

# Glossy Reflections

Seminar-Ausarbeitung von

**Kai Westerkamp**

An der Fakultät für Informatik  
Institut für Visualisierung und Datenanalyse,  
Lehrstuhl für Computergrafik

1. Juni 2016



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Ähnliche Arbeiten</b>	<b>3</b>
2.1	Virtual Point Lights . . . . .	3
2.2	Photon Mapping . . . . .	3
2.3	Precomputed Radiance Transfer . . . . .	3
<b>3</b>	<b>BRDF und Spherical Gaussians</b>	<b>5</b>
3.1	Spherical Gaussians . . . . .	5
<b>4</b>	<b>Basis Algorithmus und One-bounce Interreflection</b>	<b>7</b>
4.1	One-Bounce Interreflection . . . . .	7
4.1.1	Reflektiertes Licht . . . . .	7
4.1.2	Beleuchtung mit dem reflektiertem Licht . . . . .	8
4.1.3	Integration über ein sphärisches Dreieck . . . . .	8
<b>5</b>	<b>Baumstruktur</b>	<b>11</b>
5.1	Abschätzung der Reflexion eines Knotens . . . . .	11
5.2	Abschätzung des Fehlers . . . . .	12
<b>6</b>	<b>Implementierung</b>	<b>13</b>
6.1	Sichtbarkeit . . . . .	13
6.2	Umsetzung des Algorithmus . . . . .	13
<b>7</b>	<b>Ergebnisse und Vergleiche</b>	<b>15</b>
7.1	Genauigkeit des Algorithmus . . . . .	15
7.2	Vergleiche und Fazit . . . . .	15
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>19</b>



# 1. Einleitung

Die korrekte Beleuchtungsberechnung ist eine zentrale Aufgabenstellung der Computergrafik. Hierbei ist die indirekte Beleuchtung ein langjähriges hartnäckiges Problem. Besonders bei Szenen mit vielen unterschiedlichen Materialien stellt dieses eine große Herausforderung dar. Es gibt einige Algorithmen, die sich für bestimmte Materialien gut eignen, aber bei anderen keine guten Resultate liefern.

In dieser Arbeit wird ein Algorithmus vorgestellt, der auf Spherical Gaussians basiert und ein breites Spektrum an Materialeigenschaften abdeckt. Mit diesem Algorithmus lässt sich indirektes Licht mit einer Reflexion darstellen. In Abbildung 1 sind einige Beispielbilder, die mit dem Algorithmus erstellt wurden. Die Berechnungsdauer für diese Bilder liegt zwischen fast interaktiv und ein paar Sekunden pro Frame.

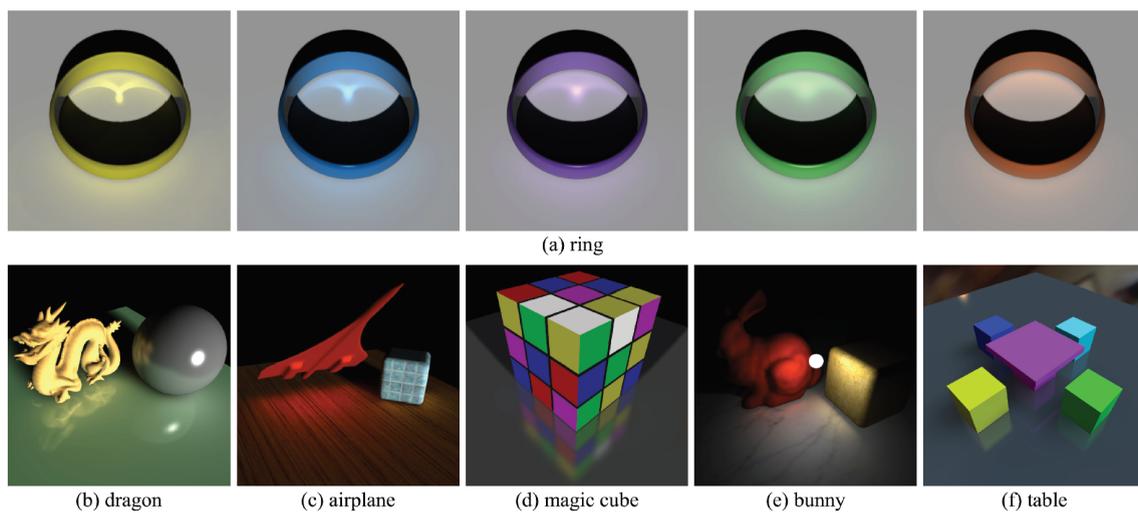


Abbildung 1.1: Einige Beispielbilder: (a) Kaustiken mit unterschiedlichen Ring-BRDFs, (b) indirekte Highlights, (c) diffuse Reflexion, (d) glossy Reflexionen, (e) eine Punktlichtquelle, (f) Umgebungslicht [WRG<sup>+</sup>09]

## 2. Ähnliche Arbeiten

In diesem Kapitel werden kurz einige Algorithmen vorgestellt, die versuchen das Problem der indirekten Beleuchtung zu lösen.

### 2.1 Virtual Point Lights

Eine effiziente Lösung für indirekte Beleuchtung sind Virtual Point Lights (VPL). Diese wurde zuerst in dem Paper Instant Radiosity [Kel97] vorgestellt. Dabei werden viele VPLs durch Pfade von der Lichtquelle in der Szene verteilt. Beim Rendern wird mit Shadow Maps der Einfluss aller VPLs auf einen Oberflächenpunkt bestimmt. Der Aufwand für diesen Vorgang steigt linear mit Anzahl der VPLs. Es gibt einige Verbesserungen für diesen Algorithmus, jedoch eignet er sich wenig für spekulare Materialien. Die indirekte Beleuchtung wird bei diesem Vorgehen in einige Punkte zusammengefasst. Diese werden bei diesen Materialien durch Glanzlichter sichtbar wie in Abbildung 7.2 gut erkennbar.

### 2.2 Photon Mapping

Beim Photon Mapping [Jen01] werden Photonen von der Lichtquelle ausgesendet, in der Szene verteilt und in einer Photon Map gespeichert. Im zweiten Durchlauf wird die Photon Map mit Raytracing Methoden ausgewertet.

### 2.3 Precomputed Radiance Transfer

Beim Precomputed Radiance Transfer [SKS02] wird die Darstellung von indirektem Licht in Echtzeit erreicht, indem der Lichttransport in statischen Szenen vorberechnet und gespeichert wird. Zum Speichern wird hierbei eine effiziente Methode benötigt, wie zum Beispiel Spherical Harmonics.



## 3. BRDF und Spherical Gaussians

In diesem Kapitel werden die Grundlagen des Lichttransports und Spherical Gaussians eingeführt.

Zur physikalischen Beleuchtungsberechnung muss hierzu die Rendergleichung [Kaj86] berechnet werden.

$$L(x, o) = L_e(x, o) + L_r(x, o) = L_e(x, o) + \int_{\Omega^+} f_r(i, x, o) L_i(x, i) \max(0, i \cdot n) di \quad (3.1)$$

Hierbei ist  $L(x, o)$  die Radiance, die an einem Oberflächenpunkt  $x$  in die Richtung  $o$  (outgoing) abgegeben wird.  $L_e(x, o)$  ist das von dem Oberflächenpunkt emittierte Licht, und das Integral das reflektierte Licht in die Richtung  $o$ . Das reflektierte Licht wird bestimmt durch das Integral über die positive Hemisphäre, wobei  $L_i(x, i)$  das einfallende Licht aus der Richtung  $i$  (incoming) und  $\max(0, i \cdot n)$  der Kosinus zwischen der Oberflächennormalen  $n$  und  $i$  ist.  $f_r(i, x, o)$  (kurz  $f_r(i, o)$ ) ist die *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF). Die BRDF ist vom Material abhängig und gibt an einem Oberflächenpunkt  $x$  an, wie viel Licht vom Einfallswinkel  $i$  in die Ausfallrichtung  $o$  reflektiert wird.

In der Rendergleichung 3.1 kann  $L_i(x, i) = L(y, -i)$  mit  $y = ray(x, i)$  geschrieben werden. Somit erhält man eine rekursive Darstellung. Diese zu lösen ist eine komplexe Aufgabe und wird häufig approximiert und vorberechnet, um Beleuchtung in Echtzeit berechnen zu können. Z.B. ignoriert man indirekte Beleuchtung vollständig und betrachtet nur alle Oberflächen, bei denen  $L_e > 0$  ist. In Raytracing Methoden wird versucht, die Rendergleichung durch Monte Carlo Integration und geschicktes Sampling der BRDF anzunähern.

In dieser Ausarbeitung wird ein Algorithmus vorgestellt, der die Gleichung mit einer indirekten Reflexion auswertet.

Eine einfache BRDF ist durch das Phong Beleuchtungsmodell gegeben. Die Beleuchtung wird in eine diffuse und spekulare Komponente getrennt. Der diffuse Anteil wird berechnet durch  $k_d \cdot I_L \cdot (N \cdot L)$  und der spekulare Anteil durch  $k_s \cdot I_L \cdot (R \cdot V)^n$  (siehe Abbildung 3). Hierbei ist  $I_L$  die einfallende Lichtintensität,  $k_d$  und  $k_s$  materialabhängige Konstanten und  $n$  der Phong Exponent, der die Größe der spekularen Glanzlichter beeinflusst.

### 3.1 Spherical Gaussians

Eine Möglichkeit BRDF's zu approximieren, bieten Spherical Gaussians (SG) 3.2. Spherical Gaussians sind definiert durch folgende Darstellung:

$$G(v; p, \lambda, c) = c \cdot e^{\lambda(v \cdot p - 1)}$$

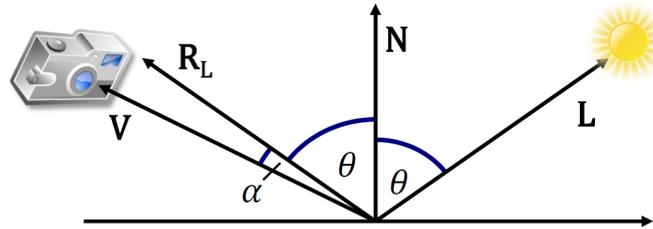


Abbildung 3.1: Richtungen im Phong Beleuchtungsmodell.  $N$  ist die Oberflächennormale,  $V$  der Viewvektor,  $L$  der Lichtvektor und  $R$  die Reflexion von  $L$  an  $N$  (Vorlesung Fotorealistische Bildsynthese 02\_BRDF)

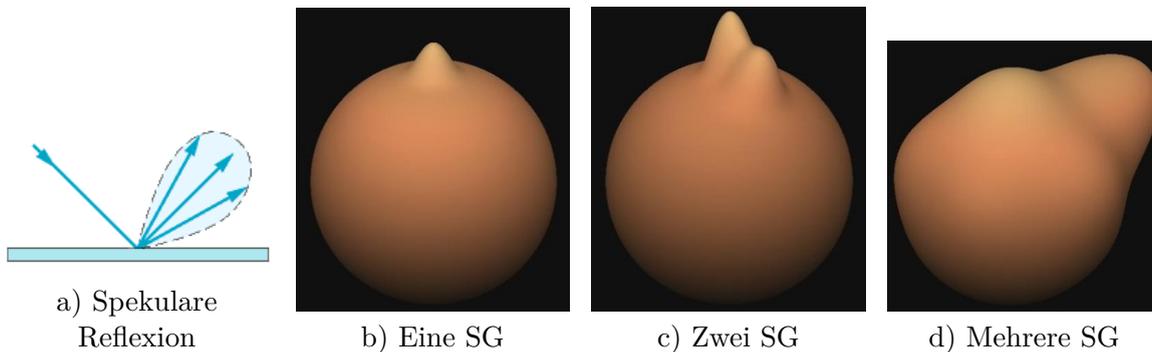


Abbildung 3.2: a) Spekulare Reflexion im Phong Beleuchtungsmodell b) bis d) Überlagerung von mehreren SG's [Glo] [pra]

mit  $p$  als Mittelachse,  $\lambda$  als sharpness und  $c$  als Skalar. Folgende kurze Schreibweisen werden häufig verwendet  $G_l(v) = G(v; p_l, \lambda_l) = G(v; p_l, \lambda_l, 1)$ . BRDFs können in eine Summe aus einem diffusen und einem spekularen Anteil zerlegt werden:

$$f_r(i, o) = k_d + k_s f_s(i, o)$$

In Wang et al. [WRG<sup>+</sup>09] wird beschrieben, wie die spekulare Komponente als Summe von SGs dargestellt werden kann:

$$k_s f_r(i, o) \approx \sum_{j=1}^n G(i; o^j, \lambda^j, c^j)$$

mit den Zentren  $o^j$ , den sharpnesses  $\lambda^j$  und den Koeffizienten  $c^j$ . Die diffuse Komponente kann als SG mit einer sharpness von 0 dargestellt werden.

$$k_d = G(i; 2(o \cdot n)n - o, 0, k_d)$$

Somit kann die BRDF als Summe von SGs dargestellt werden. In [WRG<sup>+</sup>09] lassen sich hierfür Beispiele finden, z.B. für Bling-Phong und Cook-Torrance. Des Weiteren können Lichtquellen auch als SGs ( $G_l(i)$ ) dargestellt werden. Dadurch kann eine einheitliche Darstellung als Summe von SGs erzielt werden.

## 4. Basis Algorithmus und One-bounce Interreflection

In dem Paper von Xu et al. [XCM<sup>+</sup>14] wird ein Algorithmus vorgestellt, der die Rendergleichung für die Rekursionstiefe 1 löst. Zur Beleuchtung eines Dreiecks (Empfänger) wird zusätzlich das indirekte Licht von anderen Dreiecken (Reflektor) berechnet. Dabei wird die SG-Darstellung von BRDF's verwendet und daraus eine stückweise definierte Approximation hergeleitet, um die Beleuchtung effizienter zu berechnen. Anschließend wird eine Baumstruktur 5 eingeführt, um diesen Algorithmus auch bei großen Szenen effizient anwenden zu können. Da nicht jedes Dreieck für alle anderen sichtbar ist und somit indirekt beleuchtet wird, wird zuletzt eine Lösung für das Sichtbarkeitsproblem 6 beschrieben.

### 4.1 One-Bounce Interreflection

In diesem Abschnitt leiten wir die Reflexionsgleichung für einen Oberflächenpunkt X (receiver) mit Normale  $n_x$  in Richtung  $o$  her. Die SG Lichtquelle  $l$  wird hierbei an einem Dreieck T (reflector) mit Normale  $n_r$  reflektiert. Für die Herleitung der Formel nehmen wir an, dass nichts zwischen  $x$  und T ist (Siehe Abb. 4.1).

Aus der Rendergleichung 3.1 folgt für den Receiver:

$$L(x, o) = \int_{\Omega_T} f_r(-r, x, o) L_i(x, -r) \max(0, -r \cdot n_x) dr \quad (4.1)$$

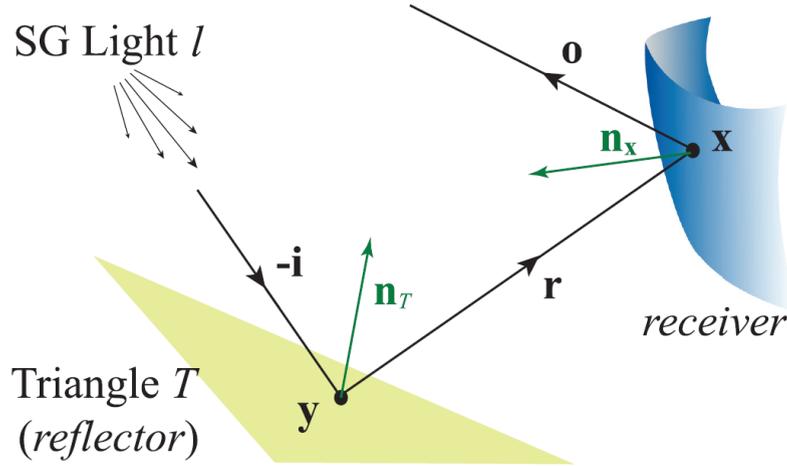
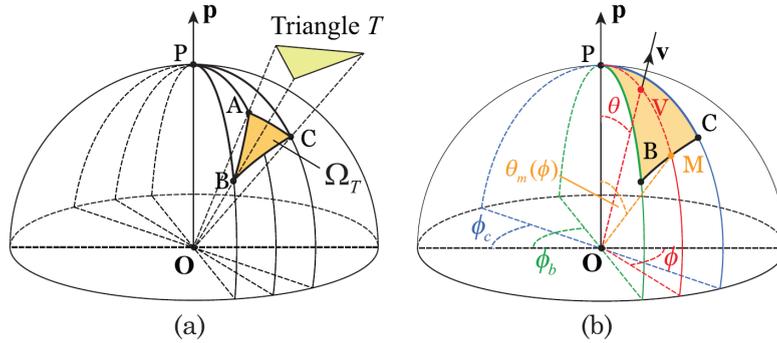
Wobei  $r$  die Richtung von einem Punkt  $y$  auf dem Reflektor ist und  $\Omega_T$  die sphärische Projektion des Dreiecks T. Für das einfallende Licht ist  $L_i(x, -r) = L(y, r)$  :

$$L(y, r) = \int_{\Omega_T} f_r(i, y, r) G_l(i) \max(0, i \cdot n_r) di \quad (4.2)$$

Beim Receiver wird hier die SG der Lichtquelle eingesetzt.

#### 4.1.1 Reflektiertes Licht

Im Folgenden approximieren wir die Gleichung 4.2, um eine besser berechenbare Funktion zu erhalten. Der Kosinus-Term  $\max(0, i \cdot n_r)$  ist für ein Dreieck T eine glatte Funktion die durch die mittlere Richtung  $i_T$  des Dreiecks angenähert werden kann. Damit erhält man die Konstante  $\max(0, i_T(r) \cdot n_r)$ , die man aus dem Integral ziehen kann. Die BRDF  $f_r(i, y, r)$  ist wie in Kapitel 3.1 beschreiben als Summe von SGs darstellbar  $f_r(i, y, r) \approx G_T(i)$ . Das

Abbildung 4.1: Lichtpfad für die Reflexion an einem Dreieck [WRG<sup>+</sup>09]Abbildung 4.2: Integration eines sphärischen Dreiecks  $\omega_T$  [WRG<sup>+</sup>09]

Integral über 2 SGs kann durch ein SG angenähert werden (siehe Anhang von [WRG<sup>+</sup>09]). Daraus ergibt sich eine Gleichung mit einer glatten Funktion und einer SG (die genauen Parameter sind nachzulesen im paper von Wu et al. 3.1).

$$L(y, r) \approx F(r)G(r; i_r, \lambda_r) \quad (4.3)$$

#### 4.1.2 Beleuchtung mit dem reflektiertem Licht

Die Gleichung 4.3 wird nun in 4.1 eingesetzt und die BRDF als Summe von SGs ersetzt.

$$L(x, o) = \int_{\Omega_T} F(r) \max(0, -r \cdot n_x) G(r; i_r, \lambda_r) G(r; -o_x, \lambda_x, c_x) dr \quad (4.4)$$

Das Produkt zweier SGs lässt sich durch eine SG ersetzen und die Funktion  $F(r) \max(0, -r \cdot n_x)$  ist "wirklich glatt" [WRG<sup>+</sup>09]. Man kann man es aus dem Integral ziehen. Somit erhält man eine vereinfachte Version der Rendergleichung:

$$L(x, o) \approx H(r'_h) \int_{\Omega_T} G(r; r_h, \lambda_h, c_h) dr \quad (4.5)$$

#### 4.1.3 Integration über ein sphärisches Dreieck

Um die Gleichung 4.5 auszuwerten, muss  $\int_{\Omega_T} G(v; p, \lambda) dv$  berechnet werden. Mit der Mittelachse P des SG ergibt sich aus dem Bild 4.1.3, dass

$$\Omega_t = \Omega_{\Delta ABC} = \Omega_{\Delta PBC} - \Omega_{\Delta PAB} - \Omega_{\Delta PCA}$$

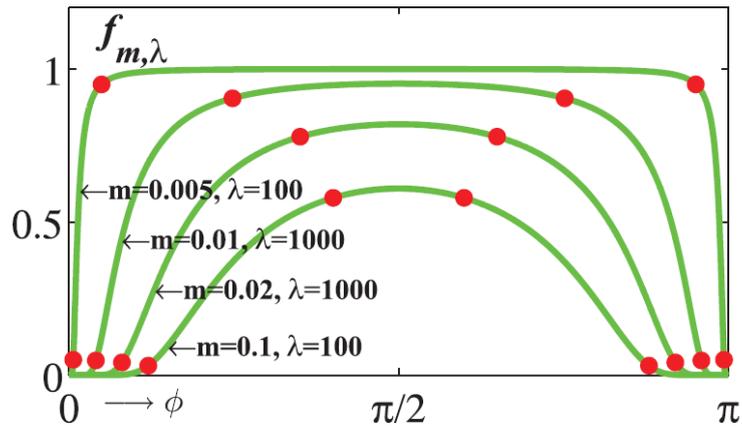


Abbildung 4.3: Plot der Funktion  $f_{m,\lambda}$ . Diese kann durch lineare Funktionen durch die roten Punkte angenähert werden. [WRG<sup>+</sup>09]

ist. Durch Integration über die Winkel und einigen Umformungen ergibt sich ein Integral über eine eindimensionale reelle Funktion 4.6, die durch eine stückweise definierte lineare Funktion angenähert werden kann.

$$f_{m,\lambda}(\phi) = \exp \left[ \lambda \left( \frac{\sin \phi}{\sqrt{m^2 + \sin^2 \phi}} - 1 \right) \right] \quad (4.6)$$



## 5. Baumstruktur

Um die indirekte Beleuchtung eines Oberflächenpunktes auszuwerten, muss die Formel aus dem vorherigen Kapitel für alle Dreiecke berechnet werden. Bei Szenen mit wenigen Dreiecken ist das möglich. Jedoch steigen die Kosten linear mit der Anzahl der Dreiecke. In diesem Kapitel wird eine binäre Baumstruktur eingeführt, die die Effizienz bei vielen Dreiecken steigert. Die Blätter des Baumes sind die Dreiecke der Szene und die einzelnen Knoten die Referenzen und Mittelwerte der Kinder. Der Baum wird von der Wurzel aufgebaut, und in jedem Schritt in 2 Kinder gesplittet. Für eine Split wird eine Hauptkomponentenanalyse durchgeführt. Im 6-dimensionalen Raum aus Dreiecksmittelpunkt und gewichteter Normale wird die Hauptachse berechnet und am Median gesplittet. Dieses Vorgehen garantiert das Aufteilen eines Knotens entlang der größten Varianz in 2 gleich große Kinder.

In den Knoten wird der durchschnittliche Mittelpunkt, die Durchschnittsnormale, die Bounding Box, der Normalenkegel, und die absolute Dreiecksfläche gespeichert. Bei texturtierten Dreiecken wird zusätzlich der Durchschnittsfarbwert und die Maximal- und Minimalfarbe gespeichert. Aus diesen Daten lässt sich das reflektierte Licht zu einem Empfänger approximieren 5.1, und eine Abschätzung des Fehlers errechnen 5.1.

Beim Rendern wird zunächst der Schnitt durch den Baum bestimmt. Angefangen wird mit dem Wurzelknoten und es wird immer der Knoten mit dem größten Fehler durch seine beiden Kinder ersetzt. Dieser Vorgang wird solange wiederholt bis 1.000 Knoten im Schnitt enthalten sind oder der Fehler kleiner ist als 1% des reflektierten Lichts. Wenn Blätter im Schnitt enthalten sind, kann das reflektierte Licht wie in Kapitel 4 berechnet werden. Jedoch funktioniert der Algorithmus nur bei Dreiecken mit einheitlicher BRDF. Bei texturtierten Dreiecken wird deshalb der Mittelwert der Farbe bestimmt und wir nehmen ihn als uniforme BRDF. Sollte der Fehler durch diese Annäherung zu groß werden, wird das Dreieck in kleinere unterteilt und dann ausgewertet. Für die Knoten im Baum wird im folgenden Abschnitt beschrieben, wie die Reflexion abgeschätzt werden kann.

### 5.1 Abschätzung der Reflexion eines Knotens

Um das reflektierte Licht auszurechnen, ändern wir Gleichung 4.5 geringfügig ab. Für einen Knoten  $N$  sei  $I_N$  der Mittelpunkt,  $n_N$  die durchschnittliche Normale und  $t_N$  die Durchschnittsfarbe. Wir ändern den Integrationsbereich von einem einzelnen Dreieck  $\Omega_T$  zu der sphärischen Projektion aller Dreiecke des Knotens  $\Omega_N$ .

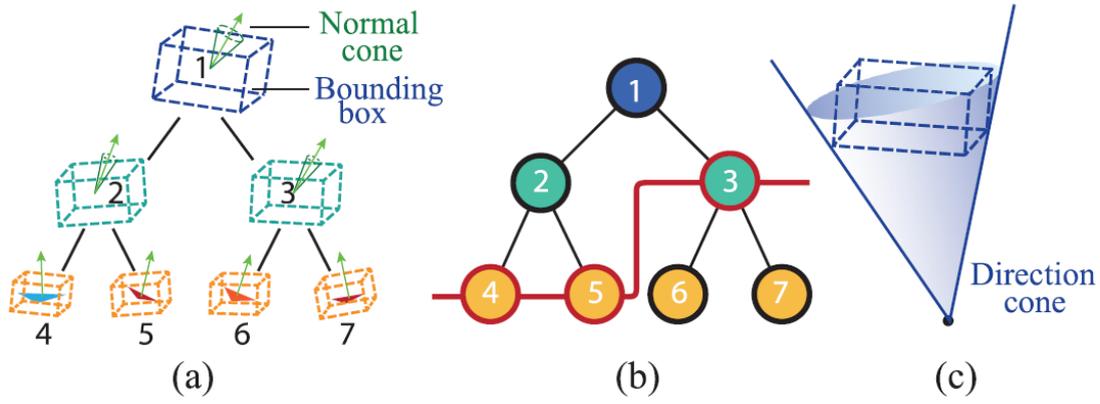


Abbildung 5.1: a) Der Binärbaum der Dreiecke mit Bounding box und Normal cone. b) Ein Beispiel Reflectorcut, c) Direction cone [WRG<sup>+</sup>09]

$$L(x, o) \approx t_N \cdot H(r'_h) \int_{\Omega_N} G(r; r_h, \lambda_h, c_h) dr \quad (5.1)$$

Da  $\Omega_N$  nicht bekannt ist, integrieren wir über die komplette Hemisphäre und ersetzen  $\Omega_N$  durch eine binäre Maske  $V_{\Omega_N}(r)$ .

$$\int_{\Omega_N} G(r; r_h, \lambda_h, c_h) dr = \int_{\Omega} G(r; r_h, \lambda_h, c_h) V_{\Omega_N}(r) dr \quad (5.2)$$

Diese Binärmaske ist wiederum durch eine SG approximierbar  $V_{\Omega_N}(r) \approx G(r; r_N, \lambda_N, c_N) = G_N(r)$ . Hierbei ist  $r_N$  die Richtung von  $I_N$  zu  $X$  und die Sharpness errechnet aus der Varianz und Dreiecksfläche des Knotens. Damit erhalten wir ein Integral über zwei SGs, das, wie oben beschrieben, eine analytische Lösung hat.

## 5.2 Abschätzung des Fehlers

Bei der Abschätzung der Funktion  $V_{\Omega_N}(r)$  kann es zu großen Fehlern kommen. Ist der Fehler eines Knotens zu groß, so wird er in die beiden Kinderknoten aufgesplittet. Um die Obergrenze des Fehlers in Gleichung 5.2 abzuschätzen, berechnen wir die größten und kleinsten Werte der SG  $g_{min}$  und  $g_{max}$ , den Winkel  $\Omega_N$ ,  $||\Omega_N||_{min}$ ,  $||\Omega_N||_{max}$  und die Texturwerte  $t_{min}$ ,  $t_{max}$ . Der Fehler lässt sich dann mit  $H(r'_h) \cdot (t_{max} \cdot g_{max} \cdot ||\Omega_N||_{max} - t_{min} \cdot g_{min} \cdot ||\Omega_N||_{min})$  berechnen. Die Texturwerte werden in dem jeweiligen Knoten gespeichert und die restlichen Werte können aus der Bounding Box und dem Normalenkegel des Knotens errechnet werden.

## 6. Implementierung

### 6.1 Sichtbarkeit

Bisher haben wir die Reflexion von Licht aus einer Lichtquelle über ein Dreieck zu einem Oberflächenpunkt berechnet. Dabei haben wir nicht betrachtet, ob der Lichtpfad durch Objekte blockiert ist. Um die Sichtbarkeit zwischen Lichtquelle und dem Reflektor zu evaluieren, wird Variance Shadow Map (VSM, [DL06]) verwendet. Hier wird die Shadowmap der Lichtquelle für 16 gleichmäßig verteilte Samples auf dem Reflektordreieck ausgewertet. Aus den Werten wird der Durchschnitt berechnet und zu dem Dreieck gespeichert.

Die Sichtbarkeit zwischen Reflektor und Retriever ist schwieriger zu bestimmen. Zunächst werden während der Initialisierung 200 virtuelle Lichter in der Szene verteilt um zur Laufzeit Imperfect Shadow Maps [RGK<sup>+</sup>08] zu berechnen. Imperfect Shadow Maps sind Shadow Maps mit geringer Auflösung für jede virtuelle Lichtquelle. In den Knoten der Baumstruktur werden die drei nächsten Lichter gespeichert. Bei der Berechnung der Sichtbarkeit wird der Mittelpunkt der Knoten, bzw. des Dreiecks in die Ebene der drei Punktlichtquellen projiziert. Die Werte aus den zugehörigen ISM werden ausgelesen und mit Hilfe von baryzentrische Koordinaten linear gemittelt.

### 6.2 Umsetzung des Algorithmus

Zur Initialisierung muss die Szene geladen und die Baumstruktur errechnet werden. Hier wird für jedes Mesh, das mehr als 200 Dreiecke enthält, der Binärbaum errechnet. Für kleinere Dreiecksnetze ist es effizienter die Reflexion von allen Dreiecken auszurechnen.

Während eines eigenen Renderdurchgangs wird zunächst die direkte Beleuchtung der Szene bestimmt. Anschließend muss für jeden Pixel ein Schnitt durch den Baum bestimmt werden. Dafür wird zunächst für jeden Vertex ein Schnitt bestimmt. Für einen Pixel werden dann die 3 Schnitte der Eckpunkte gemittelt. Im finalen Rendervorgang wird dann der Schnitt ausgewertet, für jeden Pixel die Reflexion berechnet und mit den Werten aus den Shadow Maps gewichtet.

Um die Performance zu verbessern, kann die Schnitt-Selektion in CUDA implementiert werden. Jedoch gibt es noch keine effizienten Prioritätenlisten für CUDA. Die Schnitt-Selektion wird in 5 normale Warteschlangen mit unterschiedlichen Fehlern aufgeteilt. Die erste Schlange speichert z.B alle Knoten mit Fehlern größer als 16% und nach dem Splitten werden die Kinder zu einer Liste mit zugehörigem Fehler, z.B.größer als 8% hinzugefügt.

So erhält man eine nicht ganz akkurate Prioritätenliste, aber eine ausreichend genaue für diesen Zweck.

## 7. Ergebnisse und Vergleiche

In diesem Kapitel wird der vorgestellte Algorithmus mit anderen verglichen. Außerdem wird die Wahl der Punktlichter und des Fehler Grenzwertes betrachtet.

### 7.1 Genauigkeit des Algorithmus

In Abbildung 7.2 wird die indirekte Reflexion eines Dreiecks mit unterschiedlichen BRDF's. In der Szene steht das Reflektor Dreieck senkrecht auf eine Ebene und ein Licht im 45 Grad Winkel zur Ebene. Die Ebene hat eine Lambert BRDF und das Dreieck hat pro Reihe eine unterschiedliche Glossiness. Der vorgestellte Algorithmus hat bereits bei eine 3 geteilten Approximation der Funktion 4.6 sehr starke Ähnlichkeiten zur Referenz. Der Vergleich zu VPL zeigt, das diese bei spekularen Materialien starke Artefakte produzieren. In Abbildung 7.2 wird zusätzlich die BRDF der Ebene verändert und mit einer Path-Tracer Referenz verglichen.

Beim erstellen des Schnittes wurde die Größe des Fehlers von 1% experimentell bestimmt. Größere Fehler wie 5% ergeben eine bessere Performance produzieren aber sichtbare Fehler.

Auch die Wahl von 200 Virtual Pointlights zur Bestimmung der Sichtbarkeit wurde getestet. Weniger Lichter führt zu sichtbaren Fehlern und ab 200 sind die Bilder sehr ähnlich zur Referenz.

### 7.2 Vergleiche und Fazit

In Abbildung 7.2 sind Vergleichsbilder mit VPL gegeben. Hier kann man erkennen, dass VPLs für diffuse Materialien gut funktionieren. Bei spekularen Materialien werden jedoch sehr schnell Artefakte sichtbar. In Vergleich zu Photon Mapping produziert der Algorithmus in ähnlicher Zeit weniger Rauschen. Mit viel mehr Photonen lassen sich bessere Ergebnisse erzielen, jedoch ist es dann nicht mehr fast interaktiv. Bei einfachen Szenen mit verschiedenen Materialien werden gute Bilder errechnet (siehe Abbildung 7.2. Auch für komplexere, texturierte Szenen überzeugt der Algorithmus und kann sogar überzeugende Kaustiken berechnen (siehe Abbildung 1). Die Performance auf einer NVIDIA Geforce GTX690 Grafikkarte reicht von 0,03 fps bei 720p für sehr komplexe Szenen bis zu 1,4 fps bei einfachen Szenen (Magic cube). Der Algorithmus erreicht also gute Ergebnisse für Szenen mit vielen unterschiedlichen Materialien und ist dabei fast interaktiv. Die Grenze liegt jedoch bei indirekter Beleuchtung mit maximal einer Reflexion. Indirektes Licht

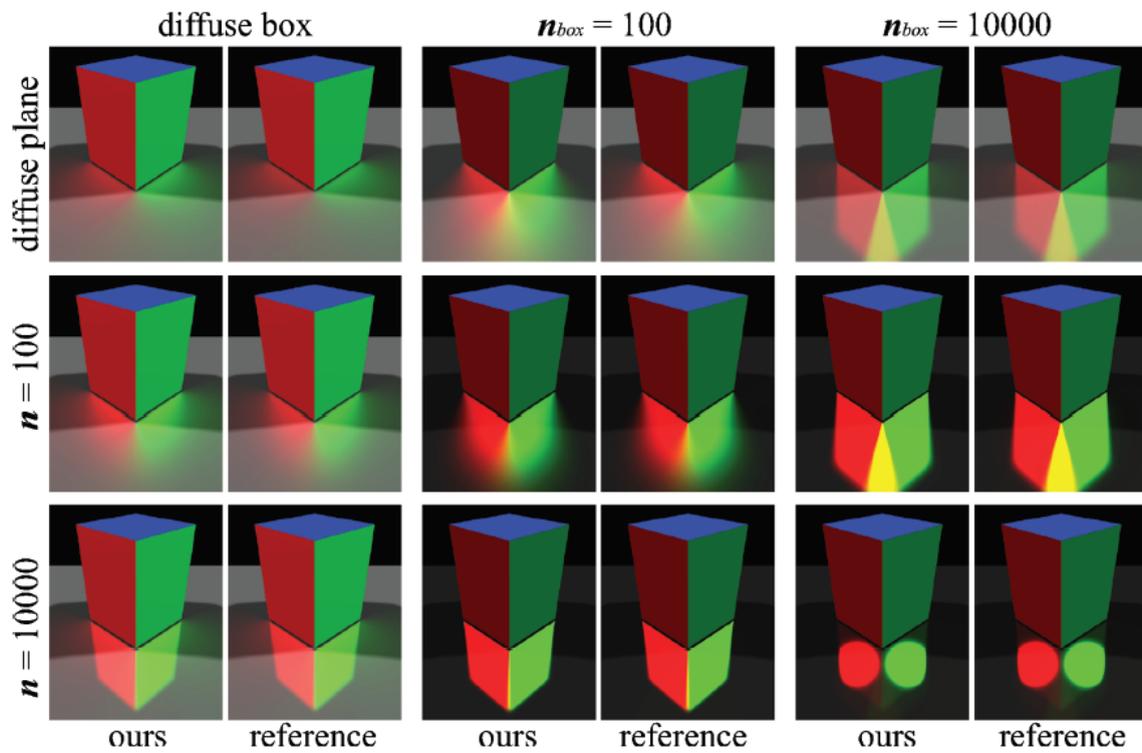


Abbildung 7.1: Würfel auf Ebenen mit jeweils verschiedenen spekularen Materialien [WRG<sup>+</sup>09]

über mehrere Reflexionen wird nicht betrachtet. Prinzipiell könnte man den Algorithmus so anpassen, dass auch 2 Reflexionen betrachtet werden, jedoch liegt der Aufwand bei  $O(N^2)$  mit  $N$  Dreiecken. Jede mögliche Kombination zwischen Reflektor 1 und 2 müsste betrachtet werden.

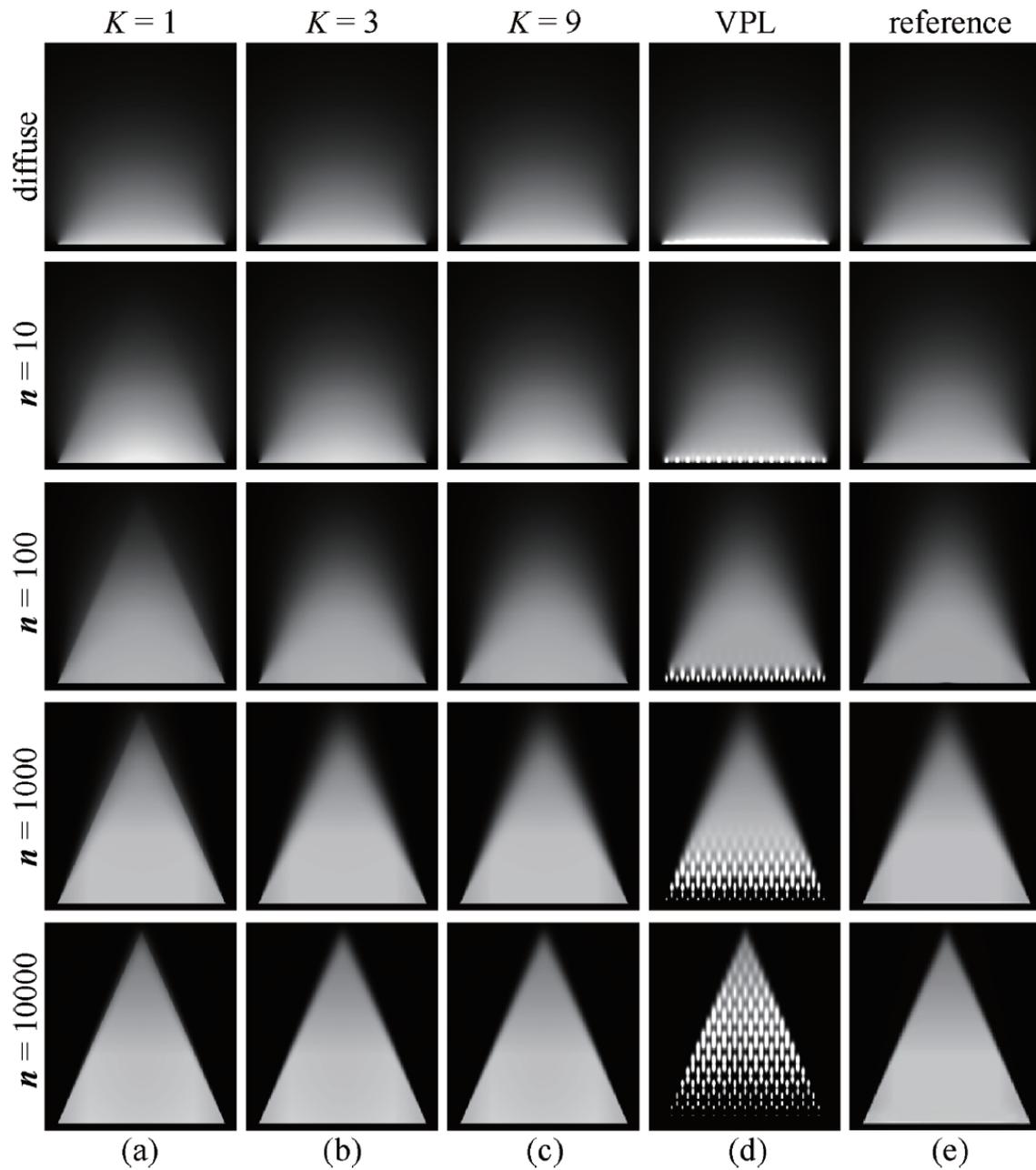


Abbildung 7.2: Vergleich der indirekten Reflexion mit unterschiedlich spekularen Materialien. Reihe 1 ist ein diffuser Reflektor und Reihen 2 bis 5 jeweils Blinn-Ohong mit Shininess 10, 100, 1000 und 10000. Spalte (a) bis (c) sind mit dem vorgestellten Algorithmus mit unterschiedlich vielen linearen Stücken der Funktion 4.6 bestimmt, (d) ist mit 265 VPL erstellt und (e) eine path-traced Referenz [WRG<sup>+</sup>09]



# Literaturverzeichnis

- [DL06] William Donnelly und Andrew Lauritzen: *Variance Shadow Maps*. In: *Proceedings of the 2006 Symposium on Interactive 3D Graphics and Games*, I3D '06, Seiten 161–165, New York, NY, USA, 2006. ACM, ISBN 1-59593-295-X. <http://doi.acm.org/10.1145/1111411.1111440>.
- [Glo] *Blurred Glossy Reflections*. <http://blog.yiningkarlli.com/2012/12/blurred-glossy-reflections.html>. Accessed: 2016-05-30.
- [Jen01] Henrik Wann Jensen: *Realistic Image Synthesis Using Photon Mapping*. A. K. Peters, Ltd., Natick, MA, USA, 2001, ISBN 1-56881-147-0.
- [Kaj86] James T. Kajiya: *The Rendering Equation*. SIGGRAPH Comput. Graph., 20(4):143–150, August 1986, ISSN 0097-8930. <http://doi.acm.org/10.1145/15886.15902>.
- [Kel97] Alexander Keller: *Instant Radiosity*. In: *Proceedings of the 24th Annual Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques*, SIGGRAPH '97, Seiten 49–56, New York, NY, USA, 1997. ACM Press/Addison-Wesley Publishing Co., ISBN 0-89791-896-7. <http://dx.doi.org/10.1145/258734.258769>.
- [pra] *All-Frequency Rendering of Dynamic, Spatially-Varying Reflectance*. <http://graphics.im.ntu.edu.tw/~kevincosner/presentation/Presentation-2010-04-14.pptx>. Accessed: 2016-05-30.
- [RGK<sup>+</sup>08] Tobias Ritschel, Thorsten Grosch, Min H. Kim, Hans Peter Seidel, Carsten Dachsbacher und Jan Kautz: *Imperfect Shadow Maps for Efficient Computation of Indirect Illumination*. ACM Trans. Graph. (Proc. of SIGGRAPH ASIA 2008), 27(5), 2008.
- [SKS02] Peter Pike Sloan, Jan Kautz und John Snyder: *Precomputed Radiance Transfer for Real-time Rendering in Dynamic, Low-frequency Lighting Environments*. ACM Trans. Graph., 21(3):527–536, Juli 2002, ISSN 0730-0301. <http://doi.acm.org/10.1145/566654.566612>.
- [WRG<sup>+</sup>09] Jiaping Wang, Peiran Ren, Minmin Gong, John Snyder und Baining Guo: *All-Frequency Rendering of Dynamic, Spatially-Varying Reflectance*. ACM Trans. Graph., 28(5):1–10, 2009.
- [XCM<sup>+</sup>14] Kun Xu, Yan Pei Cao, Li Qian Ma, Zhao Dong, Rui Wang und Shi Min Hu: *A Practical Algorithm for Rendering Interreflections with All-frequency BRDFs*. ACM Trans. Graph., 33(1):10:1–10:16, 2014.



# Erklärung

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe, die wörtlich oder inhaltlich übernommenen Stellen als solche kenntlich gemacht und die Satzung des KIT zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis in der jeweils gültigen Fassung beachtet habe. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt und von dieser als Teil einer Prüfungsleistung angenommen.

Karlsruhe, den 1. Juni 2016

(Kai Westerkamp)