

Friedrich-Schiller-Universität Jena
Physikalisch-Astronomische Fakultät
Theoretisch-Physikalisches Institut

Generierung von Irradiance Maps

Bachelorarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Bachelor of Science (B.Sc.)
betreut durch Dr. Carsten Lojewski und Prof. Reinhard Meinel

vorgelegt von Markus Pawellek
Matrikelnummer: 144645
geboren am 7.Mai 1995 in Meiningen

Erstgutachter/-in:
Zweitgutachter/-in:

Jena, 16.Juni 2017

Inhaltsverzeichnis

1	Grundlagen und Methoden	1
1.1	Szenengeometrie	1
1.2	Streuung von Licht an Oberflächen	3
1.3	Beleuchtung und Szene	4
1.4	Raytracing	6
1.5	Radiometrie	8
1.6	Rendergleichung	9
2	Schätzung der Irradianz	11
2.1	Analyse von Materialien	11
2.2	Lambertsche diffuse Materialien und die Rendergleichung	12
2.3	Irradiance Map und Irradiance Cache	14
2.4	Fehlerabschätzung der Irradianz	15

Abbildungsverzeichnis

1	Die Bilder zeigen die gerenderte »Dragon«-Szene. Das rechte Bild entspricht dem roten Bereich des Linken. In dieser Szene werden die Normalen des Objektmodells durch die analytischen Normalen der Dreiecke angenähert. Da das Modell sehr fein trianguliert ist, fällt dies im ersten Bild nicht auf. Zoomt man jedoch mit der Kamera heran werden die Fehler durch die Approximation deutlich und die einzelnen Dreiecke sind mit dem menschlichen Auge auszumachen.	2
2	Die erste Skizze auf der linken Seite zeigt den Verlauf einer Vertex-Shading-Normalen ν anhand eines Beispiels. A und B sind dabei zwei Eckpunkte eines Dreiecks \triangle . μ_A und μ_B sind die jeweilig gegebenen Vertex-Normalen an den Eckpunkten. Im rechten Bereich der Abbildung ist die durch ν approximierte gekrümmte Fläche $\tilde{\Delta}$, auf der die Shading-Normale ν senkrecht steht, eingezeichnet.	2
3	Die Abbildung zeigt die Verteilung des reflektierten Lichtes für alle $\omega \in \mathcal{H}_\mu^2$ bezüglich einer konstanten Einfallssrichtung $\omega_i \in \mathcal{H}_\mu^2$ einer BSDF f bezüglich der Oberflächen-normalen $\mu \in \mathcal{S}^2$	4
4	Die Darstellung zeigt, dass die Beleuchtung zweier Punkte x_1 und x_2 einer Oberfläche S mit den Normalen $\nu(x_1)$ und $\nu(x_2)$ durch eine Umgebungsbeleuchtung f nur abhängig von der Verdeckung der Punkte und nicht von deren Position ist. Bei x_1 und x_2 sind in diesem Falle die gleichen Lichtintensitäten zu messen. Es ist $\lambda \in (0, \infty)$ die Wellenlänge des Lichtes und $\omega \in \mathcal{S}^2$ der Raumwinkel.	5
5	Die Abbildung zeigt eine Skizze, welche das Sichtbarkeitsproblem und den Raytracing-Algorithmus verdeutlicht. Die grau melierten Dreiecke sollen die gegebene Mesh \mathcal{T} darstellen. Der ausgesendete Strahl r , gegeben durch (r_o, r_d) , trifft in der Mesh genau zwei Punkte x_1 und x_2 . Dabei wird x_2 durch x_1 verdeckt. Es gilt also $V_{\mathcal{T}}(r_o, x_1) = 1$ und $V_{\mathcal{T}}(r_o, x_2) = 0$	6
6	In der Skizze ist ein typisches Render-Verfahren auf der Basis des Raytracing-Algorithmus dargestellt. Bezuglich eines Beobachtungspunktes $o \in \mathbb{R}^3$ wird durch jeden Pixel eines virtuellen Bildschirms VS ein Strahl geschossen und der Wert der Raytracing-Funktion evaluiert. Die grau melierten Dreiecke bilden die Mesh \mathcal{T} . Je nachdem, ob ein Strahl einen Schnittpunkt mit \mathcal{T} aufweist, wird ein entsprechendes Shading-Verfahren ausgeführt. Der Übersicht wegen sind im Bild nur vier der eigentlich acht Strahlen sichtbar.	7
7	Die Skizze stellt das qualitative Beispiel einer spektralen Strahldichte \mathcal{L} dar, die an einem Punkt x auf der Oberfläche ∂K mit der äußeren Normalen μ und für eine Wellenlänge λ eine Verteilung in Abhängigkeit von $\omega \in \mathcal{S}^2$ besitzt.	8
8	Die Abbildung skizziert an einem Beispiel die Relation der Funktionen L und \tilde{L} aus der Definition der Rendergleichung. Dabei stellen das Dreieck einen Teil der Mesh, U die Umgebungsbeleuchtung für $\omega \in \mathcal{S}^2$, ω_1, ω_2 Raumrichtungen, λ die betrachtete Wellenlänge und x einen Punkt auf der Mesh dar. Für \tilde{x} gilt nach Defintion $\tilde{x} = r(rt_{\mathcal{T}}(r))$, wobei der Strahl r durch (x, ω_2) gegeben ist. Der Strahl in Richtung ω_1 besitzt keinen Schnittpunkt mit der Szene, wodurch sich die einfallende Strahldichte aus der Umgebungsbeleuchtung ergibt.	10
9	Die Abbildung stellt eine durch Path Tracing simulierte Lösung der Rendergleichung für die »Audi R8«-Szene dar. Die Lichtquelle besteht hier alleine aus der Umgebungsbeleuchtung. Für die BSDFs ist immer eine Mischung aus idealer Reflexion, lambertsch diffuser Reflexion und idealer Brechung gewählt worden.	10

- 10 Die Bilder zeigen die gerenderte »Shaderball«-Szene, beleuchtet durch eine direktionale Lichtquelle. Im linken Bild wurde die Strahldichte der Szene nur durch direkte Beleuchtung ohne die Verwendung einer entsprechenden BSDF berechnet. Im rechten Bild wurde für jedes Material eine lambertsch diffuse Reflexion angenommen. Die Szene wirkt hier wesentlich plastischer und realistischer als im linken Bild. 13
- 11 Die Bilder zeigen die gerenderte »Shaderball«-Szene, beleuchtet durch eine Umgebungsbeleuchtung. Im linken Bild bestehen die verwendeten BSDFs nur aus der lambertsch diffusen Reflexion. Im rechten Bild wurde das Material der äußeren Körpers zusätzlich mit der BSDF einer idealen Reflexion kombiniert. Das entstehende Material ist kein idealer Spiegel, aber auch kein idealer diffuser Strahler. 13
- 12 Die Bilder zeigen die gerenderte »Sponza«-Szene, deren Materialien aus Lambertschen Strahlern bestehen und deren Umgebungsbeleuchtung eine konstante Funktion ist. Für das linke Bild wurde an jedem sichtbaren Punkt der Szene die Irradianz durch 16 Messungen ermittelt. Das Resultat beinhaltet noch einen großen Anteil des Rauschens. Im rechten Bild wurden jeweils 1024 Messungen durchgeführt, wodurch es wesentlich rauschärmer als das Linke ist. 15
- 13 Die Abbildung zeigt eine beispielhafte Menge von Dreiecken $\left\{ \Delta^{(i)} \mid i \in \mathbb{N}, i \leq 7 \right\}$. Verschiedene Gruppen von Dreiecken bilden eine Approximation einer Oberfläche im Raum. Dabei werden die Eckpunkte der Dreiecke geteilt und es gilt zum Beispiel $\Delta_B^{(1)} = \Delta_A^{(3)}$ und $\Delta_C^{(1)} = \Delta_C^{(3)}$ 16

Symboltabelle

Symbol	Definition
\mathbb{N}	Menge der natürlichen Zahlen (Null nich eingeschlossen)
\mathbb{R}	Menge der reellen Zahlen
$\overline{\mathbb{R}}$	$\mathbb{R} \cup \{-\infty, \infty\}$
(a, b)	$\{x \in \mathbb{R} \mid a < x < b\}$ mit $a, b \in \overline{\mathbb{R}}$
$[a, b]$	$\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x \leq b\}$ mit $a, b \in \overline{\mathbb{R}}$
$[a, b)$	$\{x \in \mathbb{R} \mid a \leq x < b\}$ mit $a, b \in \overline{\mathbb{R}}$
$(a, b]$	$\{x \in \mathbb{R} \mid a < x \leq b\}$ mit $a, b \in \overline{\mathbb{R}}$
$\langle x, y \rangle$	$\sum_{i=1}^n x_i y_i$ mit $x, y \in \mathbb{R}^n$ für $n \in \mathbb{N}$
$\ x\ $	$\sqrt{\langle x, x \rangle}$ mit $x \in \mathbb{R}^n$ für $n \in \mathbb{N}$
\mathcal{S}^2	$\{x \in \mathbb{R}^3 \mid \ x\ = 1\}$
\mathcal{H}_μ^2	$\{x \in \mathcal{S}^2 \mid \langle \mu, x \rangle \geq 0\}$ mit $\mu \in \mathcal{S}^2$
$\text{im } f$	$\{f(x) \mid x \in X\} \subset Y$ mit der Abbildung $f: X \rightarrow Y$ und Mengen X, Y

1 Grundlagen und Methoden

In den folgenden Kapiteln wird eine grundlegende Einführung und Definition der Verfahren gegeben, die für den weiteren Verlauf dieser Arbeit von Belang sind. Viele dieser Themen können hier nur angezissen werden, da ihre komplette Behandlung den Rahmen und das Ziel des Themas verfehlten würde. Für eine genauere Einführung in die einzelnen Themengebiete, wird dem Leser geraten sich mit den genannten Quellen auseinander zu setzen.

1.1 Szenengeometrie

Um in einem Computer ein zweidimensionales Bild einer dreidimensionalen Umwelt oder auch »Szene« (engl.: *scene*) zu generieren, benötigen wir ein mathematisches Modell, welches diese hinreichend gut beschreibt. Wir wollen uns einen Beobachter vorstellen, der die Umwelt und die Objekte in ihr von einem bestimmten Punkt im Raum aus betrachtet. Für viele Algorithmen, die diese Aufgabe lösen, ist dabei vor allem das Verhalten von Licht auf den Oberflächen dieser Objekte wichtig [11, 26, 30]. Der Einfachheit halber wollen wir davon ausgehen, dass Licht nur in den oberen Schichten eines Körpers mit dessen Material wechselwirkt. Diese Annahme reduziert die Komplexität des mathematischen Modells, die dann noch aus der Charakterisierung der Oberflächen besteht.

Die Oberflächen realer physikalischer Körper sind im Allgemeinen beliebig geformt und können nicht in geschlossener Form durch eine Gleichung beschrieben werden. Dennoch lassen sie sich im analytischen Sinne durch einfache Hyperflächen (engl.: *shape* [26, S. 123 ff]) im Raum approximieren [12]. Für die Bildgenerierung wählt man für solch eine Fläche meist ein Dreieck. Es ist einfach zu beschreiben und flexibel genug um die meisten Objekte beliebig genau zu approximieren [2, 18]. Dabei wollen wir entartete Dreiecke, die nur aus einem Punkt oder einer Strecke bestehen, ausschließen, da sie für die betrachteten Render-Verfahren nicht darstellbar sind.

DEFINITION 1.1: (Dreieck)

Ein Dreieck Δ wird durch eine Sequenz (A, B, C) von Eckpunkten in \mathbb{R}^3 , für die die Menge $\{B - A, C - A\}$ linear unabhängig ist, charakterisiert. Seien weiterhin

$$M := \{(u, v) \in [0, 1]^2 \mid u + v \leq 1\}$$

$$\varphi: M \rightarrow \mathbb{R}^3, \quad \varphi(u, v) := (1 - u - v)A + uB + vC$$

Dann ist die Menge der Punkte S des Dreiecks gegeben durch im φ und (M, φ) stellt deren Standardparametrisierung dar. Der Notation wegen, identifizieren wir Δ mit S und definieren für alle $(u, v) \in M$

$$\Delta(u, v) := \varphi(u, v)$$

Die baryzentrischen Koordinaten (u, v, w) eines Punktes $x \in \Delta$ sind weiterhin durch die folgenden Eigenschaften gegeben.

$$(u, v) \in M, \quad w = 1 - u - v, \quad \Delta(u, v) = x$$

Die analytische äußere Normale oder auch Normale ist definiert durch

$$\mu := \frac{(B - A) \times (C - A)}{\|(B - A) \times (C - A)\|}$$

Jedes Dreieck besitzt auf seiner gesamten Fläche eine eindeutige konstante äußere analytische Normale. Für die Simulation von globalen Beleuchtungseffekten ist diese Eigenschaft jedoch ein Nachteil, weil die Beleuchtung eines Objektes stark vom Verlauf seiner Normalen abhängt. Nähern wir ein

Objekt durch $n \in \mathbb{N}$ Dreiecke an, so nähern wir auch den Normalenverlauf des Objektes durch die stückweise konstanten Normalen der Dreiecke an. Der Fehler dieser Approximation tritt in Form eines facettenhaften Musters auf, welcher für das menschliche Auge gut erkennbar ist [26, S. 166]. In Abbildung 1 wird dieser Effekt genauer an einem Beispiel demonstriert. Folglich muss darauf geachtet werden, dass bei stetig differenzierbaren Oberflächen, die Stetigkeit der Normalen erhalten bleibt [12, S. 39 ff].

DEFINITION 1.2: (Normalen-Funktion / Shading-Normale)

Sei Δ ein Dreieck mit der Normalen μ . Dann wird $\nu: \Delta \rightarrow \mathcal{H}_\mu^2$ als Normalen-Funktion oder auch Shading-Normale von Δ bezeichnet.

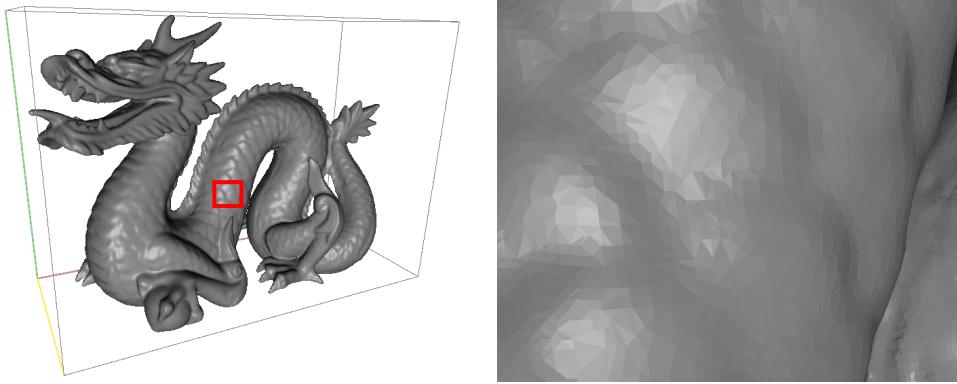


Abbildung 1: Die Bilder zeigen die gerenderte »Dragon«-Szene. Das rechte Bild entspricht dem roten Bereich des Linken. In dieser Szene werden die Normalen des Objektmodells durch die analytischen Normalen der Dreiecke angenähert. Da das Modell sehr fein trianguliert ist, fällt dies im ersten Bild nicht auf. Zoomt man jedoch mit der Kamera heran werden die Fehler durch die Approximation deutlich und die einzelnen Dreiecke sind mit dem menschlichen Auge auszumachen.

Nach [26, S. 166, 584 ff] und [1, S. 38 ff, 183 ff] sind die typischen Verfahren für eine genauere Interpolation die »Vertex-Shading-Normalen« und das »Bump Mapping« (engl.: *bump mapping*). Formal gesehen werden bei beiden Verfahren die Normalen der vorhandenen Geometrie durch eine Normalen-Funktion ersetzt.

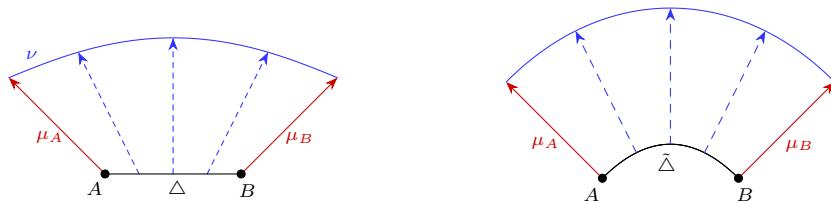


Abbildung 2: Die erste Skizze auf der linken Seite zeigt den Verlauf einer Vertex-Shading-Normalen ν anhand eines Beispiels. A und B sind dabei zwei Eckpunkte eines Dreiecks Δ . μ_A und μ_B sind die jeweilig gegebenen Vertex-Normalen an den Eckpunkten. Im rechten Bereich der Abbildung ist die durch ν approximierte gekrümmte Fläche $\tilde{\Delta}$, auf der die Shading-Normale ν senkrecht steht, eingezeichnet.

DEFINITION 1.3: (Vertex-Shading-Normale)

Seien Δ ein Dreieck mit der Normalen μ und $\mu_A, \mu_B, \mu_C \in \mathcal{H}_\mu^2$ Normalen an den Eckpunkten des Dreiecks. Sei weiterhin ν eine Shading-Normale auf Δ , sodass für alle

$x \in \Delta$ mit den baryzentrischen Koordinaten (u, v, w) gilt

$$\nu(x) := \frac{w\mu_A + u\mu_B + v\mu_C}{\|w\mu_A + u\mu_B + v\mu_C\|}$$

Dann ist ν stetig und man nennt es eine Vertex-Shading-Normale von Δ .

Durch das Setzen der Normalen an den Eckpunkten (engl.: *vertex*) eines Dreiecks können wir sicher gehen, dass der Verlauf der Normalen stetig von einem Dreieck zu einem anderen übergeht. Ein beispielhafter Verlauf einer Vertex-Shading-Normalen wird in Abbildung 2 gezeigt. Zu beachten ist, dass die Vektoren der Shading-Normale im Allgemeinen nicht mehr senkrecht auf der Geometrie stehen. Dadurch kann es, wie in [26, S. 574 ff] und [30, S. 150 ff] gezeigt, zu Artefakten bei der Generierung des Bildes kommen.

Der letzte Schritt zur vollständigen Beschreibung der Szenegeometrie, besteht darin, eine Menge von Dreiecken zu bilden, sodass diese ein physikalisches Objekt gut genug approximieren. In [26] und [2] werden solche Mengen auch »Meshes« (engl.: *triangle mesh*) genannt. Wir wollen hier eine unübliche Definition geben.

DEFINITION 1.4: (Mesh)

Seien $n \in \mathbb{N}$ und Dreiecke Δ_i mit Shading-Normalen ν_i für alle $i \in \mathbb{N}, i \leq n$. Weiterhin definieren wir

$$\mathcal{T} := \bigcup_{i=1}^n \Delta_i \quad \mathcal{A} := \{x \in \mathcal{T} \mid \exists! i \in \mathbb{N}, i \leq n: x \in \Delta_i\}$$

$$\nu: \mathcal{T} \rightarrow \mathcal{S}^2 \cup \{0\}, \quad \nu(x) := \sum_{i=1}^n \nu_i(x) \mathbf{1}_{\mathcal{A} \cap \Delta_i}(x)$$

Dann nennen wir \mathcal{T} eine Mesh mit Shading-Normaler ν , wenn für σ -fast-alle $x \in \mathcal{T}$ auch $x \in \mathcal{A}$ gilt.

Die Definition der Mesh verbietet, dass die Schnittpunkte der Dreiecke eine eigene Fläche im Raum bilden. So können wir sicher gehen, dass die Integration über die Punkte der Mesh eine eindeutige Lösung ergibt. Es ist jedoch erlaubt, dass sich Dreiecke in einem Punkt oder einer Strecke schneiden dürfen. Dies ist auch nötig, um komplexere Objekte formen zu können. In der Praxis ist die genannte Bedingung im Allgemeinen erfüllt und folglich auch keine fundamentale Einschränkung [2, 18, 26, 30].

1.2 Streuung von Licht an Oberflächen

Im letzten Abschnitt wurden die Grundbausteine einer Szene eingeführt, die deren Geometrie beschreiben. Wie bereits erwähnt, benötigen wir jedoch zusätzlich die Informationen, auf welche Art und Weise Licht mit den Oberflächen der Objekte interagiert. Dieses Verhalten wird durch die sogenannte »Bidirektionale Streuungsverteilungsfunktion« (engl.: *bidirectional scattering distribution function*, BSDF), die sich aus einer »Bidirektionalen Reflektanzverteilungsfunktion« (engl.: *bidirectional reflectance distribution function*, BRDF) und einer »Bidirektionalen Transmissionsverteilungsfunktion« (engl.: *bidirectional transmittance distribution function*, BTDF) zusammensetzt, geklärt. Strukturierte Einführungen zu diesem Thema erhält man in [1, 4, 20, 26, 30].

DEFINITION 1.5:

Sei $\mu \in \mathcal{S}^2$ die Normale am Punkt einer Oberfläche. Dann ist eine BSDF bezüglich

μ gegeben durch eine integrierbare Abbildung $f: \mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$ mit den folgenden Eigenschaften.

(i) Für σ^2 -fast-alle (ω_i, ω_o) mit $\omega_i \in \mathcal{S}^2$, $\omega_o \in \mathcal{H}_\nu^2$ und $\nu := \text{sgn}(\langle \mu, \omega_i \rangle) \cdot \mu$ gilt

$$f(\omega_i, \omega_o) = f(\omega_o, \omega_i) \quad (\text{Helmholtz-Reziprozität})$$

(ii) Für σ -fast-alle $\omega_i \in \mathcal{S}^2$ gilt

$$\int_{\mathcal{S}^2} f(\omega_i, \omega) |\langle \mu, \omega \rangle| d\sigma(\omega) \leq 1 \quad (\text{Energieerhaltung})$$

Eine BSDF f gibt an, welcher Anteil des einfallenden Lichtes aus der Richtung $\omega_i \in \mathcal{S}^2$ in die Richtung $\omega_o \in \mathcal{S}^2$ gestreut wird. Gilt dabei $\omega_o \in \mathcal{H}_\nu^2$, so befindet sich ω_o in der gleichen Hemisphere bezüglich μ wie ω_i und es handelt sich um eine Reflexion des Lichtes. Der verbleibende Fall beschreibt die Transmission. Die BSDF stellt damit eine Verallgemeinerung der idealen Reflexion und Brechung an Oberflächen dar. [26, S. 571 ff] und [30, S. 135 ff] weisen zudem nach, dass die Helmholtz-Reziprozität nur für den reflektierten Anteil des Lichtes gilt. In Abbildung 3 ist das Beispiel einer typischen BSDF gezeigt, die keine Transmission des Lichtes zulässt [26, S. 509 ff].

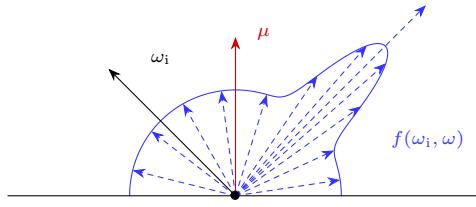


Abbildung 3: Die Abbildung zeigt die Verteilung des reflektierten Lichtes für alle $\omega \in \mathcal{H}_\mu^2$ bezüglich einer konstanten Einfallsrichtung $\omega_i \in \mathcal{H}_\mu^2$ einer BSDF f bezüglich der Oberflächennormalen $\mu \in \mathcal{S}^2$.

Die hier eingeführten Funktionen für die Charakterisierung von Materialien können auf verschiedene Weisen verallgemeinert werden. Zu beachten ist vor allem die fehlende Abhängigkeit von der Wellenlänge des einfallenden und des gestreuten Lichtes, welche Effekte wie Dispersion, Irisieren und Lumineszenz verhindert. Eine weiteres physikalisches Phänomen stellt die Volumenstreuung dar. Bei der Betrachtung dieser wird ein Material durch die sogenannte »BSSRDF« beschrieben [26, S. 671 ff].

BSDFs sind im Allgemeinen nicht in geschlossener Form notierbar [26, S. 507 ff]. Aus diesem Grund wollen wir für die Konstruktion realistischer Materialien wie bei der Approximation von Oberflächen verschiedene einfache BSDFs zu Grunde legen. In den beiden folgenden Beispielen handelt es sich um die BSDFs f bezüglich der Normalen $\mu \in \mathcal{S}^2$ für die lambertsche diffuse Reflexion (engl.: *lambertian reflection*, [26, S. 531 ff]) und für die ideale Reflexion (engl.: *specular reflection*, [30, S. 144 ff]). Weitere BSDF-Modelle sind in [4, 26, 30] zu finden. Es seien $\omega_i, \omega_o \in \mathcal{S}^2$ mit $\nu := \text{sgn}(\langle \mu, \omega_i \rangle) \cdot \mu$ gegeben.

$$f(\omega_i, \omega_o) = \frac{1}{\pi} \mathbb{1}_{\mathcal{H}_\nu^2}(\omega_o) \quad (\text{lambertsche diffuse Reflexion})$$

$$f(\omega_i, \omega_o) = \frac{\delta_{\omega_o}(2 \langle \mu, \omega_i \rangle \mu - \omega_i)}{|\langle \mu, \omega_i \rangle|} \quad (\text{ideale Reflexion})$$

1.3 Beleuchtung und Szene

Die BSDF an einem Punkt beschreibt lediglich die Streuung des einfallenden Lichtes. Um den Render-Verfahren einen Sinn zu geben, benötigen wir demnach Lichtquellen. In [26, S. 707 ff] und [10] werden verschiedene Arten von Lichtquellen definiert, implementiert und gesampled. Der einfachste Weg

Lichtquellen einzuführen, besteht in einer abstrakten Formulierung, die unabhängig von der Szenengeometrie agiert. Wir wollen eine sogenannte »Umgebungsbeleuchtung« (engl.: *hdr environment map* oder *infinite area light*, [26, S. 737 ff]) einführen.

DEFINITION 1.6: (Umgebungsbeleuchtung)

Eine Umgebungsbeleuchtung ist definiert als eine integrierbare Abbildung $f: (0, \infty) \times \mathbb{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$.

Diese Funktion beschreibt das Licht verschiedener Wellenlängen, welches von einer Kugeloberfläche mit quasi unendlich großem Radius in die Szene ausgesandt wird. Für einen Punkt der Szene, ist dessen Beleuchtung durch diese Funktion also unabhängig von dessen Position. Diese Tatsache wird in Abbildung 4 wieder an einem Beispiel gezeigt.

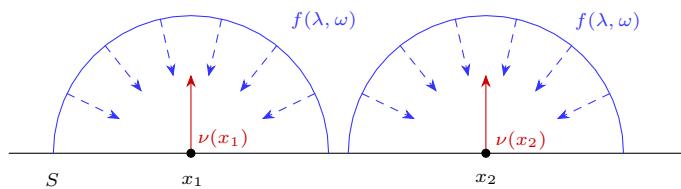


Abbildung 4: Die Darstellung zeigt, dass die Beleuchtung zweier Punkte x_1 und x_2 einer Oberfläche S mit den Normalen $\nu(x_1)$ und $\nu(x_2)$ durch eine Umgebungsbeleuchtung f nur abhängig von der Verdeckung der Punkte und nicht von deren Position ist. Bei x_1 und x_2 sind in diesem Falle die gleichen Lichtintensitäten zu messen. Es ist $\lambda \in (0, \infty)$ die Wellenlänge des Lichtes und $\omega \in \mathbb{S}^2$ der Raumwinkel.

Aber auch die Materialien der Szene sollten in der Lage sein Licht auszusenden. Wir führen hierfür eine Abbildung ein, die die dafür nötigen Eigenschaften erfüllt. Häufig werden diese Lichtquellen auch »Feldlichtquellen« (engl.: *area light*) genannt [26, S. 733 ff].

DEFINITION 1.7: (Emission)

Sei \mathcal{T} eine Mesh mit einer Shading-Normalen ν . Dann ist eine Emission von \mathcal{T} durch eine integrierbare Abbildung $E: \mathcal{T} \times (0, \infty) \times \mathbb{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$ gegeben.

Wie bei der vorherigen Definition beschreibt diese Funktion das ausgesandte Licht in Abhängigkeit der Wellenlänge und des Raumwinkels. Der Unterschied besteht darin, dass sie auf der Oberfläche einer Mesh variieren kann und sich damit auch die Beleuchtung eines Punktes je nach Position verändert.

Durch die Einführung der Lichtquellen erhalten wir nun die vollständige Beschreibung einer Szene durch Zusammenführung der bereits definierten Strukturen.

DEFINITION 1.8: (Szene)

Eine Szene ist ein Tupel $(\mathcal{T}, \nu, f, E, U)$ bestehend aus einer Mesh \mathcal{T} mit einer Shading-Normalen ν , einer integrierbaren Abbildung $f: \mathcal{T} \times \mathbb{S}^2 \times \mathbb{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$, wobei $f(x, \cdot, \cdot)$ für σ -fast-alle $x \in \mathcal{T}$ ein BSDF bezüglich $\nu(x)$ darstellt, einer Emission E von \mathcal{T} und einer Umgebungsbeleuchtung U .

1.4 Raytracing

Im einfachsten Falle bezeichnet das Wort »Raytracing« (engl.: *ray tracing*) einen Algorithmus zur Ermittlung der Sichtbarkeit von dreidimensionalen Objekten bezüglich eines Ursprungspunktes (engl.: *origin*) im Raum [24, 26]. Häufig versteht man darunter jedoch auch eine Render-Technik für die Generierung eines gesamten Bildes aus einer gegebenen Szene, die auf dem eben genannten Raytracing-Algorithmus basiert [21, 24, 26].

Grundsätzlich gibt es viele Verfahren, um ein Szene auf ein Bild zu rendern [1, 5]. Die Erfahrung zeigt aber, dass vor allem in Bereichen, in denen die globalen Beleuchtungseffekte realistisch simuliert werden sollen, Raytracing eine wichtige Grundlage darstellt. Der Grund dafür besteht in der Tatsache, dass Raytracing das »Sichtbarkeitsproblem« (engl.: *visibility problem*, [5, 6]) löst und durch die Verwendung von Strahlen eine Basis für die Lichtberechnung im Sinne der geometrischen Optik bereitstellt [24, 26, 30].

DEFINITION 1.9: (Sichtbarkeitsproblem)

Sei \mathcal{T} eine Mesh. Dann ist die Sichtbarkeitsfunktion von \mathcal{T} die folgende Abbildung.

$$V_{\mathcal{T}}: \mathbb{R}^3 \times \mathcal{T} \rightarrow \{0, 1\}$$

$$V_{\mathcal{T}}(o, x) = \begin{cases} 1 & : \mathcal{T} \cap \{(1 - \gamma)o + \gamma x \mid \gamma \in (0, 1)\} = \emptyset \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

Das Sichtbarkeitsproblem beschreibt die Aufgabe diese Funktion für gegebene Parameter zu evaluieren.

Die Sichtbarkeitsfunktion gibt an, ob der Oberflächenpunkt x vom Beobachtungspunkt o aus in gerader Linie gesehen werden kann oder ob zwischen diesen Punkten ein weiterer Punkt der Mesh \mathcal{T} den Punkt x verdeckt [6, S. 30]. Daran anknüpfend besteht die Basis des Raytracing-Verfahrens auf dem Aussenden von »Strahlen« (engl.: *ray*) bezüglich eines Ursprungspunktes [21, 24, 26]. Für diese Strahlen kann der Schnittpunkt mit \mathcal{T} ermittelt werden. Liegt der Schnittpunkt zwischen o und x , so beträgt der Wert der Sichtbarkeitsfunktion 0. Im noch bleibenden Fall ergibt sich der Wert zu 1. Die Sichtbarkeitsfunktion kann somit für alle gegebenen Parameter durch Raytracing berechnet werden. Abbildung 5 zeigt diese Methode anhand einer Skizze.

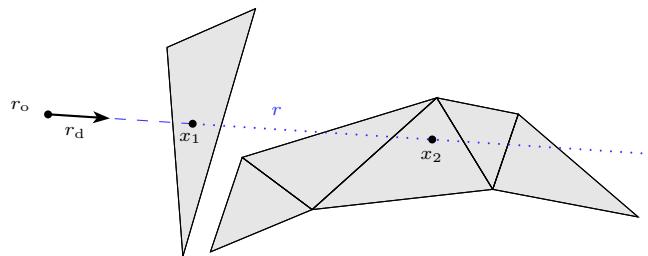


Abbildung 5: Die Abbildung zeigt eine Skizze, welche das Sichtbarkeitsproblem und den Raytracing-Algorithmus verdeutlicht. Die grau melierten Dreiecke sollen die gegebene Mesh \mathcal{T} darstellen. Der ausgesendete Strahl r , gegeben durch (r_o, r_d) , trifft in der Mesh genau zwei Punkte x_1 und x_2 . Dabei wird x_2 durch x_1 verdeckt. Es gilt also $V_{\mathcal{T}}(r_o, x_1) = 1$ und $V_{\mathcal{T}}(r_o, x_2) = 0$.

DEFINITION 1.10: (Strahl)

Seien ein Ursprung $o \in \mathbb{R}^3$, eine Richtung $d \in \mathbb{S}^2$ und die folgende Abbildung gegeben.

$$\varphi: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}^3, \quad \varphi(\gamma) := o + \gamma d$$

Dann wird das Bild im φ ein Strahl r genannt. Dabei ist $([0, \infty), \varphi)$ die Standardparametrisierung von r . Der Notation wegen, definieren wir für alle $\gamma \in [0, \infty)$

$$r(\gamma) := \varphi(\gamma)$$

Durch das Tupel (o, d) charakterisieren und identifizieren wir den Strahl r . Die Menge aller Strahlen definieren wir als \mathcal{R} .

Die vollständige Evaluierung von $V_{\mathcal{T}}$ ist jedoch häufig nicht notwendig. In Abbildung 5 ist klar, dass alle Punkte von r , die hinter x_1 liegen von dem Beobachtungspunkt r_o aus nicht sichtbar sind. Beim eigentlichen Raytracing-Algorithmus wirkt sich diese Eigenschaft positiv aus. Es reicht für eine gegebene Richtung und einen gegebenen Beobachtungspunkt den nächsten Schnittpunkt des resultierenden Strahles zu ermitteln. Für alle weiteren Schnittpunkte, sofern diese existieren, ergibt sich die Sichtbarkeitsfunktion zu Null, wodurch sie für das weitere Vorgehen ignoriert werden können [26, S. 4 ff, 866].

DEFINITION 1.11: (Raytracing-Funktion)

Sei \mathcal{T} eine Mesh. Dann ist die Raytracing-Funktion von \mathcal{T} durch die folgende Abbildung gegeben.

$$rt_{\mathcal{T}}: \mathcal{R} \rightarrow (0, \infty]$$

$$rt_{\mathcal{T}}(r) := \begin{cases} \min \{\gamma \in (0, \infty) \mid r(\gamma) \in \mathcal{T}\} & : \mathcal{T} \cap (r \setminus \{r(0)\}) \neq \emptyset \\ \infty & : \text{sonst} \end{cases}$$

Wie bereits erwähnt, erweitert man diesen Algorithmus häufig mit der Berechnung eines gesamten Bildes, indem man für jeden Pixel des Bildes einen oder mehrere Strahlen durch einen analogen virtuellen Pixel im Szenenraum schießt und die Raytracing-Funktion für diese evaluiert [21, 24, 26]. Abbildung 6 zeigt dieses Verfahren anhand einer Skizze. Um gleichzeitig das sogenannte »Sha-

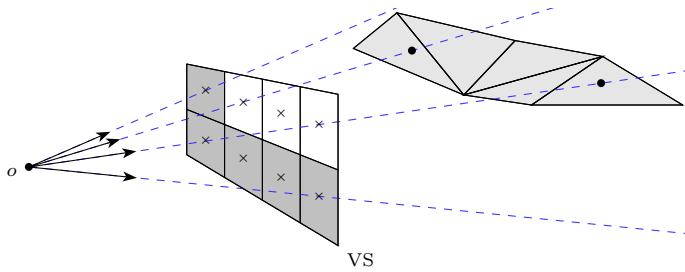


Abbildung 6: In der Skizze ist ein typisches Render-Verfahren auf der Basis des Raytracing-Algorithmus dargestellt. Bezüglich eines Beobachtungspunktes $o \in \mathbb{R}^3$ wird durch jeden Pixel eines virtuellen Bildschirms VS ein Strahl geschossen und der Wert der Raytracing-Funktion evaluiert. Die grau melierten Dreiecke bilden die Mesh \mathcal{T} . Je nachdem, ob ein Strahl einen Schnittpunkt mit \mathcal{T} aufweist, wird ein entsprechendes Shading-Verfahren ausgeführt. Der Übersicht wegen sind im Bild nur vier der eigentlich acht Strahlen sichtbar.

ding« zu ermöglichen, ermittelt man nicht nur den Schnittpunkt, sondern auch in welchem Dreieck sich dieser befindet und welche baryzentrischen Koordinaten er besitzt [17, 26]. Die Implementierung des Raytracing-Verfahrens soll hier nicht gezeigt werden, da eine einfache Implementierung einen zu

großen Rechenaufwand darstellt und die hier verwendete optimierte Variante weit über das Thema dieser Arbeit hinausgeht. Für eine strukturierte Einführung von Beschleunigungsstrukturen sei auf [26, S. 247 ff] und [21, 24] verwiesen.

1.5 Radiometrie

Ein physikalischer Körper K mit der Oberfläche ∂K und äußerer Normalen-Funktion μ sendet aufgrund verschiedener physikalischer Effekte, wie zum Beispiel Reflexion oder Emission, elektromagnetische Wellen aus [22]. Für die Simulation von Beleuchtungseffekten ist es nötig die Abhängigkeit dieser Abstrahlung für verschiedene Wellenlängen $\lambda \in (0, \infty)$, verschiedene Oberflächenpunkte $x \in \partial K$ und verschiedene Richtungen $\omega \in \mathbb{S}^2$ zu betrachten. Dafür führen wir die sogenannte »spektrale Strahldichte« (engl.: *spectral radiance*) ein. Sie gibt an, wie viel Energie pro Zeit, pro Wellenlängenänderung, pro Flächenelement und pro Raumwinkel abgestrahlt beziehungsweise empfangen wird [16, 23, 35]. Sind also messbare Teilmengen $\Lambda \subset (0, \infty)$, $U \subset \partial K$ und $S \subset \mathbb{S}^2$ gegeben, so kann man die spektrale Strahldichte über die abgegebene Strahlungsleistung $\Phi(U, \Lambda, S)$ der Oberfläche U in den Raumwinkelbereich S definieren [35]. Die zugehörige Abbildung ist dann wie folgt gegeben.

$$\mathcal{L}: \partial K \times (0, \infty) \times \mathbb{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$$

$$\Phi(U, \Lambda, S) =: \int_U \int_{\Lambda} \int_S \mathcal{L}(x, \lambda, \omega) |\langle \mu(x), \omega \rangle| d\sigma(\omega) d\lambda(\lambda) d\sigma(x)$$

Abbildung 7 zeigt eine Skizze, welche die Struktur dieser Abbildung verdeutlicht. Der Erfahrung nach stellt die spektrale Strahldichte für das menschliche Auge die sinnvollste messbare Größe für die empfundene Helligkeit einer Oberfläche bezüglich eines Beobachtungspunktes dar [16, 23].

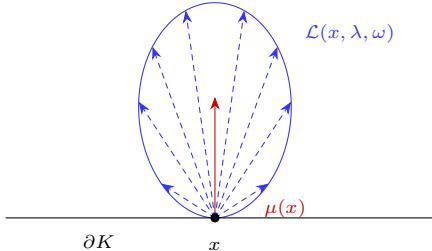


Abbildung 7: Die Skizze stellt das qualitative Beispiel einer spektralen Strahldichte \mathcal{L} dar, die an einem Punkt x auf der Oberfläche ∂K mit der äußeren Normalen μ und für eine Wellenlänge λ eine Verteilung in Abhängigkeit von $\omega \in \mathbb{S}^2$ besitzt.

Eine weitere Größe, die wir hier einführen möchten, ist die sogenannte »Bestrahlungsstärke« oder auch spektrale Irradianz (engl.: *spectral irradiance*). Sie wird vor allem bei der noch folgenden Konstruktion der Irradianz Maps benötigt werden. Wir definieren sie für eine messbare Teilmenge $S \subset \mathbb{S}^2$ [9, S. 9 f].

$$\mathcal{E}: \partial K \times (0, \infty) \rightarrow [0, \infty), \quad \mathcal{E}(x, \lambda) := \int_S \mathcal{L}(x, \lambda, \omega) |\langle \mu(x), \omega \rangle| d\sigma(\omega)$$

Die spektrale Bestrahlungsstärke quantifiziert die Energie pro Zeit, pro Wellenlängenänderung und pro Flächenelement, die an einem Punkt auf der Oberfläche des Objektes aus dem Raumwinkelbereich S empfangen wird [9, 35].

Für die weiteren Algorithmen und Implementierungen reicht es entkoppelte Abbildungen zu betrachten, welche für jeden Punkt einer Szene und jede gegebene Richtung der Strahldichte beziehungsweise der Irradianz entsprechen. Später werden dies die Funktionen sein, die wir durch »Path Tracing« simulieren und durch geeignetes »Surface Caching« zwischenspeichern wollen.

DEFINITION 1.12: (Strahldichte und Irradianz)

Sei $\Sigma := (\mathcal{T}, \nu, f, E, U)$ eine Szene. Dann ist eine Strahldichte von Σ gegeben durch eine integrierbare Abbildung

$$L: \mathcal{T} \times (0, \infty) \times \mathcal{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$$

Die zu L gehörige Irradianz definieren wir durch die folgende Funktion.

$$E: \mathcal{T} \times (0, \infty) \rightarrow [0, \infty), \quad E(x, \lambda) := \int_{\mathcal{H}_{\nu(x)}^2} L(x, \lambda, \omega) \langle \mu(x), \omega \rangle \, d\sigma(\omega)$$

1.6 Rendergleichung

Die »Rendergleichung« (engl.: *rendering equation* oder *light transport equation*, [26, S. 861]) ist eine Integralgleichung, die 1986 von James T. Kajiya entwickelt wurde, um die bis zu diesem Zeitpunkt verbreiteten Rendertechniken für die Simulation globaler Beleuchtungseffekte auf eine gemeinsame Basis zu stellen [11]. In [11], [26, S. 349 ff, 862 ff] und [30] wird sie mithilfe der Prinzipien der geometrischen Optik und dem Energieerhaltungssatz hergeleitet. [30] stellt dabei die resultierende Gleichung zusätzlich in einer Operator-Formulierung dar. Insbesondere handelt es sich bei der Rendergleichung um eine Fredholm-Integralgleichung 2. Art, die unter gewissen Voraussetzungen eine eindeutige Lösung besitzt (siehe hierzu [30, S. 103 ff] und [27]).

DEFINITION 1.13:

Seien $\Sigma := (\mathcal{T}, \nu, f, E, U)$ eine Szene und L eine Strahldichte von Σ . Dann gehorcht L der Rendergleichung, wenn für alle $x \in \mathcal{T}$, $\lambda \in (0, \infty)$ und $\omega_o \in \mathcal{S}^2$ das Folgende gilt.

$$L(x, \lambda, \omega_o) = E(x, \lambda, \omega_o) + \int_{\mathcal{S}^2} f(x, \omega, \omega_o) \tilde{L}(x, \lambda, \omega) |\langle \nu(x), \omega \rangle| \, d\sigma(\omega)$$

$$\tilde{L}(x, \lambda, \omega) := \begin{cases} L(r(\text{rt}_{\mathcal{T}}(r)), \lambda, -\omega) & : r \in \mathcal{R}, r \equiv (x, \omega), \text{rt}_{\mathcal{T}}(r) < \infty \\ U(\lambda, \omega) & : \text{sonst} \end{cases}$$

In der Definition entspricht $\tilde{L}(x, \lambda, \omega)$ der aus ω einfallenden Strahldichte am Punkt x der Wellenlänge λ . Die Funktionen \tilde{L} und L sind über die Raytracing-Funktion miteinander verbunden. Existiert jedoch für den gegebenen Strahl r kein Schnittpunkt mit der Szene, so entspricht die einfallende Strahldichte gerade der Umgebungsbeleuchtung. In Abbildung 8 wird dieser Zusammenhang an einem Beispiel demonstriert. Die Strahldichte in Richtung ω entspricht damit der Summe des emittierten und des gestreuten Lichtes am Punkt x .

Gehorcht die Strahldichte einer Szene der Rendergleichung, so simuliert sie die globalen Beleuchtungseffekte dieser Szene auf einer physikalischen Basis, wodurch die entstehenden Lichtverhältnisse für das menschliche Auge real wirken [11, 26, 30]. Die Rendergleichung lässt sich aber im Allgemeinen nicht analytisch lösen [11, 26, 30]. Aus diesem Grund sind verschiedene numerische Lösungsmethoden für die Berechnung einer Strahldichte, die der Rendergleichung gehorcht, entwickelt worden. Die berühmtesten Beispiele stellen das »Path Tracing« [11], das »Bidirectional Path Tracing« [13], der »Metropolis Light Transport« [31] und das »Photon Mapping« [10] dar. Eine strukturierte Einführung zu diesen Verfahren gibt es auch hier in [26]. Das Beispiel für eine durch Path Tracing erzeugte Lösung ist in Abbildung 9 zu sehen.

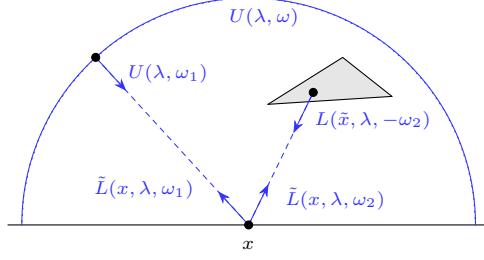


Abbildung 8: Die Abbildung skizziert an einem Beispiel die Relation der Funktionen L und \tilde{L} aus der Definition der Rendergleichung. Dabei stellen das Dreieck einen Teil der Mesh, U die Umgebungsbeleuchtung für $\omega \in S^2$, ω_1, ω_2 Raumrichtungen, λ die betrachtete Wellenlänge und x einen Punkt auf der Mesh dar. Für \tilde{x} gilt nach Defintion $\tilde{x} = r(rt_T(r))$, wobei der Strahl r durch (x, ω_2) gegeben ist. Der Strahl in Richtung ω_1 besitzt keinen Schnittpunkt mit der Szene, wodurch sich die einfallende Strahldichte aus der Umgebungsbeleuchtung ergibt.



Abbildung 9: Die Abbildung stellt eine durch Path Tracing simulierte Lösung der Rendergleichung für die »Audi R8«-Szene dar. Die Lichtquelle besteht hier alleine aus der Umgebungsbeleuchtung. Für die BSDFs ist immer eine Mischung aus idealer Reflexion, lambertsch diffuser Reflexion und idealer Brechung gewählt worden.

Alle genannten Verfahren arbeiten auf der Basis von Zufallszahlen. Da die Rendergleichung eine mehrdimensionale Integralgleichung ist, bietet sich die Verwendung verschiedener »Monte-Carlo-Methoden« an [19]. Für uns bedeutet diese Tatsache, dass es sich bei der Abfrage der Strahldichte für diese numerischen Verfahren um die Realisierung einer Zufallsvariable handelt, deren Erwartungswert im besten Falle der der wahren Strahldichte entspricht. Eine detailliertere Betrachtung dieser Eigenschaft wird in den weiteren Kapiteln folgen. Für die Konstruktion der Irradiance Maps ist es im Grunde genommen unwichtig, welcher Algorithmus verwendet wird, sofern er in der Lage ist die Strahldichte für gegebene Parameter zu evaluieren. Wir verwenden hier einen einfachen Path Tracing Algorithmus.

2 Schätzung der Irradianz

2.1 Analyse von Materialien

Wie bereits in Abschnitt 1.2 erwähnt, ist es im Allgemeinen nicht möglich, die BSDF eines Materials in geschlossener Form anzugeben. Es gibt jedoch verschiedene Verfahren um einfache BSDF-Modelle zu konstruieren, die in der Simulation der Strahldichte Anwendung finden. In [26, S. 507 f] wird hier für die Verwendung von Messdaten, phenomenologischen Beobachtungen, Simulationsergebnissen und physikalischen Gesetzen als Beispiel genannt. Durch die Kombination solcher Modelle ist man dann in der Lage auch diverse komplexe Materialien zu simulieren. Das folgende Theorem formuliert dieses Vorgehen genauer.

THEOREM: (BSDF-Reihe)

Seien $\mu \in \mathcal{S}^2$, $(f_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von BSDFs bezüglich μ und $(\alpha_n)_{n \in \mathbb{N}}$ eine Folge von Werten in $[0, 1]$, sodass die beiden folgenden Eigenschaften für σ^2 -fast-alle $(\omega_i, \omega_o) \in \mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2$ gelten.

$$\sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n(\omega_i, \omega_o) < \infty, \quad \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \leq 1$$

Dann ist auch die Abbildung f mit der folgenden Definition eine BSDF bezüglich μ .

$$f: \mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2 \rightarrow [0, \infty), \quad f(\omega_i, \omega_o) := \begin{cases} \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n(\omega_i, \omega_o) & : \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n(\omega_i, \omega_o) < \infty \\ 0 & : \text{sonst} \end{cases}$$

BEWEIS:

Für die Wohldefiniertheit von f betrachten wir dessen Definitions- und Wertebereich. Der Definitionsbereich von f entspricht dem der f_n für alle $n \in \mathbb{N}$. Weiterhin folgt aus der Definition von f , dass $f < \infty$ gilt. Für $n \in \mathbb{N}$ betrachtet man dann

$$f_n \geq 0 \implies \alpha_n f_n \geq 0 \implies f = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n \geq 0$$

Insbesondere ist also $f(\omega_i, \omega_o) \in [0, \infty)$ für alle $\omega_i, \omega_o \in \mathcal{S}^2$. Damit ist f eine Abbildung der Form $f: \mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2 \rightarrow [0, \infty)$ und wohldefiniert.

Kommen wir nun zur Integrierbarkeit. Für alle $n \in \mathbb{N}$ sind die Abbildungen f_n und infolgedessen auch $\alpha_n f_n$ integrierbar. Wir definieren die Folge $(g_n)_{n \in \mathbb{N}}$ von Funktionen durch

$$g_n := \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i$$

Dann ist g_n aufgrund der Linearität des Integrals integrierbar und es gilt $g_n \leq g_{n+1}$ für alle $n \in \mathbb{N}$. Weiterhin erhält man durch die Anwendung der Definition die folgende Aussage für σ^2 -fast-alle $(\omega_i, \omega_o) \in \mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2$.

$$g_n(\omega_i, \omega_o) \xrightarrow{n \rightarrow \infty} f(\omega_i, \omega_o)$$

Nach dem Satz über die Monotone Konvergenz [7, S. 125] ist damit f eine integrierbare Funktion, für die das Folgende aufgrund der Linearität des Integrals gilt.

$$\begin{aligned} \int_{\mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2} f \, d\sigma^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2} g_n \, d\sigma^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \int_{\mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2} \sum_{i=1}^n \alpha_i f_i \, d\sigma^2 \\ &= \lim_{n \rightarrow \infty} \sum_{i=1}^n \alpha_i \int_{\mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2} f_i \, d\sigma^2 = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \int_{\mathcal{S}^2 \times \mathcal{S}^2} f_n \, d\sigma^2 \end{aligned}$$

Die Helmholtz-Reziprozität von f wird direkt durch die Verwendung der Helmholtz-Reziprozität der $f_n, n \in \mathbb{N}$ klar. Für σ^2 -fast-alle (ω_i, ω_o) mit $\omega_i \in \mathcal{S}^2, \omega_o \in \mathcal{H}_\nu^2$ und $\nu := \text{sgn}(\langle \mu, \omega_i \rangle) \cdot \mu$ gilt demnach

$$f(\omega_i, \omega_o) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n(\omega_i, \omega_o) = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n f_n(\omega_o, \omega_i) = f(\omega_o, \omega_i)$$

Für die Energieerhaltung erhalten wir eine entsprechende Aussage durch die Anwendung des Satzes von Fubini [7, S. 175 f]. Es ist damit $f(\omega_i, \cdot)$ σ -integrierbar für σ -fast-alle $\omega_i \in \mathcal{S}^2$. Die Funktion $|\langle \mu, \cdot \rangle|$ ist stetig und durch 1

beschränkt. Mithin ist auch $f(\omega_i, \cdot) |\langle \mu, \cdot \rangle|$ messbar und es gilt für σ -fast-alle $\omega_i \in S^2$

$$f(\omega_i, \cdot) |\langle \mu, \cdot \rangle| \leq f(\omega_i, \cdot) \implies \int_{S^2} f(\omega_i, \cdot) |\langle \mu, \cdot \rangle| d\sigma \leq \int_{S^2} f(\omega_i, \cdot) d\sigma < \infty$$

Analog zum Beweis der Integrierbarkeit von f lässt sich dann mithilfe der Energieerhaltung der $f_n, n \in \mathbb{N}$ die Energieerhaltung von f formulieren.

$$\int_{S^2} f(\omega_i, \cdot) |\langle \mu, \cdot \rangle| d\sigma = \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \int_{S^2} f_n(\omega_i, \cdot) |\langle \mu, \cdot \rangle| d\sigma \leq \sum_{n \in \mathbb{N}} \alpha_n \leq 1$$

□

Nach dieser Aussage ist man in der Lage, abzählbar viele BSDFs mithilfe entsprechender Koeffizienten miteinander zu kombinieren. Eine direkte Folgerung bildet die Anwendung des Satzes auf nur endlich viele BSDFs.

KOROLLAR: (BSDF-Summe)

Seien $\mu \in S^2$ und $n \in \mathbb{N}$. Weiterhin seien f_k eine BSDF bezüglich μ und $\alpha_k \in [0, 1]$ für alle $k \in \mathbb{N}$ mit $k \leq n$, sodass $\sum_{k=1}^n \alpha_k \leq 1$ gilt. Dann ist die folgende Abbildung eine BSDF bezüglich μ .

$$f := \sum_{k=1}^n \alpha_k f_k$$

2.2 Lambertsch diffuse Materialien und die Rendergleichung

Eines der einfachsten BSDF-Modelle ist das der lambertschen diffusen Reflexion, welches in Abschnitt 1.2 als Beispiel eingeführt wurde. Die einfallende Strahldichte wird bei diesem Modell gleichmäßig in alle Richtungen der Halbkugel gestreut, was auch der idealen diffusen Reflexion entspricht. Eine Oberfläche mit dieser Eigenschaft wird auch Lambertscher Strahler (engl.: *Lambertian radiator*, [35, S. 17]) genannt. Zu beachten ist, dass diese BSDF keinerlei Transmission von Licht beschreibt und auch im Allgemeinen keiner physikalischen Basis entspricht. Dennoch stellt sie eine gute Approximation vieler realer Oberflächen, die ein mattes Aussehen besitzen, dar [26, S. 532]. Das Modell eignet sich aufgrund seiner Simplizität für die numerische Simulation der globalen Beleuchtung. In Abbildung 10 ist erkennbar, dass der Szene durch die Verwendung des Modells ein plastisches und damit auch realistischeres Aussehen zu Teil wird.

Wir wollen nun eine Szene $\Sigma := (\mathcal{T}, \nu, f, E, U)$ und einen Punkt $x \in \mathcal{T}$ betrachten, sodass $f(x, \cdot, \cdot)$ einen Lambertschen Strahler bezüglich $\nu(x)$ darstellt. Die Rendergleichung für die Strahldichte L am Punkt x in Richtung $\omega_o \in \mathcal{H}_{\nu(x)}^2$ für eine Wellenlänge $\lambda \in (0, \infty)$ lautet dann wie folgt.

$$L(x, \lambda, \omega_o) = E(x, \lambda, \omega_o) + \underbrace{\frac{1}{\pi} \int_{S^2} \mathbf{1}_{\mathcal{H}_{\nu(x)}^2}(\omega) \tilde{L}(x, \lambda, \omega) |\langle \nu(x), \omega \rangle| d\sigma(\omega)}_{=: L_r(x, \lambda, \omega_o)}$$

$L_r(x, \lambda, \omega_o)$ beschreibt den reflektierten Anteil der Strahldichte. Die charakteristische Funktion im Integranden ändert die Integrationsmenge. Bezeichnen wir die Irradianz von L durch die Variable R , so folgt

$$L_r(x, \lambda, \omega_o) = \frac{1}{\pi} \int_{\mathcal{H}_{\nu(x)}^2} \tilde{L}(x, \lambda, \omega) \langle \nu(x), \omega \rangle d\sigma(\omega) = \frac{R(x, \lambda)}{\pi}$$

Der reflektierte Anteil $L_r(x, \lambda, \omega_o)$ ergibt sich damit aus der mit $\frac{1}{\pi}$ skalierten Irradianz $R(x, \lambda)$ [25, S. 785 f]. Insbesondere ist er damit unabhängig von der Richtung ω_o . Das Einsetzen in den übrigen Teil der Gleichung ergibt dann direkt

$$L(x, \lambda, \omega_o) = E(x, \lambda, \omega_o) + \frac{1}{\pi} R(x, \lambda)$$

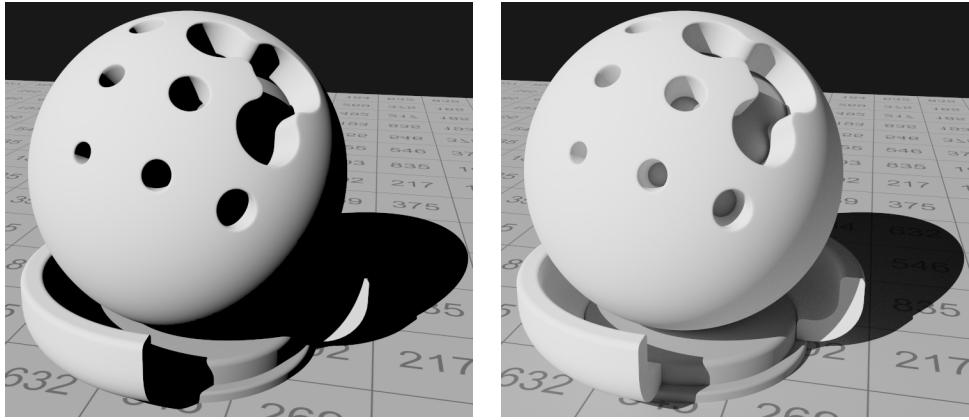


Abbildung 10: Die Bilder zeigen die gerenderte »Shaderball«-Szene, beleuchtet durch eine direktionale Lichtquelle. Im linken Bild wurde die Strahllichte der Szene nur durch direkte Beleuchtung ohne die Verwendung einer entsprechenden BSDF berechnet. Im rechten Bild wurde für jedes Material eine lambertsch diffuse Reflexion angenommen. Die Szene wirkt hier wesentlich plastischer und realistischer als im linken Bild.

In den meisten Fällen ist E selbst unabhängig von ω_o und an vielen Punkten im Raum sogar identisch mit Null. Für matte Oberflächen, deren Reflexionsverhalten durch einen lambertschen Strahler charakterisiert werden kann, reicht es dementsprechend die Irradianz zu betrachten [33, 34].

Verwendet man jetzt das Korollar des vorigen Abschnittes, so lässt sich das einfache Modell der lambertsch diffusen Reflexion zum Beispiel mit einer idealen Reflexion verbinden, wie es in Abbildung 11 gezeigt ist. Das resultierende Material ist komplexer aufgebaut und beschreibt eine andere Klasse von Materialien. Die Verwendung eines lambertschen Strahlers kann somit durch Kombination mit anderen BSDF-Modellen auf einen größeren Bereich von Materialarten ausgeweitet werden. Mithin ist es in der Praxis in fast allen Szenen nötig diffuse Reflexionen an den Oberflächen der Objekte auszuwerten.

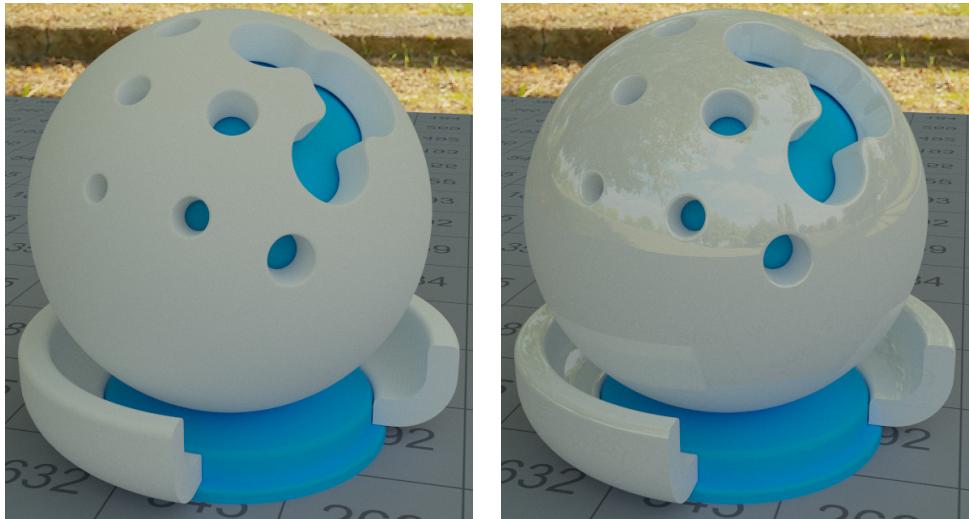


Abbildung 11: Die Bilder zeigen die gerenderte »Shaderball«-Szene, beleuchtet durch eine Umgebungsbeleuchtung. Im linken Bild bestehen die verwendeten BSDFs nur aus der lambertsch diffusen Reflexion. Im rechten Bild wurde das Material der äußeren Körpers zusätzlich mit der BSDF einer idealen Reflexion kombiniert. Das entstehende Material ist kein idealer Spiegel, aber auch kein idealer diffuser Strahler.

Wir nehmen jetzt an, dass sich die BSDF am Punkt x aus der Kombination eines lambertschen Strahlers mit Koeffizient α und einer beliebigen BSDF $\tilde{f}(x, \cdot, \cdot)$ mit Koeffizient β ergibt. Dabei fordern wir, dass $\alpha, \beta \in [0, 1]$ und $\alpha + \beta \leq 1$ gilt. Das Korollar über die Summe von BSDFs tätigt dann eine klare

Aussage über die Form des reflektierten Anteils.

$$L(x, \lambda, \omega_o) = E(x, \lambda, \omega_o) + \frac{\alpha}{\pi} R(x, \lambda) + \beta \int_{S^2} \tilde{f}(x, \omega, \omega_o) \tilde{L}(x, \lambda, \omega) |\langle \nu(x), \omega \rangle| d\sigma(\omega)$$

Diese Form der Rendergleichung für Lambertsche Strahler besitzt für die Verwendung in der Praxis einen Vorteil. Die BSDF $\tilde{f}(x, \cdot, \cdot)$ ergibt sich meistens aus stark richtungsabhängigen Anteilen, wie zum Beispiel der idealen Reflexion, der idealen Brechung oder ähnlich glänzenden Materialien. Diese Anteile können vergleichsweise gut durch Raytracing beziehungsweise auch Path Tracing gerendert werden. Die Berechnung von $R(x, \lambda)$ erfordert jedoch immer eine Integration über die gesamte Hemisphäre, bei der jeder erhaltene Wert gleichermaßen gewichtet werden muss. Diese Bedingung erschwert die Evaluierung und resultiert in entsprechend langen Zeiträumen des Renderings.

Der große Vorteil an der Irradianz besteht jedoch darin, dass sie unabhängig von der betrachteten Richtung ist. Die empfangene Strahldichte von x ist konstant egal von welchem Punkt im Raum aus man x betrachtet. Diese Eigenschaft ermöglicht es, $R(x, \lambda)$ vorzuberechnen und am Punkt x zu speichern. Jedes mal, wenn man nun den Punkt x aus einer Richtung $\tilde{\omega} \in \mathcal{H}_{\nu(x)}^2$ betrachtet, wird das Integral des rechten Teils der Gleichung effizient durch Path Tracing geschätzt. Der Wert $R(x, \lambda)$ kann mit $E(x, \lambda, \tilde{\omega})$ ausgelesen und zum resultierenden Wert hinzugefügt werden. Infolgedessen verkürzen sich die benötigten Renderzeiten. Da es sich bei R um die Irradianz handelt, wollen wir die zugehörige Datenstruktur, die ihre Werte speichert »Irradiance Map« nennen.

Wir möchten hier bemerken, dass die genannten Eigenschaften nur für die Translation des Beobachtungspunktes gelten. Die Änderung der Beleuchtung oder Geometrie führt zu einer neuen Szene $\tilde{\Sigma}$ deren Irradianz \tilde{R} im Allgemeinen nicht R entspricht. Die Irradiance Map muss demnach für jede Modifizierung der Szene neu berechnet werden, um die korrekten Werte der Irradianz zu beinhalten.

2.3 Irradiance Map und Irradiance Cache

In [34] und [25, S. 783 ff] wird das Verfahren des sogenannten »Irradiance Caching« beschrieben. Es basiert auf der vorherigen Gleichung und ermöglicht das Zwischenspeichern der Irradianz in einem »Cache«. Dabei werden nur Werte, für die genügend bereits aufgenommene Werte in der Nähe gefunden werden, durch diesen Cache interpoliert. Ist dies nicht der Fall, so wird die Irradianz an diesem Punkt neu geschätzt und im Cache abgelegt. Der Cache besteht aus einer räumlichen Datenstruktur (engl.: *spatial datastructure*), wie zum Beispiel einem »Octree«, der die einzelnen Irradianz-Werte mit ihrer Position im Raum unabhängig von der Mesh speichert. Dies ermöglicht die Implementierung einer effizienten Suche für die bereits aufgenommenen Werte.

Irradiance Caching ist damit ein Verfahren, welches in Abhängigkeit des derzeitigen Beobachtungspunktes Werte aufnimmt, speichert und interpoliert. Folglich berechnet es nur die Irradianzen an Punkten, die durch den Beobachter gesehen werden. Auch die Interpolation kann sich dadurch dem derzeitigen Bildausschnitt anpassen und exaktere Ergebnisse liefern.

Eines der wichtigsten Probleme besteht darin, dass die Interpolation der aufgenommenen Werte über dem Raum und nicht über der Oberfläche der Szene stattfindet. Diese fehlerhafte Interpolation führt in einigen Szenen mit dünnen Wänden zu sogenannten »light leaks« und anderen Beleuchtungs-Artefakten. Weiterhin ist es im Allgemeinen ratsam nur die indirekte Irradianz durch einen Irradiance Cache anzunähern, da sich diese über der Oberfläche nur langsam ändert und gut approximiert werden kann. Beleuchtungseffekte, die durch die Umgebungsbeleuchtung oder andere direkte Lichtquellen erzeugt werden, müssen hiernach für jedes Bild neu berechnet werden.

Ein andere Variante ist die in dieser Arbeit besprochene komplette Vorberechnung einer Irradiance Map. Sie speichert die aufgenommenen Werte durch eine passende Datenstruktur auf der Oberfläche der Szene und ermöglicht eine vergleichsweise einfache lokale Interpolation. Beispiele finden sich in [10, 29, 32]. Dies ermöglicht das Speichern der direkten Irradianz und verhindert die Entstehung einiger Beleuchtungsartefakte. Allerdings müssen Irradiance Maps auch Werte für Bereiche der Szene

speichern, die vom Beobachter aus nicht gesehen werden. Dies führt dazu, dass Irradiance Maps im Allgemeinen einen sehr viel höheren Speicherverbrauch aufweisen als Irradiance Caches.

2.4 Fehlerabschätzung der Irradianz

In Abschnitt 1.6 wurde erwähnt das die meisten Renderverfahren, wie zum Beispiel das hier verwendete Path Tracing, auf der Basis von Zufallsvariablen arbeiten. Das Integral in der Rendergleichung wird dabei mithilfe geeigneter Monte-Carlo-Methoden berechnet. Aus diesem Grund bildet sich bei den Lösungen der Rendergleichung immer ein gewisses »Rauschen« (engl.: *noise*) aus. In Abbildung 12 wird dies an einem Beispiel demonstriert.

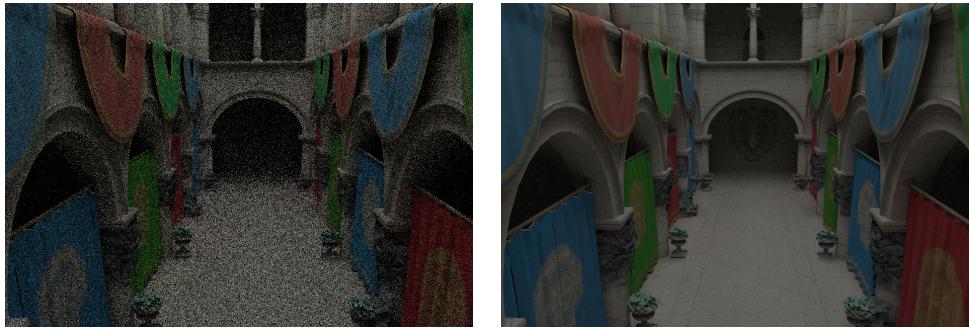


Abbildung 12: Die Bilder zeigen die gerenderte »Sponza«-Szene, deren Materialien aus Lambertschen Strahlern bestehen und deren Umgebungsbeleuchtung eine konstante Funktion ist. Für das linke Bild wurde an jedem sichtbaren Punkt der Szene die Irradianz durch 16 Messungen ermittelt. Das Resultat beinhaltet noch einen großen Anteil des Rauschens. Im rechten Bild wurden jeweils 1024 Messungen durchgeführt, wodurch es wesentlich rauschärmer als das Linke ist.

Möchte man die Irradianz für den Irradiance Cache oder auch die Irradiance Map ermitteln, so muss also darauf geachtet werden, dass das Rauschen des Endresultates und damit dessen Fehler klein bleibt. Mathematisch lässt sich dieser Sachverhalt durch Zufallsvariablen formulieren. Wir gehen davon aus, dass die Abfrage der Strahldichte einer Zufallsvariable

Diese Definition zeigt diverse Probleme auf, die bei der Modellierung von Objekten entstehen können. Dreiecke der Primitive in einer Szene dürfen sich im Allgemeinen beliebig schneiden. Dadurch ist es im Allgemeinen nicht möglich jedem Oberflächenpunkt eine eindeutige äußere Normale zuzuordnen. Bei der Generierung der Irradiance Maps werden sich diese Punkte als Fehler äußern.

Die abstrakte Definition ist für die Implementierung leider noch nicht ausreichend.

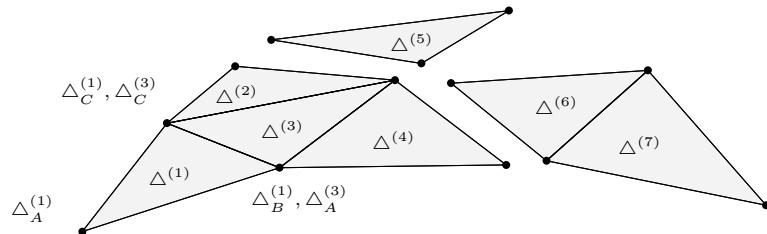


Abbildung 13: Die Abbildung zeigt eine beispielhafte Menge von Dreiecken $\{\Delta^{(i)} \mid i \in \mathbb{N}, i \leq 7\}$. Verschiedene Gruppen von Dreiecken bilden eine Approximation einer Oberfläche im Raum. Dabei werden die Eckpunkte der Dreiecke geteilt und es gilt zum Beispiel $\Delta_B^{(1)} = \Delta_A^{(1)}$ und $\Delta_C^{(1)} = \Delta_C^{(3)}$.

Literatur

- [1] Akenine-Möller, Tomas, Eric Haines, and Naty Hoffman: *Real-Time Rendering*. A K Peters, Ltd., third edition, 2008.
- [2] Botsch, Mario, Mark Pauly, and C Ross: *Geometric modeling based on triangle meshes*. Acm Siggraph 2006 ..., pages 1–148, 2006. <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=1185839>.
- [3] Bronstein, Semendjajew, Musiol und Mühlig: *Taschenbuch der Mathematik*. Europa-Lehrmittel, zehnte Auflage, 2016, ISBN 978-3-8085-5789-1.
- [4] Cohen, Michael F. and John R. Wallace: *Radiosity and Realistic Image Synthesis*. Academic Press Professional, 1995, ISBN 0-12-059756-X.
- [5] Cohen-Or, Daniel, Yiorgos L. Chrysanthou, Cláudio T. Silva, and Frédo Durand: *A survey of visibility for walkthrough applications*. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics, 9(3):412–431, 2003, ISSN 10772626.
- [6] Durand, F: *3D Visibility: analytical study and applications*. Université Joseph Fourier, Grenoble, France, 1999. <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search{\&}q=intitle:3D+Visibility+:+Analytical+Study+and+Applications{\#}0{\%}5Cnhttp://scholar.google.com/scholar?hl=en{\&}btnG=Search{\&}q=intitle:3D+Visibility:+analytical+study+and+applications{\#}0>.
- [7] Elstrodt, Jürgen: *Maß- und Integrationstheorie*. Springer, siebte korrigierte und aktualisierte Auflage, 2011, ISBN 978-3-642-17904-4.
- [8] Gautron, Pascal, Jaroslav Kriva, Sumanta Pattanaik, and Kadi Bouatouch: *Radiance Caching for Efficient Global Illumination Computation*. 11(5):1–11, 2005.
- [9] Grant, Barbara G.: *Field Guide to Radiometry*. SPIE, 2011, ISBN 978-0-8194-8827-5.
- [10] Jensen, Henrik Wann: *A practical guide to global illumination using photon maps*. SIGGRAPH 2000 Course Notes CD-, 38:20-es, 2000. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1103900.1103920{\%}5Cnhttp://171.67.77.70/courses/cs348b-00/course8.pdf>.
- [11] Kajiya, James T: *The rendering equation*. In *ACM Siggraph Computer Graphics*, volume 20, pages 143–150. ACM, 1986.
- [12] Kühnel, Wolfgang: *Differentialgeometrie: Kurven - Flächen - Mannigfaltigkeiten*. Springer Spektrum, sechste Auflage, 2013, ISBN 978-3-658-00614-3.
- [13] Lafontaine, Eric P and Yves D Willems: *Bi-Directional Path Tracing*.
- [14] LaMothe, André: *Tricks of the 3D Game Programming Gurus: Advanced 3D Graphics and Rasterization*. Sams Publishing, 2003.
- [15] Levoy, Marc and Pat Hanrahan: *Light field rendering*. Proceedings of the 23rd annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '96, pages 31–42, 1996, ISSN 00978930. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=237170.237199>.
- [16] Malacara, Daniel: *Color Vision and Colorimetry: Theory and Applications*. SPIE, 2011, ISBN 978-0-8194-8397-3.

- [17] Mm Oller, Tomas and Ben Trumbore: *Fast, Minimum Storage Ray/Triangle Intersection*. ACM SIGGRAPH 2005 Courses, (1):1–7, 2005, ISSN 1086-7651.
- [18] Morvan, Jean Marie and Boris Thibert: *Smooth surface and triangular mesh: comparison of the area, the normals and the unfolding*. SMA '02: Proceedings of the seventh ACM symposium on Solid modeling and applications, pages 147–158, 2002.
- [19] Müller-Gronbach, Thomas, Erich Novak und Klaus Ritter: *Monte Carlo-Algorithmen*. Springer, 2012, ISBN 978-3-540-89140-6.
- [20] Nicodemus, Fe, Jc Richmond, and Jj Hsia: *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Science And Technology, 60(October):1–52, 1977, ISSN 10411135. <http://graphics.stanford.edu/courses/cs448-05-winter/papers/nicodemus-brdf-nist.pdf>.
- [21] Nikodym, Tomas: *Ray Tracing Algorithm For Interactive Applications Tomas Nikodym*. page 76, 2010.
- [22] Nolting, Wolfgang: *Grundkurs Theoretische Physik 3: Elektrodynamik*. Springer, achte Auflage, 2007, ISBN 978-3-540-71251-0.
- [23] Ohta, Noboru and Alan Robertson: *Colorimetry: Fundamentals and Applications*. Wiley, 2005, ISBN 978-0-470-09472-3.
- [24] Parker, Steven, William Martin, Peter Pike J Sloan, Peter Shirley, Brian Smits, and Charles Hansen: *Interactive ray tracing*. Proceedings of the 1999 symposium on Interactive 3D graphics SI3D 99, pages:119–126, 1999. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=300523.300537>.
- [25] Pharr, M. and G. Humphreys: *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann, second edition, 2010.
- [26] Pharr, M., W. Jakob, and G. Humphreys: *Physically Based Rendering: From Theory to Implementation*. Morgan Kaufmann, third edition, 2017.
- [27] Pipkin, A. C.: *A Course on Integral Equations*. Springer Science+Business Media, LLC, 2013, ISBN 978-1-4612-8773-5.
- [28] Scherzer, Daniel, Chuong H. Nguyen, Tobias Ritschel, and Hans Peter Seidel: *Pre-convolved Radiance Caching*. Computer Graphics Forum, 31(4):1391–1397, 2012, ISSN 01677055.
- [29] Shirley, P., B. Wade, P. M. Hubbard, D. Zareski, B. Walter, and D. P. Greenberg: *Global Illumination via Density-Estimation*. Proceedings of 6th Workshop on Rendering, pages 219–230, 1995. http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-7091-9430-0{__}21{_\%}5Cnhttp://www.cs.utah.edu/{\~}shirley/papers/de95.pdf.
- [30] Veach, Eric: *Robust Monte Carlo Methods for Light Transport Simulation*. Dissertation at the Department of Computer Science of Stanford University, 134(December):759–764, 1997, ISSN 13509462. http://graphics.stanford.edu/papers/veach{__}thesis/.
- [31] Veach, Eric and Leonidas J. Guibas: *Metropolis light transport*. Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques - SIGGRAPH '97, pages 65–76, 1997, ISSN 00978930. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=258734.258775>.

- [32] Walter, Bruce, Philip M Hubbard und Peter Shirley: *Global Illumination Using Local Linear Density Estimation*.
- [33] Ward, Gregory J. und Paul S Heckbert: *Irradiance gradients*. ACM SIGGRAPH 2008 classes on - SIGGRAPH '08, Seite 1, 2008. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=1401132.1401225>.
- [34] Ward, Gregory J., Francis M. Rubinstein, and Robert D. Clear: *A ray tracing solution for diffuse interreflection*. ACM SIGGRAPH Computer Graphics, 22(4):85–92, 1988, ISSN 00978930. <http://portal.acm.org/citation.cfm?doid=378456.378490>.
- [35] Wolfe, William L.: *Introduction to Radiometry*. SPIE, 1998, ISBN 0-8194-2758-6.
- [36] Yuksel, Cem, John Keyser und Donald H. House: *Mesh colors*. ACM Transactions on Graphics, 29(2):1–11, 2010, ISSN 07300301.

Eigenständigkeitserklärung

Ich erkläre, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig und nur unter Verwendung der angegebenen Hilfsmittel und Quellen angefertigt habe. Die eingereichte Arbeit ist nicht anderweitig als Prüfungsleistung verwendet worden oder in deutscher oder einer anderen Sprache als Veröffentlichung erschienen.

Seitens des Verfassers bestehen keine Einwände, die vorliegende Bachelorarbeit für die öffentliche Benutzung zur Verfügung zu stellen.

Jena, 16.Juni 2017

Markus Pawellek