

# Kapitel 11

## Auswertungsmethoden

### 11.1 Beleuchtungsstärken und Leuchtdichten

Die Berechnungsergebnisse liegen in Dateien im RADIANCE-Bildformat vor. Sie enthalten Leuchtdichten oder Beleuchtungsstärken auf den Oberflächen. Beleuchtungsstärken, also die Menge Licht, die eine Oberfläche empfängt, kann man messen, aber nicht sehen. Sie sind ein abstraktes Maß für die Lichtverteilung im Gebäude. Ihre Verteilung und Veränderung können Eigenschaften der Beleuchtung beschreiben, die unabhängig vom Standpunkt eines Betrachter sind. Für ihre Darstellung bieten sich Parallelprojektionen, sprich Grundrisse und Schnitte an. Zusätzlich wurden Fisheye-Aufnahmen aus der Mitte des Gebäudes hergestellt, die der Übersicht der Beleuchtung auf den Wand- und Gewölbeoberflächen im Innenraum dienen. Die Werte der Beleuchtungsstärke werden anhand einer Skala von Fehlfarben dargestellt.

Die Leuchtdichte beschreibt das von einer Fläche in eine bestimmte Richtung ausgehende Licht. Auch Leuchtdichten lassen sich in Fehlfarben darstellen um ihre quantitative Verteilung im Blickfeld zu visualisieren. Allerdings sind sie abhängig vom Standpunkt des Betrachters, da sie auch die Reflexionen von Fenstern, Sonnenlichtflecken etc. auf den Oberflächen enthalten. Dafür erscheint nur eine perspektivische Darstellung sinnvoll, möglichst aus einer Position, die ein Betrachter im Gebäude tatsächlich einnehmen kann. Leuchtdichten entsprechen also, dem, wie ein Betrachter an einem bestimmten Ort die beleuchtete Szene sieht. Daher interessieren hier nicht nur die Zahlen. Denn man will sich ein *Bild* von dem machen, was dieser gedachte Betrachter wahrnimmt, um es mit eigenen oder anderen Seherfahrungen vergleichen zu können und Schlüsse daraus zu ziehen. Das ist Aufgabe der Perzeptionsanalyse. Die so visualisierten Bilder können den quantitativen Ergebnissen gegenübergestellt werden.

### 11.2 Perzeptionsanalyse mittels Tone Mapping

Der Begriff *tone mapping* steht für eine Reihe gut dokumentierter Verfahren, die sich zum Beispiel auf physiologischen Untersuchungen an Photorezeptoren<sup>1</sup>, oder an photographischen

---

<sup>1</sup> Reinhard und Devlin 2005.

Verfahren<sup>2</sup> orientieren.<sup>3</sup> Auch in RADIANCE findet sich im Programm pcond ein solcher Tone-Mapping-Operator, meist als *histogram adjustment* bezeichnet.<sup>4</sup>

Das Verfahren basiert auf der Theorie, dass das Auge, wenn es eine Szene »abtastet«, sich permanent an die lokale Helligkeit anpasst, genauer an einen Bereich von 1° rund um die Sehachse. Das Verfahren sammelt die Helligkeiten dieser Bereiche über das ganze Bild ein<sup>5</sup> und erstellt daraus ein Histogramm, also eine nach Helligkeiten sortierte Liste, in der aufgezeichnet wird, wie häufig der jeweilige Tonwert vorkommt. Die Helligkeiten werden dabei logarithmisch erfasst.<sup>6</sup> In einem solchen Histogramm sind die Helligkeitswerte ungleichmäßig verteilt. Größere Bereiche des Bildes, die ähnliche Helligkeiten haben, wie die Fenster, der Boden im Hauptraum oder die dunkleren Seitenschiffe, zeichnen sich als Hügel oder scharfe Spitzen in einem solchen Histogramm ab. Für diese wichtigen Bildbereiche sollen möglichst (gleich) viele Tonwerte zur Verfügung stehen, damit wir darin Unterschiede und Gradienten, also Formen, gut erkennen können. Histogram Adjustment bedeutet, die Tonwerte mit diesem Ziel zu manipulieren. Ähnlich wie beim photographischen Film werden also bestimmte wichtige Helligkeitsbereiche gestreckt und weniger wichtige komprimiert, aber eben nicht mit einer statischen Kurve wie beim Film, sondern über das Helligkeitsspektrum dynamisch und an die jeweilige Szene angepasst. Dabei könnte es besonders bei dunklen Szenen passieren, dass auf dem Monitor oder dem Papier Helligkeitsunterschiede sichtbar werden, die das menschliche Auge in der Szene nicht wahrnehmen kann. Um das zu vermeiden, begrenzt der hier verwendete Algorithmus die Manipulation in solchen Fällen.

Das Verfahren berücksichtigt auch die anderen Limitierungen des menschlichen Sehens:

- Betrachtet man eine relativ dunkle Fläche nahe einer hellen Lichtquelle, fällt Streulicht von der Linse auf das Abbild dieser Fläche, sie erscheint heller, wodurch der Kontrast innerhalb der Fläche reduziert werden kann.
- Am unteren Ende der Helligkeitsadaption nimmt die Fähigkeit Farben zu unterscheiden ab.
- Ebenfalls am unteren Ende der Helligkeitsadaption nimmt die Sehschärfe ab.

Das eingesetzte Verfahren nähert sich dem menschlichen Sehen auf vielfache Weise an. Tone-Mapping-Verfahren haben aber ihre Grenzen: Ist der Kontrast des Mediums im Vergleich zur dargestellten Szene sehr gering, wirken die Bilder zuweilen flau, da alle Helligkeitswerte auf dem Medium vertreten sein sollen. In den hellen Bereichen liefern die Verfahren manchmal eigentümliche Pastelltöne. Aus den vorliegenden Ergebnissen rechnet pcond das Funkeln des Goldmosaiks und der vergoldeten Zahnleisten heraus (Abbildung 11.1). Ob diese kleine hellen Flächen von Verfahren richtig behandelt werden, müsste noch genauerer untersucht werden.

---

<sup>2</sup> Reinhard, Stark u. a. 2002.

<sup>3</sup> Eine ganze Reihe solcher Operatoren findet sich im pfstools-Paket: Pfstools Entwickler 2017; Mantiuk u. a. 2007.

<sup>4</sup> Larson, Rushmeier und Piatko 1997.

<sup>5</sup> Es greift dazu auf die in der Datei gespeicherten Bildwinkel zurück.

<sup>6</sup> Weber-Fechner-Gesetz, s. o.

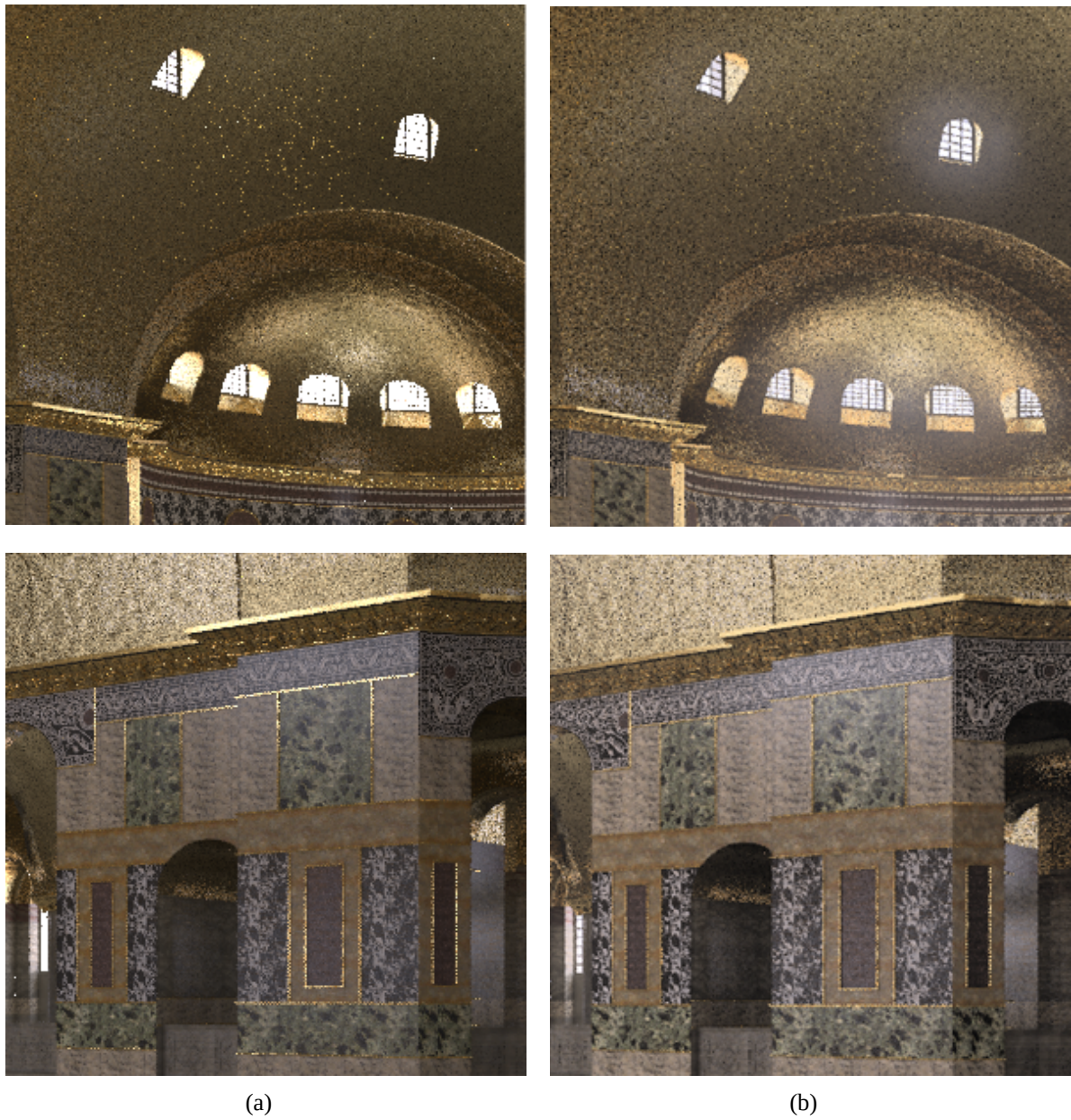


Abbildung 11.1: Vergleich der Visualisierung der mit einer linearen Darstellung mit angepasster Beleuchtung (a) und mittels Histogram Adjustment (b). Das Glitzern im Goldmosaik wird gedämpft, die Zahnleisten und Gesimse treten weniger hervor.

Histogram Adjustment ist aber auf alle Fälle geeignet, wichtige Charakteristika der Beleuchtung der Hagia Sophia in den Ergebnissen herauszuarbeiten, insbesondere:<sup>7</sup>

- der Helligkeitseindruck der Szene,
- die Verteilung der Helligkeiten in der Szene,
- die wahrgenommenen lokalen und globalen Kontraste,
- Effekte der Blendung,
- Einschränkungen der Farbwahrnehmung,
- und die Adaption während der Abtastbewegungen des Auges.

Für die Analyse der Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung kann Histogram Adjustment ein nützliches Werkzeug sein und erlaubt, verschiedene Beleuchtungssituationen miteinander zu vergleichen. Die Gesamtheit der Wahrnehmung einer Szene umfasst aber weitere Aspekte:

- die Farbadaption,
- das stereoskopische Sehen,
- das Zeitverhalten der Helligkeitsadaption großer Kontraste,
- die Bewegung des Kopfes,
- die Bewegung im Raum,
- die Bewertung von absoluten Helligkeiten durch erinnerte Objekteigenschaften,
- die Fokussierung der Aufmerksamkeit,
- die Erinnerung gerade nicht sichtbarer Teile der Szene
- etc.

Die Auswertung in dieser Arbeit wird sich auf die Helligkeits- und Kontrastwahrnehmung beschränken. Die Perzeptionsanalyse ist aber ein Feld der Lichtsimulation historischer Bauzustände, das Raum für eine ganze Reihe weiterer Untersuchungen lässt. Insgesamt kann die Perzeptionsanalyse wichtige Grundlagen für ein Verständnis der Rezeption historischer Architektur durch die Zeitgenossen bieten. Sie hat vor allem Vorzüge gegenüber einer Diskussion anhand photographischer oder »photorealistischer« Aufnahmen und individueller, anekdotischer Eindrücke. Die Trennung von Perzeption und Rezeption in der Analyse schafft Ordnung zwischen physiologisch und wahrnehmungspsychologisch abgesicherten Ansätzen und der Interpretation von Textquellen, die sich ganz anderer Mittel bedient.

Um den verschiedenen Medien Rechnung zu tragen, werden in dieser Arbeit Bilder für den Druck und für die Betrachtung am Monitor generiert, wobei die letzteren vorzuziehen ist. Zusätzlich werden die Berechnungsergebnisse im Ausgangsformat zur Verfügung gestellt. Die Fehlfarbdarstellung der Leuchtdichten sind den Tone-Mapping-Bildern dabei gegenübergestellt, um den Vergleich zu den quantitativen Ergebnissen zu ermöglichen.

---

<sup>7</sup> Vergleiche visualisierter und realer Szenen mittels Personenbefragung bestätigen den realistischen Gesamteindruck des Verfahrens und der wahrgenommenen Kontraste. Die Wahrnehmung der Helligkeit zeigt Vorzüge anderer Verfahren: Yoshida u. a. 2005.

## 11.3 Darstellung der Ergebnisse

Zusammengefasst werden die Informationen in den RADIANCE-Bilddateien folgendermaßen visualisiert:

- Beleuchtungsstärken werden mit Fehlfarben dargestellt. Die Daten werden innerhalb einer Skala von 2 – 5000 lx gezeigt.
- Leuchtdichten werden ebenfalls mit Fehlfarben dargestellt. Die Daten werden innerhalb einer Skala von 0,25 – 5000 cd m<sup>-2</sup> gezeigt.
- Leuchtdichten mit Einstellungen für einen Laser-Ausdruck bei guter Beleuchtung (ca. 500 lx): Kontrastumfang 1 : 17, maximale Leuchtdichte 100 cd m<sup>-2</sup> (pcond -h -d 17 -u 100).<sup>8</sup>
- Leuchtdichten mit Einstellungen für einen guten Monitor bei abgedunkelter Beleuchtung (ca. 5 lx): Kontrastumfang 1 : 52, maximale Leuchtdichte 189 cd m<sup>-2</sup> (pcond -h -d 52 -u 189).<sup>9</sup>

---

<sup>8</sup> Leuchtdichten unter etwa 45° gemessen an einem exemplarischen Ausdruck mit einer weißen (100 cd m<sup>-2</sup>) einer schwarzen Fläche (5,88 cd m<sup>-2</sup>) unter einer Beleuchtung von 500 lux. Gemessen mit einem GOSSEN STARLIGHT 2.

<sup>9</sup> Gemessen an einen LG 27UK850-W für eine schwarze (3,62 cd m<sup>-2</sup>) und eine weiße Fläche (189 cd m<sup>-2</sup>). Beleuchtung auf dem Monitor 5,64 lux. Gemessen mit einem GOSSEN STARLIGHT 2.