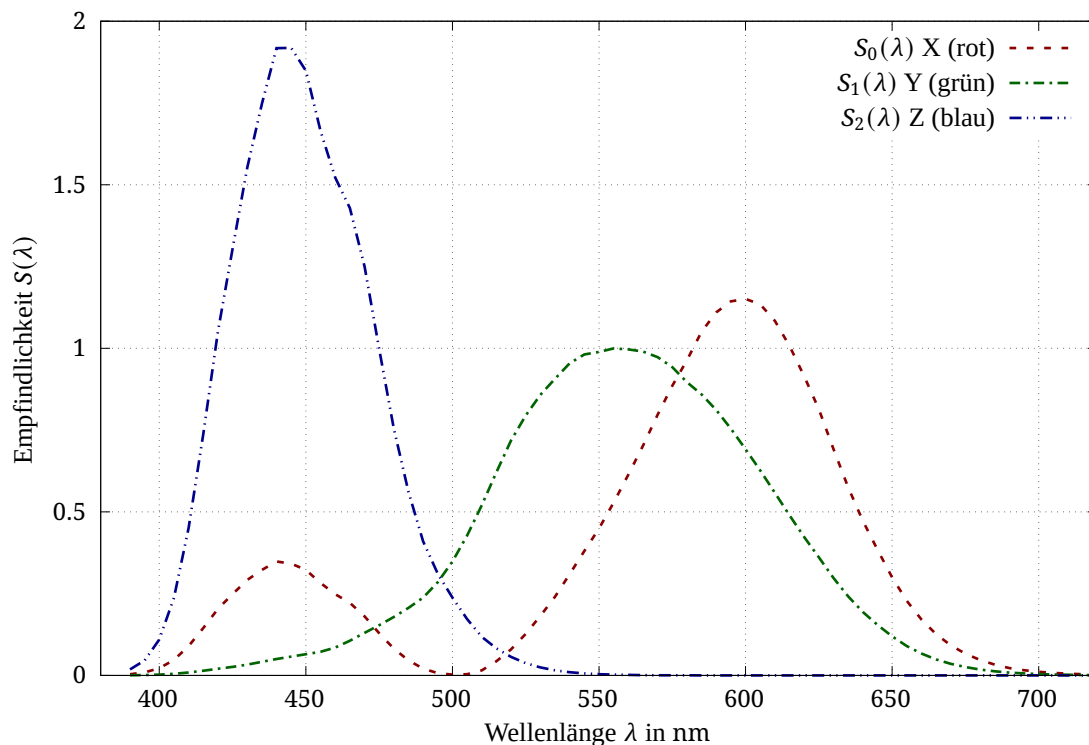


Abbildung 1.5: Relative Empfindlichkeit der drei Farbkanäle (XYZ) in Abhängigkeit von der Wellenlänge nach CIE 15-2004 2004.

Aus dem Lichtstrom lassen sich zwei Einheiten ableiten, mit der sich beleuchtete Szenen quantitativ untersuchen lassen, die Beleuchtungsstärke (E_v) und die Leuchtdichte (L_v):

$$E_v = \frac{\Phi_v}{A} , \quad (1.4)$$

$$L_v = \frac{\Phi_v}{A \cdot \cos \beta \cdot \Omega} . \quad (1.5)$$

⁴⁵ CIE 15-2004 2004.

Die *Beleuchtungsstärke* ist ein Maß für das Licht, das auf eine Oberfläche (A) einstrahlt. Als solche ist die Beleuchtungsstärke nur mittelbar für die Wahrnehmung relevant. Mit ihr kann unabhängig von Farbe, Glanz und Reflexionsgrad die Beleuchtung von Oberflächen verglichen werden. So lassen sich durch die Beleuchtung hervorgehobene Teile eine Szene zeigen, eine Hierarchie zwischen Raumteilen feststellen oder der Anteil einer Lichtquelle an der Beleuchtung einer Fläche angeben.

Die *Leuchtdichte* ist ein Maß für das Licht, das eine Fläche (projiziert $A \cdot \cos \beta$) in einem bestimmten Raumwinkel (Ω) abgibt. Reflektiert eine Fläche einfallendes Licht, ist die Leuchtdichte folglich von Farbe, Glanz und Reflexionsgrad dieser Fläche abhängig. Glänzt die Oberfläche, ist der Winkel aus dem sie beleuchtet wird ebenfalls von Bedeutung. Leuchtdichten lassen sich zu Bildern kombinieren, die ihre Verteilung im Sichtfeld eines Beobachters zeigen. So lassen sich Kontraste im Blickfeld untersuchen.

Leuchtdichte und (horizontale) Beleuchtungsstärke stehen in einem Zusammenhang, der sich bei diffuser (matter) Reflexion an einer Oberfläche mit dem Reflexionsgrad ρ wie folgt ausdrücken lässt:⁴⁶

$$L = \frac{E_h \cdot \rho}{\pi} . \quad (1.6)$$

1.9 Kontrastwahrnehmung und Adaptionsvermögen

Man kann zweierlei Kontraste in den Leuchtdichten unterscheiden: lokale und globale. Der *globale Kontrast* oder Kontrastumfang einer Szene muss vom Auge bewältigt werden. Ein großer globaler Kontrast, etwa zwischen den Fenstern und dem Rest einer Innenraumszene, kann zur Blendung führen. Dunklere Bereiche lassen sich dann nur schwer differenzieren. *Lokale Kontraste* erlauben es, Objekte und Formen durch Farbunterschiede, Schatten, Helligkeits- und Glanzverläufe etc. zu erkennen. Das Verhältnis von lokalen und globalen Kontrasten ist entscheidend für den visuellen Komfort. Definieren kann man den Kontrast als Verhältnis der Leuchtdichten eines Objekts (L_o) und seiner Umgebung (L_u):⁴⁷

$$K = \frac{L_o - L_u}{L_u} . \quad (1.7)$$

Das Auge ist in der Lage, sich über enorme Skalen hinweg dem Helligkeitsniveau einer Umgebung anzupassen und enorme Helligkeitsunterschiede in einer Szene zu bewältigen. Es stellt für uns kein Problem dar, im Mondlicht zu sehen oder die Formen von der Sonne direkt angestrahlter Gegenstände zu erkennen. In einem Innenraum können wir die Einrichtung studieren und zugleich die Landschaft vor dem Fenster erkennen. Dazu verfügt unser

⁴⁶ Bartenbach und Witting 2009, S. 42.

⁴⁷ Bartenbach und Witting 2009, S. 92.

Sehapparat über verschiedene *Adaptionsmechanismen*, die allerdings unterschiedlich schnell greifen:⁴⁸

- Kontrastumfang und unterschiedliche Empfindlichkeit der verschiedenen Sehzellen (Stäbchen und Zäpfchen, permanent)
- Pupillenkontraktion (Sekundenbruchteile)
- Rezeptoradaption, durch Aufbau und Abbau des Sehfärbstoffes (Minuten)

Die Adaption an das mittlere Helligkeitsniveau einer Szene⁴⁹ hat entscheidende Auswirkungen auf deren Wahrnehmung: Blendet uns das helle Licht der Fenster eines Innenraumes, erscheint er uns dunkler. Zugleich fällt es uns schwerer, in den dunklen Bereichen Helligkeits- und Farbunterschiede auszumachen. Durch die Adaption fällt es ferner schwer, die absolute Helligkeit unserer Umgebung einzuschätzen.⁵⁰

In den Grenzen des normalen »Hellsehens«, dem *photopischen* Sehen, spielen nur relative Helligkeiten in einer Szene eine größere Rolle für deren Wahrnehmung. Die absolute Helligkeit eines Gegenstands können wir nur durch unsere Erfahrung bezüglich dieses Gegenstandes und des gegebenen Kontexts ermitteln.

Das Ausgleichsvermögen des Sehapparates kennt allerdings eine Untergrenze, an der sich das Sehen deutlich verändert. Bei geringen Helligkeiten sind wir auf die höhere Empfindlichkeit der Stäbchen angewiesen, man spricht vom »Dunkelsehen« oder dem *skotopischen* Sehen. Die Stäbchen differenzieren Farben nicht, daher können wir im Dunkeln nicht farbig sehen. Darüber hinaus ist die Sehschärfe eingeschränkt. Die Stäbchen können von einem einzelnen Photon angeregt werden, allerdings fasst der Sehapparat Informationen aus mehreren Stäbchen zusammen. Insbesondere Details, die einen geringen Kontrast aufweisen, können nicht mehr aufgelöst werden. Die Stäbchen reagieren langsamer auf Helligkeitsänderungen, daher brauchen wir länger, um eine Szene zu erfassen. Eine weitere Eigenschaft des skotopischen Sehens ist eine Verschiebung der spektralen Empfindlichkeit zum Blauen hin. In einem Übergangsbereich zum Hellsehen mischen sich die Eigenschaften beider Sehartens. Man spricht vom *mesopischen* Sehen oder dem Dämmerungssehen.⁵¹ Die Wahrnehmung dunkler Szenen folgen also anderen Gesetzen (Tabelle 1.1).

Tabelle 1.1: Grenzen der unterschiedlichen Sehbereiche. Die Übergänge sind fließend und individuell verschieden.

skotopisches Sehen	mesopisches Sehen	photopisches Sehen
$L_v < 1 \cdot 10^{-5} \text{ cd m}^{-2}$	$L_v > 0,1 \text{ cd m}^{-2}$	$L_v > 10 \text{ cd m}^{-2}$

⁴⁸ Bartenbach und Witting 2009, S. 79 ff.

⁴⁹ Lam 1992, S. 46.

⁵⁰ Lam 1992, S. 47 f.

⁵¹ Bartenbach und Witting 2009, S. 78.

Auch das andere Extrem der Helligkeitswahrnehmung, die Blendung führt zu Veränderungen der Wahrnehmung. Durch Streuung im Auge werden dunklere Bereiche überstrahlt, also heller und kontrastärmer wahrgenommen. Gleichzeitig nimmt die Sehschärfe ab, besonders feinere dunkle Strukturen z. B. Äste oder Fenstergitter vor hellem Hintergrund verschwimmen.

1.10 Kontrastdarstellung

Am Anfang der Analyse und der Interpretation von Helligkeitswerten und Kontrasten steht ein grundsätzliches Problem: Es fehlt an einem geeigneten Medium der Darstellung der berechneten Leuchtdichten. Die Wahrnehmung von Helligkeiten und Farben ist von den vielen physiologischen Eigenschaften des menschlichen Auges abhängig: Auflösungsvermögen und Streueigenschaften der Linse, Rezeptorverteilung, Helligkeitsadaptation durch Pupille und Auf- und Abbau der Sehfärbstoffe etc. Daher ist die Betrachtung des *Bildes* einer Szene grundsätzlich verschieden von der Betrachtung der Szene selbst. Ein Bild kann uns z. B. nicht blenden. Der Kontrast einer Szene übersteigt fast immer die Möglichkeiten dessen, was auf Papier darstellbar ist und meist auch das, was auf einem Bildschirm dargestellt werden kann.

Es gibt wenige Oberflächen, die weniger als 1 – 2 % des eingestrahnten Lichts reflektieren und wenige die mehr als etwas über 90 % reflektieren. Der tatsächliche Kontrastumfang eines Ausdrucks auf Papier liegt daher deutlich unter 1 : 50.⁵² Ein Computermonitor ist schon besser. In dunkler Umgebung versprechen Hersteller einen Kontrastumfang von 1 : 1000. Die maximale Leuchtdichte liegt hier bei etwa 300 cd m⁻².⁵³ Das menschliche Auge kann Kontrastumfänge von über 1 : 5000 bewältigen.⁵⁴

Es gibt grundsätzlich zwei Wege, mit dieser Problematik umzugehen. Zum einen kann man die Leuchtdichte und den Kontrastumfang des Mediums erhöhen, zum anderen die Visualisierung auf einem Medium mit geringerem Kontrast mittels *tone mapping*.

Neue Standards für High Dynamic Range (HDR)-Fernsehen versprechen einen Kontrastumfang von bis zu 1 : 200.000⁵⁵ und machen Displays mit einer maximalen Leuchtdichte oberhalb von 1000 cd m⁻² verfügbar. Spezielle HDR-Displays steigern die maximale Leuchtdichte auf 3500 cd m⁻² oder mehr.⁵⁶ Die Darstellung von typischen Simulationsergebnissen würde einen HDR-Fernseher in Bezug auf die Leuchtdichte noch überfordern, ein spezielles HDR-Display könnte aber die Anforderungen an die Leuchtdichte als auch an den Kontrastumfang bedienen.

⁵² Der Standard-Wert im RADIANCE Programm pcond, das Berechnungsdaten für die Ausgabe anpasst, liegt bei 1 : 32.

⁵³ Nach eigener Erfahrung liegen gemessene Werte bei Standardeinstellungen und realistischen Umgebungsbedingungen deutlich darunter.

⁵⁴ Kunkel und Reinhard 2010.

⁵⁵ Borer und Cotton 2016.

⁵⁶ Kunkel und Reinhard 2010, siehe auch Reinhard, Heidrich u. a. 2010, S. 205–224.

Zur Darstellung der Forschungsergebnisse aus dem Hagia-Sophia-Projekt im Rahmen zweier Ausstellungen⁵⁷ hat der Verfasser zusammen mit Oliver Hauck eine Darstellungstechnik für hohe Kontraste mittels hintergrundbeleuchteter, doppelseitig bedruckter Tafeln entwickelt, die Bilddiagonalen von mehr als zwei Meter Länge und die Herstellung von Halbzylindern für eine panoramatische Präsentation zulassen.⁵⁸

Beim Tone Mapping werden die Leuchtdichten zu Bildern mit Anpassungen an das menschliche Kontrastempfinden verarbeitet. Eigentlich wird auf fast alle Bilder, die wir zu sehen bekommen eine einfache Korrektur angewandt, die sogenannte Gamma-Korrektur. Wird ein Bild am Monitor angezeigt, werden die Helligkeitswerte der Datei als Basis einer Exponentialfunktion interpretiert, deren Exponent das Gamma ist.⁵⁹ Das trägt dem Umstand Rechnung, dass der Sinneseindruck eines Reizes grob in einem logarithmischen Verhältnis zu seiner Größe steht (Weber-Fechner-Gesetz⁶⁰).

Ähnliches gilt für die chemische Photographie: die typische S-Kurve des Verhältnisses von Belichtung zur Dichte eines Films sorgt dafür, dass bei den mittleren Helligkeiten eine annähernd lineare Beziehung herrscht, in den dunklen und hellen Bereichen, eine zusätzliche Belichtung aber zu einer geringeren Zunahme der Dichte führt (Abbildung 1.6). So wird der Kontrast in diesen Bereichen komprimiert, wodurch insgesamt mehr Helligkeitsstufen dargestellt werden können, ohne dass der lokale Kontrast in den Mitten abnimmt. Der Photograph stellt die Belichtung so ein, dass die wichtigsten Bildteile im mittleren Bereich der Kurve liegen. Damit kann in gewissem Umfang sichergestellt werden, dass in den Lichtern und Schatten immer noch Helligkeitsunterschiede wahrzunehmen sind.

Die Wiedergabe einer hochkontrastreichen Szene auf einem Medium mit geringerem Kontrast ist ein Problem, das die gesamte Kunst bildhafter Darstellung umfasst, insofern sie illusionistische Wirkungen anstrebt. Letztlich bleibt es den höheren Funktionen des Sehens überlassen, die Reize zu Bildern zusammensetzen, die sie mit anderen Seherfahrungen vergleichen lassen. Darauf zielen die beiden genannten Verfahren, aber auch viele andere künstlerische Darstellungen ab.⁶¹ Diese Verfahren lassen sich nutzen, um über Licht und Belichtung zu kommunizieren, sie können aber auch Eindrücke *verfälschen* oder Effekte (z. B. Blendung) überdecken, wenn sie unbedacht eingesetzt werden.

⁵⁷ »Byzanz – Pracht und Alltag«, Kunst- und Ausstellungshalle der Bundesrepublik Deutschland, Bonn, 2010 und »Einblicke in den virtuellen Himmel: Neue und alte Bilder der Hagia Sophia«, Ausstellungshalle der Universitätsbibliothek, Augsburg, 2014.

⁵⁸ Noback 2011, Hauck, Noback und Shakespeare 2010, Hauck und Noback 2012.

⁵⁹ Am Computer meist mit dem Wert 2, 2.

⁶⁰ Schmidt, Thews und Lang 2013, S. 210.

⁶¹ Man denke z. B. an Vermeers kleine weiße Punkte um Reflexionen darzustellen.

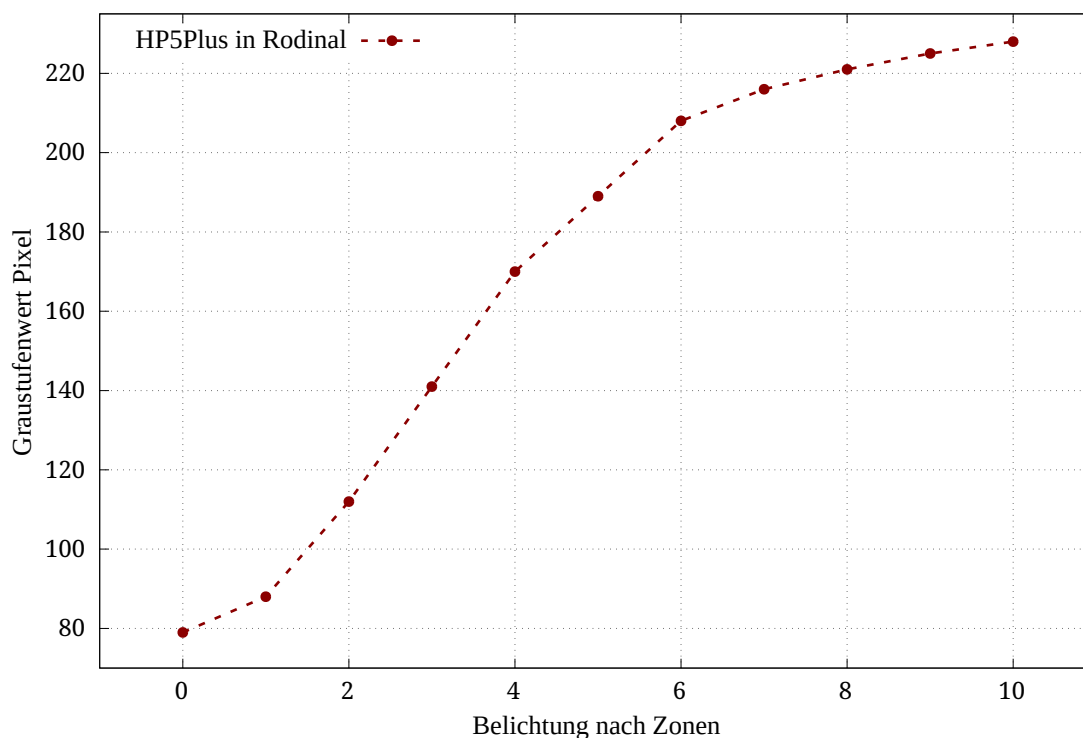


Abbildung 1.6: Typische S-Kurve eines photographischen Films. In den mittleren Helligkeiten ist die Beziehung zwischen Belichtung und Dichte annähernd linear. In den Lichtern und Schatten ist die Kurve flacher, die Helligkeitsverteilung wird komprimiert. Daten von https://www.scotty-elmslie.com/uploads/5/6/3/3/56337819/a_practical_guide_to_film_characteristic_curves.pdf.

1.11 Tageslicht als dynamische Beleuchtung

Tageslicht ist ein dynamisches Umweltphänomen.⁶² Sein Ursprung ist die Abstrahlung der Sonne. Durch den großen Abstand zwischen Sonne und Erde im Vergleich zum Durchmesser der Sonne sind die Lichtstrahlen, welche die Erde erreichen fast parallel, der maximale Winkel zwischen zwei Strahlen beträgt lediglich $0,5^\circ$. Die Sonne ist in diesem Sinne eine gerichtete Lichtquelle. Die Position der Sonne – und damit die Richtung aus der ihr Licht einstrahlt – ist durch die Drehung der Erde um ihre Achse von der Tageszeit abhängig. Durch die Schrägstellung dieser Achse relativ zur Ebene der Erdbahn hat die Jahreszeit einen Einfluss. Die Kugelgestalt der Erde macht den Sonnenstand von der geografischen Lage abhängig. Sonnenlicht ist folglich ein ortsgebundenes dynamisches Phänomen, dessen Charakteristik sich voraussehen aber nicht beeinflussen lässt (Abbildung 1.7).

Durch die Streuung des Sonnenlichts in der Atmosphäre entsteht mit dem Himmelslicht eine weitere Komponente des Tageslichts. Das Himmelslicht ist eine ungerichtet abstrahlende oder diffuse Lichtquelle. Allerdings wird die Helligkeitsverteilung über die gedachte Hemisphäre

⁶² Vergl. Bartenbach und Witting 2009, S. 45, Preetham, Shirley und Smits 1999.

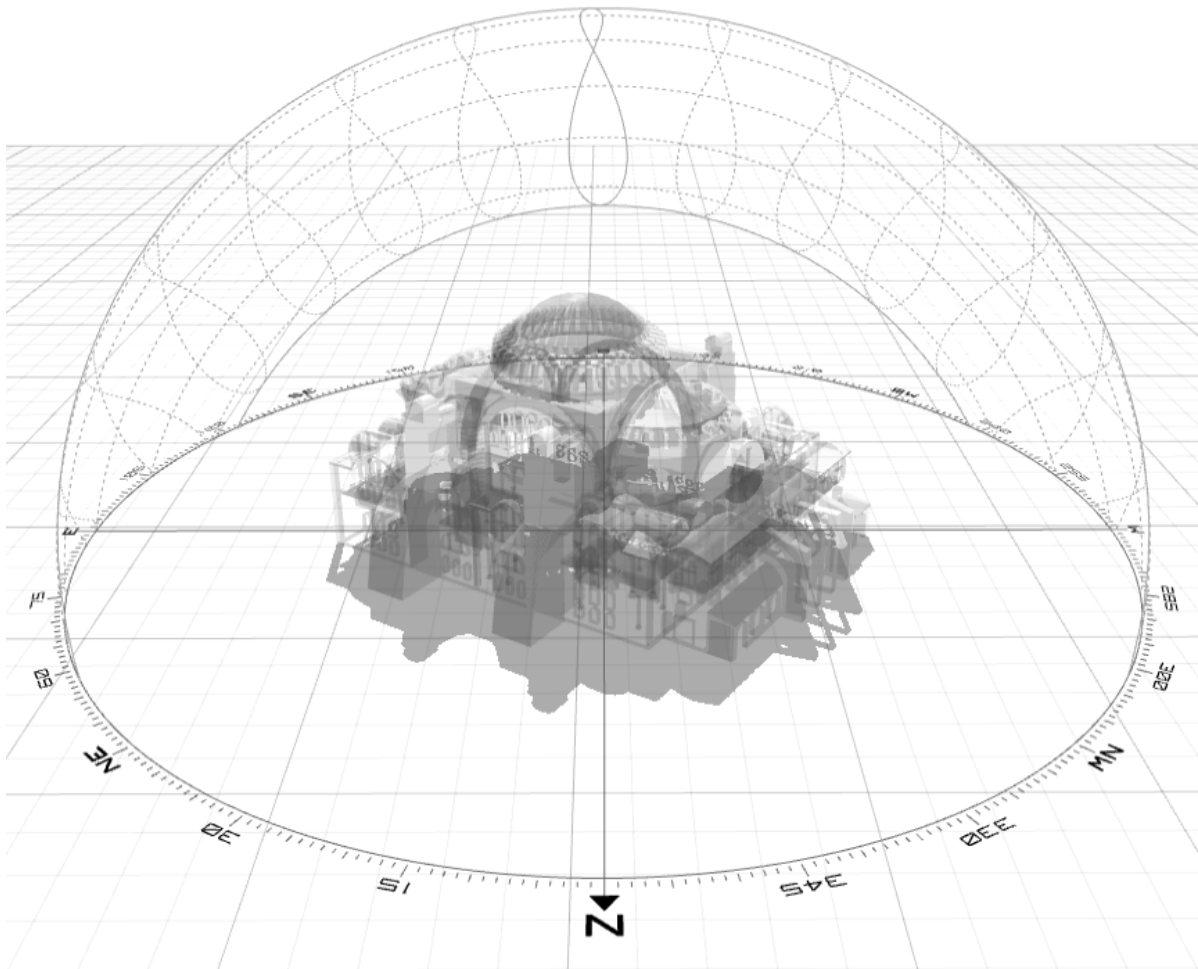


Abbildung 1.7: Sonnenstandsdiagramm für Istanbul mit dem Modell der Hagia Sophia. Quelle: Grobe, Noback und Inanici 2020

des Himmels vom Sonnenstand beeinflusst. Der Anteil des gestreuten Sonnenlichts ist vom Weg, den es durch die Atmosphäre zurücklegen muss abhängig und damit vom Höhenwinkel der Sonne. Damit ändert sich auch die Farbe von Sonnen- und Himmelslicht.

Einen großen Einfluss hat der Zustand der Atmosphäre, sprich das Wetter auf das Tageslicht. Wolken, aber auch Luftfeuchtigkeit und Staub beeinflussen die Streuung des Sonnenlichts und damit das Verhältnis von Sonnen- und Himmelslicht und deren absolute Intensität und Farbe. Diese Dynamik führt zu individuellen Lichtszenen und lässt sich in Modellen nur statistisch bewältigen.

Als dritte Komponente des Tageslichts kann man das Licht ansehen, das durch die Umgebung reflektiert oder abgehalten wird. Auch dieses versteht man als eine diffuse Lichtquelle, die für eine konkrete Umgebung richtungsabhängig ist. Das Umgebungslicht ist verschiedenen Dyna-

miken unterworfen: Die Umgebung kann Sonnenlicht abhängig vom Sonnenstand abschatten. Der abgehaltene Teil des Himmelslichts ist ebenfalls vom Sonnenstand beeinflusst. Auch für die Reflexion an Oberflächen spielt der relative Stand der Sonne und die Verteilung des auf sie einstrahlenden Himmelslichts eine Rolle. Die Reflexionscharakteristik der Oberflächen kann sich durch Regen, Schnee und Veränderung der Vegetation wandeln.

Diese vielfältige Dynamik macht den Reiz von Tageslicht aus (Abbildung 1.8). Sie ist zugleich eine Herausforderung für die Planung mit Tageslicht und die Analyse von Tageslichtbeleuchtung.

1.12 Historische Lichtkonzepte

Licht ist das dominante Medium in dem wir Architektur erfahren. Form, Farbe, Struktur des Baukörpers, die Oberflächengestaltung und die plastische Durchbildung sind ohne Licht und Schatten nicht wahrnehmbar. Beleuchtung steht in einem unauflösbaren Zusammenhang mit der künstlerischen und praktischen Gestaltung von Architektur. Als *Lichtkonzept* kann man alle Entscheidungen zusammenfassen, welche die Beleuchtung betreffen. Dazu gehören die verfolgten *Ziele* und alle eingesetzten *Mittel*, diese Ziele zu erreichen.⁶³ Beleuchtung ist aber nicht allein die Kunst der Lichtführung. Für jede Form von Architektur muss das Problem der Beleuchtung im Kontext anderer Aspekte wie Funktion, Statik, Produktion etc. gelöst werden. Sie kann daher nicht getrennt von der Entwicklung von Bautechnik und Gebäudetypen bewertet werden.⁶⁴ Bei der Untersuchung des symbolischen Gehalts muss dieser klar im Gestaltungskonzept nachgewiesen⁶⁵ und gegen den Hintergrund anderer Einflüsse abgegrenzt werden.

So stellt sich die Frage, wie man Lichtkonzepte strukturiert analysieren kann. Einen eingängigen, auch auf historische Lichtkonzepte anwendbaren Ansatz liefert der amerikanische Architekt Richard Kelly, der zu den Gründern der Lichtgestaltung als eigenständige Disziplin zählt.⁶⁶ In seinem einflussreichen Artikel *Lighting as an integral part of architecture* beschreibt er die Grundzüge der Lichtgestaltung aus seiner Sicht.⁶⁷ Er unterscheidet drei archetypische Erscheinungsformen von Beleuchtung und leitet daraus drei Grundelemente der Lichtgestaltung ab: *focal glow*, *ambient luminescence* und *play of brilliants*. Diese Grundelemente illustriert er mit meist archetypischen Lichtszenen und weist ihnen Funktionen in der Lichtgestaltung zu. Am besten lässt sich das in einer Tabelle gegenüberstellen (Tabelle 1.2).⁶⁸

⁶³ Eine Übersicht über historische Lichtkonzepte geben zwei Tagungsbände: Mondini und Ivanovici 2014 und Schneider und Wulf-Rheidt 2010a.

⁶⁴ Schneider und Wulf-Rheidt 2010b, S. 377 f.

⁶⁵ Schneider und Wulf-Rheidt 2010b, S. 377.

⁶⁶ Kelly hat Beleuchtungskonzepte für viele herausragende Gebäude entwickelt und mit bekannten Architekten zusammengearbeitet, z. B. bei der Beleuchtung des Seagram Buildings. Petty 2007.

⁶⁷ Kelly 1952

⁶⁸ Wegen der von Kelly sehr gezielt gewählten Begriffe wird auf eine Übersetzung verzichtet.



Abbildung 1.8: *Dynamisches Tageslicht: Blick vom Schreibtisch des Verfassers während der Niederschrift. Die Variation von Sonnenstand, Wetter, Vegetation, Schnee etc. resultiert in unzähligen, reizvollen Beleuchtungssituationen.*

Tabelle 1.2: *Richard Kellys Elemente der Lichtgestaltung*

Element	Archetypische Szenen	Funktionen
Focal glow	campfire limelight follow spot on the modern stage pool of light at your favorite reading chair shaft of sunshine that warms the end of the valley candlelight of the face flashlight of a stair	producing a significant composition of attention pulls together diverse parts separates the important from the unimportant sells merchandise helps people see
Ambient luminescence	uninterrupted light of a snowy morning foglight at sea twilight haze on a river where the shore and water and sky are indistinguishable art gallery with strip-lighted walls, translucent ceiling and a white floor known as “indirect” lighting	produces shadowless illumination minimizes form and bulk minimizes the importance of all things and people suggest the freedom of space can suggest infinity usually reassuring quiets the nerves is restful
Play of brilliants	Times Square at night eighteenth century ballroom of crystal chandeliers and my candle flames sunlight on a fountain of a rippling brook a cache of diamonds in an open cave the rose window of chartres night automobiles at a busy cloverleaf a night city from the air trees outside your window interlaced with the beams of spotlights sparkling cabinet of fine glassware	excites the optic nerve stimulates the body and spirit quickens the appetite awakens curiosity sharpens the wit distracting or entertaining

Ganslandt und Hofmann nehmen diese Kategorien auf und interpretieren sie funktional als »Licht zum Hinsehen« (Orientierung, Präsentation), »Licht zum Sehen« (Grund- und Arbeitsbeleuchtung) und »Licht zum Ansehen« (Informationsträger, Lichtskulptur).⁶⁹

Die Kunst der Lichtgestaltung sieht Kelly in einem geordneten Zusammenspiel dieser Elemente, von denen eines ein *Thema* vorgeben sollte, das die anderen ergänzen. Den wahrnehmenden Menschen sieht er naturgemäß im Zentrum des Entwurfs, erst in seinem Auge setzen sich die Elemente zusammen.

Eine wichtige Qualität von Beleuchtung ist für Kelly das »Maß an Diffusität«. Dieses beschreibt als Verhältnis gerichteter und diffuser Anteile der Beleuchtung.⁷⁰ Es ist u. a. abhängig von der Größe einer Lichtquelle und vom Reflexionsgrad der umgebenden Oberflächen. Es bestimmt die Härte der Schatten, die das Oberflächenprofil wirft. Eine Mischung aus gerichtetem und diffusem Licht führt zu einem gleichmäßigen kontinuierlichen Helligkeitsverlauf auf gekrümmten Oberflächen ohne das Teile der Form im Schatten verschwinden. So wird die Wahrnehmung komplexer dreidimensionaler Formen unterstützt. Dazu sollte das Licht nicht aus der Blickrichtung des Beobachters kommen.⁷¹ Hohe Diffusion führt zur Dämpfung von Glanzpunkten – das *play of brilliants* geht verloren. In einer allzu gleichmäßig ausgeleuchteten Szene treten unwichtige Details in den Vordergrund.⁷²

Die Beleuchtung einer Szene beeinflusst unsere Stimmung. Den Grund dafür sieht Lam in einem biologischen Bedürfnis nach Information. Ein vollkommen bedeckter Himmel erscheint düster, weil die große informationslose Lichtquelle das Fokussieren auf die interessanteren Objekte der Umgebung erschwert. An klaren Tagen ist der Himmel dunkler als diese Objekte und das direkte Sonnenlicht steigert die lokalen Kontraste und erleichtert das Erkennen dreidimensionaler Formen.⁷³ Eine nächtliche Straßenszene erscheint hell erleuchtet, wenn die bedeutsamen und interessanten Elemente angestrahlt werden. Im Gegensatz dazu kann ein Weg durch den Park dunkel und unsicher wirken, wenn durch die helle Beleuchtung des Weges alles andere im Dunkeln versinkt. Architektonische Gestaltung muss aus der Erfahrung von Beleuchtung, praktischen Anforderungen und künstlerischen Zielen Anforderungen an die Beleuchtung definieren und Mittel finden, diesen gerecht zu werden.

Um auf das Lichtkonzept eines historischen Gebäudes zu schließen, bieten sich zwei grundsätzlich unterschiedliche Herangehensweisen an: Man kann die religiösen, philosophischen und naturwissenschaftlichen Vorstellungen der Zeit bezüglich Licht und Architektur herausarbeiten und untersuchen, ob und wie sie im Gebäude konzeptionell umgesetzt worden sind (*top-down*). Alternativ kann man aus dem bestehenden Gebäude und der Rekonstruktion seines ursprünglichen Zustands die Wirkungen und Mittel herausarbeiten und davon auf die Intentionen der Erbauer schließen (*bottom-up*). Der erste Ansatz ist für die Hagia Sophia vielfach beschritten

⁶⁹ Ganslandt und Hofmann 1992, S. 24 f.

⁷⁰ Inanici 2007 nutzt den Begriff »directionality« und versucht dem Phänomen quantitativ beizukommen.

⁷¹ Lam 1992, S. 68.

⁷² Lam 1992, S. 56.

⁷³ Lam 1992, S. 54.

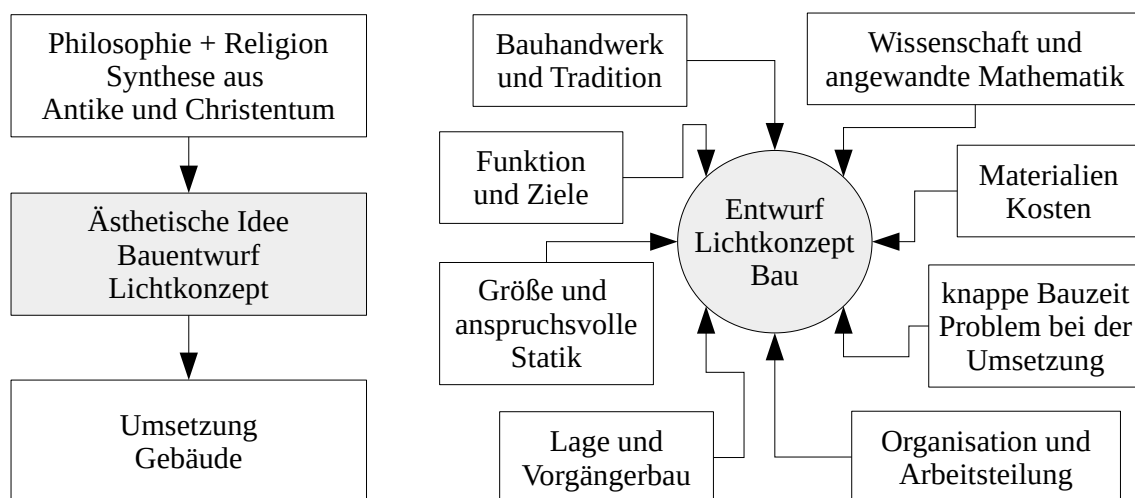


Abbildung 1.9: *Unterschiedliche Vorstellungen der Genese eines Lichtkonzepts: Umsetzung einer Idee und Entstehung im Spannungsfeld des Bau- und Entwurfsprozesses*

worden und in der Literatur in unterschiedlicher Qualität breit vertreten. Der zweite Ansatz ist in Bezug auf die Beleuchtung bisher nur selten versucht worden.⁷⁴

Mit den beiden Varianten stehen sich nicht nur deduktive und induktive Ansätze der Forschung gegenüber, sie betonen jeweils unterschiedliche Aspekte eines Lichtkonzeptes: Der Top-down-Ansatz versteht ein Lichtkonzept als die Umsetzung einer Idee und verknüpft diese vorwiegend mit historischen Texten und geisteswissenschaftlichen Vorstellungen. Der Bottom-up-Ansatz betont das materielle, unter den Bedingungen von Natur und Gesellschaft entstandene Ganze des Gebäudes. Dadurch setzt dieser Ansatz das Lichtkonzept in Relation zu den anderen bedeutsamen Aspekten des Entwurfs, etwa Problemen der Statik, Nutzung und Kosten. Ihm liegt ein anderes Verständnis des architektonischen Entwurfs zugrunde. In diesem müssen Entscheidungen multidimensionale Lösungen anbieten und werden durch eine arbeitsteilige Entstehungsweise bedingt, deren Verlauf nicht nur vom Willen eines gebildeten Architekten abhängig ist, sondern auch von der Tradition und Herstellungsmethoden der Bauleute und Kunsthandwerker und der Dynamik des Bauprozesses (Abbildung 1.9).

1.13 Gestaltungsmittel antiker und spätantiker Tageslichtarchitektur

Tageslichtarchitektur ist dadurch gekennzeichnet, dass sie keine Kontrolle über ihre primären Lichtquellen hat. Abgesehen von modernen Techniken der Lichtlenkung, für die es vereinzelt

⁷⁴ Z. B. Inanici 2014 und Grobe, Hauck und Noback 2010.

Vorbilder in der Antike gibt⁷⁵ und Besonderheiten wie durchscheinende Marmordächer⁷⁶, sind die wesentlichen Mittel überschaubar, die der Gestaltung mit Tageslicht zur Verfügung stehen: *Öffnungen* – einschließlich einer eventuellen Verglasung oder anderer transparenter oder transluzenter Materialien – und diffus oder glänzend *reflektierende Oberflächen*. Beide erlauben allerdings eine Mannigfaltigkeit von Variationen.

Fenster waren bis zur Erfindung des Fensterglases in der 2. Hälfte des 1. Jh. n. Chr. zumeist von geringer Größe. Die Beleuchtung von Aufenthaltsräumen war daher oft weit von modernen Standards entfernt.⁷⁷ Mit der Einführung der Verglasung – eine Errungenschaft der römischen Architektur – nimmt die Fensterfläche zu und es entstehen größere Möglichkeiten der Gestaltung.⁷⁸ Gut kann man diese Möglichkeiten am Bau von Thermen nachvollziehen, in denen Fensterglas wohl erstmals systematisch genutzt wurde: Haben frühe Bäder noch sehr kleine Öffnungen und wirken Dunkel, sind die späteren hell und von großen Fensterflächen geprägt.⁷⁹ Das sogenannte *Thermenfenster* das sich in einer Art Symbiose mit dem Kreuzgratgewölbe und dem Fensterglas innerhalb dieses Bautypus entwickelt, kann als Paradebeispiel für die Interaktion von Bautechnik, gesellschaftlicher wie technischer Funktion und Bautypus dienen. Die Entwicklung von Fensterglas wirkt sich auch auf andere öffentliche Bautypen aus und beeinflusst den Wohnungsbau.⁸⁰

Türen hatten in der Antike eine weit größere Bedeutung für die Beleuchtung von Räumen, oft waren sie die einzige natürliche Lichtquelle. So bei Tempeln wie dem Venus- und Roma-Tempel oder bei einigen römischen Mausoleen.⁸¹ Auch in Atrium- und Peristylhäusern spielten Türen eine wichtige Rolle für die Belichtung, auch repräsentativer, Räume.⁸²

Eine systematische Klassifizierung von Öffnungen als Gestaltungsmittel historischer Tageslichtarchitektur steht noch aus. Um sie genauer zu untersuchen und ihre Rolle in einem Lichtkonzept besser zu verstehen, sollte man aber folgende Eigenschaften näher betrachten:

- *Ausrichtung auf Sonne und Himmel*. Hoch angebrachte Fenster erlauben es Sonnenlicht bei hohen Sonnenständen tief in den Raum zu fallen. Auch der bedeckte Himmel ist in Nähe des Zenits am hellsten. Bei tieferen seitlich angebrachten Fenstern reicht das Sonnenlicht nur bei tiefen Sonnenständen in den Raum, sonst fällt es zum großen Teil auf den Boden in Nähe der Fenster. Die Himmelsrichtung eines Fensters ist bedeutend für Einfall diffusen Himmelslichts und entscheidend für den Einfall von Sonnenlicht in

⁷⁵ Hennemeyer 2010.

⁷⁶ Ohnesorg 2011.

⁷⁷ Schneider und Wulf-Rheidt 2010b, S. 377.

⁷⁸ Baatz 1991.

⁷⁹ »[...] Unsere Alten meinten, ein Bad wäre nicht warm, wenn es nicht dunkel wäre. [...] Jetzt aber nennt man jedes Bad ein Schabenloch, wenn es nicht so eingerichtet ist, dass es das volle Tageslicht durch weite Fenster empfängt; wenn man nicht im Bad auch von der Sonne gefärbt wird, und nicht von der Wanne aus auf Fluren und Meer sieht.« Seneca Epist. Bdn. 11–13, 86,4–8, nach: Pauly 1832.

⁸⁰ Z. B. Bachmann 2011, S. 133 ff. und Michielin 2019.

⁸¹ Rasch 2011, S. 246.

⁸² Thür 2011, S. 231 ff.

Abhängigkeit von Tages- und Jahreszeit. Auch relativ kleine Fenster können effizient zur Beleuchtung beitragen, wenn direktes Sonnenlicht durch sie einfällt. Einzelne kleine Fenster wirken dann als gerichtete Lichtquellen, wie die Strahler moderner Kunstlichtsysteme.⁸³ Das Opaion des Pantheons kann man als Archetyp dieser Art von Fenster bezeichnen. Dazu zählen hoch in Wänden oder in Gewölben eingebaute kleine Okuli oder Bogenfenster. Durch das Sonnenlicht entstehen in Abhängigkeit vom Glasmaterial mehr oder weniger scharf begrenzte Lichtflecken. Bei bedecktem Himmel bleibt der Effekt aus.

- *Größe.* Mit der Größe eines Fensters korreliert die Menge des einfallenden Lichts. Da das Auge sich an die Lichtverhältnisse anpasst, ist die absolute Größe eines Fensters allerdings in vielen Fällen von weniger großer Bedeutung. Wichtiger ist seine relative Größe im Vergleich zu anderen Fenstern. Die absolute Menge des einfallenden Tageslichts ist allerdings von Bedeutung, wenn es mit künstlichen Lichtquellen konkurriert.

Große Fensterflächen zeigen größere Teile des Himmels oder des Außenraums und erlauben so eine diffuse Beleuchtung mit weicheren Schatten. Kleinere Fenster können allerdings zu Gruppen zusammengefasst werden, die dann ebenfalls eine diffuse Charakteristik aufweisen können.

- *Position relativ zum Betrachter.* Liegen Öffnungen im Blickfeld, steigt der globale Kontrast, den das Auge zu bewältigen hat an. Das kann zur Blendung führen und die Wirkung lokaler Kontraste (*play of brilliants*) dämpfen. Der Rest eines Raumes wirkt dunkler, wenn sich das Auge an helle Fenster anpassen muss. Fenster im Rücken oder oberhalb des Blickfeldes lassen umgekehrt Räume heller, aber auch flacher erscheinen.
- *Form und Ausführung.* Streueigenschaften, Transmissionsgrad und Farbe einer Verglasung sind relevant für das Lichtmenge und Farbe, aber auch für das Verhältnis gerichteter und diffuser Beleuchtung durch ein Fenster. Auch die Form und Farbe der Fensterlaibungen hat Einfluss auf dieses Verhältnis und bestimmt darüberhinaus, welche Raumboberflächen gerichtetes, diffuses oder reflektiertes Licht erhalten. Schattenwerfende Unterteilungen bestimmen die Form von Lichtflecken auf Boden und Wänden.
- *Anordnung im Gebäude.* Im städtischen Kontext mit engen Gassen können hochliegende Fenster besser zur Beleuchtung beitragen.⁸⁴ Die Anordnung von Fenstern kann funktional erfolgen, z. B. verhindern hoch angebrachte kleine Fenster in Seitenschiffen, dass dort Gewölbe zu dunkel werden ohne dass sie in großem Umfang zur Gesamtbeleuchtung beitragen.

Vielfach muss sich die Anordnung der Fenster der Logik der Konstruktion unterordnen. Das gleiche gilt offenbar für die Symmetrie eines Gebäudes: Bei den – meist nach Osten orientierten – christlichen Basiliken werden die nach Norden gerichteten Fenster meist genauso wie die nach Süden gerichteten ausgeführt.

⁸³ Man sollte beachten, dass bei bedecktem Himmel solche direkten Lichtquelle ausfallen.

⁸⁴ Hillmann 2011.

Anders verhält es sich bei den Apsiden christlicher Kirchen. Diese sind nach Osten ausgerichtet und die Fenster liegen im Blickfeld, wenn sich das Auge auf den Altar richtet. Hier unterstreicht die Anordnung eine Hierarchie im Innenraum. Ähnlich können Haupt- und Seitenschiffe durch die Beleuchtung mittels Obergadenfenster hierarchisiert werden. Ähnliches gilt bei Zentralbauten durch die Fenster in einem Tambour oder in der Kuppel. Dieses Prinzip lässt sich verallgemeinern: Durch die Anordnung von Fenstern lässt sich ein Innenraum in hellere und dunklere Bereiche gliedern oder bereits existierende Gliederungen betonen und qualifizieren.

Für die Betrachtung der Anordnung gilt ferner, dass sich Fenster oft funktional oder konstruktiv Gruppen zuordnen lassen. Für die Untersuchung eines Lichtkonzepts ist es wichtig, die Beiträge einzelner Fenster oder Fenstergruppen zur Beleuchtung in Relation zueinander zu betrachten. Nach Kelly würde das bedeuten, ein Thema von seiner Verfeinerung zu unterscheiden.

Eine Oberfläche kann in zweifacher Weise Gestaltungsmittel sein: Wenn sie im Blickfeld des Betrachters liegt kann sie Thema des Lichtkonzeptes sein. Sie kann aber auch die Lichtverteilung durch spiegelnde oder diffuse Reflexion beeinflussen. Sie kann auch beide Eigenschaften aufweisen. Liegt sie im Blickfeld des Betrachters, können Eigenschaften wie Helligkeit, Farbe, Muster, Glanz, Profil etc. Teil eines *play of brilliants* oder Ziel eines *focal glow* sein. Sie wird zugleich Medium in einem narrativen Sinn. Liegt sie außerhalb des Fokus, kann sie vor allem zur *ambient luminescence* beitragen, besonders wenn sie einen hohen diffusen Reflexionsgrad hat.

Die Lage und Ausrichtung einer Oberfläche im Gebäude und relativ zu Fenstern bestimmt, von wo sie Licht empfangen. Böden erhalten oft Licht von der Sonne und vom Himmel, Gewölbe oft Licht, das vom Boden im Inneren oder außerhalb des Gebäudes reflektiert worden ist.

1.14 Beispiele römischer und spätantiker Lichtkonzepte

Eine systematische Geschichte der Beleuchtung römischer und spätantiker Bauten ist noch zu schreiben. Zur Einordnung des gewählten Baus genügen aber zunächst eine Reihe von Beispielen, einschließlich zweier Kirchen, die unter der Herrschaft Justinians errichtet wurden.

Unter den öffentlichen Bauten, die zum Bauprogramm römischer Kaiser gehören und bedeutende Innenräume aufweisen, gehören die großen Thermen, deren Hallen mit einer Kombination aus Kreuzgratgewölben und großen Halbbogenfenstern – den Thermenfenstern – beleuchtet sind.⁸⁵ Diese Fenster liegen deutlich oberhalb der Augenhöhe, so dass Blendung unwahrscheinlich ist. Sie werden ergänzt durch weitere großflächige Fenster, die oft einen Blick ins Freie zulassen.

Ein anderes Beleuchtungsprinzip kann man bei Bauten wie der Maxentius-Basilika erkennen. Hier sind die Seitenschiffe mit quer stehenden Tonnen eingewölbt. Das erlaubt große Fensterflächen in den Wänden. So wird der Innenraum zusätzlich zu den Obergaden-Fenstern – hier wohl

⁸⁵ Z. B. die Caracalla-Thermen: Yegül 2010, S. 110.

halbbogenförmige Fenster unter Kreuzgratgewölben – von den Seitenschiffen aus beleuchtet. Diesem Beleuchtungstypus entsprechen viele spätantike Bauten in denen der Hauptraum von Fenstern in Galerien und Seitenschiffen bzw. Umgängen beleuchtet wird.⁸⁶

Die Palastaula in Trier ist rundum mit großen Fenstern in zwei Ebenen versehen, von denen die untere schon deutlich oberhalb der Augenhöhe liegt. Es entsteht dadurch eine sehr gleichmäßige Beleuchtung.⁸⁷ Die flache Decke erhält im Vergleich zum Boden nicht sehr viel Licht, die acht Fenster der nach Norden orientierten Apsis dominieren den Blick entlang der Längsachse.

Der wesentliche Teil der Beleuchtung frühchristlicher Basiliken oder Zentralbauten wie St. Costanza funktioniert über die Obergadenfenster.⁸⁸ Das Hauptschiff oder der zentrale Raum werden von oben diffus beleuchtet und sind heller als die Seitenschiffe oder Umgänge. Diese erhalten Licht über Kolonnaden aus dem Hauptraum. Okuli oder andere hoch liegende kleine Fenster unterstützen die Beleuchtung der seitlichen oder umlaufenden Gewölbe. Diese Fenster sind bei den Basiliken nach Norden und Süden ausgerichtet oder erhalten im Fall der Zentralbauten Licht aus (fast) allen Himmelsrichtungen. Auch bei diesem Typ von Beleuchtung ist mit Blendung nicht zu rechnen. In der Apsis der Basiliken finden sich oft weiter unten liegende, teils größere Fenster, die den Altarraum hell hervorheben.

Zwei wichtige Kirchen des 6. Jhs. n. Chr. sind die kurze Zeit vor der Hagia Sophia errichtete Sergios- und Bakchos-Kirche⁸⁹ und die etwas später errichtete Kirche San Vitale in Ravenna. Erstere wird oft als Prototyp für den Bau der Hagia Sophia angesehen, letztere zeigt den Einfluss des Kaiserpaares schon in den bekannten Mosaiken. Beide sind als oktagonale Zentralbauten angelegt und weisen große Fenster unterschiedlicher Ausrichtung in den Hallen und Galerien auf, die den Hauptraum umgeben. Diese Fenster tragen wesentlich zur Beleuchtung der Raummitte bei. Im Gegensatz zu St. Costanza erscheint der Hauptraum daher nicht heller als die Hallen, die Galerien sind sogar deutlich heller. Bei beiden wird die Beleuchtung durch Fenster in den Kuppeln und großflächige Fenster in der Altarapsis ergänzt. Die Oberflächen des Altarraums werden durch im Vergleich zum Raumvolumen großen Fenster zusätzlich beleuchtet und dadurch deutlich hervorgehoben.⁹⁰

⁸⁶ Rasch 2011, S. 251.

⁸⁷ Rasch 2011, S. 246.

⁸⁸ Brandenburg 2005, S. 76 f.; Rasch 2011, S. 249.

⁸⁹ Auch kleine Hagia Sophia genannt.

⁹⁰ Vergl. die Analyse beider Bauten in: Schibille 2014a, S. 85–96.