

Photo-Realistic Rendering of Fiber Assemblies

Arno Zinke

Institut für Informatik
Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn
zinke@cs.uni-bonn.de

Abstract: Die realistische Visualisierung von Frisuren und anderen Faserkollektionen stellt aufgrund der damit verbundenen geometrischen und optischen Komplexität eine große Herausforderung der Computergrafik da. Im Rahmen dieser Arbeit wurde eine neuartige Framework zur formalen Beschreibung der Lichtstreuung an Fasern entwickelt, welches als Basis für effiziente Renderingtechniken dient. Darüber hinaus wurde am Beispiel von Humnhaar untersucht, inwieweit sich optisch relevante Parameter natürlicher Fasern aus Bilddaten abschätzen lassen.

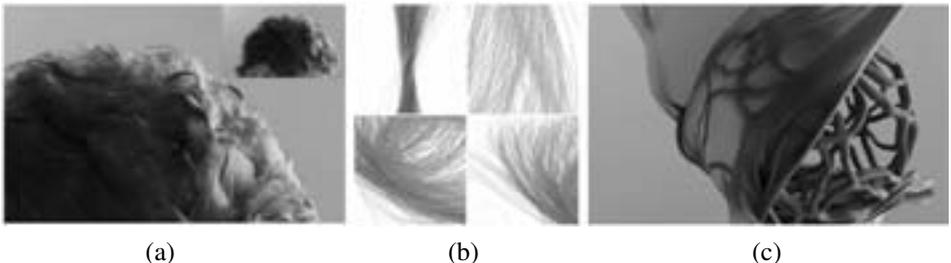


Abbildung 1: Ergebnisse die mit in der Dissertation entwickelten Verfahren erzielt wurden: einzel-faserbasierte optische Simulationen von Humanhaar in Bild (a) und (b), sowie von gewebtem Stoff in Bild (c).

1 Einführung

Die realistische Visualisierung von Haaren und Fasern stellt bis in die heutige Zeit eine große Herausforderung im Bereich der Computergrafik dar. Dabei ist neben der rein geometrischen Komplexität – es sind oft tausende einzelner Filamente zu simulieren – insbesondere die optische Komplexität von Bedeutung. Jede Einzelfaser für sich streut einfallendes Licht auf komplizierte Art und Weise, was durch optische Wechselwirkungen zwischen Fasern (wie z.B. bei Frisuren oder gewebten Stoffen) zu einem subtilen Gesamterscheinungsbild führen kann.

Die effiziente Simulation der Lichtstreuung in komplexen Faseranordnungen, insbesondere Frisuren, ist Hauptgegenstand der vorgestellten Dissertation. Zur Lösung des Problems

wurde zunächst ein tragfähiges theoretisches Fundament entwickelt, aus dem sich nicht nur Einsichten über die Struktur der Lichtstreuung an Faserkollektionen ergeben, sondern insbesondere auch neue, äußerst effiziente Berechnungsverfahren. Darüber hinaus wurde für den wichtigen Spezialfall Humanhaar untersucht, inwieweit sich optisch relevante Parameter aus Fotografien abschätzen lassen.

Ergebnisse der Arbeit werden bereits für computeranimierte Filme eingesetzt und ermöglichen in diesem Zusammenhang die realistische Darstellung virtueller Charaktere. Weitere praktische Anwendungsfelder sind die Kosmetik- sowie Textieforschung, bei denen die Vorhersage des Erscheinungsbildes für verschiedene Färbeprodukten bzw. von Webmustern im Vordergrund stehen.

2 Überblick

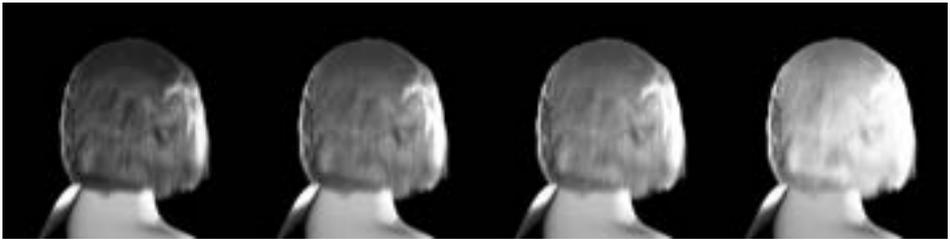
In dieser Arbeit wurde ein universeller Formalismus zur Beschreibung der Lichtstreuung an Einzelfasern entwickelt. Er bildet die Grundlage für neuartige physikalisch-basierte Simulationsverfahren, welche eine effiziente Berechnung der Lichtstreuung in komplexen Faseranordnungen erlauben. Dabei lassen sich grob zwei verschiedene Anwendungsbereiche unterscheiden. Der eine umfasst die Generierung von fotorealistischen Bildern (oder auch virtuellen Messungen) basierend auf gegebenen Geometriedaten. Diese Form der Synthese wird in der Computergraphik oft auch als Rendering bezeichnet.

Desweiteren lassen sich Ergebnisse der Arbeit auch zur Analyse von realen Messdaten einsetzen. Ein praktisch besonders relevanter Spezialfall ist die Abschätzung optischer Materialeigenschaften von Haaren aus Bilddaten.

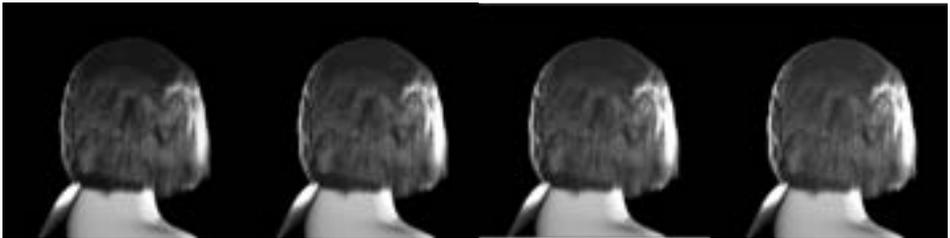
3 Lichtstreuung an Filamenten

Eine Grundvoraussetzung für physikalisch akkurate optische Simulation von Faserkollektionen ist die hinreichend genaue radiometrische Beschreibung der Lichtstreuung an Einzelfasern. Bisher war dies entweder durch explizite (und damit extrem aufwendige) Simulationen des Lichttransports innerhalb der Faser oder aber durch isolierte, spezialisierte Modelle möglich [MJC⁺03, KK89, Kim02]. Ein effizientes und zugleich universelles Rahmenwerk, welches dazu geeignet ist, sowohl mikroskopische als auch makroskopische Effekte konsistent zu beschreiben, wurde erstmalig im Rahmen der Dissertation entwickelt.

Die Basis sämtlicher Betrachtungen bildet eine neue Streufunktion, die *Bidirectional Fiber Scattering Distribution Function (BFSDf)* [ZW07]. ähnlich der BSSRDF für Oberflächen erlaubt die BFSDf eine effiziente, vereinheitlichte radiometrische Beschreibung der Reflektions- sowie Transmissionseigenschaften von Einzelfasern. Es handelt sich gewissermaßen um den „optischen Fingerabdruck“ einer Faser. Durch Verwendung spezieller BFSDf-Modelle für Haare sowie andere Fasertypen sind detailgenaue und dennoch kompakte Darstellungen spezifischer Eigenschaften möglich. Ein weiterer Vorteil der *Bi-*



(a)



(b)

Abbildung 2: Einfluss der Mehrfachstreuung auf die „Haarfarbe“. Simulationen für verschiedene optische Parameter: (a) vollständige Lösung (Einfach- und Mehrfachstreuung berücksichtige); (b) nur Einfachstreuung berücksichtigt. Man beachte die Wichtigkeit der Mehrfachstreuung für das Gesamterscheinungsbild.

directional Fiber Scattering Distribution Function besteht in der Möglichkeit, konsistente Näherungslösungen auf systematischem Wege abzuleiten. So können beispielsweise für große Beobachtungsabstände (also im Fernfeld) hochfrequente Details entlang des Faserquerschnitts durch gröbere Strukturen approximiert werden. Im Grenzfall lassen sich Querschnittsdetails vollständig vernachlässigen und die Faserstreuung reduziert sich zu einer weniger komplexen Kurvenstreuungsfunktion, der sogenannten *Bidirectional Curve Scattering Distribution Function (BCSDF)*.

4 Rendering von Haaren und Faseranordnungen

Für eine vollständige Simulation von Faserkollektionen ist neben der direkten Streuung am Einzelfilament auch die Mehrfachstreuung zwischen Fasern zu berücksichtigen. Wie in einer Arbeit, die zu Beginn des Dissertationsprojekts entstand, erstmalig gezeigt wurde, ist es interessanterweise genau diese Komponente, welche das Gesamterscheinungsbild entscheidend beeinflusst [ZSW04]. Dies gilt insbesondere für Haare, wo die Haarfarbe durch Mehrfachstreuung dominiert wird (siehe Abb. 2).

Eine Berechnung der indirekten Streukomponente ist prinzipiell mit Hilfe etablierter Verfahren – wie beispielsweise Monte Carlo Pathtracing auf – Basis des BFSDF-Formalismus möglich [ZW07]. Obwohl dieser Ansatz für genaue Simulationen hervorragend geeignet

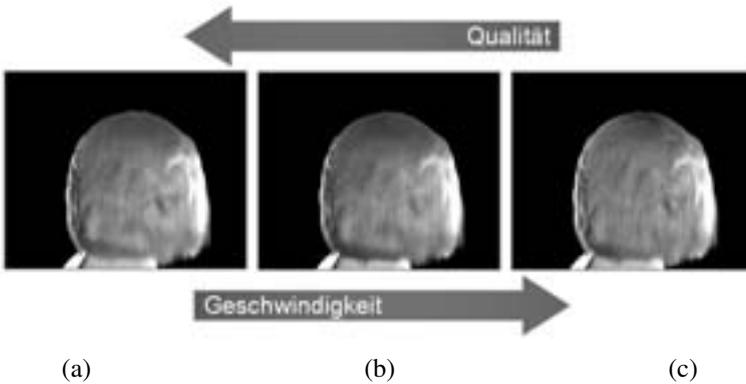


Abbildung 3: Vergleich von Rechenzeit und Darstellungsqualität für verschiedene Renderingverfahren: (a) Pathtracing, 12 h; (b) *strahlenbasierte Approximation*, 20 min; (c) *Dual Scattering*, Echtzeit.

ist, ist er wegen seiner enormen Rechenkomplexität für viele Anwendungsfälle nicht praktikabel. So werden beispielsweise in Computerspielen echtzeitfähige Lösungen benötigt und auch für computeranimierte Filme steht eher die Rechengeschwindigkeit als die Simulationsgenauigkeit im Vordergrund. Deshalb wurden in der Dissertation auch andere deutlich effizientere Verfahren entwickelt, welche einen Kompromiss zwischen Darstellungsqualität und Rechengeschwindigkeit erlauben (siehe auch Abb. 3).

All diese Verfahren beruhen auf einer formalen Aufspaltung des gesamten gestreuten Lichts L in eine direkte L_d und eine indirekte Komponente L_i , welche einfach bzw. mehrfach gestreutes Licht bezeichnen:

$$L = L_i + L_d. \quad (1)$$

Beide Komponenten werden nun auf unterschiedlichem Wege berechnet. Für die direkte Beleuchtung wird die BFSDF (BCSDF) auf herkömmlichem Wege ausgewertet wohingegen die kostenintensive indirekte Beleuchtung wird mit Hilfe von Näherungslösungen abgeschätzt. Im folgenden soll ein kurzer Überblick über zwei der implementierten Verfahren gegeben werden.

4.1 Strahlenbasierte Approximation

Bei der *strahlenbasierten Approximation* [ZW06] wird sich insbesondere die Tatsache zunutze gemacht, dass L_i nur vergleichsweise langsam variiert, d.h. deutlich weniger optisch relevante hochfrequente Anteile besitzt als die direkte Komponente L_d . Das eigentliche Verfahren, welches eng mit klassischem Photonmapping verwandt ist, besteht aus zwei Schritten. Im ersten Schritt werden Lichtpfade ausgehend von der Lichtquelle erzeugt und gespeichert. Dabei werden nur jene Anteile berücksichtigt, welche tatsächlich mehrfach gestreutes Licht repräsentieren. Im zweiten Schritt wird L_i aus der gespeicherten Licht-

pfaddichte abgeschätzt.

Obwohl etwa ein bis zwei Größenordnungen schneller als eine effizient Implementierung der Pathtracingmethode weisen die Ergebnisse selbst in direktem Vergleich eine sehr gute visuelle Übereinstimmung mit Referenzlösungen auf (vgl. Abb. 3).

4.2 Dual Scattering

Eine weiteres und äußerst effizientes Approximationsverfahren ist das sogenannte *Dual Scattering* [ZYWK08]. Die Grundidee dieses neuartigen Verfahrens besteht darin die MehrfachstreuKomponente L_i formal als Ergebnis zweier verschiedener Prozesse zu betrachten, nämlich *lokaler Mehrfachstreuung* und *globaler Mehrfachstreuung*. Mit globaler Mehrfachstreuung ist mehrfach gestreutes Licht gemeint, welches in die Umgebung eines betrachteten Punktes gelangt und dort mittels lokaler Mehrfachstreuung erneut gestreut wird. Der Vorteil dieses Konzeptes besteht nun darin, dass sich beide Effekte mit Hilfe verschiedener Verfahren getrennt voneinander approximieren lassen. Dies ist insbesondere für das Rendering von Haaren interessant, wo beide Anteile das Erscheinungsbild verschiedenartig beeinflussen. Durch Verwendung analytischer Approximationen gelingt eine äußerst effiziente und dabei erstaunlich akkurate Reproduktion von Referenzlösungen (vgl. Abb. 3).

Ein wichtiger Vorteil der Dual Scattering Methode besteht darin, dass sie sich direkt auf modernen programmierbaren Graphikkarten implementieren läßt was einen dramatischen Geschwindigkeitsgewinn gegenüber rein CPU-basierten Implementierungen bedeutet und Berechnungen in Echtzeit möglich macht.

5 Fotometrische Abschätzung der Haarfarbe aus Bilddaten

Natürliche Fasern können eine große Variabilität bezüglich optischer Eigenschaften aufweisen, weshalb typische BSDF- bzw. BCSD-Modelle oft dutzende an freien Parametern besitzen. Aufgrund der damit verbundenen Komplexität ist es nahezu unmöglich, diese Parameter „per Hand“ anzupassen, um damit ein vorgegebenes Ergebnis (beispielsweise eine gewisse Haarfarbe) darzustellen. Eine Möglichkeit, um freie Parameter zu bestimmen, besteht in einzelfaserbasierten Gonioreflektometer-Messungen. Dieser Ansatz ist wegen seines hohen Zeit- und Kostenaufwandes nur eingeschränkt praxistauglich. Als prinzipielle Alternative bleibt eine Parameterabschätzung auf Basis von Faserkollektionen. In diesem Fall müssen optische Eigenschaften von Einzelfasern aus dem kollektiven Streuverhalten der Faserkollektion abgeschätzt werden.

Eine interessante, da kostengünstige Methode besteht in der Abschätzung optischer Eigenschaften aus konventionellen Fotografien. Für den Spezialfall Humanhaar wurde anhand synthetischer Testfälle gezeigt, dass solch ein Ansatz grundsätzlich dazu geeignet ist, BCSD-Parameter zu extrahieren. In Folgearbeiten konnten diese theoretischen Ergebnisse auch in der Praxis bestätigt und ein entsprechender Prototyp implementiert werden, der

eine robuste BCSDf-Schätzung auf Basis eines einzigen Fotos erlaubt [ZHR⁺09]. Ein grober Überblick über das Verfahren sowie erste Ergebnisse des aktuellen Prototypen sind in Abb. 4 dargestellt.

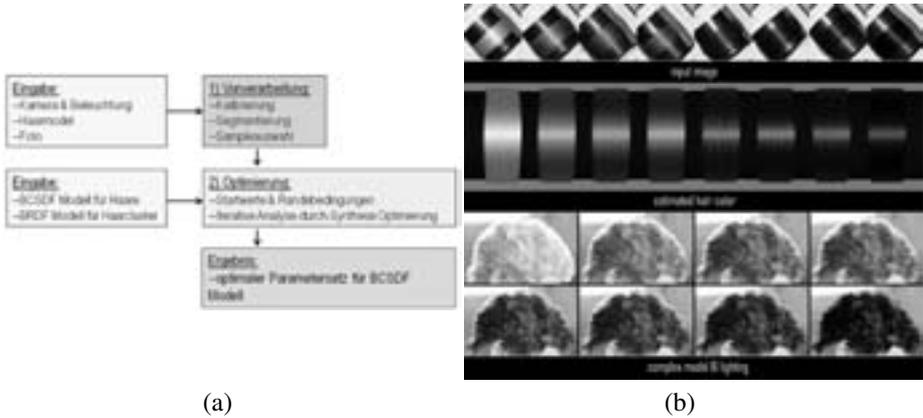


Abbildung 4: Rekonstruktion der BCSDf aus Bilddaten: (a) Gesamtüberblick und (b) Rekonstruktionsbeispiele – von oben nach unten: Eingabebilder, Renderings unter Verwendung der geschätzten BCSDf sowie ähnlicher Geometrie und Beleuchtung, Übertragung der BCSDf auf eine ganze Frisur mit komplexer Beleuchtung.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Im Rahmen der Dissertation wurde die optische Simulation von Faserkollektionen umfassend behandelt. Auf der Basis neu entwickelter theoretischer Grundlagen wurden praktische Verfahren entwickelt, welche eine effiziente Visualisierung möglich machen. Daneben wurde für den wichtigen Spezialfall Humanhaar theoretisch untersucht, inwieweit die Rekonstruktion optisch relevanter Eigenschaften aus Bilddaten möglich ist. Die gewonnenen Ergebnisse konnten in der Folge auch praktisch bestätigt werden. Da das Problem der effizienten Visualisierung durch die Beiträge der Dissertation weitestgehend gelöst zu sein scheint, werden sich zukünftige Forschungsarbeiten verstärkt auf das entsprechende inverse Problem, der Rekonstruktion von optischen Eigenschaften aus Bilddaten und anderen Messungen, konzentrieren.

Literatur

- [Kim02] Tae-Yong Kim. *Modeling, rendering and animating human hair*. Dissertation, Los Angeles, CA, USA, 2002. Adviser-Neumann,, Ulrich.
- [KK89] J. T. Kajiya und T. L. Kay. Rendering fur with three dimensional textures. *SIGGRAPH Comput. Graph.*, 23(3):271–280, 1989.
- [MJC⁺03] Stephen R. Marschner, Henrik Wann Jensen, Mike Cammarano, Steve Worley und Pat Hanrahan. Light scattering from human hair fibers. *ACM Transactions on Graphics*, 22(3):780–791, 2003. SIGGRAPH 2003.
- [ZHR⁺09] Arno Zinke, Tomas Lay Herrera, Martin Rump, Andreas Weber und Reinhard Klein. A Practical Approach for Photometric Acquisition of Hair Color. *submitted to SIGGRAPH ASIA, ACM Trans. Graph.*, 2009.
- [ZSW04] A. Zinke, G. Sobottka und A. Weber. Photo-Realistic Rendering of Blond Hair. In B. Girod, M. Magnor und H.-P. Seidel, Hrsg., *Vision, Modeling, and Visualization (VMV) 2004*, Seiten 191–198, Stanford, U.S.A., November 2004. IOS Press.
- [ZW06] Arno Zinke und Andreas Weber. Global Illumination for Fiber Based Geometries. In *Electronic proceedings of the Ibero American Symposium on Computer Graphics (SIACG 2006)*, Santiago de Compostela, Spain, Juli 2006.
- [ZW07] Arno Zinke und Andreas Weber. Light Scattering from Filaments. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(2):342–356, 2007.
- [ZYWK08] Arno Zinke, Cem Yuksel, Andreas Weber und John Keyser. Dual scattering approximation for fast multiple scattering in hair. In *SIGGRAPH '08: ACM SIGGRAPH 2008 papers*, Seiten 1–10, New York, NY, USA, 2008. ACM.



Arno Zinke wurde am 13. April 1975 in Berlin geboren. Das Studium der Physik und Informatik an der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität schloss er als Diplom-Informatiker ab (2004) und wurde dort anschließend im Fach Informatik promoviert (2008). Neben seiner Arbeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter des Instituts für Informatik der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn und als Lehrbeauftragter der Goethe-Universität Frankfurt ist er seit 2004 außerdem geschäftsführend für das Unternehmen GfaR GmbH tätig.