

Übersicht über die optischen Eigenschaften von Human-Haar

Unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der Computergrafik

G. Sobottka

Universität Bonn. sobottka@cs.uni-bonn.de

A. Weber

Universität Bonn. weber@cs.uni-bonn.de

Institut für Informatik II
Universität Bonn
D-53117 Bonn, Germany

Übersicht über die optischen Eigenschaften von Human-Haar

Unter besonderer Berücksichtigung der Anforderungen der Computergrafik

Gerrit Sobottka

Universität Bonn. sobottka@cs.uni-bonn.de

Andreas Weber

Universität Bonn. weber@cs.uni-bonn.de

12. April 2002

Zusammenfassung

Haare weisen eine elliptische Querschnittsgeometrie auf. Der Grad der Elliptizität variiert, wie auch die Welligkeit, mit der Rasse. Der Verlauf der goniophotometrischen Messkurve zeigt für Haare bei einem Einfallswinkel von 30° ein Maximum bei etwa 24° und ein weiteres von der Haarfarbe abhängiges diffuses Maximum bei 40° . Die optischen Eigenschaften können durch die Applikation von kosmetischen Substanzen wie Haarsprays oder Shampoos beeinflusst werden.

1 Struktur und Geometrie

die Stabilität des Haares verantwortlich.

Struktur. Morphologisch können beim Haar vereinfacht zwei Hauptkomponenten unterschieden werden: (i) die *Cuticula* oder äußere Hülle des Haares und (ii) der *Cortex*, der von der *Cuticula* umschlossen wird (ABB. 1).

Die Aufgabe der *Cuticula* besteht im Schutz der Haare vor chemischen und physikalischen Belastungen der Außenwelt [OR68]. Die *Cuticula* ist von röhrenförmiger Struktur und bildet den Mantel des Haares, bestehend aus verbundenen dachziegelförmig übereinander angeordneten *Cuticulazellen* von $35 - 40 \mu m$ Dicke, den *Schuppen*.

Der *Cortex* besteht aus in axialer Richtung verlaufenden spindelförmigen Zellen und ist für

Haarfarbe. Die Haarfarbe wird durch den Pigmentfarbstoff *Melanin* verursacht, der in den Cortezellen eingelagert ist. Er kommt in den beiden Modifikationen *Phäomelanin* und *Eumelanin* vor [Swi97], deren Verhältnis die natürliche Haarfarbe bestimmt. Das Eumelanin kann alle Farbtöne von braun bis schwarz annehmen, Phäomelanin überwiegt bei blonden und roten Haaren.

Querschnitt. Der Haardurchmesser schwankt in der Regel mit dem Alter und nimmt seinen größten Wert mit der Pubertät an. Die Welligkeit und die Querschnittsgeometrie des Haares sind genetisch bedingt und von Rasse zu Ras-

se unterschiedlich, so dass eine Untergliederung der Eigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Rasse sinnvoll erscheint. Robbins [Rob02] unterscheidet hier *kaukasisch*, *mongolisch* und *äthiopisch*. Dabei stellt der kaukasische mit einem Durchmesser von $50 - 90 \mu m$ den feinsten Haartyp dar. Interessanterweise besitzen Haare keinen runden, sondern einen eher elliptischen Querschnitt. Modifikationen mit nieren-/ birnenförmigem oder gar dreieckigem Querschnitt treten vereinzelt auf, primär im Zusammenhang mit pathologischen Veränderungen. Dabei ist das Verhältnis der beiden Haupttradien charakteristisch für die jeweilige Rasse. Die Form des Querschnittes unterliegt innerhalb einer Rasse und innerhalb der Kopfbehaarung einer Person u.U. erheblichen Schwankungen. Als Faustregel gilt, dass der Durchmesser der Haare bei einer Person um mehr als den Faktor zwei variiert [Rob02]. Genaugenommen ändert sich Faserquerschnitt in axialer Richtung. Die Änderungen sind jedoch klein und können deshalb vernachlässigt werden. Querschnittswerte sind deshalb immer als Mittelwerte anzusehen.

Vernall [Ver61] hat die Haare von jungen, männlichen Personen unterschiedlicher Nationalität im Alter zwischen 20 und 30 Jahren hinsichtlich ihrer Querschnittsgeometrie untersucht¹. Die Variabilität bezüglich der Geometrie zwischen den Rassen ist dabei signifikant größer als zwischen den Individuen einer Rasse und hier wiederum signifikant größer, als beim Individuum selbst.

Die für den Hauptdurchmesser ermittelten Werte bewegen sich zwischen $60 \mu m$ (West-Europäer) und $125 \mu m$ (Chinesen). Im Durchschnitt zeigen die Haare des Afrikaners mit

¹Es wird eine etwas andere Aufteilung bezüglich der Rassen verwendet als bei [Rob02].

$98 \mu m$ den größten, die des Europäers mit $82 \mu m$ dagegen den kleinsten Durchmesser. Die Werte des kleinen Durchmessers rangieren zwischen $43 \mu m$ (West-Europäer) und $100 \mu m$ (Chinesen). Der Chinese hat mit $77 \mu m$ in Bezug auf den kleinen Hauptdurchmesser durchschnittlich die dicksten Haare, der West-Europäer mit $57 \mu m$ dagegen die dünnsten. Bedingt durch die extremen Werte der Hauptdurchmesser sind die Haarfasern des Chinesen mit Abstand am dicksten, die der West-Europäer dagegen am dünnsten.

Der Quotient der beiden Haupttradien beschreibt den Grad der Elliptizität. Die Indices variieren zwischen 1.25 und 1.68. Das Haar des Afrikaners zeichnet sich infolge seiner Flachheit durch den größten Index aus. Bei den Chinesen findet man den kleinsten Index und damit die rundeste Form. In TAB. 1 sind die Werte zusammengestellt. Besonders das afrikanische Haar fällt neben seiner ausgeprägten Elliptizität auch durch seine extreme axiale Torsion auf [MWM66].

Welligkeit. Die longitudinale Struktur oder Welligkeit des Haares stellt eine der wichtigsten Größen für das Haarstyling dar und variiert insbesondere mit der Rasse. Die extreme Lockigkeit des Afrikanerhaares findet man sonst nur bei den Populationen Papua Neu Guineas [OF99]. Im asiatischen Raum überwiegen Haare mit glatter Konfiguration, wohingegen im europäischen Raum alle Arten vertreten sind. Die Haargeometrien sind schematisch in ABB. 2 dargestellt. Konkrete Werte in Abhängigkeit von der Rasse liegen nicht vor.

Haardichte. Für Männer und Frauen kaukasischer Abstammung kann ein Durchschnittswert von 340 Haare/cm^2 (± 76) angenommen wer-

	\bar{d}_{\max} (μm)	\bar{d}_{\min} (μm)	$\bar{d}_{\max}/\bar{d}_{\min}$ (-)	A (μm^2)
West-Europäer	81.94	56.74	1.44	3786
Chinesen	94.28	76.79	1.23	5817
Inder	92.94	66.49	1.40	4994
Afrikaner	98.23	58.52	1.68	4648
Kaukasier	63.93	47.28	1.35	2411
Mongolen	79.53	61.96	1.28	4085
Athiopier	90.62	51.70	1.75	4006

TAB. 1: Größter und kleinster durchschnittlicher Durchmesser und Flächeninhalt bei Haaren unterschiedlicher Rassen [Swi95, Rob02].

Alter	φ (n/cm^2)	σ (n/cm^2)
16 - 29	332	346
30 - 55	352	329

TAB. 2: Haardichte bei Frauen und Männern kaukasischer Abstammung [OL82].

den, sofern keine kosmetischen Behandlungen vorgenommen wurden [OL82]. Andere Untersuchungen ergaben Werte von 192 *Haare/cm*² (± 12) [PA90]. Durchschnittswerte für die angesprochene Populationsgruppe findet man in TAB. 2.

2 Optische Eigenschaften

Bei Beleuchtung eines Haares wird das Licht teilweise an der Haaroberfläche reflektiert oder dringt in das Haarinnere, wo es von den Pigmenten absorbiert oder an der Rückwand reflektiert oder gebrochen wird. D.h., es tritt unter einem bestimmten Winkel auf der Rückseite wieder aus - *Transmission*. Einfallswinkel und Ausfallswinkel sind in der Regel nicht identisch [Rob02].

Die Bestimmung des Reflexionsverhaltens von Haaren erfolgt unter Anwendung *goniophotometrischer* Techniken [SGF77a]. Hierbei wird die

Lichtintensität des reflektierten Lichtes als Funktion des Winkels gemessen. Das Maximum dieser Funktion ist der *spekulare* Anteil der Reflexion. Ein gewisser Teil des Lichtes wird dagegen in unterschiedliche Richtungen gestreut, der *diffuse* Anteil der Reflexion. Ursachen für die Streuung sind Inhomogenitäten der Haaroberfläche sowie der Haarmatrix.

Goniophotometrische Untersuchungen [SGF77a, SGF77b, GGL87, BS90, RR93] an einzelnen Haarfasern haben gezeigt, dass das Maximum der spekularen Reflexion bei 24° liegt, wenn Haare in axialer Richtung (Haaransatz-Spitze) unter einem Winkel von 30° gemessen gegen die Lotrechte angestrahlt werden (siehe ABB. 3). Daraus lässt sich ableiten, dass die Schuppen in einem Winkel von etwa 3° von der Oberfläche abstehen. Die Winkel nehmen in der Regel mit zunehmendem Abstand von der Haarwurzel leicht ab [GGL87]. Der Initialwinkel beträgt offenbar 3°. Ein weiteres lokales Intensitätsmaximum, dessen Wert von der Haarfarbe abhängig ist, tritt bei etwa 40° auf [SGF77b]. Bei braunen Haaren ist es bedingt durch die größere Absorption kleiner als bei blonden Haaren, bei schwarzen Haaren verschwindet es in der Regel ganz. Bei

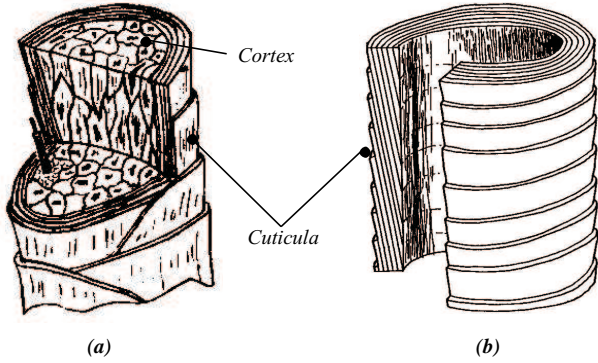


ABB. 1: Struktur des Haares (schematisch). (a) Cortex und Cuticula, (b) nur Cuticula, [JZH97].

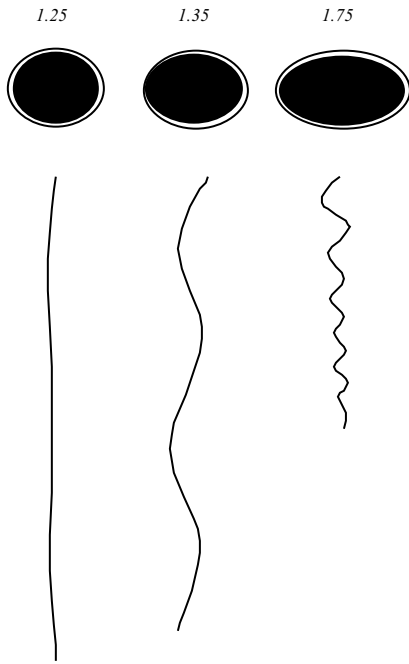


ABB. 2: Welligkeit und Elliptizität von Haaren unterschiedlicher Rassen [Rob02].

Beleuchtung einer Haarfaser in entgegengesetzter Richtung (Spitze-Haaransatz) zeigt der Verlauf der Lichtintensität ein Maximum bei 36° , der Kurvenverlauf ist quasi gespiegelt, die Intensitäten weichen aber leicht voneinander ab [SGF77b].

Die Farbe des spekularen Anteils ist weiss, die des diffusen Maximums entspricht der Haarfarbe [SGF77a]. Die spekulare Reflexion ist ein Oberflächenphänomen, wohingegen die diffusen Anteile der Reflexion von der inneren Struktur bzw. von der Haarfarbe abhängig sind. Werden Haare in einer Schicht exakt parallel angeordnet, wird der diffuse Anteil der Reflexion für diese Anordnung minimal.

Der Verlauf des Lichtstrahls kann nach Stamm et al. [SGF77a] durch ein stark vereinfachtes Modell beschrieben werden (siehe ABB. 4). Die Winkel, die aufgrund dieses Modells vorhergesagt werden, weichen von den empirisch ermittelten Ergebnissen ab. Der Brechungswinkel kann nach dem Gesetz von SNELLIUS ermittelt werden

$$\frac{\sin \varphi_1}{\sin \varphi_2} = \frac{n_2}{n_1} = \text{const.}$$

Stamm et al. [SGF77a] geben als Brechzahl für die Cuticula $n_2 = 1.548$ an², die Brechzahl für Luft ist $n_1 \approx 1.0$, so dass $n_2/n_1 = n = 1.548$ gesetzt werden kann. Damit gilt

$$\sin \varphi_2 = \frac{1}{n} \sin (\varphi_1 - \alpha),$$

$$\sin (\varphi_3 + \alpha) = n \sin (\varphi_2 + 2\alpha)$$

und

$$\sin (\varphi_4 + \alpha) = n \sin (\varphi_2 + 4\alpha),$$

wobei φ_1 der Einfallswinkel des Lichtes gegen die Lotrechte zur Haarachse und α der Winkel der Schuppen ist ($\approx 3^\circ$).

²Für Cuticula und Cortex kann der gleiche Wert angenommen werden.

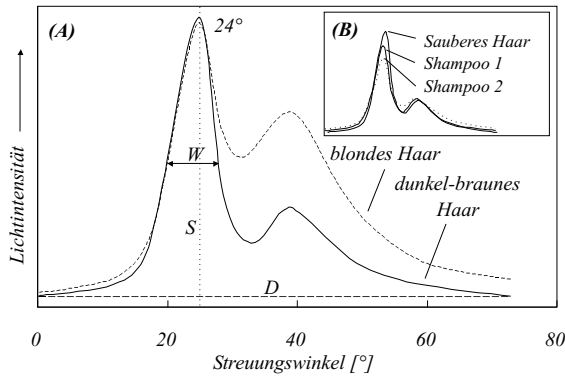


ABB. 3: Streulichtintensität in Abhängigkeit vom Winkel, Einfallswinkel 30° [SGF77b].

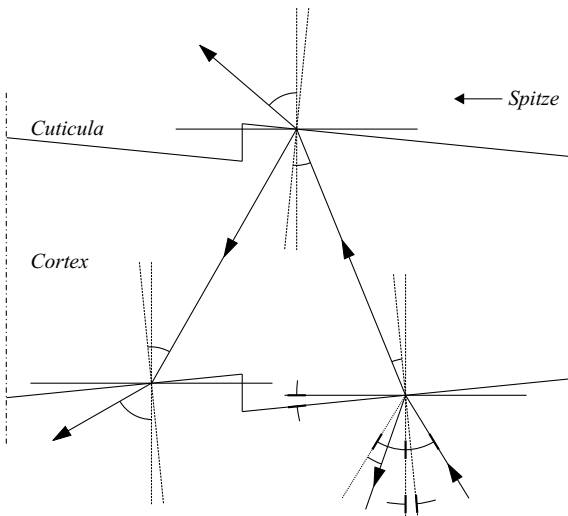


ABB. 4: Modell für die Reflexion und Beugung des Lichts an einer Haarfasern [SGF77a].

Haarglanz. Glänzendes Haar ist aus Sicht des Konsumenten eine der wünschenswertesten kosmetischen Eigenschaften. Um so verständlicher sind die Bemühungen der kosmetischen Industrie, das physikalischen Phänomen zu verstehen und zu quantifizieren. Dazu wurde der Begriff des «Haarglanzes» eingeführt. Er ist abhängig von der Haarfarbe, der Dicke der Faser und dem Zustand der Haaroberfläche. Partikelbeladung infolge kosmetischer Behandlungen mit Shampoos, Haarsprays, Haarlack oder Haargel etc. sowie durch Staub aus der Umgebungsluft beeinflussen den Haarglanz in erheblichem Maße [RR93]. Auch die Anordnung der Haarfasern ist zu berücksichtigen. In die Formeln zur Quantifizierung des Haarglanzes gehen der spekulare und der diffuse Anteil der Reflexion ein. Allgemein gilt, dass der Haarglanz mit zunehmendem spekularen Anteil größer und mit zunehmendem diffusen Anteil kleiner wird. Robbins und Reich [RR93] schlagen folgende Beziehung zur Ermittlung des Haarglanzes vor: $L = S/DW$. D ist der Wert der diffusen Reflexion, der durch Abtrennen der Basisreflexion aus der goniophotometrischen Messkurve erhalten wird³. S ist das Integral der spiegelnden Reflexion ohne diffusen Anteil, W ist die Breite des Maximumpeaks bei halber Intensität (ABB. 3). Diese Gleichung gilt nur, solange ein diffuser Anteil vorhanden ist. Das ist bei Haaren strukturell bedingt immer der Fall. Stamm et al. [SGF77b] geben für den Haarglanz bei unterschiedlicher Haarfarbe einige Werte an (ermittelt nach der Beziehung $(S - D)/S$), schwarz (0.90), dunkel-braun (0.85), hell-braun (0.74), blond (0.73), grau (0.60) und stark gebleicht (0.0).

Allgemein korrelieren die Messwerte aus Haarglanzmessungen mit den subjektiven

³Verbindung der Streulichtintensitäten bei 0° und 75°

Einschätzungen des kosmetisch ungeschulten Beobachters [RR93].

Kosmetika. Kosmetische Behandlungen der Haare wie das Waschen, die Applikation von Haarsprays, Haarlacken oder auch das Bleichen und Färben beeinflussen die optischen Eigenschaften. Haarwaschmittel werden besonders oft und regelmäßig verwendet. Die Werbung suggeriert eine Zunahme des Glanzes nach der Verwendung bestimmter Produkte. Solche Aussagen decken sich allerdings nicht unbedingt mit den Messergebnissen von [RR93]. ABB. 3 zeigt den typischen Kurvenverlauf eines dunkelbraunen orientalischen Haares im unbehandelten Zustand sowie nach mehrfacher Behandlung mit einem handelsüblichen Shampoo. Es lässt sich eine «*Abstumpfung*» des Glanzes beobachten. D.h., das Intensitätsmaximum wird kleiner und der diffuse Anteil größer. Das Entfernen der Shampooester unter Verwendung spezieller Detergenzien wie Natriumlaurylsulfat führt zur Wiederherstellung der Ausgangskurve. Bustard und Smith [BS90] haben hingegen eine deutliche Zunahme des Glanzes nach der Behandlung von Haaren mit herkömmlichen Shampoos gefunden. Allerdings lässt sich eine Bewertung des Glanzes besser an einer Gruppe von Haaren vornehmen, als an einer Einzelfaser. Die Einhaltung von Randbedingungen, wie sie bspw. beim Haarwaschen auftreten, ist hier eher möglich. Neben Shampooestern führt auch die natürliche Bildung von Fetten zur Abstumpfung des Glanzes. Bei Einsatz von Haarsprays kann man je nach Inhaltsstoffen Abnahmen des Verhältnisses von spiegelnder zur diffusen Reflexion von bis zu 14 % finden [Rob02].

3 Folgerung

Auf den Sachverhalt eines spekularen und eines diffusen Maximums ist im Zusammenhang mit der Animation von Haaren im Bereich der Computergrafik bereits 1991 von Rosenblum et al. [RCI91] hingewiesen worden. Allerdings wurden bis heute keine Beleuchtungsmodelle entwickelt, die diesem Sachverhalt Rechnung tragen. Die Berücksichtigung von Selbstschattierung und Backlight-Effekt steigern die Qualität der Renderingergebnisse deutlich. Man muss deshalb die Frage stellen, ob die Berücksichtigung der hier angeführten Befunde zu einer weiteren Qualitätssteigerung bei der grafischen Darstellung von Haaren führen können.

Literatur

- [BS90] H.K. Bustard and R.W. Smith. Studies of factors affecting light scattering by individual human hair fibres. *Int. J. Cosmet. Sci.*, 12:121–133, 1990.
- [GGL87] A. Guiolet, J.C. Garson, and J.L. Leveque. Study of the optical properties of human hair. *Int. J. Cosmet. Sci.*, 9:111–124, 1987.
- [JZH97] P. Jollès, H. Zahn, and H. Höcker. *Formation and Structure of Human Hair*. Birkhäuser-Verlag, Basel, 1997.
- [MWM66] J. Menkart, L.J. Wolfram, and Irene Mao. Caucasian Hair, Negro Hair, and Wool: Similarities and Differences. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 17:769–787, 1966.
- [OF99] Robert R. Ogle and Michelle J. Fox. *Atlas of Human Hair. Microscopic Characteristics*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 1999.
- [OL82] C.E. Orfanos and L.Brückmann. Messungen der Haardichte an normaler menschlicher Kopfhaut mit und ohne kosmetische Vorbehandlung. *Akt. Dermatol.*, 8:222–224, 1982.
- [OR68] C. Orfanos and H. Ruska. Die Feinstruktur des menschlichen Haares. I. Die Haar-Cuticula. *Arch. klin. exp. Derm.*, 231:97–110, 1968.

- [PA90] V. Pecoraro and I.P.L. Astore. Measurements of Hair Growth Under Physiological Conditions. In C.E. Orfanos and R. Happle, editors, *Hair and Hair Diseases*, pages 237–254. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- [RCI91] Robert E. Rosenblum, Wayne E. Carlson, and Edwin Tripp III. Simulating the structure and dynamics of human hair: Modelling, rendering and animation. *The Journal of Visualization and Computer Animation*, 2:141–148, 1991.
- [Rob02] C.R. Robbins. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag, New York, 4. edition, 2002.
- [RR93] Charles Reich and Clarence R. Robbins. Light scattering and shine measurement of human hair: A sensitive probe of the hair surface. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 44:221–234, 1993.
- [SGF77a] Robert F. Stamm, Mario L. Garcia, and Judith J. Fuchs. The optical properties of human hair I. Fundamental considerations and goniophotometer curves. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 28:571–599, 1977.
- [SGF77b] Robert F. Stamm, Mario L. Garcia, and Judith J. Fuchs. The optical properties of human hair II. The luster of hair fibers. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 28:601–609, 1977.
- [Swi95] J.A. Swift. Some simple theoretical considerations on the bending stiffness of human hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 17:245–253, 1995.
- [Swi97] J. Allan Swift. *Fundamentals of Human Hair Science*. Micelle Press, Weymouth, Dorset, England, 1997.
- [Ver61] D.G. Vernall. A study of the size and shape of cross-sections of hair from four races of men. *Am. J. Phys. Anthropol.*, 19:345–350, 1961.