

# Recovering Photometric Properties Of Architectural Scenes From Photographs

von Yizhou Yu und Jitendra Malik

in Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series(1998), pp. 207-218

präsentiert von Anton Schultschik

## 1 Einleitung

### 1.1 Motivation

Die meisten Verfahren, die auf image-based Rendering basieren, können aufgenommene Szenen nicht für andere Beleuchtung rekonstruieren. Dieses Problem entsteht, da der geometrische Aufbau der abgebildeten Szene ignoriert und nur mit nur mit Bilddaten gearbeitet wird. Das selbe Problem tritt auch bei Systemen zur geometrischen Modellierung von Gegenständen auf, die auf einen ähnlichen Ansatz zurückgreifen. Ein Beispiel dafür ist das System „FACADE“[1], das erst die grobe geometrische Struktur eines Zielgebäudes aus einer Reihe von Photos rekonstruiert. Anschliessend werden aus den Photos Texturen für das geometrische Modell generiert. „FACADE“ legt dazu auf jede Teiloberfläche der geometrischen Struktur ein Raster, das dann entsprechend eingefärbt wird. Mit diesem Ansatz können zwar Bilder von neuen Kamerapositionen aus rekonstruiert werden, es ist jedoch nicht möglich, die Szene unter neuen Lichtverhältnissen zu rendern, da die rekonstruierten Texturen nur das reflektierte Licht zum Aufnahmezeitpunkt erfassen, und nicht die Beschaffenheit der Oberfläche.

Die von Yu und Malik vorgestellte Methode erweitert die Möglichkeiten von hybriden Modellierungen wie „FACADE“. Anstelle der Farbwerte werden die Reflexionseigenschaften der einzelnen Oberflächenelemente in das Modell integriert. Zusätzlich wird ein an die Umweltbedingungen angepasstes Beleuchtungsmodell verwendet. Dabei steht im Vordergrund, die Szene für beliebige Lichtverhältnisse möglichst realistisch rekonstruieren zu können.

Die Informationen über Gebäude, Umgebung, Sonne und Himmel werden durch eine Anzahl von Photos aus verschiedenen Perspektiven und zu verschiedenen Tageszeiten gesammelt. Aus diesen Photos werden Parameter für die Reflexions- und die Lichtquellenmodelle geschätzt. Um eine Rekonstruktion zu neuen Tageszeiten zu ermöglichen, werden neue Modellparameter interpoliert.

### 1.2 Übersicht

Das vorgestellte Verfahren kann in vier Stufen unterteilt werden. Es benötigt an vielen Stellen im Ablauf Unterstützung vom Benutzer, um beispielsweise die Inhalte der Photos interpretieren zu können. Da beinahe alle Gleichungssysteme zur Ermittlung der Modellparameter überdefiniert und nicht linear sind, verwenden die Autoren ein numerisches Least-squares Verfahren zur Schätzung der Parameter.

In einem ersten Schritt werden mehrere Photoserien von Zielgebäude, Umgebung, Himmel und Sonne aufgenommen. Dabei werden alle Photos einer Serie zum selben Zeitpunkt aufgenommen. So entstehen über einen Tag verteilt Stützstellen für die Interpolation der Modelle zu einer neuen Tageszeit. Durch eine spezielle Aufnahmemethode[2] können direkt die natürlichen Lichtstärken übernommen werden, die beim Aufnehmen eines normalen Photos verloren gehen. Das System arbeitet in allen folgenden Schritten mit derartigen Lichtstärkebildern. Bereits an dieser Stelle kann auch die geometrische Grundstruktur des Zielgebäudes aus einer Serie von Photos erstellt werden.

Im nächsten Schritt werden dann die zur Weiterverarbeitung notwendigen Informationen aus diesen Lichtstärkebildern extrahiert und für den dritten Schritt bereitgestellt. Dabei werden die Daten nach Stützstellen getrennt aufbereitet. Zu diesem Zeitpunkt können bereits einige einfache Eigenschaften wie die Lichtstärke der Sonne direkt gemessen werden. Alle Bilddaten, die das Zielgebäude und die Umgebung

betreffen werden aufgetrennt. Die Teile der Photos, die nicht das Zielgebäude enthalten, werden in mehrere Environment Maps zusammengefasst; die das Gebäude betreffenden Bildteile werden ebenfalls separat zwischengespeichert.

Die dritte Stufe des Systems ist das Schätzen der einzelnen Modelle aus der aufbereiteten Bildinformation. Hier werden die Parameter für die Reflexions- und Lichtquellenmodelle geschätzt. Obwohl die Sonne die einzige echte Lichtquelle ist, haben die Autoren den Himmel und die Umgebung als zusätzliche Lichtquellen integriert, da jede der drei Quellen eine unterschiedliche spektrale Verteilung hat. Sonne und Himmel können in ein Parametermodell eingepasst werden; die umgebende Landschaft muss diskret abgespeichert bleiben. Die Reflexion wird ähnlich wie das Phong'sche Beleuchtungsmodell für jede der Lichtquellen approximiert.

Da sich die Reflexionseigenschaften des Zielgebäudes bei dieser Modellierung der Lichtquellen nicht wesentlich ändern, haben die Autoren für eine Rekonstruktion zu einer neuen Tageszeit nur die Lichtquellen neu berechnet. Im vierten und letzten Schritt wird zwischen den an den Stützstellen gefundenen Lichtverhältnissen interpoliert, um die Parameter der Lichtquellen für eine neue Tageszeit schätzen zu können. Schliesslich wird das Bild unter diesen neuen Bedingungen rekonstruiert. Als Abschluss muss die zu Beginn vorgenommene Transformation in Lichtstärkebilder rückgängig gemacht werden, damit die gerenderten Bilder vernünftig aussehen. Das Verfahren wird später etwas detaillierter erklärt (siehe 2.1.2).

## 2 Aufbau des Systems

### 2.1 Vorbearbeitung

#### 2.1.1 Aufnahme der Bilder

Wie schon erwähnt, werden mehrere Serien von Bildern aufgenommen, um genügend Informationen zur Rekonstruktion von Gebäude und Umgebung zu erhalten. Alle Photos einer Serie sind zum gleichen Zeitpunkt aufgenommen worden und bilden die Stützstellen für eine Interpolation. Es werden Bilder vom Zielgebäude, der Umgebung, Himmel und Sonne aufgenommen. Standpunkt und Blickrichtung müssen bei allen Bildern vom Benutzer mitgeliefert werden. Aus diesem Grund müssen in allen Aufnahmen Bezugspunkte wie Gebäude oder Umgebung vorhanden sein.

Um das Reflexionsmodell sinnvoll schätzen zu können, sollten einige der Aufnahmen aus kritischen Winkeln gemacht werden. So kann zum Beispiel die spekulare Reflexion der Sonne auf einer Oberfläche nur dann rekonstruiert werden, wenn mindestens eine der Aufnahmen den spekularen Teil der Reflexion erfasst. Da die Sonne normalerweise die Farbwerte einer Aufnahme sättigt, werden zusätzliche Filter verwendet. Diese werden bei der Umwandlung in die Lichtstärken berücksichtigt.

#### 2.1.2 Lichtstärkebilder(Radiance Images)

Die meisten Systeme zur Aufnahme von digitalen Bildern (auch mit Umweg über Film und Scanner) bilden die aus der abglichteten Szene einfallende Lichtstärke nicht linear in digitalen Farbintensitäten ab. Extreme Beispiele sind die Verwendung von Filtern oder die Sättigung der Farbwerte bei zu hellen Szenen. Um möglichst realistische Bilder zu rekonstruieren ist es jedoch wichtig, mit den wirklichen Lichtintensitäten der Szenen zu rechnen.

Werden aus der gleichen Perspektive mehrere Bilder mit unterschiedlicher Belichtungszeit aufgenommen, so können aus diesen Bildern die ursprünglichen Lichtstärken für jeden Farbkanal rekonstruiert werden[2]. Diese Lichtstärkebilder eignen sich zwar wesentlich besser für alle Arten von Bildverarbeitung, müssen jedoch zur Betrachtung wieder in normale Farbwerte zurückverwandelt werden.

#### 2.1.3 Geometrisches Struktur

In den folgenden Verarbeitungsschritten wird davon ausgegangen, dass die geometrische Struktur des Gebäudes bereits bekannt ist und zur Verfügung steht. Die Unterteilung der Teiloberflächen in einzelne Texturelemente muss ebenfalls vorbereitet sein. Dies kann beispielsweise mit FACADE aus einem einzelnen Satz von Photos aufgebaut werden.

### 2.2 Datenextraktion

Bevor die einzelnen Modelle geschätzt werden können, werden alle dazu notwendigen Daten aus den Lichtstärkebildern entnommen und bereitgestellt.

#### Sonne

Aus den Sonnenbildern kann auf einfache Art die Lichtstärke der Sonne gefunden werden. Dieser Wert wird später als Intensität einer parallelen Lichtquelle verwendet.

## Himmel

Da keine Aufnahme existiert, die nur Himmel enthält (siehe 2.1.1), wird in verschiedenen Bildern ein Teil des Photos manuell als Himmel markiert. Aus diesen einzelnen Gebieten kann eine Schätzung für die Parameter eines synthetischen Himmels gefunden werden.

## Umgebung

In einem ersten Schritt wird aus je einer Serie von Bildern die nicht zum Zielgebäude gehörenden Bereiche jedes Bildes in eine Kugel projiziert, die eine Environment Map darstellt. Die Oberfläche der Kugel wird als Bitmap abgespeichert und in Kugelkoordinaten abgetragen. Die Auflösung der Bitmap ist niedrig gewählt, da für eine Berechnung der Reflexion über die ganze Map integriert werden muss. Dieses Integral würde durch eine höhere Auflösung der Map nur wenig profitieren. Ein weiterer Vorteil ist, dass durch die niedrige Auflösung kleine Änderungen des Kugelmittelpunktes vernachlässigbar sind. Bei komplexeren Umgebungen müssen notfalls mehrere Environment Maps angelegt werden, die über das Zielgebäude verteilt sind. Dies ist zum Beispiel der Fall, wenn das Zielgebäude nahe bei anderen grossen Objekten steht.

## Zielgebäude

Für eine spätere Schätzung der Oberflächeneigenschaften müssen die vom Zielgebäude reflektierten Lichtstärken bekannt sein. Aus diesem Grund wird als Vorbereitung für die Texturierung ein enges Gitter auf jede Teiloberfläche des Zielgebäudes aufgetragen. Durch die Rückprojektion dieser Gitterpunkte auf die Photos können die reflektierten Lichtstärken in die dazugehörenden Richtungen gefunden werden.

## 2.3 Schätzen der Modelle

### 2.3.1 Lichtquellen

Alle Lichtquellen des Systems werden in die drei Farbkanäle RGB aufgeteilt. Da die spektrale Verteilung und die Lichtstärke der Sonne von Himmel und Umgebung stark abweichen, wird die Sonne getrennt behandelt. Obwohl Himmel und Umgebung im Reflexionsmodell später gemeinsam verarbeitet werden, müssen sie als Lichtquellen in unterschiedlichen Datenstrukturen gespeichert werden. Alle Lichtquellen werden als RGB-Modell zusammengesetzt.

#### Sonne

Die Sonne, die wie erwähnt als parallele Lichtquelle approximiert wird, kann am einfachsten in das System integriert werden.

#### Künstlicher Himmel

Für den Himmel kann eine übersichtliche und einfache Darstellung für einen Farbkanal gefunden werden:

$$Ls(\mathbf{x}, \mathbf{g}) = Lz \cdot Bg(\mathbf{x}) \cdot Sa(\mathbf{g})$$

$$Bg(\mathbf{x}) = 1 + a \cdot \exp(b / \cos \mathbf{x})$$

$$Sa(\mathbf{g}) = 1 + c \cdot \exp(d \cdot \mathbf{g}^h) + e \cdot \cos^2 \mathbf{g}$$

$\mathbf{g}$  : Winkel zwischen Sonne und darzustellendem Punkt am Himmel.

$\mathbf{x}$  : Winkel zwischen Zenit und darzustellendem Punkt am Himmel

$Lz$  : Helligkeitsfaktor für den ganzen Himmel.

$a, b, c, d, e, h$  : zu schätzende Parameter in  $Bg()$  und  $Sa()$ .

$Bg()$  : Hintergrund am Himmel, der nicht von der Sonnenposition abhängt.

$Sa()$  : Sonnenaure

Für jede Photoserie werden die Parameter für jeden Farbkanal geschätzt.

#### Umgebungsmodell

Die Umgebung wird mit einem einfachen image-based Rendering Ansatz gespeichert. Die Basis dafür ist eine Halbkugel, auf die entlang der Längen- und Breitengrade eine grob aufgelöste zweidimensionale Bitmap gelegt wird. Auf diese Bitmap werden die Umgebungsbereiche der Photos projiziert. So entsteht eine Environment Map für die ganze Umgebung.

Im einfachsten Fall wird nur eine einzige Environment Map angelegt, da eine kleine Abweichungen des Standorts von der Kugelmitte kein Problem darstellt. Für komplexere Umgebungen (Gruppen von Gebäuden) müssen unter Umständen genügend Maps über das ganze Zielgebäude verteilt werden. Als Basis werden die Environment Maps aus dem zweiten Schritt verwendet. Der Himmel wird aus der Map entfernt.

## 2.3.2 Oberflächeneigenschaften / Reflexion

### Reflexion und Pseudo-BRDF

Um ein möglichst realistisches Modell für die Reflexion zu erhalten, sind die Autoren direkt von der BRDF (bidirectional reflectance distribution function) ausgegangen, da hier einige interessante Eigenschaften zur Modellierung von Reflexion und Licht gefunden werden können.

$$r(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r, I) = \frac{dI(\mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r, I)}{I(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, I) \cos \mathbf{q}_i d\mathbf{w}_i}$$

$\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i$  : Richtung einer einfallenden Lichtkomponente

$\mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r$  : Richtung einer reflektierten Lichtkomponente

$I$  : Wellenlänge

$I()$  : Lichtstärke aus bestimmter Richtung mit bestimmter Wellenlänge.

Da die Photodaten nur aus RGB-Werten bestehen, wird die Reflexionsfunktion als erstes in die drei Farbkanäle RGB zerlegt. Es entstehen drei Pseudo-BRDF Funktionen, die ohne die Wellenlänge auskommen:

$$\mathbf{r}_{pseudo}(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r) = \frac{\int I(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, I) r(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, \mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r, I) R(I) dI}{\int I(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i, I) R(I) dI} = \frac{dI_{image}(\mathbf{q}_r, \mathbf{f}_r)}{I_{image}(\mathbf{q}_i, \mathbf{f}_i) \cos \mathbf{q}_i d\mathbf{w}_i}$$

$R(I)$  : spektrale Verteilung für einen Farbkanal

Weil die einfallende Lichtstärke ein Teil des Integrals für die Pseudo-BRDF ist, wird die Reflexionsfunktion abhängig von der spektralen Verteilung der Lichtquellen. Aus diesem Grund werden für jede Teiloberfläche mehrere Pseudo-BRDF rekonstruiert. Es werden also in Summe sechs Pseudo-BRDFs benötigt: für jede Lichtquelle (Sonne, Himmel/Umgebung) und jeden Farbkanal (R,G,B). Sämtliche Pseudo-BRDFs werden als zeitunabhängig betrachtet, obwohl sich die Funktionen mit einer neuen spektralen Verteilung der Lichtquelle verändern würde. Für die Rekonstruktion des Gebäudes zu einer neuen Tageszeit, bzw. Beleuchtung muss also das Reflexionsmodell nicht interpoliert werden.

Die einzelnen Pseudo-BRDFs selbst werden durch ein Modell approximiert, das etwas komplexer als ein normales Phong Modell ist. Für den diffusen Anteil wird direkt das Lambert'sche Modell verwendet.

### Diffuse Reflexion, Lambert'sches Modell

Unter der Annahme, dass abgesehen von Fenstern oder ähnlichem die meisten Oberflächen am Zielgebäude keine oder nur schwache spekulare Reflexion haben, kann man davon ausgehen, dass auf den Photos, die nicht in einem Winkel nahe einer Spiegelung aufgenommen worden sind, nur diffuse Anteile sichtbar sind. Aus diesem Grund rekonstruieren die Autoren die diffuse Reflexion nach dem Lambert'schen Modell getrennt und für jeden Punkt auf der Textur. Für alle Lichtquellen muss dabei berücksichtigt werden, dass sie von anderen Teilen des Zielgebäudes teilweise oder ganz verdeckt werden können. Die Sonne als parallele Lichtquelle stellt für diesen Schritt kein Problem dar, da Lichtvektor und Normalenvektor der Teiloberfläche bekannt sind. Für die anderen Lichtquellen (Himmel und Umgebung) muss anders vorgegangen werden.

Um den Lichtfluss von Himmel/Umgebung auf ein Texturelement zu berechnen, darf nur über die Himmels- und Umgebungselemente summiert werden, die nicht von anderen Teilen des Gebäudes verdeckt werden. Aus diesem Grund werden nur die Elemente aus Himmel/Umgebung genommen, die von der Aussenseite einer Teiloberfläche sichtbar sind. Um das zu erreichen werden erst die Halbkugel, die hinter der Oberflächenebene liegt, dann die Flächen, die vom Gebäude verdeckt sind geclippt. Vom Himmel selbst wird nur der Teil genommen, der vor der Teiloberfläche mit dem Texturelement liegt. Nach diesem Clipping wird der Himmel durch Subdivision in Polygone mit uniformer Lichtstärke aufgeteilt. Auf diesen Polygonen wird der Lichtfluss berechnet und für das Reflexionsmodell aufsummiert. Da die Umgebung bereits diskretisiert ist, kommt das Verfahren für die Umgebung ohne die Subdivision aus.

Um die diffusen Reflexionskoeffizienten für Sonne und Himmel/Umgebung zu schätzen werden zwei Photos verwendet: Ein erstes Photo, in dem das zu schätzende Texturelement nur durch Himmel/Umgebung beleuchtet ist, und ein zweites, in dem das Dreieck zusätzlich durch die Sonne beleuchtet wird. Durch das erste Photo kann der Reflexionskoeffizient ( $\mathbf{r}^{se}$ ) für Himmel/Umgebung direkt berechnet werden, da das abgestrahlte Licht nur von einer Lichtquelle abhängt. Dadurch bleibt für das zweite Photo der Koeffizient ( $\mathbf{r}^{sum}$ ) für die Sonne als einzige Unbekannte und kann so berechnet werden:

$$\mathbf{p}^{(1)} = \mathbf{r}^{se} \cdot E_{se}^{(1)}$$

$$\mathbf{p}^{(2)} = \mathbf{r}^{se} \cdot E_{se}^{(2)} + \mathbf{r}^{sum} \cdot E_{sun}$$

$I^{(1)}, I^{(2)}$  : abgestrahltes Licht im ersten, bzw., zweiten Photo

$E_{se}^{(1)}, E_{se}^{(2)}$  : Aufintegrierter, bzw. aufsummierter einfallender Lichtfluss von  
Himmel/Umgebung für erstes, bzw. zweites Photo  
 $E_{sun}$  : aufintegrierter einfallender Lichtfluss von der Sonne. Nur im zweiten Photo!

### Spekulare Reflexion

Das im System verwendete Reflexionsmodell ist etwas komplexer als das Phong Modell und verwendet ein gewichtetes inneres Produkt:

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{r}_d + \mathbf{r}_s \cdot (C_x u_x v_x + C_y u_y v_y + C_z u_z v_z)^n$$

$u$  : Einfallrichtungen der einzelnen Lichtstrahlen.  
 $v$  : Sichtrichtung, bzw. Richtung für reflektierten Strahl  
 $\mathbf{r}_d$  : bereits berechneter diffuser Reflexionskoeffizient  
 $\mathbf{r}_s$  : zu schätzender spekularer Reflexionskoeffizient  
 $C_x, C_y, C_z$  : zu schätzende Koeffizienten für das innere Produkt

Für Himmel und Umgebung wird analog zur diffusen Reflexion vorgegangen. Aus diesem Grund muss die Schätzung für jeden reflektierten Strahl ( $v_i$ ) über die einzelnen einfallenden Lichtstrahlen ( $u_j$ ) berechnet werden. Das Least-squares Ziel sieht dann folgendermassen aus:

$$\sum_{i=1}^m \left( \frac{\sum_{j=1}^n e_j \cdot \mathbf{r}(u_j, v_i) - I_i}{\mathbf{s}_i} \right)^2 \rightarrow \min$$

$e_j$  : bereits berechnete/gemessene einfallende Lichtstärke aus Richtung  $u_j$   
 $I_i$  : gemessene, reflektierte Lichtstärke aus Richtung  $v_i$   
 $\mathbf{s}_i$  : Gewichte für Least-squares.

Da bei jedem Iterationsschritt die Auswertung dieser Doppelsumme nötig ist, haben Yu und Malik folgende Vereinfachung getroffen: Unter der Annahme, dass die spekularen Eigenschaften des Gebäudes über eine Teiloberfläche des geometrischen Modells sich nicht verändert, kann der Berechnungsaufwand wesentlich reduziert werden, da die Doppelsumme nicht über jedes Texturelement ausgewertet werden muss. Ein weiterer Vorteil besteht darin, dass für jedes spekulare Modell jetzt wesentlich mehr Information für eine Schätzung zur Verfügung steht. Für die Berechnung der spekularen Reflexionsfunktion der Sonne entfällt die Doppelsumme.

## 2.4 Re-Rendering

Aufgrund der geschätzten Parameter für Beleuchtung und Gebäude kann nun eine neue Szene aus einer beliebigen Richtung zu einer beliebigen Tageszeit rekonstruiert werden. Da zu Beginn alle Bilddaten in „Radiance images“ umgewandelt wurden, müssen die Resultate noch zurücktransformiert werden, um die einem Photo ähnlichen Bilddaten zu erhalten.

### 2.4.1 Rekonstruktion für eine neue Tageszeit

Um eine Szene zu einer neuen Tageszeit rekonstruieren zu können, werden die Beleuchtungsmodelle für jede der Photoserien aufgebaut und bilden so Stützstellen. Durch eine vernünftige Interpolation zwischen den einzelnen Photoserien entsteht schliesslich ein Beleuchtungsmodell für beliebige Tageszeiten.

#### Sonne

Durch eine einfache Formel kann zu einem gegebenen Zeitpunkt und einer gegebenen geographischen Lage die Position der Sonne am Himmel bestimmt werden. So müssen für eine neue Tageszeit nur die Farbkomponenten der Sonne interpoliert werden (Anhang von [3]). Die Sonnenposition wird einfach aus der geographischen Lage und dem Zeitpunkt berechnet.

#### Himmel

Um die Parameter für eine neue Tageszeit zu schätzen wird eine künstliche Environment Map für den Himmel eingerichtet. Diese Map kann nicht direkt durch punktweise Interpolation aus zwei berechneten künstlichen Maps gefunden werden, da durch die verschiedenen Sonnenpositionen Probleme entstehen. Aus diesem Grund werden für jeden Punkt auf dieser künstlichen Map Werte für die totale Helligkeit, Hintergrundkomponente und Sonnenaura interpoliert. Das Produkt der drei Werte ergibt den Farbwert auf der Map.

Hintergrund und Sonnenaura werden berechnet, indem die entsprechenden Funktionen an den verwendeten Stützstellen ausgewertet und gemittelt werden. Die totale Helligkeit kann direkt aus den Stützstellen ausgelesen und gemittelt werden. Als Gewicht für die einzelnen Stützstellen wird der Kehrwert des Winkel zwischen der Sonnenpositionen der Stützstelle, bzw. der neuen Tageszeit gewählt.

## Umgebung

Da sich die Environment Map bei neuer Sonnenposition mitverändert, ist die Rekonstruktion der Umgebung für eine neue Tageszeit nicht einfach. Yu und Malik verwenden deshalb folgendes Verfahren: Für eine einzelne Lichtquelle lassen sich unter der Annahme, dass alle Oberflächen der Umgebung diffus reflektieren, Normalenvektor und Reflexionskoeffizient aus den reflektierten Lichtstärken bei drei unterschiedlichen Beleuchtungsrichtungen rekonstruieren. In diesem Fall können einfach drei Environment Maps zu drei Tageszeiten verwendet werden.

Da der Himmel in dieser Modellierung auch als Lichtquelle angesehen werden muss, wird das Verfahren etwas komplexer. Wenn der Himmel als ambiente Lichtquelle approximiert wird, entsteht folgendes Modell:

$$I_{env} = \begin{cases} \mathbf{r}_{sky} \cdot E_{sky} + \mathbf{r}_{sun} \cdot E_{sun} \cdot (n_{env} \cdot l_{sun}) & , \text{ falls } n_{env} \cdot l_{sun} \geq 0 \\ \mathbf{r}_{sky} \cdot E_{sky} & , \text{ sonst} \end{cases}$$

$E_{sun}$  : Lichtstärke der Sonne

$E_{sky}$  : Lichtstärke integriert über gesamten Himmel

$l_{sun}$  : Normierter Vektor zur Sonnenposition

$\mathbf{r}_{sky}$ ,  $\mathbf{r}_{sun}$  : zu schätzende Reflexionskoeffizienten (drei Komponenten: RGB)

$n_{env}$  : Zu schätzender Normalenvektor (normiert)

Da der Normalenvektor die Länge 1 haben muss, bleiben 8 Unbekannte, die durch ein Least-squares Verfahren über drei verschiedene Sonnenpositionen gefunden werden können. Durch Abspeichern der Lösungen für jeden Pixel der Environment Map kann die Umgebung für jede beliebige Tageszeit neu aufgebaut werden.

### 2.4.2 High Resolution Re-Rendering

Eine besondere Eigenschaft des Systems ist das Re-Rendern bestimmter Bilder mit höherer Auflösung. Dies ist wünschenswert, da die Oberflächen bei einer zu nahen Ansicht des Gebäudes beim Re-Rendering verschwommen wirken. Dies kommt zustande, da das Raster, das zur Schätzung der Reflexionen auf die Teiloberflächen des Gebäudes gelegt worden ist, unter diesen Umständen zu niedrig aufgelöst ist. Um diesen Verlust an Auflösung mindestens für einzelne Ansichten zu kompensieren, werden ein aus der gewünschten Perspektive aufgenommenes Photo ( $I(x, y)$ ) und die Rekonstruktion ( $\tilde{I}(x, y)$ ) des gleichen Bildes für die Lichtverhältnisse zum Aufnahmezeitpunkt verglichen. Unter der Annahme, dass sich der auf das Gebäude einfallende Lichtfluss ( $E(x, y)$ ) über die Oberfläche nur langsam ändert, kann er mit dem aus der Rekonstruktion berechneten Lichtfluss ( $\tilde{E}(x, y)$ ) approximiert werden. Um nun eine neue Reflexionsfunktion ( $\mathbf{r}()$ ) zu finden, wird folgendermassen vorgegangen:

$$\mathbf{r}(x, y) = \frac{I(x, y)}{E(x, y)} \approx \frac{I(x, y)}{\tilde{E}(x, y)}$$

Durch Berechnen des Lichtflusses ( $E'(x, y)$ ) für eine andere Beleuchtung kann ein neues hochaufgelöstes Bild berechnet werden:

$$I'(x, y) = \mathbf{r}(x, y) \cdot E'(x, y)$$

So entsteht ein Bild, das die neuen Lichtverhältnisse mit der Genauigkeit des ursprünglichen Photos rekonstruiert.

## 3 Resultate / Zukünftige Arbeiten

Yu und Malik haben für ihren Versuch ungefähr 100 Bilder des „Berkeley bell tower“ zu vier Tageszeiten aufgenommen und verarbeitet. Wie vermutet hat die Sonne den grössten Einfluss; im roten Farbkanal beispielsweise über 90%. Die von der Sonne nicht beleuchteten Seiten sind von Himmel und Umgebung vergleichsweise gleich stark beleuchtet. Durch den starken Einfluss der Sonne ist die spekulare Reflexion der Sonne ungefähr 18 Mal so stark wie die von Himmel und Umgebung. Um ein schnelles Re-Rendering zu erreichen, haben Yu und Malik die spekularen Anteile von Himmel und Umgebung ignoriert.

Vergleiche mit Photos, die aus neuen Winkeln zu neuen Tageszeiten gemacht worden sind, bestätigen die angenommenen Modelle. Eine Simulation von Sonnenaufgang bis Sonnenuntergang, sowie ein Übergang zwischen klarem und bewölktem Himmel bleiben weitgehend realistisch. Bei niedrigem Sonnenstand, wie zum Beispiel bei Sonnenuntergang, weichen die Rekonstruktionen etwas mehr ab, da sich die spektrale Zusammensetzung der Sonne stark verändert.

Da sich die Pseudo-BRDFs mit der spektralen Verteilung der Lichtquellen ändern, ist noch unklar, wie das System zu extremen Lichtverhältnissen arbeitet. Die Rekonstruktion von mehreren Gebäuden ist im Moment nur möglich, indem jedes Gebäude einzeln verarbeitet wird. Interessant wäre es, ein solches Szenario in einem Schritt rekonstruieren zu können.

Der Ansatz von „FACADE“ und die hier vorgestellte Entkopplung von der ursprünglichen texturbasierten Version hat mich beeindruckt, da das Verfahren mit kleinen Umstellungen wahrscheinlich auf manches image-based System übernommen werden kann. Interessant war auch die Methodik, mit der die Probleme bei der Interpolation auf neue Tageszeiten gelöst worden sind. An den Resultaten hat mir die „Sunrise To Sunset Simulation“ mit der Rekonstruktion des spekularen Anteils der Kuppel gefallen. Als zusätzliches Beispiel würde mich interessieren, was für Effekte bei einer anderen Sonnenlaufbahn (z.B. andere Jahreszeit) ausgelöst werden. Auch die Rekonstruktionen eines Zielgebäudes mit grösseren stark spekularen Oberflächen wie zum Beispiel Fensterscheiben würden wahrscheinlich einen noch besseren Einblick in die Leistungsfähigkeit dieser Modellierung geben.

## Referenzen

- [1] DEBEVEC, P., TAYLOR, C., AND MALIK, J. Modelling and rendering architecture from photographs: A hybrid geometry- and image-based approach. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series* (1996), pp. 11-20
- [2] DEBEVEC, P., AND MALIK, J. Recovering high dynamic range radiance maps from photographs. In *Computer Graphics Proceedings, Annual Conference Series* (1997), pp. 369-378
- [3] REES, W. *Physical Principles of Remote Sensing*. Cambridge Univ. Press. 1990