

Kapitel 6

Materialmodelle und goniophotometrische Messungen

6.1 Raytracing und Materialmodelle

Die computergrafischen Verfahren, die in der Lichtsimulation zum Einsatz kommen, leiten sich aus der geometrischen Optik ab. D. h. sie verfolgen das Licht als Strahl auf seinem Weg durch den Raum. Dabei modellieren sie die Interaktion mit Materialien als Reflexion und Brechung an den Grenzen optischer Medien (Abbildung 6.1). Diese Grenzen entsprechen den Oberflächen des geometrischen Modells. Der Weg des Lichts ist dabei umkehrbar, es spielt keine Rolle, ob es von der Lichtquelle zum Empfänger oder umgekehrt nachvollzogen wird. Wenn sie sich überschneiden, beeinflussen sich die Strahlen verschiedener Lichtquellen nicht.

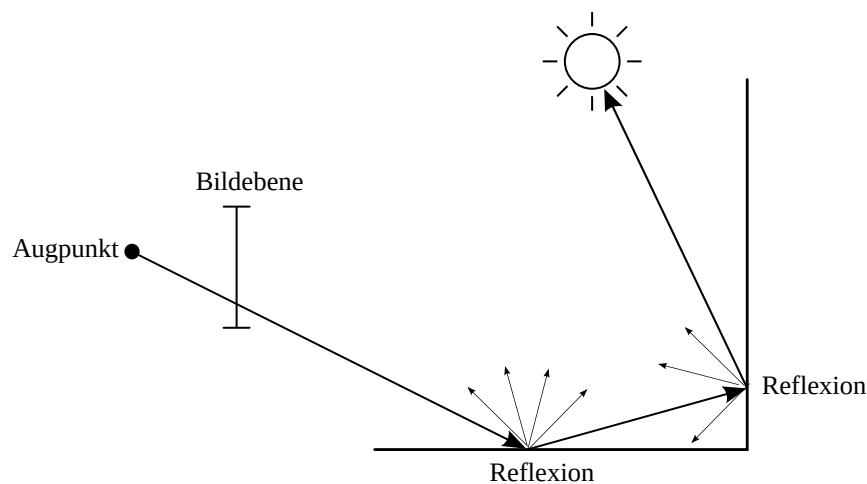


Abbildung 6.1: Berechnung mittels Strahlenverfolgung vom Augpunkt eines Betrachters aus (Backward Raytracing). Für jeden Pixel auf der Bildebene wird ein Strahl über mehrere Reflexionen bis zur Lichtquelle verfolgt.

Dieses Verfahren schließt eine ganze Reihe physikalischer Effekte aus, die sich nur in der Wellenoptik untersuchen lassen: Dispersion, Beugung, Polarisation, Interferenz etc. Darüber hinaus werden in vielen Fällen Effekte ignoriert, bei denen das Volumen, welches das Licht

durchläuft, einen Einfluss hat, auch wenn es dafür Verfahren gibt. Dazu gehören z. B. die Streuung am Staub und Nebel in der Luft oder das Subsurface scattering (SSS), wie es beim Marmor auftritt, bei welchem das Licht in das Material eindringen kann und dort gestreut wird. Eine weitere Einschränkung, die häufig vorgenommen wird, betrifft transparente Medien. In vielen Anwendungen der Lichtsimulation sind das Glasscheiben, also flache Körper, die zwei parallele Oberflächen aufweisen, durch eine einzige Fläche repräsentiert. Bei diesen spielt die Lichtbrechung keine große Rolle, sodass der Lichtdurchgang als nicht abgelenkte Transmission vereinfacht wird.

Die Reflexion und Transmission an einer Oberfläche kann sehr unterschiedlich sein. Ein Spiegel wirft das Licht nach dem Gesetz »Einfallswinkel gleich Ausfallswinkel« perfekt zurück, ein Blatt Papier streut das Licht nach dem Lambertschen Gesetz in alle Richtungen. Dazwischen gibt es unendlich viele Abstufungen, die sich offensichtlich aus der mikroskopischen Struktur der Oberfläche ergeben. Bei manchen Materialien, z. B. gebürstetem Aluminium bewirkt das Drehen um die Oberflächennormale (z in Abbildung 6.2) eine Veränderung des Reflexionsverhaltens (Anisotropie).

Zusammenfassend kann man die Effekte, die an den Oberflächen bei Reflexion oder Transmission stattfinden, als *Streuung* bezeichnen. Die in der Lichtsimulation verwendeten Materialmodelle beschreiben Streuung mathematisch.¹ Die allgemeinste Form dieser mathematischen Beschreibung ist die Bidirectional Scattering Distribution Functions (BSDFs).² Diese liefert die Intensität des gestreuten Lichts für jede mögliche Kombination von Einfalls- und Ausgangsrichtung³. Beide Richtungen werden für gewöhnlich in Polarkoordinaten (ϑ_i, φ_i) und (ϑ_s, φ_s) relativ zu der zu beschreibenden Oberfläche wiedergegeben (Abbildung 6.2).

Die BSDF ist wie folgt definiert:

$$f_{\text{BSDF}}(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_s, \varphi_s) = \frac{dL_s(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_s, \varphi_s; E_i)}{dE_i(\vartheta_i, \varphi_i)} \quad [\text{sr}^{-1}] . \quad (6.1)$$

Dabei ist L_s die Leuchtdichte des gestreuten Lichts und E_i die Beleuchtungsstärke auf der Probestfläche.

6.2 Streuungsmessungen mit einem Goniophotometer

Nach diesem geometrischen Prinzip lassen sich BSDFs mit einem Goniophotometer messen (Abbildung 6.5).⁴ Das Gerät an der Hochschule Luzern mit dem die im Folgenden beschriebenen Messungen durchgeführt wurden, kann mit Hilfe zweier Lichtquellen, verschiedener

¹ Kurt und Edwards 2009.

² Es gibt noch andere Modelle wie die Bidirectional Texture Function (BTF) (Schwartz u. a. 2013) oder die Polynomial Texture Mapping (PTM) (Malzbender, Gelb und Wolters 2001), die hier nicht näher untersucht werden können, aber wichtige Anwendungen im Bereich der Cultural Heritage haben (z. B. Santos u. a. 2014).

³ ASTM E2387-05 2005; Nicodemus u. a. 1977.

⁴ Apian-Bennowitz 2010b, Apian-Bennowitz 2014

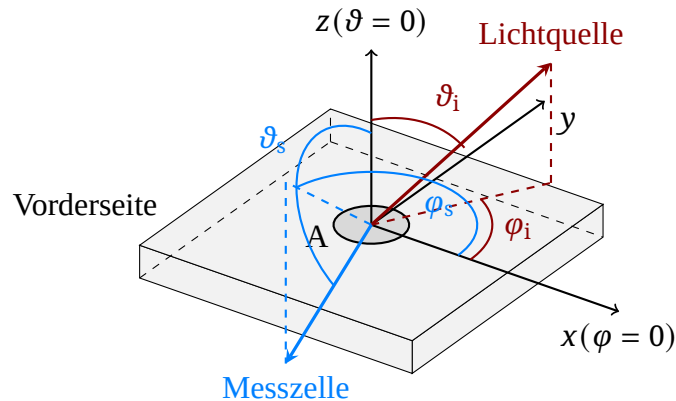


Abbildung 6.2: Geometrie der goniophotometrischen Messung einer Probe. Gezeigt sind die Koordinatensysteme der Probe (x, y, z) , aus Richtung der Lichtquelle (ϑ_i, φ_i) und von der beleuchteten Probefläche A zur Messzelle (ϑ_s, φ_s) . Quelle: Grobe, Noback und Lang 2019.

Kondensorlinsen und Blenden auf einer optischen Bank für verschiedene Messstrahlen konfiguriert werden (Abbildung 6.4).⁵ Der Messstrahl richtet sich auf eine Probe, die in einem von mehreren Probenhaltern befestigt werden kann. Der Probenhalter kann die Probe automatisch um die vertikale und die horizontale Achse drehen. Dadurch lässt sich während einer Messreihe die Einfallrichtung $(\vartheta_i = 0 - 180^\circ, \varphi_i = 0 - 360^\circ)$ des Messstrahls relativ zur Probe variieren.

Vom so konfigurierten Lichtfleck auf der Probe (*Sampling Aperture*) wird das Licht zum Detektor hin gestreut. Dieser fährt während der Messung konfigurierbare Pfade auf einer gedachten Kugeloberfläche ($r = 1020 \text{ mm}$) ab (Abbildung 6.3). Dabei werden üblicherweise hunderttausende von Messwerten ermittelt. Ein $V(\lambda)$ -Filter vor dem Detektor beschränkt das einfallende Licht auf den sichtbaren Bereich. Die gemessenen Werte werden für die Reflexions- $(\vartheta_i = -90 - 90^\circ, \varphi_i = 0 - 360^\circ)$ und die Transmissions-Hemisphäre $(\vartheta_i = 90 - 270^\circ, \varphi_i = 0 - 360^\circ)$ ausgegeben.

Das Messinstrument liefert Beleuchtungsstärken $E_{s,j}$ für eine große Anzahl n von Messflächen (ϑ_s, φ_s) ; siehe Abbildung 6.2) auf der Hemisphäre. Um daraus BSDF-Werte berechnen zu können, muss zunächst eine Referenzmessung durchgeführt werden, auf dessen Grundlage der Lichtstrom des Messstrahls berechnet wird:⁶

$$P_i = \sum_{j=1}^n E_{s,j} \Omega_{s,j}, \quad j \in [1, n]. \quad (6.2)$$

Die BSDF als Mittelwert der von der Sampling Aperture erfassten Fläche in einer Messrichtung entspricht dem Anteil des insgesamt eingestrahlt Lichts, der in diese Richtung reflektiert wird. Sie lässt sich wie folgt berechnen:

⁵ Es gibt noch andere Messaufbauten z. B. Krehel, Wittkopf und Kämpf 2015.

⁶ Apian-Bennewitz 2010b.

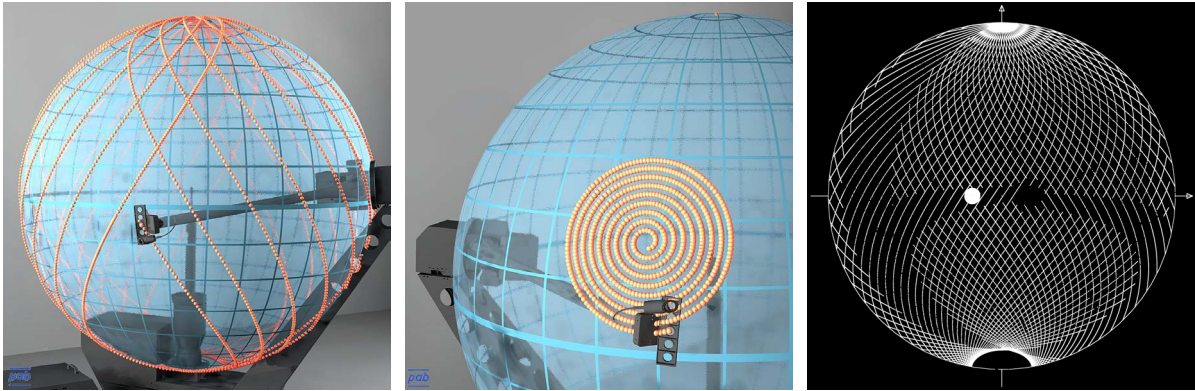


Abbildung 6.3: Geometrie des Detektorbewegung am Goniophotometer. Links: Zur Messung des gestreuten Lichts führt der Detektor Richtungen um die Probe $\vartheta_s = 0 - 180^\circ$, $\varphi_s = 0 - 360^\circ$. Mitte: Für ausgewählte Bereiche wird die Richtungsauflösung durch gezielte Verfeinerung erhöht. Rechts: Projektion der verwendeten Pfade für $\vartheta_i = 15^\circ$ und $\varphi_i = 0^\circ$. Der verfeinerte Bereich erhöht die Dichte der Messung in Richtung der spekularen Reflexion. Quelle: Noback, Grobe und Wittkopf 2016. Abbildungen links und mitte: Peter Apian-Bennewitz, pab-opto.

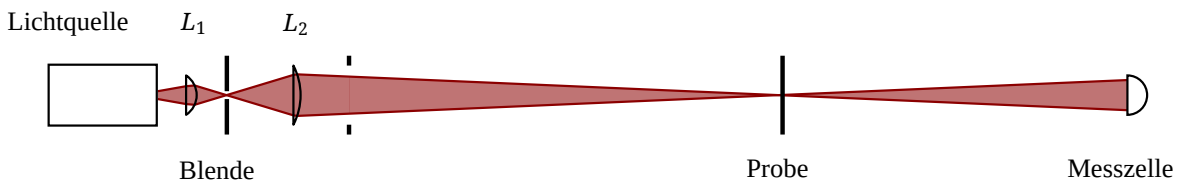


Abbildung 6.4: Konfiguration der optischen Bank bei der Fokussierung auf die Probe. Quelle: Grobe 2019a.

$$f_{\text{BSDF},j}(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_s, \varphi_s) = \frac{E_{s,j}}{P_i \cdot \cos \vartheta_{s,j}} \quad (6.3)$$

Bei der Darstellung von Streuungsmessungen wird häufig die DSF vorgezogen, weil sie nicht durch den $\cos \vartheta_{s,j}$ geteilt wird. Der Cosinus ist für flache Winkel $\vartheta_s \approx 90^\circ$ und $\vartheta_s \approx 270^\circ$ nahe Null, wodurch das Rauschen in den Messungen verstärkt wird.

$$f_{\text{DSF},j}(\vartheta_i, \varphi_i; \vartheta_s, \varphi_s) = \frac{E_{s,j}}{P_i} \quad (6.4)$$

6.3 Datenbasierte und analytische Materialmodelle

Gemessene BSDF lassen sich direkt in bestimmten Materialmodellen verwenden, man spricht dann von datenbasierten Materialmodellen.⁷ Diese müssen zwischen den gemessenen Werten

⁷ Matusik u. a. 2003.

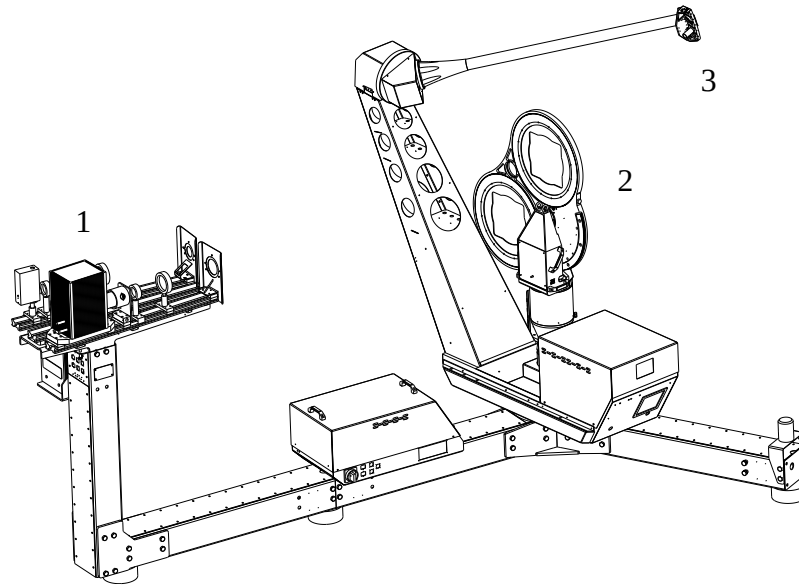


Abbildung 6.5: Das abtastende Goniophotometer der Hochschule Luzern besteht aus 1. Lichtquellen auf einer optischen Bank, 2. einem automatischen Probenhalter und 3. Detektoren an einem robotischen Arm. Abbildung: Peter Apian-Bennewitz, pab-opto.

interpolieren und Werte außerhalb der gemessenen Winkel extrapolieren. Aufgrund der großen Anzahl der gemessenen Werte kommen zudem Verfahren zur Datenreduktion zum Einsatz. Ein solches datenbasiertes Materialmodell ist in RADIANCE implementiert.⁸

Nicht immer kann nach einem solch aufwendigen Verfahren gemessen werden und nicht immer kann in der Lichtsimulation mit solch großen Datenmengen hantiert werden. Dann kommen einfachere analytische Materialmodelle zum Einsatz. Diese beschreiben die Streueigenschaften mittels einer überschaubaren Anzahl anschaulicher Parameter, die man mit in Bezug zu messbaren physikalischen Eigenschaften einstellen kann. Viele dieser Modelle leiten sich aus der *micro-facet*-Theorie her.⁹

Das durch Ward, Dür und Geisler-Moroder in RADIANCE implementierte Modell ist ein solches analytisches Materialmodell.¹⁰ Es beschreibt diffuse Reflexion als einen konstanten Term und die spiegelnde Reflexion in Form einer Gaußschen Funktion t_s :¹¹

$$t_s(\vartheta_i, \varphi_i, \vartheta_s, \varphi_s) = \frac{\exp\left(\left(2 \cdot (\vec{i}, \vec{t}) - 2\right) / \alpha^2\right)}{\pi \cdot \alpha^2 \cdot \sqrt{\cos \vartheta_i \cdot -\cos \vartheta_s}}. \quad (6.5)$$

⁸ Ward, Kurt und Bonneel 2012; Ward, Kurt und Bonneel 2014; Grobe, Wittkopf und Kazanasmaz 2017.

⁹ Walter u. a. 2007.

¹⁰ Geisler-Moroder und Dür 2010.

¹¹ Grobe, Geisler-Moroder und Wittkopf 2010

Tabelle 6.1: Parameter des RADIANCE *plastic* Modells

Parameter	Bezeichnung	Beschreibung
red, green, blue	Reflectance	Reflexionskoeffizient für das diffus reflektierte Licht (Lambertsche Reflexion) im jeweiligen Farbkanal. Der Rest wird absorbiert.
spec	Specularity	Reflexionskoeffizient des spekulär reflektierten Lichtes (Glanz), das restliche Licht wird diffus gestreut oder absorbiert
rough	Roughness	Maß für die Streuung des spekulär reflektierten Lichtes

Die Parametrisierung des Modells kann man am Beispiel des RADIANCE *plastic* (Listing 6.1) zeigen, das für alle nicht metallischen reflektierenden Oberflächen zum Einsatz kommt. Es beschreibt die Streuung mittels fünf Parametern (Tabelle 6.1). Die ersten drei beschreiben den Reflexionskoeffizienten in drei Farbkanälen. Sie lassen sich mit einem Spektrometer messen oder mit einer Kamera ermitteln. Die Specularity beschreibt den Anteil des Lichts, das ähnlich einem Spiegel gerichtet reflektiert wird. Sie lässt sich z. B. mit einer Ulbrichtkugel messen (Abbildung 6.6).¹² Der letzte Parameter, die Roughness beschreibt die Streuung des reflektierten Lichts um die Hauptrichtung. Der einzustellende Wert lässt sich durch mikroskopische Vermessung der Oberflächenstruktur messen (Root-Mean-Squared Roughness (RMS)-Wert), aber zumeist geschätzt wird.

```
modifier plastic identifier
0
0
5 red green blue spec rough
```

Listing 6.1: Syntax des RADIANCE *plastic* Modells

¹² DIN 5036-3:1979 1979.

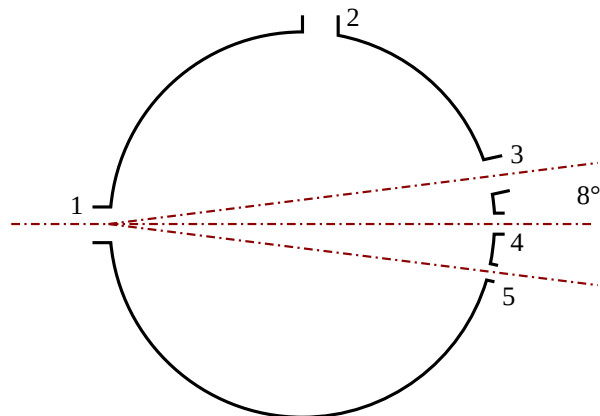


Abbildung 6.6: Messung mit der Ulbricht-Kugel: Die innen weiß beschichtete Kugel hat mehrere Öffnungen. An der Öffnung 1 wird die Probe angebracht, durch die Öffnung 3 fällt gerichtetes Licht, dessen specular reflektierter Anteil die Anordnung durch die Öffnung 5 verlässt. An Öffnung 2 wird gemessen. Durch einen Vergleich dieser Messung mit einer weiteren, bei der die Öffnung 5 durch ein reflektierendes Material verschlossen wird, kann der Anteil der specularen Komponente ermittelt werden. Nach DIN 5036-3:1979 1979.