

Kapitel 10

Simulationsanordnung und Berechnungsmethoden

In den vorangegangenen Kapiteln wurde die Grundlagenermittlung für eigentliche Simulation beschrieben. Es wurde gezeigt, wie in der Rekonstruktion ein geometrisches Modell entsteht und wie auf Basis physikalischer Messungen Materialmodelle hergestellt werden. Im Folgenden soll beschrieben werden, wie diese Teile zu einer Versuchsanordnung zusammengefügt werden und die eigentliche Berechnung durchgeführt wird. Noch fehlt aber ein wichtiger Teil: ein Himmelsmodell, das sich für das Untersuchungsprogramm konfigurieren lässt.

10.1 Himmelsmodelle für die Tageslichtsimulation verlorener Bauzustände

Die Wahl und Parametrisierung eines Himmelsmodells stellt den Ausgangspunkt einer Tageslichtsimulation dar. Das Himmelsmodell liefert für die Berechnung zumeist zwei separate Lichtquellen: das direkte Licht der Sonne und das diffuse Licht des Himmels. Wird ein vollkommen bedeckter Himmel gewählt, entfällt die Sonne als Lichtquelle. Ist sie vorhanden, wird die Sonne durch eine Lichtquelle repräsentiert, die eine variable Richtung und einen konstanten Raumwinkel aufweist. Der scheinbare Durchmesser der Sonne beträgt etwa $0,5^\circ$. Die Richtung der Sonne variiert mit Tages- und Jahreszeit. Dabei ist zu beachten, dass das kalendarische Jahr nicht mit dem astronomischen identisch ist¹ und die Tageszeit in der Simulation immer eine Ortszeit ist. Durch Bewölkung und Sonnenstand variiert das diffuse Himmelslicht in Helligkeit und Farbe sowohl insgesamt als auch über die Himmelsrichtung relativ zur Sonne, die von einem hellen Halo umgeben ist. Ergänzt werden die Modelle für den Himmel üblicherweise um eine für alle Richtungen unterhalb des Horizonts konstante diffuse Komponente, die das von der Umgebung, insbesondere dem Boden, reflektierte Licht simuliert.

Bei Wetterbeobachtungen werden üblicherweise die Intensität der direkten Sonneneinstrahlung und des diffusen Himmelslichts erfasst. Das kann mittels zweier Pyranometer geschehen.

¹ Man denke hier beispielsweise an Schaltjahre oder die Unterschiede zwischen dem julianischen und dem gregorianischen Kalender. Es gibt auch Schwankungen der Erdbahn und die Präzessionsbewegung der Erdachse.

Eines erfasst die globale Einstrahlung (GHI), also direktes Sonnenlicht und Himmelslicht gemeinsam. Beim zweiten wird die Sonne verdeckt, also nur die diffuse Einstrahlung (Diffuse Horizontal Irradiance (DHI)) erfasst. Die direkte Sonneneinstrahlung (Direct Normal Irradiance (DNI)) kann durch Subtraktion und den Höhenwinkel der Sonne ermittelt werden. Diese Daten werden üblicherweise zu statistisch optimierten Datensätzen für Orte oder Regionen zusammengefasst, beispielsweise in Form eines Typical Metrological Year (TMY).² Die erfassten Werte für die direkte Sonneneinstrahlung kann man unmittelbar zur Parametrisierung einer Lichtquelle im Modell nutzen. Um die Lichtverteilung am Himmel zu simulieren, bedarf es synthetischer Modelle. Diese fassen statistische Betrachtungen der Lichtverteilung bei typischen Wetterlagen zu einer Formel zusammen, die mit den gemessenen Werten parametrisiert wird.

Eine Reihe solcher Modelle sind in internationalen Standards definiert. Das einfachste ist ein Modell für einen vollkommen bedeckten Himmel (Commission Internationale de l’Eclairage (CIE) Overcast Sky), das zum Beispiel zu Sicherung einer minimalen Beleuchtung an einem Arbeitsplatz herangezogen wird. Dieses Modell wird ergänzt durch ein Modell für einen vollkommen klaren Himmel (CIE Clear Sky)³. Diese beiden Modelle stellen extreme Wetterlagen dar, deshalb definiert die neuere Fassung der Norm insgesamt 15 verschiedene Wettervarianten auf Basis eines gemeinsamen Modells.⁴ Das RADIANCE Programm gensky implementiert noch ein weiteres Modell für einen Himmel mittlerer Bewölkung (Intermediate Sky)⁵ nach einem Modell von Matsuura.⁶ Zur Vereinfachung von Berechnungen, die an den energetischen Eigenschaften des Tageslichts orientiert sind, wird der synthetische Himmel häufig in einzelne Flächen unterteilt.⁷ Die Modelle werden um das vom Boden reflektierte Licht ergänzt, das aus der GHI mit einem Reflexionsfaktor errechnet wird.

Präzise Wetterdaten, um diese Modelle zu parametrisieren, liegen für historische Zeiten üblicherweise nicht vor. Man weiß, dass mit lokalen Klimaveränderungen über den Lauf der Zeit zu rechnen ist, also heutige Daten nicht ohne weiteres übertragbar sind. Hier soll deshalb auf eine vereinfachte Annäherung zurückgegriffen werden, die im RADIANCE-Programm gensky implementiert ist. Dieses berechnet die Helligkeit des Himmel am Zenit (*zenith brightness*, $L_{v,z}$), die sonst aus der DHI abgeleitet wird, auf Basis des Höhenwinkels der Sonne (Altitude, h) mit folgenden Formeln:

$$L_{v,z}(h) = (8,6 \cdot \sin h + 0,123) \cdot 4,926 \quad [\text{cd m}^{-2}] \quad (10.1)$$

für den Overcast Sky,

$$L_{v,z}(h) = ((1,376 \cdot T - 1,81) \cdot \tan h + 0,38) \cdot 4,926 \quad [\text{cd m}^{-2}] \quad (10.2)$$

für den Clear Sky und

² Wilcox und Marion 2008.

³ Beide definiert in: CIE 003/E-1996 1996.

⁴ und zusätzlich den Overcast Sky in seiner ursprünglichen Fassung: CIE 011/E: 2003 2004.

⁵ In der Manpage gensky (Radiance developers 2020) fälschlicherweise als »CIE intermediate day« bezeichnet.

⁶ Mardaljevic 1999, S. 172.

⁷ Tregenza 1987, Bourgeois, Reinhart und Ward 2008.

$$L_{v,z}(h) = \frac{(1,376 \cdot T - 1,81) \cdot \tan h + 0,38 + 8,6 \cdot \sin h + 0,123}{2} \cdot 4,926 \quad [\text{cd m}^{-2}] \quad (10.3)$$

für den Intermediate Sky.

Der Parameter T steht für die Trübung des Himmels (*turbidity*), die in gensky einen Standardwert von 2,45 hat.

Hier wurde ausschließlich mit standardisierten synthetischen Himmelsmodellen gearbeitet. Diese enthalten allerdings kein Modell für die Farbigkeit des Sonnen- und Himmelslichts. Auch dafür gibt es Modelle⁸ die in RADIANCE allerdings nicht implementiert sind. Eine Methode, welche die Farbigkeit des Sonnen- und Himmelslichts in Angriff nimmt, muss neben einem durchgängigen Farbmanagement auch ein Modell für die Farbadaption des Sehapparates umfassen. Das würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen, wäre aber durchaus von Interesse für die zukünftige Erforschung des Lichts der Hagia Sophia.

Synthetische Himmelsmodelle zeigen eine kontinuierliche Lichtverteilung. Wolken sind aber über den Himmel zumeist ungleichmäßig verteilt, sodass sich eine diskontinuierliche Lichtverteilung ergibt. Mit HDR-Aufnahmen des *Image Based Lighting*⁹ kann man die Wirkung konkreter Beleuchtungssituationen und zudem Einflüsse der Umgebung aufzeigen. Das kann eine Mannigfaltigkeit von Wolkenformationen und Wetterphänomene umfassen, die Veränderung der Vegetation im Jahresverlauf, die Licht- und Schattenverteilung in der Umgebung oder besondere Konstellationen wie die Reflexion der Sonne auf einer großen Wasserfläche oder die Farben der Umgebung im Licht der Morgensonne. *Image Based Lighting* wird in Computerspielen und Hollywoodfilmen im großem Umfang eingesetzt, weil die subtilen Auswirkungen der Farb- und Lichtverteilung der Umgebung den Realismus einer Szene spürbar erhöhen.¹⁰ Auch dies wäre von Interesse für die Erforschung des Lichts der Hagia Sophia, setzt aber unter anderem präzise Annahmen zur historischen Umgebung des Gebäudes voraus.

10.2 Berechnung der Lichtverteilung mit Radiance und der Photonmap-Erweiterung

Die bis vor kurzem veröffentlichten Bilder des Darmstädter Modells der Hagia Sophia haben sich dem Methodenspektrum von »classic« RADIANCE bedient und damit Verfahren des Backward Raytracing. Es hat sich gezeigt, dass diese Verfahren bestimmte Aspekte der Lichtverteilung der Hagia Sophia nicht adäquat wiedergeben können, insbesondere die Wirkung der Reflexionen des goldenen Glasmosaiks. In den berechneten Bildern traten als Artefakte unterschiedlich große goldene Flecken auf, die zeigten, dass Licht im Mosaik reflektiert wird, aber diese Treffer waren von viel zu geringer Dichte, um den tatsächlichen Effekt wiederzugeben.

⁸ Preetham, Shirley und Smits 1999; Hosek und Wilkie 2012.

⁹ Debevec 2005; Inanici 2013.

¹⁰ Auch die Malerei hat sich diesem Thema nicht verschlossen: Man denke an verschiedene Impressionisten, William Turner oder an Vermeers Stadtansicht von Delft.

Mit der Modellierung streuenden Fensterglases zeigte sich eine weitere Grenze der klassischen RADIANCE-Verfahren. Die direkte Suche nach Lichtquellen kommt durch den gesetzten Roughness-Parameter nicht mehr zum Einsatz. Die Fenster müssen nun durch die sogenannte *indirekte* Berechnung gefunden werden, was bei der großen Anzahl und geringen Größe der Scheiben nicht mehr mit ausreichender Genauigkeit möglich ist, sollten die Berechnungszeiten nicht undurchführbar lang werden. Abbildung 10.1 zeigt das Ergebnis einer solchen Berechnung. Die Berechnung des relativ kleinen Bildes benötigte 42 Stunden und zeigen Fehler in Form eines Rauschens.¹¹ Je weiter die Fenster von den Flecken, die das Sonnenlicht auf den Boden wird entfernt sind, desto größer ist dieses Rauschen. Das zeigt, dass eine Auseinandersetzung mit den Berechnungsverfahren für die Lichtsimulation komplexer historischer Bauzustände notwendig ist.

Für den Konferenzbeitrag zur AIHV21¹², der die Streuwirkung des Fensterglases zum Inhalt hatte, wurden daher erstmals Verfahren der *Photonmap*-Erweiterung¹³ eingesetzt, welche die klassischen RADIANCE-Verfahren des Backward Raytracing mit einem Forward-Raytracing-Schritt kombiniert und damit die beiden genannten Effekte berechenbar macht. Die Photonmap-Erweiterung konnte erst zum Einsatz kommen, nachdem in den Arbeiten zum Konferenzbeitrag eine Reihe von Verbesserungen vorgenommen wurden, ohne die, im Falle der Hagia Sophia, Ergebnisse verfälscht worden wären.¹⁴ Erst in der vorliegenden Arbeit kann dieses Verfahren für die systematische Analyse der Lichtverhältnisse im 6. Jh. genutzt werden.

10.2.1 Backward Raytracing in Radiance

Backward Raytracing generiert Bilder einer Szene mit Hilfe von Sehstrahlen, die vom Augpunkt des Betrachters ausgehen. Diese Strahlen folgen den Gesetzen der *geometrischen Optik*, folglich kann die Reflexion und Brechung der Strahlen an getroffenen Oberflächen wiedergegeben werden. Lichtsimulation mit diesem Verfahren ermittelt die Leuchtdichten oder Beleuchtungsstärken innerhalb einer solchen Szene, indem sie nach *direkten* und *indirekten* Lichtquellen sucht.¹⁵ Trifft ein Sehstrahl eine Oberfläche, wird die Leuchtdichte in dieser Richtung ermittelt, indem mit Hilfe des Materialmodells verschiedene Komponenten der einstrahlenden Beleuchtung verrechnet werden.¹⁶ Diese Komponenten werden ermittelt, indem weitere Teststrahlen – die den Sehstrahlen entsprechen – losgeschickt werden. Ist das Ziel eines Teststrahls keine Lichtquelle,

¹¹ Die Berechnung fand mit der gleichen Hardware statt wie die späteren Berechnungen mit der Photonmap. Als Parameter für die Berechnung wurden gesetzt: `rpict -n 16 -ab 2 -ar 64 -aa 0.025 -ad 2048 -as 0`.

¹² Noback, Grobe und Lang 2021.

¹³ Schregle 2004; Schregle, Grobe und Wittkopf 2016.

¹⁴ Zusammengefasst in einer unveröffentlichte Technote. Wichtige Aspekte sind in Grobe 2019b dokumentiert.

¹⁵ Das geschieht in RADIANCE für drei Farbkanäle mit einem gemeinsamen Exponenten.

¹⁶ D. h. die integrale Formel der RADIANCE *equation* wird gelöst: Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 495.

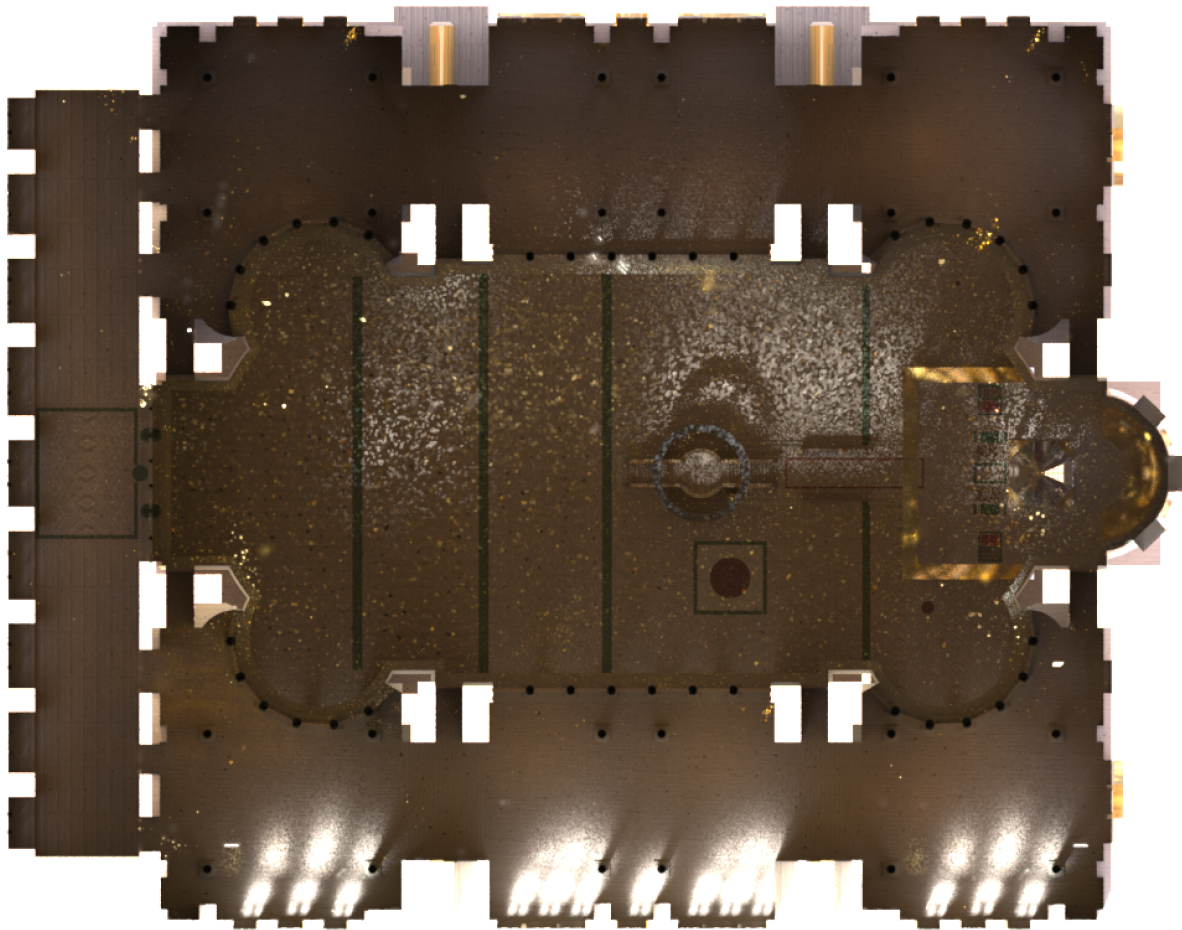


Abbildung 10.1: Die Hagia Sophia mit dem neuen Glasmmodell berechnet mit RADIANCE classic: Mit zunehmendem Abstand wird die Wahrscheinlichkeit eine der hellen Glasscheiben zu finden immer geringer und damit die Fehler größer. Das Goldmosaik bewirkt über den Grundriss verteilte goldene Flecken.

beginnt der Prozess von neuen.¹⁷ Das Verfahren bedient sich also der *Rekursion* und braucht mit jedem zusätzlichen Schritt mehr Rechenleistung.

Die einzelnen Komponenten werden auf verschiedene Weise ermittelt. RADIANCE kombiniert dazu *deterministische* mit *stochastischen* Herangehensweisen zu einem hybriden Verfahren. Rein deterministische Raytracer ermitteln die Beleuchtung eines Punktes auf einer Oberfläche, indem sie von dort einen Teststrahl zum Mittelpunkt einer Lichtquelle schicken und dabei feststellen, ob ein Objekt dazwischen liegt, das diese Lichtquelle verdeckt. Spiegelung und Brechung lassen sich so berechnen indem Rekursion angewandt wird. Diese Berechnung liefert immer das gleiche Ergebnis – ist also deterministisch. Das Verfahren ist im Vergleich sehr

¹⁷ Es gibt gewöhnlich weitere Abbruchbedingungen, die aber praktischen Erwägungen oder Verfeinerungen des Verfahrens geschuldet sind.

schnell, resultiert aber u. a. in unnatürlich harten Schatten. Bestimmte Komponenten wie die Interreflexion zwischen diffusen Oberflächen lassen sich so nicht berechnen.

Phänomene wie die diffuse Interreflexion oder auch die Streuung direkten Lichts durch eine Oberfläche lassen sich mit stochastische Raytracer berechnen. Diese schicken von einem Punkt Teststrahlen in zufällige Richtungen los und integrieren das Ergebnis mit Hilfe des Materialmodells. Der Prozess wird rekursiv wiederholt, bis eine Lichtquelle getroffen wird. Limitiert wird das Verfahren durch den Zusammenhang zwischen der Anzahl der losgeschickten Strahlen und der erreichten Genauigkeit. Eine geringe Genauigkeit manifestiert sich in einem Rauschen. Ist aber die Wahrscheinlichkeit, dass ein Phänomen erfasst wird sehr gering, zum Beispiel, dass eine kleine Lichtquelle getroffen wird, müssen sehr viele Teststrahlen losgeschickt werden, um eine ausreichende Genauigkeit zu erhalten. Das Problem wird dadurch verschärft, dass bei jedem Treffer des Teststrahls auf einer Oberfläche wieder eine große Anzahl von Teststrahlen losgeschickt werden muss, die Anzahl der Interreflexionen also als Exponent in die Berechnung der notwendigen Anzahl der zu verfolgenden Teststrahlen eingeht. Daher kombiniert RADIANCE beide Herangehensweisen und steigert die Effizienz noch durch weitere Optimierungen. Allerdings ist die Genauigkeit bestimmter Berechnungskomponenten weiterhin von der Anzahl der losgeschickten Teststrahlen abhängig und damit von der verfügbaren Zeit und Rechenleistung.

Auf eine Frage wurde bisher nicht eingegangen, nämlich, warum der Weg des Lichts rückwärts vom Auge des Betrachters und nicht von den Lichtquellen aus nachverfolgt wird. Ein solches, reines Forward Raytracing ist nur als stochastisches Raytracing denkbar. Dabei ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein reflektierter Lichtstrahl den Augpunkt trifft, sehr gering. Um überhaupt ein vollständiges Bild zu erhalten, muss die Berechnung extrem lange dauern. Warum ein solcher Berechnungsschritt, wie in der Photonmap-Erweiterung implementiert, dennoch für die Berechnung der Hagia Sophia hilfreich ist, zeigt sich, wenn man die vom klassischen RADIANCE eingesetzten Verfahren und ihre Limitierungen noch etwas genauer betrachtet.

RADIANCE unterscheidet zunächst direkte und indirekte Berechnung. Direkt ist die Suche nach Lichtquellen, die von einem Punkt auf einer Oberfläche aus sichtbar, also nicht verschattet sind (*deterministisches Raytracing*). Im Fall der Berechnung der Hagia Sophia kommen als Lichtquellen die Sonne und der Himmel in Frage. Von diesen kommt wieder nur die Sonne für die direkte Berechnung in Frage. Der Himmel befindet sich in allen Richtungen und wird daher bei der indirekten Berechnung erfasst. Im Modell der Hagia Sophia ist die Sonne von keiner Stelle im Innenraum direkt sichtbar, es liegt zumindest eine Glasscheibe dazwischen. Das ist so lange kein Problem, wie das Glas klar ist.¹⁸ Streut das Glas das Sonnenlicht aber, kommt auch die Sonne nicht mehr für die direkte Berechnung in Frage und muss ebenfalls von der indirekten Berechnung ermittelt werden. Die schnelle und genaue direkte Berechnung für die Verteilung von Sonnenlicht und Schatten fällt also komplett aus.

Die beiden Verfahren, die zum Zuge kommen, sind Teil der indirekten Berechnung. Sie werden als *specular sampling* und *indirect irradiance caching* bezeichnet. Das erste nimmt sich des Lichts an, dass *gerichtet reflektiert* oder an einer Oberfläche *gebrochen* wird. In Bezug auf

¹⁸ Der Grad an Transparenz wird mit der Leuchtdichte der Lichtquelle multipliziert.

die Reflexion ist es das Licht, dass nach dem Muster Einfallswinkel = Ausfallswinkel reflektiert wird. Im Fall der Hagia Sophia ist dies das Licht der Fenster, die sich in den glänzenden Materialien spiegeln, aber auch das Sonnenlicht, das in den direkt sichtbaren Scheiben gestreut wird.¹⁹ Das Verfahren schickt, durch den Roughness-Parameter des Materialmodells gesteuert,²⁰ nach einem stochastischen Verfahren²¹ Teststrahlen rund um den Einfallswinkel des Lichts los, der ja durch die Ausrichtung der Fläche zum Augpunkt bekannt ist. Es kann so auch den seidenmatten Glanz des Marmors wiedergeben und die transluzente Wirkung des Fensterglases. Beim Finden der Sonne als Lichtquelle für die Beleuchtung von Oberflächen hilft das specular sampling wenig, da es ja nur solche Lichtquellen erfassen kann, die nahe des gerichteten Reflexionswinkels liegen. Sehr wohl helfen kann das Verfahren aber bei der Einschätzung der Blendung durch die Fenster, da es das Aufleuchten der Scheiben im Gegenlicht berechnen kann.

Im Fall der Hagia Sophia ist das zweite Verfahren der indirekten Berechnung, das *indirect irradiance caching*, letztlich für fast alles zuständig, auch für Phänomene, für die es explizit nicht entwickelt wurde. Das Verfahren ist dafür gedacht, die indirekte Beleuchtung zu berechnen, die durch die Interreflexion zwischen den Oberflächen entsteht. Dabei ist in den meisten Fällen davon auszugehen, dass sich Kontraste innerhalb einer Szene im Rahmen halten, bzw. sich im Raum auf verhältnismäßig wenige helle Flächen eingrenzen lassen. Ein typisches Anwendungsbeispiel wäre ein Raum mit einem größeren Fenster. Hier behandelt die indirekte Berechnung sowohl das Licht des Himmels, das im Fenster sichtbar ist, also auch die indirekte Beleuchtung der Szene durch den hellen Fleck, der durch einfallendes Sonnenlicht im Raum entsteht. Wohlgedacht nicht, wie der Fleck selbst zustande kommt, der ist durch die direkte Berechnung ermittelt worden und die Sonne selbst wird als Lichtquelle für die indirekte Berechnung ausgeblendet, sofern sie durch die direkte Berechnung erfasst wird.²² Im Falle des Lichtflecks kommt es zu sichtbarer Interreflexion. Eine gedachte Wand nahe dem Fleck erscheint heller und erhellt zugleich andere Wände des Raums.

Das Verfahren erfasst die genannten Phänomene, indem es am Schnittpunkt des Strahls mit der Oberfläche, stochastisch über eine gedachte Hemisphäre verteilt, in viele Richtungen neue Teststrahlen losschickt. Das Kernproblem dieser Berechnung ist, dass keine Annahmen getroffen werden können, aus welcher Richtung *wichtige* Beiträge zur Beleuchtung des untersuchten Punktes kommen und aus welchen nicht. Die Gefahr besteht, dass wichtige Lichtquellen übersehen werden, z. B. der Himmel im Fenster des gedachten Raums nicht getroffen wird. Man muss sehr viele Teststrahlen losschicken, um eine gute Genauigkeit zu erhalten. Das wirkt sich aber auf die benötigte Rechenzeit aus. Daher bedient sich das Verfahren einer Reihe von Optimierungen. So wird die Hemisphäre in Felder aufgeteilt und dort, wo sich benachbarte Felder deutlich voneinander unterscheiden, werden in einem zweiten Schritt zusätzliche Teststrahlen hingeschickt. Zum anderen werden die errechneten Ergebnisse gespeichert (*ambient*

¹⁹ Gemeint ist hier die abgelenkten Sonnenstrahlen innerhalb des Peaks im Gegensatz zum diffus gestreuten Hintergrund.

²⁰ Siehe: Abschnitt 7.1

²¹ Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 526 ff.

²² Ausgeblendet werden auch die Bereiche, die vom specular sampling erfasst werden.

cache) und für andere Punkte nach anpassbaren Kriterien wiederverwendet. Ferner wird die Berechnung nach einer einstellbaren Anzahl von Reflexionsschritten abgebrochen oder wenn die Teststrahlen einen bestimmaren Beitrag zur Beleuchtung unterschritten haben (Parameter - lw). Diese Optimierungen machen die indirekte Beleuchtung erst berechenbar, ihre Parametrisierung erfordert Erfahrung, weil sie an die jeweilige Szene angepasst werden muss.²³

Bei aller Optimierung scheitert die indirekte Berechnung bei der Suche nach kleinen, konzentrierten Lichtquellen wie der Sonne. Das gilt auch für die vielen kleinen Scheiben, die die Verglasung der Hagia Sophia ausmachen. Das Problem ist durch die Modellierung des streuenden Fensterglases offensichtlich geworden, da diese dann wie selbstständige Lichtquellen wirken. Es hat die Ergebnisse aber schon immer beeinflusst. Die Anfangs erwähnten goldenen Flecken entstehen bei diesem Berechnungsschritt (Abbildung 10.1). Die Sonne spiegelt sich im goldenen Glasmosaik. Da dieses eine Roughness größer als Null besitzt, also die gerichtete Beleuchtung streut, ist es ein Fall für die indirekte Berechnung. Wird ein Punkt auf der Oberfläche berechnet, kann es sein, dass diese winzige Spiegelung der Sonne getroffen wird. Wenn das der Fall ist, erhält der Punkt rechnerisch sehr viel Licht. Bei der Berechnung der Punkte daneben gibt es keinen solchen Zufallstreffer, sie sind viel dunkler. Durch die Eigenheiten des *ambient cache* entstehen aus den Treffern kreisrunde helle Flecken verschiedener Größe. Diese Flecken könnte man als lästige Artefakte ignorieren und in den Bildern retuschieren, wären sie nicht ein Hinweis darauf, dass ein Phänomen nicht erfasst werden kann. Es ist nämlich denkbar, dass das Licht der Sonne vom Goldmosaik auf den gekrümmten Gewölbeflächen an bestimmten Orten wie von einem Brennspeigel konzentriert wird. Einer der Architekten der Hagia Sophia, Anthemios von Tralleis hat sich mit Brennspeigeln beschäftigt, daher ist es denkbar, dass solche Effekte sogar bewusst eingesetzt wurden.

Der optische Fachbegriff für derartige Phänomene heißt Kaustik und trägt mit dem altgriechischen Wort »verbrannt« noch seine Herkunft von den Versuchen mit Brennspeigeln in sich. Aber auch die Lichtphänomene durch bewegte Wasseroberflächen oder Muster, die durch die Reflexion von Sonnenlicht in Fensterscheiben auf den Wänden gegenüberliegender Häuser entstehen gehören zu dieser Klasse. Für die moderne Lichtsimulation von besonderem Interesse sind Reflexionen an gekrümmten Fensterlamellen, die zur Lichtlenkung eingesetzt werden und die Berechnung von sogenannten Lightpipes, die es ermöglichen, Tageslicht an dunkle Orte in Gebäuden zu bringen, indem Licht mit Hilfe von Speigeln in einem langen Kasten oder Rohr immer wieder reflektiert wird. Dazu gehören auch alle Phänomene, die durch Linsen oder prismatische Konstruktionen Licht lenken oder konzentrieren. Alle diese Phänomene können von den klassischen RADIANCE Verfahren nur unzureichend erfasst werden und führten zur Entwicklung der Photonmap-Erweiterung.²⁴

²³ Detaillierter als in dieser knappen Zusammenfassung wird das Verfahren hier beschrieben: Larson, Shakespeare, Ehrlich u. a. 1998, S. 535 ff.

²⁴ Schregle 2004.

10.2.2 Forward Raytracing mit der Photonmap-Erweiterung

Die Photonmap-Erweiterung implementiert einen zusätzlichen Berechnungsschritt, in dem Forward Raytracing zum Einsatz kommt. Es werden also Teststrahlen von den Lichtquellen aus losgeschickt. Die Erweiterung ersetzt bestimmte Teile der klassischen Berechnungsverfahren und wird mit anderen Teilen des Backward Raytracings kombiniert. Durch die Kombination werden oben erwähnte Limitierungen des Forward Raytracing behoben, man spricht von Bidirectional Raytracing. Die Szene wird also von beiden Richtungen aus untersucht. Dazu ist in RADIANCE eine komplexe Interaktion der Verfahren nötig, die nicht ganz einfach zu implementieren ist.

Im Fall der Hagia Sophia erfolgt die Berechnung wie folgt: In einem vorgelagerten Schritt werden zwei *photonmaps* erzeugt. Die eine enthält *caustic photons*, die andere *global photons*. Im Abstrahlwinkel der Lichtquellen werden nach stochastischen Verfahren eine große Anzahl von Photonen, also Teststrahlen, die einen Teil des Lichtstromes der Lichtquelle repräsentieren, losgeschickt. Für die Sonne und den Himmel geschieht das allerdings nicht direkt, da sie nicht an eine Geometrie in der Szene gebunden sind. Stattdessen werden die Photonen von sogenannten *photon ports* emittiert, die in der Ebene der Glasscheiben liegen. Für alle Photonports wird ermittelt, wieviel Licht sie jeweils von Sonne und Himmel erhalten. Dabei wird die Verschattung durch außenliegende Geometrie geprüft, allerdings nicht das von außenliegender Geometrie reflektierte Licht.²⁵ Das ist eine wichtige Einschränkung des Verfahrens. Die Sonne beispielsweise, die von den außen liegenden Teilen der großen Bögen oder den Fensterwandungen reflektiert wird, erhellt nicht den Innenraum.

Die losgesandten Photonen treffen auf die Oberflächen der Szene. Dort können sie:

1. in gerader Linie reflektiert, transmittiert oder gebrochen,
2. gerichtet gestreut,
3. diffus gestreut,
4. oder absorbiert werden.

Was davon mit einem konkreten Photon passiert, wird anhand einer Wahrscheinlichkeitsberechnung auf Basis des jeweiligen Materialmodells entschieden. Entscheidet der Algorithmus, das Photon zu absorbieren, ist seine Reise zu Ende. In den anderen Fällen wird das Photon weitergeschickt, bis es andere Oberflächen der Szene trifft. Im Falle der ersten Interaktion des Photons mit einer Oberfläche wird lediglich gespeichert, welcher Art die Interaktion (1–3) war. Wenn das Materialmodell eine diffuse Komponente aufweist, wird bei der zweiten und weiteren Interaktionen der Ort der Interaktion, die Oberflächennormale an diesem Ort und der Lichtstrom der Lichtquelle in einer der Photonmaps gespeichert.²⁶ Waren die vorangegangenen Interaktionen diffuser Natur (2), wird das Photon in der *global* Photonmap abgelegt, sonst (1, 3)

²⁵ Schregle 2015b, S. 10.

²⁶ Die erste Interaktion zwischen den Photonen und einer Oberfläche wird anders behandelt, weil die direkte Beleuchtung einer Oberfläche durch eine Lichtquelle weiterhin über die direkte Berechnung des nachfolgenden Backward Raytracing behandelt wird. Schregle 2015b, S. 42.

in der *caustic* Photonmap. Es werden so lange Photonen von den Lichtquellen losgesandt, bis in den Photonmaps die jeweils voreingestellte Anzahl von Photonen abgelegt worden ist.

Eine Besonderheit sind die mit den Änderungen an der Photonmap eingeführten *primary photons*. Diese werden nur für ausgedehnte Lichtquellen wie den Himmel losgesandt. Sie werden im Falle von diffus streuenden Oberflächen abgelegt, wenn sie von diesen Lichtquellen direkt beleuchtet werden oder Licht von diesen Lichtquellen durch nicht streuende Transmission, Brechung oder Spiegelung erhalten.²⁷

Ist die vorgelagerte Berechnung abgeschlossen, wird mit dem Verfahren des Backward Raytracing fortgefahren. Treffen die von Augpunkt losgesandten Strahlen eine Oberfläche, werden die schon bekannten Komponenten der Leuchtdichte ermittelt:

1. Die direkte Beleuchtung der Oberfläche wird mittels Teststrahlen zu den Lichtquellen ermittelt (*shadow testing*).²⁸
2. Licht das gerichtet gestreut wird, wird weiterhin mit Teststrahlen rund um den Einfallswinkel ermittelt (*specular sampling*).²⁹
3. Die Berechnung der diffusen Beleuchtung wird anhand der Photonmaps ermittelt. Dabei wird der Betrag der Photonen der *caustic* Photonmap direkt ermittelt, indem rund um den Auftreffpunkt der Teststrahlen der ersten Iteration so lange Photonen eingesammelt werden, bis eine voreingestellte Zahl erreicht ist (*nearest neighbour search*). Wie bei der bisherigen diffusen Berechnung werden Teststrahlen über die Hemisphäre verteilt losgeschickt. Wo sie auftreffen, wird der Beitrag der Photonen in der *global* und *caustic* Photonmap ermittelt. Zusätzlich werden auch hier Beiträge von Lichtquellen ermittelt, die direkt sichtbar sind.³⁰ Im Fall der Hagia Sophia liegen aber alle Lichtquellen hinter streuenden (transluzenten Glasscheiben), wurden also für diesen Teil der diffusen Berechnung von der Photonmap erfasst. Aus dem gleichen Grund wird auch keine Suche nach gerichtet gestreutem Licht für diesen Teil der diffusen Berechnung durchgeführt.

10.3 Parametrisierung und Ressourcenverbrauch der Berechnung

Für die Berechnung standen insgesamt drei Workstations für etwa sechs Wochen zur Verfügung. Diese sollten optimal ausgenutzt werden, um das umfangreiche Untersuchungsprogramm abzuarbeiten und dabei eine möglichst hohe Qualität der Ergebnisse zu erreichen. Neben der

²⁷ Grobe 2019b, S. 4.

²⁸ Das Gleiche gilt für direkt sichtbare Lichtquellen und solche, die durch Spiegelung und Brechung sichtbar werden.

²⁹ Das ist eine der Änderungen, die an der ursprünglichen Photonmap vorgenommen werden musste. Grobe 2019b, S. 3 ff.

³⁰ Das gilt auch Lichtquellen der Typen *light* (Sonne) und *spot light*, wenn sie hinter transparenten Oberflächen liegen, die das Licht nicht brechen.

Berechnungszeit musste der Verbrauch an Arbeitsspeicher als absolute Grenze beachtet werden und ein Optimum zwischen Arbeitsspeicherverbrauch und Parallelisierung gefunden werden.

Häufig werden Berechnungszeit und Ressourcenverbrauch bei Publikationen über Lichtsimulation nicht weiter betrachtet. Erfahrungen mit der Größe und Komplexität des Modells der Hagia Sophia haben aber gezeigt, dass man sich bei der Berechnung nah an den Grenzen des Möglichen bewegt und sich die Arbeit mit solchen historischen Modellen von Berechnungen moderner Gebäude unterscheidet. Im Untersuchungsprogramm sollen zudem Aspekte wie die gerichtete diffuse Streuung im Glas und auf den Marmoroberflächen, sowie die Wirkung des goldenen Glasmosaiks im Fokus stehen, Aspekte also, die für die Tageslichtsimulation moderner Bauten selten relevant sind. Der Ressourcenverbrauch ist also von Interesse für die Adaption der Methoden für die Tageslichtsimulation historischer Bauzustände. Es wurden vorab eine Reihe von Versuchen durchgeführt, um auf das Untersuchungsprogramm abgestimmte Parameter für die Berechnung zu finden.

10.3.1 Forward Raytracing

Der erste wichtige Aspekt, der zu klären ist, betrifft die Größe der Photonmaps. Diese benötigen abhängig von der Größe entsprechende Zeit zur Berechnung. Ferner müssen sie bei der nachfolgenden Berechnung im Arbeitsspeicher gehalten werden und auch der Zeitverbrauch der nachfolgenden Berechnung ist abhängig von ihrer Größe. Bei Versuchen hat sich herausgestellt, dass für die Genauigkeit der Verbrauch an Arbeitsspeicher der begrenzende Faktor ist. Von den insgesamt 64 GB werden ca. 30 GB bei der Erzeugung und ca. 20 GB bei den nachfolgenden Berechnungen für die Photonmaps genutzt. Sie enthalten 768 Millionen kaustische und 64 Millionen globale Photonen. Diese zu erzeugen benötigt etwa 3 Stunden pro Tageslichtszene. Das Ergebnis kann für die Erzeugung aller Bilder weiterverwendet werden.

In den Berechnungsergebnissen lässt die Größe der *global* Photonmap keine Wünsche offen. Artefakte sind nicht auszumachen. Anders bei der *caustic* Photonmap. Hier werden selbst bei der großen Anzahl von Photonen noch Flecken in den Perspektiven auf kontrastarmen Oberflächen wie dem Boden und anderen Bauteilen aus prokonnesischem Marmor sichtbar. Für die numerischen Ergebnisse sind sie von geringer Bedeutung. Testreihen zeigen, dass eine Verdopplung der Photonenzahl signifikante Änderungen bewirkt. Eine Verbesserung würde folglich substantiell mehr Arbeitsspeicher erfordern.³¹

10.3.2 Backward Raytracing

Etwas unerwartet war der Bedarf an Arbeitsspeicher bei der Berechnung der Bilder. Erwartet wurde, dass dieser von der Größe der Photonmaps dominiert wird. Dazu käme ein gewisser

³¹ Es gibt eine Variante der Photonmap, die Out-Of-Core arbeitet, also die Photonmaps auf der Festplatte ablegt und nur einen Teil der Photonen in einem Cache im Arbeitsspeicher hält. Das Verfahren ist zwar effizient, aber dennoch langsamer im Vergleich zum Vorhalten im Arbeitsspeicher (Schregle, Grobe und Wittkopf 2016). Verbesserungen lassen sich auch mit *precomputed photonmaps* erwarten (Schregle 2004, S. 45 ff.), die allerdings mit der verbesserten Variante der Photonmap bisher nicht funktionieren.

Bedarf für den *ambient cache* (Größenordnung etwa 2 GB). Beide Ressourcen werden von den parallel arbeitenden Prozessen gemeinsam genutzt (Shared Multiprocessing). Allerdings benötigen die individuellen Prozesse bei der Berechnung der Leuchtdichten eine unerwartete Menge an »privatem« Arbeitsspeicher. Dieser Bedarf erreicht bei einigen Perspektiven zusammengenommen die Größe des gemeinsam genutzten Speichers, also etwa 20 GB. Versuche zeigen, dass sie von der Größe des Parameters *-lw* abhängig ist. Dieser regelt die Untergrenze des Beitrags eines Teststrahls zur indirekten Berechnung und damit die Anzahl dieser Teststrahlen. Er bezieht sich auf die diffuse Berechnung und auf die gerichtet gestreute Berechnung. Die Versuche zeigen auch, dass dieser Parameter einen großen Einfluss auf die Berechnungszeit für die Leuchtdichteverteilung hat und die Berechnungsergebnisse bei den Spiegelungen beeinflusst.

Diese Umstände haben zwei Folgen: Es steht weniger Arbeitsspeicher für die Photonmaps zur Verfügung und die Anzahl der parallelen Prozesse muss begrenzt werden. Letzteres führt dazu, dass man die Beschleunigung durch das sogenannte Hyperthreading nicht nutzen kann, was eine Beschleunigung von etwa 15 % bringt, aber doppelt so viele Prozesse benötigt. Es führt auch dazu, dass bei der Wahl der Prozessoren – konträr zur modernen Prozessorentwicklung – solche mit hoher Taktzahl und wenigen Kernen solchen mit hoher Taktzahl und vielen Kernen vorzuziehen sind. Das Problem ließe sich durch noch größere Mengen an Arbeitsspeicher lösen, allerdings dauern auch die Berechnungen deutlich länger.

Die Darstellung der glänzenden Marmoroberflächen wird von den Parametern *-st* und *-ss* gesteuert (Tabelle 10.1). Unterhalb des Schwellenwerts *-st* für die Reflexion oder Transmission wird die Berechnung der Glanzpunkte nur noch für Lichtquellen durchgeführt. Ein Wert von 0 erzwingt die Berechnung in jedem Fall. Der Parameter *-ss* bestimmt die Anzahl der Teststrahlen pro Pixel, die zur Darstellung rauer Materialien losgeschickt werden. Die Anzahl und Größe der Fenster, andere hell angestrahlte und reflektierende Oberflächen und die großflächig spiegelnde Wandverkleidung erzwingen einen hohen Wert (Abbildung 10.2).

Wie schon beschrieben, begrenzt der Parameter *-lw* die tatsächliche Anzahl der Teststrahlen. Der Parameter wurde so gewählt, dass der Arbeitsspeicher bei den Berechnungen mit dem größten Verbrauch gerade noch ausreichend war, also eine möglichst hohe Genauigkeit bei den gerichtet diffusen Reflexionen erreicht wurde. Einstellungen oberhalb des gewählten Wertes haben zu sichtbaren Veränderungen in den Ergebnissen geführt. Die Berechnung findet also an einem Limit statt.

Tabelle 10.1: Berechnungs-Parameter für die Darstellung der glänzenden Marmoroberflächen

Parameter	Standardwert	gewählter Wert	Beschreibung
<i>-st</i>	0,15	0	<i>Specular sampling threshold</i>
<i>-ss</i>	1	64	<i>Specular sampling</i>
<i>-lw</i>	$1 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-4}$	<i>Weight Limit</i>

Ein wichtiger Parameter für die Schnittstelle zwischen dem Forward und dem Backward Raytracing ist die Anzahl der eingesammelten Photonen aus den Photonmaps im Parameter

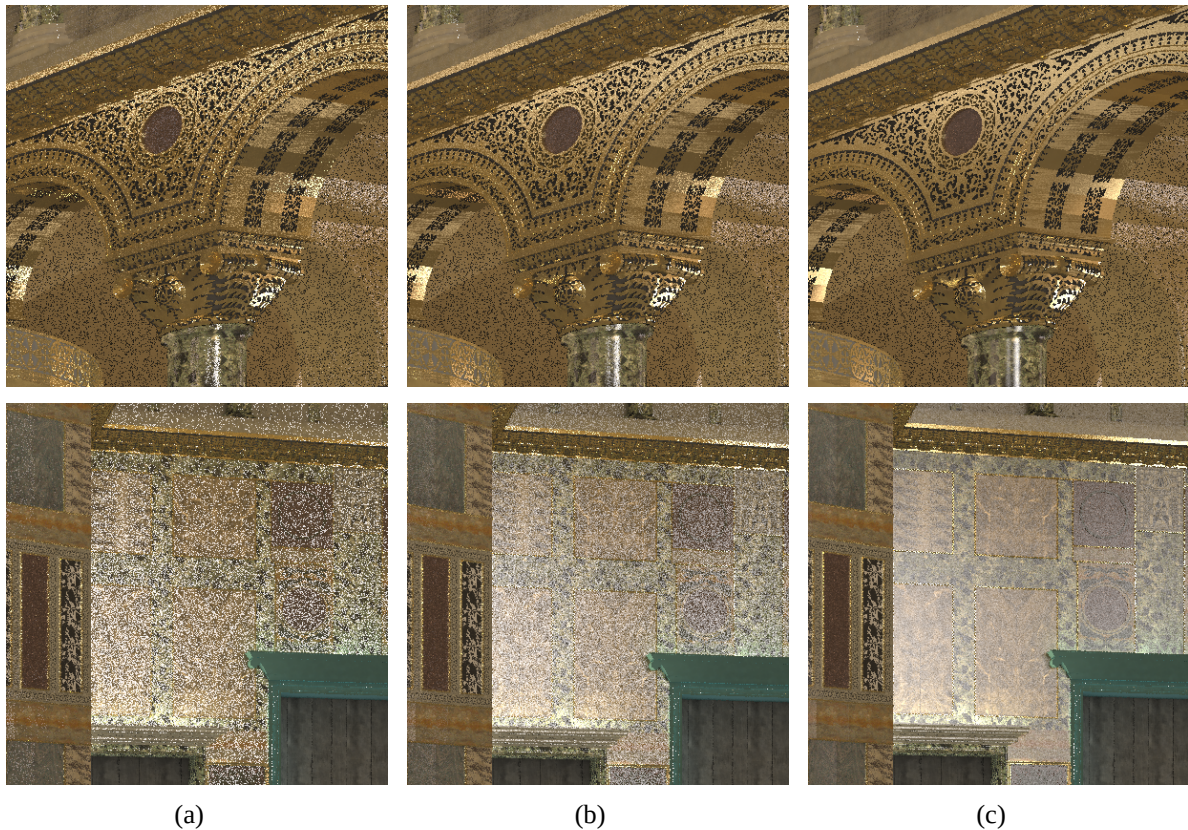


Abbildung 10.2: Auswirkung des *ss*-Parameters auf die Oberflächendarstellung der glänzenden Mar-morausstattung und der vergoldeten Architekturelemente. Werte von 8 (a), 32 (b) und 256 Teststrahlen per Pixel (c).

-ap (Tabelle 10.2). Er wurde nach Erfahrungswerten passend zur Größe der Photonmap gesetzt und dann variiert. Bei der globalen Photonmap ergaben sich dabei geringe Veränderungen. Bei der caustic Photonmap stellt die Wahl einen Kompromiss zwischen dem schon erwähnten Rauschen und der Genauigkeit an den Stellen dar, wo sich die Beleuchtung verändert (Bias). Abbildung 10.3 zeigt Versuche, das Rauschen zu unterdrücken, ohne dass der Bias zu stark wird.³²

Die Parameter für die diffuse Beleuchtung haben einen vergleichbar geringen Einfluss auf die Berechnungsergebnisse (Tabelle 10.3). Ein großer Teil der »Arbeit« in diesem Bereich wird von der Photonmap geleistet. Die Parameter konnten daher vergleichsweise niedrig gewählt werden. Höhere Werte haben in den Versuchen zu geringen Abweichungen geführt. Eine Ausnahme sind die Parameter -aa (*ambient accuracy*) und -ar (*ambient resolution*). Diese beeinflussen die Auflösung in Bereichen, in denen sich die Helligkeit der diffusen Berechnung verändert.

³² Die Photonmap kennt eine sogenannte *bias compensation*, bei der die Anzahl der Photonen dynamisch festgelegt wird (Schregle 2004, S. 77 ff.). Diese ist aber für das Programm *mkrpict*, mit denen das Backward Raytracing durchgeführt wurde, nicht verfügbar.



(a)



(b)



(c)



(d)

Abbildung 10.3: Versuche zu geeigneten Einstellungen für die Anzahl der eingesammelten Photonen für die caustic Photonmap: (a) 20 und (b) 40 Photonen bei einer Größe der caustic Photonmap von 1024 Millionen, (c) 60 und (d) 80 Photonen bei einer Größe der caustic Photonmap von 768 Millionen. Die Pfeile zeigen Bereiche in denen der Bias beginnt deutlich zu werden. So wird der Schatten des Pfeilers an seinem Rand heller und die Schatten innerhalb des Pfeilers »weichgezeichnet«. Mit der Anzahl der Photonen geht das Rauschen zurück.

Tabelle 10.2: Berechnungsparameter für die Anzahl der eingesammelten Photonen

Parameter	Standardwert	gewählter Wert	Beschreibung
-ap global	-	40	<i>n photons</i>
-ap caustic	-	80	<i>n photons</i>

Da diese Parameter nur einen vergleichbar geringen Einfluss auf die Berechnungszeiten und den Ressourcenverbrauch haben, konnte besonders die *ambient resolution* recht hoch gewählt werden.

Tabelle 10.3: Berechnungsparameter für die diffuse Beleuchtung

Parameter	Standardwert	gewählter Wert	Beschreibung
-ab	1	1	<i>ambient bounces</i>
-aa	0,2	0,25	<i>ambient accuracy</i>
-ar	64	2048	<i>ambient resolution</i>
-ad	512	256	<i>ambient divisions</i>
-as	128	64	<i>ambient super-samples</i>

Alle anderen Parameter wurden gemäß Tabelle 10.4 gesetzt oder bei den Standard-Einstellungen belassen.

Tabelle 10.4: Weitere Parameter, die sich von den Default-Einstellungen der RADIANCE-Version 5.2a unterscheiden

Parameter	Standardwert	gewählter Wert	Beschreibung
-ps	4	1	<i>pixel sample</i>
-pj	0,67	0,9	<i>pixel jitter</i>
-dt	0,05	0,02	<i>direct threshold</i>
-dj	0	0,8	<i>direct jitter</i>
-ds	0,25	0,1	<i>direct sampling</i>

10.4 Vom Rekonstruktionsmodell über das Simulationsmodell zur Simulationsanordnung

Die Herstellung der Simulationsanordnung ist die zentrale Schnittstelle zwischen den verschiedenen Arbeitsschritten der Lichtsimulation historischer Bauzustände. Hier begegnen sich die

verschiedenen Arbeitsweisen der Experten eines interdisziplinären Teams. Zugleich sind die technischen Anforderungen der Simulation zu beachten. Daher bedarf dieser Arbeitsschritt in besonderer Weise praktischer und organisatorischer Überlegungen. Diese manifestieren sich in der Notwendigkeit besonderer Datenstrukturen und einer darauf aufbauenden Automatisierung.

In Abbildung 2.2 fließen in die Simulationsanordnung das geometrische Rekonstruktionsmodell, die Ergebnisse der Messungen an den Materialien und die Arbeitshypothesen ein. Hier werden die Ergebnisse der Messungen in Form von Materialmodellen mit der rekonstruierten Geometrie verknüpft. Die Arbeitshypothesen bestimmen – erweitert zu einem Untersuchungsprogramm – die Parametrisierung der Simulationsanordnung, z. B. die Konfiguration der Himmelsmodelle.

Zwischen diesen Elementen gibt es mannigfaltige Verknüpfungen und gegenseitige Abhängigkeiten, z. B. die schon genauer beschriebene zwischen der Materialmodellierung und der Modellierung der Geometrie. Der Arbeitsprozess, besonders unter den Bedingungen interdisziplinärer Zusammenarbeit, legt aber auch einige Grenzen im Sinne einer *separation of concerns* nahe. In der Software-Entwicklung steht dieser Begriff für die Reduktion von Komplexität durch Aufteilung einer Software in getrennte Arbeitsbereiche durch Definition geeigneter Schnittstellen. Im Laufe der Entwicklung des Darmstädter Modells der Hagia Sophia hat sich eine Arbeitsteilung in drei Bereiche etabliert: Die Herstellung und Verbesserung des *Rekonstruktionsmodells*, die Herstellung von Materialmodellen und deren Verknüpfung mit der Geometrie zum *Simulationsmodell* sowie die Herstellung und Parametrisierung einer geeigneten *Simulationsanordnung* für das Untersuchungsprogramm unter den Bedingungen der verfügbaren Rechenleistung und Simulationsmethoden.

10.4.1 Rekonstruktions- und Simulationsmodell

Diese Arbeitsteilung begründet sich nicht nur aus der unterschiedlichen Expertise und Arbeitsweise in den Arbeitsfeldern, sondern auch durch die technischen Anforderungen an das Simulationsmodell, die andere sind, als üblicherweise an ein Rekonstruktionsmodell gestellt werden. Die Geometrie im Rekonstruktionsmodell soll leicht veränderbar und übersichtlich sein. Daher bedient man sich der üblichen Mittel, die in einer CAD-Anwendungen zur Verfügung stehen: Ebenen, Klassen, parametrische Objekte, Konstruktionslinien etc. Die entstehende Struktur lässt sich nicht in das Simulationsmodell übertragen. RADIANCE kennt lediglich die Verknüpfung einer Fläche mit einem Materialmodell.

Umgekehrt stehen die speziellen Materialmodelle nicht innerhalb von üblichen CAD-Anwendungen zur Verfügung. Die Geometrie muss folglich aus der CAD-Anwendung exportiert und schließlich in das RADIANCE-Geometrieformat konvertiert werden. Dabei wird eine der Ordnungsstrukturen Ebene, Klasse, Gruppe etc. herangezogen, um die Materialmodelle den Flächen zuzuordnen. Die exportierte Geometrie wird zusammen mit den Definitionsdateien der Materialmodelle und Bilddateien, die Farb- und Helligkeitsinformationen enthalten, in einer gemeinsamen Struktur abgelegt. Das Simulationsmodell der Hagia Sophia liegt in Form von über tausend einzelnen Dateien vor, die durch spezielle Konfigurationsdateien in einer hierarchischen

Ordnung miteinander verknüpft sind (Abbildung 10.4). Dieses Simulationsmodell muss parallel zum Rekonstruktionsmodell gepflegt werden.

Diese Ordnung ist nicht nur den Eigenheiten der Materialmodellierung geschuldet, sondern erschließt auch die Vorteile der in RADIANCE typischen Arbeitsweise mit Instanzen, also sich wiederholenden Bauteile wie z. B. Säulen oder Wänden. Die Geometrie dieser Bauteile muss nicht, wie sonst üblich, vor der Berechnung aufgelöst und dabei vervielfacht werden, sondern kann als Ganzes in den Arbeitsspeicher geladen und an verschiedenen Orten im Modell wiederverwendet werden. Diese Optimierung reduziert den Speicherverbrauch erheblich und besonders in den Anfangsjahren wäre die Berechnung eines derart detaillierten Modells auf bezahlbarer Hardware sonst unmöglich gewesen. Zudem begrenzt die hierarchische Struktur der Datenablage Änderungen auf Teilbereiche.

Schon zu Beginn des Projektes wurde beschlossen, die Geometrie innerhalb des Simulationsmodells in Form der Übergabeformate abzulegen, d. h. als OBJ- und DXF-Dateien. Diese definieren die Schnittstelle zwischen dem Rekonstruktionsmodell und dem Simulationsmodell. Das hat das Arbeiten unabhängig von bestimmten CAD-Programmen gemacht.³³ Die beiden Übergabeformate liegen im Klartext vor, wie auch die verwendeten RADIANCE-Dateiformate. Ausnahme sind lediglich die Bilder, die als Tagged Image File Format (TIFF)-Dateien vorliegen. Das Modell ist dadurch auch langfristig wissenschaftlich nachvollziehbar und nachhaltig nutzbar.³⁴

Die Begrenzung von Änderungen auf Teilbereiche der logischen Struktur des Modells und die Verwendung von Klartextformaten erlaubt die Arbeit mit Versionsverwaltungssystemen.³⁵ Das erleichtert das gemeinsame Arbeiten am Modell und die Dokumentation von Änderungen und fördert damit die Nachvollziehbarkeit der wissenschaftlichen Produktion.³⁶

10.4.2 Simulationsanordnung und Automatisierung

Schon die Ablage von Geometrie und Bildern in Übergabeformaten erzwingt eine Automatisierung. Zur Simulationsanordnung gehören aber neben dem Simulationsmodell auch die vom Untersuchungsprogramm vorgegebene Konfiguration der Himmelsmodelle, sowie zur Untersuchung notwendige Wahl zwischen Varianten der Materialmodelle und der Geometrie. Zusätzlich sind passende Parameter für die Berechnung zu wählen, diese zu starten und zu überwachen und schließlich die Ergebnisse nachvollziehbar abzulegen. Das wird für das Darmstädter Modell mit

³³ Tatsächlich wurde die Geometrie des Darmstädter Modells mit mindestens sechs verschiedenen CAD-Systemen erstellt.

³⁴ Bei den CAD-Dateien haben wir schon Informationsverluste hinnehmen müssen, weil sie vom gleichen CAD-System in anderer Version nicht wieder eingelesen werden konnten. Ein bekanntes Problem bei der Archivierung von CAD-Daten: Noback 2010.

³⁵ Im Laufe der Jahre: Current Version System (CVS), Apache Subversion (SVN) und heute GIT.

³⁶ Dabei konnte auf die Erfahrungen einer gemeinsamen studentischen Arbeit zurückgegriffen werden: Akropolis4D, aus der sich später Konzepte zur Strukturierung von Modellen aus dem Cultural Heritage Bereich entwickelt haben. Siehe: Hauck und Kuroczyński 2015.

```

sophia
  |----aisles
    |----columns
    |----cornices
    |----floor
        |----[...]
    |----vaults
        |----[...]
    |----walls
        |----[...]
    |----windows
  |----galleries
  |----[...]
  |----nave
    |----apse
      |----furniture
          |----altar
          |----ambo
          |----synthronon
          |----vaults
          |----walls
          |----windows
          |----[...]
    |----cornice
    |----dome
        |----windows
    |----exedrae
        |----[...]
    |----floor
        |----[...]
    |----vaults
        |----window_west
    |----walls
        |----colonnades
            |----antes
            |----columns
        |----entrance
            |----walls
        |----lining
        |----mainpiers
        |----semidome
        |----piers_east
        |----piers_west
        |----tympana
            |----windows
    |----[...]
  |----window_glass
  |----[...]

```

Abbildung 10.4: Ausschnitt der hierarchischen Datenstruktur des Darmstädter Modells.

Hilfe von Konfigurationsdateien und einem auf `make`³⁷ und *Shellscript* basierendem System erledigt. Dieses wurde für die vorliegende Arbeit erweitert, sodass verschiedene Teile des Untersuchungsprogramms mit ihren unterschiedlichen Einstellungen nacheinander abgearbeitet werden können. Zuvor hätte jeder der über hundert Einstellungssätze separat konfiguriert und gestartet werden müssen.

Bei einem Simulationslauf werden zunächst die passenden Varianten von Geometrie und Materialmodellen mittels Verweisen (*softlinks*) im Dateisystem aktiv geschaltet. Das geschieht durch individuelle Shellscripts. Danach wird ein Konfigurationssystem für die Berechnung gestartet. Dazu arbeitet ein Shellscript nacheinander Konfigurationsdateien ab, die es in einem Verzeichnis findet. Diese enthalten einen Satz Parameter für die Erzeugung der Photonmaps und Einstellungen für das Himmelsmodell. Die Dateien können beliebig viele Parametersätze für den Backward-Raytracing-Schritt enthalten, die jeweils mit einer weiteren Konfigurationsdatei verknüpft werden, welche wiederum Parametersätze für eine beliebige Anzahl von Bildern enthält.

Die Funktionalität wird genutzt, um auf Basis eines gemeinsamen Himmelsmodells, einer wiederverwendeten Photonmap und eines gemeinsamen Ambient Caches³⁸ zwei Bildsätze mit den Ergebnissen zu erzeugen. Von diesen enthält der eine Leuchtdichten und der andere Beleuchtungsstärken. Dazu generiert das Script als erstes das Himmelsmodell. Dann startet es das Make-System, das aus den Übergabeformaten für Geometrie und Bilddaten sowie den Materialdefinitionen das RADIANCE Modell generiert. Dieses wird entsprechend der Ausrichtung des Gebäudes dreht³⁹ und vom byzantinischen Fuß in Meter skaliert.⁴⁰ Als erster Schritt der Berechnung werden die Photonmaps generiert. Dann wird der Backward-Raytracing-Schritt durchgeführt und so die Ergebnisse in Form von RADIANCE-Bilddateien gesichert. Alle Einstellungen und die Ergebnisse werden in einem Ordner abgelegt und nach der Konfigurationsdatei benannt. Parallel wird die Berechnung überwacht und dabei sowohl Laufzeiten, der Verbrauch an Arbeitsspeicher und Fehler protokolliert und bei den Ergebnissen abgelegt. Schließlich werden alle Zwischenprodukte gelöscht und damit die nächste Berechnung vorbereitet. Ohne diese Automatisierung und Überwachung wäre der Vergleich verschiedener Beleuchtungszustände äußerst mühsam und die Wahl geeigneter Parameter für die Berechnung schwierig. Die Automatisierung ist daher ein nicht zu unterschätzender Teil der Methode.

³⁷ Make ist ein System das in der Softwareentwicklung zum automatisierten Kompilieren und den dazu nötigen Vorarbeiten eingesetzt wird. Hier müssen immer wieder die gleichen Aufgaben erledigt werden. Es arbeitet in einer rekursiven Vorgehensweise entlang definierter *targets* und deren Abhängigkeiten voneinander.

³⁸ Dieser enthält zwischengespeicherte Ergebnisse der diffusen Berechnung, beschleunigt also diesen Teil der Berechnung.

³⁹ Tatsächlich wird das Himmelsmodell gedreht, um die Einstellung von Perspektiven zu erleichtern.

⁴⁰ Die Modellierung in *bzf* ist einfacher, Leuchtdichten und Beleuchtungsstärken setzen aber Flächen in *Système international d'unités* (SI)-Einheiten voraus.