Spectral Rendering

Eva Wohlfart*
Marie-Theres Tschurlovits†

Institute of Computer Graphics
University of Technolgy
Vienna / Austria

Zusammenfassung

Diese Arbeit befasst sich mit den möglichen Repräsentationen von Farbe im Renderingprozess. Als gängigste Methode wird der RGB-Farbraum behandelt, der allerdings Farben nicht korrekt darstellen kann. Als Alternative dazu wird Spectral Rendering vorgestellt, bei dem die spektrale Information direkt beibehalten wird. Dadurch wird eine Darstellung vieler physikalischer Effekte, die auf den spektralen Eigenschaften eines objekts beruhen, möglich.

Keywords: Spectral Rendering, XYZ, RGB, Direct Sampling, Basisfunktionen, Koheränzmatrizen, Coherency Matrix Modifiers, Stokes-Vektor, Müller-Matrizen, Filterrotation, Cornell Image Synthesis Testbed, Wavefront Tracking, Linear Farbrepräsentationen, Adaptives Spectral Rendering mit Wahrnehmungskontrolle, Hybrides Spectral Rendering, Utah Spectral Renderer

1 Einführung

Das wichtigste Ziel der photorealistischen Bilderzeugung sind Bilder, die bei einem menschlichen Betrachter genau denselben Eindruck erwecken wie eine reale Szene. Der Ablauf, um dies zu erreichen, besteht aus mehreren Schritten. Diese Arbeit befasst sich mit dem Problem, welche mathematische Beschreibung am besten für die Repräsentation von Licht und damit auch Farbe verwendet werden soll. Diese Entscheidung ist sehr komplex und hängt davon ab, was erreicht werden soll.

Spectral Rendering benutzt bei der Bildsynthese spektrale Repräsentationen für Licht und Reflektion. Dieses Thema ist schon lange ein Forschungsbereich der Computergrafik, trotzdem werden spektrale Renderingsysteme in der Praxis kaum verwendet.

In dieser Arbeit erfolgt zunächst eine kurze Einführung in Renderingverfahren, wobei hier der Schwerpunkt auf Raytracing liegen soll. Anschließend werden die Unterschiede zwischen Renderingsystemen, die im RGB-Farbraum rechnen, und solchen, die Spektralverteilungen benutzen, aufgezeigt. Die Vor- und Nachteile beider Techniken werden beleuchtet und schließlich folgt noch eine Beschreibung der wichtigsten Effekte, die mittels Spectral Rendering dargestellt werden können.

*evawohlfart@gmx.at
†tschurlo.mth@gmx.at

2 Rendering

Jeder Renderingalgorithmus baut auf einem Beleuchtungsmodell auf, welches die Lichtintensität an jedem Punkt einer Szene berechnet [2]. Ein Beispiel für ein solches Beleuchtungsmodell ist Phong-Shading [10]. Die Intensität an einem Pixel wird bei diesem Verfahren folgendermaßen berechnet:

$$I = I_a + \sum_{j=1}^{j=ls} k_d(N * L_j) + k_s(N * H_j)^n$$

wobei

$I =$ die reflektierte Intensität,
$I_a =$ die Reflektion basierend auf der Umgebungshelligkeit,
$ls =$ die Anzahl der Lichtquellen,
$k_d =$ Konstante für die diffuse Reflektion,
$N =$ der Normalvektor der Oberfläche,
$L_j =$ der Vektor in Richtung der j-ten Lichtquelle,
$k_s =$ Konstante für die Reflektion, durch die Glanzlichter entstehen,
$H_j =$ der Vektor zwischen der Richtung zum viewer L_j,
$n =$ Exponent, der die Stärke des Glanzeffekts angibt.

Dieses Modell basiert wie auch andere Beleuchtungsmodelle auf folgenden Grundelementen: Lichtquellen, Oberflächen und einem *viewer*, von dem aus das Bild gesehen wird. Die Grundidee dabei ist, dass das von der Lichtquelle kommende Licht auf Oberflächen trifft, reflektiert wird und dann den viewer erreicht, wo es aufgenommen wird. Der Renderingalgorithmus verwendet dann die Intensitätsberechnungen dieses Modells, um das Erscheinungsbild der Objekte in der Szene zu bestimmen.

2.1 Raycasting

Die Basis von Raytracing bildet die Grundvorstellung, dass von einem *viewer* aus Strahlen durch das Gitter der

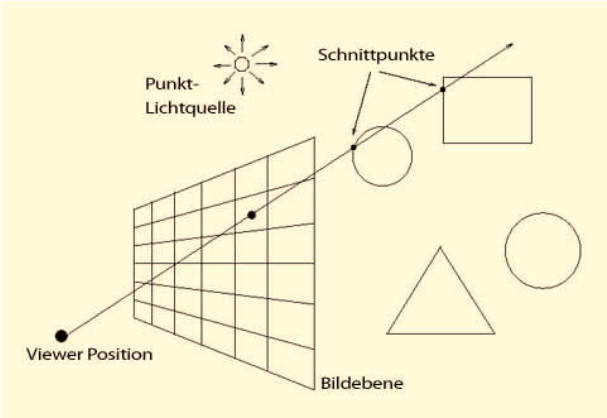

Abbildung 1: *Raycasting.* Dieses Verfahren ist die einfachste Form der Verwendung von Bildstrahlen. Es wird vor allem zur Detektion von sichtbaren Oberflächen verwendet. Bild von http://ugweb.cs.ualberta.ca/ c411/Notes/ RayTracing/Notes.html

Bildebene geschickt werden. Trifft ein Strahl auf keine Oberfläche, so wird der Bildpunkt in der Hintergrundfarbe dargestellt. Schneidet der Strahl aber eine Oberfläche, so wird dieser Punkt in der Farbe des Objekts dargestellt. Dieses vereinfachte Verfahren nennt man *Raycasting*. Damit kann lediglich bestimmt werden, welches Objekt näher zur Bildebene liegt und damit sichtbar ist, aber Dinge wie Reflektion oder transparente Objekte können nicht dargestellt werden.

2.2 Raytracing

Diese Methode wurde erstmals von Whitted[16] vorgestellt und stellt einen der größten Meilensteine in der Verwendung von strahlbasierten Bildsynthesemethoden dar. Raytracing ist eine Erweiterung des einfachen Verfahrens von Raycasting. Anstatt nur nach der vordersten Oberfläche zu suchen, wird der ausgesendete Strahl beim Schnitt mit einer Oberfläche weitergeführt. Dabei existieren drei Arten von Strahlen (siehe auch Abbildung 3):

- *Reflektionsstrahl*(reflection ray): Wenn ein Objekt ein spiegelnder Reflektor ist, wird der eintreffende Strahl reflektiert und weitergeführt.
- *Lichtbeugungsstrahl*(refraction ray): Ist ein Objekt transparent, so wird dieser Strahl durch das Objekt gelegt.
- *Schattenstrahl*(shadow ray): Dieser Strahl wird vom Schnittpunkt mit einem Objekt in Richtung der Lichtquelle(n) gelegt. Schneidet er ein anderes Objekt, so liegt der Schnittpunkt im Schatten dieses Objekts.

Trifft nun ein Strahl auf ein Objekt, so wird die Intensität des Bildpunktes aus dem lokalen Beleuchtungsmodell

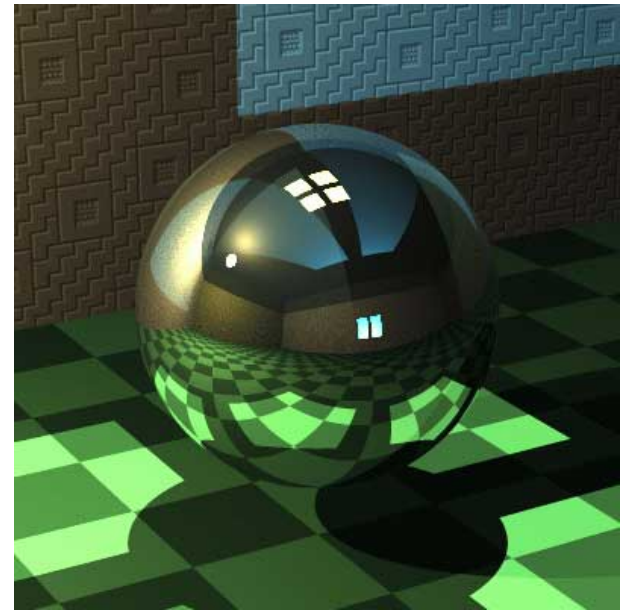

Abbildung 2: Hier ein Beispiel eines Bilds, das mit dem Raytracing-Verfahren erzeugt wurde. Die Darstellung des Schattens und der spiegelnden Oberfläche des Balls erfolgt durch das Aussenden von Strahlen. Bild von http://www.med.osaka-u.ac.jp/pub/clcomp/saito/raytr/ball-img.html

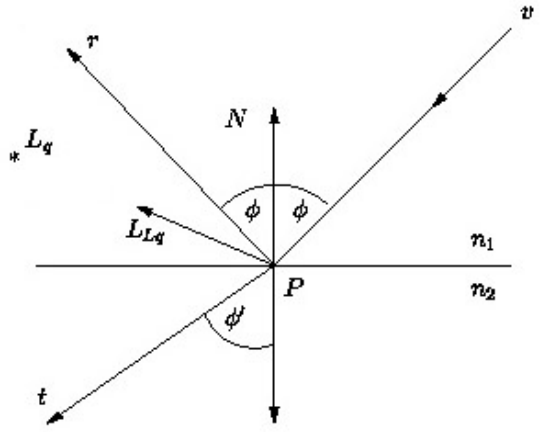

Abbildung 3: Die möglichen Strahlen die bei Raytracing auftreten: v bezeichnet den vom viewer ausgehenden, t den Lichtbeugungsstrahl. r ist der reflektierte Strahl und L_LQ der Strahl zur Lichtquelle (shadow ray). Bild von http://www-lehre.informatik.uni-osnabrueck.de/ cg/2000/skript/21_Ray_Tracing.html

(z.B. Phong-Shading), der Summe der Intensität aus der Reflexionsrichtung und der Summe der Intensität aus der Beugungsrichtung berechnet. Durch das Weiterverfolgen der Strahlen ergibt sich ein Strahlbaum, der die Strahlen graphisch wiedergibt.

2.2.1 Das Modell von Whitted

Dieses Modell wurde von Whitted ausführlich beschrieben. Der Term, der bei Phong-Shading die diffuse Reflektion modelliert, wurde auch von ihm übernommen. Die mathematische Repräsentation lautet wie folgt:

$$I = I_a + k_d * \sum_{j=1}^{j=ls} (N * L_j) + k_s * S + k_t * T$$

wobei

S = die Intensität des Lichts durch die Reflektion,
k_t = der Transmissionskoeffizient,
T = die Intensität des Lichts durch Beugung.

Berechnung von Koeffizienten k_s und k_t sind in diesem Modell Konstanten, für die bestmögliche Genauigkeit sollten sie Funktionen sein, die das Fresnel'sche Reflektionsgesetz approximieren[16, 17]. Dabei könnten etwa die Koeffizienten eine Funktion abhängig vom Einfallwinkel des Lichts sein, die je nach den Oberflächeneigenschaften des Materials variiert. Die Richtung der Reflektion wird durch das simple Gesetz, dass Einfallswinkel gleich dem Ausfallswinkel sein muss, bestimmt. Die Beugungsrichtung lässt sich ebenfalls leicht bestimmen, wenn man den Einfallswinkel V und den Normalvektor N der Oberfläche kennt.

Strahltiefe Eine wichtige Frage bei Raytracing ist die Strahltiefe, also auch die Tiefe des Strahlbaums, die zugelassen wird. Die Tiefe des Baums bestimmt, nach wie vielen Rückverfolgungen eine Lichtquelle zu schwach ist. Natürlich steigen bei zunehmender Tiefe des Baums auch die erforderlichen Rechenkosten.

2.2.2 Optimierungen

Das Raytracing-Verfahren liefert exzellente Bilder, braucht aber sehr viel Zeit. Der Großteil der Zeit wird dabei mit dem Test auf Schnittpunkte verbraucht. Mit zwei Ansätzen kann das Verfahren beschleunigt werden: Verringerung von

- den Kosten der einzelnen Operationen, oder
- der Anzahl der Operationen.

Boundage Boxes Der erste Weg hat eine Obergrenze, die bei modernen Raytracern auch erreicht wird. Eine Möglichkeit bei der zweiten Methode ist die Verwendung von *Boundage Boxes*. Die Idee hierbei ist es, die Schnittberechnung zunächst mit einem einfacheren Körper, z.B. einer Kugel, durchzuführen. Dadurch werden die im Endeffekt durchgeführten Schnittberechnungen verringert. Die Boundage Box muss das Ausgangsobjekt vollkommen umschließen. Wird ein Schnitt mit dieser festgestellt, muss dann der eigentliche Schnittpunkt mit dem Objekt berechnet werden. Eine Erweiterung dieses Verfahren ist es, mehrere Boundage Boxes ineinander zu platzieren. Dabei wird eine Art Hierarchie aufgebaut.

Raumaufteilung Eine andere Möglichkeit, die Berechnungen zu verringern, stellt die Unterteilung des Bildraums in mehrere Quader dar. Der Strahl kann dann durch die einzelnen Quader verfolgt werden. Da es für jeden Quader eine Liste der (teilweise) enthaltenen Objekte gibt, brauchen nur mehr mit diesen Schnittpunkte berechnet werden. Eine weitere Möglichkeit ist es, den Raum nicht gleichmäßig aufzuteilen, sondern in jedem Quader nur ein Objekt zu haben. Dies kann man mit einer nicht uniformen Raumaufteilung erreichen. Welche Art der Aufteilung die beste ist hängt von den verwendeten Objekten, deren Positionen und Berechnungskomplexität, den Lichtquellen und auch dem Beobachterstandpunkt ab.

3 Farbe

Wie man Farbe beschreibt, hängt unter anderem auch davon ab, wie der Mensch Farbe wahrnimmt. Daher wird in diesem Abschnitt kurz auf die wichtigsten Bestandteile des Auges eingegangen, die für die Farbrezeption verantwortlich sind.

3.1 Das menschliche Auge

Das menschliche Auge arbeitet ähnlich einer Kamera. Die Hornhaut und die Linse des Auges fokussieren ein Bild aus der Realität auf der Netzhaut, die wie ein Film einer Kamera fungiert. Im Brennpunkt der Netzhaut haben wir das beste Raum- und Farbsehen (siehe auch Abbildung 5). Auf der Netzhaut befinden sich die Rezeptoren des Auges, die Stäbchen und Zapfen.

Farbverarbeitung im Auge Die Stäbchen der Netzhaut sind für das Schwarz-weiß-Sehen verantwortlich, die Zapfen verarbeiten die Farbinformation im sichtbaren Spektrum, das zwischen 380 und 780 nm liegt. Es gibt drei Arten von Zapfen, die für bestimmte Wellenlängen sensitiv sind. Bezeichnet werden diese als L-, M- und S-Zapfen,

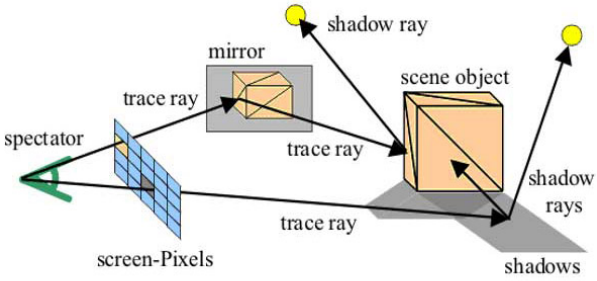

Abbildung 4: Hier wird der grundsätzliche Aufbau eines Raytracers gezeigt. Ausgehend vom Beobachter werden durch ein ”Gitter”, welches die Bildebene repräsentiert, Strahlen geschickt. Von diesen Strahlen werden dann die Schnittpunkte und -winkel berechnet. Je nach den Eigenschaften des getroffenen Objekts werden die Strahlen dann reflektiert und/oder durchdringen das Objekt, falls es transparent ist. Für die Erzeugung von Schatten werden Schattenstrahlen in Betracht gezogen, die von jedem Schnittpunkt mit einem Objekt zur Lichtquelle gesendet werden. Trifft dieser Strahl ein Objekt, so liegt das vorhergehende Objekt im Schatten dieses Objekts. Bild von http://www-lehre.informatik.uni-osnabrueck.de/ cg/2000/skript/21_1_Grundlagen.html

wobei L, M und S jeweils für long-, middle- und short-wavelength stehen. Die L-Zapfen verarbeiten also die roten, die M-Zapfen die grünen und die S-Zapfen die blauen Farbeindrücke.

4 Rendern mit RGB

Das RGB-System baut auf der Struktur des menschlichen Auges auf, es ist der menschlichen Wahrnehmung nachempfunden. Die drei Grundfarben des Systems sind wie im Auge Rot, Grün und Blau. Die Farbinformation wird durch diese drei Farbwerte beschrieben. Diese Werte, die den Beitrag einer Farbe zur endgültigen zusammengesetzten Farbe beschreiben, werden auch *Tristimulus-Werte* genannt. Die meisten konventionellen Renderingsysteme verwenden diese Farbdarstellung.

4.1 Probleme mit RGB

Soll Farbe in einem Renderingsystem korrekt behandelt werden, so muss die Abhängigkeit des Lichts von der Wellenlänge aufrechterhalten werden [9]. Das RGB-Modell beschreibt aber Licht und die Oberflächen einer Szene mit deren RGB-Werten auf einem bestimmten Monitor. Dadurch ist eine große Abhängigkeit von einem Monitor gegeben und es ist unmöglich, Vorhersagen über das tatsächliche Erscheinungsbild einer Szene in der Realität zu treffen.

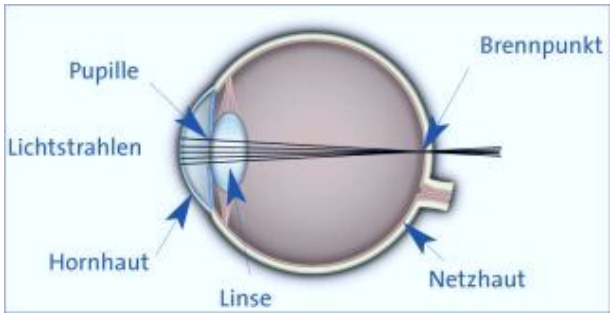

Abbildung 5: Schematische Darstellung des menschlichen Auges. Bild von http://mathsrv.ku-eichstaett.de/MGF/homes/didphy/mmoptik/bilder/

Spektralinformation geht verloren Bei Rendering im RGB-Farbraum geht jede Information über spektrale Eigenschaften eines Materials oder einer Oberfläche verloren. Das Licht, welches von einer Oberfläche abgestrahlt wird, wird durch die Produkte von den Rot-, Grün- und Blauwerten von dem einstrahlenden Licht und der Oberfläche selbst gegeben. Das RGB-Modell kann also die spektrale Variation nicht darstellen und die RGB-Werte sind außerdem noch von der Wahl des Monitors abhängig. Aus diesem Grund sind die Farben in einem RGB-Bild oft weit entfernt von den tatsächlichen korrekten Farben in der Realität.

Fehlen von physikalischen Effekten Durch das Rechnen mit Farbinformationen ist es unmöglich, jegliche Effekte, die auf spektralen Eigenschaften beruhen, in Betracht zu ziehen. In wenigen Fällen, wie etwa bei Fluoreszenz und Dispersion, ist es zwar möglich, diese auch mit RGB zu berechnen, das dabei erzielte Ergebnis ist aber kaum zufriedenstellend [1].

5 Spectral Rendering

Spectral Rendering ist ein Verfahren, das auf physikalischen Daten beruht. Im Unterschied zu RGB werden nicht Farb-, sondern Spektralinformationen im Renderingprozess verwendet. Durch dieses Aufbauen auf physikalischen Werten ergeben sich unterschiedliche Vor- und Nachteile, welche im folgenden Kapitel 5.1 behandelt werden. Weiters werden im Kapitel 5.2 mögliche Anwendungsbereiche aufgezeigt.

5.1 Vor-und Nachteile

Die Vor- und Nachteile von Spectral Rendering ergeben sich aus den Eigenschaften dieses Rendering Verfahrens.

[1] Siehe auch Kapitel 11.2 auf Seite 17

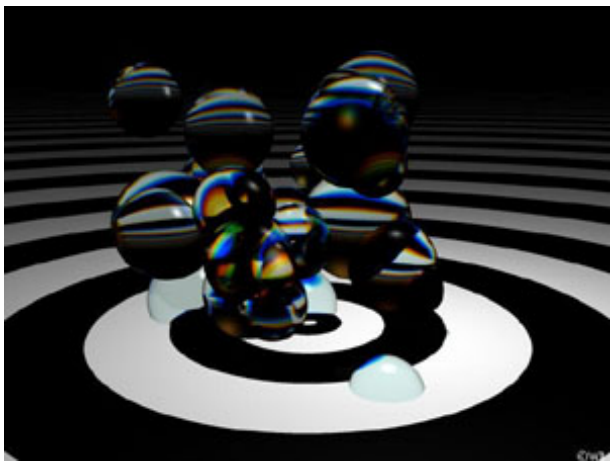

Abbildung 6: Ein Beispiel eines spektral gerenderten Bilds. Deutlich sind die Dispersionseffekte sichtbar, die nur mit RGB-Daten kaum reproduziert werden könnten. Bild von http://www.photon.at/~werner/light/spectrum/glass-40-dispersion.html

Da die Spektralinformation im Renderingprozess erhalten bleibt, kann im endgültigen Bild ein um einiges größerer Realismus erreicht werden, da viele Effekte, die auf spektralen Eigenschaften von Materialien und Oberflächen beruhen und die bei RGB-Rendering nicht in Betracht gezogen werden (können), nun mit einbezogen werden. Zu diesen gehören etwa Fluoreszenz, Dispersion, Polarisation und Metamerismus, welche im Kapitel 11 genauer erläutert werden.

5.1.1 Vorteile von Spectral Rendering

Repräsentation des Spektrums Die Grundidee von Spectral Rendering ist es, nicht mit Farbwerten zu rendern, wie dies beim RGB-System der Fall ist, sondern die Information über die volle spektrale Verteilung beizubehalten und im Spektralraum zu rendern. Dadurch erreicht man eine Farbgenauigkeit im Vergleich zur Realität, die in dieser Art und Weise mit RGB-Systemen nicht erzielt werden kann [19].

Physikalische Effekte Das Ziel von photorealistischem Rendern ist im Endeffekt, Bilder erstellen zu können, bei denen es keine Unterscheidungsmöglichkeit von der Realität gibt. Aus diesem Grund dürfen viele physikalische Effekte, die zum Erscheinungsbild einer Szene beitragen, nicht ignoriert werden, wie dies bei Rendern im RGB-Farbraum der Fall ist. Da bei Spectral Rendering nicht nur die Farbinformation, sondern auch die Information über das Aussehen der Spektralkurve berücksichtigt wird, ist es möglich, diese darzustellen. So kann ein viel größerer Realismus der gerenderten Bilder erreicht werden.

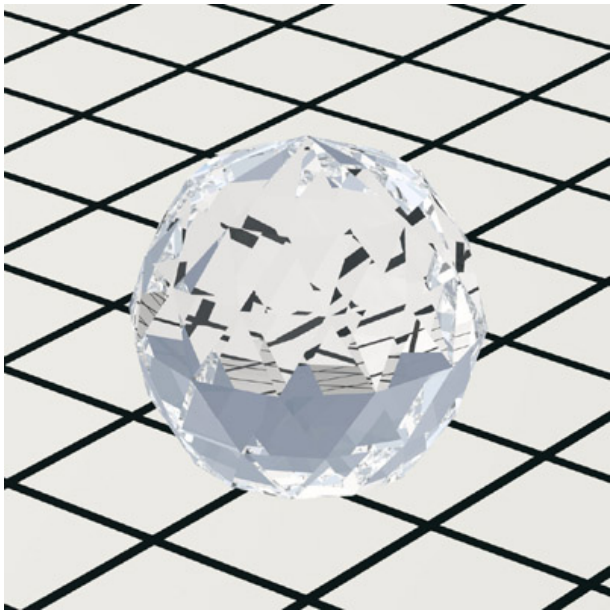

Abbildung 7: Dieses Kristallobjekt wurde gerendert, ohne die Dispersion zu berücksichtigen. Bild von http://www.artoolkit.org/Gallery/Dispersion/

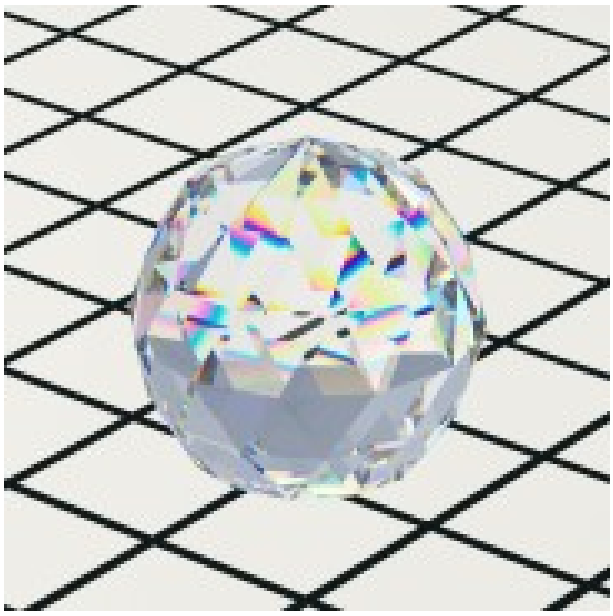

Abbildung 8: Derselbe Kristall mit Dispersion. Ohne Spektraldaten wäre diese Darstellung, bei der man die Lichtbrechung und Dispersion sieht, nicht möglich. Bild von http://www.artoolkit.org/Gallery/Dispersion/

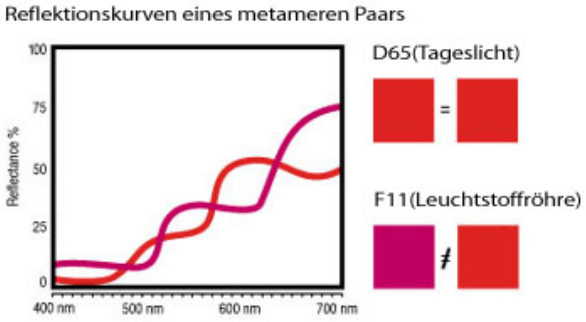

Abbildung 9: Zwei Proben werden als metamer bezeichnet, wenn sie dieselben RGB-Werte, aber unterschiedliche Spektren besitzen. Je mehr Schnittpunkte ihre Spektralkurven haben, umso stärker ist der Metamerismus. Bild von http://www.gecolorxpress.com/jsp/extranet/user/-start/basics10.jsp

Metamerismus Metamerismus ist ein wichtiges Problem beim Vergleichen von Farben. Kurz gesagt sind zwei Farben metamer, wenn sie denselben RGB-Farbwert, aber unterschiedliche Spektralverteilungen besitzen (siehe Abbildung 9). Schon aus dieser Tatsache ist ersichtlich, dass Metamerismus beim Rendern mit RGB-Farbwerten keinesfalls berücksichtigt werden kann. Zwei Farben, die im RGB-Farbraum völlig ident sind, können bei einem spektralen Rendering System (falls Metamerismus auftritt) durch ihre unterschiedliche Spektralverteilung auseinandergehalten werden. In Kapitel 11.4 auf Seite 19 wird Metamerismus genauer erläutert.

5.1.2 Probleme mit Spectral Rendering

Obwohl die Vorteile von Spectral Rendering offensichtlich sind, wird diese Methode in der Praxis nur vereinzelt eingesetzt. Ursachen dafür sind etwa das fehlende Vorhandensein von spektralen Daten, die als Input für Spectral Rendering benötigt werden, die Möglichkeit, Effekte im Bild zu ”faken”, das Problem der gemischten RGB- und Spektraldaten und die zusätzlichen Rechenkosten, die durch das Rechnen im Spektralraum entstehen. In diesem Abschnitt werden diese Gründe genauer erläutert [14, 19].

Wenig Spektraldaten. Spektrale Daten sind in der Praxis im Prinzip nicht vorhanden. Mehrere Forscher beschäftigen sich zwar damit, spektrale Daten zu erfassen und verfügbar zu machen[15], einfacher wäre es aber, wenn diejenigen, die solche Daten benötigen, mit Spectrophotometern arbeiten würden. Diese Messgeräte sind allerdings teuer und werden für Rendering kaum benutzt. Außerdem existiert (noch) keine kommerzielle Rendering Applikation, die Daten von einem Spektrophotometer als Input akzeptiert.

”Nachbauen” von Effekten. Oftmals erscheinen physikalische Effekte wie Fluoreszenz oder Polarisation zu wenig wichtig, um den Mehraufwand an ihrer Implementation zu rechtfertigen. Dies ist umso mehr der Fall, weil viele solche Effekte für die üblichen Anwendungen der Computergrafik kaum benötigt werden. Falls sie in einem speziellen Fall doch nötig wären, so ist es für einen guten 3D Artist leicht möglich, diese ”nachzubauen” [19]. Zu den Methoden dieses Nachbauens zählt etwa das Setzen von zusätzlichen ”Lichtquellen”, die Farb- und Leuchteffekte darstellbar machen. Bei Dispersion und Fluoreszenz ist es sogar möglich, diese auch im RGB-Farbraum zu berechnen, allerdings mit kaum zufriedenstellenden Ergebnissen[1], siehe dazu Kapitel 11.2 auf Seite 17.

”Data mixing problem” Ein weiterer Grund, warum Spektralrenderer kaum eingesetzt werden, ist das Problem der Vermischung von Daten. Angenommen, jemand möchte in einer Szene sowohl Spektral- als auch RGB-Daten von Oberflächen verwenden. Dann sind Umwandlungen unumgänglich, im Endeffekt existieren dazu zwei Möglichkeiten. Entweder es werden aus den RGB-Daten Spektren erzeugt oder die Spektralwerte werden zu RGB-Werten reduziert. Letzteres ist natürlich ein Rückfall, der jedes Zurückgreifen auf die spektrale Information und damit auch das spektrale Rendern unmöglich macht.

Rechenkosten Ein weiteres Problem, das sich durch das Beibehalten der Spektralinformation ergibt, sind die zusätzlichen Rechenkosten. Bei vielen Renderings steht die Berechnung von Schatten im Vordergrund, auch bei Rendering mit RGB-Farbwerten. Müssen all diese Berechnungen mit der maximalen spektralen Auflösung durchgeführt werden, so wiegen die erhaltenen Vorteile die zusätzlichen Rechenkosten nicht auf. Da aber, wie die Vergangenheit gezeigt hat, vermutlich die Computer immer besser und schneller werden, wird die Qualität und Geschwindigkeit von Renderingsystemen immer besser werden. Dadurch wird dann auch die Verwendung von Spectral Rendering erleichtert.

Um diesen Nachteil der zusätzlichen Rechenkosten so gering als möglich zu halten, versuchen viele Forscher, Spectral Rendering so effizient als möglich zu gestalten. Meyer [7] hat vier spektrale Samples verwendet und effiziente Ergebnisse erzielt. Allerdings treten dabei, wie dies auch bei anderen Point Sampling Methoden der Fall ist, Probleme auf, wenn das Spektrum hohe Spitzen enthält. Eine andere Methode ist die Verwendung von Basisfunktionen, wie dies Percy [9, 8] vorgeschlagen hat. Sein Verfahren benötigt bei minimaler Genauigkeit nur dreimal soviel Rechenkosten wie eine Standardberechnung im RGB-Farbraum.

5.2 Anwendungsbereiche von Spectral Rendering

Mit dem Realismus, der durch Spectral Rendering erreicht werden kann, sind ganz neue Dinge möglich. So könnten etwa in der Architektur mit Spektraldaten von Materialien, aus denen ein Gebäude erbaut werden soll, realistische gerenderte Modelle entstehen. Überall dort, wo realistische Simulationen benötigt werden, kann Spectral Rendering eingesetzt werden.

5.2.1 Architektur

In der Architektur spielen Modelle eine große Rolle. Architekten arbeiten mit physikalischen Materialien, setzen diese zusammen und bauen Modelle ihres Entwurfs, um sich das am Papier konstruierte Modell genauer vorstellen zu können. Aber auch computerunterstützte Hilfsmittel kommen zum Einsatz. Computergenerierte ”Walkthroughs”, bevor überhaupt ein Stein des Gebäudes gebaut wurde, sind keine Seltenheit. Wichtig ist dabei aber immer der Bezug zum realen Material, da der Computer hier die Rolle hat, zu zeigen, wie Objekte in der realen Welt aussehen würden. Da das genaue Aussehen aber mit einem RGB-Renderingsystem nicht dargestellt werden kann, dient die Computersimulation eher als Anfangspunkt denn als genaue Darstellung. Genau hierbei kommt aber der Vorteil von Spectral Rendering zum Zug: die Farbechtheit und damit auch die Realitätsnähe ist um einiges größer.

5.2.2 visuelle Simulationen

Jegliche Art von visueller Simulation gewinnt an ”Echtheit”, wenn Spectral Rendering verwendet wird. Wie schon gesagt, sind Simulationen in der Achitektur von großer Wichtigkeit. Andere Anwendungsmöglichkeiten wären zum Beispiel überall dort, wo Produkte erzeugt werden, deren Erscheinungsbild ”gut ausschauen” soll. Vorstellbar wäre hier etwa die Erzeugung von Stoffen oder auch die Automobilindustrie, diese Liste könnte man aber lange weiterführen.

5.2.3 Geodäsie

Die Geodäsie befasst sich mit der Erfassung von Daten über die Erde mittels Satelliten. Dies ist zwar kein direkter Anwendungsbereich für Spectral Rendering, es gibt aber einen anderen Grund, warum die Geodäsie dafür von großer Wichtigkeit ist. Wie schon in Kapitel 5.1.2 auf Seite 6 beschrieben wurde, sind Daten über Spektralverteilunden äußerst rar. Außerdem werden Spektrophotometer, also Messgeräte, die die Spektralverteilung von Oberflächen bestimmen, kaum eingesetzt.

Die Satelliten, die um die Erde kreisen, messen aber Spektraldaten, da durch diese zum Beispiel die Art der Vegetation bestimmt werden kann. Solche Spektraldaten sind in Referenzdatenbanken gespeichert, welche daher eine der seltenen Quellen für Reflexionswerte darstellen.

6 Darstellung von Spektren

In der Praxis gibt es mehrere Möglichkeiten Spektren darzustellen, damit ein Renderingsystem mit diesen arbeiten kann. In den meisten Fällen sind die Spektren recht glatte Kurven, in manchen Fällen, wie z.B. bei Fluoreszenz, kann die Kurve einige Spitzen aufweisen, was die adäquate Speicherung des Spektrums erschwert. Nun gilt es die Methode auszuwählen, die für die konkrete Anwendung die Balance zwischen annehmbarer Rechenzeit und brauchbarem Ergebnis findet. [17]

6.1 Direct Sampling

Bei dieser Methode wird das Spektrum in regelmäßigen Intervallen (im Bereich von 10nm) abgetastet und so ein digitalisiertes Abbild der Kurve gespeichert. Dabei kann jedoch relevante Information, wie Spitzen in der Kurve, die bei fluoreszierenden Lichtquellen auftreten, verloren gehen. Nimmt man stattdessen kleinere Intervalle wird wiederum der Speicheraufwand zu groß. [17]

6.2 Basisfunktionen

Diese lineare Methode versucht eine Kurve durch eine Linearkombination einfacher Basisfunktionen zu beschreiben. Hier kann es dahingehend zu Problemen kommen, dass diese Menge nur eine bestimmte Gruppe von Spektren gut beschreiben kann, jedoch nicht auf ein beliebiges Spektrum anwendbar ist. Mann muss außerdem darauf achten, dass, wenn sehr viele Basisfunktionen benötigt werden, die Methode des direkten Samplings bei geringerem Rechenaufwand effizienter sein kann.

Vergleicht man die beiden Methoden in Hinsicht auf spektrale Multiplikationen, so ist klar das direkte Sampling im Vorteil, da dieses einen Aufwand der Größenordnung $O(n)$ aufweist, während man mit Basisfunktionen mit einem Aufwand von $O(n^2)$ rechnen muss. [17]

6.3 Hybride Ansätze

Um die Vorteile der beiden vorgestellten Methoden nützen und die Nachteile reduzieren zu können, gibt es die sogenannten *hybriden* oder *zusammengesetzten* Ansätze.

Um die allgemeine Form eines Spektrums darzustellen werden Funktionen niedriger Ordnung verwendet. Eventuell auftretende Spitzen im Spektrum werden seperat behandelt. So ist es möglich ein sehr genaues Resultat bei gleichzeitig niedrigem Speichervolumen zu erzielen.

Doch auch diese vielversprechende Methode hat ihren Nachteil: die spektralen Multiplikationen sind vergleichsweise komplex! [17]

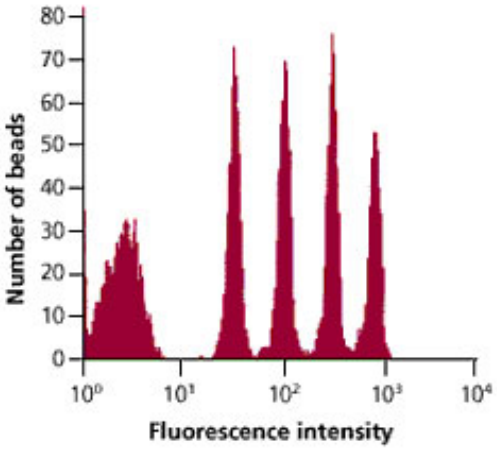

Abbildung 10: Fluoreszierendes Spektrum

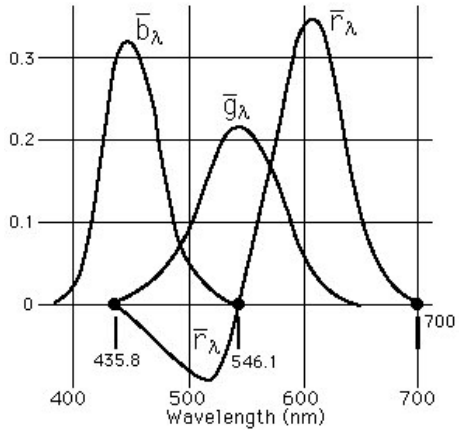

Abbildung 12: Der RGB-Farbraum; Bild von http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/vision/colspa.html

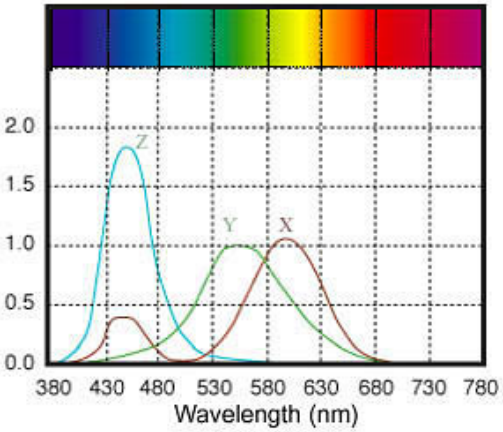

Abbildung 11: Der CIE XYZ-Farbraum; Bild von http://www.creativepro.com/printerfriendly/story/13036.html

7 Umrechnungen

7.1 Spektrum zu RGB

Zur Umrechnung eines gegebenen Spektrums in entsprechende RGB-Farbwerte, muss zuerst der passende CIE XYZ Farbwert bestimmt werden. Dies geschieht durch folgende Funktionen (*color matching functions*): [17]

$$X = \int_{380}^{780} x(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

$$Y = \int_{380}^{780} y(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

$$Z = \int_{380}^{780} z(\lambda)S(\lambda)d\lambda$$

Der XYZ-Wert wird danach durch Multiplikation mit Hilfe einer Transformationsmatrix T in einen RGB-Wert umgerechnet. [3]

$$T = \begin{pmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{pmatrix}$$

7.2 RGB zu Spektrum

Um ein Bild realistisch darstellen zu können ist oft eine volle spektrale Repräsentation nötig. Viele der verfügbaren Modelle und Modellformate spezifizieren Materialien und Licht als RGB-Tripel. Deshalb ist die Umwandlung von RGB-Farbwerten in Spektren nötig.

Leider ist diese Umwandlung keine eindeutige Operation, da für jedes positive RGB-Tripel unendlich viele Spektren existieren, die dieselbe Farbe liefern. Diese Spektren nennt man *Metamere*. Da nicht genügend Informationen verfügbar sind, das 'richtige' Metamer auszuwählen, versucht man ein möglichst gutes zu finden. Dafür wurden bereits Algorithmen entwickelt, einer von Brian Smits.

Jede Farbe kann als Summe von Weiß plus einer Farbe aus Cyan, Magenta oder Gelb plus einer weiteren Farbe aus Rot, Grün oder Blau dargestellt werden. Der Konvertierungsprozess versucht soviel wie möglich des weiteren Spektrums (Weiß, dann entweder Cyan, Magenta oder Gelb) abzuziehen, bevor der Rest konvertiert wird, unter Verwendung von Rot, Grün oder Blau. Dazu präsentiert Smits folgenden Pseudocode: [12]

```
Spectrum RGBToSpectrum (red, green,
                        blue)
{
   Spectrum ret = 0;
   if (red <= green && red <= blue)
   {
      ret += red * whiteSpectrum;
      if (green <= blue)
```

```
      {
         ret += (green - red) *
                cyanSpectrum;
         ret += (blue - green) *
                blueSpectrum;
      }
      else
      {
         ret += (blue - red) *
                cyanSpectrum;
         ret += (green - blue) *
                greenSpectrum;
      }
   }
   else if (green <= red &&
            green <= blue)
      ...
   else // blue <= red &&
        // blue <= green
      ...
}
```

8 Mathematische Grundlagen

8.1 Koheränzmatrizen

Koheränzmatrizen sind ein Formalismus zur Beschreibung polarisierten Lichts. Man nimmt eine monochromatische Welle an, die sich entlang der positiven z-Achse ausbreitet. Der Vektor E besteht aus zwei orthogonalen Komponenten in x- und in y-Richtung. Die Beziehung zwischen diesen beiden Komponenten reicht von stark zusammenhängend (*polarisiertes Licht*) bis zu gar keinem Zusammenhang (*unpolarisiertes Licht*). Der Koheränzstatus einer solchen Welle kann nun durch eine Matrix J beschrieben werden: [17]

$$J = \begin{pmatrix} J_{xx} & J_{xy} \\ J_{yx} & J_{yy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} < E_x E_x^* > & < E_x E_y^* > \\ < E_y E_x^* > & < E_y E_y^* > \end{pmatrix}$$

E_x, E_y stellen den Zeitdurchschnitt der E-Feldvektoren für x- und y-Richtung dar. E_x^* steht für die komplexe Konjungierte von E_x. J_{xx}, J_{yy} haben reelle Werte und $T(J) = J_{xx} + J_{yy}$ drückt die totale Lichtaustrahlung der Welle aus. Die komplexen Konjugierten J_{xy}, J_{yx} beschreiben die Beziehung zwischen den x- und den y-Komponenten von E. Bei voll polarisiertem Licht stehen diese Komponenten in starker Beziehung und $|J|$ verschwindet.

8.2 Coherency Matrix Modifiers CMM

Um Filteroperationen, also die Interaktion von Licht mit einem Medium, zu beschreiben, werden Coherency Matrix Modifiers verwendet. CMMs haben die Form von 2×2-Matrizen mit komplexen Werten. Beziehen sich alle beteiligten Elemente auf dasselbe Referenzkoordinatensystem können solche Matrizen direkt auf eine Koheränzmatrix angewandt werden:
$J_p = M_p J M_p^+$.

J..... Koheränzmatrix
M_p.... Modifier
M_p^+... konjugierte transponierte von M_p

Befinden sich Modifier und Koheränzmatrix nicht im gleichen Referenzsystem, so muss zuvor eine entsprechende Transformation vorgenommen werden. [17]

8.3 Der 'Stokes'-Vektor

Der 'Stokes'-Vektor stellt eine mathematisch einfachere alterative Darstellung für polarisiertes Licht dar. Die Beschreibung durch einen Stokes-Vektor ist äquivalent zu der Darstellung durch Koheränzmatrizen, jedoch mit dem Vorteil, dass nur reelwertige Terme zur Beschreibung des Polarisationsstatus verwendet werden.

Sowohl Stokes-Vektoren als auch Müller-Matrizen sind nur dann sinnvoll, wenn wenn sie in ihrem jeweiligen Referenzkoordinatensystem betrachtet werden. Das bedeutet in weiterer Folge, dass in einem Renderingsystem nicht nur das Licht, sondern auch Filter eine Orientierung im dreidimensionalen Raum haben, und mit einem passenden Koordinatensystem gespeichert werden müssen.

Stokes-Vektor Notation:

$$E_{n,0} = \kappa(V_x^2 + V_y^2)$$
$$E_{n,1} = \kappa(V_x^2 - V_y^2)$$
$$E_{n,2} = \kappa(2V_x V_y \cos\gamma)$$
$$E_{n,3} = \kappa(2V_x V_y \sin\gamma)$$

Die erste Komponente beschreibt die unpolarisierte Intensität der Lichtwellen. Die zweite und die dritte Komponente beschreiben die Präferenz der Welle zu linearer Polarisation bei null und bei 45 Grad. Die letzte Komponente des Vektors sagt etwas über die rechtszirkuläre Polarisation aus.

Die erste Komponente ist klarerweise immer positiv, während die anderen drei Komponenten sich im Intervall $[-E_{n,0}, E_{n,0}]$ bewegen. [17]

8.4 Fresnelterme

In ihrer vollständigen Form bestehen die Fresnelterme aus zwei Paaren von Gleichungen.

Das erste Paar bestimmt das Ausmaß des einfallenden Lichts, das für die x- und die y-Komponente separat reflektiert wird.

Das zweite Paar beschreibt die *retardance*, der das einfallende Licht unterworfen ist. Diese ist eine relative Phasenverschiebung, die die vertikale und die horizontale Komponente der Lichtwelle, während der Reflexion erleben.

Die Fresnelgleichungen für eine dielektrische komplexe Schnittstelle lauten:

$$F_\Delta(\theta,\eta) = \frac{a^2+b^2-2a\cos\theta+\cos^2\theta}{a^2+b^2+2a\cos\theta+\cos^2\theta}$$

$$F_{||}(\theta,\eta) = \frac{a^2+b^2-2a\sin\theta\tan\theta+\sin^2\theta\tan^2\theta}{a^2+b^2+2a\sin\theta\tan\theta+\sin^2\theta\tan^2\theta}F_\Delta(\theta,\eta)$$

$$\tan\delta_\Delta = \frac{2\cos\theta}{\cos^2\theta-a^2-b^2}$$

$$\tan\delta_{||} = \frac{2b\cos\theta[(n^2-k^2)b-2nka]}{(n^2+k^2)^2\cos^2\theta-a^2-b^2}$$

mit

$$\eta = n + ik$$

$$2a^2 = \sqrt{(n^2-k^2-\sin^2\theta)^2+4n^2k^2}+n^2-k^2-\sin^2\theta$$

$$2b^2 = \sqrt{(n^2-k^2-\sin^2\theta)^2+4n^2k^2}-n^2+k^2+\sin^2\theta$$

$F_{||}$ ist die Reflexionskomponente parallel zur Einfallsebene. F_Δ steht normal darauf.

Unter der Annahme, dass man nur an der Strahlungsintensität des reflektierenden Lichtes interessier ist, kann man eine häufig benutzte Vereinfachung $F_{average}$ treffen:

$$F_{average} = \frac{(F_\Delta+F_{||}}{2}$$

mit δ_Δ und $\delta_{||}$ als *retardance*-Faktoren der zwei Wellenkomponenten. [17]

8.5 Müller Matrizen

Diese Matrizen stellen eine Datenstruktur zur Beschreibung einer Filteroperation durch Materialien dar, die den Polarisierungsstatus des einfallenden Lichts, das durch einen Stokes-Vektor repräsentiert wird, ändern. Der Modifikator eines 4-Vektors ist eine 4x4-Matrix. Die Elemente einer solchen Matrix entsprechen bestimmten physikalischen Filtereigenschaften.

Ein Beispiel für eine in der Praxis verwendete Müller-Matrix ist ein *idealer linearer Polarisierer* T_{lin}, deren Polarisationsachse um einen Winkel θ gegen das Referenzkoordinatensystem geneigt wird:

$$T_{lin} = \begin{pmatrix} 1 & cos2\theta & sin2\theta & 0 \\ cos2\theta & cos^2 2\theta & sin2\theta.cos2\theta & 0 \\ sin2\theta & sin2\theta.cos2\theta & sin^2 2\theta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

Zum Zweck des physikalisch korrekten Renderings ist es auch wichtig die Müllermatrix, die bei der Auswertung der Fresnelterme [2] entsteht, zu kennen. Für eine gegebene Wellenlänge (Brechungsindex) und den Lichteinfallswinkel lautet die Fresnelmatrix $T_{Fresnel}$ folgendermaßen: [17]

$$T_{Fresnel} = \begin{pmatrix} A & B & 0 & 0 \\ B & A & 0 & 0 \\ 0 & 0 & C & -S \\ 0 & 0 & S & C \end{pmatrix}$$

mit

$A = \frac{(F_\Delta+F_{||})}{2}$
$B = \frac{(F_\Delta-F_{||})}{2}$
$C = \cos(\delta_\Delta - \delta_{||})$
$S = \sin(\delta_\Delta - \delta_{||})$.

8.6 Filter Rotation

Eine Aneinanderreihung von Filtern bedeutet in der Praxis eine Kette von Matrixmultiplikationen von Müller-Matrizen. Die Müller-Matrizen müssen jedoch zuvor in einem neuen Referenzkoordinatensystem ausgerichtet werden.

Im Falle von polarisiertem Licht, beeinflusst eine Rotation um einen Winkel ϕ nur die zweite und die dritte Komponenten eines Stokes-Vektors. Die zugehörige Rotationsmatrix hat dann folgende Form:

$$M(\phi) = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & cos2\phi & sin2\phi & 0 \\ 0 & -sin2\phi & cos2\phi & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Diese Form von Rotationsmatrizen kann jedoch nicht nur auf Stokes-Vektoren angewandt werden, sondern auch auf eine Müller-Matrix $T(0)$, in ähnlicher Form wie auf die Coherency Matrix Modifiers:

$$T(\phi) = M(-\phi).T(0).M(\phi)$$

Die Matrix $M(\phi)$ hat eine weitere interessante Eigenschaft: sie ist die Müller-Matrix eines *idealen zirkularen Renderers*. Linear polarisiertes Licht, dass auf ein Material dieses Typs trifft, wird um den Winkel ϕ gedreht. Zu den Materialien, die diese Eigenschaft aufweisen, in diesem Zusammenhang auch *optische Aktivität* genannt, gehören u.a. Kristallquarze und Dextrose. [17]

9 Bestehende Systeme

9.1 Cornell Image Synthesis Testbed

Dieses System war aller Wahrscheinlichkeit nach der erste Spectral Renderer überhaupt und wurde von Hall und Greenberg entwickelt. Es war in der Lage Farbberechnungen mit Intervallen bis zu 1nm innerhalb des sichtbaren Bereiches durchzuführen. Das Testbed konnte mit beliebigen Samples arbeiten als auch mit dem RGB- und dem CIE XYZ-Farbmodell.

[2] siehe Abschnitt 3.4

Das beste Resultat konnte bei einer Eingabe von neun Samples erzielt werden. Die Berechnungsdauer lag nur zwei Prozent über der eines RGB-Renderers, das Ergebnis erwies sich jedoch als wesentlich farbtreuer.
Eine weitere Neuheit brachte dieses System insofern, dass die resultierenden Bilder als *high dynamic range CIE XYZ Farbraum-Bilder* gespeichert wurden. [17]

9.2 Wavefront Tracking

Dieses Renderingsystem, entwickelt von Collins, war in der Lage Dispersionseffekte zu rendern. Zur spektralen Auswertung von Oberflächenreflektionen wurden Fresnelterme verwendet. [3]

Collins verwendete sein System außerdem zur Erforschung der visuellen Eigenschaften von zusammengesetzten Augen. Insekten können in einem anderen Bereich des elektromagnetischen Spektrums sehen, sodass man spektrale Bilder benötigt um Vergleiche mit der menschlichen Wahrnehmung treffen zu können. [17]

9.3 Lineare Farbrepräsentation

9.3.1 Prinzip

Peercy war einer der ersten, der eine Alternative zum direkten Sampling verwendete. Stattdessen wählte er eine Repräsentation der Spektren durch sorgfältig gewählte Grundfunktionen. So ist es möglich ein Spektrum mit nur vier oder fünf spektralen Samples zu beschreiben. [17]

Die Beleuchtungsberechnungen können als Generalisierung von Point-Sampling angesehen werden. Dieses Sampling wird für Spektren mit glatter Oberfläche verwendet. Durch Verwendung von Vektor Analysis können Basisfunktionen ausgewählt werden, die effizienter ungewöhnliche Spektren beschreiben.

Die Verwendung von einfachen Basisfunktionen macht den Renderingprozess komplett linear, und ermöglicht es, diese Methode in Standardrenderer einzubauen. Außerdem ist die Menge der Basisfunktionen frei wählbar und kann dazu genutzt werden die Effizienz des Renderingprozesses zu steigern.

9.3.2 Wahl der Basisfunktionen

Ist das Beleuchtungsmodell nicht stückweise teilbar, müssen die Oberflächenmatrizen für jede geometrische Konfiguration berechnet werden. Dies bedeutet, dass die effektivsten Basisfunktionen Pointsamples darstellen. Ist das Modell jedoch stückweise trennbar, dann werden die Komponenten der Oberflächenreflexionen durch $m \times m$-Matrizen dargestellt. Das führt dazu, dass Reflexionsberechnungen zu quadratischen Multiplikationen führen. Sind die Basisfunktionen jedoch Pointsamples sind die Oberflächenmatrizen diagonal und die Reflexion benötigt nur m Multiplikationen.

[3] siehe Abschnitt 3.4

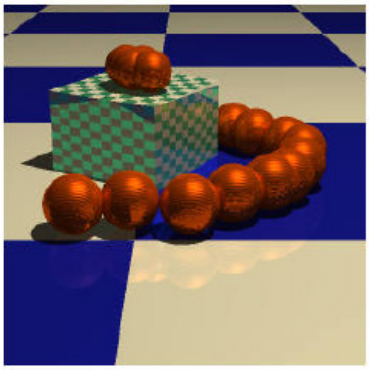

Abbildung 13: Sampling mit 1nm Schritten; Bild von *Linear color representations for full speed spectral rendering*

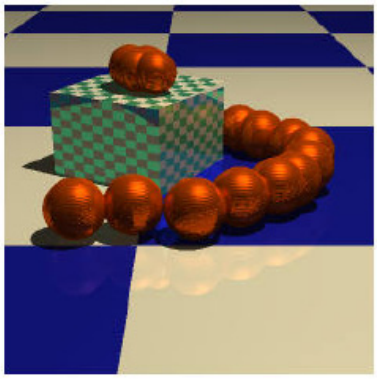

Abbildung 14: Darstellung durch 5 Basisfunktionen; Bild von *Linear color representations for full speed spectral rendering*

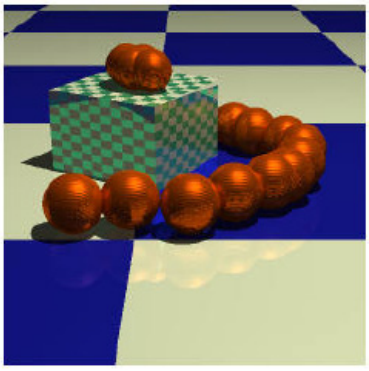

Abbildung 15: Darstellung mit 25 Samples; Bild von *Linear color representations for full speed spectral rendering*

Bei der Wahl der Basisfunktionen kommt es auch auf die zu verarbeitenden Spektren an. Für relativ gleichmäßige Spektren kann das Pointsampling (mit Hilfe von Riemann Summierung) relativ recht effizient sein, für sehr komplizierte Spektren jedoch ist es ratsamer mit Basisfunktionen (Charakteristische Vektor Analysis) zu arbeiten. [8]

9.4 Adaptives Spectral Rendering mit Wahrnehmungskontrolle

Von Iehl wurde ein hybrides stochastisches Renderingsystem entwickelt, dass auch spektrales Rendering unterstützt. Bei diesem System wird die Repräsentation der Spektren so adaptiert, dass mit der geringsten spektralen Repräsentation ansprechende Ergebnisse erzielt werden. Beispielsweise werden Nuancen, die vom menschlichen Auge sowieso nicht wahrgenommen werden können, weggelassen. [17]

Dieses System versucht sowohl die spektrale Repräsentation von Licht und Materialien einzubeziehen, als auch die unabhängige Ausbreitung von Wellen im sichtbaren Bereich. Außerdem versucht man damit die Kontrolle über den Wahrnehmungsfehler zu erreichen. Der sichtbare Wellenlängenbereich wird in Wellenbündel aufgesplittet, die ein ähnliches Verhalten und Ausbreitung aufweisen. Eine fortschreitende Berechnung, die auf einer Schätzung des entstehenden Farbfehlers basiert, erlaubt das Finden einer zufriedenstellende Lösung, während viel weniger Berechnungen getätigt werden müssen als in einer vollständigen Berechnung.

Die Berechnung des Bildes erfolgt in zwei Durchgängen. Im ersten wird die Lichtenergie, die von den Lichtquellen ausgeht, entlang von spiegelnden LS^+D Pfaden verfolgt. In diesem Schritt wird von allen Materialien ein ähnliches Verhalten angenommen. Im zweiten Schritt wird die einfallende Lichtenergie in jedem Pixel erfasst, durch die Auswertung einer Repräsentation der Interaktion zwischen Licht und Materialien mit Hilfe von Operatoren. Dabei können zwei verschiene Situationen entstehen. Ein Pfad kann auf ein das Licht brechendes Objekt treffen und/oder auf eine Szenerie mit durchschnittlichen Photonen. In beiden Fällen müssen die Pfade des Lichts für jede Wellenlänge abgetastet werden.

Die Auswertung jedes Pixels ist eine fortschreitende Berechnung, die die sichtbaren Wellenlängenbereiche in Intervalle unterteilt. Die Berechnung wird solange fortgeführt, bis der Wahrnehmungsfehler des momentanen Pixels unter einen gegebenen Schwellenwert fällt. In jedem Berechnungsschritt wird das Intervall mit dem größten Fehler weiter unterteilt.

Diese Vereinfachung der Berechnung ermöglicht es, sich auf die Teile der Szene zu konzentrieren, wo es beispielsweise transparente Objekte gibt, und auf jene, die die wichtigsten Teile des sichtbaren Wellenlängenbereichs beinhalten. Die gesteigerte Effizienz dieser Technik ergibt

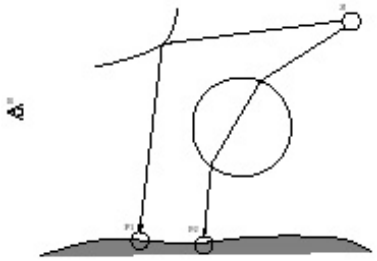

Abbildung 16: 1. Schritt für die Verfolgung von spiegelnden LS+D Pfaden; Bild von *An Adaptive Spectral Rendering with a Perceptual Control*

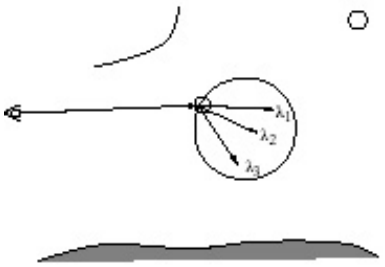

Abbildung 17: Gestreuter Gathering-Operator auf einem ES+ Pfad; Bild von *An Adaptive Spectral Rendering with a Perceptual Control*

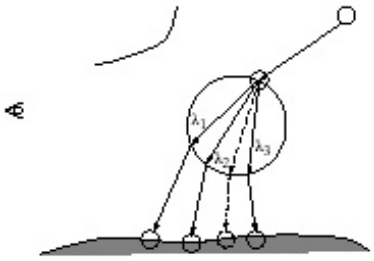

Abbildung 18: Erneute Anwendung des Operators auf den LS+D Pfad; Bild von *An Adaptive Spectral Rendering with a Perceptual Control*

Abbildung 19: Der große Diamant wurde mit hybridem Spectral Rendering berechnet. Der keine Diamant ist ein Foto der echten Vorlage; Bild von *A spectrally based framework for realistic image synthesis*

sich durch die Reduzierung der spektralen Berechnungen. [4]

9.5 Hybrides Spectral Rendering

Das eigentliche Ziel der Generierung von Bildern durch den Computer, ist diese ununterscheidbar von der Realität zu machen. Jedes in der Natur auftretende Phänomen ist letztendlich eine Mischung aus geometrischen und optischen Faktoren. Dabei ist der optische Faktor, der in enger Beziehung zu den optischen Effekten steht, eine abschätzbare und unter Kontrolle zu bekommende Größe. Ein System, das in der Lage ist diese optischen Effekte zu meistern ist auch in der Lage alle natürlichen Phänomene durch Rendering darzustellen. [13]

9.5.1 Prinzip

Natürliche Spektren können beliebige Formen aufweisen, die eine unendlichen Anzahl von Parametern erfordern um exakt beschrieben werden zu können. Es ist leicht ersichtlich, dass mit einer zwar endlichen, aber sehr großen Anzahl von Parametern kaum gearbeitet werden kann, da in einer Szene hunderte oder tausende solcher Spektren auftreten können, was den Rechenaufwand ins unermessliche steigen ließe.

So ergeben sich einige Anforderungen an ein Spektrum: es soll sowohl kompakt und effizient sein als auch ein adäquates Abbild der Realität liefern. Außerdem muss eine schnelle spektrale Multiplikation möglich sein, da die Grundoperationen Reflexion und Transmission diese erfordern.

Sampling kann eine hohe Genauigkeit liefern, wenn viele Samplingpunkte verwendet werden. Außerdem ermöglicht es eine schnelle Matrizenmultiplikation. Der ersichtliche Nachteil dieser Methode ist, dass man ein Spektrum so nicht kompakt darstellen kann. Besonders bei Spektren, die Spikes aufweisen, wird diese Methode ineffizient, und diese Art von Spektren kommt jedoch oft in der Natur vor.

Der andere gebräuchliche Ansatz ist die Beschreibung der Spektren durch eine Sammlung einfacher Basisfunktionen, die mit Hilfe numerischer Berechnungen eruiert werden. Dieses Modell ist nun kompakt, flexibel und liefert ein adäquates Ergebnis, jedoch sind hier die Matrizenmultiplikationen sehr kostspielig.

So wurde ein neuer Ansatz entwickelt, um die Nachteile und Beschränkungen des direkten Samplings wie auch der Basisfunktionen zu vermindern. Das Spektrum wird in zwei Teile aufgespalten: der glatte Teil der Kurve und die auftretenden Spikes. Der glatte Teil wird durch Fourierkoeffizienten dargestellt, ein Spike wird durch seine Position und seine Höhe beschrieben. So können Spektren $S(\lambda)$ allgemein dargestellt werden:

$$S(\lambda) = S_{smooth}(\lambda) + S_{spikes}(\lambda)$$

Diese Modell liefert akkurate, kompakte und effiziente Ergebnisse bei optischen Effekten wie Dispersion, Diffraktion und Fluoreszenz. [13]

9.5.2 Architektur

Für die Arbeit mit diesem Framework ist es notwendig, dass alle optischen Daten als spektrale Funktionen beschrieben werden. Licht sollte in Form spektraler Energieverteilung beschrieben werden, dunkle Objekte durch die Reflexion und transparente Objekte durch spektrale Absorption oder Lichtdurchlässigkeit. Spektrale Daten können einerseits durch experimentelle Messungen gewonnen werden, andererseits durch verlässliche numerische Berechnungen, die in einem standardisierten Format in einer Datenbank abgelegt werden.

In manchen Fällen kann es jedoch passieren, dass die gewünschten Daten nicht in spektraler Form verfügbar sind. Dann müssen die spektralen Daten aus der Farbinformation hergeleitet werden. In der Praxis geschieht das beispielsweise, indem man die drei niedrigsten Fourierkomponenten aus den Farbkomponenten berechnet. Ein anderer Ansatz wäre, adaptierte Gaußglocken als spektrale Grundfunktionen zu verwenden. Gibt es in dem Framework somit einen Konverter von Farb- in spektrale Information, ist es in der Lage, sollte es unumgänglich sein, auch mit farbbasierter Information zu arbeiten. [13]

9.6 Der 'Utah'-Spectral Renderer

Die Computergraphik-Gruppe der University of Utah hat eine Reihe von Papers über photorealistisches Rendering von natürlichen Phänomenen wie beispielsweise Wasser [11] und Nachthimmel [5] herausgegeben. Obwohl Teile des Sourcecodes schon im Netz veröffentlicht wurden, wurde das Gesamtsystem noch nicht der Öffentlichkeit vorgestellt. Die bisherigen Publikationen stellen nicht

Abbildung 20: Gerenderte Wellen; Bild von *Rendering Natural Waters*

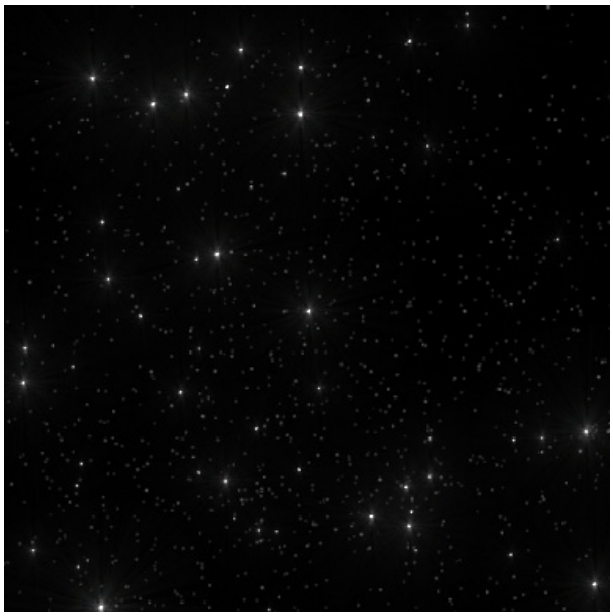

Abbildung 21: Gerenderter Sternenhimmel; Bild von *A Physically-Based Night Sky Model*

klar, welches System für die spektrale Repräsentation verwendet wurde, aus den Codefragmenten lässt sich jedoch schließen, dass wahrscheinlich fixes Sampling angewandt wurde. [17]

10 Farbraumrendering

Bekannterweise nimmt das menschliche Auge über drei verschiedene Rezeptoren (rot, grün, blau) Farben wahr. Diese drei Rezeptoren reichen aus um jede wahrgenomme Farbe zu repräsentieren, was im CIE XYZ-Farbraum dargestellt wird. Jedoch ist das Licht ein kontinuierliches Spektrum und deshalb kann das Zusammenwirken von Licht und Materialien nicht ausreichend durch diese drei Komponenten beschrieben werden.

Brauchbares Farbrendering braucht eine Vielzahl von Samples über dem gesamten visuellen Spektrum. Oft wird jedoch aus praktischen Gründen (Effizienz, Weiß-Balance, Daten) in vielen kommerziellen Rendering-Packages ein naives RGB-Modell für die Beleuchtungsberechnung benutzt. Das Resultat sind Farben, die sich oft gravierend von jenen in der Realität unterscheiden. Doch es wurden zwei Methoden entwickelt um die Ergebnisse zu verbessern ohne die Rechenzeit zu erhöhen: *spektrales Prefiltering* und *Farbraumselektion*.

Spektrales Prefiltering Die Methode beginnt mit der Transformation von gemessenen Quellen und Reflexionsspektren in drei separate Farbkanäle für das Rendering. Diese Eingabefarben werden dann für den konventionellen Renderingprozess verwendet. Danach folgt eine letzte Transformation in den Ausgabefarbraum RGB. Im Vergleich mit Full Spectral Rendering werden für die direkten Komponten exakte und für die reflektierten Komponenten auch noch relativ gute Ergebnisse erzielt.

Farbraumselektion Unabhängig von der Methode des spektralen Prefilterings beeinflusst die Wahl des Farbraumes ebenfalls die Qualität des Bildes.

10.1 Farbtransformation

Für eine gegebene Lichtquelle und Material beschreibt die CIE eine Standardmethode für die Bestimmung des Tristumulus Wertes, das dem durchschnittlichen Farbeindruck eines Menschen entspricht. [4] Die color matching functions sind zwar sehr nützlich für die Bestimmung des XYZ Farbwertes, jedoch sind sie kein absoluter Maßstab für eigentliche Farberscheinung. Das menschliche Auge tendiert dazu manche Lichtquellen 'auszuschließen' und den Farbeindruck nur durch das Umgebungslicht beeinflussen zu lassen. Dies lässt sich an einem Beispiel verdeutlichen: eine gewisse Stelle erscheint unter Kunstlicht für den menschlichen Beobachter wie ein weißer Fleck.

[4] vgl. 'Color matching functions' Abschnitt 2.1

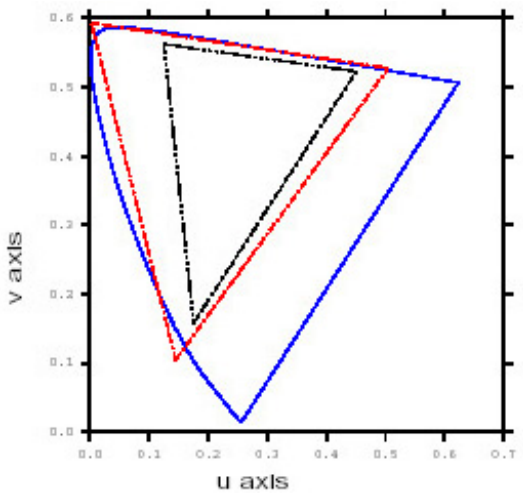

Abbildung 22: *sharp*-RGB (*rot*) vs. RGB Farbraum (*schwarz*), sichtbarer Bereich (*blau*)
; Bild von *Picture Perfect RGB Rendering Using Spectral Prefiltering and Sharp Color Primaries*

Die color matching functions würden für diesen weiß erscheinenden Fleck jedoch eine gelb-orange Farbe berechnen. Angenommen unser Beobachter hätte einen Fotoapparat dabei und würde ein Bild dieses Bereiches machen, wäre er wahrscheinlich ziemlich erstaunt, nach dem entwickeln wirklich einen gelb-orangen Fleck statt dem erwarteten Weiß zu sehen.

Um nun wirklich ein vom Benutzer erwartetes Ergebnis zu berechnen, werden die Farbwerte vor der Anzeige am Bildschirm noch einer weiteren Transformation unterzogen. Diese Transformation nimmt als Input einen XYZ Farbwert, der unter der tatsächlichen Beleuchtung berechnet wurde. Dieser wird zu einem äquivalent erscheinenden Farbwert XYZ' unter einer anderen Beleuchtung verschoben, der jedoch den Umständen der Anzeige entspricht. Diese Transformation sieht folgendermaßen aus:

$$\begin{pmatrix} R'_m \\ G'_m \\ B'_m \end{pmatrix} = M_A M_C^{-1} \begin{pmatrix} \frac{R'_w}{R_w} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{G'_w}{G_w} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{B'_w}{B_w} \end{pmatrix} M_C \begin{pmatrix} X_m \\ Y_m \\ Z_m \end{pmatrix}$$

wobei

$$\begin{pmatrix} R_w \\ G_w \\ B_w \end{pmatrix} = M_C \begin{pmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{pmatrix}$$

Dafür wurden XYZ Farbwerte für Weiß unter der Beleuchtung berechnet, sowie eine 3×3- Transformationsmatrix M_C, für eine Verschiebung aus dem XYZ- in ein passenden Farbraum.

Die Anzeige-Matrix M_A dient zur Transformation in den Farbraum des Ausgabegerätes. Für eine Verschiebung in den RGB-Farbraum würde M_A z.B. so aussehen:

$$M_{RGB} = \begin{pmatrix} 3.240479 & -1.537150 & -0.498535 \\ -0.969256 & 1.875992 & 0.041556 \\ 0.055648 & -0.204043 & 1.057311 \end{pmatrix}$$

Die Wahl, welche Matrix M_C für die chromatische Adaptierung verwendet werden soll, ist interessant. Innerhalb der Farbwissenschaftsgemeinschaft gab es in den letzten Jahren einige Diskussionen darüber, welcher Farbraum der geeignetste sein könnte. Es scheint so, dass einige Lösungen gleich gut geeignet scheinen wie andere. Jedoch scheint darin Einigkeit zu bestehen, dass RGB-Gruppen, die 'schärfer' (einen gesättigteren Farbton aufweisen) sind, die plausibelsten Ergebnisse liefern. Eine solche Matrix für eine Konvertierung in einen *sharp*-RGB Farbraum könnte folgendermaßen aussehen:

$$M_{sharp} = \begin{pmatrix} 1.2694 & -0.0988 & -0.1706 \\ -0.8364 & 1.8006 & 0.0357 \\ 0.0297 & -0.0315 & 1.0018 \end{pmatrix}$$

10.2 Farbfehler-Analyse

Spektrales Prefiltering ist in jeder Szenerie, die von nur einer dominierenden Lichtquelle ausgeleuchtet wird, zur Minimierung der Farbfehler geeignet, unabhängig von dem Rendering-Farbraum.

Von den drei getesteten Farbräumen (XYZ, RGB, sharp-RGB) lieferte der CIE XYZ-Farbraum die schlechtesten Ergebnisse. Die Fehler lagen kombiniert mit Prefiltering bereits über dem erkennbaren Schwellenwert und nahmen, ohne die Kombination mit Prefiltering, noch erheblich zu.

Im Gegensatz dazu lieferte der sharp-RGB Farbraum, der auch von den Experten bevorzugt wird, durchschnittliche Fehler, die sowohl mit als auch ohne Prefilterung, klar unter dem Schwellenwert lagen.

Ward und Eydelberg nehmen an, dass der sharp-RGB Farbraum deshalb so gute Resultate liefert, da er den Darstellungsfehler für Tristimuluswerte minimiert weil der Wahrnehmung nach die Achsen dieses Farbraumes entlang der dichtesten Regionen des XYZ-Raumes liegen.

Die Kombination von spektralem Prefiltering und dem sharp-RGB Farbraum ist besonders effektiv. Bei Sharp-RGB in Kombination mit Prefiltering unter einer einzigen Lichtquelle, liegen 98% der Pixel unter dem erkennbaren Schwellenwert. Der einzige erkennbare Fehler in der abbgebildeten Szenerie tritt bei dem Glanzpunkt in der Goldkugel auf. Die starke spektrale Selektivität und die Spiegelung verletzt eine der Grundannahmen, dass eine diffuse Lichtquelle die Szene dominieren soll. Prefiltering kann in diesem Kontext leider nicht viel ausrichten. Die Wahl des sharp-RGB Farbraumes liefert auf jeden Fall eine Verbesserung des Resultats.

Eine zweite Grundannahme kann dadurch verletzt werden, dass nicht nur eine einzige Lichtquelle verwendet

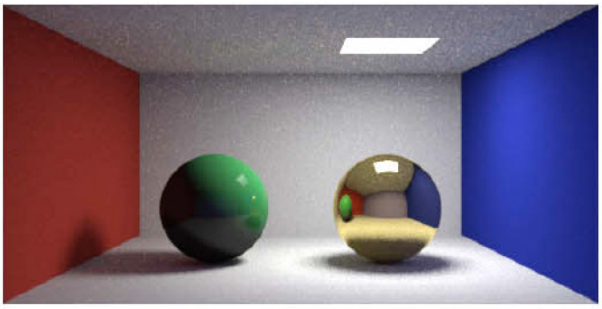

Abbildung 23: Mulitspektrale Musterlösung für fluoreszierende Lichtquelle

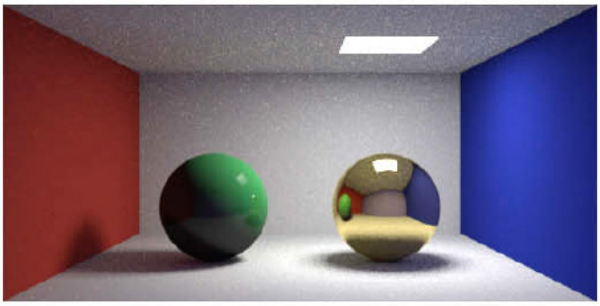

Abbildung 24: Prefiltered RGB für fluoreszierende Lichtquelle

wird, sondern beispielsweise zwei gleich starke Lichtquellen. Zusammen mit Prefiltering liefern sowohl RGB als auch sharp-RGB brauchbare Ergebnisse. Ohne Prefiltering steigt der Fehler des RGB Farbraumes über den Schwellenwert, während der sharp-RGB Raum immer noch unter dem Schwellenwert liegt. [14]

11 Physikalische Effekte

Wie schon früher erwähnt, ist es durch das Beibehalten der spektralen Information bei Spectral Rendering mög-

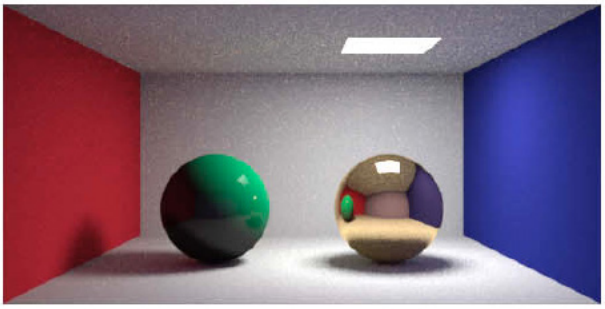

Abbildung 25: naives RGB für fluoreszierende Lichtquelle

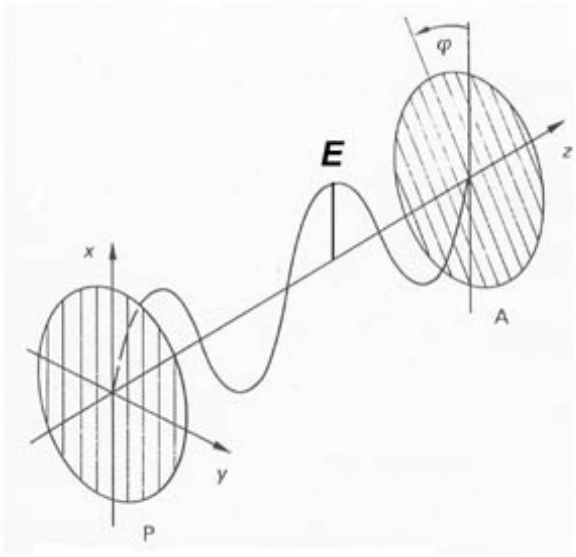

Abbildung 26: Linear polarisiertes Licht schwingt nur in bestimmten Ebenen, hier wird ein Sonderfall gezeigt, in dem das Licht nur in einer Ebene schwingt. Schickt man solches Licht durch einen Polarisationsfilter, der genau normal auf die Schwingungsebene ausgerichtet ist, so wird kein Licht durchgelassen. Bild von http://www.physik.fu-berlin.de/ brewer/ph3_polar.html

lich[5], bestimmte physikalische Effekte darzustellen, was bei Rendering mit Darstellung der Farbwerte mittels RGB nicht in einer solch direkten Art möglich ist. Dabei existieren hierbei zwei verschiedene Arten: Effekte, die mit Tristimulus-Werten nicht berechnet werden können und solche, die im RGB-Farbraum nicht gelöst werden können. Zu letzteren gehören etwa das Problem des Metamerismus, alle übrigen hier beschriebenen Effekte gehören zur ersteren Problemgruppe. Einige dieser Effekte sind leicht künstlich nachzubauen, wie etwa Fluoreszenz, bei anderen ist dies nicht so leicht möglich. Die Auswirkung auf das optische Bild einer Szene ist auch je nach Effekt unterschiedlich. So bewirkt die Polarisation des Lichts meist nur geringe Änderungen im Erscheinungsbild einer Szene, während Dispersion oder Fluoreszenz doch auffällige Änderungen hervorrufen.

11.1 Polarisation

Polarisation wurde bei gängigen Rendering Systemen meist wenig in Betracht gezogen, da sie wenig markante Effekte in gerenderten Szenen verursacht [18, 17]. Ausserdem ist das menschliche Auge üblicherweise nicht in der Lage, polarisiertes Licht von nicht polarisiertem Licht zu unterscheiden. Ein Bereich, in dem polarisiertes Licht aber dennoch eine grosse Rolle spielt, sind Szenen unter Tageslicht, denn dieses ist meist stark polarisiert.

[5] siehe auch Kapitel 5 auf Seite 4

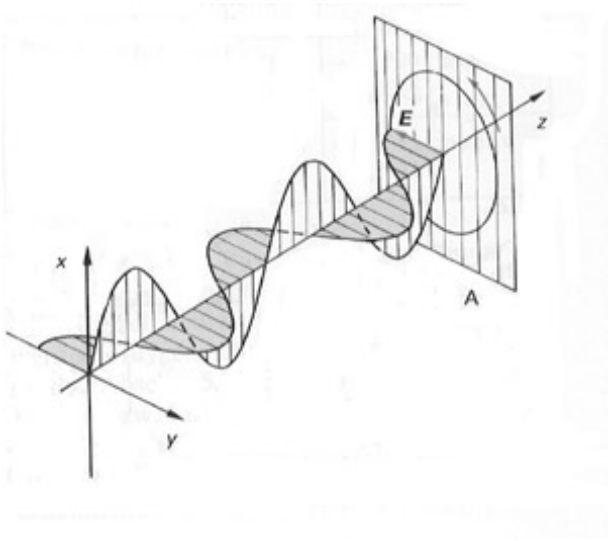

Abbildung 27: Bei zirkular polarisiertem Licht tritt eine Phasenverschiebung zwischen den Schwingungen auf. Diese beträgt ein Viertel einer Schwingung, somit also $\frac{\pi}{2}$. Bild von http://www.physik.fu-berlin.de/brewer/ph_3polar.html

Ursachen von polarisiertem Licht Abgesehen von Tageslicht ist es äußerst ungewöhnlich, dass eine Lichtquelle polarisiertes Licht aussendet. In den meisten Fällen entsteht polarisiertes Licht daher durch die Interaktion von Licht mit einem Medium oder einer Oberfläche.

Eigenschaften von polarisiertem Licht Licht setzt sich aus vielen verschiedenen Lichtwellen zusammen, welche normal auf die Ausbreitungsrichtung k der Lichtwelle stehen. Es gibt jedoch beliebig viele Ebenen, die senkrecht zu einer gegebenen Richtung k stehen können. Sind die Schwingungsrichtungen des Lichts wahllos über diese möglichen Ebenen verteilt, spricht man von *unpolarisiertem Licht*. Polarisiertes Licht dagegen schwingt nur in einer bestimmten Ebene. Dieses bezeichnet man dann als *linear polarisiert* (siehe Abbildung 26).

Arten von Polarisation Jede linear polarisierte Welle kann durch Überlagerung zweier linear polarisierter Wellen E_x und E_y , die zueinander normal stehen und keine Phasenverschiebung besitzen, dargestellt werden. Die Amplitude der resultierenden Welle ergibt sich aus der Vektorsumme der beiden Amplituden V_X und V_y der beiden Amplituden. Werden die beiden Wellen mit einer Phasenverschiebung von $\frac{\pi}{2}$ überlagert, entsteht eine andere Art der Polarisation. Da sich die Amplitude der resultierenden Welle dann einmal pro Schwingung um die k-Achse dreht, spricht man hier von *zirkular polarisiertem Licht* (siehe Abbildung 27. Dabei wird je nach der Drehrichtung zwischen rechts- (Phasenverschiebung $+\frac{\pi}{2}$) und linkszirkular (Phasenverschiebung $-\frac{\pi}{2}$) polarisiertem Licht unterschieden.

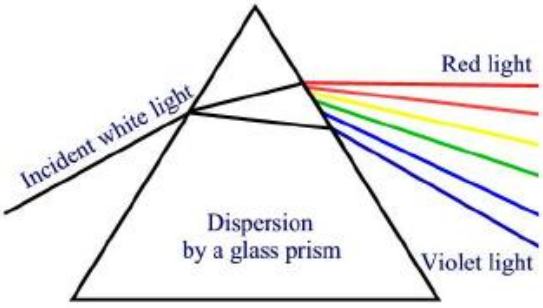

Abbildung 28: Bei Dispersion wird ein polychromatischer Lichtstrahl an einer Objektkante in seine Bestandteile aufgespalten. Dadurch entsteht der allgemein bekannte ”Regenbogeneffekt”. Bild von http://www.tmm.utexas.edu/npl/mineralogy/Science_of_Minerals/optical_properties.htm

Beschreibung von Polarisation Wie schon vorher erwähnt, stehen die Ebenen in denen Licht, also auch polarisiertes Licht, schwingt, im rechten Winkel zur Ausbreitungsrichtung des Lichts. Die genaue Beschreibung dieser Schwingung erfolgt durch die mikroskopische Beschreibung der Polarisation. Ausgehend von einer Lichtquelle an einem entfernten Punkt auf der z-Achse, welche Schwingungen erzeugt, wird das elektromagnetische Feld ”aufgenommen”. Dabei kann die z-Komponente dieses Felds in Distanzen ab mehreren Wellenlängen von der Lichtquelle vernachlässigt werden, und dieses liegt dann in der x-y-Ebene. Die x- und y-Komponenten werden dann folgendermaßen angegeben:

$$E_x = V_x * \cos(2\pi * v * t + \delta_x)$$

$$E_y = V_y * \cos(2\pi * v * t + \delta_y)$$

V_x und V_y bezeichnen hierbei die Amplituden $[V * m^{-1}]$, v ist die Frequenz der Schwingung $[Hz]$, δ_x und δ_y sind die Phasen der elektromagnetischen Welle, und t ist die Zeit $[s]$.

11.2 Dispersion

Bei Dispersion wird ein Lichtstrahl aus weißem, also polychromatischem Licht, spektral aufgespalten [19]. Dieser Effekt, der zu Regenbogeneffekten in Glasprismen und Diamanten führt, hat die Menschen schon immer fasziniert. Durch immer größeres Verständnis über die Natur des Lichts ist die Dispersion heute genau erforscht und alle wichtigen Materialien, die Dispersion verursachen, sind mit ihren spezifischen Eigenschaften in Tabellen erfasst.

Dispersion mit RGB Dispersion kann prinzipiell auch im RGB-Farbraum simuliert werden. Die geringe Anzahl an spektralen Bändern, die durch die Tristimulus-Sicht besteht, verhindert aber eine optisch zufriedenstellende Darstellung dieses physikalischen Effekts. Daher ist Spectral

Abbildung 29: Entstehung von Aliasing bei deterministischem Vorgehen, hier mit einer spektralen Repräsentation von 8 gleichverteilten samples. Bild von http://www.artoolkit.org/Gallery/Dispersion/

Abbildung 30: Bei stochastischem Vorgehen werden die Spektralbänder gestreut. Dadurch wird der Aliasingeffekt, der in Abbildung 29 deutlich sichtbar ist, stark verringert. Bild von http://www.artoolkit.org/Gallery/Dispersion/

Rendering die bessere Möglichkeit, Dispersion in einer Szene wiederzugeben.

Enstehung des Effekts Dispersion entsteht durch das Eindringen des Lichts in ein lichtbrechendes Material. Solche Materialien sind etwa geschliffenes Glas oder Diamanten. Durch diese Brechung entsteht die Auftrennung in die Regenbogenfarben. Der Grad der Brechung wird durch den sogenannte Brechungsindex (index of refraction, IOC) angegeben. Dieser ist je nach Wellenlänge des Lichts unterschiedlich und folgt keinem linearen Zusammenhang. Daher können Brechungsindizes nur durch Messung in Experimenten bestimmt werden.

Sellmeier Aproximation Eine genaue physikalische Beschreibung von Dispersion ist sehr aufwändig und komplex und für technische Anwendungen auch nicht notwendig. Stattdessen werden empirische Approximationsformeln verwendet, die für den eingeschränkten Bereich des sichtbaren Spektrums passend sind. Die am weitesten verbreitete Methode zur Beschreibung des Dispersionsverhaltens ist die sogenannte Sellmeierapproximation. Von dieser existieren mehrere Formen, die sich nur in der Anzahl der empirischen Konstanten unterscheiden. Diese Unterschiede ergeben sich meist durch divergierende Messprozesse dieser Konstanten.

Ein typisches Beispiel für solche Approximationsformeln ist der Glaskatalog der Schott Glaswerke [19]. Diese sind eines der weltweit führenden Unternehmen für technisches Glas. In diesem Katalog werden hunderte Glastypen und unter anderem deren Brechungsindex aufgelistet, für den folgende Formel verwendet wird:

$$n^2(\lambda) - 1 = \frac{B_1\lambda^2}{\lambda^2 - C_1} + \frac{B_2\lambda^2}{\lambda^2 - C_2} + \frac{B_3\lambda^2}{\lambda^2 - C_3} \qquad (1)$$

Der Brechungsindex wird in dieser Formel durch n repräsentiert, λ bezeichnet die Wellenlänge des Lichts. Im Katalog werden die Werte für die Koeffizienten B_n und C_n aufgelistet. Mithilfe dieser Werte kann der Brechungsindex im sichtbaren Bereich mit einem Fehler, der unter 1.0E-5 liegt, berechnet werden. Damit ist dieser Glaskatalog eine wichtige Quelle für ausreichend genaue Daten über die Dispersion eines Materials.

Rendern von Dispersion Wie man Dispersion rendert, hängt auch von der Repräsentation des Spektrums ab. Verwendet man etwa Samplingwerte des Spektrums, dann hat man zwei Möglichkeiten für die Vorgehensweise: deterministisch oder stochastisch (siehe auch Abbildung 29 und 30).

Deterministisches Vorgehen Im deterministischen Fall wird ein Spektrum durch n Bänder repräsentiert, die sich nicht überlappen. Durch diese Reduktion auf n Frequenzen treten bei der Dispersion auch nur n Winkel bei der Aufspaltung des Lichts auf, was zu geometrischem Aliasing führt. Dies kann bei Nahansichten von Dispersionseffekten zu Problemen führen, für kleine Effekte ist es aber durchaus passend.

Abbildung 31: Das fluoreszierende Mineral Calcit bei normaler Beleuchtung. Bild von http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Minerale/calcarag.htm

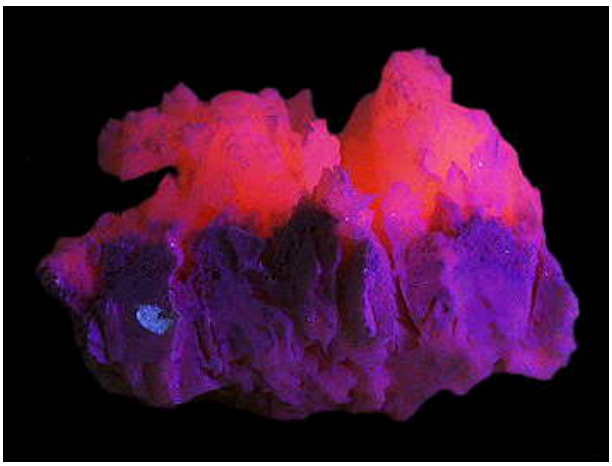

Abbildung 32: Bei Beleuchtung mit sowohl nieder- als auch hochfrequentem UV-Licht zeigt sich der fluoreszierende Charakter von Calcit durch Abstrahlen von Lichtenergie im roten bis violetten Frequenzbereich. Bild von http://www.seilnacht.tuttlingen.com/Minerale/calcarag.htm

Stochastisches Vorgehen In diesem Fall werden die Spektralbänder die durch das Sampling bedingt sind über die Hälfte ihrer Breite zufällig gestreut. Dadurch werden die Aliasing Effekte deutlich verringert, ja sie verschwinden teilweise sogar ganz.

11.3 Fluoreszenz

Fluoreszenz ist der Effekt, bei dem einfallendes Licht von fluoreszierenden Materialien wieder ausgestrahlt wird, in den meisten Fällen auf niedrigeren Frequenzen. Dadurch entstehen auffallende Leuchteffekte, die z.B. bei Post-its und verschiedenen Mineralien auftreten, wie dies in Abbildung 31 und 32 sichtbar ist. Fluoreszenz wurde wie die Polarisation in den meisten Renderingsystemen nicht beachtet, allerdings aus einem anderen Grund. Das fluoreszierende Leuchten kann üblicherweise leicht von einem guten 3D Artist ”nachgebaut” werden. Es ist auch möglich, Fluoreszenz im RGB-Farbraum zu modellieren, dabei treten aber Aliasing-Effekte auf[1]. Daten von fluoreszierenden Materialien sind kaum verfügbar, da keine öffentlich zugänglichen Daten über Fluoreszenz existieren.

Entstehung von Fluoreszenz Wie schon vorher erwähnt, ist die charakteristische Eigenschaft von fluoreszierenden Materialien, dass sie Licht in extrem kurzer Zeit (etwa 10^{-8} Sekunden) wieder abstrahlen. Abbildung 34 zeigt die Reflektionsspektren eines solchen fluoreszenten Materials. Wird Licht abgegeben, das die gleiche Frequenz wie das eingestrahlte Licht aufweist, so spricht man von Resonanzfluoreszenz. Ebenso ist sowohl die Abgabe von im Vergleich zum einstrahlenden Licht niedrigerfrequenterem als auch höherfrequenterem Licht möglich. Letzteres entsteht durch die ”Kombination” von zwei Photonen niedriger Energie zu einem Photon von höherer Energie. Dabei ist meist die doppelte Frequenz der beiden absorbierten Photonen die Obergrenze für die Frequenz des emittierten Photons. In der Computergrafik ist der erstere Fall allerdings von größerer Wichtigkeit, da er auch häufiger auftritt. Fluoreszenz wird mittels einer sogenannten *re-radiation matrix* beschrieben. Abbildung 33 zeigt ein Beispiel einer solchen Matrix.

Rendern von Fluoreszenz Wird ein System mit n samples benutzt, so wird zur Darstellung der Fluoreszenz eine re-radiation matrix mit nxn Elementen benötigt. Die Tatsache dass durch Fluoreszenz meist Licht auf niedrigeren Wellenlängen abgestrahlt wird, erlaubt das Vernachlässigen der oberen Hälfte dieser Matrix.

11.4 Metamerismus

Zum Beispiel bei der Anprobe von Kleidern stellt sich oft das Problem, dass Gewand unter einer bestimmten Beleuchtung zusammenpasst, bei anderen Lichtverhältnissen wie etwa Tageslicht aber nicht. Dieses Problem fusst auf dem physikalischen Phänomen des Metamerismus. Um Probleme mit Metamerismus zu vermeiden, wird in der grafischen Industrie, bei der man sich mit Farben und Drucken beschäftigt, für die Bestimmung einer Farbe immer eine standardisierte Beleuchtung verwendet.

Physikalischer Hintergrund Metamerismus hat seine Ursache in der spektralen ”Zusammensetzung” einer Farbe [6]. Kurz gesagt werden zwei Farben als *metamer* bezeichnet, wenn sie dieselben Tristimulus-Werte, also denselben RGB-Farbeindruck[6], aber unterschiedliche spektrale Verteilungen besitzen. Je größer dieser Unterschied ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass

[6] Siehe auch Kapitel 4 auf Seite 4

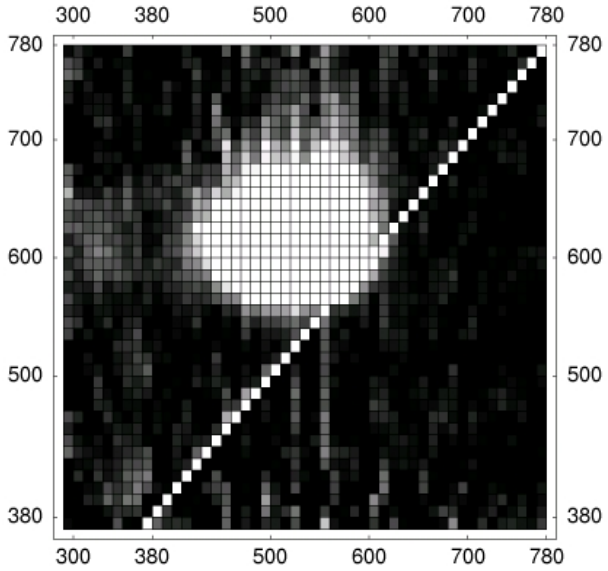

Abbildung 33: Die graphisch dargestellte Re-radiation Matrix eines pinken Post-its. Die horizontale Achse beschreibt dabei das eingestrahlte, die vertikale Achse das wieder ausgestrahlte Licht. Die zusätzlich zur normalen Lichtreflektion durch die Fluoreszenz abgestrahlte Lichtenergie ist deutlich sichtbar.

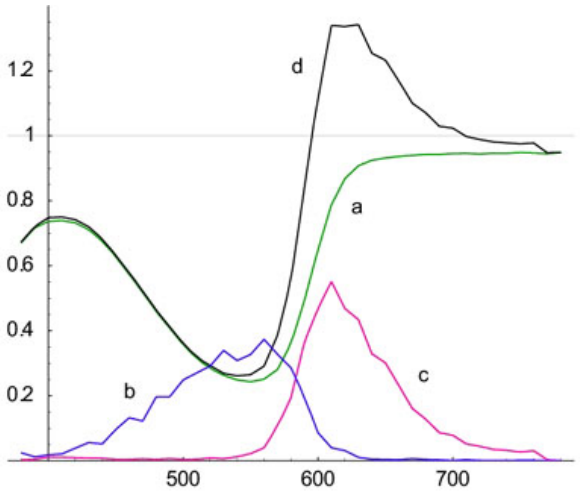

Abbildung 34: Spektralkurven eines pinken Post-its. Die Kurven veranschaulichen das Reflexionsspektrum ohne Berücksichtigung der Fluoreszenz (grün), die absorbierte (blau) und die wiederabgegebene (rot) Energie und das eigentliche Reflexionsspektrum (schwarz), welches sich durch die Summe dieser Kurven ergibt.

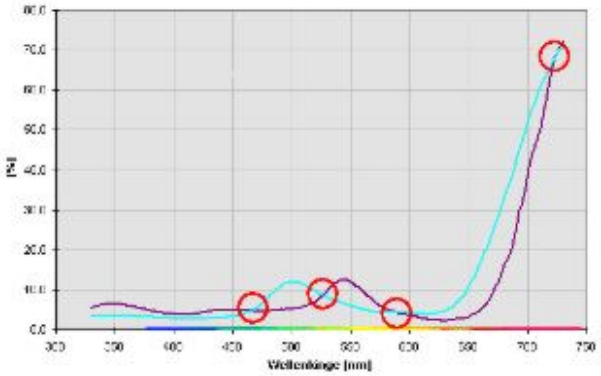

Abbildung 35: Zwei Spektralkurven metamerer Materialien. Die Schnittpunkte der Spektralkurven, welche Metamerie anzeigen, sind deutlich sichtbar. Bild von http://www.binder-muc.de/metamer.htm

zwei Farben bei bestimmten Lichtverhältnissen nicht ”zusammenpassen”.

Überprüfung von Metamerie Soll überprüft werden, ob zwei Proben metamer sind, müssen diese unter unterschiedlichen Lichtarten betrachtet werden. Dabei werden oft die Lichtarten D65 (Tageslicht), A (Glühlampe) und F11(Leuchtstoffröhre) verwendet, weil diese uns im täglichen Leben häufig begegnen. Von den Proben werden dann mit einem Spektrophotometer die Spektralkurven ermittelt. Schneiden sich diese Kurven, so tritt Metamerie auf. Je mehr Schnittpunkte diese aufweisen, umso höher ist die Metamerie (siehe auch Bild 35.

12 Conclusion

In den vorhergehenden Kapiteln wurden die Vor- und Nachteile von Spectral Rendering aufgezeigt und wichtige Systeme, die bereits Spektraldaten verwenden vorgestellt. Momentan werden im Allgemeinen hauptsächlich Rendering Systeme verwendet, die RGB-Farbwerte benutzen. Im Bereich des spektralen Renderings ist sicherlich noch viel Forschungsarbeit zu tun, sind doch viele Fragen noch offen. Dabei wäre etwa die Wahl der richtigen Basisfunktion zu nennen. Da allerdings photorealistisches Rendern immer das Ziel hat, keine Unterscheidung zur Realität zu gewährleisten, ist Spectral Rendering diesbezüglich sicherlich ein interessanter Ansatz, da hier ”reale” Daten in die Berechnung einfließen.

Literatur

[1] Billy Biggs. *Accurate and Visually Plausible Colour in Photorealistic Rendering*. Final project for CS788, University of Waterloo.

[2] Donald Hearn and Pauline Baker. *Computer Graphics*. Prentice Hall, New Jersey.

[3] http://www.cs.rit.edu/ ncs/color/t_spectr.html. *Spectrum to RGB Conversion*.

[4] Jean Claude Iehl and Bernard Péroche. An adaptive spectral rendering with a perceptual control. *Computer Graphics Forum*, 19(3), August 2000.

[5] Henrik Wann Jensen, Frédo Durand, Michael M. Stark, Simon Premoze, Julie Dorsey, and Peter Shirley. A physically-based night sky model. In *SIGGRAPH 2001, Computer Graphics Proceedings*, Annual Conference Series, pages 399–408. ACM Press / ACM SIGGRAPH, 2001.

[6] Marianne Klaman. *Aspects on Colour Rendering, Colour Prediction and Colour Control in Printed Media*. Department of Numerical Analysis and Computer Science, Stockholm, 2002.

[7] Gary Meyer. *Wavelength Selection for Synthetic Image Generation*. Computer Vision, Graphics and Image Processing, 1988.

[8] Mark S. Peercy. Linear color representations for full speed spectral rendering. *Computer Graphics*, 27(Annual Conference Series):191–198, 1993.

[9] Mark S. Peercy. *Interactive Full Spectral Rendering*. Symposium on Interactive 3D Graphics, Monterey CA USA, 1995.

[10] Bui-Tuong Phong. *Illumination for Computer Generated Images*. Communications of the ACM, 18(6), 311-317, 1975.

[11] Simon Premoẑe and Michael Ashikhmin. Rendering natural waters. In D. Duke and R. Scopigno, editors, *Computer Graphics Forum*, volume 20(4), pages 189–200. Blackwell Publishing, 2001.

[12] Brian Smits. An RGB-to-spectrum conversion for reflectances. *Journal of Graphics Tools: JGT*, 4(4):11–22, 1999.

[13] Yinlong Sun, F. David Fracchia, Mark S. Drew, and Thomas W. Calvert. A spectrally based framework for realistic image synthesis. In *The Visual Computer*, volume 17(7), pages 429–444. Springer, 2001.

[14] Greg Ward and Elena Eydelberg-Vileshin. Picture perfect rgb rendering using spectral prefiltering and sharp color primaries. pages 117–124, June 26–28 2002.

[15] Harold B. Westlund and Gary W. Meyer. *A BRDF Database Employing the Beard-Maxwell Reflection Model*. Graphics Interface, 2000.

[16] Turner Whitted. *An Improved Illumination Model for Shaded Display*. IEEE Computer Graphics and Applicatioins, New Jersey.

[17] Alexander Wilkie and Werner Purgathofer. *State of the Art in Spectral Rendering*. Institut für Computergraphik und Algorithmen, TU Wien, 2003.

[18] Alexander Wilkie, Werner Purgathofer, and Robert F. Tobler. *Combined Rendering of Polarization and Fluorescence Effects*. Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna, 2001.

[19] Alexander Wilkie, Robert F. Tobler, and Werner Purgathofer. *Raytracing of Dispersion Effects in Transparent Materials*. Institute of Computer Graphics and Algorithms, Vienna, 2000.