

Abbildung 1.5 (a) Wasserstoffbrücke: Prototyp einer richtungsabhängigen zwischenmolekularen Kraft. Das Potential ist für Winkel $\theta \approx 180^\circ$ (minimal und wird nahezu null, wenn die Bindungen senkrecht aufeinander stehen. (b) Stabilisierung der α -Helix-Struktur der Proteine und der DNA-Doppelhelix durch Optimierung der Wasserstoffbrücken zwischen den Basen der Ribonukleinsäuren. (c) Einpassen eines kleinen Moleküls in die Bindungstasche eines Enzyms. Die Formen der Bindungstasche und des Moleküls sind so aufeinander abgestimmt, dass die Anziehungskräfte durch die Wasserstoffbrücken optimiert werden. Die Situation gleicht der Passung eines Schlüssels zu „seinem“ Schloss, man spricht daher von molekularen Schlüssel-Schloss-Kräften. Der rechte Ausschnitt zeigt Details der zwischenmolekularen Bindung.

Schloss, man spricht daher auch von molekularen „Schlüssel-und-Schloss“-Kräften (siehe Kapitel 8). Die genaue Form der Bindungstasche ist durch die Art und die Anordnung der Aminosäuren in dem Enzym bestimmt, die wiederum in den Genen festgelegt ist. Kleinste Änderungen der Struktur des Enzyms, die durch Einbau einer einzigen falschen Aminosäure (Punktmutation genannt) entstehen, können fatale Folgen für die Funktion unseres Organismus haben und sind oft die Ursache chronischer Erkrankungen.

1.3.3 Der Muskel als Musterbeispiel der hierarchischen Struktur biologischer Materie

Hier betrachten wir die Fortbewegung der Lebewesen. Von eukaryotischen Zellen über Spermien bis zum Menschen dienen dazu molekulare Linearmotoren. Diese bestehen aus einem hebelartigen Motor (im Fall des Muskels Myosin) und einer Laufschiene (einem Aktinfilament, Abb. 1.6). Das Myosin ist selbst wieder ein modular aufgebautes Protein, das aus einem Funktionsteil (dem krafterzeugenden Arm) und einem der Assoziation mit

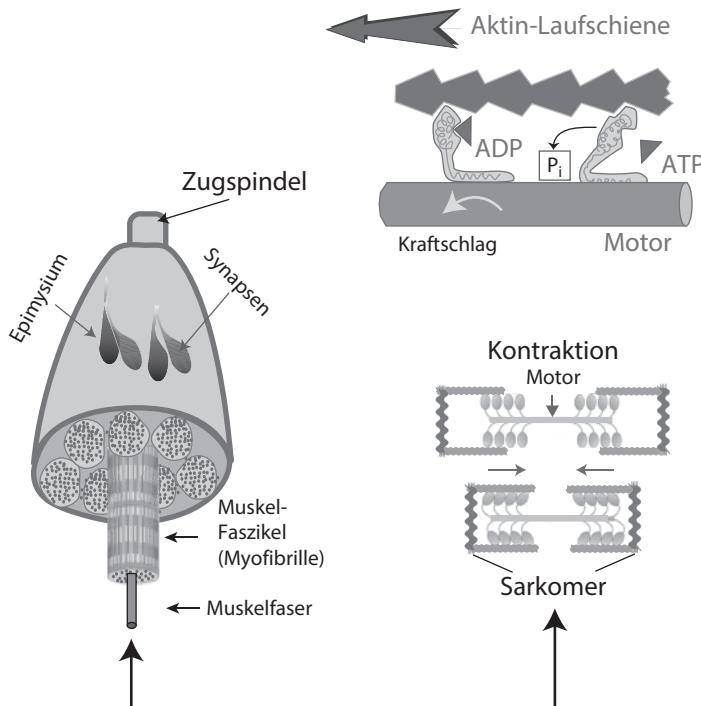


Abbildung 1.6 Ein Beispiel für den hierarchischen Aufbau lebender Materie. Linkes Bild: Vereinfachte Darstellung des hierarchischen Aufbaus eines Skelettmuskels aus Muskelfasern (s. auch erweiterte Darstellung in Abb. 20.8). Rechtes Bild unten: Aufbau der Sarkomere aus dem Motor Myosin und Aktinfilamenten als Laufschienen. Rechtes Bild oben: Myosin assoziiert spontan zu bipolaren Bündeln, aus denen die krafterzeugenden Arme herausragen (links vor und rechts nach dem Kraftschlag durch ATP-Hydrolyse). Die Regulation der Selbstorganisation der Myosin-2-Bündel wird in Kapitel 28 beschrieben. Die dicken Bündel des Myosins und die dünnen Aktinfilamente bilden die Sarkomere. Diese Elementarmotoren des Muskels lagern sich nach dem in Abb. 28.5 gezeigten Regelmechanismus zu den Mikrofibrillen des Skelettmuskels zusammen.

anderen Bausteinen dienenden Stamm besteht (Abb. 1.6b). Die molekulare Struktur dieser Domäne bestimmt die Funktion der Motoren. Durch Assoziation der Stämme entstehen einige Mikrometer lange, bipolare Bündel. Diese assoziieren mit den Aktinfilamenten zu den regelmäßig aufgebauten *Sarkomeren*, die sich schließlich zu den Muskelfasern unserer Skelettmuskeln zusammenlagern. In den Zellen (wie den unsrigen Blutgefäßen umschließenden glatten Muskelzellen) organisieren sich die beiden Komponenten zu weniger regelmäßig aufgebauten Mikromuskeln.

1.3.4 Biomineralisierung als Prototyp der Selbstorganisation biologischer Materie

Ein gewaltiger Schritt auf dem Weg zur Evolution höherer Lebensformen war die Bildung mechanisch robuster Materialien mit außergewöhnlichen elastischen Eigenschaften durch den Prozess der Biomineralisierung. Sie begann vor rund 500 Millionen Jahren (im Kambrium) mit der Evolution der Weichtiere wie der Mollusken und führte vor rund 300 Millionen Jahren durch die Evolution der Knochen zur Entwicklung der landlebenden

Wirbeltiere (*Vertebraten*). Die Biomineralien erzeugenden Weichtiere formten durch die Schaffung von Korallenriffen und Muschelkalkgebirgen die Erde. Manche Spezies wie die Kalkalgen *Emiliania huxleyi* spielen auch heute noch eine entscheidende Rolle für die Verteilung des CO_2 in den Weltmeeren und den CO_2 -Haushalt der Erde.

Abbildung 1.7a zeigt als Beispiel die Schale einer Muschel. Diese besteht aus einer lederartigen Außenhaut (dem *Periostracum*), deren Innenseite mit einer Schicht aus mikroskopisch kleinen kristallinen Plättchen aus Aragonit ausgekleidet ist, einer metastabilen kristallinen Modifikation des Calciumcarbonats (CaCO_3). Dieses Mineral bildet in übersättigter wässriger Lösung nadelförmige Kristalle (Calcit oder Aragonit), aus denen sich durch Sintern eine Art Keramik herstellen ließe. Da solche Materialien sehr brüchig sind, verfiel die Natur auf den Trick, ein Verbundmaterial aus organischen Polymeren und anorganischen Kristallen zu verwenden. Der schichtartige Aufbau aus hexagonalen Plättchen ($10 \cdot 10 \cdot 0,5 \mu\text{m}^3$) und deren Trennung durch einige 10 nm dicke Filme aus Biopolymeren (vorwiegend Chitin und Seide) verleiht dem Verbundmaterial außergewöhnliche mechanische Eigenschaften wie hohe Dehnbarkeit und Duktilität. Wir werden im Kapitel 23 zeigen, weshalb Materialien aus Polymeren und nanoskopischen Bausteinen (Nanokomposite) extrem bruchfest sind.

Die Bildung solcher Verbundmaterialien aus Nanokompositen ist außerordentlich trickreich, da Nukleation und Wachstum von Kristallen definierter Morphologie und Größe durch zahlreiche schwer kontrollierbare Faktoren bestimmt sind. Dies gilt besonders für die Kristallisation in begrenzen Räumen, da sowohl die Keimbildung als auch das

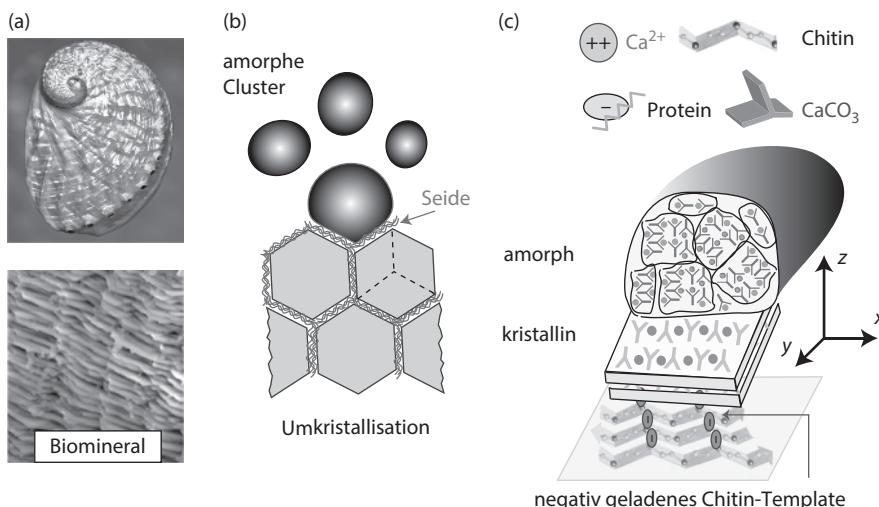


Abbildung 1.7 (a) Abalone und Nanokristalle aus Perlmutt (mit freundlicher Genehmigung von I. Weiss). (b) Prinzip der Steuerung der Kristallmodifikation durch das Prinzip der Fest-fest-Benetzung. (c) Bildung flacher Kristallite ($10 \cdot 10 \cdot 0,5 \mu\text{m}^3$) von Aragonit auf dünnen Schichten aus negativ geladenem Chitin. Die Größe der Kristallite wird durch die Bildung einer dünnen Schicht aus Seide reguliert. Durch Bindung stark negativ geladener Proteine an Chitin wird das Wachstum der Aragonitmodifikation bevorzugt. Wahrscheinlich erfolgt die Bildung der Nanoplättchen durch Umkristallisation der amorphen CaCO_3 -Phase an der funktionalisierten Chitin-Oberfläche. (Nach E. Sackmann, Lecture Note „Biomineralisierung“, www.biophy.de).

Kristallwachstum bevorzugt an Oberflächen erfolgen und durch die Benetzungseigenschaften der Oberfläche bestimmt sind. Die Natur löste das Problem durch Wachstum der Aragonitkristalle auf ultradünnen Schichten aus Chitin, an die negativ geladene Proteine gekoppelt sind. Diese spielen eine zentrale Rolle für die Bildung der Aragonitplättchen.

Nach unserem derzeitigen Verständnis bilden sich die Plättchen durch Umkristallisieren einer amorphen und wasserreichen Modifikation von CaCO_3 . Der Grund für dieses komplexe Verfahren liegt in der außergewöhnlichen (und noch weitgehend unverstandenen) Physik des Kristallwachstums, wie wir in *Abb. 1.7* kurz und in *Kapitel 23* ausführlicher begründen werden [11, 12].³⁰

Steuerung der Biomineralisierung durch Fest-fest-Benetzung

Zur Herstellung plattenförmiger Nanokristalle nutzt die Natur die Physik des Kristallwachstums in begrenzen Räumen aus. In diesen bildet sich bevorzugt diejenige Kristallmodifikation, welche die Oberfläche am besten benetzt. Damit sich Aragonitplättchen anstelle von nadelförmigem Calciumcarbonat bilden, ist die Oberfläche der Wachstumszonen der Biomaterialien von negativ geladenen Chitinschichten bedeckt.

In *Kapitel 23* werden wir das Prinzip der Festkörperbenetzung ausführlicher diskutieren, dort am Beispiel der Bildung von Röhrenknochen in Kollagenmatrizen.

Obwohl Biomineralien nur wenige Prozent an bio-organischem Material enthalten, sind sie um ein Vielfaches dehnbarer und resistenter gegen Bruch als technische Keramiken. Wie wir in *Kapitel 23* sehen werden, ist die mechanische Robustheit im Aufbau der Muschelschalen und Knochen aus langgestreckten Nanokristallplättchen sowie dem Skalengesetz der Bruchfestigkeit begründet.

1.3.5 Skalengesetze der Physik als Konstruktionsprinzip

Als Kind ist man von dem Gedanken begeistert, dass auf dem Mond viel größere Menschen und Tiere leben könnten als auf der Erde. In der Schule lernt man dann, dass es an der Schwerkraft liegt, aber versteht nicht, warum. Tatsächlich ist dies ein sehr einfaches, aber lehrreiches Beispiel dafür, dass die Grenzen des Wachstums nicht durch die Genetik, sondern durch Skalengesetze der Physik bestimmt sind. Dies hat uns schon Galileo Galilei³¹ am Beispiel der Grenzen des Größenwachstums der Tiere gezeigt (*Abb. 1.8*).

Bei einer Vergrößerung der Dimension L eines Wirbeltieres um den Faktor λ nimmt dessen Gewicht mit der dritten Potenz, die Querschnittsfläche der Knochen aber nur mit dem Quadrat des Faktors λ zu. Unter der Annahme, dass sich Knochen wie elastische Stäbe verhalten, wächst deren mechanische Stabilität etwa mit λ^2 . Der Knochendurchmesser müsste daher etwa mit $\lambda^{3/2}$ steigen, um die mechanische Stabilität des größeren Lebewesens zu gewährleisten.

Zum Beweis seiner These zeigte er, dass die auf dieselbe Länge normierte Dicke der Beinknochen von Gazellen um mehr als einen Faktor zwei kleiner ist als die von Bisons. Ein Ausweg wäre gewesen, stabileres Knochenmaterial zu entwickeln, aber dazu war die Evolution schon zu weit fortgeschritten. Eine wichtige Rolle spielten die Skalengesetze der

³⁰ Ein ausführlicheres Modell der Kontrolle des Kristallwachstums findet man in E. Sackmann, *Lecture Note „Biomineralisation“*, frei zugänglich unter www.biophys.de.

³¹ Galileo Galilei (* 15. Februar 1564 in Pisa; † 8. Januar 1642 in Arcetri) war ein italienischer Mathematiker, Physiker und Astronom.

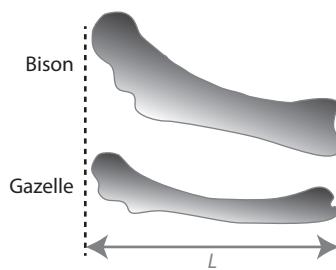
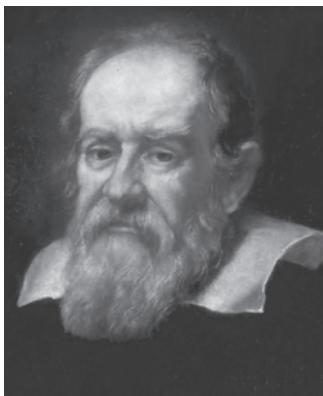


Abbildung 1.8 Links: Galileo Galilei. Rechts: Zum Skalengesetz und zu den Grenzen des Größenwachstums der Wirbeltiere. Abgebildet sind die auf dieselbe Länge normierten Beinknochen eines Bisons (≈ 800 kg) und einer Gazelle (≈ 80 kg). Das Größenverhältnis ist $\lambda \approx 2$, während sich die auf gleiche Länge normierten Knochendicken wie 2:1 verhalten. Die erforderliche höhere Stabilität wird also durch Änderung der Proportionen erreicht.

Hydrodynamik bei der Evolution der Mechanismen des Schwimmens beim Übergang von Einzellern zu Fischen, wie wir in *Kapitel 22* sehen werden.

1.3.6 Die Natur als Konstrukteur

Die Skalengesetze haben die Evolution nicht nur behindert, sondern sie wurden von der Natur auch ausgenutzt, um erstaunliche Fähigkeiten der Tiere und Pflanzen zu entwickeln.

Wir mögen Fliegen nicht, aber wir beneiden sie um ihre Fähigkeit, die Wände hoch oder an der Decke entlang zu laufen. Noch beeindruckender ist diese Fähigkeit bei Eidechsen oder den mehreren 10 cm langen Geckos. Auch hier haben Sie sich sicherlich schon gefragt, wie die Tiere das machen und ob man dies nicht auch lernen könnte. Erstaunlicherweise wird die Haftung der Füße auf der Oberfläche durch unspezifische Van-der-Waals-Kräfte³² vermittelt, die auch für die Kohäsionskräfte zwischen Molekülen verantwortlich sind. Um zu verstehen, wie die Natur es schafft, durch diese schwachen Kräfte relativ große Tiere festzuhalten, vergleichen wir die Fußsohlen verschiedener Tiere wie Fliegen, Spinnen oder Geckos mit unseren. Während letztere glatt sind, besitzen die der Insekten und Echsen viele kleine Borsten (sogenannte *Setae*). Diese bestehen aus Keratin, sind an der Spitze verbreitert und besitzen eine glatte Oberfläche (Abb. 1.9). Der Vergleich der verschiedenen Tiere zeigt: Je größer die Masse, umso dünner und dichter angeordnet sind die Füßchen. Es gilt das folgende empirische Skalengesetz zwischen der Zahl der Borsten pro Fläche (der Borsendichte n) und der Masse m des Tiers [13]:

$$n = \text{Konstante} \cdot m^{2/3}. \quad (1.1)$$

Das ist ein interessantes Ergebnis. Es besagt: Während die Fliege (mit 80 Milligramm Gewicht) mit 10^5 Borsten pro mm^2 auskommt, benötigen Geckos mit ihrem 1000-mal

³² Benannt nach Johannes Diderik van der Waals (* 23. November 1837 in Leiden; † 8. März 1923 in Amsterdam), einem niederländischen Physiker.

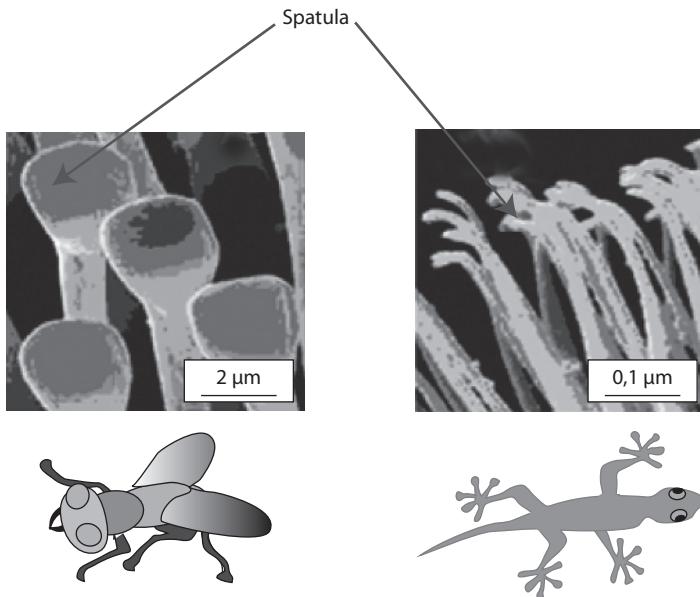


Abbildung 1.9 Vergleich der Setae einer Fliege und eines Geckos. Man beachte, dass die Enden der Spatulae in beiden Fällen etwas aufgeweitet sind und eine sehr glatte Oberfläche besitzen (modifiziert nach [13]).

größeren Gewicht einige 10^7 Borsten pro mm^2 . Wie kann man dieses Skalengesetz verstehen?

Man kann das Skalengesetz *Gl. (1.1)* auf der Grundlage des berühmten JKR-Modells von Johnson, Kendall und Roberts über die Adhäsion von deformierbaren elastischen Stempeln auf Unterlagen verstehen. Die wichtigste Aussage dieser Theorie ist, dass die Haftkraft proportional zum Radius R der Stempel ist. Wenn wir also z. B. den Fuß bei konstanter Gesamtfläche in N Stempel mit um \sqrt{N} kleinerem Radius aufteilen, so erhöht sich die Haftkraft um den Faktor $N^{1/2}$, falls die Gesamtfläche erhalten bleibt.

Um diese Aussage der Theorie zu verstehen, nehmen wir an, die Enden der zylinderförmigen Setae seien Kugelkappen mit Radius R (d. h. R ist auch gleich dem Zylindradius). Werden diese mit der Schwerkraft $F_S = mg$ auf die Unterlage gedrückt, so werden die Spitzen der Borsten abgeflacht und bilden eine Kontaktfläche mit dem Radius a . Nach dem berühmten Hertz-Modell der Deformation von Festkörperoberflächen durch solche Stempel hängt der Radius der Kontaktfläche nur schwach von der Kraft F ab,

$$a \approx \sqrt[3]{RE^{-1}F}. \quad (1.2)$$

wobei E der Young-Modul der Borsten ist. Wird die Schwerkraft durch die Adhäsion verstärkt, so erhöht sich die Kontaktfläche etwas. Vernachlässigen wir diesen Effekt, so ist der Gewinn an Adhäsionsenergie $W_{\text{ad}} \approx -\pi a^2 \Gamma$ wobei Γ gleich dem Gewinn an spezifischer Oberflächenenergie (in J/m^2) ist. Daraus folgt für die Entbindungskraft $F^* = \delta W_{\text{ad}} / \delta h$, wobei δh die durch die Kraft erzwungene Deformation der Kugel in Richtung der

Normalen darstellt. Nun besteht die bekannte geometrische Beziehung zwischen δh und der Kontaktfläche (πa^2) der Kugelkappe: $\delta h \approx a^2/2R$, daher wird die Entbindungskraft

$$F^* = \frac{\delta W_{\text{ad}}}{\delta h} = 2\pi \Gamma R. \quad (1.3)$$

Dieses Ergebnis stimmt bis auf den Faktor 3/2 mit der strengen Johnson-Kendall-Roberts-Theorie überein. Man kann mit einiger Mühe auch zeigen, dass die Entbindungskraft für Borsten mit sphärischen Kappen mit $m^{2/3}$ zunimmt, in guter Übereinstimmung mit der Beobachtung (Gl. (1.1)). Der interessierte Leser wird auf die Originalarbeit verwiesen [13] und wird ermutigt, die lehrreiche *Aufgabe 1.3* lösen.

Von generellem Interesse ist der Befund, dass die durch äußere Kräfte vermittelte Kontaktwechselwirkung zwischen festen Körpern wesentlich durch deren elastische Deformation bestimmt wird. Dieser Effekt bestimmt die Haftreibung zwischen festen Körpern (z. B. zwischen den Autoreifen und der Straße) und spielt so eine wichtige Rolle in unserem täglichen Leben und in der Technik. Wie wir in *Kapitel 13* sehen werden, bestimmt derselbe Zusammenhang auch die Haftung zwischen Zellen.

Natürlich gibt es derzeit viele Bemühungen, den Trick der Geckos für technische Zwecke auszunutzen, beispielsweise zum Bau von Robotern, die senkrecht die Wände hochfahren können. Ein Traum wäre natürlich auch, Schuhe für Menschen bauen zu können, die uns die Fähigkeit der Geckos verleihen. Nach der obigen Formel müsste die Zahl bzw. die Flächendichte der Setae dazu etwa nochmals um einen Faktor 1 000 größer werden als beim Gecko, was kaum möglich erscheint. Ein Hoffnungsschimmer ist jedoch, dass die Geckos bei jedem Schritt mit weniger als einem Prozent ihrer Füßchen die Oberfläche kontaktieren müssen, um sich festzuhalten.

Besonders eindrucksvolle Beispiele der Evolution smarter natürlicher Materialien und Systeme findet man bei Tieren, die unter extremen Bedingungen leben, beispielsweise in der Wüste. Biologen und Ingenieure sind derzeit besonders vom Beispiel bestimmter Arten von Skinken (Glattechsen) fasziniert, die auch unter der einprägsamen Bezeichnung *Sandfische* bekannt sind (Abb. 1.10). Dabei handelt es sich um verschiedene Eidechsen, die bei Gefahr im Sand untertauchen und sich mit Geschwindigkeiten von bis zu $v \approx 0,1 \text{ m/s}$ (0,36 km/h) durch den Sand schlängeln können. Die Tiere bewegen sich, indem sie mit ihrem Körper Biegewellen erzeugen, die vom Kopf zum Schwanz laufen; die Physik hinter dieser Antriebsart werden wir in *Kapitel 22* kennenlernen. Die Materialforscher beschäftigt dabei vor allem die Frage, welche Tricks die Natur benutzt, um den Verschleiß (die Abrasion) der Oberfläche beim „Schwimmen“ im Sand zu minimieren. Tatsächlich ist die Abrasion der Sandfischhaut bei der Behandlung mit einem Sandstrahlgebläse geringer als die von Stahl [14, 15]. Dies ist offenbar auf die geringe dynamische Reibung zwischen den Sandkörnern und der Haut zurückzuführen. Die Außenhaut der Tiere (auch Oberhäutchen genannt) ist mit einer dünnen Schicht aus β -Keratin bedeckt. Diese Proteinfilamente enthalten hohe Anteile an Prolin, Glycin und Cystein und bilden die Grundsubstanz der Haare und der Haut von uns Menschen, aber z. B. auch von Schlangen.

Es konnte gezeigt werden, dass nicht in erster Linie die kammartigen Auswüchse für die erstaunliche Reibungsminderung verantwortlich sind, sondern vor allem die Polymerenschicht aus β -Keratin, an das Mannose-Oligomere angedockt sind [16].

Reibungsminderung und die Reduktion der Van-der-Waals-Kräfte durch Polymerenschichten sind wiederkehrende Themen der Evolution. Erwähnenswert sind in diesem

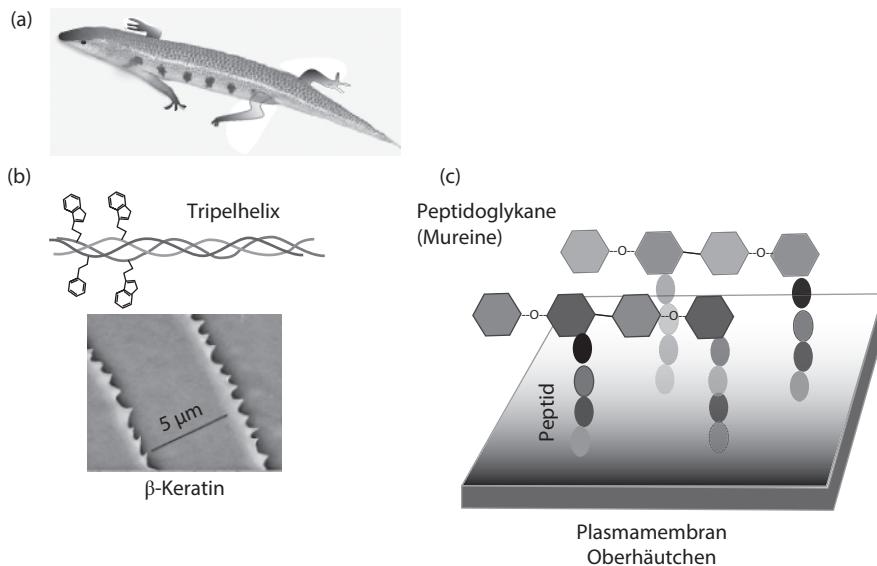


Abbildung 1.10 (a) Bild eines Sandfischs der Art *Scincus albifasciatus*, nach [14]. (b) Das Oberhäutchen der Hülle besteht aus β -Keratin, einem Vertreter der Intermediärfilamente, der in Kapitel 26 genauer beschrieben wird. Darunter das Oberflächenprofil des Oberhäutchens mit Anordnungen von 250 nm hohen Kämme. Der Abstand der Kämme ist mit 5 µm etwa 100-mal kleiner als der mittlere Durchmesser der Sandkörner der Sahara ($\approx 0,3$ mm). (c) Die Oberfläche des Oberhäutchens ist mit Filamenten aus elektrisch geladenen Oligosacchariden noch unbekannter Struktur bedeckt. Die β -Keratine sind dazu mit Mannoseoligomeren verstärkt.

Zusammenhang auch unsere Gelenke, die ständig Drücken von ≈ 5 MPa ausgesetzt sind. Die Oberflächen der Knochen sind mit Schichten des Glykoproteins Lubricin bedeckt. Die etwa 200 nm langen Filamente sind an die organische Knochensubstanz Kollagen gekoppelt. Es besteht also eine gewisse strukturelle Analogie zwischen den Oberflächen unserer Gelenkknochen und der der Sandfische. Diese zeigt, dass die Natur ein einmal gefundenes physikalisches Konzept zur Optimierung der Materialeigenschaften immer wieder anwendet. Die Effizienz dieses Konzepts der Reibungsunterdrückung zeigt folgende Betrachtung.

Der Druck auf den Rücken der Sandfische (mit einer mittleren Dichte von $1,6$ g cm $^{-3}$) beträgt etwa $p \approx 1\,600$ Pa. Wenn wir annehmen, dass die Oligosaccharidketten sich wie semiflexible Polymere verhalten, dann können wir die Wechselwirkung der Haut mit den Sandkörnern durch das Dolan-Edwards-Potential beschreiben:

$$V_{\text{rep}}(h, R_g) \approx k_B T \rho_0 \left(\frac{R_g}{h} \right)^2 \exp \left[-\frac{3}{2} \left(\frac{h}{R_g} \right)^2 \right], \quad (1.4)$$

wobei R_g der Trägheitsradius ist und ρ_0 die laterale Dichte der Haare. Wir werden diese Näherungsformel in Kapitel 13 noch genauer kennenlernen. Eine einfache Abschätzung zeigt, dass der repulsive Druck im Abstand $d \approx R_g \approx 10$ nm ausreicht, um den Druck des Sands in 10 cm Tiefe zu kompensieren [14]. Inzwischen gibt es vielversprechende Bemühungen, künstliche Roboter zu bauen, die sich wie Sandfische im Sand bewegen [17]. Wie das geht, werden wir in Kapitel 22 untersuchen.

Literatur

- 1 Fratzl F. (2002) Von Knochen, Holz und Zähnen. *Phys. J.* **1**, 49–55.
- 2 Fromherz P. (2001) Interfacing von Nervenzellen und Halbleiterchips. *Phys. Bl.* **57**, 43–48.
- 3 Sackmann E. (1996) Supported membranes: scientific and practical applications. *Science* **271**, 43–48.
- 4 Kulesa P., Fraser S. (2002) Cell dynamics during somite boundary formation revealed by time-lapse analysis. *Science* **298**, 991–995.
- 5 Van Hemmen L. (2001): Die Karte im Kopf: Wie stellt das Gehirn seine Umwelt dar? *Phys. J.* **57**, 37–42.
- 6 Schrödinger E. (1999) *Was ist Leben*. Piper, München, Zürich.
- 7 von Helmholtz H. (1983) *Über die Erhaltung der Kraft*. Physik-Verlag, Weinheim.
- 8 Hänggi P., Marchesoni F. (2005) 100 years of Brownian motion. *Chaos* **15**, 026101.
- 9 Mach E. (1933) *Die Mechanik*. Brockhaus, Wiesbaden; Nachdruck Wissenschaftliche Buchgesellschaft Darmstadt.
- 10 Mayr E. (1984) *Die Entwicklung der biologischen Gedankenwelt*. Springer, Berlin, Heidelberg, New York.
- 11 Addadi L. et al. (2005) Mollusk shell formation: a source of new concepts for understanding biomineralization processes. *Chem. Eur. J.* **11**, 980–987.
- 12 Weiss I. M. et al. (2013) On the function of chitin synthase extracellular domains in biomineralization. *J. Struct. Biol.* **183**, 216–225.
- 13 Arzt E., Gorb S., Spolenak R. (2003) From micro to nano contacts in biological attachment devices. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **100**, 10603–10606.
- 14 Sackmann E. (2013) Biomimetic physics: learning from nature's strategies of overcoming evolutionary crises. *Int. J. Nanotechnol.* **10**, 376–389.
- 15 Rechenberg I. (2009) Tribologie im Dünensand – Sandfisch, Sandboa und Sandschleiche als Vorbild für die Reibungs- und Verschleißminderung. Schlussbericht, BMBF-Förderkennzeichen 0311967A.
- 16 Baumgartner W. et al. (2007) The Sandfish's Skin: Morphology, Chemistry and Reconstruction. *J. Bionic Eng.* **4**, 1–9.
- 17 Maladen R. D. et al. (2011) Undulatory swimming in sand: experimental and simulation studies of a robotic sandfish. *Int. J. Robotics Res.* **30**, 793–804.

