

Geometrische und Physikalische Eigenschaften von Human-Haar

Gerrit Sobottka
Institut für Informatik II
Universität Bonn
53117 Bonn, Germany
sobottka@cs.uni-bonn.de

Andreas Weber
Institut für Informatik II
Universität Bonn
53117 Bonn, Germany
weber@cs.uni-bonn.de

ZUSAMMENFASSUNG

Im folgenden geben wir eine Übersicht über die geometrischen und physikalischen Eigenschaften von menschlichen Haaren. Unter geometrischen Eigenschaften werden die axiale und die radiale Struktur, sowie die Haarlänge verstanden. Die physikalischen Eigenschaften umfassen die Zug, Biege und Torsionssteifigkeit, viskoelastisches Verhalten und Hysterese, sowie den Einfluss von Feuchtigkeit, Temperatur und kosmetischen Behandlungen auf eben diese Größen. Dazu zählen ferner Reibung und optische Eigenschaften von Haaren.

Stichworte

geometrische Eigenschaften, mechanische Eigenschaften, menschliche Haare, Humanhaar

1. EINLEITUNG

Im folgenden soll ein kurzer Überblick über die physikalischen Eigenschaften von menschlichen Haaren gegeben werden. Als Informationsquellen dienen die Literatur aus dem Bereich der Kosmetikbranche bzw. der Medizin, sowie diverse Zeitschriftenbeiträge unterschiedlicher Fachrichtungen, die in den letzten Jahrzehnten zu diesem Thema veröffentlicht worden sind.

Die Aufklärung der Haar-Struktur bzw. die Verifikation bestehender Modelle sowie die Aufdeckung von Zusammenhängen zwischen Krankheitsbildern und pathologischen Veränderungen der Haareigenschaften stehen im Mittelpunkt des Interesses der nicht kosmetisch motivierten Haarforschung. Infolgedessen werden Untersuchungen oftmals unter Bedingungen durchgeführt, die in dieser Form im «*Haar-Alltag*» nicht auftreten. Dennoch scheint die Angabe qualitativer Zusammenhänge unter «*unnatürlichen*» Bedingungen sinnvoller, als bestimmte Themenbereiche gänzlich unbeleuchtet zu lassen.

Haare gehören zur Gruppe der *Keratine* und sind morpho-

logisch und von ihren physikalischen Eigenschaften her eng verwandt mit der Schafswolle, die sehr viel eingehender untersucht worden ist. So sind zum Beispiel die Isothermen der Feuchtigkeitsaufnahme bis zum 95 %-Level praktisch identisch [21]. In der Literatur wird der Bezug zur Wolle oft hergestellt, wenn empirische Befunde für Haare nicht vorliegen. Dieser Vorgehensweise wollen wir uns im folgenden anschließen.

2. STRUKTUR DER HAARFASER

In der Literatur findet man häufig den Hinweis, dass die mechanischen Eigenschaften von Haaren primär über die Struktur verstanden werden können. Deshalb wird im folgenden kurz auf den mikro-strukturellen bzw. molekularen Aufbau der Haarfaser eingegangen.

Haare gehören zur Gruppe der Keratinfasern und bestehen im wesentlichen aus einer Ansammlung dichtgepackter, keratinhaltiger Filamente. *Keratine* selbst sind Faserproteine mit α -helicaler Struktur, die durch Disulfidbindungen stabilisiert werden [24]. Der Begriff des Karatins wird in der Literatur oftmals synonym für biologische Materialien verwendet, die solche Proteine enthalten. Als typische Beispiele können hier neben Haaren auch Wolle, Horn, Nägel, Hufen, Stacheln etc. angeführt werden. Haare sind morphologisch und von den physikalischen Eigenschaften her eng verwandt mit der Schafswolle.

Die sogenannten α -Keratine¹ bestehen aus Polypeptidketten, die durch Kondensation von Aminosäuren entstehen [29]. Keratine sind reich an Cystin, einer Aminosäure, die sich durch ihren Schwefelgehalt auszeichnet. Die Thiolgruppen zweier Cystinreste können durch Ausbildung einer kovalenten Bindung mehrere Polypeptidketten miteinander verbinden.

Die physikalischen Eigenschaften von Humanhaar werden maßgeblich durch die Wasseraufnahmefähigkeit seiner Zellkomponenten bestimmt [52]. Diese hängt von der chemische Zusammensetzung ab, insbesondere dem Verhältnis von hydrophilen und hydrophoben Aminosäureresten und dem Vernetzungsgrad der Proteine. Die charakteristische Unlöslichkeit und Resistenz gegen enzymatischen Abbau begründen sich durch den hohen Gehalt an der Aminosäure Cystin bzw. den damit verbundenen hohen Schwefelgehalt.

Morphologisch können beim Haar drei Hauptkomponen-

¹Das α rührt vom typischen Röntgen-Beugungsmuster her, dem α -Pattern, das für diese Art von Proteinen charakteristisch ist.

Permission to make digital or hard copies of all or part of this work for personal or classroom use is granted without fee provided that copies are not made or distributed for profit or commercial advantage and that copies bear this notice and the full citation on the first page. To copy otherwise, to republish, to post on servers or to redistribute to lists, requires prior specific permission and/or a fee.

CG-2003/1, März 2003, ISSN 1610-8892

Computer Graphics Technical Reports Series, Institut für Informatik II.

Copyright University of Bonn, Germany

ten unterschieden werden: (i) die *Cuticula* oder äußere Hülle des Haares, (ii) der *Cortex*, der von der Cuticula umschlossen wird (iii) die *Medulla*, eine poröse Röhre im Zentrum des Cortex (ABB. 1).

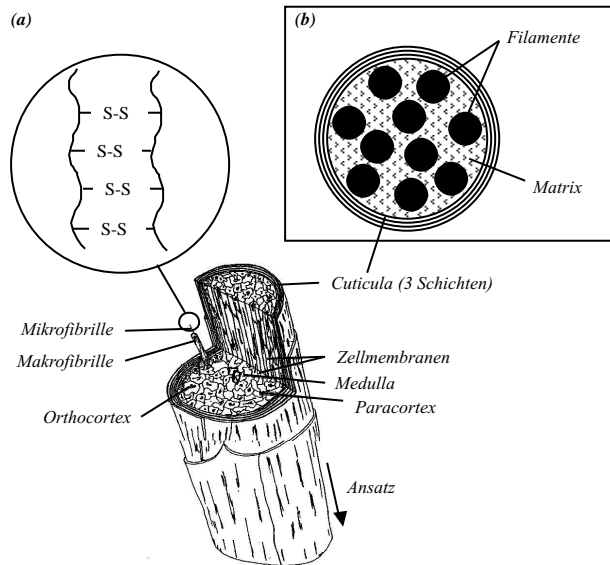


Abb.1: Struktur des menschlichen Haares. (a) Räumliche Ansicht, (b) Schematischer Querschnitt mit mechanisch relevanten Komponenten.

Die Aufgabe der Cuticula besteht im Schutz der Haare vor chemischen und physikalischen Belastungen der Außenwelt [31]. Die Cuticula ist von röhrenförmiger Struktur und bildet den Mantel des Haares, bestehend aus verbundenen dachziegelförmig übereinander angeordneten Cuticulazellen von 35 – 40 μm Dicke, den *Schuppen*. Die Cuticulazellen setzen sich ihrerseits aus aus drei Schichten, der *Epi*-, *Endo*- und *Exocuticula* zusammen.

O'Connor et al. [27] haben die Kinetik des Hydratationsvorganges und die damit einhergehenden morphologischen Veränderungen der Haaroberfläche durch *Atomic Force Microscopy* erstmals direkt beobachten können. Die *Epicuticula* ist bedingt durch den hohen Grad der Vernetzung sehr hart und neigt weniger zum Quellen. Sie fungiert damit als Diffusionsbarriere. Die hydrophile *Endocuticula* bildet bedingt durch ihre Wasseraufnahmefähigkeit einen wichtigen Diffusionsweg. Ihre Quellfähigkeit und leichte enzymatische Abbaubarkeit sind die Folge hoher Konzentrationen an hydrophilen Aminosäureresten.

Der Cortex setzt sich aus in axialer Richtung verlaufenden spindelförmigen Zellen in zylindrischer Anordnung zusammen. Die Rindenzellen sind durch eine interzelluläre Kittsubstanz miteinander verbunden [32]. Das Cortexkeratin besteht aus feinsten Filamenten von 6-8 nm Länge, den *Mikrofibrillen*. Mehrere solcher Mikrofibrillen sind zu *Makrofibrillen* zusammengelagert, die in den Cortexzellen liegen. Sie enthalten das α -Keratin. Die Cortexzellen sind von unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung. Das Haar des Afrikaners besteht im Bogeninneren der Kräuselung aus cystinreichen Cortexzellen (Paracortex), auf der Außenseite aus cystinärmeren Zellen (Orthocortex). Bei glatten Haaren sind beide Zelltypen konzentrisch verteilt.

Haartyp	Alter (a)	\bar{l}_{max} (cm)	\bar{r}_{max} (μm)
Lanugo	<1	15	20
Kind	1 - 12	60	60
Erwachsene	>13	100	100
Vellus	>30	0.1	4

Tab.1: Kopfbehaarung und Alter, durchschnittliche maximale Länge und Radius.

Im Zentrum des Cortex kann als weitere Zellkomponente gelegentlich die *Medulla* auftreten, die von porösem Charakter ist. Ihre Anwesenheit hat destabilisierenden Einfluss auf die Zugfestigkeit.

Generell sind die Zellen der Cuticula, des Cortex und der Medulla fest miteinander verkittet. Das kann auf dem Wege der chemischen Bindung über Kittsubstanzen geschehen, andererseits treten auch rein mechanische, druckknopfartige Verbindungen auf.

Die Haarfarbe wird durch den Pigmentfarbstoff *Melanin* verursacht, der in den Cortexzellen eingelagert ist. Er kommt in den beiden Modifikationen *Phäomelanin* und *Eumelanin* vor [45], deren Verhältnis die natürliche Haarfarbe bestimmt. Das Eumelanin kann alle Farbtöne von braun bis schwarz annehmen, Phäomelanin überwiegt bei blonden und roten Haaren. Der Verlust der Pigmentierung mit fortschreitendem Alter (Ergrauen der Haare) geht in der Regel nicht mit Änderungen im physikalischen Verhalten der Haare einher [16], das fortschreitende Alter an sich dagegen schon. Unpigmentierte Haare sind etwas gröber und welliger als pigmentierte.

2.1 Geometrie

2.1.1 Haarlänge

Die Haarlänge hängt vom jeweiligen Haar-Typus ab. Die pränatalen Haare oder Lanugo fallen in der Regel schon vor der Geburt oder kurz danach aus und erreichen Längen von kaum mehr als 15 cm . Sie werden direkt vom präpubertären Haartypus, dem primären Terminalhaar abgelöst. Seine Struktur ist deutlich gröber als das Lanugo und erreicht Längen von bis zu 60 cm . Mit dem Einsetzen der Pubertät und den damit einhergehenden hormonellen Veränderungen lässt sich eine gröbere Haarstruktur mit Längen von bis zu 100 cm feststellen, das sogenannte sekundäre Terminalhaar. Zwischen dem zwanzigsten und dreißigsten Lebensjahr führen dann erneute hormonelle Umstellungen zum Wachstum von feineren und oftmals kürzeren Haarfasern. Dieser Effekt kann bis zum Übergang des Terminalhaares zum Vellus führen, das bei einem sehr kleinen Durchmesser von ca. 4 μm Längen von kaum mehr als 0.1 cm erreicht. Dieser feine Haartypus ist mit bloßem Auge kaum wahrnehmbar und lässt die betroffenen Regionen kahl erscheinen. TAB. 1 fasst die Daten zusammen. Die hier genannten Längen stellen Durchschnittswerte dar. Auf «Langhaar- Wettbewerben» können des öfteren Haarlängen von über 150 cm beobachtet werden. Den Rekord hält derzeit die Amerikanerin Dianne Witt aus Massachusetts mit mehr als 300 cm . Die Wachstumsrate liegt bei ca. 15 cm/a .

2.1.2 Querschnitt

Der Haardurchmesser schwankt in der Regel mit dem Al-

ter und nimmt seinen größten Wert mit der Pubertät an. Die Welligkeit und die Querschnittsgeometrie des Haares sind genetisch bedingt und von Rasse zu Rasse unterschiedlich, so dass eine Untergliederung der Eigenschaften in Abhängigkeit von der jeweiligen Rasse sinnvoll erscheint. Robbins [37] unterscheidet hier *kaukasisch*, *mongolisch* und *äthiopisch*. Dabei stellt der kaukasische mit einem Durchmesser von $50 - 90 \mu\text{m}$ 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 Hauptradien charakteristisch für die jeweilige Rasse. Der Quotient übt wesentlichen Einfluss auf das Biegeverhalten aus. 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 [37]. 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 [48] hat die Haare von jungen, männlichen Personen unterschiedlicher Nationalität im Alter zwischen 20 und 30 Jahren hinsichtlich ihrer Querschnittsgeometrie untersucht². 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 Werte der Hauptdurchmesser bewegen sich zwischen $60 \mu\text{m}$ beim West-Europäer und $125 \mu\text{m}$ beim Chinesen (kleinster bzw. größter über alle Proben gefundener Wert). Die Haare des Afrikaners sind in Bezug auf den Hauptdurchmesser durchschnittlich am größten, die eines West-Europäers am kleinsten (Chinesen und Inder liegen dazwischen).

Betrachtet man den Wert des kleinsten Durchmessers, so liegen die Werte zwischen $43 \mu\text{m}$ beim West-Europäer und $100 \mu\text{m}$ beim Chinesen. Chinesen verfügen im Durchschnitt über die dicksten, Europäer dagegen über die dünnsten Haare. Der intra-personelle Unterschied bewegt sich zwischen $25 \mu\text{m}$ beim Individuum afrikanischer Abstammung und $313 \mu\text{m}$ beim Inder.

In Bezug auf die Querschnittsfläche verfügen West-Europäer mit $2017 \mu\text{m}^2$ über den kleinsten und die Chinesen mit $10105 \mu\text{m}^2$ über den größten Wert.

Als Index für den Grad der Elliptizität wird der Quotient der beiden Hauptradien herangezogen. Die Indices variieren hier zwischen 1.25 und 1.68. Das Haar des Afrikaners zeichnet sich durch seine Flachheit und folglich durch den größten Index aus. Bei den Chinesen findet man den kleinsten Index und damit die rundeste Form. Die Geometrie bei West-Europäern und Indern liegt dazwischen. In TAB. 2 sind die Werte zusammengestellt. Besonders das afrikanische Haar fällt neben seiner ausgeprägten Elliptizität auch durch seine extreme axiale Torsion auf [21].

Swift [44] führt basierend auf den Erkenntnissen zur Elliptizität weitergehende Überlegungen durch, auf die im Zu-

²Es wird eine etwas andere Aufteilung bezüglich der Rassen verwendet als in [37]. Die etwas unglücklichen Bezeichnungen *Negroider* und *negroid* werden im folgenden durch die moderneren Begriffe *Afrikaner* bzw. *afrikanisch* ersetzt.

sammenhang mit dem Biegeverhalten von Haaren weiter unten kurz eingegangen werden soll.

2.1.3 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 [28]. Im asiatischen Raum überwiegen Haare mit glatter Konfiguration, wohingegen im europäischen Raum alle Arten vertreten sind. Die Haargeometrien sind schematisch in ABB. 2 abgebildet.

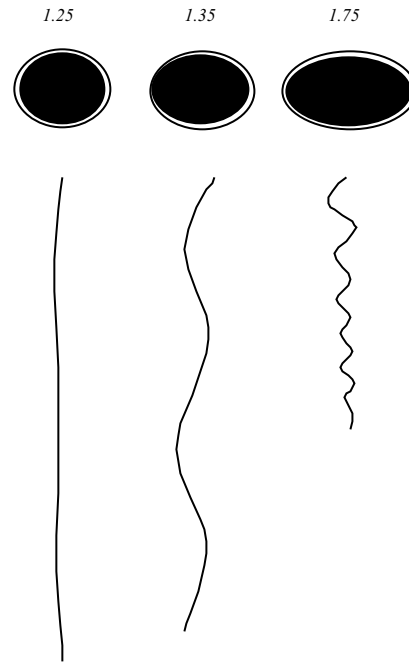


Abb.2: Welligkeit und Elliptizität von Haaren unterschiedlicher Rassen.

Dauerwelle oder die Applikation von Haarrelaxern bewirken eine Änderung der Welligkeit. Je nachdem, ob das Haar eine mehr glatte oder eine welligere Struktur aufweist, fällt der Einfluss physikalischer Effekte wie Reibung und Steifigkeit größer oder kleiner aus. Robbins und Reich [38] stellen eine Methode zur Bestimmung der Welligkeit vor. Dabei wird die Länge L_C des einzelnen Haares im Normalzustand und anschließend L_T im gestreckten Zustand durch Anhängen eines Gewichtes von 1g gemessen. Sieht man die Struktur des einzelnen Haares vereinfacht als Sinuskurve an, dann kann durch Abzählen der Wellen N die Welligkeit bestimmt werden zu $C = N L_T / L_C$ ³. In der Regel weisen Haarfasern aber diesbezüglich große Unregelmäßigkeiten auf. Nach dem Durchnässen der Haare oder der Applikation von Ölen können die Kohäsions-Kräfte des Fluides in den kapillaren Zwischenräumen der Fasern Werte erreichen, bei

³Sinnvoller erscheint für solche Zwecke die Angabe von *Frequenz* und *Amplitude*. Leider fehlen in dieser Untersuchung Haarlängenangaben völlig, so dass - ausgehend von der Annahme, dass für alle Haare die gleichen Längen gewählt wurden - sich die Werte lediglich für den Vergleich untereinander eignen.

	\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.2: Größter und kleinster durchschnittlicher Durchmesser und Flächeninhalt bei Haaren unterschiedlicher Rassen.

Haartyp	Behandlung	trocken	nass
Orientalisch	P	0	-
	SAC, SLS, BL	1.6	0
Kaukasisch	P	0	-
	SAC, SLS, BL	2.6	0
Kraus I	P	18.0	-
	SAC, SLS, BL	18.0	14.0
Kraus II	P, SAC, SLS, BL	16.0	-

Tab.3: Welligkeit von Haaren nach unterschiedlicher Behandlung im nassen und trockenen Zustand. P = Pomade, SAC = Stearalkoniumchlorid, SLS = Natriumlaurylsulfat, BL = Bleichen.

denen die Wellen ganz verschwinden. Reibung und Gewicht des Haftwassers verstärken den Effekt, der sich besonders deutlich bei kaukasischem und orientalischem Haar zeigt. Krauses Haar neigt dagegen deutlich weniger zum Nässebedingten Formverlust. Die Werte für C in TAB. 3 können nur als grobe Anhaltswerte dienen.

Die Haarfasern ein und desselben Haarschopfes zeigen mit zunehmender Dicke einer größeren Welligkeit [51]. Über den Grund kann man nur spekulieren. Eine Mögliche Erklärung könnte sein, dass dünnes Haar ausschließlich in glatter Konfiguration gebildet wird. Andererseits setzen dünne Fasern Glättungseffekten wie dem Druck durch benachbarte Fasern, Eigengewicht, Kämmen und Bürsten weniger Widerstand entgegen, so dass sie infolge der alltäglichen Haarpflege möglicherweise ihre Form verlieren.

2.1.4 Haarkörper und Haarovolumen

Der Haarkörper ist das sichtbare Volumen der gesamten Haarmasse. Die Ausprägung des Haarkörpers wird im wesentlichen bestimmt durch die Steifigkeit, die Querschnittsgeometrie und den Durchmesser der Faser, die longitudinale Form sowie durch Faserinteraktionen wie Reibung und Kohäsion [37]. Bei der Längsdehnung von Haaren geht der Durchmesser quadratisch, bei Biegung und Torsion dagegen mit der vierten Potenz ein, so dass die Längsdehnungen infolge Eigengewicht vernachlässigbar sind. Schon kleine Änderungen des Durchmessers sollten sich auf das Aussehen des Haarkörpers auswirken. Tolgyesi et al. [51] haben den Einfluss des Faserdurchmessers auf den Haarkörper von erwachsenen amerikanischen Frauen unter kosmetischen Gesichtspunkten untersucht. Die Haar-Steifigkeit steht hierbei im Vordergrund, Reibung und Kohäsion bleiben dagegen unerwähnt.

Die Zunahme der Welligkeit führt zu einem deutlich fülligeren Haarkörper. Die Kraft, die beim Bürsten der Haare

aufgewendet werden muss, nimmt mit der Faserdicke zu.

Der Vorgang der Dauerwelle bewirkt eine Zunahme der Welligkeit und der Reibung, durch Bleichen wird die Reibung erhöht. Deshalb führt diese Art der kosmetischen Behandlung zu einer Vergrößerung des Haarkörpervolumens.

Umgekehrt wirken Haare nach Behandlung mit einer Pflegeespülung eher schlaff und der Haarkörper verliert deutlich an Fülle, wahrscheinlich durch Herabsetzung des Reibungsbeiwertes [37]. Die Behandlung mit hochreinigenden Shampoos führt einerseits zum Rückgang der Faser-Kohäsion, andererseits zu einer erhöhten Reibung, da die Entfernung des Talgs von der Haaroberfläche die natürlichen Unebenheiten freilegt (cuticuläre Schuppen).

2.1.5 Haardichte

Die Haardichte übt maßgeblichen Einfluss bei der Konstitution des Haar-körpers. Für Männer und Frauen kaukasischer Abstammung kann ein Durchschnittswert von 340 Haare/cm^2 (± 76) angenommen werden, sofern keine kosmetischen Behandlungen vorgenommen wurden [30]. Andere Untersuchungen ergaben Werte von 192 Haare/cm^2 (± 12) [33].

Während sich in jungen Jahren keine geschlechter-spezifischen Unterschiede feststellen lassen, findet man bei Männern eine hormonell bedingte Abnahme der Haardichte in der frontoparietalen Region. Kosmetische Behandlungen (Dauerwelle, Färben, Bleichen), die vorrangig von Frauen vorgenommen werden, können u.U. im Alter zu einer leichten Abnahme der Haardichte führen. Durchschnittswerte für die angesprochen Populationsgruppe findet man in TAB. 4.

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

Tab.4: Haardichte bei Frauen und Männern unterschiedlichen Alters.

3. MECHANISCHE EIGENSCHAFTEN

Die am häufigsten auftretenden Belastungen sind Dehnung, Stauchung, Scherung, Biegung und Torsion, wobei die letzten zwei als Kombinationen von Dehnung, Stauchung und Scherung aufgefasst werden können. Biegung und Torsion spielen bei der Deformation von Haaren eine wichtige Rolle. Trotzdem ist das Dehnungsverhalten am meisten untersucht worden⁴. Gerade im Bereich der Medizin wird

⁴Interessanterweise gibt es trotz der Häufigkeit der Versuche

durch intensive Erforschung des mechanischen Verhaltens versucht, Rückschlüsse über das Vorliegen bestimmter Erkrankungen, das Alter und sogar das Geschlecht der Person ziehen zu können.

3.1 Dehnung

Das Dehnungsverhalten kann im klassischen Zugversuch bestimmt werden. Das einzelne Haar wird bei gegebener Temperatur und Luftfeuchte mit einer konstanten Rate⁵ gedehnt und die Widerstandskraft des Materials gemessen. Trägt man die Spannungen σ (Verhältnis von Verlängerung zur Gesamtlänge) gegen die Dehnungen ε auf, ergibt sich eine Kurve mit drei charakteristischen Bereichen - (i) HOOKEscher Bereich (*pre-yield*), (ii) Fließbereich (*yield*) und (iii) Nachfließbereich (*post-yield*) (ABB. 3).

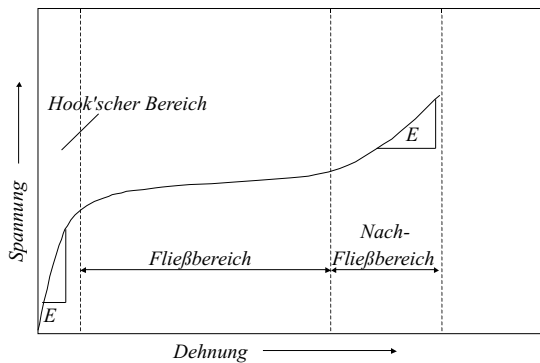


Abb.3: Verlauf der Spannungs-Dehnungskurve bei Haaren.

Wichtige Parameter der Spannungs-Dehnungskurve Kurve sind der *Modul der Elastizität* E_α , die *HOOKEsche Grenze*, die *Bruchdehnung*, die *Bruchspannung*, der *Modul des Nachfließbereiches* E_β und die *Dehnungsarbeit* (Fläche unter der Kurve).

3.1.1 HOOKEscher Bereich und E-Modul

Im HOOKEschen Bereich weist die Kurve eine in etwa konstante Steigung auf, die sich als materialabhängige Kenngröße interpretieren lässt. Die Steigung ist der *Elastizitätsmodul* E (YOUNG'sche Zahl).

Das Verhalten innerhalb dieses Bereiches ist keineswegs linear-elastisch und trägt den Namen HOOKEscher Bereich zu unrecht [10]. Der E-Modul setzt sich eigentlich aus einem zeitunabhängigen elastischen und einem zeitabhängigen viskosen Anteil zusammen. Eine leichte Variation des E-Moduls in Abhängigkeit von der Dehnungsrate ist deshalb nicht auszuschließen. Auf die Zusammenhänge wird weiter unten kurz eingegangen.

Robbins [37] gibt für E einen Wert von $3.89 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ (60 % rel. LF) an⁶. Goldsmith und Baden [14, 15] stellen ein alternatives Verfahren zur Bestimmung des E-Moduls vor. Da die vom Querschnitt des Materials unabhängige Schallgeschwindigkeit und der E-Modul über $v_s = \sqrt{E/\rho}$ in Be-

keine Standards.

⁵Üblich sind hier 25 mm/min .

⁶Wegen der Feuchtigkeits- bzw. Temperaturabhängigkeit werden die Umgebungsbedingungen immer mit angegeben.

ziehung stehen, kann bei bekannter Dichte⁷ der E-Modul durch Messung der Schallgeschwindigkeit bei unterschiedlichen Dehnungen bestimmt werden. Schallgeschwindigkeit und E-Modul für unterschiedliche rel. Luftfeuchte sind in TAB. 5 aufgeführt.

rel. LF (%)	Schallgeschw. (km/s)	E-Modul (N/cm^2)
6	3.0	11.7×10^5
53	2.6	8.8×10^5

Tab.5: Schallgeschwindigkeit und E-Modul bei unterschiedlicher rel. LF, $T = 23^\circ\text{C}$.

Durchmesser, Zugfestigkeit und Dehnungsarbeit bis zum Materialversagen sind offenbar vom Alter abhängig. ABB. 12 zeigt die Zusammenhänge, die bei japanischen Männer

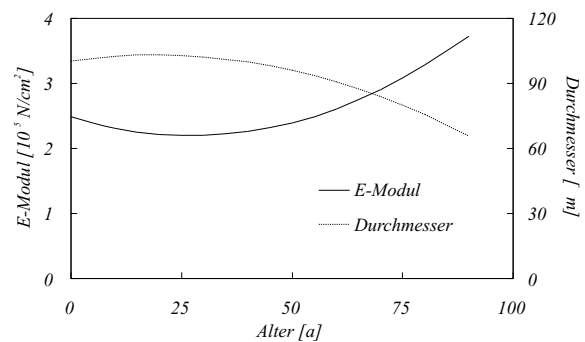


Abb.4: Statistisch ermittelte Zusammenhänge zwischen Alter und E-Modul bzw. Haar-Durchmesser.

im Alter von 2 bis 91 Jahren festgestellt werden konnten [23]. Für den E-Modul wird hier ein Wertebereich von $1.5 - 4.6 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ angegeben ($T = 20^\circ\text{C}$, 65 % rel. LF). Swanbeck und Nyren [43] haben die Änderung der mechanische Eigenschaften bei Patienten mit unterschiedlichen Formen von Haarerkrankungen untersucht (Männer und Frauen kaukasischer Abstammung im Alter zwischen 20 und 56). Signifikante Änderungen konnten nicht festgestellt werden. Für den E-Modul liegen die Werte zwischen $1.64 - 2.80 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ ($T = 20^\circ\text{C}$, 100 % rel. LF).

Ob ein Haar von einer männlich oder einer weiblichen Person stammt, oder gar das Alter der Person, lässt sich nicht anhand der Zugfestigkeit feststellen⁸ [19]. Allerdings liefert die Studie Durchschnittswerte für den E-Modul von $1.23 - 4.10 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ ($T = 30^\circ\text{C}$, 30 % rel. LF) für männliche und weibliche Personen im Alter zwischen 15 und 35 Jahren (vermutlich Inder).

Huck und Baddiel [17] haben den E-Modul mittels der Methode des oszillierenden Stabes für kleine Dehnungen (1 - 2 %) bestimmt. Neben dem Modul der Elastizität wird der *Verlust-Modul* E' eingeführt, der aus der Dämpfung der Schwingung abgeleitet werden muss ($\tan \delta = E'/E$; δ

⁷[14] geben für die Dichte des menschlichen Haares einen Wert von $\rho = 1.3 \text{ g/cm}^3$ an.

⁸Obwohl ein Zusammenhang zwischen Alter und Zugfestigkeit durchaus besteht, wie weiter oben angesprochen wurde.

ist die Phasenverschiebung, ein Maß für die interne Dämpfung). Er beschreibt die bei Dehnung einer Faser dissipierte Energie und gibt damit Auskunft über die interne Viskosität der Haarfasern. Für unbehandelte Haarfasern liegen die Werte für E und E' bei $4.10 \times 10^5 \text{ N/cm}^2 (\pm 0.66)$ bzw. $0.177 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ (25°C , 75% rel. LF). Generell korreliert E' mit dem Schwefelgehalt der Haarkeratine, E dagegen nicht. Ein Einfluss von Substanzen für das Haarsetting auf E und E' ist statistisch nicht nachweisbar.

Sakai et al. [40] geben einen Wert von 0.38×10^5 bzw. $1.03 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ bei 40°C bzw. 90°C (in Wasser) an. Diese Werte sind im Bereich von $0.5 - 5.0\%/min$ Dehnungsrate quasi konstant.

Interessanterweise kann man nicht davon ausgehen, dass dicke Haarfasern automatisch eine größere Steifigkeit aufweisen als dünnere [26]. Die Werte des E-Moduls für dünne Haarfasern ($< 70\mu\text{m}$) sind signifikant höher als für dicke ($> 80\mu\text{m}$) Haare derselben Person. Der Grund könnte in der Ausprägung der Medulla liegen, die bei dicken Haarfasern einen größeren Querschnitt im Verhältnis zur Gesamtfläche aufweist, als bei dünnen. Das führt zu einer Destabilisierung des Haarcortex gegenüber mechanischen Beanspruchungen. Die Entnahmeregion (*occipital, frontoparietal*) hat dagegen keinen Einfluss auf den E-Modul. In TAB. 6 sind die Werte für dünne und dicke Fasern dargestellt.

	$< 70 \mu\text{m}$ (10^5 N/cm^2)	$> 80 \mu\text{m}$ (10^5 N/cm^2)
1	3.44	1.70
2	4.89	2.00
3	4.22	1.70
4	4.44	1.70
5	4.22	2.55
6	6.44	2.44
7	4.00	2.22
8	5.40	2.33
9	4.67	2.55
10	5.55	2.89
11	4.44	1.70
12	4.20	1.80
13	5.55	2.50
14	3.89	2.55
15	3.55	2.44
\bar{x}	4.59	2.20

Tab.6: Durchschnittswerte für E_α bei dünnen und dicken Haaren, 45% rel. LF, $T = 23^\circ\text{C}$.

3.1.2 Fließbereich

Beim Überschreiten der HOOKESchen Grenze bei $\varepsilon \approx 2\%$ führen bereits kleine Spannungszunahmen zu überproportional großen Längenänderungen (ca. 30%); dieses ist der Fließbereich. Auf molekularer Ebene vollzieht sich der Übergang des Keratins vom α -helicalen in den β -gefalteten Zustand [9]. Die Dehnungen sind vollständig reversibel, wenn man Haarfasern in Wasser einlegt oder ihnen einen längeren Erholungszeitraum gibt. Ruetsch und Weigmann [39] konnten zeigen, dass solche extremen Belastungen trotz der Wiederherstellung der mechanischen Eigenschaften zu irreversibler Schädigung der Cuticula führen und damit die These bestätigt, dass die Cuticula keinen Beitrag zur Zugfestigkeit von Haaren leistet. Im Bereich großer Dehnungen, führen Scherkräfte in den äußeren Haarschichten zum Abheben der cuticulären Schuppen. Es ist zu vermuten, dass

dadurch der Reibungskoeffizient beeinflusst wird. Im nassen Zustand ist der E-Modul des Cortex etwa 20 mal größer als der Modul der Cuticula. Bei der Torsion dagegen hat die Cuticula einen merklichen Einfluss.

Durch Tests konnte gezeigt werden, dass die Arbeit, die zum Ausreißen eines Haares aufgebracht werden muss, näherungsweise der HOOKESchen Grenze entspricht [37]. Die Konsequenz von zu großen Zugkräften ist das Versagen der Haarwurzel, noch lange bevor Materialermüdung auftritt.

3.1.3 Nach-Fließbereich

Über die obere Grenze (Fließpunkt) des Fließbereiches hinaus ändert sich die Länge des Haares wieder langsamer, endet aber schlagartig beim Erreichen der Bruchdehnung durch Materialversagen. Das Verhalten ist hier, wie im HOOKESchen Bereich, etwa linear-elastisch. Die Steigung der Kurve wird durch den E-Modul des Nachfließbereiches (E_β) beschrieben. Das Verhältnis Steigungen der drei Bereiche beträgt etwa 100:1:10 [10].

3.2 Rheologische Eigenschaften

Biologische Materialien zeigen in der Regel kein elastisches, sondern vielmehr ein zeitabhängiges Verformungsverhalten [12]. Basis für die Beschreibung der Deformationen ist die lineare Theorie der Viskoelastizität.

Die mechanischen Eigenschaften von biologischen Materialien können vorhergesagt werden, wenn das Verhalten bei Belastung bekannt ist. Dieses kann in der Regel nur empirisch bestimmt werden. Die Spannungen steigen mit zunehmender Dehnung schneller als nach dem HOOKESchen Gesetz zu erwarten ist. Die Spannungs-Dehnungs Beziehung zeigt bei einachsiger Belastung die Form einer Hysteresiskurve. D.h., die Spannungs-Dehnungs-Beziehungen unterscheiden sich im Falle von Be- und Entlastung. Die Hysteresis-Kurve stabilisiert sich bei zyklischer Wiederholung des Vorganges. Dieser Effekt wird als Konditionierung bezeichnet. Der Einfluss der Dehnungsrate auf die Hysteresisschleifen ist eher klein (gilt generell im Bereich von 10^3 -facher Variation).

Materialien, die bei einer konstanten Dehnung gehalten werden, zeigen einen Rückgang der inneren Spannungen, die sich einem Grenzwert nähern. Die Größe der Anfangsbelastung entscheidet, wie schnell die Relaxationsfunktion $G(t)$ einen konstanten Wert erreicht. Bei sehr hohen Anfangsbelastungen kann sich die Dauer der Abnahme über viele Stunden erstrecken (hängt von der Art des Gewebes bzw. seiner Dehnbarkeit ab).

Übt man dagegen auf das konditionierte Material eine konstante Belastung aus, kommt es zu einer Kriechverformung und infolgedessen zu einer allmählichen Längenänderung.

Chapman [3] hat das Relaxationsverhalten von Wollfasern bei kleinen Biegedehformationen (0.5–4.0%) hinsichtlich der Fragestellung untersucht, inwieweit sich das Erholungsverhalten unter Anwendung der Theorie der linearen Viskoelastizität beschreiben lässt. Den rheologischen Eigenschaften während der Biegung kommt im Bereich der Textilindustrie eine besondere Bedeutung zu, da sie das Trageverhalten von Kleidung (Faltenwurf, Flexibilität etc.) maßgeblich bestimmen. Über die Frage, ob das Biegeverhalten aufgrund von Daten aus Dehnungsversuchen ausreichend beschrieben werden kann, herrscht in der Fachwelt eine geteilte Meinung. Die während der Biegung auftretenden Dehnungen sind inhomogen. Die Spannungsrelaxation für Wolle ist linear bei

Dehnungen $< 4\%$, wenn die sie gegen die log. Zeit aufgetragen wird. Der Relaxationsmodul⁹ bei 1% Dehnung und 1 min Relaxationszeit liegt bei $4.0 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$. Die lineare Theorie der Viskoelastizität setzt voraus, dass die mechanischen Eigenschaften (die Relaxationsfunktion $G(t)$) invariant bezüglich der Zeit sind. Dies trifft bei Wolle für kleine Dehnungen ($\leq 1\%$) zu. Die Erholungskurven (ABB. 5), also der zeitliche Rückgang der Dehnungen nach dem Absetzen der Spannungen, sind im Bereich bis 1% in etwa identisch. Mit zunehmender Dehnung kommt es zu bleibenden Verformungen (viskose Anteile). Weiterhin muss die Relaxationsfunktion $G(t)$ bekannt sein. Unter Anwendung des BOLTZMANNschen Superpositionsprinzips

$$\sigma(\varepsilon, t) = \int_0^t G(t - \tau) d\varepsilon(\tau)$$

gilt dann in inkrementeller Form

$$\sigma(t) = \sum_{i=0}^n G(t - \tau_i) \Delta\varepsilon_i.$$

Es konnte gezeigt werden, dass sich für ein breites Spektrum an Relaxationszeiten die Vorhersagen gut mit den experimentellen Daten decken, vorausgesetzt die Dehnungen bleiben klein.

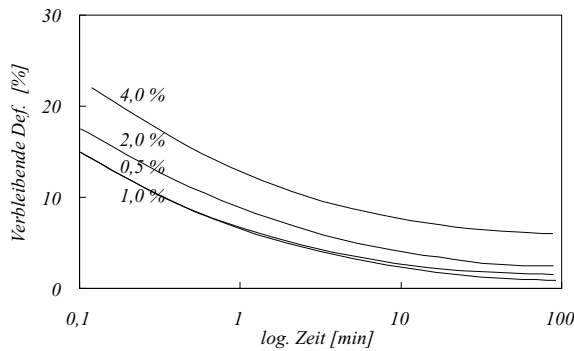


Abb.5: Erholungskurve für Wolle bei 20 °C, 65% rel. LF.

Die mechanischen Eigenschaften von Keratin ändern sich im Verlaufe der Zeit, es findet ein Alterungsprozess statt. Dieses Phänomen ist von Textilien her bekannt, sie zeigen ein deutlich besseres Erholungsverhalten gegenüber Faltenwurf, wenn sie über einen langen Zeitraum unter konstanten Umgebungsbedingungen gelagert werden. Ein Durchnässen führt zur temporären Wiederherstellung der Ausgangseigenschaften, die aber im Verlaufe der Zeit zurückgehen. Chapman [4] hat das rheologische Verhalten von Keratin während des Alterungsprozesses untersucht. Bei Wolle nimmt die Steifigkeit gegenüber kleinen Dehnungen ($\leq 1\%$) infolge Biegung mit der Zeit zu und die Komplianz ab. Da der Spannungsrelaxationsmodul also mit der Alterungszeit variiert, ist Keratin nicht linear-viskoelastisch. Dennoch liefert das Superpositionsprinzip im Falle hochgealteter Wollfasern gute Übereinstimmungen mit den experimentellen Ergebnissen. Signifikante Abweichungen treten dann auf, wenn

⁹Spannung geteilt durch die ausgeübte Dehnung als Funktion der Zeit.

die Relaxationszeit mindestens von derselben Ordnung ist, wie die Alterungszeit. Chapman [4] schlägt eine modifizierte Superposition der Form

$$\sigma(t) = \sum_{i=0}^n G(t_A, t - \tau_i) \Delta\varepsilon_i$$

vor. $G(t_A, t - \tau_i)$ hängt neben der Relaxationszeit t auch von der Alterungszeit t_A (absolute Zeit) ab. Der Anstieg der Umgebungstemperatur kann den Prozess der Alterung wesentlich beschleunigen. Werte über 50°C führen nach wenigen Stunden bereits zu Alterungserscheinungen, die sonst erst in Jahren erreicht werden [36].

Tao und Postle [46] haben ein Modell zur Abschätzung des viskoelastischen Verhaltens von Keratinkompositen entwickelt. Solche Komposite setzen sich aus zwei oder mehreren unterschiedlichen Phasen zusammen (siehe [8]). Aufgrund des Modells wurden die longitudinalen und transversalen mechanischen Eigenschaften für ein Keratinkomposit mit viskoelastischen Filamenten und isotrop viskoelastischer Matrix bei unterschiedlichem Wassergehalt berechnet und mit experimentellen Messungen an Wollfasern verglichen. Die Ergebnisse decken sich sehr gut mit den empirischen Daten. Die Anfangswerte für den longitudinalen Relaxationsmodul bewegen sich zwischen 6.7 und $2.0 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ im wasserfreien Zustand bzw. bei maximalem Feuchtigkeitsgehalt. Für den Torsionsrelaxationsmodul betragen sie $1.70 - 0.12 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$. Die Zunahme des Wasseranteils bewirkt ein Absinken der Anfangswerte E_{L0} und G_{L0} auf 2.0 bzw. $0.12 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$. Die Werte nach einer sehr langen Zeit¹⁰ $E_{L\infty}$, können als konstant angesehen werden. Der Wert des Torsionsmoduls $G_{L\infty}$ beträgt unabhängig vom Wassergehalt immer 0 . Das Verhältnis E/G beschreibt den Grad der Anisotropie. Zu Belastungsbeginn ist die Anisotropie am kleinsten (ABB. 6).

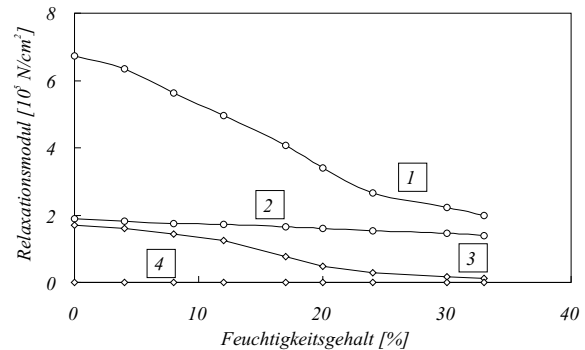


Abb.6: Relaxationsmodul in Abhängigkeit vom Feuchtigkeitsgehalt. (1) E_{L0} , (2) $E_{L\infty}$, (3) G_{L0} , (4) $G_{L\infty}$.

Basierend auf denselben Prinzipien haben Tao und Postle [47] ein Modell für die thermale bzw. hygrale Viskoelastizität der Keratinfaser formuliert. Das Quellen infolge Feuchtigkeitsaufnahme bzw. die thermische Ausdehnung werden durch die mechanischen und themalen/hygralen Eigenschaften der Komposit-Konstituenten ausgedrückt. Der thermale

¹⁰Zeitpunkt, ab dem die zeitliche Änderung des Relaxationsmoduls vernachlässigbar klein wird.

Ausdehnungskoeffizient liegt bei $5.18 \times 10^{-4}/^\circ$.

Nikiforidis et al. [25, 26] haben die Zugeigenschaften von Haaren unter Berücksichtigung des viskoelastischen Verhaltens mit einer speziell konstruierten Anlage bestimmt. Die Spannungen hängen von der Dehnungshistorie ab und können bei linearem Verlauf in einen zeitabhängigen und einen zeitunabhängigen Anteil untergliedert werden

$$\sigma(\varepsilon, t) = T(\varepsilon) + \int_0^t T[\varepsilon(t - \tau)] \frac{\partial G(\tau)}{\partial \tau} d\tau.$$

$T(\varepsilon)$ ist die Spannungsantwort des Materials infolge eines Einheitsprungs in der Dehnung, $G(\tau)$ ist die normalisierte Relaxationsfunktion mit $G(0) = 1$. Im Bereich großer Dehnungen zeigen biologische Materialien aber in der Regel kein lineares Verhalten mehr. In diesem Fall kann die Spannung experimentell durch eine schrittweise Erhöhung der Dehnung um jeweils 1% mit einer anschließenden relativ langen Relaxationsphase approximiert werden. Die Dehnungen haben quasi instantan zu erfolgen. Es gilt

$$\sigma(\varepsilon, t) = \sum_{i=1}^n \left\{ T_i(\varepsilon) + \int_{t_{i-1}}^{t_i} T_i[\varepsilon(t_i - \tau)] \frac{\partial G_i(\tau)}{\partial \tau} d\tau \right\},$$

mit $t_0 = 0$. $G_i(\tau)$ ist die Relaxationsfunktion in jedem Schritt und kann vereinfacht durch eine Exponentialfunktion abgebildet werden $G(\tau) = A_i e^{-k_i \tau}$. Die Summe der Integrale ist der zeitabhängige Anteil $K(\varepsilon, t)$ und $T(\varepsilon)$ der zeitunabhängige Anteil der Spannungen. Der Verlauf der beiden Anteile ist in ABB. 7 abgebildet.

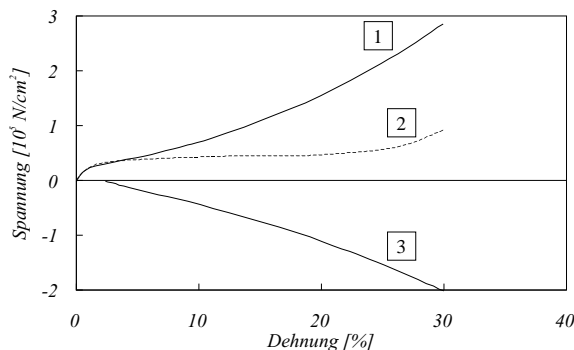


Abb.7: Verlauf des elastischen und des viskosen Anteils der Spannungsantwort bei Haaren (1) $T(\varepsilon)$, (2) $\sigma(\varepsilon, t)$, (3) $K(\varepsilon, t)$.

3.3 Hysterese bei Haaren

Der klassische Zugversuch ist eine quasi-statische Testmethode, die das Verhalten von Haaren eindimensional beschreibt. Natürliche Belastungssituationen, die beim Kämmen oder Bürsten von Haaren auftreten, lassen sich besser in dynamischen Tests simulieren, bei denen in kurzen zeitlichen Abständen wiederholt eine konstante Belastung ausgeübt wird. Die Messung der Spannungen bei Be- und Entlastung führt auf eine Hysterese-Kurve, da ein Teil der Energie infolge interner Reibung (innere Viskosität der Keratin-Matrix) dissipiert. Solche Untersuchungen liegen nur für Woll- bzw. Haarfasern in aquatischen Systemen vor. Eine Besonderheit solcher Konfigurationen besteht darin, dass selbst große Dehnungen (30% und mehr) vollständig

reversibel sind. D.h., die Hysterese-Kurven laufen in den Nullpunkt zurück (ABB. 8).

In Wasser zeigen Wollfasern bei Dehnungsraten von $100\%/min$ eine nur geringfügig größere Steifigkeit als bei $0.1\%/min$ [9]. Dieses zeigt sehr deutlich, dass der Einfluss der Dehnungsrate auf die Hysterese-Kurve gering ist. Dies deckt sich mit der Beobachtung [12], dass eine Variation der Belastungsrate zumindest für lebendes Gewebe ohne größeren Einfluss auf die Hysteresschleife bleibt. Eine Steigerung der Rate um das 1000-fache führt lediglich zu einer 1 – 2%igen Zunahme der Belastungsantwort.

Stetige Wiederholung des Belastungs/Entlastungsvorganges zeigt eine fortschreitende Abnahme der Spannungen [9]. Ein vollständiger Belastungszyklus (20% Dehnung) wird bei $0.1\%/min$ in mehr als 6 h durchlaufen.

Deem und Rieger [6] haben solche Versuche für große Dehnungen ($\varepsilon = 30\%$) an chemisch modifizierten Haarfasern durchgeführt (in Wasser). Die Form des Entlastungsastes der Hysterese-Kurve lässt sich sowohl durch die Temperatur als auch durch die Art der chemischen Modifikation wesentlich beeinflussen. Der Belastungsast dagegen zeigt lediglich geringe Formänderungstendenzen bei Variation der besagten Parameter.

Das Hysterese-Verhältnis (Dehnungs- zu Wiederherstellungsarbeit bei 20 oder 30% Dehnung) ist ein charakteristischer Parameter der Keratinfaser. Chemische Modifikationen, wie sie z.B. beim Bleichen oder bei der Dauerwelle auftreten, führen zu einem veränderten Hystereseverhältnis. Das Hystereseverhältnis ist innerhalb eines bestimmten Bereiches proportional zur Temperatur. Der lineare Verlauf der Hystereseverhältnis-Temperatur-Kurve zeigt einen Knick bei etwa $45^\circ C$ (Änderung der Steigung). Die Steigung des Bereiches vor dem Übergangspunkt ändert sich bei Modifikation von Disulfidbindungen, die des anderen Bereiches wird durch andere Bindungsarten beeinflusst.

3.4 Einfluss von Feuchtigkeit

Haare sind extrem hygroskopisch, sie enthalten ca. 15 Gew.-% Eigenfeuchte. In feuchtem Klima lassen sie sich um bis zu 100% ihrer Ursprungslänge dehnen, unter Normalbedingungen immerhin noch um etwa 50%. Ohne äußere Krafteinwirkung ändert sich ihre Länge bei 100% rel. Luftfeuchte um ca. 2% [20]. Der Wassergehalt bei Sätti-

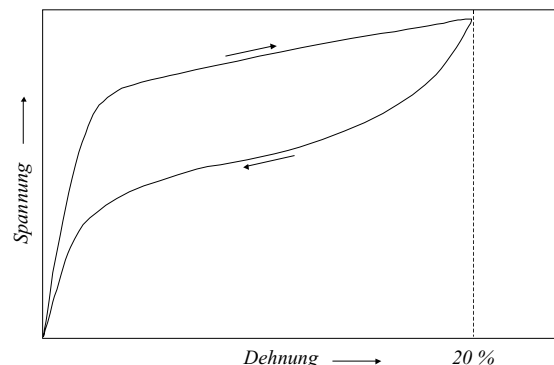


Abb.8: Typischer Verlauf der Hysterese-Kurve von Woll- und Haarfasern in Wasser.

gung beträgt ca. 30 % [21]. Die Feuchtigkeitsaufnahme führt zu einem Anschwellen des Durchmessers um bis zu 16%. Der Feuchtigkeitsgehalt von Haaren ist folglich abhängig von der rel. Luftfeuchte.

Seit langem bekannt ist das Phänomen der Feuchtigkeits-Hysterese bei Haaren (ABB. 9). Der Wassergehalt im Gleich-

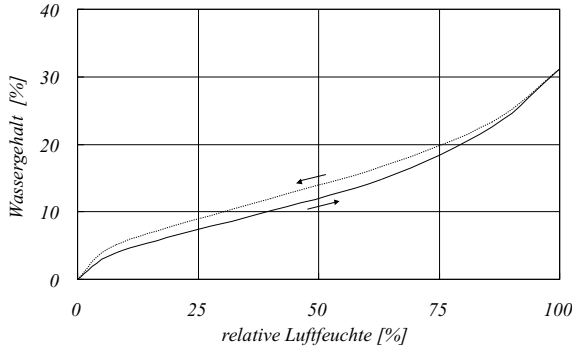


Abb.9: Feuchtigkeits-hysterese.

gewichtszustand ist bei abnehmender relativer Luftfeuchte immer etwas größer als bei Zunahme derselben [11]. In ABB. 10 sind die Isothermen der Feuchtigkeitsänderung dargestellt. Bezüglich Absorption und Desorption bestehen geringe rassistische Unterschiede, die sich im Bereich von ca. 1 % bewegen [21].

Über den Zusammenhang von E-Modul und Luftfeuchte liegen lediglich Untersuchungen an Wollfasern vor (Merino). Ein ähnlicher Zusammenhang für Haare kann postuliert werden, da (i) die Dehnbarkeit von Haaren ebenfalls mit zunehmender rel. Luftfeuchte steigt und der E-Modul dagegen abnimmt, (ii) die quantitative Wasserbindefähigkeit von Wolle und Haaren in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte identisch sind [37].

Luftfeuchte beeinflusst die mechanischen Eigenschaften von Humanhaar in erheblichem Maße. Locken, die mit Wasser gesetzt werden (Wasserwell-Locken), zeigen je nach Umgebungsbedingungen unterschiedliche Haltbarkeit, siehe z.B. [11]. Der Einfluss der Luftfeuchte wird in der Regel über den Haltbarkeitsindex quantifiziert. Der Index I_{CR} ist das

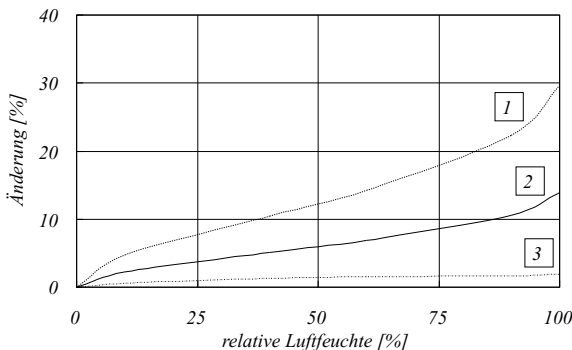


Abb.10: Änderung von (1) Querschnitt, (2) Durchmesser und (3) Länge.

Verhältnis der Länge einer gewickelten Haarfasern nach einer bestimmten Einwirkzeit bei bekannter Luftfeuchte und der Länge im ungewickelten Zustand. Zwischen I_{CR} und dem E-Modul gemessen bei unterschiedlichen rel. Luftfeuchten besteht ein linearer Zusammenhang [2]. Dasselbe gilt für die Beziehung zwischen I_{CR} und der Kraft, die zum Herbeiführen einer 10 %-igen Dehnung aufgebracht werden muss (bei unterschiedlicher rel. LF, ABB. 11).

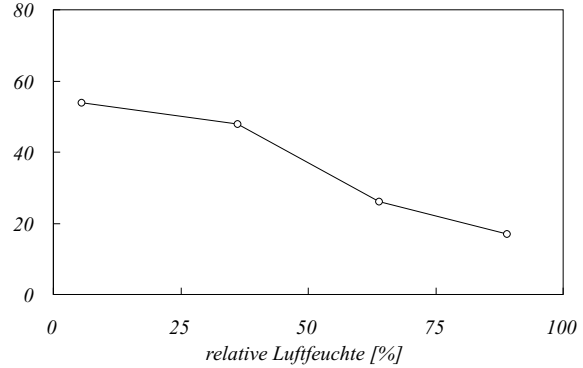


Abb.11: Haltbarkeit von Wasser-gesetzten Locken bei unterschiedlicher Luftfeuchte.

Der Effekt der Wasseraufnahme kann über molekulare Modelle des Keratins verstanden werden. Das gängigste Modell ist das des *Polyelektrolyt-Gels*. Es fasst Haar als Netzwerk von Polymeren mit α -helicaler kristalliner oder amorpher Struktur auf. Uniaxiale Belastungen überführen die Moleküle vom kristallinen in den ungeordneten Zustand. Sofern keine Überdehnung vorliegt, nimmt das Netzwerk bei Entlastung wieder eine stabile Form durch Reformation der kristallinen Bereiche an. Die Polymerketten sind über Disulfidbrücken miteinander verbunden und nehmen damit feste Positionen ein. Nach dem Aufbrechen dieser Bindungen lassen sich die Moleküle frei gegeneinander verschieben. Bei der Aufnahme von Wasser - es wird chemisch gebunden - verschiebt sich das Gleichgewicht zwischen den kristallinen und den amorphen Regionen. Alle Prozesse, die mit dem Übergang vom kristallinen in den amorphen Zustand gekoppelt sind (z.B. die Dehnung), werden demnach durch die Aufnahme von Wasser bzw. durch die Luftfeuchte beeinflusst. Breuer [2] hat eine Gleichung basierend auf der thermodynamischen Theorie des Schmelzverhaltens von Polymeren vorgeschlagen, über die sich die Reaktionskraft in einer gedehnten Haarfasern im Gleichgewichtszustand bestimmen lässt:

$$f = \frac{\Delta H^\circ}{\Delta L} \left(1 - \frac{T}{T_S^\circ} \right) + \frac{RT}{\Delta L} \log \left(\frac{1 + K_1 a}{1 + K_2 a} \right),$$

mit $T_S^\circ = \Delta H^\circ / \Delta S^\circ$, wobei ΔH° , ΔS° und ΔL die Differenzen der partiellen molaren Wärmen ($\approx 20.0 J/g$), der Entropien und der Längen ($\approx 0.7 cm/g$) eines Aminosäurerestes in der kristallinen und der amorphen wasserfreien Konformation sind. T_S und T_S° sind die Schwundtemperaturen des Haares bei gegebener Luftfeuchte und bei Abwesenheit von Wasser, K_1 ($0.341/mol$) sowie K_2 ($0.291/mol$) sind die Reaktionskonstanten des Wassers bei Bindung an den Aminosäurerest im kristallinen bzw. amorphen Zustand; a ist die Aktivität des Wassers. Dieser Ausdruck erklärt die auftretenden Kräfte gewissermaßen auf molekularer Ebene.

Bis zu einer Dehnung von ca. 1 – 2% ist das mechanische Verhalten der Keratinfaser in etwa linear-viskoelastisch. Der Anstieg der Steifigkeit bei Rückgang des Wassergehaltes ist zeitabhängig. Das Verhalten der Faser kann vereinfacht durch System aus einer Feder, die einen Beitrag von $1.4 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ (in Wasser) zur Steifigkeit leistet und einer parallel geschalteten Feder mit Dämpfer beschrieben werden [10]. Die Viskosität des Dämpfungselementes hängt dabei von der Feuchtigkeit ab. Feughelman [8] zieht zur Erklärung ein Zwei-Phasen Modell heran. Es setzt sich aus einer wasserundurchlässigen Phase aus zylindrischen Stäben und der umschließenden wasserdurchlässigen Matrix-Phase zusammen. Nach Schätzungen leisten Matrix und Mikrofibrillen im Keratin je einen Beitrag von $0.2 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ bzw. $1.2 \times 10^5 \text{ N/cm}^2$ zur Gesamtsteifigkeit. Curiskis und Feughelman [7] haben das Konzept des Zwei-Phasen Modells mittels der *Finite Elemente Methode* für unterschiedliche Volumenverhältnisse von Filament und Matrix untersucht. Die Keratin-Matrix zeigt mit steigendem Wassergehalt zunehmend anisotropes Verhalten. Exakte Berechnungen fordern die zusätzliche Berücksichtigung der transversalen Materialeigenschaften. Für die POISSON-Zahl scheint 0.49 eine realistische Wert.

3.5 Einfluss von Fluiden

Es ist eine bekannte Tatsache, dass sich Haare nach zu schneller Relaxation von langandauernder Belastung z.B. nach dem Hairstyling schlaff anfühlen. Öle und aquatische Systeme beeinflussen die mechanischen Eigenschaften von Haarfasern. Solche Effekte können im Sinne einer mechanischen Konditionierung aufgefasst werden und sind im Bereich der Haarpflege durchaus erwünscht. Im Bereich kleiner Dehnungen ($\leq 1\%$), in dem die Haarfasern viskoelastisches Verhalten zeigen, findet man Änderungen im Dehnungs- bzw. Relaxationsverhalten nach Immersion bzw. Deimmersion der Fasern in/ von bestimmten Fluiden.

Das Relaxationsverhalten bei Immersion in Ölen bspw. ist abhängig von der Konditionierungsgeschichte des Öls bzw. der Haarfaser. Wurde das Öl bei einer geringeren Luftfeuchte konditioniert als die Haarfaser, zeigen sich Längenkontraktionen und Zunahmen der Kraft (*overshoot*), die zum Halten einer 1%-igen Dehnung aufgebracht werden muss ($F_{1\%}$). Sie Erreicht relativ schnell ihr Maximum und fällt anschließend langsam auf das Ausgangsniveau ab [13]. Wurde das Haar dagegen bei einer geringeren Luftfeuchte als das Öl konditioniert, findet man Längenzunahmen und einen Rückgang von $F_{1\%}$ (*undershoot*, ABB. 12). Dieses Phänomen lässt sich auch in Lösungen unterschiedlicher Salze beobachten, mit dem Unterschied, dass (i) ein Maximum deutlich schneller erreicht wird und (ii) $F_{1\%}$ nicht mit der Zeit abfällt, solange die Faser in der Lösung gehalten wird. Nach Deimmersion fällt $F_{1\%}$ innerhalb weniger Minuten um etwa 85% ab. In einer zweiten lang andauernden Phase, die sich über mehrere Stunden hinziehen kann und die von der Luftfeuchte beeinflusst wird, vollzieht sich der Rückgang auf das Ausgangsniveau. Der Übergangspunkt von der schnellen zur langsamen Phase der Wiederherstellung lässt sich physikalisch als Übergang von der FICKSchen zur *viskoelastischen Diffusion* deuten. Dieser *undershoot*-Effekt ist aus der Wollforschung wohlbekannt [36].

Von Interesse ist in diesem Zusammenhang der Index der Relaxation, also die Änderung der Kraft, die zum Halten einer konstanten Dehnung (1%) nach einer bestimmte Zeit-

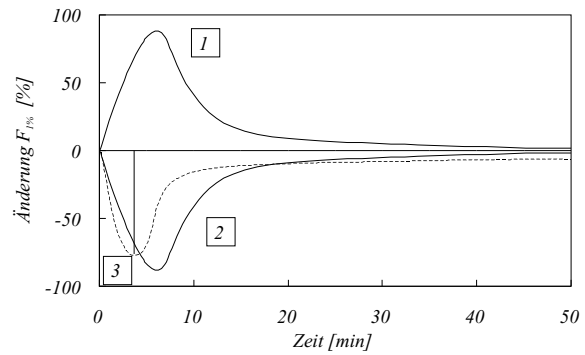


Abb.12: Overshoot/Undershoot-Effekt bei Immersion von Haarfasern nach Relaxation in unterschiedlichen Fluiden. (1) In Öl, bei geringerer rel. LF konditioniert als das Haar; (2) Öl, bei höherer rel. LF konditioniert als das Haar; (3) Nach Immersion und Deimmersion in/von Salzlösung (senkrechter Strich).

spanne noch aufgebracht werden muss. Der Index erreicht seinen Gleichgewichtszustand deutlich später als $F_{1\%}$. Diese zeitliche Differenz ist ursächlich für die gute Frisierbarkeit von Haaren nach ein bis zwei Stunden Trockenzeit.

3.6 Einfluss der Temperatur

Der klassische Zugversuch zeigt eine deutliche Abhängigkeit von der Temperatur. Der Verlauf der Spannungs-Dehnungskurve wird mit steigender Temperatur flacher. Trägt man die Steigungen des HOOKESchen Bereichs für unterschiedliche Messungen gegen die Temperatur auf, zeigt die Kurve bei 0°C und 75°C einen Knick (ABB. 13, [40]). Der Übergang vom HOOKESchen zum Fließbereich bzw. vom

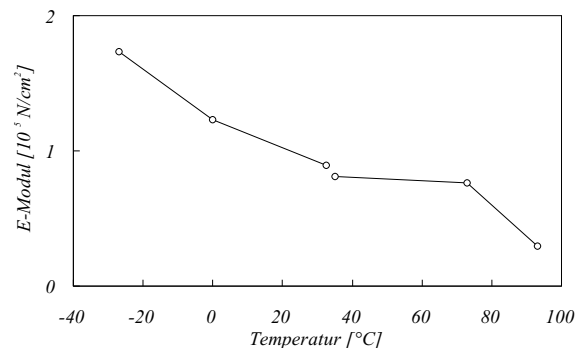


Abb.13: Abhängigkeit des E-Moduls von der Temperatur.

Fließbereich zum Nach-Fließbereich sind ebenfalls temperaturabhängig und weisen Steigungänderungen bei 0°C bzw. 80°C auf.

Nagase et al. [22] haben ein Modell zur Erklärung der wichtigsten physikalischen Eigenschaften von Haaren entwickelt, das aus zwei Komponenten mit je zwei Zuständen besteht. Der Übergang vom einen in den anderen Zustand ist

gekennzeichnet durch eine charakteristische stark vom Wassergehalt abhängige Transitions-Temperatur. Sie beträgt in einem wässrigen Medium für eine die Komponente etwa 70°C (hohe T_c^h) und für die andere etwa 0°C (tiefe T_c^l). Die Werte verschieben sich bei zunehmendem Feuchtigkeitsgehalt nach oben.

Oberhalb dieser Temperaturen sind beide Komponenten plastisch, unterhalb fest und elastisch. Zu den strukturellen Bestandteilen der T_c^h -Komponente zählen Makrofibrillen und Exocuticula, zu denen der T_c^l -Komponente der Zellmembrankomplex, die Endocuticula und die Matrix. Die hohe Übergangstemperatur lässt sich mit der großen Anzahl an Disulfidbindungen erklären. Die Matrix wie auch die Exocuticula bestehen dagegen aus nicht-keratinartigen Proteinen und bestimmten Lipiden mit deutlich weniger S-S Bindungen.

Auf physikalischer Ebene scheint ein Wechsel vom Gel zum Sol als Art des Übergangs wahrscheinlich. Im T_c^h -Bereich liegen überwiegend Disulfid-Bindungen, im Bereich der T_c^l vorwiegend Wasserstoffbrücken- bzw. ionische Bindungen vor. Mit zunehmender Temperatur werden einige der Bindungen aufgebrochen und das Polymernetz geht in einen leicht verformbaren Zustand über. In diesem Zustand ist das Eindiffundieren von chemischen Substraten stark erleichtert. Der Übergang ist reversibel.

Das Modell für die mechanischen Eigenschaften von Haaren kann vereinfacht als System bestehend aus parallel geschalteten Federn und Dämpfungselementen aufgefasst werden. Die T_c^l -Komponente wird durch ein einzelnes Dämpfungselement abgebildet, da keine elastischen Anteile beobachtet wurden. Eine Feder repräsentiert die T_c^h -Komponente und die α -Helices in den Mikrofibrillen bilden ein MAXWELL-Element (ABB. 14).

Bei Temperaturen unterhalb T_c^l sind im HOOKEschen Bereich alle drei Elemente an der Verformung beteiligt. Bei Überschreitung dieses Übergangspunktes fällt der Einzeldämpfer weg, da die T_c^l -Komponente in den viskosen Sol-Zustand übergeht. Für $T > T_c^h$ fällt auch die Feder weg und das weitere Verhalten wird durch das MAXWELL-Element (α -Helices) bestimmt. Dieses Modell bezieht im Gegensatz zu [8] den mechanischen Beitrag der Materialien zwischen den Makrofibrillen und der Endocuticula mit in die Betrachtung ein.

Das Setting-Verhältnis bei der Herstellung von Wasserwell-Locken (tiefe Relaxationstemperatur) ist stark von der Behandlungstemperatur abhängig. Liegt diese über der T_c^h , ist infolge der Plastizität beider Komponenten eine bleibende Verformung möglich. Bei Werten unterhalb von T_c^l ist der Zustand elastisch, eine bleibende Verformung wird verhindert. Im Bereich zwischen den beiden Übergangstemperaturen liegen lediglich die strukturellen Elemente der T_c^l im plastischen Zustand vor, die der T_c^h bleiben elastisch. Die Stabilität ist mittelmäßig und bleibt bei Werten $< T_c^h$ ungefähr konstant. Der Einfluss der Relaxationstemperatur besteht darin, dass die Deformation gleichsam eingefroren wird. Liegt sie über T_c^l , ist der Zustand plastisch und nur die T_c^h -Komponente ist für die Formgebung verantwortlich.

Relaxation von Wasserwell-Locken in unterschiedlichen Lösungsmitteln zeigen, dass der Wert der Dielektrizitätskonstante ϵ über die Haltbarkeit entscheidet. $\epsilon < 20$ führt zu besserer Haltbarkeit infolge Anhebung von T_c^l .

Der Wert von T_c^l hängt stark vom Feuchtigkeitsgehalt der

Haare ab. Bei nassen Haaren sinkt er in der Regel unter Raumtemperatur, so dass ein Setting bequem möglich ist. Nach dem Trocknen steigt er wieder und die Form bleibt erhalten. Aufgrund dieses Effektes verlieren Lockenwicklerfrisuren bei steigender Luftfeuchtigkeit schnell ihre Form.

Chemische Substanzen wie Färbemittel können mit steigender Temperatur einfacher in die Haarstrukturen diffundieren. Der Diffusionskoeffizient steigt mit dem Erreichen von T_c^h .

3.7 Biegung

Die Biegung der Haarfaser stellt eine wichtige Deformationsgröße dar. Dabei entsteht im äußeren Bereich der Krümmung eine Zone maximaler Dehnung, die zur Krümmungsinne Seite hin über die neutrale Faser in die Kompressionszone übergeht. Die neutrale Faser verläuft durch die Schwerpunkte der Querschnitte. Der vom Haar der Biegung entgegengebrachte Widerstand ist die Biegesteifigkeit $E_B I$, wobei I das Flächenträgheitsmoment darstellt ($I_y = \int_A x^2 dA$, x ist der Abstand von der neutralen Faser). Vom Standpunkt der Elastizitätstheorie her lassen sich Dehnung und Kontraktion beim ideal-elastischen Material durch den E-Modul beschreiben. Die Biegung kann im Bereich kleiner Verformungen in Analogie zur Biegung von Stäben vereinfacht durch eine Differentialgleichung vierter Ordnung beschrieben werden:

$$EI_2 \frac{d^4 x}{dz^4} - Q_x = 0 \quad EI_1 \frac{d^4 y}{dz^4} - Q_y = 0,$$

wobei

$$\mathbf{Q} = -\frac{d\mathbf{F}}{dl},$$

also die Änderung der Kraft entlang des Stabes und z die Stabachse im undefor mierten Zustand ist. I_1 bzw. I_2 sind die Hauptträgheitsmomente, die Richtungen von x bzw. y fallen mit den Hauptträgheitsachsen zusammen. Kleine Verformung heißt in diesem Zusammenhang, dass die Ableitung der Tangente dT/dl entlang des Stabes klein ist.

Haarfaser n neigen zu viskoser Verformung und verfügen keineswegs über einen homogenen Querschnitt, so dass der Modul der Biegung in der Regel vom E-Modul, der aus Zugversuchen bekannt ist, abweicht.

Aufgrund der elliptischen Querschnittsgeometrie zeigt das Haar in Richtung der beiden Hauptachsen unterschiedliche Biegesteifigkeiten. Die Flächenträgheitsmomente nehmen dabei die Form an

$$I_{min} = \frac{1}{4} \pi a b^3, \quad I_{max} = \frac{1}{4} \pi a^3 b,$$

wobei a und b der große bzw. der kleine Halbmesser der Ellipse sind. Die Biegung findet bevorzugt in Richtung des kleinen Halbmessers statt. Eine Vergrößerung des großen Halbmessers um 25% hätte einen Anstieg der Biegesteifigkeit um 25%, eine Zunahme des kleinen Halbmessers um denselben Wert fast eine Verdopplung der Steifigkeit zur Folge.

Mit den in TAB. 2 gegebenen Haardurchmessern unterschiedlicher Rassen errechnet man als Verhältnis I_{max}/I_{min} Werte zwischen 1.5 und 2.8 (TAB. 7). Bei afrikanischen Haarfaser n kann die Biegesteifigkeit in der Richtung des großen Halbmessers folglich bis zu dreimal so groß sein, wie senkrecht dazu. Ob sich dieser theoretische Aspekt in irgendeiner Weise auf das makroskopische Erscheinungsbild auswirkt, lässt sich nicht beurteilen. Allerdings scheinen

	I_{\max}/I_{\min}	$I_{\min}/I_{\min}^{\text{Euro}}$
West-Europäer	2.09	1.00
Chinesen	1.51	2.85
Inder	1.95	1.83
Negroide	2.82	1.32

Tab.7: Steifigkeit von Haaren unterschiedlicher Rassen.

sich Parameter wie Geometrie und Biegesteifigkeit durchaus in der Haarmechanik bemerkbar zu machen. Von Swift [44] wird in diesem Zusammenhang auf das *Syndrom nicht-kämmbarer Haare* verwiesen, bei dem man eine dreieckige Querschnittsgeometrie als Ursache annimmt. Das Verhältnis der Biegesteifigkeiten von Dreieck zu Ellipse beträgt etwa $1,20 \cdot a/b$. Das Phänomen kann aber nicht alleine aus dieser Tatsache heraus erklärt werden.

Interessanterweise wird der Cuticula im Gegensatz zur Zugbeanspruchung ein Einfluss auf das Biegeverhalten zugesprochen, der sich anteilmäßig zwischen 40 und 50% bewegen kann. Es ist davon auszugehen, dass Agenzien, welche die cuticuläre Struktur zu beeinflussen vermögen, damit indirekt auch das Biegeverhalten beeinflussen.

Scott und Robbins [42] haben eine Methode zur Messung des Biegeverhaltens speziell bei Haaren entwickelt. An den Enden des einzelnen Haares werden Gewichte von $0.1g$ fixiert und das Haar anschließend über einem Haken ausbalanciert. Über den sich einstellenden Abstand d der beiden Schenkel kann der E-Modul zu

$$E_B = \frac{\pi T d^2}{2 A^2}$$

ermittelt werden, wobei T die an den Enden ausgeübte Kraft ist. Diese Methode liefert näherungsweise die gleichen Werte wie der klassische Zugversuch (siehe TAB. 8), solange ein kreis-runder Querschnitt angenommen wird. Der Abstand d der Schenkel ist direkt proportional zur Steigung des HOOKEschen Bereiches. Auf der Basis der Werte aus [42] (Figure 5.) wurde E_B für drei Fasern von unterschiedlicher linearer Dichte berechnet. Der Verlauf von E_B bei steigender Luftfeuchte ist in ABB. 15 dargestellt. Die Steifigkeit nimmt mit steigender Luftfeuchte ab. Dickere Fasern zeigen eine größere Sensitivität gegenüber Änderungen der Luftfeuchte.

3.8 Torsion

Haare erfahren bei natürlicher Beanspruchung durch Wind, Kämmen, Bürsten etc. neben der Biegung auch eine Verdrehung. Bei Dauerwelle oder Einsatz von Lockenwicklern nehmen Haarsträhnen spiralförmig an und werden unter Eigengewicht auseinander gezogen. Neben Biegekräften treten dann auch Verdrehungen der Faserquerschnitte auf. Der Widerstand, den sie dabei der ausgeübten Kraft entgegenzusetzen, wird als Torsionssteifigkeit bezeichnet. Die Starrheit ist das Moment, dass erforderlich ist, um eine Umdrehung pro $1cm$ Länge zu herbeizuführen. Diese Größe spielt eine große Rolle in der Kosmetikindustrie. Messverfahren zur Bestimmung des Torsionsverhaltens von textilen Fasern basieren auf dem Prinzip des Torsionspendels. Eine Last am Ende der Faser oszilliert mit einer bestimmten Periode T

und definiert den Torsionsmodul (Schubmodul) durch

$$G = \frac{128 \pi I l}{(T d^2)^2}$$

l ist die Länge, d der Durchmesser der Faser, I das Trägheitsmoment des Pendels. Daraus ermittelt man den Widerstand gegen Verdrehen (Starrheit)

$$\Gamma = 8 \pi^3 I l / T^2$$

Widerstand und Torsionsmodul stehen über

$$G = \Gamma / A^2$$

in Beziehung. Da die Amplitude der Torsionsschwingung mit der Zeit abnimmt, kann man das *logarithmische Dekrement*

$$\delta = \frac{2,3}{n} \ln \frac{a_1}{a_n}$$

als weitere charakteristische Größe einführen. Dabei ist n die Anzahl der Oszillationen, a_1 und a_n die Amplitude der ersten bzw. letzten Oszillation. Dieser Parameter beschreibt die Torsionselastizität der Faser. Je größer die Dämpfung, desto weniger elastisch ist die Faser bzw. desto größer die interne Viskosität. Für $\delta = 0$ liegt ein ideal-elastisches Verhalten vor. Man kann in Analogie zur Biegung einen Modul G' einführen, der den Torsionsverlust eines System beschreibt. Er steht mit der logarithmischen Abnahme über $G' = \delta G / \pi$ in Beziehung. In TAB. 9 sind die *Standardwerte* für E-Modul und Torsionsmodul aufgeführt.

	(N/cm^2)	$\frac{E_{65\%}}{E_{100\%}}$
E_S	$3,89 \times 10^5$	2,62
E_B	$3,79 \times 10^5$	2,40
G	$0,89 \times 10^5$	4,10

Tab.9: Dehnungs-, Biege- und Schubmodul von Haaren bei 60 – 65% rel. Luftfeuchte in N/cm^2 .

Feuchtigkeit beeinflusst die Torsionseigenschaften in stärkerem Maße als die Dehnungseigenschaften. Während der E-Modul der Dehnung lediglich um den Faktor 2 abnimmt, verzeichnet man beim Torsionsmodul den Faktor 4, wenn die rel. Luftfeuchte von 65% auf 100% steigt [1]. Das logarithmische Dekrement zeigt eine deutliche Zunahme bei steigender Luftfeuchte. Das macht es verständlich, warum sich Haare im Nassen Zustand leichter frisieren lassen und ihren Zustand mit dem Trocknen beibehalten. Feuchtigkeit macht Haare plastisch formbar, so dass ihnen mit

	G ($10^5 N/cm^2$)	$E_{65\%}/E_{100\%}$ (-)	log. Dekr. (-)
Unbehandelt	1.02	0.26	0.40
Gebleicht	1.05	0.14	0.44
Gefärbt (blond)	1.07	0.23	0.42
Gefärbt (schwarz)	1.08	0.23	0.45
Dauerwelle	1.01	0.09	0.56
Relaxed	0.91	0.06	0.65

Tab.10: Torsionsmodul von Haaren nach unterschiedlicher Behandlung bei 65% rel. Luftfeuchte in N/cm^2 .

Probe	lin. Dichte ($\mu\text{g}/\text{cm}$)	E_B ($10^5 \text{ N}/\text{cm}^2$)	E_S ($10^5 \text{ N}/\text{cm}^2$)	E_B/E_S (-)
K	99.5	4.23	3.68	1.15
L	94.9	3.54	3.82	0.93
K	89.2	4.29	3.43	1.25
L	71.8	4.25	3.83	1.11
H	69.2	4.11	3.75	1.10
L	67.7	3.35	3.96	0.85
L	54.6	3.60	4.12	0.88
L	52.9	4.69	3.98	1.18
H	52.6	3.74	4.03	0.93
H	42.3	3.23	4.21	0.77
L	34.4	2.89	4.33	0.67
H	31.3	3.58	3.59	1.00
\bar{x}	63.4	3.79	3.89	0.97
Δx		13.9	6.7	

Tab.8: E-Modul aus Biege- und Zugversuchen unter Annahme eines kreis-runden Querschnitts, 60% rel. LF, 75°F. K = Süd-Koreanisches Haar; H, L = Frau, kaukasisch, 15 bzw. 12 Jahre.

Lockenwicklern eine neue Form verliehen werden kann. Im trockenen Zustand nimmt die Steifigkeit der Haarfaser ihren ursprünglichen Wert an. Das Setting ohne Verwendung chemischer Substanzen führt zu Frisuren, die Form bei steigender Luftfeuchte schnell wieder verlieren.

Bei dauer-gewelltem (chemisch reduziertem Haar) Haar findet man man bei Luftfeuchten unterhalb von 90 % geringfügig erhöhte und oberhalb eine etwas kleinere Steifigkeit im Vergleich zum nicht modifizierten Haar (ABB. 16). Zudem ist die plastische Verformbarkeit etwas größer als vor der Behandlung. Phillips [34] hat den Einfluss des *Alterungs-Prozesses* auf die Torsionseigenschaften von Wollfasern untersucht. Unter dem Alterungs-Prozess versteht man die zeitliche Entwicklung der mechanischen Eigenschaften von Keratin-Fasern nach dem Entfernen aus dem Wasserbad. Die anschließende Konditionierung bei definierter Luftfeuchte ist ein dynamischer Prozess, bei dem sich allmählich der Gleichgewichtswassergehalt einstellt. Der Begriff der Alterung rührt daher, dass ein Durchnässen der Faser die Wiederherstellung ihrer Ursprungseigenschaften zur Folge hat. Mit dem Alterungsprozess ist die Abnahme der Torsions-Dämpfung bzw. die Zunahme der Starrheit verbunden. Dieser Prozess kann sich unter ungestörten Bedingungen über Jahre erstrecken, allerdings mit immer kleiner werdender Abnahmerate (ABB. 17).

Die Plausibilität der angegebenen Werte lässt sich über den Zusammenhang zwischen Torsionsmodul und E-Modul $G = E/[2(1 + \nu)]$ überprüfen. Dabei ist ν die POISSON-Zahl [12]. Mit den Werten aus TAB. 9 findet man keine gute Übereinstimmung. Feughelman [8] wendet diese Beziehung mit $\nu = 0.35 - 0.5$ auf Wolle an. Der Torsionsmodul sollte folglich etwa $G = \frac{1}{3} E$ betragen, was bei Wolle zumindest für trockene Fasern mit einer Toleranz von 10 % zutrifft.

Im Gegensatz zur Zugbelastung leisten die äußeren Schichten der Haarfaser (Cuticula) einen wesentlichen Beitrag zur Torsionssteifigkeit. Über die Veränderung der Torsionseigenschaften kann auf Schädigungen der Cuticula geschlossen werden.

3.9 Reibung

An den Berührflächen von Körpern treten Kräfte dissipativen Charakters auf, die Reibungskräfte. Die COULOMB-Reibung eines Körpers auf einer festen Unterlage ohne Schmiermittel ist gegeben durch $F_R = \mu \cdot F_N$, wobei F_N die

Kraft Normal zur Unterlage darstellt. μ_S ist der Koeffizient der Haftreibung, μ_K der Gleitreibungskoeffizient. Diese Beiwerte geben die zum Einleiten bzw. Aufrechterhalten der Bewegung erforderliche Kraft an. Es gilt: $\mu_S \geq \mu_K$. μ_K kann direkt bestimmt werden. Bei Anwesenheit von Gleitmitteln gilt das Gesetz der COULOMB-Reibung nicht. Ausnahmen bilden die Fälle, bei denen die Substanzen gleichmäßig über die Reibungsflächen verteilt sind. Die Feuchtigkeit und damit die rel. Luftfeuchte sowie die Anpresskraft zwischen zwei Berührflächen üben deutlichen Einfluss auf die Reibung aus. Der Theorie nach sollte der Reibungskoeffizient unabhängig von der Größe der Belastung normal zur Reibungsfläche sein. In der Praxis zeigen sich aber gerade im Bereich kleiner Belastungen bei der Faserreibung deutliche Zunahmen von μ_K .

Die experimentelle Ermittlung von Reibungskräften zwischen Haaren und Materialien gestaltet sich einfacher als zwischen Haaren untereinander. Der Koeffizient der kinetischen Reibung kann nach [37] durch Spannungsmessungen an einer Haarfaser, die man über eine Achse laufen lässt und an deren Ende eine kleine Belastung ausgeübt wird, näherungsweise bestimmt werden zu

$$\mu_k = \frac{1}{\phi} \ln \frac{T_2}{T_1}.$$

ϕ ist der Winkel der Wicklung in Radiant und T_1 bzw. T_2 sind die Spannungen, die man vor und nach dem Passieren der Achse misst. Die Unabhängigkeit von der Kraft ist eine zulässige Annahme für kleine Belastungen. Die Reibung scheint sich bei unterschiedlichen Reibungsgeschwindigkeiten nicht merklich zu verändern. Einige Werte sind in TAB. 11 aufgeführt.

Die Ermittlung des statischen Reibungskoeffizienten μ_S kann über den Gleitwinkel einer kleinen Haarschleife bestimmt werden, die auf zwei parallelen Haarfasern aufgesetzt und durch eine kleine Kraft belastet wird. Hier gilt: $F = A \cdot S$, mit der Kontaktfläche A und der Scheerfestigkeit S der berührenden Materialien.

Der Effekt der Reibung bei Haarfasern ist anisotrop. Schwartz und Knowles [41] unterscheiden bezüglich der Reibung von Haarfasern mit Materialien und untereinander fünf Fälle (siehe ABB. 18). Fall (A) zeigt die Reibung zweier gleichgerichteter Haarfasern. Die Relativbewegung ist hier unerheblich, denn es reiben nur die Schuppen jeweils einer

a)	trocken	nass
Haar	0.15	0.34
Hartgummi	0.19	0.38
Nylon	0.14	0.22
Aluminium	0.12	0.18
Polyethylen	0.22	0.29
Glas	-	1.40
b)	nass	
Gebleicht	0.25	
Dauerwelle	0.31	
Gebleicht u. Dauerwelle	0.49	
c)	μ_K	μ_S
ABS gewaschen	0.35	0.30
Pflegespülung	0.26	0.20
ABS gewaschen 1×	0.19	0.16
ABS gewaschen 2×	0.36	0.29
d)	$A \rightarrow S$	$S \rightarrow A$
Shampoo	0.425	0.546
Pflegespülung	0.293	0.475

Tab.11: a) Reibungskoeffizienten μ_K für Interaktion von trockenen und nassen Haaren mit unterschiedlichen Materialien; b) Haar auf Haar Reibung nach kosmetischer Behandlung; c) nach sukzessiver Behandlung mit ABS (Natrium-Dodecylbenzensulfonat) und Pflegespülung. (Die Werte gelten in Richtung der kleinsten Reibung). d) Reibungskoeffizienten μ_K in Abhängigkeit von der Reibungsrichtung nach Behandlung der Haare mit einem Shampoo bzw. einer Pflegespülung ($A = \text{Ansatz}$, $S = \text{Spitze}$).

Haarfaser. In (B) sind die Fasern entgegengesetzt und die Relativbewegung verläuft entgegengesetzt zur Wachstumsrichtung, so dass die Reibung kleiner ist, als im ersten Fall. Fall (C) zeigt den vorherigen Fall mit Relativbewegung in Wachstumsrichtung. Die Schuppen blockieren, so dass die Reibung größer ist als im ersten Fall. (D) und (E) zeigt die zwei möglichen Situationen, in denen die Haarfaser senkrecht zueinander stehen. Alle Reibungsfälle lassen sich auf diese fünf Diagramme zurückführen.

Die Richtungsabhängigkeit der Reibung kann durch Shampoos und Pflegespülungen beeinflusst werden (siehe TAB. 11). Der Effekt von Shampoos ist oftmals kumulativ, so dass mehrfaches Waschen zu einer schrittweisen Beeinflussung der Reibungsbeiwerte führt. Den Effekt einer solchen sukzessiven Behandlung kann man in TAB. 11 sehen. Die Bildung natürlicher Fette setzt die Reibung herab. Talg füllt die Zwischenräume benachbarter Schuppen der Cuticula aus, so dass die Rauigkeit abnimmt [5]. Generell wird die Reibung mit zunehmendem Faserdurchmesser größer. Änderungen der rel. Luftfeuchte, der Temperatur sowie das Bleichen oder die Dauerwelle beeinflussen das Reibungsverhalten von Haaren mehr oder weniger stark.

3.10 Elektrostatische Kräfte

Mechanische Belastungen, die mit dem Zusammenpressen von Haarfaser einhergehen, führen infolge unterschiedlicher Elektronen-Affinitäten zu Ladungstrennungen und folglich zur Ausbildung von Reibungs- bzw. Piezoelektrizität. Wie schnell die Ladungen abgebaut werden, hängt vom elektri-

schen Widerstand ab. Haare begünstigen infolge ihres hohen elektrischen Widerstandes die Ausbildung elektrostatischer Ladungen. Die Konsequenz ist das sogenannte *Flyaway Hair*, das man besonders gut bei frisch gewaschenem Haar beobachten kann. Hierbei spielt der Haartyp eine wichtige Rolle. Je glatter das Haar, desto größer ist die Tendenz zum Absteigen der Haare. Mit zunehmender Welligkeit hindern sich die Fasern durch den höheren Grad der Verflechtung gegenseitig am Austreten aus den Haarschichten [37].

Die Richtungsabhängigkeit der Reibung hat einen interessanten Effekt zur Folge: Zieht man aus einem Bund gleich orientierter Haare eine einzelne Faser heraus, so bildet sich auf der Faser entweder eine positive oder eine negative Ladung aus, je nachdem, ob die Faser am unteren Ende oder an der Spitze herausgezogen wurde. Ist Faser den anderen entgegengerichtet, bildet sich keine Ladung aus.

Die Zunahme der Luftfeuchtigkeit geht mit der Abnahme des elektrischen Widerstandes bzw. einer Zunahme der Leitfähigkeit einher. Der Widerstand von Haaren beträgt bei 85% rel. Luftfeuchte etwa $R = 1.0 - 1.7 \times 10^{13} \Omega$. Feuchtes Haar zeigt eine deutlich geringere Tendenz zur Ladungsbildung. Da das Haarkeratin stark hygroskopisch ist, kann der Widerstand durch die Elektrolytkonzentration beeinflusst werden. Shampoos oder Pflegespülungen verringern zum einen den elektrischen Widerstand, zum anderen die Reibung, so dass weniger *Kämmarbeit* geleistet werden muss und infolge dessen weniger Ladung aufgebaut wird. Bei Widerständen unterhalb $R = 10^8 \Omega \text{ g/cm}^2$ verteilt sich die Ladung zudem besser über die Haaroberfläche. Temperaturänderungen zeigen ähnliche Wirkung, ein Anstieg der Temperatur um 10°C führt zu einer Abnahme des Widerstandes um das Fünffache.

3.11 Einfluss von Kosmetika

Typische kosmetische Behandlungen der Haare umfassen das Kämmen und Bürsten, das Bleichen, Färben, die Dauerwelle, das Waschen mit Shampoos und Pflegespülungen sowie die Applikation von Haarsprays, Haarlacken, Haargelen oder anderen Pflegeprodukten. Der Einfluss auf die physikalischen Eigenschaften, insbesondere die mechanischen, ist unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Erforschung der Wirkung von Kosmetika auf Haut und Haar stehen im Mittelpunkt des Interesses der kosmetischen Industrie und sind von daher eingehend untersucht worden.

3.11.1 Kämmen und Bürsten

Robbins und Reich [38] haben den Einfluss globaler Haareigenschaften auf die Kämmbarkeit von Haaren untersucht. Diese kann als Funktion von statischer und dynamischer Reibung (F_s, F_k), Steifigkeit (S), Welligkeit (C), Durchmesser (D) und elektrischer Ladung (E) aufgefasst werden, die Kohäsion wird hier nicht berücksichtigt:

$$K = f(F_s, F_k, S, C, D, E).$$

Das Kämmverhalten kann charakterisiert werden durch die Maximalkraft und die zu verrichtende Arbeit. Die Kämmarbeit ist bei nassen kaukasischen oder orientalischen Haaren größer als im trockenen Zustand, bei krausen Haaren ist es umgekehrt. Afrikanisches Haar ist infolge seines in axialer Richtung ständig wechselnden Durchmesser und seine starke Torsion etwa fünfmal schwerer zu kämmen, als kaukasisches Haar [20]. Haupteinflussfaktoren sind dabei die Faserkrümmung und Reibung. Größere Steifigkeit führt zu bes-

erer Kämmbarkeit. Der Durchmesser hat keinen nennenswerten Einfluss auf Maximalkraft und Arbeit. Der Einfluss einer Behandlung auf die Kämmbarkeit lässt sich abschätzen [38]

$$K = -N_1 F_k - N_2 F_s - N_3 E - N_4 C + n_1 S + n_2 D.$$

Der Beitrag der Größen mit kleinem n ist gering.

Beim Kämmen oder Bürsten der Haare ist der größte Widerstand im Bereich der Spitzen zu überwinden (ABB. 19).

Bedingt durch Witterungseinflüsse weisen die Fasern im Bereich der Spitzen die größte Rauigkeit auf. In solchen «Haarfilzen» stehen mitunter bis zu 30 einzelne Fasern in Kontakt [45]. Bei langsam aufgewendeten ansteigenden Kräften gleiten die Haare übereinander hinweg. Bei großer ruckartiger Belastung dagegen stellen sich die Fasern teilweise senkrecht und werden übereinander hinweg gebeugt. In dieser Konfiguration erfährt die Faser eine Scherbeanspruchung in axialer Richtung, die parabolisch über den kleinen Durchmesser verteilt ist. An der äußeren Enden des Durchmessers verschwinden die Scherspannungen, in der Ebene des großen Durchmessers werden sie dagegen maximal. Ihr Wert wird größer, wenn der kleine Radius oder die Krümmung zunehmen. Bei andauernder Belastung kommt es zum Haarspliß, der sich in Richtung Haarspitze fortpflanzt. Das Herabsetzen des Reibungsbeiwertes durch Applikation von «schmierenden» Substanzen oder die Erhöhung der Plastizität durch Feuchtigkeit können die Auswirkungen solcher Scherbeanspruchungen vermindern.

Die Kraft, die beim Bürsten der Haare aufgewendet werden muss, nimmt offensichtlich mit der Faserdicke zu [51]. Diese Beobachtung widerspricht der Theorie. Demnach sollten infolge der zunehmenden Biegesteifigkeit die von den Zähnen des Kammes oder der Bürste ausgeübten Belastungen zu einer Spreizung oder einem Auseinanderdrücken der Fasern führen, die der Ursache vorwegläuft. Die aufzubringende Kraft sollte also mit zunehmender Dicke der Haare kleiner werden. Kleine Unebenheiten mit einer Amplitude nicht größer als Faserdurchmesser könnten eine Rolle spielen. Allerdings nimmt mit der Faserdicke auch die Reibung zu.

3.11.2 Glätten der Haare

Generell kann man dauerhaftes Glätten der Haare nur durch Agenzien mit starker Quell- und Kontraktionswirkung erreichen¹¹ [50]. Glätten durch Hitzeeinwirkung sind nur von temporärer Dauer. Das radiale Quellen der Keratinfasern im alkalischen Milieu führt zu einer wesentlichen Vergrößerung der Kurvenradien und damit zu einer temporären Glättung¹². Folgt eine Kontraktion um ca. 5% der Ausgangslänge («Superkontraktion»), so bleibt die Glättung erhalten. Ein dauerhafte Glättung kann auch durch ein Auseinanderziehen der Fasern in heißem Wasser erreicht werden.

3.11.3 Einfluss von Haarsprays

Unter Verwendung von Haarsprays bzw. Festigern kann die Struktur des Haarkörpers fixiert werden. Die Haltbarkeit hängt u.a. ab von der Partikelgröße, der Fließfähigkeit der Klebstoffe und von der Art der Bindung, die sich zwischen den Fasern ausbildet. Die Glasübergangstemperatur

¹¹ Stark alkalisches Milieu mit $\text{pH} > 13$ oder auch mit LiCl .
¹² Legt man z.B. lockige Haare in 1N NaOH ein, strecken sie sich ohne äußere Krafteinwirkung.

des Harzes und seine Viskosität sind wichtige Einflussgrößen zur Bestimmung der Adhäsionskräfte. Experimentell lässt sich die Stärke solcher Bindungen in Zugversuchen ermitteln. Man durchschneidet eine an der Berührungsstelle verklebte Haarschleife (ca. 2 cm) und belastet anschließend bis zum Versagen der Klebestelle auf Zug [49]. In der Regel tritt ein adhäsives Versagen eher ein als ein kohäsives. D.h., dass eine größere Tendenz zur Ablösung der Faseroberfläche vom Klebstoff besteht, als zum Bruch des Klebstoffkörpers selber. Die Größe der Oberfläche hat Einfluss auf die Festigkeit der Bindung. Handelsübliche Produkte lassen sich nach der Haltbarkeit klassifizieren: «*ultra-high holding (UHH)*», «*hard-to-hold (HH)*», «*regular-hold (RH)*» und «*light-hold (LH)*». In der Regel korrespondieren die Bezeichnung mit der Stärke der von den Produkten ausgebildeten Verbindungen. Die Stärke der Verbindung hängt stark von den Inhaltsstoffen der Produkte ab. Acrylpolymeren weisen die größte Festigkeit bei 40% rel. Luftfeuchte auf (ABB. 20). Einige typische Durchschnittswerte sind in TAB. 12 zu finden.

Klasse	Max. Kraft (N)
UHH	0.35 - 0.40
HH	0.25 - 0.30
RH	0.20 - 0.25
LH	0.10

Tab.12: Haltbarkeit von Haarsprayverbindungen unterschiedlicher Klassen, gerundet nach.

Die meisten Haarsprays werden klebrig, sobald das Lösungsmittel verdunstet ist. Die Zunahme der Steifigkeit ist proportional zur Viskosität der Polymerlösung und zur aufgetragenen Gesamtmenge und nimmt direkt nach der Applikation im Vergleich zum unbehandelten Haar um 30 – 50% zu. Dieser Initialeffekt kann auch eine Folge der Kapillarkräfte sein, die zwischen den Fasern herrschen, solange das Lösungsmittel noch flüssig ist.

Je höher das Molekulargewicht des Polymers, desto größer die Steifigkeit, die sich einstellt [18]. Aber auch dieser Zusammenhang ist von der rel. Luftfeuchte abhängig.

4. OPTISCHE EIGENSCHAFTEN

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. Messungen des Haarglanzes werden unter Anwendung *goniophotometrischer Techniken* durchgeführt. Zwischen dem Haartyp und der Lichtstreuung besteht ein Zusammenhang. Die Lichtstreuung liefert einerseits Informationen über den Glanz des Haares, andererseits ist sie ein Indikator für den Zustand der Haaroberfläche. Sie ändert sich je nach Grad der Verschmutzung bzw. Partikelbelastung und damit auch durch Behandlung mit Kosmetika (Shampoos, Haarsprays etc.) [35]. Die Anordnung der Haarfasern hat ebenfalls einen großen Einfluss auf die Lichtstreuung.

Der Glanzeffekt ist die Folge einer bevorzugten Reflexionsrichtung. Bei Beleuchtung 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). Einfallss-

winkel und Ausfallswinkel sind in der Regel nicht identisch [37].

Die Bestimmung des Glanzes erfolgt über die Messung der Lichtintensität als Funktion des Ausfallswinkels. Das Maximum dieser Funktion ist die *spiegelnde Reflexion*. Ein gewisser Teil des Lichtes wird dagegen in unterschiedliche Richtungen gestreut, der diffuse Anteil der Reflexion. Die Ursachen für die Streuung liegen in den Inhomogenitäten der Haaroberfläche und der Haarmatrix. Dazu gehören insbesondere die strukturellen Gegebenheiten der Cuticula (Schuppen). Allgemein gilt, dass der Glanz mit zunehmendem spiegelnden Anteil größer und mit zunehmendem diffusen Anteil kleiner wird. Robbins und Reich [35] schlagen folgende Beziehung zur Ermittlung des Haarglanzes vor: $L = S/DW(\frac{1}{2})$. D ist der Wert der diffusen Reflexion, der durch durch Abtrennen der Basisreflexion aus der Gesamtkurve erhalten wird¹³. S ist das Integral der spiegelnden Reflexion ohne den diffusen Anteil, $W(\frac{1}{2})$ ist die Breite des Maximumpeaks bei halber Intensität. Diese Gleichung gilt nur, solange ein diffuser Anteil vorhanden ist. Das ist bei Haaren strukturell bedingt immer der Fall.

Für Haare, die in axialer Richtung (Haaransatz-Spitze) in einem Winkel von 30° gemessen gegen die Lotrechte angestrahlt werden, liegt das Maximum der spiegelnden Reflexion bei 24°¹⁴. In entgegengesetzter Richtung (Spitze-Haaransatz) liegt das Maximum bei 36°. Ein weiteres lokales Maximum tritt bei etwa 40° auf, dessen Wert von der Haarfarbe abhängig ist. Bei schwarzen Haaren ist es bedingt durch die größere Absorption kleiner als bei blonden Haaren. Werden Haare in einer Schicht exakt parallel angeordnet, wird der diffuse Anteil der Reflexion für diese Anordnung minimal. ABB. 21 zeigt den typischen Kurvenverlauf eines dunkelbraunen orientalischen Haares im unbehandelten Zustand sowie nach mehrfacher Behandlung mit einem handelsüblichen Shampoo. Dabei kann man beobachten, dass die Applikation zur einer Abstumpfung des Glanzes führt. 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. 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 Haarewaschen auftreten, ist hier eher möglich. Neben Shampooesteren 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 [37].

5. LITERATUR

- [1] H. Bogaty. Torsional Properties of Hair in Relation to Permanent Waving and Setting. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 18:575–589, 1967.
- [2] M. Breuer. The binding of small molecules to hair - I: The hydration of hair and the effect of water on the mechanical properties of hair. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 23:447–470, 1972.

¹³Verbindung der Streulichtintensitäten bei 0° und 75°

¹⁴Daraus lässt sich ableiten, dass die Schuppen in einem Winkel von etwa 3° von der Oberfläche abstehen.

- [3] B. Chapman. Bending Stress Relaxation and Recovery of Wool, Nylon 66, and Terylene Fibers. *J. App. Polymer Sci.*, 17:1693–1713, 1973.
- [4] B. Chapman. The rheological behaviour of keratin during the aging process. *Rheol. Acta*, 14:466–470, 1975.
- [5] P. Corcuff, P. Gremillet, M. Jourlin, Y. Duvault, F. Leroy, and J.-L. Leveque. 3d Reconstruction of human hair by confocal microscopy. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 44:1–12, 1993.
- [6] D. E. Deem and M. M. Rieger. Mechanical Hysteresis of Chemically Modified Hair. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 19:395–410, 1968.
- [7] M. Feugelman and J. Curiskis. Finite Element Analysis of the Composite Fiber, Alpha Keratin. *Text. Res. J.*, 53:271–274, 1983.
- [8] M. Feughelman. A Two-Phase Structure for Keratin Fibres. *Text. Res. J.*, 29:223–228, 1959.
- [9] M. Feughelman. Mechanical Hysteresis in Wool Keratin Fibers. *J. Macromol. Sci. Phys.*, B7(3):569–582, 1973.
- [10] M. Feughelman. The physical properties of alpha-keratin fibers. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 33:385–406, 1982.
- [11] M. Feughelman. *Mechanical Properties and Structure of Alpha-Keratin-Fibres.: Wool, Human Hair and Related Fibres*. University of New South Wales Press, Sydney, 1997.
- [12] Y. Fung. *Biomechanics. Mechanical Properties of Living Tissues*. Springer-Verlag, New York, 2. edition, 1993.
- [13] M. Gamez-Garcia. Effect of some oils, emulsions, and other aqueous systems on the mechanical properties of hair at small deformations. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 44:69–87, 1993.
- [14] L. A. Goldsmith and H. P. Baden. The Mechanical Properties of Hair. I. The Dynamic Sonic Modulus. *J. Invest. Derm.*, 55(4):256–259, 1970.
- [15] L. A. Goldsmith and H. P. Baden. The Mechanical Properties of Hair. II. Chemical Modifications and Pathological Hairs. *J. Invest. Derm.*, 56(3):200–204, 1971.
- [16] B. Hollfelder, G. Blankenburg, L. Wolfram, and H. Höcker. Chemical and physical properties of pigmented and non-pigmented hair ('grey hair'). *Int. J. Cosmet. Sci.*, 17:87–89, 1995. Letter to the Editor.
- [17] P. Huck and C. Baddiel. The mechanical properties of virgin and treated human hair fibres; a study by means of the oscillating beam method. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 22:401–410, 1971.
- [18] J. Jachowicz and K. Yao. Dynamic hairspray analysis. I. Instrumentation and preliminary results. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 47:73–84, 1996.
- [19] M. Johri and D. Jatar. Young's Modulus in the Identification of Human Scalp Hair. *Med. Sci. Law*, 22(1):63–67, 1982.
- [20] P. Kassenbeck. *Das Haar und Seine Struktur*. Wella AG, Darmstadt, 1999.
- [21] J. Menkart, L. Wolfram, and I. Mao. Caucasian Hair, Negro Hair, and Wool: Similarities and Differences. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 17:769–787, 1966.

- [22] S. Nagase, M. Ohshika, S. Ueda, N. Satoh, and K. Tsujii. A Universal Structural Model for Human Hair to Understand the Physical Properties 1. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 573:2161–2167, 2000.
- [23] N. Naruse and T. Fujita. Changes in the Physical Properties of Human Hair with Age. *Journal of the American Geriatrics Society*, 19(4):308–314, 1971.
- [24] D. L. Nelson and M. M. Cox. *Lehninger Principles of Biochemistry*. Worth Publishing, 3. edition, 2000.
- [25] G. Nikiforidis, C. Balas, and D. Tsambaos. Mechanical parameters of human hair: possible application in the diagnosis and follow-up of hair disorders. *Clin. Phys. Physiol. Meas.*, 13(3):281–290, 1992.
- [26] G. Nikiforidis, D. Tsambaos, C. Balas, and A. Bezerianos. A Method for the Determination of Viscoelastic Parameters of Human Hair in Relation to Its Structure. *Skin Pharmacol*, 6(1):32–37, 1993.
- [27] S. D. O'Connor, K. L. Komisarek, and J. D. Baldeschwieler. Atomic Force Microscopy of Human Hair Cuticles: A Microscopic Study of Environmental Effects on Hair Morphology. *J. Invest. Derm.*, 105(1):96–99, 1995.
- [28] R. R. Ogle and M. J. Fox. *Atlas of Human Hair. Microscopic Characteristics*. CRC Press, Boca Raton, London, New York, Washington D.C., 1999.
- [29] C. Orfanos and R. Happle. *Hair and Hair Diseases*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- [30] C. Orfanos and L. Brückmann. Messungen der Haardichte an normaler menschlicher Kopfhaut mit und ohne kosmetische Vorbehandlung. *Akt. Dermatol.*, 8:222–224, 1982.
- [31] C. Orfanos and H. Ruska. Die Feinstruktur des menschlichen Haares. I. Die Haar-Cuticula. *Arch. klin. exp. Derm.*, 231:97–110, 1968.
- [32] C. Orfanos and H. Ruska. Die Feinstruktur des menschlichen Haares. II. Der Haar-Cortex. *Arch. klin. exp. Derm.*, 231:264–278, 1968.
- [33] V. Pecoraro and I. Astore. Measurements of Hair Growth Under Physiological Conditions. In C. Orfanos and R. Happle, editors, *Hair and Hair Diseases*, pages 237–254. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 1990.
- [34] D. Phillips. Effects of Humidity, Ageing, Annealing, and Tensile Loads on the Torsional Damping of Wool Fibers. *Text. Res. J.*, 57:42–49, 1987.
- [35] C. Reich and C. 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.
- [36] H. Rigby, T. Mitchell, and M. Robinson. Changes with Time in Mechanical Properties of Wool Fibers. *J. Macromol. Sci. Phys.*, B10(2):255–269, 1974.
- [37] C. Robbins. *Chemical and Physical Behavior of Human Hair*. Springer-Verlag, New York, 4. edition, 2002.
- [38] C. Robbins and C. Reich. Prediction of hair assembly characteristics from single fiber properties. Part II. The relationship of fiber curvature, friction, stiffness, and diameter to combing behavior. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 37:141–158, 1986.
- [39] S. B. Ruetsch and H.-D. Weigmann. Mechanism of tensile stress release in the keratin fiber cuticle: I. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 47:13–26, 1996.
- [40] M. Sakai, S. Nagase, T. Okada, N. Satoh, and K. Tsujii. A Universal Structural Model for Human Hair to Understand the Physical Properties 2. Mechanical and Permeation Behaviors. *Bull. Chem. Soc. Jpn.*, 73:2169–2177, 2000.
- [41] A. M. Schwartz and D. Knowles. Frictional Effects in Human Hair. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 14:455–463, 1963.
- [42] G. Scott and C. Robbins. Stiffness of human hair fibers. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 29:469–485, 1978.
- [43] G. Swanbeck and J. Nyren. The Mechanical Properties of Hairs from Patients with Different Types of Hair Diseases. *J. Invest. Derm.*, 54(3):248–251, 1970.
- [44] J. Swift. Some simple theoretical considerations on the bending stiffness of human hair. *International Journal of Cosmetic Science*, 17:245–253, 1995.
- [45] J. A. Swift. Mechanism of split-end formation of human hair. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 48:123–126, 1997.
- [46] X. Tao and R. Postle. A Viscoelastic Analysis of the Keratin Composite. Part I. Longitudinal and Transverse Mechanical Properties. *Text. Res. J.*, 59:123–138, 1989.
- [47] X. Tao and R. Postle. A Viscoelastic Analysis of the Keratin Composite. Part II: Thermal und Hygral Expansion. *Text. Res. J.*, 59:300–306, 1989.
- [48] D. 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.
- [49] R. R. Wickett, J. A. Sramek, and C. M. Throbaugh. Measurement of the adhesive strength of hair-hairspray junctions. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 43:169–178, 1992.
- [50] M. Wong, G. Wis-Surel, and J. Epps. Mechanism of hair straightening. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 45:347–352, 1994.
- [51] N. E. Yin, R. H. Kissinger, W. S. Tolgyesi, and E. M. Cottingham. The Effect of fiber diameter on the cosmetic aspects of hair. *J. Soc. Cosmet. Chem.*, 28:139–150, 1976.
- [52] H. Zahn. Das Menschenhaar und seine innere Struktur. *PZ Dermo Pharmazie*, 11:10–14, 1998.

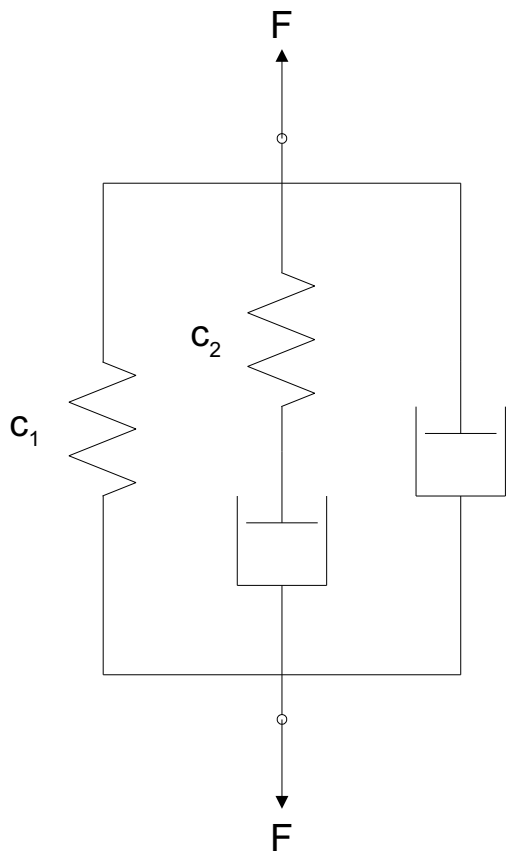


Abb.14: Strukturelles Modell für die mechanischen Eigenschaften von Haaren.

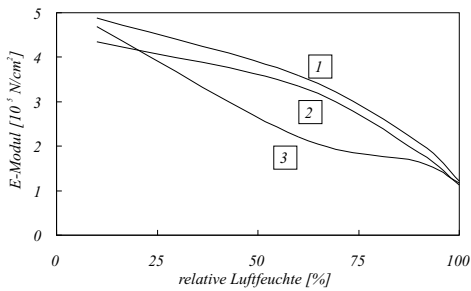


Abb.15: Änderung des E-Moduls der Biegung E_B bei Fasern unterschiedlicher linearer Dichte, berechnet auf der Basis der Werte aus. (1) K-Faser $102 \mu\text{g}/\text{cm}$, (2) H-Faser $54 \mu\text{g}/\text{cm}$, (3) H-Faser $34 \mu\text{g}/\text{cm}$.

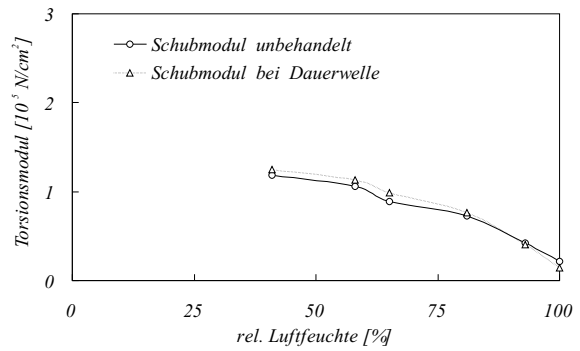


Abb.16: Änderung des Torsionsmoduls in Abhängigkeit von der rel. Luftfeuchte bei Haaren mit und ohne Dauerwelle.

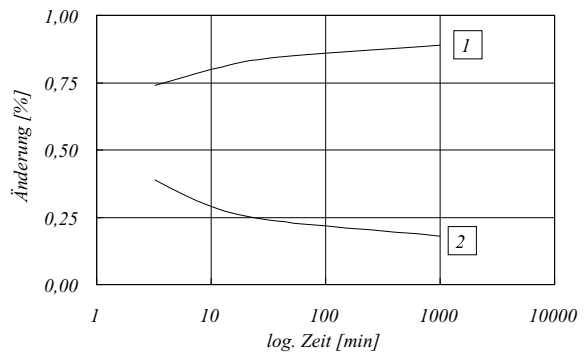


Abb.17: Änderung der Torsionseigenschaften von Wolle in Abhängigkeit von der Zeit (30°C , 65% rel. LF). (1) $\Gamma [10^5 \text{ N cm}^2]$, (2) δ .

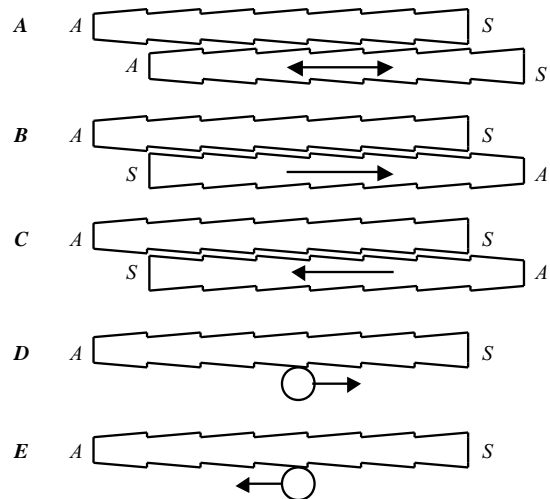


Abb.18: Richtungsabhängigkeit der Reibung.

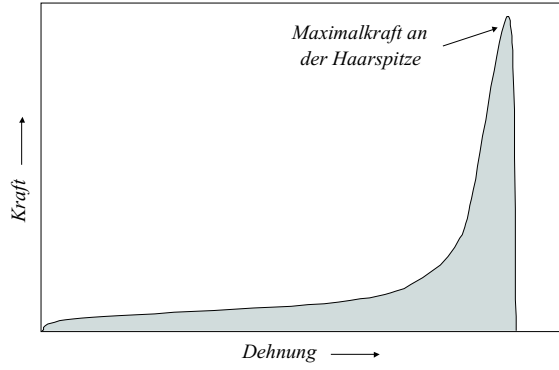


Abb.19: Verlauf der Kämmkraft mit Maximum im Bereich der Haarspitzen.

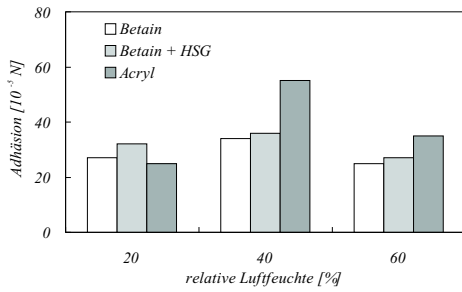


Abb.20: Kraft bis zum Versagen bei Haarsprayverbindungen basierend auf unterschiedlichen Polymeren.

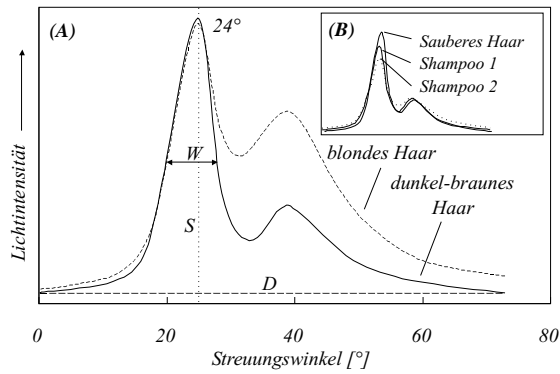


Abb.21: Streulichtintensität in Abhängigkeit vom Winkel, Einfallswinkel 30° .