

**Studie zur Anwendung und Grenzen derzeitiger
Programmtypen zur
photo-realistischen Darstellung
von Licht und Beleuchtung in der Architektur**

**Das Kimbell Art Museum als Fallstudie
für Lightscape, Radiance, 3D-Studio-MAX**

Im Auftrag der Licht Akademie

Kurt Altmann
Planungsbüro Altmann
mail@kurt-altmann.de

Peter Apian-Bennowitz
Technische Visualisierungen
apian@pab-opto.de

18. März 2000

Zusammenfassung

Zielgruppe dieser Studie sind Planer, die sich für die Thematik exakter visualisierter Lichtverteilung im professionellen Umfeld interessieren. Anfänger finden Information zur Abschätzung des Aufwands und der dadurch erreichbaren Ergebnisse, primär für Experten sind die beschriebenen Details.

In dieser Studie waren drei Kriterien von besonderer Bedeutung: Praxisbezug, Photorealistische Darstellung und quantitative Aussagen über das Licht.

In Kap. 1 wird das Modellobjekt vorgestellt, das im weiteren als Testobjekt für die Simulationsprogramme dient. Kap. 2.1 beschreibt die Modellierung und Strukturierung dieses Objekts als CAD Modell, das anschließend in die Simulationsprogramme übernommen wird (Kap. 3). Die Durchführung der Simulation ist in Kap. 4 beschrieben.

Bei unklarer Wirkung eines Programms mit problematischen Folgen, sind diese Erfahrungen durch ein Randsymbol gekennzeichnet.



Detailbeschreibungen, die beim ersten Lesen übersprungen werden können, sind so gekennzeichnet.



Wenn Sie eine gedruckte Version dieser Studie in Händen halten, wäre es möglich, daß mittlerweile eine ergänzte Version zur Verfügung steht, die Sie unter folgender Webadresse finden:

<http://www.licht-akademie.de>

http://www.pab-opto.de/render_vergleich

Unter diesen Adressen finden Sie auch die Abbildungen in hoher Qualität.

Die Reproduktion der Bilder in dieser Studie ist leider in den meisten Fällen abhängig vom Ausgabegerät: Besonders die Wiedergabe auf Farblaserdruckern ist Schwankungen unterworfen. Wenn Sie diese Datei als PDF am Bildschirm betrachten, ist durch die Natur des selbstleuchtenden Bildes und den Typ des Monitors die Reproduktion ebenfalls nicht normierbar.

Alle berechneten Bilder sind ©Kurt Altmann (für die Beispiele mit Lightscape) und ©Peter Apian-Bennwitz (für die Beispiele mit Radiance). Alle Rechte vorbehalten. Reproduktion und Weiterverwendung bedürfen der Genehmigung der Autoren.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
1 Das Modell	1
1.1 Objektbeschreibung	1
1.2 Der Modellbereich	3
1.3 Die Prüfsteine für die Programme und deren Umsetzung im Modell	5
2 Import der CAD-Daten	9
2.1 Modellstrukturierung	9
2.2 Übersicht	9
2.3 LIGHTSCAPE	10
2.4 3D-Studio MAX	11
2.5 RADIANCE	11
3 Wege zur Simulation	13
3.1 Lightscape	13
3.1.1 Geometrische Nachbearbeitung	13
3.1.2 Blöcke	13
3.1.3 Lichtquellen	15
3.1.4 Himmelsmodelle und Tageslicht	17
3.1.5 Materialzuweisung	17
3.1.6 Simulationsparameter	19
3.1.7 Flächeneigenschaften	19
3.1.8 Abschluß des Preparation-Modus	20
3.2 Radiance	20
3.2.1 Datei Organisation	22
3.2.2 Interaktive Geometriedarstellung	22
3.2.3 Materialzuweisung	25
3.2.4 Himmelsmodelle und Tageslicht	25
3.2.5 Farbdarstellung	26
3.2.6 Grundlagen und Simulationsparameter	26

4 Die Simulation	33
4.1 Lightscape	33
4.1.1 Initialisierung	33
4.1.2 Iterationen und Radiosity-Verfahren	34
4.1.3 Nachträgliche Änderungen	35
4.1.4 Auswertung	35
4.1.5 Raytracing	35
4.1.6 Batch-Mode	37
4.1.7 Verteiltes Rechnen	37
4.2 Radiance	38
4.2.1 Starten der Simulation	38
4.2.2 Auswertung	38
4.2.3 Nachbearbeitung für Ausgabegeräte	38
4.2.3.1 Ausgabe auf speziellen Geräten	44
4.2.4 Verteiltes Rechnen	47
5 Fazit	49
5.1 Zur Frage der Details einer Szene	49
5.2 Lightscape	49
5.2.1 Handhabbarkeit von Lightscape	49
5.2.2 Die Prüfsteine	51
5.2.2.1 Modellgröße, Nachbearbeitung Modell	51
5.2.2.2 Lichtbehandlung	52
5.2.2.3 Lichtverteilung über die Reflektorpaddel	52
5.2.2.4 Einschränkungen der Materialdefinitionen	53
5.2.2.5 Rechenzeiten	53
5.2.2.6 Handhabbarkeit Leuchten	54
5.3 Radiance	54
5.3.1 Die Prüfsteine	54
5.3.1.1 Modellgröße	54
5.3.1.2 Lichtverteilung	54
5.3.1.3 Lichtverteilung über die Reflektorpaddel	54
5.3.1.4 Materialdefinition	55
5.3.1.5 Rechenzeiten	55
5.3.1.6 Handhabbarkeit Leuchten	56
5.4 Zusammenfassung	56
Literaturverzeichnis	57
Autoren	59

INHALTSVERZEICHNIS

v

Die Hard- und Software

61

Index

62

Kapitel 1

Das Modell

Welches Modell mit welchem Detaillierungsgrad und welchen Geometrie Komponenten eignet sich am besten für den Vergleich unterschiedlicher Lichtsimulationsprogramme ?

Diese Fragestellung stand am Anfang der Untersuchung. Mit zunehmender Leistungsfähigkeit von Personal Computern stiegen nicht nur die Ansprüche der Anwender, sondern auch die Versprechungen der Hersteller von Software. Oftmals stellt sich jedoch heraus, daß eine Software, die für kleinere Projekte durchaus praktikabel erscheint, aus programminternen oder betriebssystembedingten Gründen bei größeren Projekten der Praxis an Limits stößt.

Gleichzeitig soll der Leser dieser Studie sich mit der geschilderten Problematik identifizieren können. Exotische Erkenntnisse im Gebrauch von Renderfarmen mit 100 oder mehr Maschinen oder High-End Grafikworkstations mit Anschaffungskosten von mehreren zehntausend Mark waren nicht Gegenstand dieser Untersuchung.

Auch wurde davon ausgegangen, daß sich ein einfacher viereckiger Büroraum mit Einrichtung ohne Probleme mit allen bei der Studie berücksichtigten Programmen realisieren läßt. Gesucht wurde daher ein reales Objekt der Praxis mit skalierbarer Geometrie, die eine stufenweise Steigerung der Komplexität innerhalb des Modells erlaubt. Außerdem sollte es möglich sein, bei Bedarf zusätzliche 'Lasten' in Form weiterer Geometrieobjekte hinzuzufügen ohne die spätere Szene zu überfrachten.

Das Thema Licht sollte eine herausragende Bedeutung einnehmen: Tages- und Kunstlicht sollten gleichermaßen vertreten sein.

Die Wahl fiel daher auf des Kimbell Art Museum in Fort Worth, Texas (Architekt: Louis I. Kahn).

Realaufnahmen und Pläne sind den im Anhang genannten und im Text zitierten Quellen entnommen.

1.1 Objektbeschreibung

Das Kimbell Art Museum wurde in den Jahren 1966 bis 1972 geplant und errichtet. Es liegt ca. 3 Kilometer vom Zentrum von Fort Worth entfernt inmitten eines Parks (Abb. 1.1).

Hauptmerkmal des Baus sind 16 parallele, Nord-Süd gerichtete Betongewölbe, die das Dach des Museums bilden. Jedes der Gewölbe überspannt eine Flächeneinheit von ca. 31,7 mal 6,7 Metern und ruht auf 4 quadratischen Eckstützen. Die Stützen haben eine Kantenlänge von ca. 0,6m und sind etwa 3,7m hoch. Zwischen den überwölbten Flächeneinheiten befinden sich ca. 2,4 m breite Zwischenzonen. Der Bau ist dreifach gegliedert. An den mittleren Bereich, bestehend aus 4 Flächeneinheiten, schließt nach Norden und Süden jeweils eine Gruppe von 6 Flächeneinheiten an.

Drei offene Portiken im Westen bilden die Hauptfassade des Museums (Abb. 1.2).

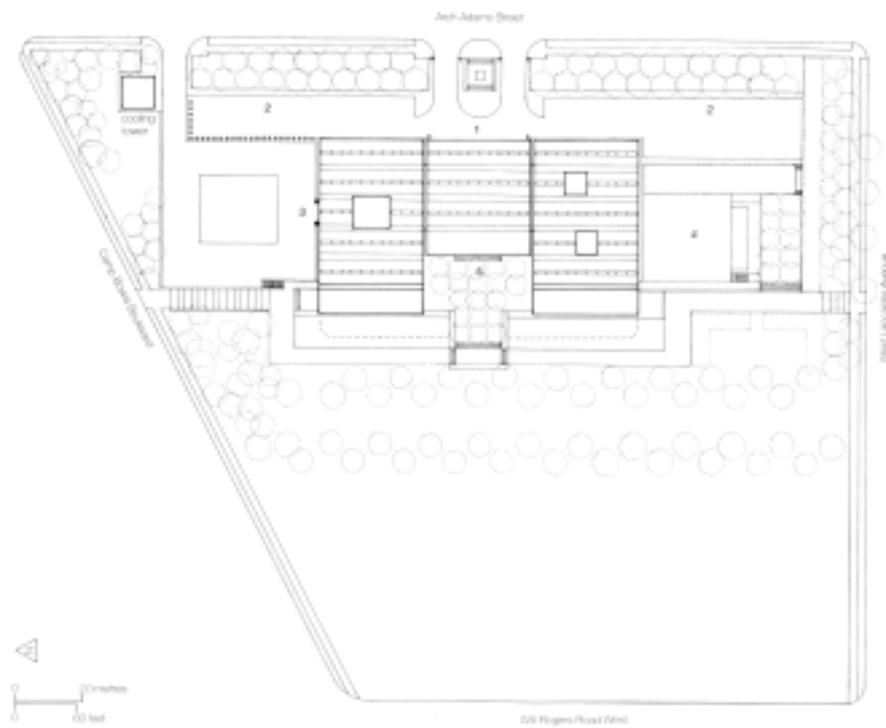


Abbildung 1.1: Lageplan [Bra92]



Abbildung 1.2: Luftbild von Westen während der Ausführung, Juni 1972 [Fra99]

Das Gebäude ist zweigeschoßig ausgeführt. Im Unterschoß befindet sich die Verwaltung, Ateliers, Werkstätten und ein Verkaufsraum. Im Obergeschoß finden sich die Ausstellungsräume (Abb. 1.3).

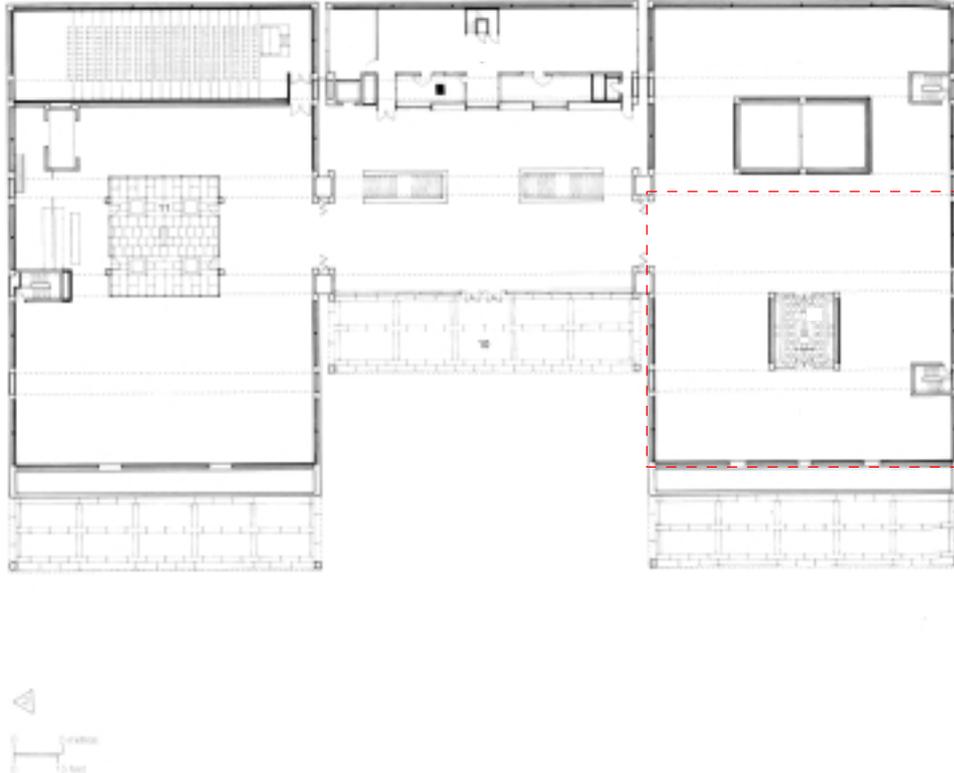


Abbildung 1.3: Grundriß des Obergeschoss [Bra92]. Der rot-gestrichelte Bereich wird im weiteren modelliert.

1.2 Der Modellbereich

Für die Modellierung wurde der südliche Ausstellungsraum im 1.OG ausgewählt.

Dieser erstreckt sich über 5 Flächeneinheiten und bildet einen ca. 43,1m mal 31,7m stützenfreien Ausstellungsbereich, gegliedert durch 2 eingestellte Lichthöfe und 2 Fluchttreppenhäuser (Abb. 1.7).

Die lichte Höhe im Scheitelpunkt der Deckengewölbe beträgt ca. 6,1m, im Bereich der Zwischenzonen ca. 3,1m (Abb. 1.4).

Der Größere der beiden Lichthöfe ist im Obergeschoß als massiver Lichtschacht ausgeführt und versorgt die Ateliers im Untergeschoß mit Tageslicht.

Der kleine Lichthof ist in Ost- und Westrichtung voll verglast (Abb. 1.5) und versorgt diesen Teil des Ausstellungsbereiches mit seitlich einfallendem Tageslicht. Zur Vermeidung direkter Einstrahlung sind an der Innenseite der Verglasung Verschattungselemente angebracht. Diese wurden bei der Modellierung nicht berücksichtigt.

Die Deckengewölbe und die Stützen wurden in Sichtbeton-Bauweise ausgeführt. Die ausgemauerten Wände sind innen und außen mit Travertinplatten verkleidet. Im Bereich der Zwischenzonen besteht der Boden aus Travertinplatten, unterhalb der Deckengewölbe ist Parkettboden verlegt.

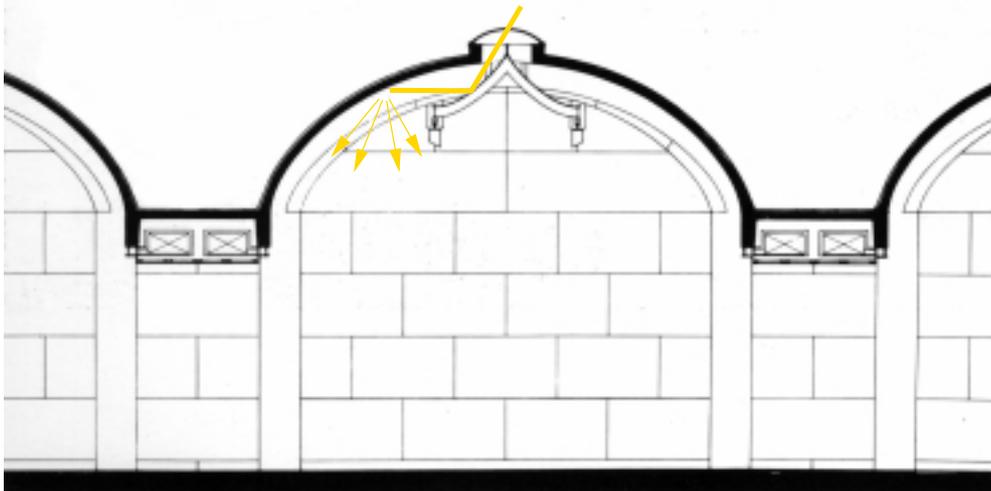


Abbildung 1.4: Schnitt durch ein Deckengewölbe mit angrenzenden Zwischenzonen [Bra92]. Skizziert ist zusätzlich der Weg des Tageslichts durch zweifache Reflexion.

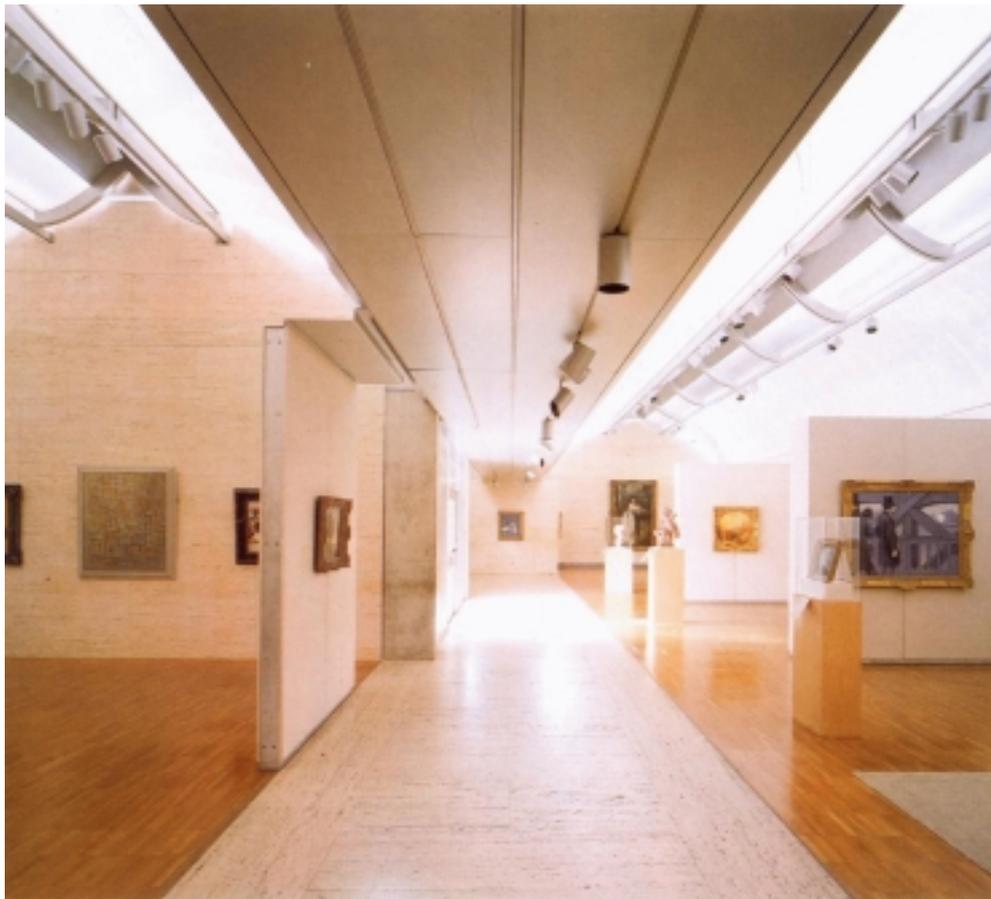


Abbildung 1.5: Innenraumansicht, das Licht fällt von links durch den kleineren Lichthof. [BL91]

Die Exponate werden freistehend auf Sockeln oder in Vitrinen oder abgehängt vor den Wänden präsentiert. Zur Erhöhung der Ausstellungskapazität können mobile Wandtafeln installiert werden. Entweder freistehend oder mittels einer speziellen Halterung an der Decke der Zwischenzone befestigt.

Die Besonderheit des Entwurfes von Louis Kahn ist aber die Behandlung des Tageslichts zur natürlichen Beleuchtung der Exponate. Über die gesamte Länge des zykliden Deckengewölbes existiert in dessen Zenit eine ca. 76cm breite Lichtöffnung, die durch eine tonnenförmige Plexiglasabdeckung abgedichtet wird. Um eine direkte Sonneneinstrahlung zu vermeiden, wurde an der Innenseite des Deckengewölbes, unterhalb der Lichtöffnung, ein Reflektor konzipiert.

Dieser besitzt eine Art Kamm, der bis in die Deckenöffnung ragt, um selbst unter flachem Winkel einfallendes direktes Sonnenlicht auszublenden.

Die zwei Paddel des Reflektors bestehen im oberen Bereich aus poliertem Aluminiumblech, das im unteren Bereich zusätzlich perforiert ist, um den Reflektoren ein transparentes Erscheinungsbild zu geben.

Durch die Opazität im oberen Bereich wird eine direkte Sonneneinstrahlung auf die Exponate vermieden.

Der Reflektor wirft das einfallende Tageslicht auf die Innenseite der Gewölbes, wo es umgelenkt und diffus in den Ausstellungsraum reflektiert wird.

Zur Positionierung von Leuchten sind am Ende der Reflektorpaddel Lichtschienen integriert. Lichtschienen finden sich zudem eingelassen in die Metalldecken der Zwischenzonen.

In allen nach Norden und Süden gerichteten Abschlußwänden befinden sich zum Zenit der Deckengewölbe hin verjüngende Lichtschlitze. Diese sollen die Konstruktion des zykliden Deckengewölbes betonen. In den nach Osten und Westen weisenden Abschlußwänden des Ausstellungsraumes existieren oberhalb der Travertinverkleidung horizontale Lichtschlitze. Auch hier soll die Trennung der Materialien sowie der Konstruktion betont werden.

Die Öffnungen in den Wänden sowie im Deckenbereich gewähren jedoch keinerlei Sichtkontakt zur Umgebung. Lediglich im Bereich des kleinen Lichthofes gibt es die Möglichkeit, einen begrenzten Himmelsausschnitt wahrzunehmen.

Abb. 1.5 veranschaulicht die oben beschriebenen konstruktiven Details sowie die Präsentation der Exponate einer Ausstellung. Exakt diese Ansicht soll daher die Grundlage für den visuellen Vergleich der Resultate der Lichtsimulationsprogramme sein.

1.3 Die Prüfsteine für die Programme und deren Umsetzung im Modell

Diverse 'Besonderheiten' im Entwurf selbst und der Modellierung sollen bei der Lokalisierung von Schwächen der untersuchten Programme behilflich sein.

Auffälligstes Merkmal des Museums ist, wie schon erwähnt, die besondere Art in der von oben einfallendes Tageslicht über Reflektorflächen und die zyklide Decke im Raum verteilt wird. Das Licht muß bei der Simulation somit mindestens zweimal umgelenkt werden, einmal über die Paddel des Reflektors, zum zweiten über die Sichtbetondecke. Die Kombination des Reflexionsvermögens unterschiedlicher Materialoberflächen steht hierbei auf dem Prüfstand.

Die Komplexität dieses Modells wurde durch Einfügen unterschiedlichster Skulpturen erhöht: Die Gesamtanzahl der relevanten Geometrieteilflächen stieg dabei auf ca. 120000 Einzelflächen¹, ein in der Praxis² durchaus auftretender Wert.

¹Auf Grund unterschiedlicher Triangulation und Polygonalisierung der Geometrieobjekte (Zylinder, extrudierte Polygone, Zerlegung von Polygonen mit mehr als 3 Ecken) ist die Anzahl der Einzelflächen nicht in allen CAD- und Simulationsprogrammen gleich.

²Hier wurden Werte von 300000 Einzelflächen als gängig genannt.

Nach ersten Testläufen wurde das Modell jedoch verkleinert, da die Wartezeiten beim Bildaufbau unter Lightscape und 3D-Studio MAX eine flüssige Bearbeitung nicht mehr zuließen.

Nach Festlegung des Ansichtspunktes und des damit verbundenen Bildausschnittes (Abb. 1.6) wurden beim neuen Modell alle nicht sichtbaren Teile, die zudem keinen Einfluß auf das Gesamterscheinungsbild hatten, eliminiert oder stark abstrahiert dargestellt.

Außerdem wurde das Modell auf 3 Feldgrößen reduziert (Abb. 1.7). Der zweite, größere Lichthof wurde aus dem Modell entfernt. Dieses vereinfachte Modell beinhaltet noch ca. 53000 Teilflächen.

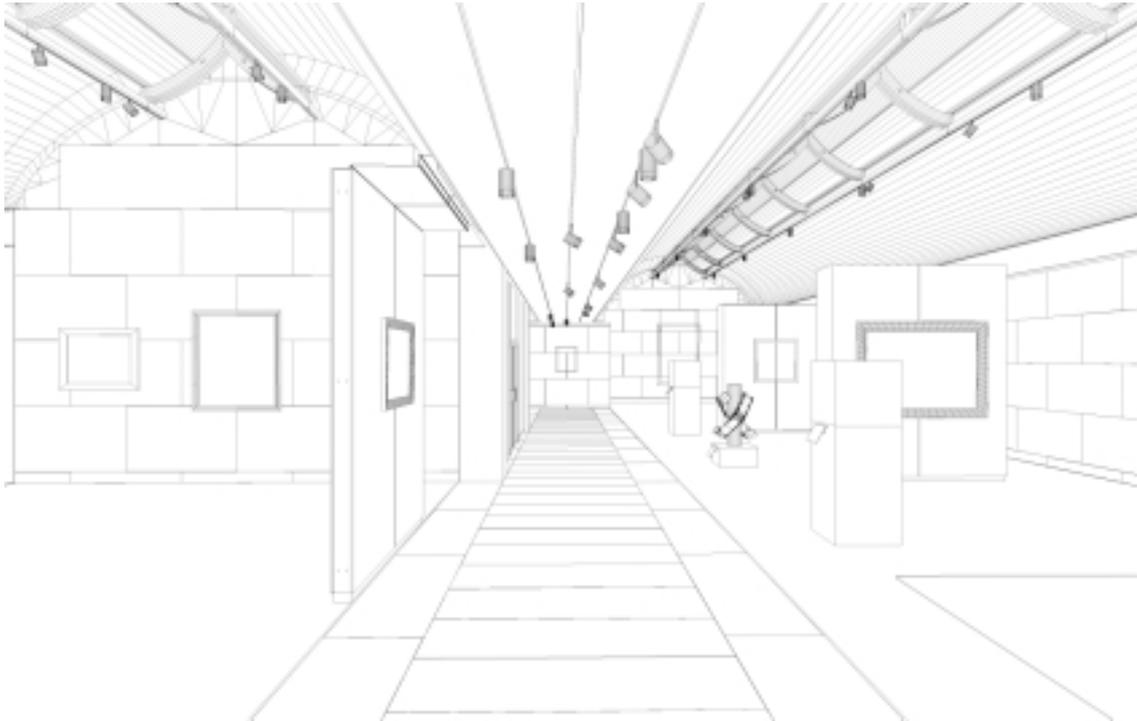


Abbildung 1.6: Ansicht des Modells in AutoCAD aus der Perspektive der Abb.1.5

Die Wand- und Bodenplatten aus Travertin spiegeln die strenge Geometrie des Gesamtentwurfes wider. Um bei der späteren Visualisierung nicht ein 'zufälliges' Texturmuster zu erhalten, wurden die Platten einzeln modelliert, womit auch die Abbildung eines exakten Fugenbildes gewährleistet ist.

Besonders in der Planungsphase ist ein schneller Austausch von Materialeigenschaften von Vorteil: Da bei der Modellierung die Einzelplatten referenziert wurden, konnte somit auch getestet werden, ob die Probanden-Programme diese Referenzierung übernehmen und sich somit Änderungen an Einzelplatten auf das Gesamterscheinungsbild auswirken.

Oftmals bilden kleine, pixelbasierte³ Bilddateien die Grundlage für Texturen, mit denen Oberflächen belegt werden. Erstreckt sich die Textur über einen größeren Bereich, wird die Texturvorlage meist "gekachelt" aufgebracht (Abb. 1.8). Somit läßt sich das Erscheinungsbild der einzelnen Bilddatei wahren, die bei einer Skalierung des einzelnen Bildes auf die größere Gesamtfläche zu Aliasing neigen würde.

Allerdings sind die wenigsten Bilddateien für ein wiederholtes Aneinanderfügen geeignet, da der obere und untere, sowie der linke und rechte Bildrand sich meistens in Helligkeitswerten und/oder Farbverläufen unterscheiden. Der "Stoß" der Texturen tritt dann deutlich zutage und dominiert im schlimmsten Fall die Gesamttextur (Abb. 1.8).

³Pixel: Kleinstes Element eines Computerbildes.

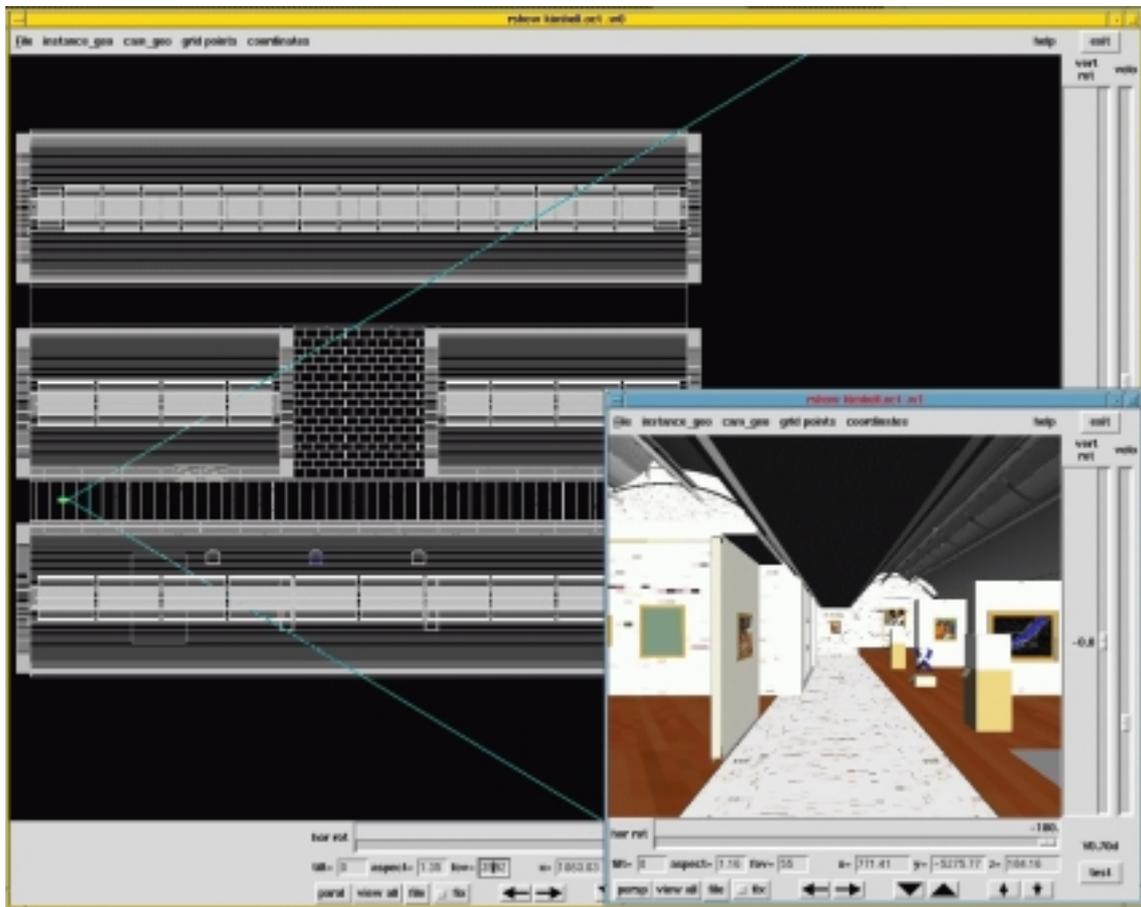


Abbildung 1.7: Dachansicht des modifizierten CAD-Modells mit Kamerastandpunkt in rshow



Abbildung 1.8: Beispiel der wiederholten Auflage eines Bildes auf einer Fläche (Texturierung): Links die ganze Fläche füllend, in der Mitte mit zweifacher Wiederholung in beiden Richtungen, rechts mit 8-facher Wiederholung. Bei Wiederholungen machen sich Grundmuster des Texturbilds stärker bemerkbar.

Bei der Auswahl des Bildausschnittes wurden daher auch größere Flächen mit einbezogen, um eine realitätsnahe Abbildung überprüfen zu können.

Daneben gibt es auch die Möglichkeit durch Prozeduren definierte Texturen zu generieren. Geprüft wurde ob und wie sich solche Texturen erzeugen lassen sowie deren visuelle und lichttechnischen Eigenschaften.

Bei ersten Testläufen zeigte sich zudem, daß es unter Lightscape bei einigen Materialeigenschaften zu unerwünschten Ergebnissen kam: So erschien die Rückseite des oberen Reflektors hell leuchtend, obwohl dieser Bereich eigentlich opak sein sollte. Zur Verifizierung dieses Problems wurde ein zweiter Reflektor modelliert, der mit einem Abstand von nur 0,1 mm zu Ersterem versetzt angeordnet wurde. Durch diese Anordnung sollen Rundungstoleranzen überprüft werden (siehe Kap. 5.2.2.3).

Zuletzt sollten sich die Kunstlichtquellen möglichst realitätsnah abbilden lassen. Die Übernahme der von Lampenherstellern veröffentlichten Leuchtverteilungskurven (LVK) sollte daher die Grundlage für die Einbindung von Leuchten bilden. Bewertet wurde neben der Handhabung der Integration der LVK's auch das Erscheinungsbild der Lampen selbst.

Als Zeicheneinheit wurden "cm" gewählt. Die "bounding box"⁴ des Gesamtmodells hat eine Größe von 2630 x 3170 x 677 cm.

⁴Die "bounding box" ist der minimale Quader, der die Szene einschließt.

Kapitel 2

Import der CAD-Daten

Welche Eigenschaften der Simulationsprogramme sind schon bei der Modellierung im CAD Programm zu berücksichtigen, und wie leicht ist der Import in die Simulationsprogramme ?

2.1 Modellstrukturierung

Zur gesteigerten Effizienz bei Erweiterungen, Nachbearbeitungen und Änderungen von CAD-Modellen sind diese normalerweise konsequent strukturiert. Diese Strukturierung wird von CAD Systemen meistens dem Benutzer überlassen, der dadurch nicht an einem gewissen Wildwuchs gehindert wird. Dieser ist für die weitere Verwendung der CAD Daten in Simulationsprogrammen dann entsprechend zeitintensiv.¹ Diese Rückwirkung der Simulationsprogramme auf die initiale Struktur der Arbeit mit dem CAD Programm sollte nicht unterschätzt werden.

Bei der Arbeit mit AutoCAD wird von häufig auftretenden Elementen ein "Bezugsobjekt" (als "Block" bezeichnet) erstellt, welches später lediglich referenziert wird. Diese Bezugsobjekte bestehen meist wiederum selbst aus Referenzen für den Aufbau einer hierarchischen Datenstruktur. Verschiedene Farben, Material oder Oberflächeneigenschaften werden in AutoCAD über separate Zeichenlayer (in anderen CAD Programmen auch Folien oder Ebenen genannt) gesteuert.

Bezugsobjekte (Blöcke) und Zeichenlayer bilden daher auch das Grundgerüst für das Modell des Kimbell Art Museums.

Ein wichtiges Kriterium beim Austausch von CAD-Daten ist die Übernahme der Flächenorientierung. Unter AutoCAD läßt sich bereits bei der Objekterzeugung Einfluß auf die Richtung der Flächennormale nehmen. Der Autor einer Zeichnung ist somit für eventuelle Nachbesserungen an der Flächenorientierung verantwortlich.

In Lightscape und 3D-Studio MAX läßt sich die Richtung der Flächennormalen leicht interaktiv umkehren. Unter Radiance ist dies zur Zeit noch relativ aufwendig, wengleich auch nur für selbstleuchtende Flächen ("light", "illum") und massive Glaskörper ("interface", "dielectric") notwendig zu berücksichtigen.

2.2 Übersicht

Erstes Kriterium für die Handhabung der zu untersuchenden Programme lieferte der Import bzw. die Konvertierung der CAD-Daten in das jeweilige Programm:

¹Englischer Ausdruck dafür: GIGO = garbage in , garbage out

Lightscape bietet eine direkte Importmöglichkeit durch das Standard-Dateiformat von AutoCAD: DWG. Unter 3D-Studio MAX erfolgt der direkte Import von DWG-Dateien über ein Plug-In.

Da die Importfunktionen in Lightscape und 3D-Studio MAX nicht offengelegt sind, hat man auf das Ergebnis des Imports nur wenige Einflußmöglichkeiten.

Zur Übertragung der CAD-Daten von AutoCAD in ein Radiance konformes Format bedarf es eines Übersetzer Programms innerhalb AutoCAD. Angewandt wurde eine überarbeitete und erweiterte Version des Programms *torad*, welches ursprünglich 1993 von Georg Mischler und dem Lehrstuhl für Bauphysik an der ETH Zürich entwickelt wurde. Die Modifizierung des Programms setzte zwar Programmierkenntnisse voraus, gewährt nun aber eine uneingeschränkte Bearbeitung der CAD-Daten.

Zu den Programmen im einzelnen:

2.3 LIGHTSCAPE

Die importierte Modellstruktur orientiert sich sehr stark an den Vorgaben von AutoCAD. Alle Blöcke (auch verschachtelte) sowie alle Layer werden korrekt übernommen und sind unter diesen Begriffen auch ansprechbar. Dies betrifft nicht extern referenzierte Blöcke.² Diese werden von der Importfunktion von Lightscape ignoriert.

Die im Modell über Layer definierten Farben werden als Materialkennung übernommen.

Es besteht die Möglichkeit, DWG-Dateien einzeln zu öffnen oder in ein bestehendes Modell zu integrieren, womit innerhalb von Lightscape ein Zusammenbau und Einfügen einzelner AutoCAD generierter Teilmodelle möglich ist.

Beim Import kann man zudem entscheiden, wie lediglich "umrissene" Geometrien behandelt werden sollen:

Dabei handelt es sich zum einen um geschlossene Umgrenzungslinien, denen keine Höhe zugewiesen ist. Wird beim Import nicht die Option "Cap Closed Entities" verwandt, werden diese Objekte ignoriert. Ansonsten wird die eingeschlossene Fläche in drei- oder vierseitige Polygone zerlegt. Zum anderen handelt es sich um den oberen und unteren Abschluß von Umgrenzungslinien mit zugewiesener Höhe: Einen Kreis kann man somit als offene Röhre oder als geschlossenen Zylinder importieren.

Abgerundete Begrenzungslinien werden in segmentierte Polylinien überführt. Die Auflösung von Bögen und Kreisen ist einstellbar.

Leider kann man diese Optionen nur global auf die zu importierende Datei anwenden: Ein Zylinder, dem die Unterseite fehlt, wie z.B. das Gehäuse eines Spots, kann somit nicht in einem Arbeitsschritt importiert werden falls er mittels eines Kreises mit zugewiesener Höhe sowie einem Kreis als Abschluß erstellt wurde.³ Im Zweifel wählt man die geschlossene Variante und editiert die Deckflächen anschließend von Hand.

Eine weitere Option beim Import ist das Erstellen sogenannter "smoothing groups": In Lightscape werden alle Geometrieobjekte aus flachen Teilflächen zusammengesetzt⁴. Eine Kugel z.B. wird somit facettiert verwaltet, am Bildschirm oder beim Rendern jedoch durch Phong-ähnliche Interpolation der Normalen rund dargestellt. Durch Anwahl dieser Option inkl. Angabe eines Schwellenwertes für den Winkel, den Flächennormalen angrenzender Flächen einschließen, läßt sich die Darstellung der Kanten beeinflussen. Diese Option ist ebenfalls nur global anwendbar.

²Prinzipiell kann jede Zeichnung als Block aufgefaßt werden. Referenziert man eine Datei ohne die Blockdefinition zu importieren, kann man derart eingefügte Blöcke nur global skalieren, drehen oder verschieben, jedoch nicht deren Inhalt manipulieren. Da der Block nicht Bestandteil der Zeichnung wird, spricht man von einem *extern referenzierten Block*.

³Eine weitere Lösung dieses Problems besteht in der Modellierung der halbseitig geschlossenen Röhre in AutoCAD als extrudiertes Polygon plus Abschlußfläche.

⁴Dies ist eine direkte Folge des zugrundeliegenden Algorithmus der Radiosity Lösung.

2.4 3D-Studio MAX

3D-Studio MAX bietet mit seinem mächtigen Materialeditor und zahlreichen Plug-In's vielfältige Möglichkeiten zur Visualisierung und Animation. Mit letzterem setzt das Programm aber einen Schwerpunkt, der dem eigentlich erwünschten effizienten Ablauf von Modellierung und anschließender Lichtsimulation zwar nicht im Wege steht, den ungeübten 3D-Studio MAX Anwender aber mit einer Fülle von Funktionalitäten konfrontiert, die für das Grundverständnis eher hinderlich als fördernd sind.

Händlerangaben zufolge ist im Bereich Architektur für den Import von 3D CAD-Daten und anschließender Visualisierung eher das Programm 3D-Studio VIZ geeignet, dessen DWG-Schnittstelle präziser an AutoCAD angepaßt sein soll. 3D-Studio VIZ ähnelt in den Grundfunktionen 3D-Studio MAX und wirbt mit einer intuitiv und leicht zu bedienenden Oberfläche. Über den integrierten Modeller sollen Leuchtgeometrien und LVK leicht positioniert und bearbeitet werden können. Allerdings räumte dieselbe Quelle auch ein, daß eine korrekte Lichtsimulation anschließend mit Lightscape erfolgen sollte. Daher wurde von der weiteren Untersuchung von 3D-Studio MAX , bzw VIZ abgesehen.

2.5 RADIANCE

Der Export von AutoCAD nach Radiance erfolgt durch ein Zusatzmodul, welches innerhalb von AutoCAD mit direktem Zugang zu der internen Struktur der AutoCAD Daten läuft. Dies ist in diesem Fall möglich, da das Radiance Dateiformat vollständig offengelegt ist und zudem eine relativ transparente Struktur aufweist.

Diese Möglichkeit steht allgemein immer dann offen, wenn folgende Punkte erfüllt sind:

- Das CAD Programm erlaubt direkten Zugriff auf interne Datenformate, und diese Schnittstelle ist dokumentiert. Technisch kann der Export dann durch eine Skriptsprache erfolgen, wie sie AutoCAD mit AutoLISP zur Verfügung stellt. Eine Alternative ist das "Andocken" eigener Programme an das CAD Programm (*linking at runtime*).
- Das Zielformat des Exports ist offengelegt und dokumentiert.

Diese Kriterien sind für die Kombination von AutoCAD und Radiance erfüllt.

Weiterhin bietet Radiance die Möglichkeit, Instanzen⁵ einmal definierter Objekte zu verarbeiten. Somit muß man lediglich die Blockstruktur von AutoCAD auf Radiance abbilden, um in den Genuß einer effizienten Modellstruktur zu gelangen. Diese Aufgabe stand bei der letzten Überarbeitung des Konverters "Torad" im Vordergrund.

Die konsistente Erstellung der Geometrie hat beim Radiance Export eine größere Bedeutung, als bei Lightscape: Da z.B. die Invertierung von Flächennormalen in Radiance, nach dem Export, noch nicht interaktiv möglich ist, wächst bei fehlerhafter Geometrieerstellung der Arbeitsaufwand, falls ein Radiance Material verwendet wird, bei dem die Flächenorientierung relevant ist (z.B. bei massiven Glaskörpern und Sondermaterialien).

⁵Eine Instanz ist dabei die wiederholte Referenz auf ein vorher definiertes Objekt, bei dessen weiterer Einfügung nur eine neue Transformationsmatrix abgespeichert wird. Dadurch ist eine größere Anzahl dieses Objekts speichereffizient modellierbar.

Kapitel 3

Wege zur Simulation

Was wird der CAD Geometrie vor Beginn der Simulation an Daten hinzugefügt ?

Hinzugefügt werden typischerweise Elemente aus zwei im Simulationsprogramm definierten Bibliotheken:

- Materialbibliotheken sind Zusammenstellungen von Parametern für Materialoberflächen, die unter einem Materialnamen referenzierbar sind. Der Umfang der Parameter und die physikalische Relevanz sind abhängig vom Simulationsprogramm.
- Blockbibliotheken enthalten im Detail definierte Geometrien, die in modellierte Szenen eingefügt werden. Dazu zählen z.B. Leuchten oder Einrichtungsgegenstände. Diese Blöcke können dabei vorher grob modellierte Platzhalter in der CAD Geometrie ersetzen.

3.1 Lightscape

3.1.1 Geometrische Nachbearbeitung

Nach dem Import der Geometrien befindet sich Lightscape im sogenannten *Preparation-Modus* (Abb. 3.1), in dem die Einbindung von Material- und Blockbibliotheken möglich ist:

Leuchten werden in Lightscape wie alle anderen Blöcke behandelt, d.h. sie können aus einer (externen) Bibliothek zugeladen werden.

Neben der Erstellung eigener Bibliotheken bietet Lightscape die Möglichkeit, mitgelieferte Bibliotheken zu installieren. Wendet man diese Bibliotheken konsequent an, können durch das Einfügen von Platzhaltern auch komplexe Geometrien gut bearbeitet werden.

Bei den Materialien verfährt man ähnlich.

3.1.2 Blöcke



Alle Blöcke können nach dem Import einzeln selektiert und nachbearbeitet werden. Dabei wechselt das Programm in einen Editiermodus, während dem das Hauptmodell ausgeblendet wird (Abb. 3.2). Alle Strukturierungselemente (Layer, Materialien, Blöcke) bleiben dabei zugänglich. Vor allem für die Zuweisung von Materialien oder beim Invertieren von Oberflächennormalen ist dieser Modus sehr hilfreich. Nach Verlassen des Editiermodus werden die Änderungen auf alle referenzierten Objekte angewandt.

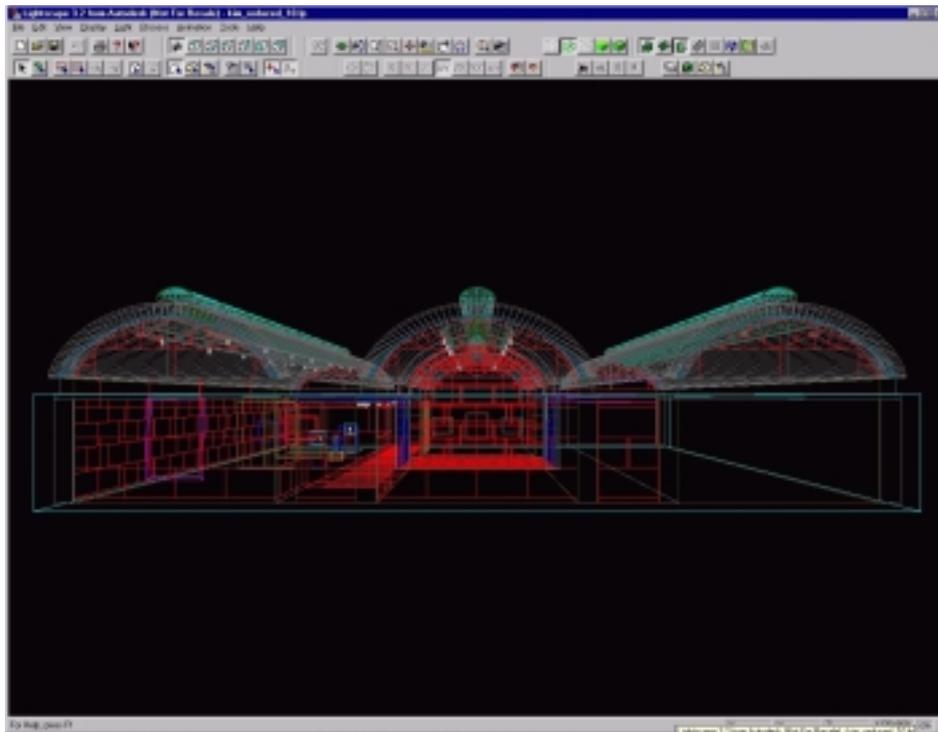


Abbildung 3.1: Import der Geometriedaten nach Lightscape

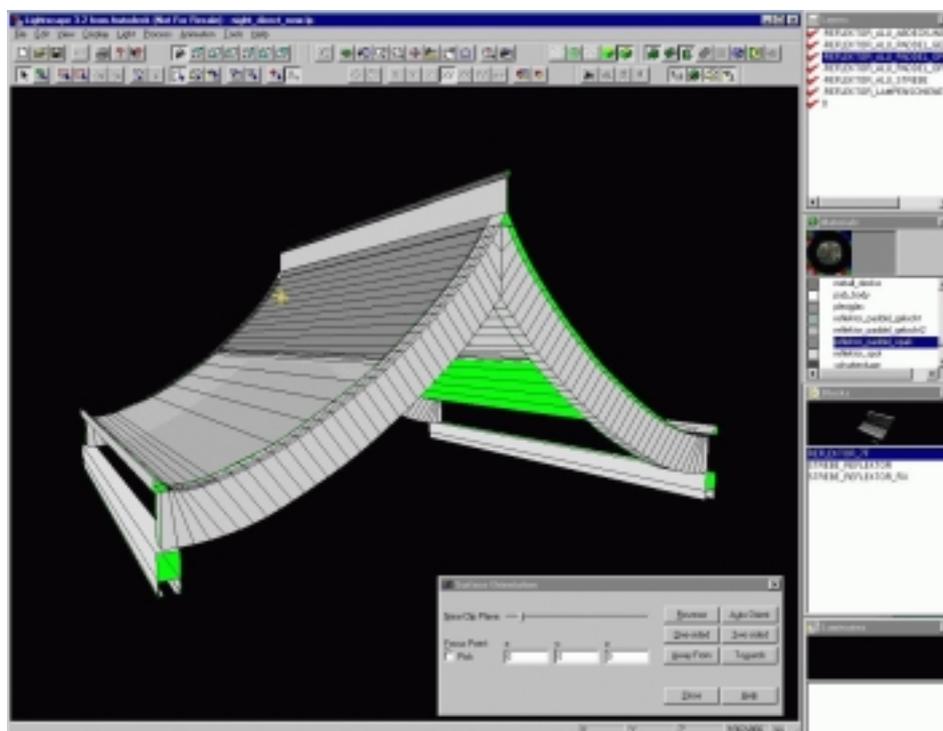


Abbildung 3.2: Blockreferenz des Reflektors. Eingblendet ist das Menü zum Invertieren der Flächennormalen. Die Rückseiten der Flächen sind grün dargestellt.

3.1.3 Lichtquellen

Ebenfalls hilfreich ist der Editiermodus beim Zuweisen von Lichtverteilungskurven (LVK). Möchte man eine Leuchte im Modell integrieren, greift man entweder auf Herstellerspezifische Bibliotheken zurück, die neben der Geometrie der Leuchtenkörper bereits den passenden Leuchtkörper beinhalten, oder man weist einem modellierten Leuchtengehäuse eine Lampe mit entsprechender Lichtverteilungskurve zu (Abb. 3.3). Diese wird über eine IES-Datei beschrieben.

Die Lampe ist dabei nicht sichtbar: Lightscape unterscheidet künstlich zwischen der Luminanz einer Lichtquelle, deren Energie auf andere Flächen verteilt wird, und der sichtbaren Luminanz bei direkter Sicht auf diese Lichtquelle. Einer Oberfläche in einem Leuchtenblock, dem eine LVK zugeordnet ist, z.B. der Mantel einer Neonröhre, muß explizit ein selbstleuchtendes Material zugewiesen werden, um bei direkter Sicht als lichtemittierend zu erscheinen (siehe Abb. 3.4 und [Aut99, Seite 114]).

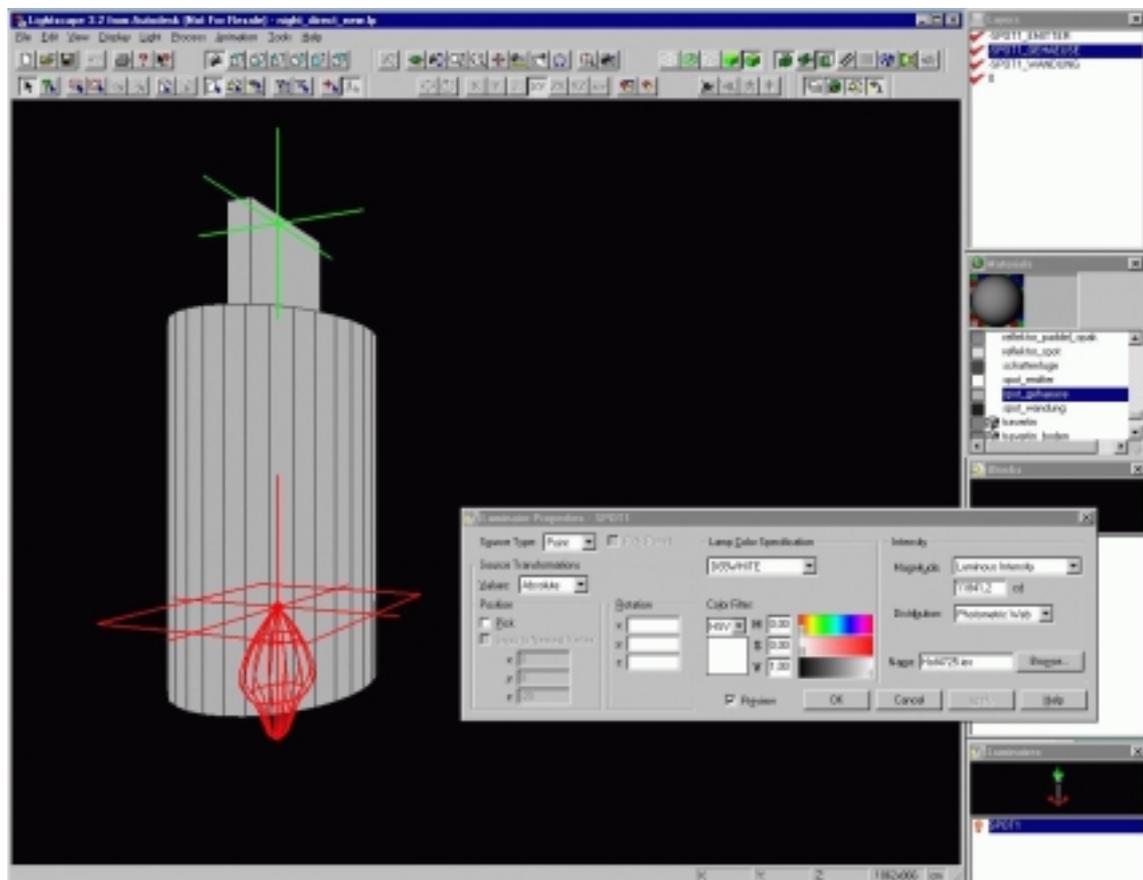


Abbildung 3.3: Blockreferenz einer Leuchte. Über das Menü können die Lampeneigenschaften beeinflusst werden.

Ein selbstleuchtendes Material hat aber keinerlei physikalische Einfluß auf die Lichtverteilung, sondern dient nur der visuellen Darstellung. Dies eröffnet neue Möglichkeiten der Inkonsistenz, besonders bei Untersuchungen zur Blendung, bei denen eine feste Korrelation zwischen Beleuchtung der Umgebung durch eine Lichtquelle und deren Helligkeit bei direkter Sicht in die Lichtquelle notwendig ist.



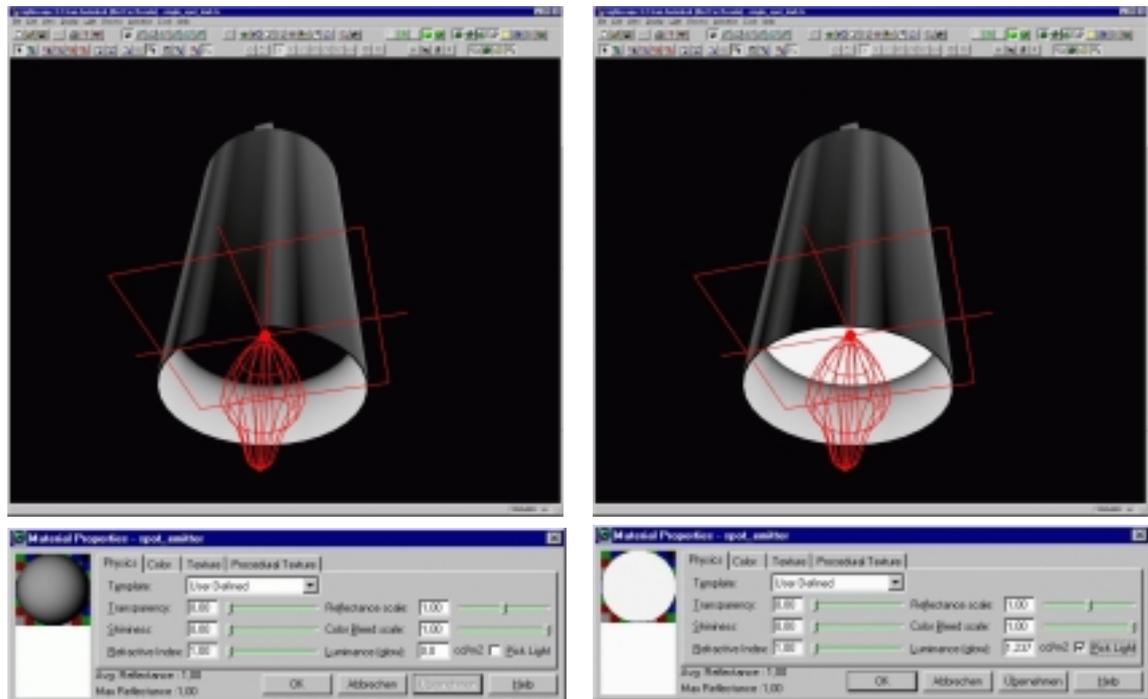


Abbildung 3.4: Beiden Leuchten ist eine LVK zugewiesen (rot eingeblendet), deren Basispunkt knapp unterhalb der Lampenabdeckung liegt. Die Lampe selbst wird nicht dargestellt. Rechts wurde der Emitterfläche ein selbstleuchtendes Material zugewiesen.

3.1.4 Himmelsmodelle und Tageslicht

Die Sonne ist in Lightscape als Lichtquelle modelliert, die paralleles Licht aussendet. Der Himmel wird als Kuppel mit unendlichem Radius abgebildet, in dessen Zentrum die modellierte Szene liegt. Die Helligkeitsverteilung der Himmelskuppel korreliert mit dem Sonnenstand. Soll bei der Simulation Tageslicht mit berücksichtigt werden, helfen verschiedene Parameter die regionalen und lokalen Unterschiede zu berücksichtigen. Neben Angaben über den Sonnenstand, definiert über Standort, Datum und lokaler Uhrzeit, kann die Farbe der Sonne sowie des Himmels justiert werden. Die Voreinstellungen hierfür stimmen mit den IES-Standards¹ überein. Der Grad der Himmelsbewölkung läßt sich in 3 Stufen einstellen: klar, halb bedeckt, bedeckt. (Siehe auch die Diskussion weiterer Himmelsmodelle in Kap. 3.2.4).

3.1.5 Materialzuweisung

Über 4 Masken zur Parametrisierung lassen sich die Materialien editieren.

Am linken Rand des Materialeditors befinden sich zwei Vorschaubilder, die das Material, angewandt auf eine Kugel und eine ebene Fläche, zeigen. Bei Änderungen der Werte werden die beiden Vorschauen sofort nachgeführt. Der Durchmesser der Vorschaukugel läßt sich auf 1, 10, 100 und 1000 Zeicheneinheiten einstellen. Dies ist besonders bei texturierten Materialien von Vorteil. Daneben kann man in den Vorschauen den farbigen Hintergrund sowie Reflexionen ausblenden. Insgesamt bietet die Vorschau aber nur einen sehr groben Anhaltspunkt für das spätere Erscheinungsbild der Materialien (Abb. 3.5).²

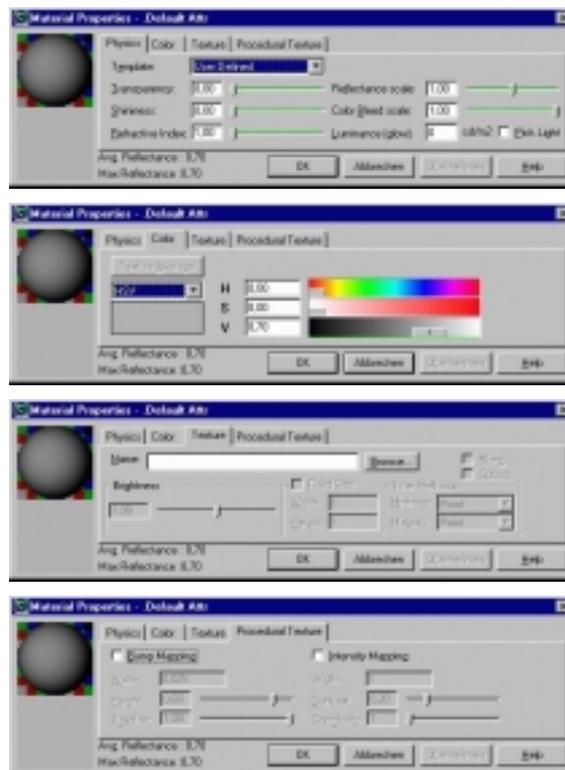


Abbildung 3.5: Die Menüs zum Einstellen der Parameter für benutzerdefinierte Materialien: Physikalische-, Farb- und Texturereigenschaften.

¹Mehr zu IES finden Sie z.B. unter <http://www.iesna.org/>

²Diese Bezeichnung erscheint fraglich: Was ist physikalisch *shininess* ?

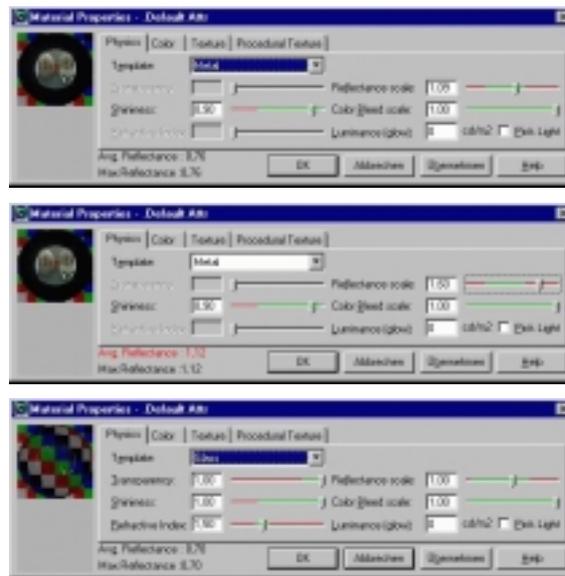


Abbildung 3.6: Die Eingrenzung möglicher Parameter auf sinnvolle Bereiche, abhängig vom Material: Oben ein Metallmaterial, das eine Fehlermeldung bei zu hoher Reflexion ergibt (Mitte). Im unteren Bild die Parameter für Glas.

Als Hilfestellung beim Erstellen von Materialien liefert LightScape mehrere Vorlagen, in denen Grundmaterialien beschrieben sind. Hier finden sich u.a. Voreinstellungen für Kacheln, Stoff, Glas, Papier, Farbe, Metall, Stein, Wasser, Holz. Wählt man eine dieser Vorlagen, werden bei den einzelnen Parametern automatisch Bereiche abgrenzt, die für das gewählte Material als sinnvoll erscheinen (Abb. 3.6).

Bei einigen Materialien werden die Einstellungen sogar noch restriktiver gehandhabt. Wählt man z.B. das Material "Metal", sind die Regler für Transparenz und den Brechungsindex nicht mehr zugänglich (Abb. 3.6). Möchte man diese Parameter trotzdem ändern, bleibt nur der Weg über die benutzerdefinierte Vorlage, bei der alle Einträge erlaubt sind.

Am unteren Rand des Materialeditors finden sich die Werte *Avg. Reflectance* und *Max. Reflectance*. Sie geben an, wieviel diffuses Licht durchschnittlich bzw. maximal von dem gewählten Material in die Bildszene reflektiert wird. Wurde das Material über eine Vorlage erzeugt, erscheint der Eintrag für *Avg. Reflectance* rot hervorgehoben (Abb. 3.6), falls man sich außerhalb der als sinnvoll erachteten Einstellungen befindet.

LightScape empfiehlt bei der Verwendung von Materialvorlagen die Parameter unbedingt innerhalb der vorgegebenen Grenzen halten, um korrekte Simulationsergebnisse zu erhalten.

Über die Eingabemaske *Procedural Texture* lassen sich zwei Effekte auf das Material anwenden. Wählt man die Option *Bump mapping*, erscheint die Oberfläche uneben, bei der Option *Intensity mapping* werden zufällige Bereiche erzeugt, die heller oder dunkler als ihre unmittelbare Umgebung sind. Diese Effekte sind allerdings nur sichtbar, nachdem der Raytracer angewandt wurde, und haben keinen Einfluß auf die Lichtverteilung zwischen den Flächen.

Hat man keinen Zugriff auf umfangreiche Bibliotheken, erlaubt der Materialeditor die schnelle Erstellung einfacher Materialien. Im Vergleich zu einem Materialeditor, wie ihn z.B. 3D-Studio MAX liefert, nimmt er sich jedoch bescheiden aus. Es fehlen umfangreiche Manipulationsmöglichkeiten, wie z.B. die Kombination von Materialien oder die Steuerung der Transparenz über Bildvorlagen. Verwendet man keine Standardmaterialien, stößt man schnell an die Grenzen der Materialabbildung.

3.1.6 Simulationsparameter

Die globalen Parameter für die Genauigkeit und Geschwindigkeit des Radiosity-Verfahrens sowie des damit verbundenen Bedarfs an Arbeitsspeicher gehören zu den diffizilsten Einstellungen von Lightscape. Hilfe bietet ein "Wizard"³, der, abhängig von der gewünschten Qualität (1 = gering, 5 = hoch) und den Lichtverhältnissen (mit oder ohne Tageslicht, Innen- und/oder Aussenbereich) sämtliche Parameter voreinstellt (Abb. 3.7).

Dem Lightscape-Novizen ist dieses Vorgehen unbedingt anzuraten, da sich Sinn und Zweck der Parameter erst nach einiger Praxis im Umgang mit Lightscape einstellen.

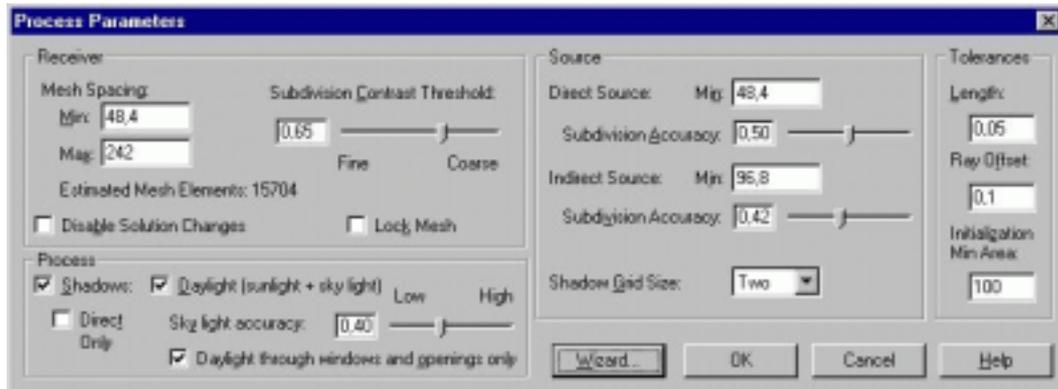


Abbildung 3.7: Die grundlegenden Parameter der Lightscape Simulation

3.1.7 Flächeneigenschaften

Durch die Zuweisung von Flächeneigenschaften kann das Verhalten von Oberflächen bezüglich der Beleuchtung beeinflusst werden. Folgende Zuweisungen sind u.a. möglich:

Occluding: Ist diese Einstellung aktiviert, wird auftreffendes Licht gemäß den Materialeigenschaften beeinflusst. Die Fläche wirft einen Schatten. Bei Deaktivierung passiert das Licht die Oberfläche ohne Beeinflussung.

Receiving: Durch die Aktivierung dieser Option geht auftreffendes Licht in das Radiosity Verfahren in eine Fläche ein. Für selbstleuchtende Materialien sollte diese Option deaktiviert werden.

Reflecting: Diese Option regelt, ob einfallendes Licht auf eine Fläche reflektiert wird oder nicht. Möchte man z.B. die Bestrahlungsstärke einer beliebigen Fläche innerhalb eines Modells erhalten, weist man ihr die Eigenschaften "nonoccluding" und "nonreflecting" zu. Das einfallende Licht ist somit auf dieser Fläche nachweisbar, ohne daß die umgebenden Oberflächen beeinflusst werden.

Window: Wird eine Fläche als Fenster definiert, wird sie als Lichtquelle (treated as a source during natural lighting computations) betrachtet, falls Tageslicht bei der Simulation berücksichtigt wird. Die abgegebene Energie ergibt sich aus dem transmittierten Lichtanteil. Flächen mit der Eigenschaft "Window" sollte deshalb ein transparentes Material zugewiesen werden.

Opening: Öffnungen verhalten sich ähnlich wie Fenster. Sie sind aber nicht Bestandteil der Szene und erhalten oder reflektieren kein Licht. Sie sind vielmehr Platzhalter, durch die natürliches Licht dringt. Öffnungen werden im gerenderten Bild nicht angezeigt.

³Der Anwender wird ob seiner Präferenzen bezüglich eines nachfolgenden Vorgangs befragt. Aus den zur Wahl stehenden Vorschlägen kann immer nur *eine* Auswahl getroffen werden.

Zudem kann für alle Flächen separat der Verfeinerungsgrad der Gittermaschen während des Radiosity-Verfahrens pro Fläche angegeben werden. Dies reduziert die Rechenzeit.

3.1.8 Abschluß des Preparation-Modus

Sind alle Einstellungen getätigt, kann zur Simulation übergegangen werden.

Zuvor fordert Lightscape den Benutzer auf, den aktuellen Bearbeitungsstand zu sichern. Preparation-Dateien (mit der standardmäßigen Endung 'lp') sind reine ASCII-Dateien. Ihr Format ist dem von DXF-Dateien sehr ähnlich, ist aber nicht offengelegt. Durch Speicherung der Punktkoordinaten mit mindestens 15 unsignifikanten Nachkommastellen⁴ bewegen sich die Dateigrößen schnell im Megabytebereich. Die Anzahl der gespeicherten Nachkommastellen ist dabei unabhängig von der Zeicheneinheit. Dies ist umso ärgerlicher, als die vorgeschlagene Toleranz für das Radiosity Verfahren nicht mit der Genauigkeit korreliert, mit der 3D Koordinaten verarbeitet werden.

Mit dem Abschluß des Preparation-Modus endet auch die Möglichkeit, geometrische Veränderungen im Modell vorzunehmen. Dies betrifft die Positionierung von Oberflächen, Blöcken sowie Lichtquellen. Im sich anschließenden Solution-Modus können nur noch Material- oder Lichteigenschaften geändert werden. Möchte man z.B. nachträglich einen Leuchtenblock einfügen, muß man zuerst die zugehörige Preparation-Datei laden und dort die Änderungen vornehmen. Die Simulation muß danach wieder von Beginn gestartet werden.

3.2 Radiance

Radiance ist frei erhältlich vom Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL):

<http://radsite.lbl.gov/radiance/HOME.html>

Die Distribution enthält alle Berechnungsprogramme, die mit Kommandozeilen gesteuert werden.⁵

Als Kern der Simulation steht das Programm `rpict` zur Verfügung, mit dem bildgebende Berechnungen der Leuchtdichte und der Bestrahlungs- und Beleuchtungsstärke im Hintergrund gestartet werden (Abb. 3.8).

Zusätzlich berechnet `rtrace` die lichttechnischen Werte für einzelne Punkte, die z.B. zu Isolux-Linien weiterverarbeitet werden können.

Zur Vorkontrolle von Parametern, Ansichten und Lichtverhältnissen kann das interaktive Programm `rview` verwendet werden (näher beschrieben in Kap. 3.2.2).

Alle diese Programme haben dieselben Kommandozeilenoptionen, die die Parameter der Simulation steuern. Ergebnisse, z.B. der indirekten Beleuchtung, können zwischen den Programmen und zwischen Aufrufen der gleichen Programme in Dateien zwischengespeichert und wiederverwendet werden, was die Rechenzeiten drastisch verkürzt.

Es sei auch auf das 1998 erschienene Buch [WLS98] verwiesen, was für Anfänger und Experten viele Fragen zu Radiance und Lichtsimulation beantwortet und Anwendungsbeispiele enthält. Das folgende ist eine, notwendigerweise kurze, Zusammenfassung der Erfahrung des Autors mit Radiance in den letzten 10 Jahren.

Für Anwender mit Radiance-Erfahrung ist dieser modulare Aufbau sehr leistungsfähig, da jedes Programm eine dedizierte, klar überschaubare Funktion hat. Einsteiger vermissen jedoch eine grafische Benutzeroberfläche (GUI), die den Einstieg vereinfacht. Das Hauptmenü des mitgelieferten Programms `trad` zeigt Abb. 3.9, es läßt jedoch Wünsche nach einer einfachen Bedienbarkeit offen.

⁴Entspricht der Entfernungsangabe Hamburg-München auf die Genauigkeit eines Atomkerndurchmessers.

⁵Im weiteren wird auf eine detaillierte Schilderung von Zusatzprogrammen wie `mkillum` oder `mktris` verzichtet.

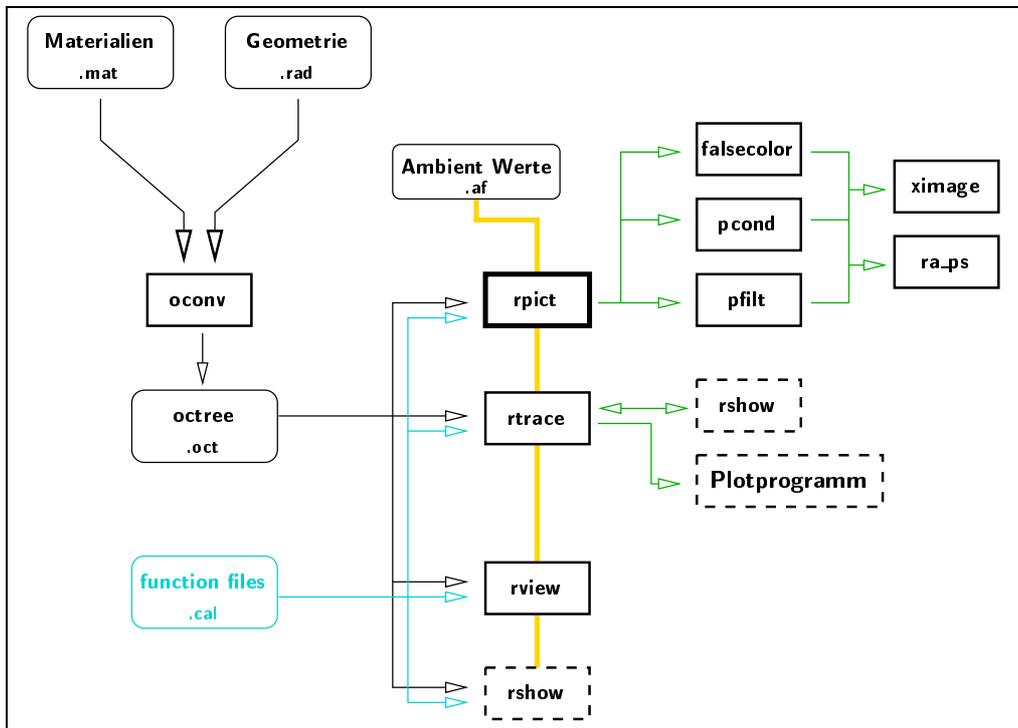


Abbildung 3.8: Übersicht über die modularen Programme im Radiance System. Dateien sind in abgerundeten Boxen dargestellt, Programme in rechteckigen. Gestrichelte Rahmen sind nicht Teil des Kernsystems.



Abbildung 3.9: Hauptmenü des Programms trad

Zur Zeit dieser Studie sind von dritter Seite mehrere grafische Benutzerinterface (GUI) erhältlich. Die am meisten verbreiteten sind:

Rayfront: Ein leistungsfähiges Programm zur Einbettung der Szenengeometrie in die Simulation mit Radiance. Siehe <http://www.schorsch.com/> für weitere Info. (kommerzielle Software)

SiView: Integriert Radiance in AutoCAD und verwendet dessen GUI. (kommerzielle Software)

rshow: Darstellung der Geometrie interaktiv mittels Open-GL. Derzeitige Version enthält viele nützliche Features für die Praxis, jedoch keinen Material Editor. Siehe <http://www.pab-opto.de/progs> für Details. (free software)

Ein Vergleich dieser Programme war nicht Inhalt dieser Studie, die sich im weiteren auf die Vor- und Nachteile des Radiance Kerns konzentriert. Wo nötig wird auf die Vorteile der GUIs verwiesen. SiView stellt dabei ein deutschsprachiges Layout zur Verfügung, bei Rayfront ist dies geplant.

Das Arbeiten mit Kommandozeilen ist für Anwender, die aus der Welt der grafischen Benutzeroberflächen, bei denen jede Aktion mit einem pop-up Menü der Art "Wollen Sie wirklich nicht speichern?" abgesichert wird, kommen, etwas roh, insofern als das kritische Aktionen, wie daß versehentliche Überschreiben wichtiger Dateien nicht so sanft doppelt abgefedert werden.

3.2.1 Datei Organisation

Nach dem Export der CAD-Geometrie liegt diese in Radiance als sogenannte `.rad` Files vor: Diese enthalten die Szenengeometrie aufgebaut in den Geometrieelementen von Radiance: Polygone, Kugeln, Konen und Zylindern. Dazu kommen die Materialien, die in Radiance sehr umfangreiche Eigenschaften beschreiben können: Von einfachen Standardoberflächen, über anisotrope Oberflächen (z.B. gebürstetes Aluminium), bis zu benutzerspezifizierte Flächen. Die Einbindung von Meßwerten der Streufunktion ist möglich. Als letztes enthalten die `.rad` Files auch die Lichtquellen und LVKs.

Zur Beschleunigung der Berechnungen wird aus der Geometrie der `.rad` Files eine dreidimensionale rekursive Raumunterteilung der gesamten Szene in verschachtelte Quader generiert. Dies erfolgt durch das Programm `oconv`, welches vor der eigentlichen Berechnung einmal gestartet wird und aus den Material- und Geometriedateien eine `.oct` Octree-Datei erzeugt.

```
oconv material.mat geometrie.rad > scene.oct
```

Wird die Szenengeometrie geändert, muß `oconv` neu gestartet werden. Änderungen der Materialeigenschaften sind auch danach ohne Risiko von Inkonsistenzen möglich.⁶ Die Laufzeit von `oconv` ist in der Praxis vernachlässigbar und liegt je nach Detailgrad der Szenen bei einigen Sekunden. Er ist für die Beschleunigung der eigentlichen Berechnungen wesentlich, da dadurch die spätere Rechenzeit weniger als linear von der Anzahl der Szenenelementen abhängt. Das heißt, Radiance verarbeitet komplexe Szenen.

Bei komplexeren Szenen mit verschiedenen zu berücksichtigten Aspekten lohnt sich die gruppenweise Aufteilung der verschiedenen `rad` Files auf verschiedene Unterverzeichnisse und die Erstellung eines `make` Files. Letzteres ist ein Steuerdatei für das unter UNIX gebräuchliche Programm `make`, mit dem sich elegant und automatisch Abhängigkeit zwischen Dateien verwalten lassen.

3.2.2 Interaktive Geometriedarstellung

Die ersten Schritte einer Radiance Simulation sind die Kontrolle der Objektgeometrie und Materialdefinitionen. Dazu wird entweder das im Paket enthaltene Programm `rview` verwendet, oder das zusätzlich erhältliche Programm `rshow`:

⁶Die Option `-f` erzeugt *frozen octrees*, in denen die Materialeigenschaften mit enthalten sind. Diese "eingefrorene" Konfiguration der Szene ist beim Vergleich verschiedener Varianten nützlich.

`rview` arbeitet adaptiv, d.h. die Bildbereiche mit hohem Kontrast werden zuerst verfeinert. Zusätzlich kann ein rechteckiger Bildausschnitt interaktiv festgelegt werden (Abb. 3.10). Dies erlaubt die Kontrolle eines Teils des Gesamtbilds. Die Berechnungen sind dabei mit allen Optionen möglich, d.h. das Ergebnis ist dem von `rpict` gleich.

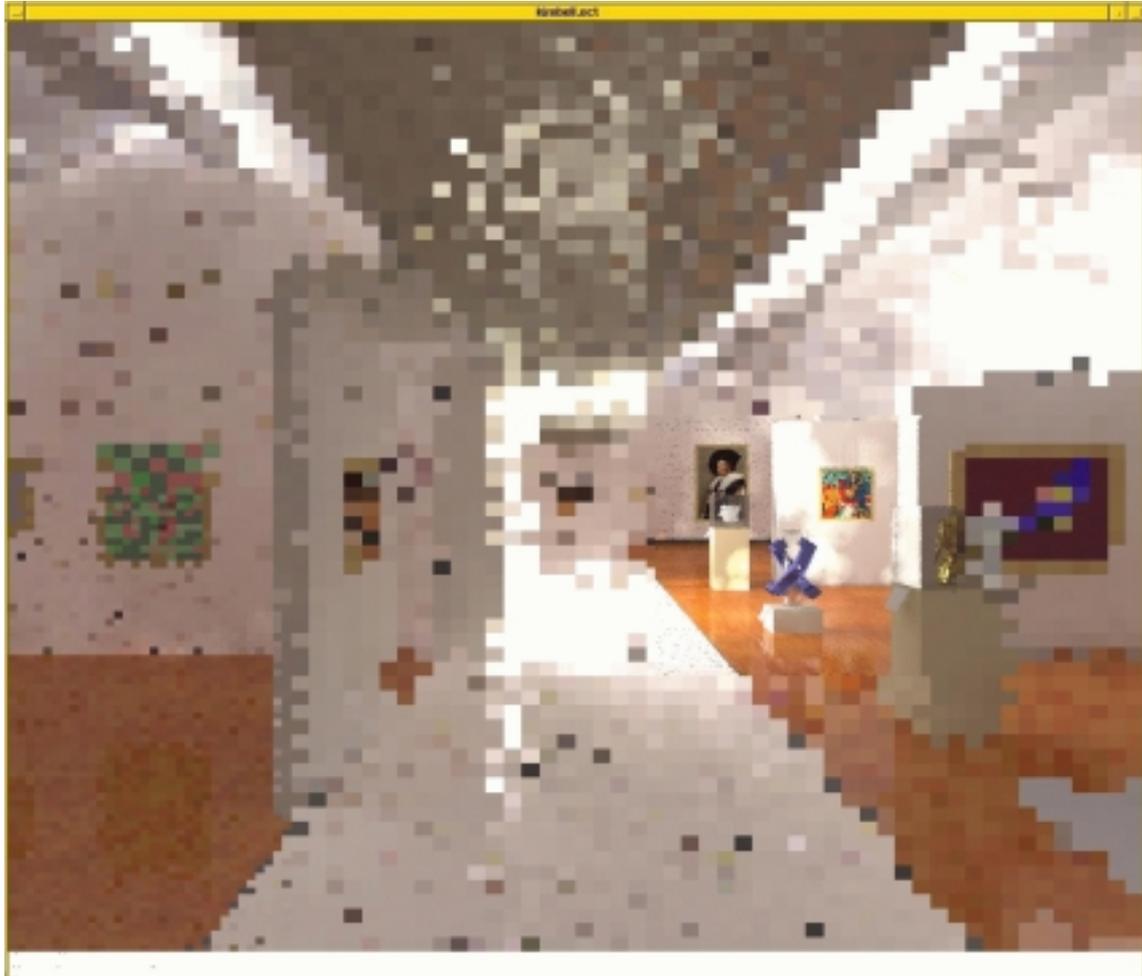


Abbildung 3.10: Interaktiver, adaptiver Bildaufbau in `rview`. Der verfeinerte Ausschnitt wurde vom Benutzer mittels Maus vorgegeben. Rechenzeit ca 15 Sekunden.

`rshow` ist in den meisten Fällen ⁷ schneller und einfacher in der Wahl der Ansicht. Es verwendet den Open-GL Standard zur Darstellung der Geometrie der Szene (Abb. 3.11). Die Darstellung ist dem eines CAD-Programms ähnlich, eine Navigation durch die Szene ist interaktiv in Echtzeit möglich, jedoch wird dieser Vorteil notwendigerweise durch eine krude Wiedergabe von Lichtverhältnissen erkaufte. In der Sprache der Computergrafik ist die Darstellung ein Phong-Modell, das nicht physikalisch richtig ist. ⁸

⁷`rshow` ist derzeit nur dann nicht anzuraten, wenn das Verhältnis von Szenenkomplexität zu Rechnerleistung ungünstig ist. Als Anhaltspunkt mag dienen, daß die hier vorgestellte Geometrie problemlos auf einem Pentium-II 400MHz zu handhaben war. Diese Einschränkung soll nach Angaben des Autors in neuen Versionen verbessert werden.

⁸Es gab Versuche, eine physikalisch richtige Darstellung einer Szene *und* interaktiver Navigation in Echtzeit zu realisieren. Derzeit ist dazu selbst ein Cray Supercomputer nicht ausreichend. Bei der exponentiellen Steigerung der Rechenleistung wird sich dies in Zukunft sicher ändern.

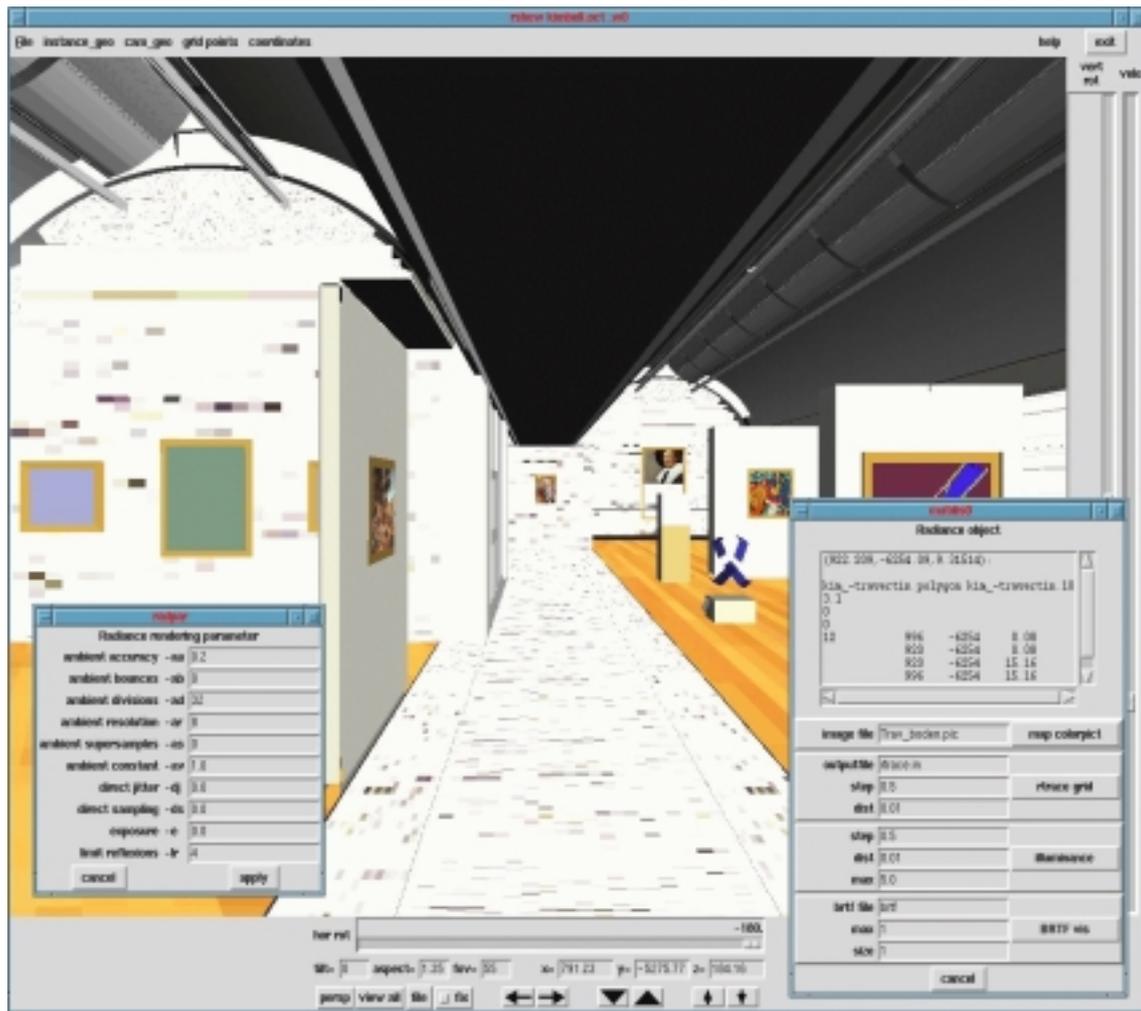


Abbildung 3.11: Hauptmenü des Programms rshow

3.2.3 Materialzuweisung

Das standard Radiance System bietet keine interaktive Auswahl von Materialien, Leuchten oder Texturen. Der Weg führt über mühsames Editieren von ASCII Textdateien, in denen dies festgelegt ist. Dies wird dem Anfänger leicht schwer bedienbar erscheinen. Ein grafisches Benutzerinterface mit einer geführten Materialauswahl ist dringend notwendig, um die Einstiegsschwelle bei Radiance zu reduzieren.⁹

Praktisch unlimitiert durch die Radiance Modelle lassen sich den Oberflächen fast jede beliebige Eigenschaften zuordnen. Drei Methoden der Auswahl einer Oberfläche sind gängig:

- Das Standard Material "plastic", dessen optische Eigenschaften mehr Materialien als nur "Plastik" wiedergeben: Es wird durch die Parameter "Farbe", "Spiegelung" und "Rauheit" angegeben. Die drei Werte für "Farbe" geben den Farbton des Materials als rot-grün-blau Tripel an (siehe auch Kap. 3.2.5), die anderen beiden Parameter steuern den Glanz der Oberfläche. Dieses Materialmodell ist der Standard für einfache Modelle und der Ausgangspunkt für die anspruchsvolleren. Es entspricht in etwa den Möglichkeiten des Lightscape Standardmaterials.
- Komplexere Materialoberflächen lassen sich nach dem Baukastenprinzip kombinieren. Ein Bild würde zum Beispiel mit einer weißen Fläche verbunden werden durch:

```
void colorpict genpic_pic_8177
15 clip_r clip_g clip_b Trav_boden.pic picture.cal pic_v pic_u
-ry -90 -s 0.570033 -t 0 -0.5 -0.570033
0
0

genpic_pic_8177 plastic genpic_pic_8177
0
0
5 1 1 1 0 0
```

Der erste Teil definiert die Zuordnung eines Bild zu einer Fläche, der zweite Teil ordnet dem das Standardmaterial "plastic" zu. Beide werden einfach nacheinander verkettet: Das Resultat ist ein Material mit den physikalischen Eigenschaften von "plastic", dessen Reflexionswerte durch ein Bild gegeben werden. Dies macht einen umständlichen und mühsamen Eindruck, beinhaltet aber weder Überflüssiges, noch in der Praxis Unbrauchbares. Ähnlich lassen sich "bump maps" und ähnliches spezifizieren: Wellen, Riffel. etc. eines Materials.

- Die dritte Möglichkeit der Materialmodellierung ist der Weg über Messungen: Dazu wird eine Probe des zu modellierenden Materials optisch vermessen, d.h. Ihre winkelabhängige Streufunktion (BRDF) wird bestimmt und dieser Datensatz modelliert und in Radiance integriert. Dies kann unter Umständen viel Zeit bei der Material-Modellierung sparen, da das übliche trial-and-error Verfahren durch ein systematischeres Vorgehen ersetzt wird. Wenn es auf genaue Aussagen ankommt, zum Beispiel zur Blendung bei Spiegelungen, lohnt sich der Aufwand einer Messung auf alle Fälle. (siehe z.B. <http://www.ise.fhg.de/radiance/gonio-photometer/intro.html>).

Einige Anmerkungen zur Farbwiedergabe finden sich in Kap. 3.2.5.

3.2.4 Himmelsmodelle und Tageslicht

Die Himmelsmodelle sind in Radiance flexibler als in Lightscape: Im Standardpaket von Radiance ist das Programm "gensky" enthalten, das einen CIE-Himmel generiert. Dieser unterscheidet einen bedeckten, klaren und mittleren Himmel, die durch einen "Turbulenzfaktor" weiter verfeinert werden.

⁹Bei Experten ist anzunehmen, daß sie eine Zahl zwischen 0 und 1 auch ohne grafisches Benutzerinterface in eine Datei eintragen können, und die Freiheit der Materialspezifikation ohne Fehler ausnutzen können.

Wem dies zu ungenau ist, kann mit dem Programm "gendaylit" einen Himmel nach dem Perez-Modell generieren, dessen Leuchtdichteverteilung durch die Angabe von zwei Parametern besser den durchschnittlichen Messungen entspricht (siehe [Del95]).

Liegen Winkelmessungen der Himmelslichtverteilung vor (z.B. mit sog. Skyscannern), lassen sich diese in Radiance als "function-files" einbinden.

Photos der Umgebung lassen sich mit dem Himmel verbinden und beeinflussen damit nicht die Horizontsicht beim Blick auf diesen Teil des Himmels, sondern haben auch zwangsläufig Einfluß auf die Berechnung der Lichtverteilung.

3.2.5 Farbdarstellung

Radiance rechnet in drei Farbkanälen. Die genaue Zuordnung zu Wellenlängenbereichen ist für die eigentlichen Rechnungen unerheblich, erst bei der Auswertung der Daten durch die Programme `ximage`, `falsecolor` oder `pcond` (siehe folgende Kapitel) werden darüber Annahmen gemacht. Dies bedingt dann ebenfalls die Wellenlängenbereiche, die den Farbtripel der Materialien zu Grunde liegen.

Für die Farbinformation in Radiance sind zwei Strategien möglich:

Das "übliche" Vorgehen, bei dem die Farbe der Materialien als Farbtripel geschätzt wird und das fertige Bild nach Erfahrung und Augenmaß auf einem Ausgabegerät reproduziert wird. Dies ist die in anderen Programmen ebenfalls angewandte Praxis. Für eine Berechnung der lichttechnischen Größen ist dies völlig ausreichend, sofern die spektral gemittelten Reflexions- und Transmissionswerte der Materialien richtig sind.

Bei Bedarf an genauere Farbinformation, etwa für die Vorhersage einer "Lichtstimmung", müssen diese beiden Schritte weit mehr mit Meßwerten quantifiziert werden: Die Farbtripel für Reflexion werden dann bei Vorliegen einer Materialprobe aus dem Reflexionsspektrum berechnet. Dazu sind entweder stationäre Spektrometer (z.B. Lambda-9 der Firma Perkin-Ellmer) oder portable Geräte (z.B. CM-525i von Minolta) notwendig. Auch unterstützt Radiance die Eichung von Bildscannern durch die Auswertung des Bilds einer *Macbeth ColorChecker* Farbreferenzkarte. Für eine konsequente Farbtreue ist jedoch die Bildausgabe ebenfalls entscheidend (siehe Kap. 4.2.2). Eine detaillierte Beschreibung geht über den Rahmen dieser Studie hinaus.

3.2.6 Grundlagen und Simulationsparameter

Für eine Simulation, die in der zur Verfügung stehenden Zeit die geforderten Ergebnisse liefert, ist eine gute Wahl der Parameter notwendig. Dazu stehen dem eingefleischten Experten durch die Optionen der Kommandozeilen transparente und gut dokumentierte Steuerungsmöglichkeiten offen. Alternativ bieten die grafischen Benutzerinterface eine Abstraktion, die allgemeinere Begriffe (z.B. "Szenenkomplexität: hoch,mittel,niedrig") in sinnvolle Vorschläge der Radiance Parameter umsetzt, ähnlich dem Lightscape "Wizard".

Bereits im Radiance System enthalten ist das Programm `trad`, welches eine einfache Verwaltung eines Simulationsprojekts und Parameterwahl erlaubt (Abb. 3.9).

Die wichtigsten Parameter sind die der sogenannten *ambient calculations*. Dies ist die Radiance Methode zur Berechnung der Reflexionen zwischen Flächen. Jede Form der indirekten Beleuchtung ist ein Beispiel dafür. Während das von Lightscape verwendete Radiosity Verfahren das mathematische Ideal diffus reflektierender Flächen annimmt, ist das Radiance Verfahren allgemeiner, jedoch aufwendiger.

Im folgenden wird dieses Verfahren etwas näher erläutert und kurz die wichtigsten Parameter erklärt: Radiance verwendet *backward raytracing*, bei dem der Wert eines Pixels dadurch berechnet wird, daß vom Augpunkt ein Sehstrahl durch das Bild auf eine Fläche der Szene (Abb. 3.13) trifft und die dort vorgefundene Strahldichte die Helligkeit des Pixels ergibt. Stellt sich die Frage, wie hell die dort getroffene Fläche ist. Die Helligkeit ergibt sich als Summe dreier Anteile:



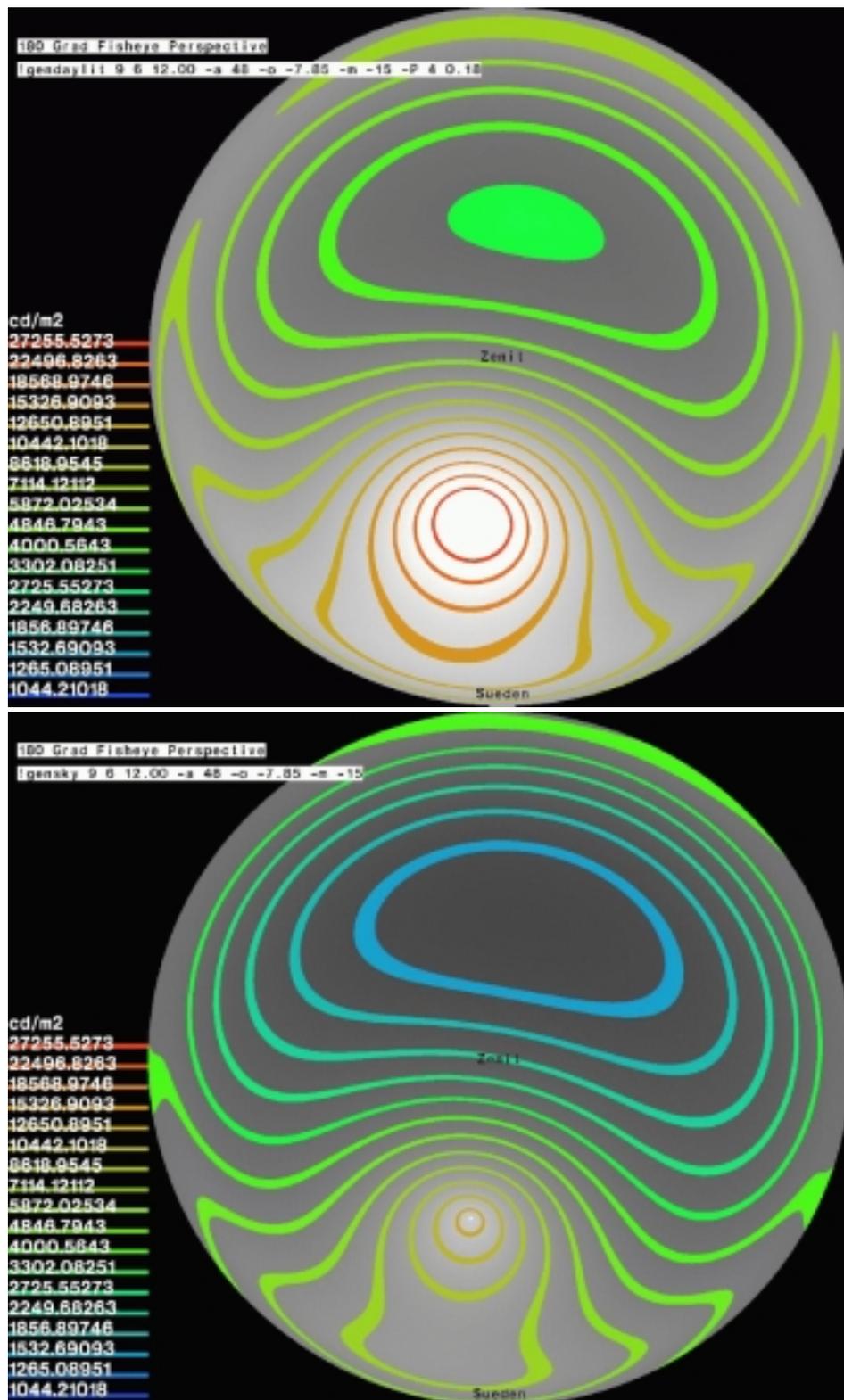


Abbildung 3.12: Winkelverteilungen des Himmelslichts in Radiance: Oben nach dem Perez-Modell bei *gendaylit*, unten mit dem CIE Himmelsmodell und *gensky*. Die im Bild eingeblendeten Angaben sind: 6. September, 12:00 relativ zu 15°O (entsprechend Mitteleuropäischer Zeitzone), Ortslänge 7.85°O, Ortsbreite 48°N, Perez Parameter $\epsilon = 4$, $\delta = 0.18$. Für letztere siehe [Del95]. Man beachte die höhere Zirkumsolarstrahlung beim Perez-Modell.

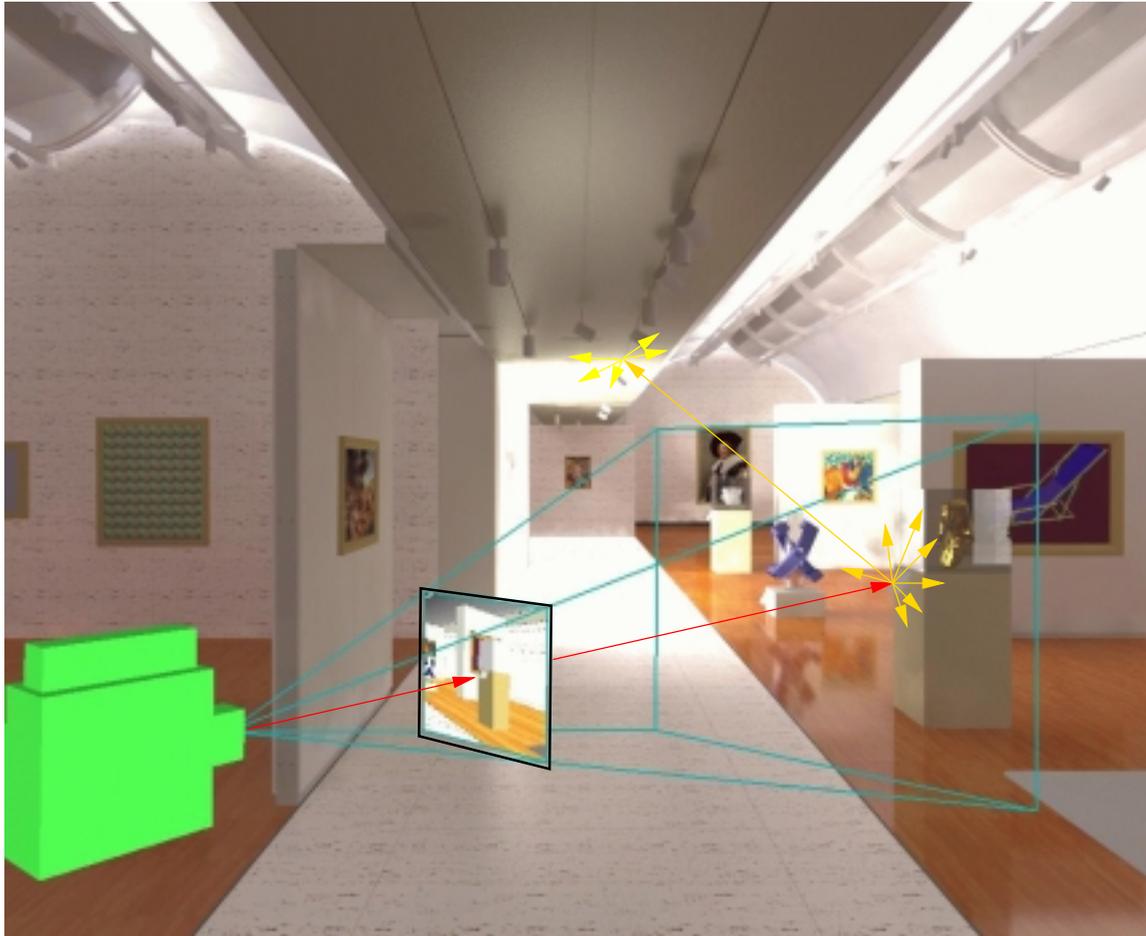


Abbildung 3.13: Illustration des *backward-raytracing* Verfahren in Radiance: In der drei dimensional modellierte Szene generiert eine "synthetische" Kamera, hier als grüner Kasten angedeutet, von einem bestimmten Betrachterstandpunkt ein Bild in eine gegebene Richtung. Diese Bild zeigt den durch die perspektive Projektion vorgegebene pyramidenförmigen Raumbereich. Das Bild wird dadurch aufgebaut, daß einzelne "Sehstrahlen" von der Kamera in die Szene gesandt werden (durch rote Linie angedeutet), auf eine Fläche der Szene treffen, und die Beleuchtungsverhältnisse an diesem Punkt berechnet werden. Dabei wird analysiert, wieviel Licht aus allen Raumrichtungen auf diesen Punkt einfällt. Dafür werden rekursiv Teststrahlen in alle Richtungen gesandt (gelbe Pfeile).

direkte Beleuchtung Alles Licht, welches auf die betreffende Fläche direkt von den Lichtquellen fällt.

sekundäre direkte Beleuchtung dito, jedoch reflektiert durch spiegelnde Flächen

indirektes Licht *ambient calculations*

Bei dem letzten Teil muß festgestellt werden, wieviel Licht von anderen Flächen in der Szene auf die betreffende Fläche trifft. Dies wird dadurch berechnet, daß ein Bündel von Strahlen, ähnlich einem Igel in den Halbraum über der betreffenden Fläche gesendet werden. Diese Strahlen liefern dann die Strahldichte zurück, die aus dieser Raumrichtung auf die betreffenden Fläche einfällt. Das Verfahren ist rekursiv.

Wenn dadurch bekannt ist, wieviel Licht auf die betreffende Fläche trifft, ergibt eine Gewichtung mit der Oberflächenreflexion der Fläche die gesuchte ausfallende Strahldichte.

Rechentechisch ist dieses Verfahren nur dadurch umzusetzen, daß zwischen den Berechnungen der "Igel" interpoliert wird. Ansonsten wäre der Rechenaufwand durch die Rekursion unpraktikabel. Es ist Greg Ward's Verdienst diese Idee in Radiance realisiert zu haben und damit für die Praxis tauglich zu machen [WRC88]. Diese Interpolation bringt dem Benutzer zwei weitere Parameter, deren Einstellung in den meisten Fällen bei den Standard-Werten bleiben kann.

Damit gibt es zwei ganz wichtige und drei wichtige Parameter, die für die Qualität und Rechenzeit eine zentrale Rolle spielen: Die typischen Werte sind in Tab. 3.14 angegeben.

ab Anzahl der Rekursionen, d.h. die Anzahl der berücksichtigten indirekten Reflexion.

ad Anzahl der "Igel"-Strahlen

as Anzahl zusätzlich versandte "Igel"-Strahlen

aa Genauigkeit der Interpolation zwischen den "Igel". Ein kleinerer Wert bedeutet höheren Rechenaufwand.

ar Maximaler geometrischer Abstand zweier "Igel" bevor ein weitere berechnet wird.

Parameter	minimal	maximal sinnvoll	typisch	Einfluß
ab	0	ca 12	3-7	ansteigende Rechenzeit und Qualität
ad	500	ca 4000	1200	ansteigende Rechenzeit und Qualität
as	0	500	100	100-300 ist ein guter Wert
aa	0.5	0.05	0.2	bei Problemen: ad höher setzen
ar	32	ca 1024	128	nur bei pathologischen Fällen setzen

Abbildung 3.14: Die wichtigsten Parameter der Ambient Berechnungen

In der Natur des Algorithmus liegt eine statische Schwankung durch das verwendete Monte-Carlo Verfahren. Bei zu kleinem ad Wert äußert sich dies in "Schimmelflecken" im Bild: Abbildung 3.15 zeigt drei Stufen der *ambient calculations* und die jeweiligen Rechenzeiten.

Die ambient Werte einer Berechnung lassen sich in einer Datei zwischenspeichern, so daß dieser aufwendige Schritt für verschiedene Ansichten derselben Geometrie nur einmal ausgeführt werden muß. Die Ambient Werte sind unabhängig vom Betrachterstandpunkt.

Die Zwischenspeicherung in einer Datei beschleunigt auch die Berechnung, wenn vor der eigentlichen Rechnung ein Vorlauf mit gleichen Parametern, aber kleinerer Bildauflösung durchgeführt wird. Hier reichen zum Beispiel 200x200 Pixel, um die Szene mit Ambient Werten zu "bevölkern" und nachfolgende Rechnungen zu beschleunigen.

Im Gegensatz zu Lightscape erlaubt der Algorithmus keine Angabe darüber, wieviel des einfallenden Lichts bereits verteilt ist, da es keiner expliziten Angabe von Öffnungen, Fenstern oder ähnlichem gibt.

Auch sind die Rekursionstiefen, die mit `ab` angegeben werden, nicht schrittweise zu verwenden, d.h. es macht keinen Sinn, zuerst mit `ab=1` und dann mit der gleichen Ambient Datei ein `ab=2` zu versuchen. In diesem Fall weist Radiance (mit Recht) auf eine Inkonsistenz zwischen den beiden Aufrufen hin.



Bei Zwischenspeicherung der Ambient Werte in einer Ambient Datei sollte die Geometrie und die Materialparameter nicht mehr geändert werden.

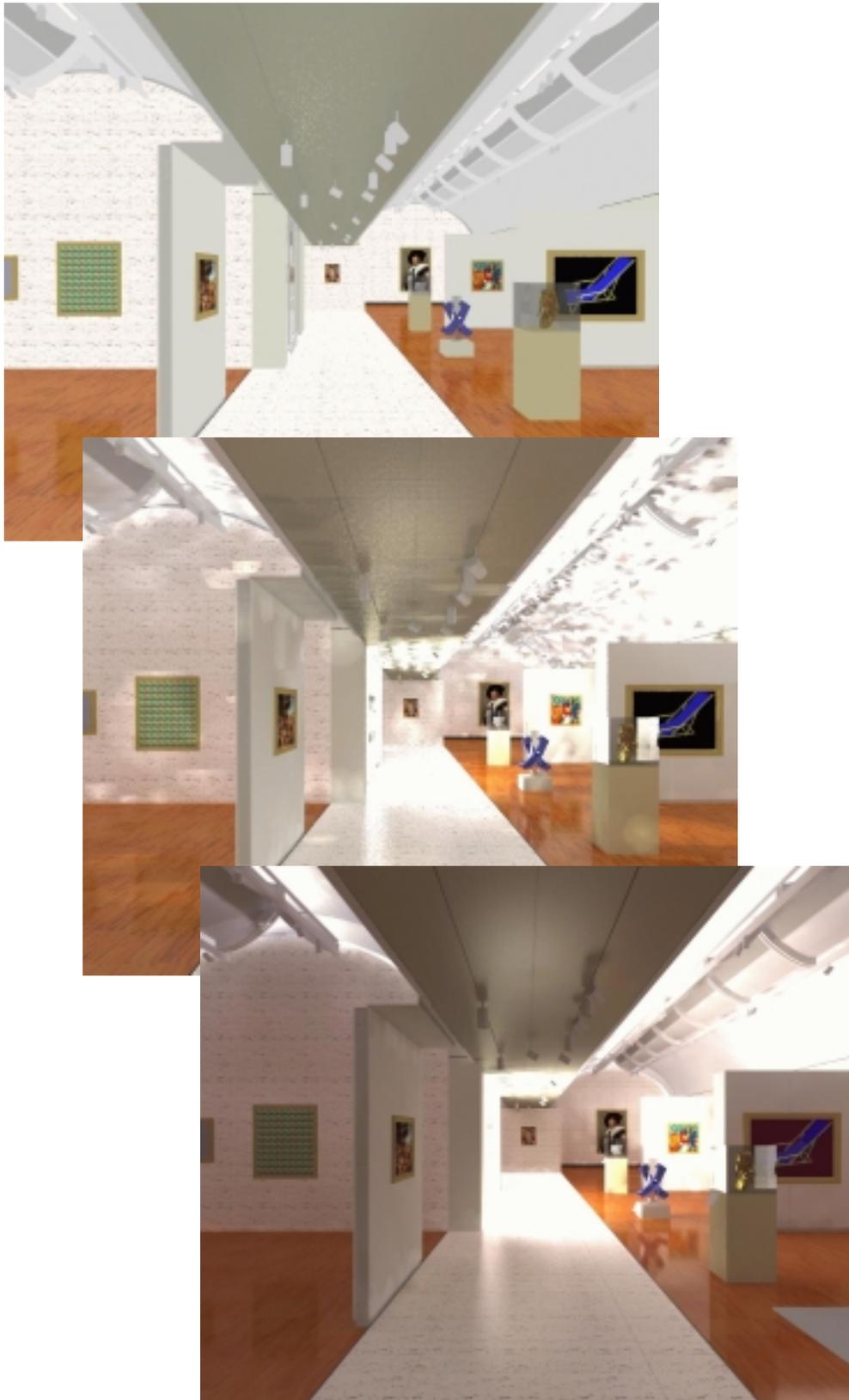


Abbildung 3.15: Drei verschiedene Einstellungen der Ambient-Berechnungen in Radiance: V.o.n.u: Konstanter Ambient Wert (d.h. keine Ambient Berechnung, $ab=0$, Rechenzeit 0.135h) Eine indirekte Reflexion ($ab=1$, $ad=128$, 0.431h) und sieben indirekte Reflexionen ($ab=7$, $ad=16000$, 24h). Die "Schimmelflecken" an den Decken sind bei höherem ad -Wert verschwunden.

Kapitel 4

Die Simulation

Wie wird die eigentliche Simulation in der Praxis realisiert ?

4.1 Lightscape

4.1.1 Initialisierung

Zur Vorbereitung der Simulation erfolgt eine Initialisierung, wobei die Geometriedaten sowie die Lichtquellen in ein effizienteres Format für das nachfolgende Radiosity-Verfahren konvertiert werden.

Lightscape gibt hierzu noch den Ratschlag, bei großen Modellen keine Layer zu verwenden, auf denen eine große Anzahl Flächen liegt. Die Initialisierung soll dann schneller vonstatten gehen.

Was Lightscape unter einer *großen Anzahl* versteht, wird leider nicht verraten.

Obwohl die Initialisierung nichts am Aussehen oder der Charakteristik des Modells ändert, werden dennoch einige Änderungen vollzogen:

- alle Blöcke werden aufgelöst. Dies macht durchaus Sinn, da an verschiedenen Stellen eingefügte Blöcke selten gleich beleuchtet sind. Die Beleuchtungsstärke wird direkt den Oberflächen zugeordnet.
- doppelseitige Flächen werden in 2 separate Flächen mit entgegengesetzter Flächennormale überführt. Da beide Flächen in der gleichen Ebenen übereinanderliegen, wird beiden Flächen die Flächeneigenschaft "nonreflecting" zugewiesen. Lightscape rät dazu derartige Flächen zu vermeiden.
- Die erzeugten Oberflächen werden zu Gruppen zusammengefaßt. Gruppenmitglieder müssen auf dem gleichen Layer liegen, ihnen muß das gleiche Material zugewiesen sein, und sie müssen die gleichen Flächeneigenschaften besitzen. Die Flächen müssen koplanar sein und an Gruppenmitglieder direkt angrenzen. Eine Fläche liegt für Lightscape auch dann in einer Ebene, wenn der Abstand aller Eckpunkte der Fläche zur Ebene kleiner einem Toleranzwert ist. Der Wert kann frei gewählt werden und beeinflusst neben der Lichtverteilung auch das "Verschweißen" der Eckpunkte. Außerdem werden bei der Gruppierung von Flächen sogenannte T-Punkte ¹ eliminiert.
- Lightscape erzeugt in Abhängigkeit von den Simulationsparametern für alle Oberflächen ein initiales Gitternetz (*initial radiosity mesh*). Alle Maschen des Gitters bestehen aus drei- oder vierseitigen

¹T-Punkte entstehen, wenn der Eckpunkt einer Fläche auf der Kante einer angrenzenden Fläche liegt. Dies kann zu Diskontinuitäten während des Radiosity-Verfahrens führen. Lightscape fügt am Kantenschnittpunkt automatisch einen neuen Eckpunkt ein.

Polygonen (*It connects the vertices of the input surfaces to form triangular and convex quadrilateral mesh elements*). Jedem Mascheneckpunkt wird einen Beleuchtungswert (*illumination value*) von 0 zugewiesen.

Günstige Flächen, wie z.B. gleichseitige Dreiecke oder Quadrate können effektiver verarbeitet werden und verursachen seltener visuelle Artefakte.

- Elemente auf nicht-aktiven Layern werden entfernt

Ab der Initialisierung werden die Daten in einer Solution-Datei (mit der standardmäßigen Endung *!s*) gespeichert.

4.1.2 Iterationen und Radiosity-Verfahren

Lightscape verwendet bei der Simulation ein iteratives Verfahren mit fortlaufender Verfeinerung der Verteilung des Lichts, welches von Primärlichtquellen (Sonne, Himmel, Lampen), Sekundärlichtquellen ("Windows" und "Openings") oder dem reflektierten Lichtanteil von Oberflächen stammt.

Zu Beginn wählt Lightscape die hellste Lichtquelle (die die meiste Energie emittiert) und berechnet deren Beitrag auf alle Gittereckpunkte der Szene. Danach folgen, in absteigender Reihenfolge der Stärke ihrer Lichtemission, alle Lichtquellen. Verdecken sich dabei Gittermaschen entsteht ein Schattenwurf.

Zur Bestimmung der auf eine Gittermasche auftreffenden Lichtenergie interpoliert Lightscape die für die Eckpunkte ermittelten Werte. Übersteigt dabei das Verhältnis von hellstem und dunkelstem Eckpunkt einen Schwellenwert, wird die Gittermasche in 4 ähnliche Maschen unterteilt. Dieser Vorgang wird iterativ solange fortgesetzt, bis der Schwellenwert unterschritten wird oder eine Mindestgröße für die Gittermasche erreicht ist. Beide Bedingungen können über die Simulationsparameter voreingestellt werden.

Durch dieses Verfahren erfolgt eine Verfeinerung der Gittermaschen nur an den Stellen, die lichtrelevante Unterschiede aufweisen, wie z.B. einer Schattenkante oder dem Rand eines Lichtkegels.

Abhängig von den Materialeigenschaften wird ein Teil der auftreffenden Lichtenergie von der Fläche absorbiert, reflektiert oder durchdringt sie. Dabei gelten alle reflektierenden Oberflächen als ideal diffus (*Lambertian*), d.h. sie reflektieren das Licht gleichmäßig in alle Richtungen.

Nachdem alle direkten Lichtquellen berücksichtigt wurden ermittelt Lightscape diejenige Gittermasche, welche den höchsten Betrag an Lichtenergie reflektiert oder, wie im Falle eines Fensters, transmittiert. Diese verteilt nun ihrerseits als sekundäre Lichtquelle erneut Energie. Danach wird, in absteigender Reihenfolge ihres Energiebetrages, die Verteilung aller übrigen Gittermaschen berechnet.

Dieses Verfahren wird solange durchgeführt, bis ein Energiegleichgewicht zwischen eingestrahelter und absorbierter Energie eingetreten ist (*the simulation reaches a state of convergence*).

Mit jedem dieser iterativen Verfahrensschritte wird ein Teil der Gesamtenergie in der Szene verteilt. Die Schrittweite der verteilten Energie nimmt mit steigender Anzahl der Iteration immer mehr ab (Konvergenz der Lösung). In der Praxis stellt man nach einem Bruchteil der Gesamtiterationen jedoch keinen visuellen Unterschied mehr fest.

Da während der Simulation nur die bereits verteilte Lichtenergie am Monitor dargestellt wird, erscheint die gewählte Ansicht einer Szene nach Abschluß der Initialisierung zunächst schwarz. Mit jeder Iteration wird jedoch mehr Licht angezeigt. Zur Orientierung über den Fortgang der Lichtverteilung informiert eine Anzeige darüber, wieviel Prozent der ursprünglich zur Verfügung gestellten Energie schon verteilt ist.

Der Iterationsprozeß kann bei jeder beliebigen Iteration angehalten, gespeichert und später mit der nächsten Iteration fortgesetzt werden.

4.1.3 Nachträgliche Änderungen

Bei angehaltenem Iterationsprozeß können Materialeigenschaften und die photometrischen Eigenschaften von Leuchten geändert werden. Änderungen am Material werden sofort visuell angepaßt. Wurde von einer geänderten Oberfläche jedoch schon Licht in die Umgebung reflektiert oder wurden Lampeneigenschaften geändert, benötigt das Programm einige weitere Iterationen um die Änderungen nachzuführen. Alternativ kann natürlich auch die gesamte Simulation wiederholt werden. Wurden signifikante Änderungen vorgenommen, rät Lightscape zu letzterem.

4.1.4 Auswertung

Nach Ablauf aller Iterationen, oder falls der Iterationsprozeß angehalten wurde, erhält man als Resultat die Verteilung des diffusen Lichtes in der vorgegebenen Szene (Abb. 4.1).

Ein Vorteil des Radiosity-Verfahrens liegt darin, daß die Ergebnisse der Lichtverteilung unabhängig vom Standort des Betrachters sind. Man kann die Lichtverteilung in Bereichen, die von besonderer Bedeutung sind, näher betrachten, ohne die Simulation erneut starten zu müssen. Diese Möglichkeit unterscheidet sich grundlegend vom Raytracing-Verfahren, bei dem für jede gewählte Ansicht eine eigene Berechnung gestartet werden muß.

Zur Analyse der Lichtverhältnisse besteht die Möglichkeit, die Verteilung der Leuchtstärke oder der Leuchtdichte über ein Falschfarben- oder Graustufenbild graphisch darzustellen. Vorgabemäßig wird die Farbumsetzung linear skaliert. Zur Untersuchung von Flächen, die, verglichen zur maximalen Beleuchtung der Szene, nur sehr schwach beleuchtet sind, kann die Farbumsetzung auch logarithmisch skaliert werden. Der Skalenbereich ist dabei frei wählbar.

Von jedem beliebigen "anklickbaren" Punkt der Szene kann die Leuchtstärke und Leuchtdichte abgerufen werden.

Auf jede beliebige Fläche der Szene kann ein "Meßgitter" gelegt werden, dessen Maschenweite frei wählbar ist. An den Gitterpunkten sind wahlweise die Leuchtstärke oder Leuchtdichte der korrespondierenden Werte darstellbar. Leider läßt sich die Schriftgröße der angezeigten Werte nicht editieren. Zudem läßt sich die Genauigkeit der Anzeige nur global für Vor- und Nachkommastellen einstellen. Dies führt zu teilweise abstrusen Darstellungen. So werden die Werte von 1234,5678 lux und 12.3456 lux bei einer Einstellung von 8 Stellen Genauigkeit mit "1234,5678" bzw. "12,345600" ausgegeben. Ändert man die Genauigkeit auf 2 Stellen wird "1,2e+003" bzw. "12," ausgegeben. Da sich die Anzeigewerte bei engem Gitterabstand überlappen, wird das Ganze leicht unübersichtlich und bringt keinen wirklichen Nutzen. Eine Möglichkeit, ermittelte Gitterwerte in eine Datei zu schreiben, wurden nicht gefunden.

Die Analysemöglichkeiten beschränken sich ausnahmslos auf das Ergebnis des Radiosity-Verfahrens. Zur Beschleunigung der Simulation kann aber z.B. die Darstellung des direkt einfallenden Sonnenlichtes unterbunden werden. Dabei wird die Sonne nur zur Berechnung der indirekten Beleuchtung verwandt. Diese Option wendet man vor allem dann an, wenn man anschließend ein Bild mit dem Raytracer erzeugen möchte. Unter anderem werden Schatten beim Raytracing-Verfahren präziser abgebildet.

Wäre die direkte Beleuchtung in die Darstellung des Radiosity-Verfahrens mit eingegangen, müßte der direkte Anteil und seine Auswirkungen zuerst wieder entfernt werden, bevor der Raytracer in Aktion tritt, da andernfalls die direkte Beleuchtung doppelt im Ergebnis auftreten würde. Die Simulation würde keine korrekten Ergebnisse liefern. Läßt man die direkte Beleuchtung in das Radiosity Verfahren eingehen, äußert sich dies allerdings in deutlich längeren Rechenzeiten.

4.1.5 Raytracing

Raytracing in Lightscape ist der eigentlichen Lichtberechnung durch das Radiosity Verfahren nachgeschaltet und dient mehr der optischen Aufbesserung des Bildes, denn der physikalisch richtigen



Abbildung 4.1: Ergebnisse der Lightscape Berechnungen für zwei Sonnenstände

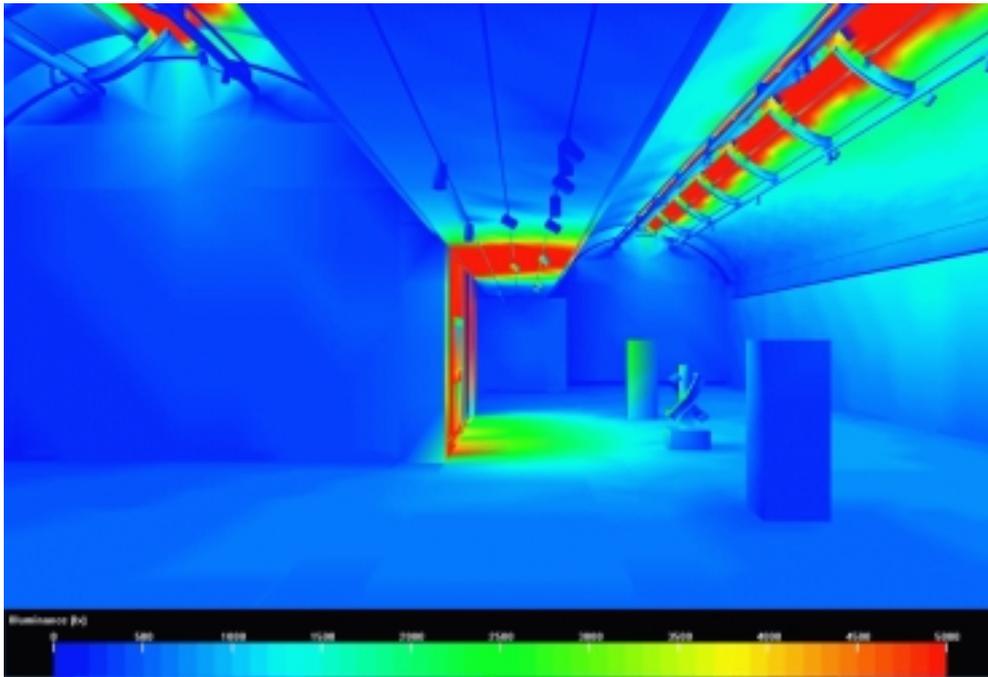


Abbildung 4.2: Ergebnisse der Lightscape Berechnungen als Falschfarben-Darstellung

Berechnung von Lichtverhältnissen. Hauptsächlich Anwendungen sind die Darstellung von Spiegelungen (z.B. der Vitrinen im modellierten Ausstellungsraum), Reflexionen von Lichtquellen in Materialien und Texturen.

Für alle Lichtquellen (Lampen, Sonne, Himmelslicht) ist einstellbar, ob sie im Raytracing-Verfahren berücksichtigt werden.

4.1.6 Batch-Mode

Radiosity-Verfahren und Raytracing können auch über Kommandozeilen ausgeführt werden. Damit eröffnen sich auch dem Lightscape Nutzer die Möglichkeiten der Skript-gesteuerten Bearbeitung komplexer Probleme. Zum Beispiel eine Geschwindigkeitssteigerung, da jeder Iterationsschritt nicht am Monitor generiert werden muß. Auch möglich ist das Abarbeiten von Varianten oder die Generierung mehrerer Ansichten oder Einzelbilder für Filme über ein entsprechendes Skript.

Die meisten Einstellungen für beide Verfahren werden vom LP oder LS-File übernommen. Einige Optionen müssen jedoch explizit über Kommandozeilenoptionen aufgerufen werden.

4.1.7 Verteiltes Rechnen

Öfters ist die Möglichkeit, vernetzte Rechner, die typischerweise für Büroarbeiten sowieso zur Verfügung stehen, parallel zur Lösung einer Berechnung zu verwenden, sehr hilfreich. Lightscape unterstützt, laut Handbuch, bis 1000 CPUs. Die Radiosity-Berechnung für eine einzelne Szene kann jedoch nicht aufgeteilt werden. Verteilt berechnet werden können das Raytracing für ein Bild, Bildvarianten, Bilder für Filmsequenzen oder mehrere unterschiedliche Radiosity-Berechnungen. Alle beteiligten Maschinen erhalten eine Steuerungssoftware aufgespielt und benötigen einen Zugriff auf ein definiertes Arbeitsverzeichnis auf einem Server. Jede beliebige Workstation kann als Server fungieren. Die Jobs werden dann automatisch verteilt und abgearbeitet.

4.2 Radiance

4.2.1 Starten der Simulation

Nach dem Generieren der octrees (Kap. 3.2.1) und dem Starten der Simulation sind für Radiance im Gegensatz zu Lightscape keine weiteren Einstellungen für die Oberflächen zu treffen.

So ist es im Gegensatz zu Lightscape nicht möglich, einzelne Flächen "transparent" zu schalten, so daß sie sichtbar sind, aber keinen Schatten werfen. Es ist praktisch unmöglich eine inkonsistente Berechnung zu starten: Alles was in Radiance sichtbar ist, beeinflußt die Lichtverteilung. Der Nachteil daran ist, daß Hilfsgeometrie wie Punkte zur Markierung von Koordinaten, Hinweispeile und ähnliches nicht einfach direkt in Radiance ins Bild eingebunden werden kann.

Für eine Bildberechnung wird das Programm `rpict` verwendet, für einzelne Punkte `rtrace`. Bei beiden kann angegeben werden, ob die Strahldichte von einem Punkt in einer Richtung oder Bestrahlungsstärke auf ein Flächenelement berechnet werden soll.

Die photometrischen Einheiten Leuchtdichte und Beleuchtungsstärke folgen aus den radiometrischen Ergebnissen durch die übliche Gewichtung mit der Augenempfindlichkeitskurve $V(\lambda)$.

4.2.2 Auswertung

Die "klassische" Ausgabe für photorealistische Bilder ist in Abb. 4.3 wiedergegeben: Eine perspektivische Ansicht der Leuchtdichte vom Kamerastandpunkt aus. Außer dieser perspektivischen bietet Radiance noch weitere Bild-Projektionen: Fisheye-Sichten, parallel Projektion und zylindrische Panorama Ansicht (siehe Abb. 4.4). Im Schema Abb. 3.8 wird nach der Berechnung durch `rpict` das Bild durch `ximage` auf den Bildschirm oder durch `ra.ps` als PostScript Datei auf den Drucker ausgegeben.

Diese Bilder können auch in Falschfarben dargestellt werden, wobei die Strahl- oder Leuchtdichte durch das Programm `fa1secolor` in eine lineare oder logarithmische Farbskala umgesetzt wird (Abb. 4.5 und Abb. 3.8). Dies ist für quantitative Auswertungen, z.B. bei der Beurteilung von Blendungsproblemen, sinnvoll, da ansonsten der große Umfang der Strahl- oder Leuchtdichte nicht wiedergegeben werden kann (siehe auch Kap. 4.2.3).

Außer der Strahl- und Leuchtdichte können Bilder der Bestrahlungs- oder Beleuchtungsstärke berechnet werden. Da die beiden Größen physikalisch über die Materialeigenschaften der Flächen gekoppelt sind, ist ein zweiter Rechendurchlauf² nötig, für den jedoch die Ambient-Werte aus der Berechnung der Strahl- und Leuchtdichten wiederverwendet werden können. Ein Beispiel ist in Abb. 4.6 wiedergegeben.

Schließlich können die Bilder der Leuchtdichte und der Beleuchtungsstärke miteinander in *ein* Bild verbunden werden, in dem Isokonturen die Beleuchtungsstärke angeben (Abb. 4.6).

Die Berechnung von Werten Beleuchtungsstärke in Ebenen, eine klassische Domäne lichttechnischer Programme, wird durch das Programm `rtrace` geboten. Es liest eine beliebige Anzahl Koordinaten und gibt die dort berechnete Beleuchtungsstärke aus³. Die Koordinaten werden z.B. innerhalb des CAD Programms angegeben und von dort exportiert, oder mittels des zusätzlich erhältlichen `rshow` generiert. Letzteres erlaubt auch die Darstellung der berechneten Ergebnisse in der Szenengeometrie (Abb. 4.7).

4.2.3 Nachbearbeitung für Ausgabegeräte

Ein Aspekt der Simulationsarbeit, der meistens übersehen wird, sind die offenen Fragen bei der Ausgabe der Ergebnisse als Farbdruck, Dia, Video oder auf dem Computerbildschirm. Dies entspricht der Aufgabe

²Mit der Option `-i` von `rpict`.

³`rtrace` kann jede Größe des Radiance Systems ausgeben, jedoch ist die Bestrahlungs- oder Beleuchtungsstärke die Standardanwendung.

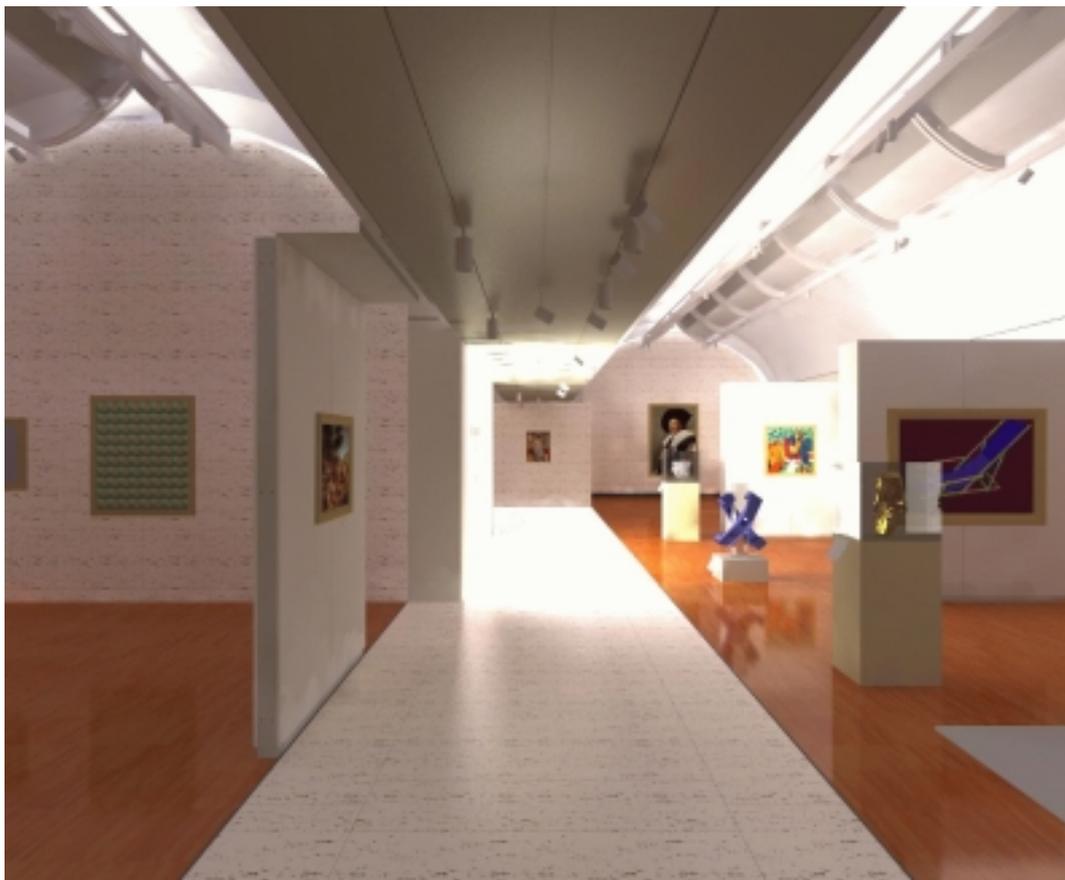


Abbildung 4.3: Berechnetes Radiance Bild der Leuchtdichteverteilung



Abbildung 4.4: Verschiedene Projektionsarten eines Radiance Bilds vom gleichem Augenpunkt aus: (im Uhrzeigersinn: zylindrisch, lineares Fisheye, cos-Fisheye). Nicht hier dargestellt ist die Ansicht in Parallelprojektion.

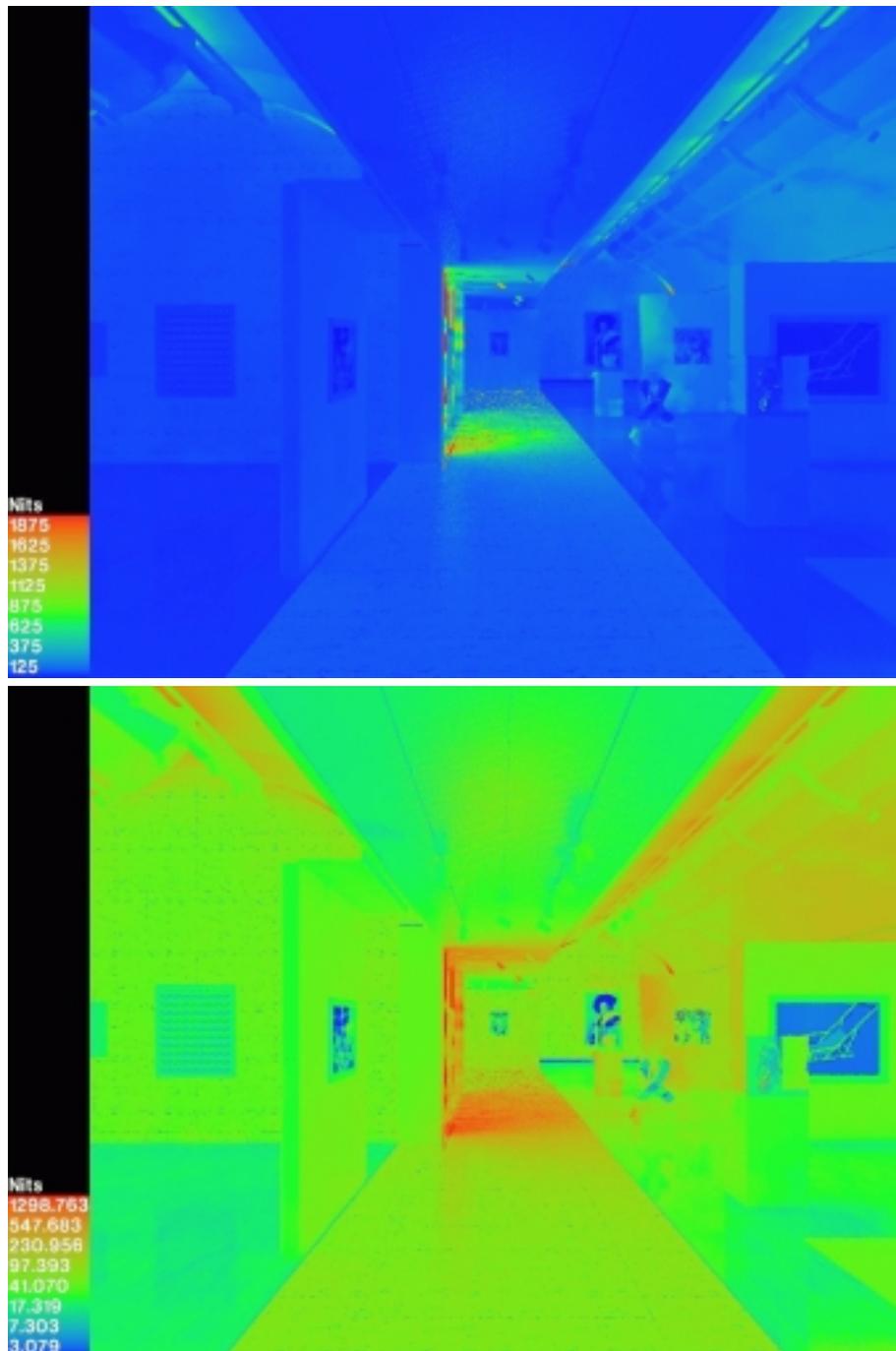


Abbildung 4.5: Falschfarben Darstellung der Ergebnisse aus Abb. 4.3: Oben mit linearer Skala, unten mit logarithmischer.

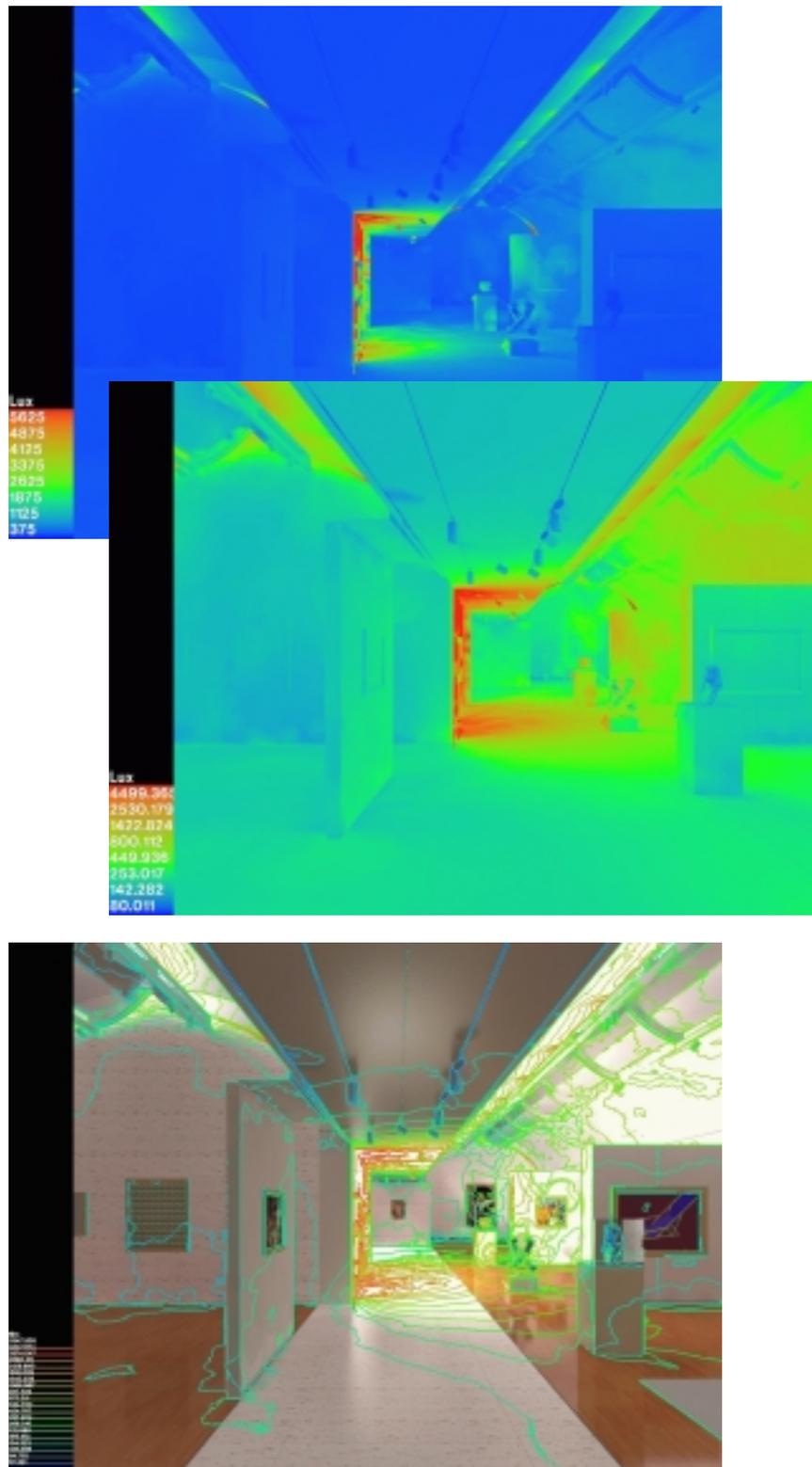


Abbildung 4.6: Falschfarben Darstellung der Beleuchtungsstärke mit linearer und logarithmischer Darstellung. Wie üblich zeigt die logarithmische Skala einen größeren Wertebereich. Das unterste Bild ist eine Überlagerung der Lux-Isolinien in das Bild aus Abb. 4.3.

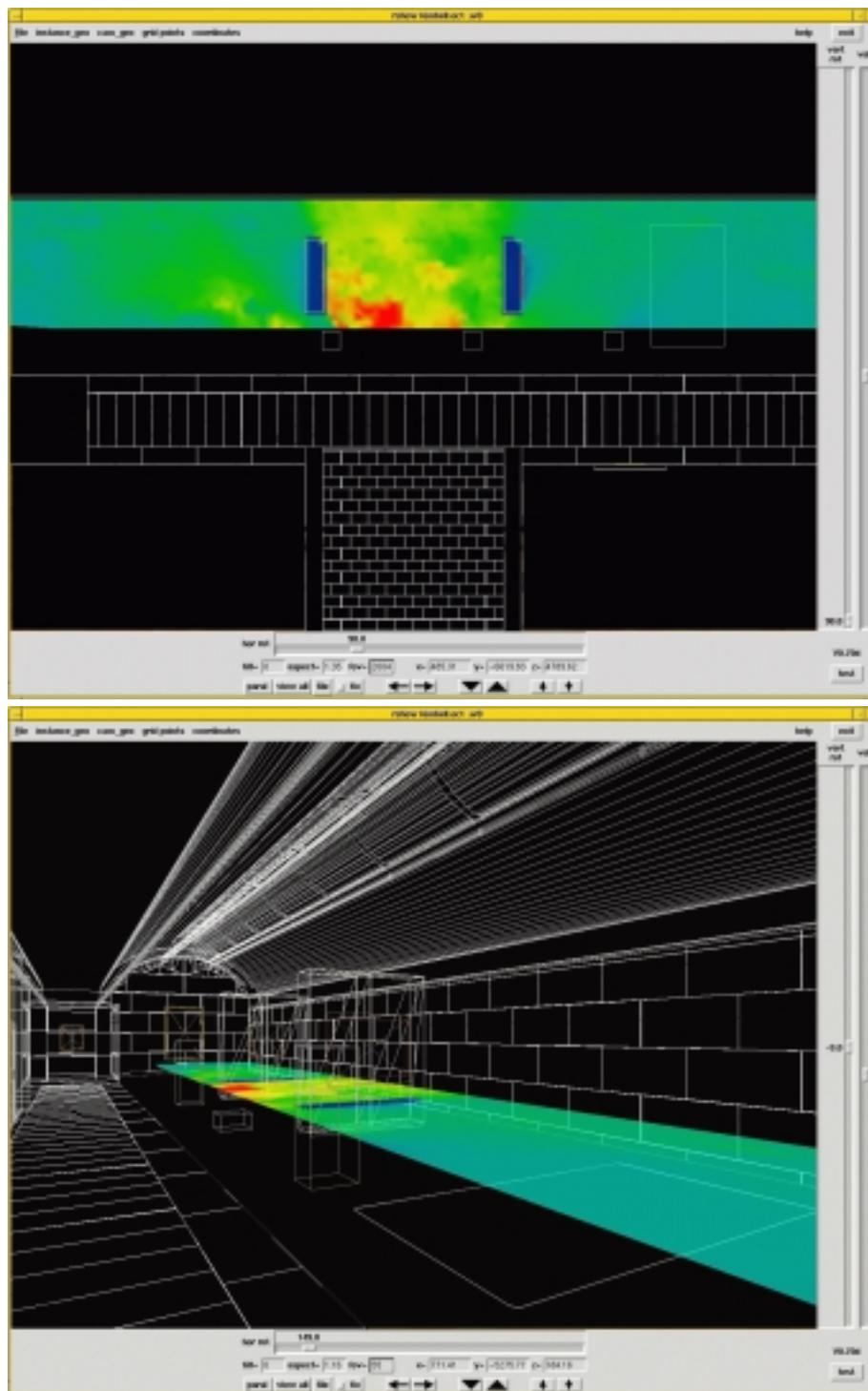


Abbildung 4.7: Falschfarben Darstellung der Beleuchtungsstärke mit linearer Skala in die Geometrie eingebendet (rshow).

eines Photographen, eine Szene wie die in Abb. 1.5 auf Photopapier oder Dia zu reproduzieren.

Eine reale Szene hat leicht einen Kontrastumfang (Dynamik) von $1 : 10^5$: Die dunklen Stellen des Bilds sind wenige Candela/m², direkt beschienene Bereiche oder Reflexe von Lichtquellen oder der Sonne liegen bei einigen zehntausend Candela/m².

Radiance gibt diesen Kontrastumfang in den Berechnungen voll wieder. Darin liegt einer der Unterschiede zu anderen Raytracern der Computergrafik: Radiance rechnet und speichert jeden Wert in einem Format, das den vollen Kontrastumfang umfaßt.

Die heutigen Ausgabegeräte sind jedoch nicht in der Lage, diesen Kontrastumfang wiederzugeben: Ein Dia hat etwa einen Umfang von 1:100, d.h. die hellen Stellen sind etwa 100mal heller als die dunklen. Bei Computerbildschirmen und Videoprojektoren ist der Kontrast ähnlich (maximal 1:1000 bei 3-Röhren Lightvalve Projektoren) . Alle nicht-selbstleuchtenden Bilder, Photos, Prints und Drucke, haben einen noch kleineren Kontrastumfang. Einige neuere Methoden versuchen dies auszugleichen und nähern sich den selbstleuchtenden Medien an [Kir97].

Wie sollen die berechneten Werte, die eine hohe Dynamik aufweisen, mittels Ausgabegeräte, die eine zu kleine Dynamik besitzen, so wiedergegeben werden, daß der subjektive Augeneindruck beim Betrachten dem der Realität entspricht ?

Offensichtlich ist dies in der Photographie einigermaßen zufriedenstellend gelöst, so daß Abb. 1.5 einigermaßen "real" aussieht. Berücksichtigen wir dabei, daß einer solchen Aufnahme sorgfältige Vorbereitung, Auswahl der Tageslichtverhältnisse und Technik voraus gegangen ist, sowie post-processing bei Vergrößerung und Druck folgte, so ist diese Wiedergabe in der Photographie nicht trivial.

In der Terminologie der Computergrafik wird dies als *tone mapping* bezeichnet [Rus93], ein Gebiet das heute noch nicht vollständig gelöst wurde.

Radiance bietet zwei Programme zum *tone mapping*: *pfilt* transformiert das Bild entsprechend einer realen Kamera, an deren Objektiv verschiedene Blenden einstellbar sind. Zu helle Bildteile werden vom Filmmaterial überbelichtet wiedergegeben, d.h. zu weiß überblendet, dunkle Bildteile sacken ins Schwarze ab (Abb. 4.8). Dies entspricht der sog. Schwärzungskurve eines Negativ- oder Diafilms.

Das neuere *pcond* verwendet Annahmen über die Sehfunktion des Auges: Helle Bildteile überstrahlen dunklere (Streuung an der Iris und im Glaskörper), dunkle Teile werden skotopisch (d.h. schwarz-weiß und unschärfer) gesehen (Empfindlichkeit der Stäbchen der Netzhaut) (Abb. 4.9). Darüber hinaus kann der Kontrastumfang des Ausgabegeräts und seine Farbwiedergabe angegeben werden.

Für eine photorealistische Wiedergabe, besonders um für einen Betrachter denselben Raumeindruck zu erzeugen, bietet Radiance mit *pcond* ein gutes Werkzeug. Um dieses Ziel zu erreichen, ist aber unbedingt auch der gesamte Rahmen der Präsentation einer Simulation zu bedenken, z.B. der Sichtwinkel den das Bild vom Betrachter gesehen einnimmt. Dies führt derzeit über den Rahmen dieser Studie hinaus.

4.2.3.1 Ausgabe auf speziellen Geräten

Als Beispiel für die Ausgabe des berechneten Bilds auf "unorthodoxen" Wegen zeigt Abb. 4.10 einen sogenannten *Anaglyphen*: Eine aus einem roten und grünen Bild zusammengesetzte Montage, die bei Betrachtung mit einer speziellen Brille ein dreidimensionales Bild liefert. Die Brille besitzt dabei lediglich einen roten Filter für das rechte, und einen grün-blauen Filter für das linke Auge.

Eine anaglyphische Darstellung transportiert keine Farbinformation der Objekte selbst und wird hauptsächlich als einfache, mit wenig Aufwand betrachtbare 3D-Darstellung verwendet, die dem Betrachter ohne Mühe sofort dreidimensional erscheint.

Andere stereoskopische Darstellung mit Farbwiedergabe sind z.B. Projektionen mit gekreuzten Polarisierungsebenen (Brille mit 2 Polarisationsfiltern) oder Computerbildschirme mit zeitmultiplexer Wiedergabe (shutter-Brillen), sowie die Wiedergabe mit zwei Monitoren oder Dias.

Diese Wiedergaben werden eingesetzt, um einem breiterem Auditorium einen für alle Betrachter leicht



Abbildung 4.8: Die synthetische Blende in `pfilt` wirkt wie die Blende eines Photoapparats: Diesen drei Bildern liegen dieselben berechneten Daten der Leuchtdichte zu Grunde. Die Bilder entsprechen einer sog. Blendenreihe in der Photographie.

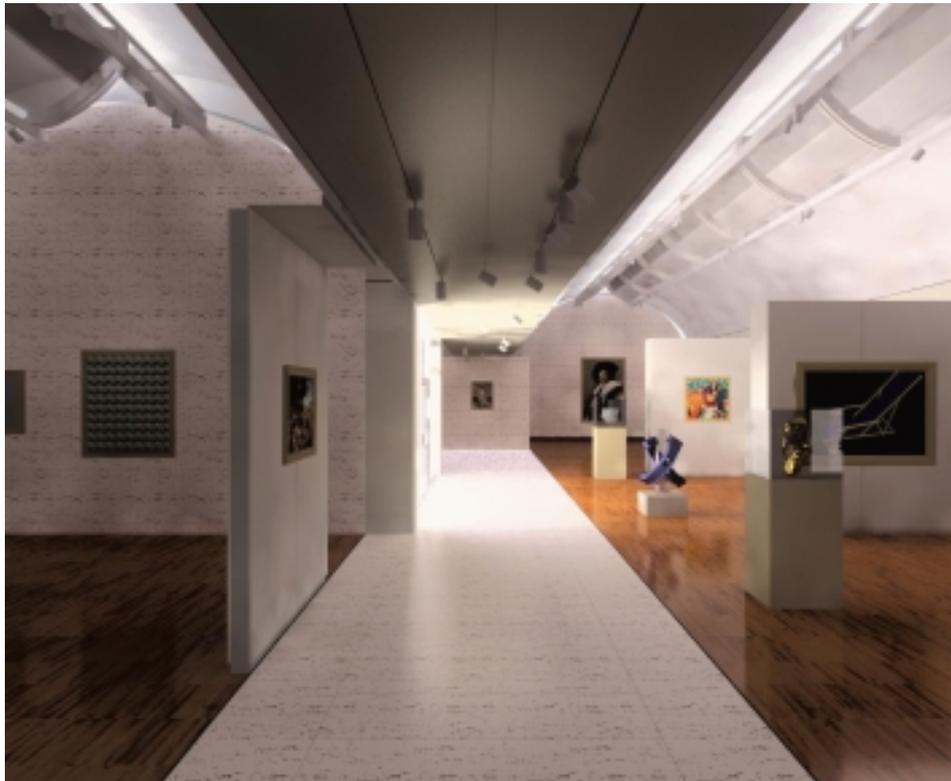


Abbildung 4.9: Die gleichen berechneten Werte wie in Abb. 4.8, mit p_{cond} korrigiert für die Wiedergabe auf einem Ausgabegerät mit maximal 100 cd/m^2 und 1:32 Kontrast. Unten zusätzlich gewichtet mit Augenparametern (Streuung heller Punkte, skotopisches Sehen)

nachvollziehbaren Eindruck einer für sie neuen dreidimensionalen Geometrie zu vermitteln.



Abbildung 4.10: Stereobild für rot/grün Brillen. Diese sogenannten *Anaglyphen* sind zusammengesetzt aus zwei Radiance Bildern für die Sicht des rechten und linken Auges. Zur dreidimensionalen Betrachtung benötigen Sie eine Brille mit rot/grün Farbfiltern. Der optimale Sehabstand beträgt in diesem Fall etwa das Doppelte der Bildbreite.

4.2.4 Verteiltes Rechnen

Verteiltes Rechnen wird von Radiance zweifach unterstützt:

Zum einen auf Mehrprozessor UNIX Maschinen: Waren diese vor Jahren noch teurer UNIX Hardware von SUN, HP oder SGI vorbehalten, stehen derzeit 2 oder 4 Prozessormaschinen auf Intel Basis mit Linux als Betriebssystem preisgünstig zur Verfügung. Hier ist Radiance in der Lage, alle Prozessoren für die Berechnung zu verwenden.

Um auf einem PC mit zwei Prozessoren und Linux als Betriebssystem zwei Bilder desselben Octrees aus zwei verschiedenen Perspektiven zu berechnen, werden die `rpict` Programme nur zusätzlich mit der Option `-PP` gestartet:

```
rpict -PP lock.file ... rpict Optionen ... -vf 1.vf -o 1.pic abc.oct
rpict -PP lock.file ... rpict Optionen ... -vf 2.vf -o 2.pic abc.oct
```

Hierbei teilt sich das zweite Programm den Speicherplatz für die Szenengeometrie mit dem ersten. Das bedeutet, daß eine komplexe und damit speicherintensive Geometrie nur einmal im Hauptspeicher Platz beansprucht.

Das Programm `rpiece` organisiert das Berechnen *eines* Bildes durch mehrere `rpicts`, so daß eine Rechnung proportional der Anzahl der Prozessoren oder Rechner im Netzwerk beschleunigt wird.

Verteiltes Rechnen im Netzwerk (LAN) wird ebenso unterstützt und unterscheidet sich vom Start der Programme wenig von der ersten Lösung. Dies ist für den Anwender transparent. Eine volle automatische Lastverteilung für mehrere Rechner geht jedoch über den Rahmen der Lichtsimulation hinaus.

Dazu wird die Simulation typischerweise mit einer eigenen Jobverteilung gekoppelt (z.B. dem psub System):

`http://www.ise.fhg.de/radiance/pabs-toolbox/psub/psub.html`

Diese Kombination ist bei größerer Anzahl von Rechnern (typischerweise mehr als 5) sehr flexibel und leistungsfähig.

Kapitel 5

Fazit

5.1 Zur Frage der Details einer Szene

Bei der Durchführung einer Simulation stellt sich öfters die Frage nach dem notwendigen Detaillgrad der CAD Modelle. Mehr Details einer Szene verursachen, sofern es sich nicht um Standardbauteile einer Objektbibliothek wie Tisch, Stühle, Bilderahmen handelt, Aufwand und damit Kosten.

Nach aller Erfahrung lohnt sich dieser Aufwand immer.

Der visuelle Eindruck wird mehr von Kleinigkeiten geprägt, als von großen Flächen: Nuten, Kanten, abgerundete Ecken usw. tragen einen wesentlichen Teil der visuellen Glaubwürdigkeit der Szene. Besonders natürlich bei Detailaufnahmen, aber auch in nicht zu unterschätzendem Teil durch die subtile Wirkung wenn sie nur einen flächenmäßig kleinen Teil des Bilds ausmachen.

Als Beispiel zeigt Abb.5.1 drei Stufen der Detaillierung am Modell einer Vitrine:

Zuerst wurde die Vitrine als zwei einfache Quader modelliert: Einem unteren aus Holz und einem oberen verglasten. Das Glas wurde dabei "einschalig" modelliert, d.h. eine unendlich dünne Glasfläche, deren Reflexion durch Brechungsindex und Absorption gegeben ist. Dieses schnell erstellte Modell liefert *für Fenster* physikalisch korrekte Ergebnisse ohne Tadel. Es ist jedoch in diesem Fall wenig real, wie sofort ersichtlich wird:

In der zweiten Stufe wird das Vitrinenglas als 8mm dicke Glasscheibe modelliert, deren Reflexion nun aus Brechungsindex, Absorption und Dicke gegeben ist. Diese Mehrarbeit am Modell fügt dem Bild wesentliche Eindrücke hinzu, indem die Kanten der Scheibe nun korrekt gesehen werden: Sie erscheinen durch Mehrfachreflexion im Glas dunkel, bzw. im Falle von Totalreflexion (Kante rechts oben) hell. Jedoch wirkt die Vitrine insgesamt noch wenig plastisch:

Im dritten Schritt wird dem Vitrinen Boden ein dunkleres Material zugeordnet (z.B. ein schwarzer Samt) und das Vitrinenglas sitzt in einer Nut, die 10mm Rand zu den Sockelflächen läßt.

Eine konsequente Modellierung mit "Liebe zum Detail" bringt plastischere Bilder mit besserem visuellem Eindruck.

5.2 Lightscape

5.2.1 Handhabbarkeit von Lightscape

Autodesk liefert mit dem Lichtsimulationsprogramm LIGHTSCAPE ein einfach zu handhabendes und dank seinem strukturiert aufgebautem GUI (Graphical User Interface) ein Produkt, mit dem man bereits nach kurzer Einarbeitungszeit effektiv arbeiten kann. Wie so oft steckt der Teufel jedoch im Detail. Die



Abbildung 5.1: Beispiel zur Qualität des Vitrinenmodells

aktuelle Release 3.2 ist z.Z. nur in Englisch erhältlich. Autodesk wirbt auf seiner deutschen Homepage mit einer unverbindlichen Preisempfehlung von 812 Euro zzgl. MWSt. (Stand Januar 2000) .

Beim ansonsten komfortablen Import von Geometriedaten irritierte nur etwas die Capping-Funktion. Besonders Gefallen hat der Editiermodus zur Bearbeitung einzelner Blöcke. Ist man bei der Hardwareausstattung mit einer schnellen Grafikkarte gesegnet, lassen sich spielend schnell die Orientierungen von Flächen und die Zuweisung von Materialien ändern.

Hat man sich im Laufe der Zeit Material- und Blockbibliotheken strategisch günstig aufgebaut, ist die Übernahme von Materialien sowie die Substituierung von Platzhaltern durch fertig konfigurierte Bibliothekselemente eine Sache von Sekunden.

Eingeschränkt wird man dabei lediglich von den Möglichkeiten der Materialerzeugung. Für die Erstellung photorealistischer Bilder jedoch ein großes Manko.

Filterfunktionen helfen bei der Auswahl der zu bearbeitenden Objekte.

Die Erstellung perspektivischer Ansichten erweist sich jedoch teilweise als sehr mühsam. Wählt man zur Erstellung den interaktiven Modus, erfolgen alle Einstellungen ausnahmslos über die Maus. Änderungen werden erst dann ausgeführt, wenn die Maus einen minimal festgelegten "Weg" zurückgelegt hat. Feinstjustagen sind dabei fast unmöglich. Bei großen Modellen ändert sich die Anzeige bei Mausbewegungen ruckartig, womit eine Feinstjustage ebenfalls schwierig ist. Alternativ dazu können der Aug- und Zielpunkt der Perspektive über eine Aufsicht auf die Szene per Klick bestimmt und über Tastatureingaben feinjustiert werden. Über die perspektivische Ansicht werden die Einstellungen kontrolliert. Bis zum endgültigen Ausschnitt schaltet man daher laufend zwischen der Aufsicht und der Perspektive hin und her. Das Bild wird dabei jedesmal neu aufgebaut. Bei großen Modellen ein zeitraubendes Unterfangen.

Überhaupt ist eine adäquate Anpassung von Hardwareausstattung und Modellgröße dringend anzuraten. Es ist zwar prinzipiell möglich, ein großes Modell über Einzelkomponenten zu bearbeiten. Allein der Aufwand, eventuell vorkommende Abhängigkeiten der Einzelmodelle zu koordinieren, würde wohl in keinem Verhältnis zum Nutzen stehen. Bezeichnend dafür ist auch, daß Lightscape nicht den Import externer Referenzen aus AutoCAD unterstützt.

Dem Lightscape-Novizen ist der "Wizard" zur Einstellung der Simulationsparameter mit Sicherheit von großem Nutzen. Störend wirkt sich lediglich aus, daß einige wenige Parameter nicht vom Wizard angepaßt werden und zu scheinbar nicht nachvollziehbaren Ergebnissen führen. Das Verständnis für solche 'Feinheiten' bedingt ein intensives Einarbeiten in das Programm.

Negativ aufgefallen sind die Dateigrößen, die das Programm erzeugt. Die Art und Weise, wie die CAD-Koordinaten vorgehalten werden, war nicht nachvollziehbar. Importiert man z.B. dieselbe Geometrie aus AutoCAD einmal mit "Metern" als Bezugseinheit, ein anderes Mal mit "Millimetern" und vergleicht anschließend die gespeicherten CAD-Koordinaten stellt man fest, daß sich die reinen Zahlen ab etwa der fünften bzw. achten Nachkommastelle unterscheiden. Da offensichtlich Rundungstoleranzen auftreten ist nicht nachzuvollziehen, weshalb 14 bzw. 17 Nachkommastellen gespeichert werden.

Die Simulationszeiten steigen rapide an, sobald man sich bei der Qualität im Bereich mittel bis hoch bewegt. Etliche Nachbearbeitungen von Flächeneigenschaften waren nötig, um auf einem Einzelrechner zu Resultaten zu gelangen, die einem akzeptablen Verhältnis von Rechenaufwand und Nutzen entsprachen.

5.2.2 Die Prüfsteine

5.2.2.1 Modellgröße, Nachbearbeitung Modell

Übersteigt die Modellgröße die adäquate Hardwareausstattung, ist ein effektives Arbeiten am Gesamtmodell fast nicht mehr möglich. Nach jeder Änderung am Material, an den Geometrien oder bei der Schließung von Eingabefensters wird die Szene am Bildschirm neu aufgebaut.

Um dennoch ein Modell dieser Größe bearbeiten zu können, wurden folgende Strategien angewandt:

Verkleinerung des Modells: Dies bedingt jedoch, daß ein Bildausschnitt schon zu einem frühen Stadium festgelegt werden muß.

Manipulation der Flächeneigenschaften: Bei allen für das Gesamtergebnis irrelevanten Flächen wurde die Verfeinerung der Gittermaschen während des RADIOSITY-Verfahrens entweder stark reduziert oder unterbunden. Selbst bei einem gut strukturiertem Modell nimmt die Nachbearbeitung viel Zeit in Anspruch. Zudem gibt es keine Möglichkeit, sich den Detaillierungsgrad ausgewählter Flächen global anzeigen zu lassen.

Begrenzung der verteilten Lichtenergie: Die Simulationen wurden angehalten, nachdem 90% der initialen Energie verteilt war.

Begrenzung der Qualität: Für die Einstellung der Simulationsparameter wurde der "Wizard" benutzt, um einen praxisnahen Arbeitsablauf zu simulieren. Dabei wurde für die Qualität stets die Einstellung "mittlere Qualität gewählt". Eine Simulation mit der Einstellung "höchste Qualität" wurde nach mehrtägiger Berechnung und keinem weiteren nennenswerten Fortgang bei der Verteilung der Lichtenergie abgebrochen.

Zur effizienten Nutzung des RADIOSITY-Verfahrens muß bereits bei der Modellierung die spätere Aufteilung der Gittermaschen berücksichtigt werden. Ungleichmäßig proportionierte Flächenformen resultieren im RADIOSITY-Verfahren in ausgefranst erscheinenden Übergängen von hell nach dunkel, wie z.B. bei Schattenkanten. Optimale Flächenformen sind Rechtecke, Quadrate, gleichschenklige oder gleichseitige Dreiecke. Arbeitet man nicht mit der "Rohfassung" von AutoCAD, sondern benutzt einen der Programmaufsätze für die Modellierung oder importiert man Geometrien von anderen CAD-Programmen, hat man selten Einfluß darauf, wie vorgefertigte Werkstücke, z.B. eine Wand mit Fensteröffnung, behandelt werden. Bei einer Konvertierung wird hierbei eher auf eine minimale Anzahl von Einzelflächen Wert gelegt, was für Lightscape meistens kein Optimum darstellt.

5.2.2.2 Lichtbehandlung

Soll bei der Simulation Tageslicht berücksichtigt werden, ist über Simulationsparameter einstellbar, ob der gesamte Himmel berücksichtigt werden soll (bei Außenszenen) oder ob nur jenes Tageslicht in die Berechnungen mit einfließt, das durch Fenster oder Öffnungen fällt (bei Innenräumen). Letzteres resultiert in einer höheren Genauigkeit und größerer Effizienz, da nur der Himmelsbereich betrachtet wird, der mit den Lichtöffnungen korrespondiert. Der Nachteil dieser Methode liegt darin, daß alle Fenster oder Öffnungen explizit als solche definiert werden müssen. Daher fallen "Löcher" im Modell kaum oder gar nicht auf. Für rein visuelle Ergebnisse ist dieser Umstand unkritisch. Legt man jedoch Wert auf die Ermittlung aussagekräftiger Beleuchtungswerte, muß die "Lichtdichtigkeit" des Modells vorab mühsam kontrolliert werden.

5.2.2.3 Lichtverteilung über die Reflektorpaddel

Die Umlenkung des einfallenden Tageslichts auf das Deckengewölbe und von dort in den Ausstellungsraum ging nicht ganz ohne Probleme vonstatten.

Für den oberen, opaken Bereich der Reflektorpaddel wurde als Material die Vorlage für Metall verwendet. Das Reflexionsvermögen wurde auf einen Wert von 90% eingestellt. Bei den ersten Testläufen fiel auf, daß die Rückseite der Paddel hell zu leuchten schien. Um den möglichen Effekt eines "Durchscheinens" zu unterbinden wurde ein um 0,1 mm versetztes zweites, opakes Paddel modelliert, welches als Material einen matten, grauen Farbanstrich erhielt. Trotz dieser Vorkehrungen schien es, als ob das von oben einfallende Tageslicht durch beide Flächen hindurchscheinen würde. Verursacher dieses Phänomens war ein nicht angepaßter Wert für die Abstandstoleranz (siehe Abb. 5.2):

Lightscape stellt diesen Parameter vorgabemäßig auf einen Wert von 0,5 mm ein. Liegt der Abstand zweier Punkte unterhalb dieses Wertes, werden sie anschließend scheinbar nicht mehr getrennt weiterverarbeitet. Durch Senkung dieses Wertes auf 0,0005 mm stellte sich nicht nur das gewünschte

Ergebnis ein - die Berechnung ging auch noch schneller vonstatten. Dieser Wert wird bei der Einstellung der Simulationsparameter über den "Wizard" nicht berücksichtigt. Weitreichender als der rein visuelle Unterschied ist jedoch die Verteilung des Lichts. Zur Verdeutlichung wurde ein Deckenabschnitt des Modells simuliert (Abb. 5.2). Die beiden Varianten unterscheiden sich nur durch den Toleranzwert, die Ergebnisse sind jedoch sehr unterschiedlich.

Die Fehler der Rechnungen entstehen im wesentlichen durch die Annahme eines diffusen Materials für den oberen Teil der Reflektorpaddel. Dadurch führt die Rückstreuung von Licht in die Plexiglaskuppel zu einer Unterschätzung des via Decke nach innen geleiteten Teils.

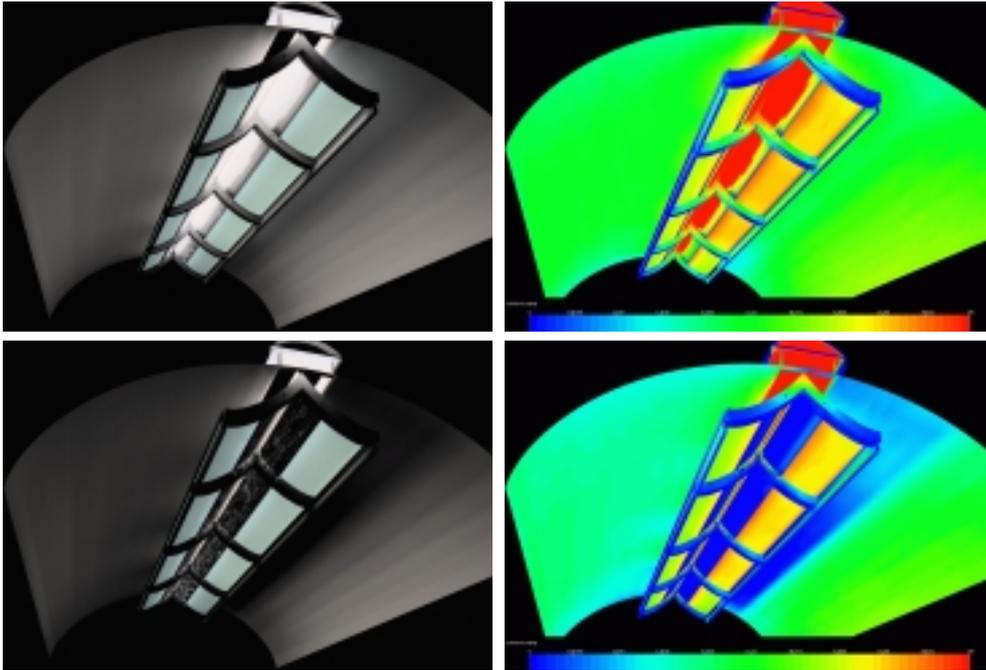


Abbildung 5.2: Die Licht-'Paddel' unter der Lichtöffnung im zykloiden Deckengewölbe modelliert in Lightscape: Oben die Übernahme des Toleranzwertes von 0,5 mm. Deutlich ist im Bild das "Durchscheinen" im Bereich der oberen Paddel zu erkennen. Unten die Änderung des Toleranzwertes auf 0,0005 mm. Die Änderung der Leuchtdichtewerte ist deutlich wahrzunehmen.

5.2.2.4 Einschränkungen der Materialdefinitionen

Bei der Materialzuweisung für den unteren, perforierten Bereich des Reflektorpaddels stößt man an die Grenzen von Lightscape. Das Material ist nicht wie gewünscht zu definieren. Zum einen ist es nicht möglich, 2 Materialien zu kombinieren, um z.B. über die Helligkeitsunterschiede eines Pixelbildes die Transparenz zu steuern. Zum anderen existiert keine Möglichkeit, ähnlich den *function files* in Radiance, ein Material per "mathematischer" Definition zu erzeugen. Die einzige Möglichkeit wäre die Geometrie des gelochten Blechs exakt nachzumodellieren. Dies hätte zu Folge, daß die Maschenweite beim Radiosity-Verfahren extrem verfeinert werden müßte, womit automatisch längere Rechenzeiten entstünden. Im vorliegenden Modell wurde dem Material des unteren Reflektorpaddels eine 5-prozentige Transparenz zugeordnet, die jedoch zu keinem überzeugenden Ergebnis führt.

5.2.2.5 Rechenzeiten

Auf einem PC, ausgestattet mit einer CPU vom Typ AMD-K6-III 400 MHz, dauerte es etwa 50 Stunden, bis 90 Prozent der initialen Lichtenergie verteilt waren. Das Programm hatte etwa 5000 Iterationen

durchgeführt. Das Radiosity-Verfahren hatte etwa 170000 Gittermaschen mit ca. 345000 Maschen-eckpunkten generiert. Etwa 58 MB Arbeitsspeicher wurden gegen Ende der Berechnung belegt. Die Speicherung des direkten Lichteinfalls für die Sonne und die Leuchten wurde unterbunden, da anschließend ein Bild per Raytracing erstellt wurde. Es wurde nur jenes Tageslicht berücksichtigt, das durch Fenster und Öffnungen trifft.

Die Erstellung eines 1834 mal 1536 Pixel großes Bildes per Raytracer dauerte danach etwa 12 Stunden. Die Interpolation der Pixelfarben erfolgte über den Antialiasing Faktor 4. Der direkte Lichteinfall und der Schattenwurf wurden für die Sonne und alle Leuchten erneut berechnet. Die Berechnung "weicher" Schattenkanten für die Sonne war aktiviert. Ansonsten wurden die Vorgaben der Einstellungen im Solution-File übernommen.

5.2.2.6 Handhabbarkeit Leuchten

Um einen direkten Vergleich zwischen Radiance und Lightscape zu ermöglichen, wurden die Leuchtenkörper in AutoCAD als Blöcke modelliert. Die LVK's ließen sich anschließend im Editiermodus von Lightscape ohne Probleme positionieren. Sind die Referenzpunkte der Leuchten korrekt definiert, läßt sich die Ausrichtung einer Leuchte per Mausclick automatisieren.

5.3 Radiance

5.3.1 Die Prüfsteine

5.3.1.1 Modellgröße

Der Grad der Komplexität des Modells ergibt für die Radiance Programme einen Speicherbedarf von ca 100 Megabyte Hauptspeicher, dies sollte für gängige Personal Computer (PCs) kein Problem sein.

Für die Ansicht der Geometrie in `rshow` wurde dies Programm mit der Option `-qs 0.1` gestartet, das heißt alle Details unter einer Ausdehnung von 10% der Gesamtszene werden ausgeblendet. Dies ermöglichte eine interaktive Auswahl der Ansichten und Kamerapositionen ¹.

Die Größe des Modells ergab in Radiance keine Probleme.

5.3.1.2 Lichtverteilung

Die Beleuchtung des Museumsraums mit Tageslicht erfolgt ausschließlich indirekt über die Reflektorpaddel (siehe nächster Abschnitt) und den kleinen Innenhof, in den direkte Sonne scheint und der daher sehr hell ist. Diese diffuse Quelle verlangt hohe Werte für die Radiance Parameter `ad` und `ab`, um keine Fehler und damit "Schimmelflecken" im Bild zu erhalten. Dies bestimmt fast ausschließlich die Rechenzeit.

5.3.1.3 Lichtverteilung über die Reflektorpaddel

Das einfallende Licht wird über das fast ideal reflektierende Paddel und über die diffuse Decke nach unten reflektiert. Fällt direktes Sonnenlicht, wie in diesem Fall, auf die gebogenen Paddel, wird dieser Lichtweg in der derzeitigen Version von Radiance zur ungenügend und aufwendig erfasst (Abb.5.3). Hier ist eine Erweiterung der Algorithmen notwendig.

¹Gleiche Hardware, Matrox G400 Grafikkarte

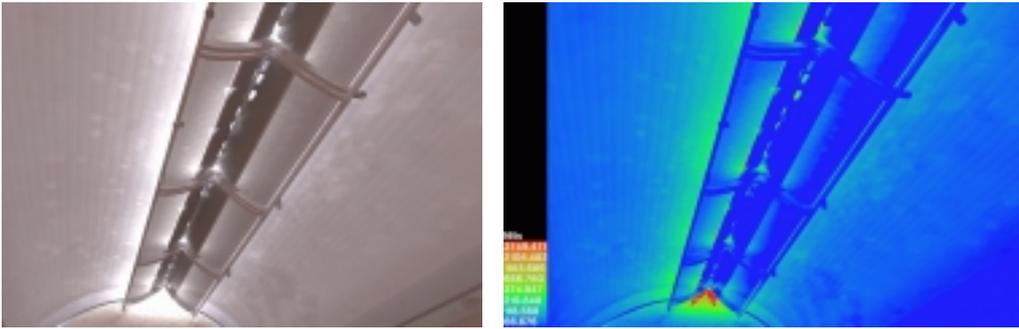


Abbildung 5.3: Die Licht-'Paddel' unter der Lichtöffnung im zykloiden Deckengewölbe modelliert in Radiance: Der Lichttransport über die gebogenen, reflektierenden Paddel wird auch bei höheren ad Parametern nicht ohne statische Schwankungen modelliert.

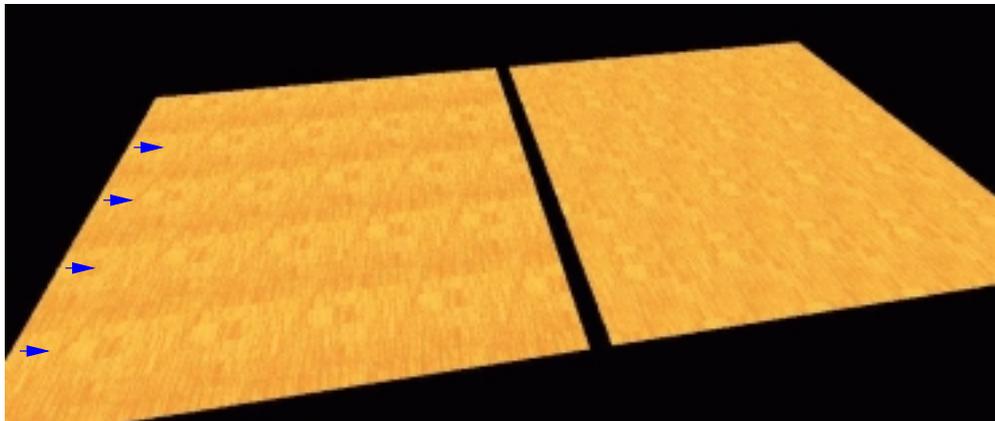


Abbildung 5.4: Beispiel einer wiederholten Bildtextur in Radiance: Links das original Bild einer Parkett Textur, die viermal wiederholt wird (Pfeile). Die störenden Hell/Dunkel-Schwankungen sind bei der rechten Textur durch eine entsprechende Vorbehandlung weit weniger ausgeprägt.

5.3.1.4 Materialdefinition

Es ergeben sich in Radiance derzeit kaum Grenzen, welches Material nicht modellierbar ist. So wurde das Loch/Material Verhältnis des feingelochten Reflektorblechs als 15% transmittierend, ansonsten reflektierend modelliert. Die Decke zwischen den Deckengewölben ist ein anisotropisch reflektierendes Metall, dessen Parameter mangels Materialprobe an Hand von Originalaufnahmen modelliert wurde. Diese Bilder von Spiegelungen im Deckenmaterial weisen daraufhin, daß es sich bei der Decke um gewalztes Blech, vermutlich eloxiertes Aluminium, handeln dürfte.

Die Ergebnisse zur der in Kap. 1.3 beschriebenen Problematik sich wiederholender Texturbilder sind in Abb. 5.4 gegeben.

5.3.1.5 Rechenzeiten

Die Rechenzeiten betragen für Präsentationsqualität ($ab=7$, $ad=16000$, 4000×4000 Pixel) ca 24 Stunden für das erste Bild und 2-3 Stunden für weitere Ansichten derselben Geometrie ². Dabei waren keinen besonderen "Tricks" zur Beschleunigung der Rechenzeit notwendig. Nachteilig in Radiance ist das Fehlen einer Konvergenz-Kontrolle, z.B. wieviel Licht verteilt wurde. Dies ist vom Algorithmus her

²Auf einem Computer mit Pentium-II, 400MHz Prozessoren.

bisher schwierig.

5.3.1.6 Handhabbarkeit Leuchten

Dies ist für Radiance derzeit ein "dickes Minus", da eine interaktive Eingabe von Leuchten und LVKs nicht gegeben ist.

Die Modularität des Radiance Systems ist zugleich seine Stärke und seine Schwäche: Es ist außerordentlich flexibel und dadurch am Anfang leicht unübersichtlich. Hier sind gute grafische Benutzerinterface eine wesentliche Notwendigkeit.

5.4 Zusammenfassung

Die Algorithmen in Radiance (*distributed raytracing*) sind denen in Lightscape (*Radiosity*) darin überlegen, daß sie Lichttransport über nicht diffuse Flächen rechnen. Denkt man zum Beispiel an Tageslichtlenkung oder Deckenfluter mit realen Deckenmaterialien, die meistens von einer diffusen Streucharakteristik abweichen, ist die Radiosity-Lösung hier unzureichend.

Der Nachteil des Radiance-Algorithmus ist die Abhängigkeit zwischen subjektiver Bildqualität und Rechenaufwand: Während Radiosity schon nach wenigen Iterationen visuell ansprechende Bilder liefert, sind die Radiance Bilder bei ungenügender Genauigkeit unansehnlich fleckig. Hier muß in jedem Fall genau und damit aufwendig gerechnet werden. Nicht übersehen werden darf jedoch, daß Lightscape bis zur Verteilung aller Energie, d.h. bis auch quantitativ stabile Ergebnisse vorliegen, Rechenzeiten in gleicher Größe aufweist. Es sieht nur bereits vorher hübscher aus.

Die Materialmodellierung in Radiance ist durch die *function files* wesentlich leistungsfähiger als die von Lightscape. Dies wirkt sich vor allem bei der Modellierung neuer Materialien aus, deren Eigenschaften von Lightscape nicht modellierbar sind.

Eine notwendige Erweiterung des Radiance Kerns betrifft die Ambient Berechnungen bei beliebigen Materialien und die Berechnung von Kaustiken. Letzteres ist u.a. für die hoch reflektierenden Reflektorpaddels des Museums eine notwendige Erweiterung, da dann die Reflexion direkter Sonne bei gebogenen Spiegeln richtig wiedergegeben werden. Für solche Erweiterungen ist Radiance durch seine modulare Struktur und verfügbaren Quellcode eine gute Plattform.

Die Handhabbarkeit von Lightscape zur Leuchten Auswahl, LVK Anbindung und Materialauswahl ist dem von Radiance deutlich überlegen. Hier hat die derzeitige Radiance Distribution deutliche Fehlstellen.

Beide Programme zeigen die breiten Möglichkeiten, die eine professionelle photorealistische Lichtsimulation derzeit hat, und die für die Praxis auf durchschnittlichen PCs zur Verfügung stehen.

Literaturverzeichnis

- [Aut99] AUTODESK, INC: *Lightscape User's Guide 3.2*, April 1999.
- [BL91] BROWNLEE, DAVID B. und DAVID G. DE LONG: *Louis I. Kahn, In the Realm of Architecture*. Rizzoli International Publications, New York, 1991.
- [Bra92] BRAWNE, MICHAEL: *Louis I. Kahn, Kimbell Art Museum, Architecture in Detail*. Phaidon Press Ltd, London, 1992.
- [Del95] DELAUNAY, JEAN-JACQUES: *Contribution à la Modelisation de la Lumiere Naturelle en vue de son Application à la simulation de l'Eclairage de Locaux*. Doktorarbeit, Université Louis Pasteur de Strasbourg I, 1995.
- [Fra99] FRANCESI: *Louis I. Kahn, The construction of the Kimbell Art Museum*. Skira editore, Milan, 1999.
- [Kir97] KIRCHNER: *Novaspace- neue Drucktechnik (Lichtakademie Gründungstreffen)*. private communication, 1997.
- [Rus93] RUSHMEIER, HOLLY E.: *From Solution to Image*. In: *Making Radiosity Practica*. Siggraph Course Notes, Course 22, August 1993.
- [WLS98] WARD LARSON, GREG und ROB SHAKESPEARE: *Rendering with Radiance*. Morgan Kaufmann, 1998.
- [WRC88] WARD, GREGORY J., FRANCIS M. RUBINSTEIN und ROBERT D. CLEAR: *A Ray Tracing Solution for Diffuse Interreflection*. In: DILL, JOHN (Herausgeber): *Computer Graphics (SIGGRAPH '88 Proceedings)*, Band 22, Seiten 85–92, August 1988.

Autoren

Kurt Altmann studierte Architektur an der TH Karlsruhe, KTH Stockholm und Universität Tampere. Während des Studiums sammelte er umfangreiche Erfahrungen mit CAD und Lichtsimulation. Nach dem Diplomabschluß 1997 wurden diese Erfahrungen bei unterschiedlichen Arbeitgebern weiter vertieft (u.A. Fraunhofer ISE). Schwerpunkte liegen in der Konvertierung und Bearbeitung von CAD Daten, sowie der Visualisierung im Bereich Licht. Seit 1999 hat er ein eigenes Büro in Karlsruhe (<http://www.kurt-altmann.de>).

Peter Apian-Bennwitz studierte Physik in Freiburg und promovierte 1995 über die Messung und Modellierung von Tageslichtelementen in Simulationsprogrammen. Interessensschwerpunkte bilden optische Fragestellungen und deren Umsetzung in Computerprogrammen. Seit 1991 arbeitet er am Fraunhofer Institut ISE und machte sich 1999 mit seiner eigenen Firma pab-opto (<http://www.pab-opto.de>) im Bereich technische Visualisierung selbständig.

Fraunhofer ISE ist eins von 40 Instituten der Fraunhofer Gesellschaft, die industriennahe, angewandte Forschung als Dienstleistung zur Verfügung stellen. Näheres zur Fraunhofer Gesellschaft finden Sie unter <http://www.fhg.de> . Das Institut ISE befaßt sich unter anderem mit Tageslichtbeleuchtung, Solarem Bauen, Materialentwicklung und thermische/optischer Vermessung von Materialien: <http://www.ise.fhg.de> und <http://www.ise.fhg.de/radiance> .

Die Lichtakademie wurde 1998 gegründet, um Fragestellungen um das Thema Licht möglichst fachübergreifend zu analysieren. Dabei reichen die Fragestellungen von der Ästhetik der Lichtstimmung über photobiologische Wirkungen bis zu den Simulationsgrundlagen: <http://www.licht-akademie.de>

Diese Studie wurde ohne Systemabstürze und Nervenkrise problemlos mit \LaTeX auf einem PC unter Linux 2.2.13 geschrieben.

Die Hard- und Software

Hardwareausstattung für Lightscape:

Gigabyte Dualmotherboard mit zweimal 200 Mhz Pentium I, 128 MB Arbeitsspeicher EDO-RAM Gloria

Synergy Grafikkarte von Elsa mit 8 MB RAM

Asus P5A Motherboard, CPU von AMD K6 III, 400 Mhz, 128 MB Arbeitsspeicher SDRAM Gloria

Synergy II Grafikkarte von Elsa mit 32 MB RAM

Hardwareausstattung für Radiance:

Asus Motherboard mit zwei Pentium 400MHz und 390MB ECC-Ram, G400 Grafikkarte.

Betriebssystem für Lightscape:

Windows NT Workstation, Version 4.0 mit Service Pack 4

Betriebssystem für Radiance:

Linux 2.2.13 (Slackware 7 Distribution)

Verwendete Software:

Modellierung:

AutoCAD R14.01 (ohne Aufsätze) Distributor Autodesk

Lichtsimation:

Lightscape v3.2 Distributor Autodesk

3D-Studio MAX v2.5 (PlugIn für den Im- und Export von DWG- Dateien) Distributor Autodesk

Radiance 3R1P20, Distributor <http://www.radsite.lbl.gov/radiance>

Index

— A —

Auswertung
 Lightscape, 35
 Radiance, 38

— H —

Himmelsmodell
 Radiance, 25

— I —

IES
 Lightscape, 15

— K —

Kahn, Louis I., 1
Kontrastumfang
 Radiance, 38

— L —

Lightscape
 Auswertung, 35
 Batchmodus, 37
 Blöcke, 13
 Lichtquellen, 15
 Materialzuweisung, 17
 Opening, 19
 Raytracing, 35
 Simulationsparameter, 19
 Verteiltes Rechnen, 37
 Window, 19

— M —

Materialzuweisung
 Lightscape, 17
 Radiance, 25

— P —

Perez Himmelsmodell, 25

— R —

Radiance
 Übersicht, 20
 Ambient Berechnung, 29
 Ausgabegeräte, 38
 Auswertung, 38
 Farbtripel, 26
 Himmelsmodell, 25
 Materialzuweisung, 25
 oconv, 22
 Parameter, 29
 pcond, 44
 pfilt, 44
 Rechenverfahren, 26
 rshow, 23
 rview, 22
 Simulationsparameter, 26
Raytracing
 backward raytracing, 26
 Lightscape, 35
 rückwärts, 26

— T —

tonemapping, 38

— V —

Verteiltes Rechnen
 Lightscape, 37
 Radiance, 47