

Grüne und nachhaltige nanotribologische Systeme im Rahmen der globalen Herausforderungen

3

I. C. Gebeshuber

Tribologie

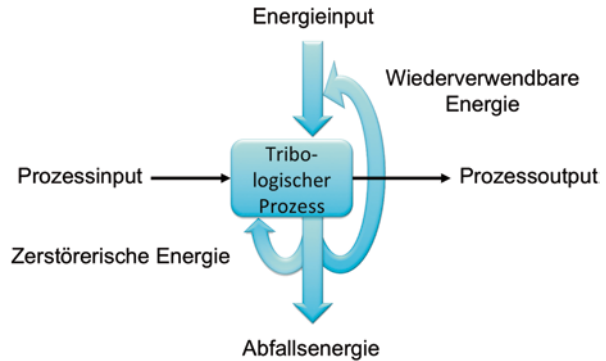
Tribologie ist die Lehre von Reibung, Schmierung und Verschleiß. Immer, wenn wir es mit interagierenden Oberflächen, die in relativer Bewegung zueinander sind, zu tun haben, geschehen tribologische Phänomene. So zum Beispiel in Motoren, bei der Interaktion vom Autoreifen mit der Straße, beim Schreiben mit Kreide auf der Tafel, oder wenn wir mit den Augen blinzeln. Es gibt im deutschsprachigen Raum mehrere Zentren für Tribologie, so zum Beispiel das Österreichische Kompetenzzentrum für Tribologie in Wiener Neustadt (AC²T research Ges.m. b. H) oder das MikroTribologie Centrum in Deutschland, eine gemeinsame Initiative des Fraunhofer-Instituts für Werkstoffmechanik und des Instituts für Angewandte Materialien des Karlsruher Instituts für Technologie. In tribologischen Forschungen werden die Ursachen von tribologischen Phänomenen erforscht und Erklärungsmodelle erstellt, die bessere tribologische Eigenschaften ermöglichen sollen (z. B. Entwicklung von Schmierstoffen, von Schmierstoffzusätzen, von strukturierten Oberflächen zur Optimierung von Laufeigenschaften oder von Hartstoffbeschichtungen für die Werkzeugindustrie). Tribologie ist eine Systemwissenschaft, bei der der Triboprozess (Abb. 3.1) eingebettet in seine Umwelt und die zeitliche Entwicklung verstanden werden muss (Tribosystem). Durch optimierte tribologische Eigenschaften wird die

I. C. Gebeshuber (✉)

Institute of Microengineering and Nanoelectronics, Universiti Kebangsaan Malaysia,
UKM Bangi, 43600 Bangi, Selangor, Malaysia
E-Mail: gebeshuber@iap.tuwien.ac.at, ille.gebeshuber@mac.com

Österreichisches Kompetenzzentrum für Tribologie, Viktor Kaplan-Straße 2,
2700 Wiener Neustadt, Niederösterreich, Österreich

Institut für Angewandte Physik, Technische Universität Wien, Wiedner Hauptstraße 8–10/134,
1040 Wien, Österreich

Abb. 3.1 Tribosystem

Lebensdauer von Maschinen und Anlagen verlängert, deren Sicherheit und Zuverlässigkeit wird erhöht und es werden Energie und Rohstoffe gespart. Die wichtigsten Optimierungshebel in der Tribologie sind in den Bereichen Einlauf, Werkstoffauswahl, Endbearbeitung und Additivierung zu finden (Tab. 3.1, Quelle: Scherge und Dienwiebel 2010).

Grüne (Nano-)Tribologie

Der Begriff „Grüne Tribologie“ wurde im Juni 2009 von Si-wei Zhang, dem ehemaligen Vorsitzenden der chinesischen Gesellschaft für Tribologie, geprägt und als internationales Konzept eingeführt. Grüne Tribologie ist die Wissenschaft und Technologie tribologischer Aspekte des ökologischen Gleichgewichts und der Auswirkungen auf Umwelt und belebte Natur. Ihre Hauptziele sind die Einsparung von Energie und Materialien und die Verbesserung der Umwelt und der Lebensqualität (Jost 2009 in Anonymous 2010).

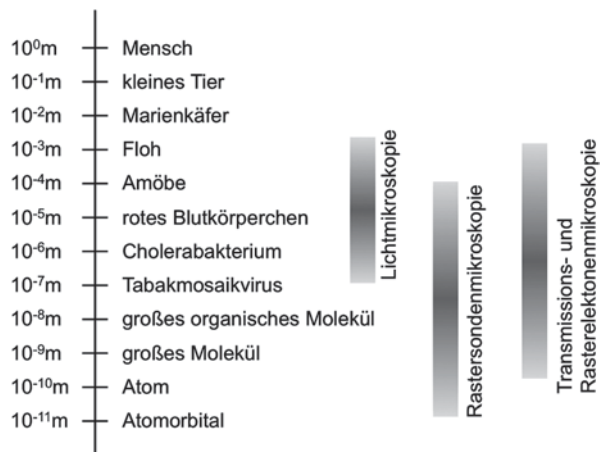
Wir brauchen grüne Tribologie aufgrund aktueller Bedürfnisse in Bezug auf Energie, Rohstoffe und Lebensmittel (Nosonovsky und Bhushan 2011). Ein Fokus auf Tribologie könnte eine Atempause geben, während umfassendere Lösungen für Umweltprobleme angegangen werden (Jost 2009 in Anonymous 2010). Tribologie muss in Einklang mit den wichtigsten weltweiten Richtlinien in Bezug auf Umwelt und Energie sein. Für Großbritannien wurde berechnet, dass die wirtschaftlichen Vorteile aus optimierten tribologischen Anwendungen 8–10 Mrd. Pfund ausmachen. 60 bis 70% davon sind mit Energie verbunden (Jost 2009 in Anonymous 2010).

Tribologie umfasst alle Längenskalen, von meterlangen Bauteilen in Maschinen bis zu einzelnen Molekülen (und sogar darunter, vgl. quantendynamische *ab initio* Berechnungen von Vernes et al. 2010). In diesem Kapitel konzentrieren wir uns auf nanotribologische Systeme (Längenskala funktionaler Elemente einige 10^{-9} m, also einige Nanometer). Neue Arten der Mikroskopie (besonders hervorzuheben ist die Rasterkraftmikroskopie, siehe z. B. Haugstad 2012) ermöglichen uns heutzutage Zugang zum Nanokosmos – und zwar nicht nur im Bereich der Bildgebung, sondern auch mit der Möglichkeit der Manipulation und Konstruktion auf kleinstem Maßstab (Abb. 3.2). Dies eröffnet völlig neue Möglichkeiten in Wissenschaft und Technik.

Tab. 3.1 Optimierungshebel in der Tribologie. (Scherge und Dienwiebel 2010)

Optimierungshebel	Kosten	Technische Anforderungen
Einlauf	Niedrig	Ausrüstung für kontinuierliche Reibungs- und Verschleißmessung
Werkstoffauswahl	Mittel	Kooperation mit Werkstoff- und Schichtentwicklern, Skalierung Labor → Produktion, Ausrüstung für physikalisch/chemische Analytik, Ausrüstung für kontinuierliche Reibungs- und Verschleißmessung
Endbearbeitung	Mittel	Gute Kooperation der Abteilungen Forschung → Vorentwicklung → Fertigung, Ausrüstung für kontinuierliche Reibungs- und Verschleißmessung
Additivierung	Hoch	Kooperation mit Additivherstellern, Großer Anteil an Grundlagenforschung, Kostenintensive Ausrüstung, Ausrüstung für kontinuierliche Reibungs- und Verschleißmessung

Abb. 3.2 Vom Makro- zum Nanokosmos. Neue Arten der Mikroskopie erlauben Visualisierung und aktive Interaktion auf sehr kleinen Längenskalen. Dadurch werden in der Nanotechnologie und insbesondere in nanotribologischen Systemen völlig neue Welten erschlossen



Grüne nanotribologische Systeme: Definition

Die Nanotribologie untersucht tribologisch interessante Materialien, Strukturen und Systeme mit Methoden der Nanotechnologie (z. B. hochauflösender Mikroskopie). Hauptkomponenten in nanotribologischen Systemen sind Nano-Oberflächen, Nanoagenten und Nanoprozesse. Tabelle 3.2 listet die Bestandteile nanotribologischer Systeme auf und bewertet ihre jeweilige Wichtigkeit auf dem Weg zu grünen nanotribologischen Systemen und der erfolgreichen Adressierung ausgewählter globaler Herausforderungen. Für grüne Nano-Oberflächen müssen Thematiken wie nanostrukturierte Oberflächen, hierarchische Oberflächen, Materialauswahl, beschichtete Materialien und monomolekulare Schmierstofflagen adressiert werden. Die

Tab. 3.2 Bestandteile nanotribologischer systeme

Kategorie	Wichtigkeit	Thematik
Nano-Oberflächen	Mittel	Nanostrukturierte Oberflächen, Hierarchische Oberflächen, Materialauswahl, Beschichtungen, Monomolekulare Schmierstofflagen
Nanoagenten	Hoch	Physikalische Eigenschaften, Chemische Eigenschaften, Auswirkungen auf Umwelt und Organismen, Zeitliche Veränderungen von Eigenschaften, Veränderungen von Eigenschaften im Triboprozess
Nanoprozesse	Mittel bis niedrig	Energieeffizienz, Anteile prozessrelevanter Energie, destruktiver Energie und Abfall- sowie wiederverwendbarer Energie, Effizienz der Wiederverwendung von Prozessenergie

Wichtigkeit von Nano-Oberflächen für grüne nanotribologische Systeme ist im mittleren Bereich. Von sehr hoher Bedeutung für grüne nanotribologische Systeme sind Nanoagenten (i.e., Additive, Reaktionsprodukte von Additiven mit anderen Substanzen und Nebenprodukte, die im System nach der technologischen Anwendung auftreten). Reaktionsprodukte (die schädlich sein können) müssen entweder nach dem Gebrauch chemisch inert sein oder in das System zur weiteren Verwendung zurückgeführt werden. Nicht benutzte Nanoagenten müssen entweder inert sein oder in die Reaktion zurückgeführt werden. Mögliche schädliche Nebenprodukte, die nichts mit den ursprünglichen Nanoagenten tun haben müssen, müssen entweder neutralisiert oder wiederverwendet werden. Biomimetische nanotribologische Systemen könnten helfen, den erfolgreichen Weg zu grünen nanotribologischen Systemen inspirierend zu begleiten. Aber es muss an dieser Stelle betont werden, dass Biomimetik nicht automatisch nachhaltige oder auch „nur“ umweltfreundliche Produkte ergibt (Gebeshuber et al. 2009a). Auf etwaige Nachhaltigkeitskonzepte muss in der Tribosystementwicklung bewusst gesondert eingegangen werden. Thematiken, die im Themenbereich Nanoagenten zu adressieren sind, beinhalten physikalische und chemische Eigenschaften, die Auswirkung auf Umwelt und Organismen und Veränderungen von Eigenschaften während der Triboprozesse. Bezüglich grüner Nanoprozesse sind die Thematiken, die adressiert werden müssen, im mittelwichtigen bis eher unwichtigen Bereich. Thematiken zur Bewältigung umfassen Energieeffizienz, Optimierung des Anteils prozessrelevanter Energie im Vergleich zu destruktiver Energie und Abfalls- sowie wiederverwendbare Energie und auch Wirksamkeit der Wiederverwendung von Prozessenergie (Gebeshuber 2012a).

Der erfolgreiche Weg zu einer grünen Tribologie bedeutet mehr als nur die Verwendung von nachhaltigen Additiven und kann von einem Blick auf die Biologie profitieren. Vor kurzem erst hat sich die Biologie von einer eher deskriptiven Wis-

senschaft zu einer Wissenschaft, die von Ingenieuren und Forschern aus den sogenannten „harten“ Wissenschaften in Bezug auf Konzepte, Ideen, Sprache und Ansätze (Gebeshuber und Majlis 2011; Gebeshuber und Drack 2008) verstanden werden kann, gewandelt. Ursprünglich war die Tribologie eher eine „schwarze Kunst“, die nur erfahrene Eingeweihte beherrschten, und die Biologie eher beschreibend (die Physiologie z. B. war in dieser Beziehung sehr bald schon eine Ausnahme, hier gibt es viel kausales Wissen). Inter- und transdisziplinäre Verbindungen zwischen den beiden Bereichen waren deswegen fast unmöglich, wegen des begrenzten kausalen Wissens und begrenzter kausaler Zusammenhänge in beiden Fachgebieten. Dies hat sich geändert. Heutzutage haben wir einen größeren Grundstock an kausalem Wissen (Gebeshuber et al. 2009) und damit ein vielversprechendes Überlappungsgebiet zwischen Tribologie und Biologie (Gebeshuber und Majlis 2010; Gebeshuber et al. 2009). Kausales Wissen bezeichnet Wissen, in dem die entsprechenden Naturgesetze erkannt sind und das daher für Erklärungen und Prognosen herangezogen werden kann. Voraussagbarkeit und/oder Berechenbarkeit auf Grundlage wissenschaftlichen Verständnisses sind Vorbedingungen für technische Anwendungen. Die Ziele der Wissenschaft sind zu erklären und zu verstehen und das Wissen zu organisieren. In der Biologie kommt kausales Wissen z. B. sehr häufig in der Physiologie vor. Ein Beispiel: Wir bekommen kalte Füße, wenn die Blutgefäße kontrahieren, weil nach den Gesetzen der Physik (Strömungsmechanik) weniger Blut durch diese Gefäße fließt.

Biomimetik ist das Gebiet, das sich mit dem Wissenstransfer von der Biologie zur Technik beschäftigt (und manchmal auch umgekehrt; Drack und Gebeshuber 2013). Biomimetik ist eine boomende Wissenschaft, die immer mehr Forscherinnen und Forscher, Publikationen und Aufmerksamkeit anzieht (Bar-Cohen 2005; Vincent et al. 2006; Kumar 2010). Otto Schmitt, der Erfinder des Schmitt-Triggers, hat dieses Gebiet im Jahr 1982 geprägt (Schmitt 1982). Einer der interessantesten Aspekte dieser interdisziplinären Wissenschaft ist die Vielfalt der Veröffentlichungskanäle. Die Autorin arbeitet zum Beispiel schon lange in der Biomimetik und hat im Bereich bioinspirierter nanotribologischer Systeme ihre Forschungsergebnisse in so verschiedenen Zeitschriften wie dem polnischen botanischen Journal (Tiffany et al. 2010), Nano Today (Gebeshuber 2007), den Proceedings der britischen Institution von Mechanikingenieuren (Gebeshuber und Crawford 2006) und dem Tribologiejournal von Maney Publishing, Großbritannien (Gebeshuber und Majlis 2010) veröffentlicht. Hierbei verbindet sie auch Wissenschaft und Kunst (Gebeshuber 2013a). Biologische Best-Practice-Systeme hinsichtlich nanotribologischer Systeme sind funktional und – in vielen Fällen – wunderschön (Abb. 3.3).

Der erfolgreiche Weg zu grünen nanotribologischen Systemen bedeutet mehr als nur die Verwendung von nachhaltigen Additiven (Gebeshuber 2012a). Tribologie ist eine Systemwissenschaft, bei der auch die Umwelt und die zeitliche Entwicklung mitberücksichtigt werden müssen.

„Grüne“ Kontrolle von Reibung, Verschleiß und Schmierung auf der Nanometerskala kann durch Berücksichtigung ökologischer Aspekte von nanoskaligen Schmierstoffschichten, Umweltaspekten der nanotechnologischen Oberflächenmodifizierungstechniken und nanotribologischen Aspekten „grüner“ Anwendungen

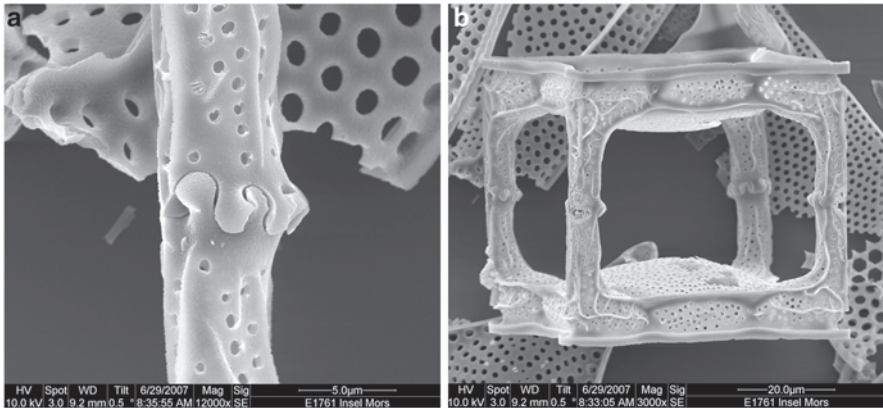


Abb. 3.3 Fossile Kieselalge – ein nanotribologisches Wunderwerk. Diese Kieselalge der Art *Solium exsculptum* lebte vor 45 Mio. Jahren auf der heutigen Insel Mors in Dänemark. Die vorliegende rasterelektronenmikroskopische Aufnahme dieser fossilen Kieselalge zeigt Verbindungsstrukturen mit verschiedensten mikromechanischen, u. a. auch tribologischen Optimierungen. **a** ist ein Zoom in die Verbindungsstruktur von **b** links hinten. Skalierungsbalken: 5 bzw. 20 µm. (© F. Hinz, Alfred Wegener Institut Bremerhaven, Deutschland. Bildwiedergabe mit Erlaubnis)

wie künstlicher Photosynthese erreicht werden. Fragen, die beim Weg zu grünen nanotribologischen Systemen angesprochen werden müssen, sind zum Beispiel (Gebeshuber 2012a):

- Werden die Prozesse mit den geplanten nanotribologischen Systemen (z. B. bessere Beschichtungen, weniger Verschleiß, weniger Haftreibung) „grüner“?
- Werden die Prozesse weniger „grün“ wegen begleitender chemischer Reaktionen?
- Sind die geplanten grünen nanotribologischen Systeme nur pseudo-grün, und in Wirklichkeit werden die negativen Auswirkungen auf die Umwelt und Organismen nur auf andere Ebenen übersetzt?

Die Verwendung neuer Technologien, Materialien und Geräte könnte Vorteile vergrößern, aber auch neue Probleme generieren. Exakte Ökobilanzberechnungen müssen durchgeführt werden, um pseudo-grüne Ansätze zu vermeiden. Ein Beispiel ist Biodiesel (Demirbas 2008): zwar werden keine fossilen Brennstoffe verbraucht, sondern ein nachwachsender Rohstoff. Allerdings kommt Biodiesel in vielen Fällen von Pflanzenölen, die auch der Mensch essen könnte. Technisch gesehen ist Biodiesel viel hygroscopischer (wasseranziehender) im Vergleich zu Diesel aus fossilen Brennstoffen, und wirkt dadurch auch eher korrosiv – was dementsprechende tribologische Nachteile mit sich bringt.

Als biomimetische Anregungen für das Design grüner nanotribologischer Systeme könnten z. B. die acht Grundregeln der Biokybernetik von Vester dienen (Vester 1999):

1. Negative Rückkopplung muss über positive Rückkopplung dominieren.
2. Die Systemfunktion muss unabhängig vom quantitativen Wachstum sein.
3. Das System muss funktionsorientiert und nicht produktorientiert arbeiten.
4. Nutzung vorhandener Kräfte nach dem Jiu-Jitsu-Prinzip statt Bekämpfung nach der Boxer-Methode.
5. Mehrfachnutzung von Produkten, Funktionen und Organisationsstrukturen.
6. Recycling. Nutzung von Kreisprozessen zur Abfall- und Abwasserverwertung.
7. Symbiose. Gegenseitige Nutzung von Verschiedenartigkeit durch Kopplung und Austausch.
8. Biologisches Design von Produkten, Verfahren und Organisationsformen durch Feedback-Planung.

Ziele effizienter grüner nanotribologischer Systeme

Die Ziele effektiver grüner nanotribologischer Systeme sind in drei Hauptbereichen: Produktion (Agenten), Reaktion (Agenten; Objekte zu Nanoprodukten; direkte Effekte von Abfallagenten) und der Lebenszyklus von Nanoprodukten (Auswirkungen auf die Umwelt während der Anwendung und während des Abbaus). Bei der Herstellung ist das Ziel minimale Verunreinigung, bei der Reaktion ist das Ziel, die Reaktion nur dort ablaufen zu lassen, wo sie benötigt wird und nicht darüber hinaus, und im Lebenszyklus muss darauf geachtet werden, minimalen Einfluss auf Stoffe und verbesserten Abbaueigenschaften sicherzustellen (z. B. über einen Zerfallsbeschleuniger) (Tab. 3.3).

Bioinspirierte Optimierungshebel in grünen nanotribologischen Systemen

Die vier Hauptoptimierungshebel in der Tribologie sind nach Scherge und Dienwiebel: Einlauf, Additive, Verarbeitung und Materialauswahl (Scherge und Dienwiebel 2010) (Tab. 3.1). In grünen nanotribologischen Systemen können alle diese vier Hebel adressiert werden (Gebeshuber 2012a) (Tab. 3.3):

Einlaufphase

Der Hauptvorteil biomimetischer grüner nanotribologischer Systeme kann im Bereich des Einlaufens gesehen werden. Unsere aktuellen technologischen Systeme und Geräte werden sequentiell produziert und benötigen eine Einlaufphase. Anders ist dies bei Organismen: Sie wachsen aus einer einzigen Zelle, und müssen eine Erstkonsolidierung überstehen. Im Gegensatz zum technischen Prozess des Einlaufens entspricht diese Erstkonsolidierung in Organismen einer Spitzenbelastung, die dazu beiträgt, die Funktion aufzubauen und die die Qualität steuert – entweder der Organismus überlebt oder eben nicht. Biologische Systeme haben vor allem weiche Materialien und ihre Schmierstoffe sind auf Wasserbasis (z. B. die Schmierflüssig-

Tab. 3.3 Ziele grüner nanotribologischer Systeme

Hauptziele grüner nanotribologischer Systeme		Wichtig-keit	Lösungen aus der belebten Natur
<i>Optimierte Energiebilanz des Systems</i>	Minimierung der destruktiven Energie	Mittel	Wasserbasierte Schmierstoffe, Sollbruchstellen, Reaktive Materialien, Struktur statt Material
	Schutz des Tribosystems vor zerstörerischen Konsequenzen	Hoch	Integrierte statt additiver Konstruktionen ^a , Optimierung des Ganzen statt Maximierung eines Einzelements ^a , Multifunktionalität statt Monofunktionalität ^a , Feinabstimmung gegenüber der Umwelt ^a , Energieeinsparung statt Energieverschleuderung ^a , Direkte und indirekte Nutzung der Sonnenenergie ^a , Zeitliche Limitierung statt unnötiger Haltbarkeit ^a , Totales Recycling statt Abfallanhäufung ^a , Vernetzung statt Linearität ^a , Entwicklung im Versuchs-Irrtums-Prozess ^a
	Wiederverwendung von Energie und Neutralisierung von Abfallenergie	Niedrig	Lebewesen
<i>Schutz der Umwelt vor Prozessrückständen</i>	Nichtverwendete Agenten	Niedrig	Wiederverwendung im Ökosystem
	Schadstoffe	Mittel	Biologische Abbaubarkeit, Abgeschlossene Räume für chemische Prozesse
	Prozesssicherheit und die Gefahren von Worst-Case-Szenarios	Hoch	Mit der Zeit hohe Entwicklung (Evolution)
<i>Umweltkosten des Prozesses selbst</i>	Aufwand die Agenten zu produzieren	Hoch	Optimierung (auf dem Systemlevel)
	Reinere Inputs (dafür aber mehr Abfall in der Herstellung derselben)	Mittel	Wasserbasierte Chemie, Zellorganellen als Nanofabriken, Abschirmung des Prozesses durch Membranen
	Verschiedene Skaleneffekte	Niedrig	Evolutionssprünge ^b , Säugetiere vs. Kaltblüter
<i>Erhaltung der Nanodiversität</i>		unbekannt	Additive in sehr geringer Konzentration gewährleisteten Nanodiversität Wiederverwendung desselben Basismaterials mit nur geringen Modifikationen für verschiedene Anwendungen

^a (Nachtigall 1997)^b (Szathmary und Maynard Smith 1994)

keit in den Gelenken oder der Schmierfilm im Auge zwischen Hornhaut und Lid). Lebewesen haben in vielen Fällen tribologische Eigenschaften die denjenigen von technischen Geräten weit überlegen sind, und können deswegen als Inspiration für neue tribologische Ansätze dienen. Als Beispiel sei die Schmierung von Synovialgelenken (Hüfte, Knie, Schulter) angesprochen, die effizientere Schmierstoffstrategien inspirieren kann (Gebeshuber 2007; Neville et al. 2007).

Additive

Beispiele für Additive in Schmierstoffen, die von Lebewesen produziert und verwendet werden, sind Proteine, z. B. im Schneckenschleim (welcher als Klebstoff und Schmiermittel fungiert) (Kobayashi et al. 2004) und in Fischschleim (welcher, neben anderen Funktionen, den Strömungswiderstand reduziert) (Jakowska 1963; Ling und Ling 1974; Daniel 1981) sowie in Synovialgelenken (Mansour 2003). Bioschmierstoffe sind wasserlöslich. Derzeit arbeiten verschiedenste Forschungsgruppen an der Entwicklung wasserlöslicher Schmierstoffe für technische Anwendungen (z. B. das V.A. Kargin Polymer Chemistry and Technology Research Institute und das Singapore Institute of Manufacturing Technology). Erstrebt Resultate sind Umweltverträglichkeit und verbesserte tribologische Eigenschaften.

Verarbeitung

Viele Biomaterialien haben Eigenschaften, die auch in der Technik wünschenswert sind: Sie sind komplex, multifunktional, hierarchisch und reagieren schnell und in den meisten Fällen ist Funktionalität auf der Nanometerskala mit Leistung im makroskopischen Bereich kombiniert. Viele Biomaterialien haben aufwendige Oberflächenstrukturen: derart „veredelte“ Tribo-Oberflächen sind Untersuchungsschwerpunkt in verschiedensten Forschungsnetzwerken, und es gibt viele akademische Arbeiten mit Beispielen biologischer „weicher“ Materie mit exzellenter Verarbeitung. Als Beispiele seien hierarchische Oberflächenstrukturen bis in den Nanobereich im Sandskink (Baumgartner et al. 2007), in der Schlangenhaut (Hazel et al. 1999) und an der Oberfläche des Säugetierauges (Davim 2013) genannt. Optimierte technische Oberflächen könnten vielleicht vielfach sogar ganz ohne Schmierstoffe auskommen. Dies wäre eine sehr elegante und innovative Lösung tribologischer Herausforderungen.

Materialauswahl

Beim Optimierungshebel „Materialauswahl“ ist zu beachten, dass in biologischen nanotribologischen Systemen die Korrelation von Struktur und Funktion sowie von Struktur und Werkstoff von fundamentaler Bedeutung ist. Im Gegensatz zur Technik, die viele verschiedene Materialien verwendet, finden in Organismen eher wenige Materialien Verwendung – diese sind jedoch für die jeweilige Anwendung auf meisterliche Art geringfügig modifiziert, wobei sie einen Mehrwert erhalten und verschiedene Funktionen erfüllen. Kollagen ist dafür ein wunderbares Beispiel: Es findet sich in unserer Haut, verantwortlich für deren Robustheit und Elastizität, in den Blutgefäßen, die es verstärkt, und in der Hornhaut und Linse des Auges – dort in kristalliner, durchsichtiger Form (Ramshaw et al. 1996). Weiters sind die in

Lebewesen verwendeten Materialien in vielen Fällen strukturiert, meistens sogar hierarchisch (Fratzl und Weinkamer 2007). Kieselalgen (Abb. 3.3) (Round et al. 1990) sind hervorragende Beispiele aus der Natur für tribologische Optimierung unter Bedingungen eingeschränkter Materialvielfalt (Gebeshuber et al. 2005; Gebeshuber und Crawford 2006).

Globale Herausforderungen

Im Jahr 2005 hat der US Amerikaner Jared Diamond sein Buch „Kollaps: Warum Gesellschaften überleben oder untergehen“ veröffentlicht (Diamond 2005). Diamond zeigt darin vier große Themenbereiche auf, die zum Zusammenbruch von Gesellschaften führen. Der erste Themenbereich umfasst Zerstörung und Verlust der natürlichen Ressourcen (z. B. die Zerstörung der natürlichen Lebensräume, Aquakulturen, Verlust der Artenvielfalt, Erosion und Beschädigung des Bodens), der zweite die Deckelung natürlicher Ressourcen (z. B. fossile Brennstoffe, Wasser, Photosynthese), der dritte Themenbereich umfasst schädliche Dinge, die wir produzieren und herumbewegen (z. B. toxische Chemikalien, nicht heimische Arten, Ozonloch) und der vierte Themenbereich umfasst Bevölkerungsfragen (z. B. Bevölkerungswachstum, Auswirkungen der Altersstruktur der Bevölkerung auf die Umwelt).

Die Welt braucht nüchterne Idealisten, die sich mit dem schlechtesten und dem besten in der Menschheit beschäftigen, und die Erfolgsstrategien schaffen und implementieren. (Jerome Glenn, Executive Summary 2012 State of the Future¹)

Seit 16 Jahren wird jährlich der State of the Future Report des Millennium Projektes der Vereinten Nationen veröffentlicht (mit wenigen Seiten in Druck und vielen tausenden von Seiten an Informationen auf CD). Das Millennium-Projekt, an dem 2500 Futuristen, Wissenschaftler, Entscheidungsträger und Business-Planer aus über 50 Ländern arbeiten, wurde im Jahr 1996 initiiert. Es verfügt über eine umfangreiche Webseite (<http://www.millennium-project.org>, link überprüft am 18. März 2014). Der State of the Future Report identifiziert und behandelt die fünfzehn größten globalen Herausforderungen für die Menschheit (Abb. 3.4) und erstellt einen Aktionsplan für die Welt (Glenn et al. 2012). Der Executive Summary des 2012 State of the Future Reports ist im Internet unter <http://www.millennium-project.org/millennium/SOF2012-English.pdf> (link überprüft am 18. März 2014) abzurufen.

¹ <http://www.millennium-project.org/millennium/SOF2012-English.pdf>.

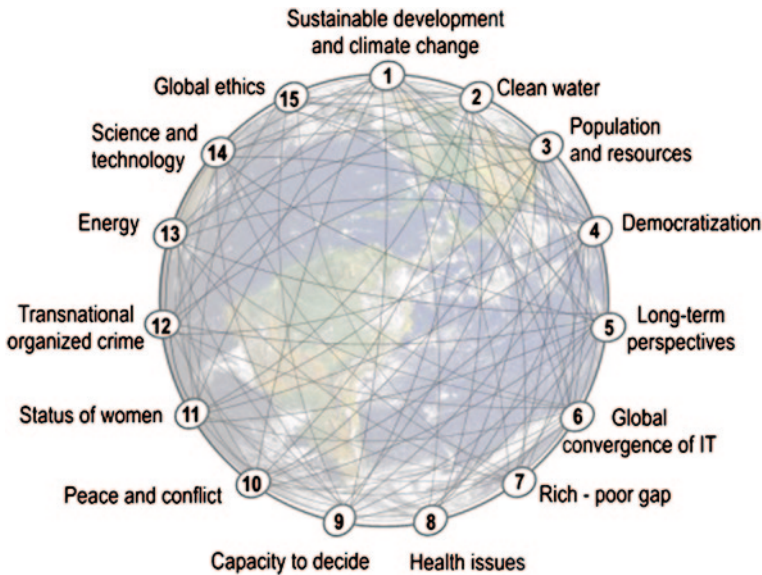


Abb. 3.4 Die 15 Globalen Herausforderungen der Menschheit gemäß Millennium Projekt. (Bildquelle: <http://www.millennium-project.org/millennium/images/15-GC.jpg> (link überprüft am 18. März 2014))

Die Globalen Herausforderungen gemäß dem UN Millennium Projekt

Seit Jahren sind die 15 globalen Herausforderungen, die im Millennium Projekt identifiziert werden, dieselben:

1. Wie kann nachhaltige Entwicklung für alle erreicht werden, mit gleichzeitiger Bewältigung des globalen Klimawandels?
2. Wie kann jeder genügend sauberes Wasser ohne Konflikt erhalten?
3. Wie können Bevölkerungswachstum und Ressourcen ins Gleichgewicht gebracht werden?
4. Wie kann echte Demokratie aus autoritären Regimen entstehen?
5. Wie kann Politik gemacht werden, die auch langfristige globale Perspektiven berücksichtigt?
6. Wie kann die globale Konvergenz von Informations- und Kommunikationstechnologien Arbeit für alle schaffen?
7. Wie kann ethische Marktwirtschaft dazu beitragen, die Kluft zwischen arm und reich zu verkleinern bzw. zu schließen?
8. Wie kann die Gefahr von neuen und wiederauftauchenden Krankheiten und immunen Mikroorganismen reduziert werden?
9. Wie kann in einer Zeit sich verändernder Arten der Arbeit und Institutionen die Kapazität zu entscheiden verbessert werden?

10. Wie können gemeinsame Werte und neue Sicherheitsstrategien ethnische Konflikte, Terrorismus und den Einsatz von Massenvernichtungswaffen reduzieren?
11. Wie kann der sich verändernde Status von Frauen zur Verbesserung der Lage der Menschheit beitragen?
12. Wie können grenzüberschreitende organisierte Kriminalitätsnetzwerke daran gehindert werden, immer mächtigere und hoch entwickelte globale Unternehmen zu werden?
13. Wie kann der wachsende Energiebedarf sicher und effizient erfüllt werden?
14. Wie können wissenschaftliche und technologische Durchbrüche beschleunigt werden, um die Bedingungen, unter denen Menschen leben, zu verbessern?
15. Wie können ethische Überlegungen routinemäßig in globale Entscheidungen eingebunden werden?

Wie nachfolgend näher ausgeführt wird, sind grüne nanotribologische Systeme – mit all ihren potentiellen positiven Auswirkungen – von besonderer Relevanz für Globale Herausforderung 13 (Energie) und Globale Herausforderung 14 (Wissenschaft und Technik).

Grüne nanotribologische Systeme und die Globale Herausforderung 13: Energie

Globale Herausforderung 13: Wie kann der wachsende Energiebedarf sicher und effizient erfüllt werden?

Die folgenden (übersetzten) Zitate aus der Webseite des Millennium Projektes in Bezug auf die Globale Herausforderung 13 (http://www.millennium-project.org/millennium/Global_Challenges/chall-13.html, link überprüft am 18. März 2014) mögen einen Einblick auf einige Punkte geben, die die Futuristen behandeln:

Investitionen in Alternativen zu fossilen Brennstoffen steigen auf der ganzen Welt rasant, um die projizierte 40–50 % Zunahme der Nachfrage bis 2035 zu erfüllen.

Allerdings wird ohne große Durchbrüche in der Technologie und in Verhaltensänderungen die Mehrheit der Energie der Menschheit im Jahr 2050 noch immer von fossilen Brennstoffen kommen.

China ist weltweit führend in Investitionen in erneuerbare Energien und Energieeffizienz. Verhaltensänderungen und Energieeinsparung können die Nachfrage verringern.

Gemäß dem Millennium Projekt wird die Globale Herausforderung 13 dann ernstzunehmend adressiert sein, wenn die gesamte Energieumwandlung aus umweltfreundlichen Prozessen fünf aufeinanderfolgende Jahre lang die aus anderen Quellen übertroffen hat, und wenn die atmosphärischen CO₂ Emissionen mindestens fünf Jahre lang gesunken sind.

Chancen: Beiträge grüner nanotribologischer Systeme, um den wachsenden Energiebedarf sicher und effizient zu erfüllen.

Eine der beiden von der Autorin identifizierten globalen Herausforderungen des Millenniums-Projekts, zu deren erfolgreicher Adressierung optimierte tribologi-

sche Systeme wesentlich beitragen könnten, ist Energie. Chancen bezüglich dieser Herausforderung bestehen in den Bereichen erneuerbare Kraftstoffe, Nutzung von Abwärme und anderer „Abfallenergie“ und effizientere Energieumwandlungssysteme. Bezüglich grüner nanotribologischer Systeme sind Energie-Management, Verschleiß-Management und selbstheilende Beschichtungen von hohem Potenzial.

Biokraftstoffe weisen noch immer große ungelöste tribologische Fragen auf, insbesondere in Bezug auf ihre hygroskopischen Eigenschaften und damit verbundene Absorption und/oder Adsorption von Wasser – dies führt zu mikrobiologischer Aktivität, Korrosion und Brennstoffinstabilität. Derartige Probleme müssen mit Tribologie auf allen Längenskalen adressiert werden. Weiters müssen unterdurchschnittlich gut funktionierende Energiesysteme, MEMS „Energieharvester“ (Energieerntemaschinen) und Windenergieanlagen tribologisch optimiert werden. Grüne nanotribologische Systeme können in all diesen Bereichen ihren Beitrag leisten.

Grüne nanotribologische Systeme und die Globale Herausforderung 14: Wissenschaft und Technologie

Globale Herausforderung 14: Wie können wissenschaftliche und technologische Durchbrüche beschleunigt werden, um die Bedingungen, unter denen Menschen leben, zu verbessern?

Die folgenden (übersetzten) Zitate aus der Webseite des Millennium Projektes in Bezug auf die globale Herausforderung 14 (http://www.millennium-project.org/millennium/Global_Challenges/chall-14.html, link überprüft am 19. März 2014) mögen einen Einblick geben auf einige Punkte, die die Futuristen behandeln:

Nanoroboter durchstreifen in Tests das Augeninnere, um Medikamente für Krankheiten wie altersbedingte Makuladegeneration auszuliefern. Schwärme von Fertigungsrobotern werden entwickelt, die in der Lage sein sollen, nanoskalige Bausteine für die Synthese neuartiger Materialien und Strukturen zu managen, sowie den Aufbau ihrer eigenen Komponenten, inklusive Selbstreplikation und -reparatur. Auf einem noch kleineren Maßstab wurden Nanometerroboter entwickelt, die in der Lage zu sein scheinen, sich mit natürlicher DNA zu verknüpfen. Nanoroboter in der Größe von Blutzellen können vielleicht eines Tages in den Körper eindringen, um Krankheiten zu diagnostizieren und Therapien und interne Bilder in virtueller Realität zur Verfügung zu stellen. Obwohl die Nanotechnologie außerordentliche Gewinne in der notwendigen Effizienz für eine nachhaltige Entwicklung verspricht, werden die ökologischen Auswirkungen auf die Gesundheit in Frage gestellt.

Computer können von gelähmten Menschen alleine durch ihre Gedanken gesteuert werden.

Einige Wissenschaftler sagen voraus, dass [...] der Large Hadron Collider [...] auch ein zweites Teilchen namens Higgs Singulett nachweisen kann. Dieses soll die Fähigkeit haben, in eine zusätzliche, fünfte Dimension zu springen, wo es sich entweder vorwärts oder rückwärts in der Zeit bewegen kann und in der Zukunft oder Vergangenheit wieder erscheinen kann.

Wir brauchen ein globales kollektives Informationssystem, das Fortschritte und Prognosen in Wissenschaft und Technologie mitverfolgt, deren Konsequenzen vorhersagt, und eine Reihe von Ansichten dokumentiert, sodass die Politiker und die Öffentlichkeit die möglichen Folgen neuer Wissenschaft und Technologie verstehen kann.

In den vergangenen fünf Jahren sind die chinesischen Patentanmeldungen um 500 % angestiegen; China investiert mehr in saubere Energietechnologien als die USA es tut und es hat das zweitgrößte Forschungs- und Entwicklungsbudget in der Welt. Asiatische Länder mit zweistelligem Wirtschaftswachstum haben auch ein zweistelliges Wachstum in Ausgaben für Forschung und Entwicklung. Energie und Umwelt sind der Schwerpunkt der US- chinesischen Beziehungen.

Russische Investitionen in Forschung und Entwicklung und in Unternehmen in der Nanotechnologie sind erheblich, sogar während der jüngsten Rezession.

Forschungsergebnisse von der US-amerikanischen Akademie der Wissenschaften, der US-amerikanischen nationalen Akademie der Ingenieurwissenschaften und dem medizinischen Institut stehen zum kostenlosen Download bereit. Das Massachusetts Institute of Technology macht 2 000 Kurse kostenlos online verfügbar – viele davon von den besten Kursen der Welt im Bereich Wissenschaft und Technologie – komplett mit Videos, Skripten und Referenzen.

Über 35 % der weltweiten Forschung und Entwicklung finden in den USA statt. Jede Woche macht das US-Patentamt Tausende von neuen Patenten online frei verfügbar.

Wissenschaftliche und technologische Durchbrüche müssen beschleunigt werden, um den Zustand der Menschheit zu verbessern. Wir haben derzeit ein großes Problem mit dem Management von Überinformation, und wie wir damit umgehen sollen. Ein weiteres Problem betrifft große Lücken zwischen Investoren, Innovatoren und Erfindern, in Bezug auf ihre Ziele und Visionen, Träume und Ansätze, Bonussysteme und Antriebsgründe (Abb. 3.5). Es besteht Bedarf nach neuen Wegen, prägnanten Visionen und Forscherinnen und Forschern, die das „big picture“ verstehen. Es besteht Bedarf an Fachleuten (Spezialisten), die durch Generalisten (an denen massiv Bedarf besteht, derartige Allrounder sind heutzutage selten) koordiniert werden.

Fragen, die adressiert werden müssen, sind zum Beispiel: Was nützt Wissenschaft, wenn die Arbeit der Wissenschaftler in Zeitschriften und Büchern verschwindet, und niemand dieses Wissen anwendet? Was nützt es, wenn die Wissenschaftler nur den Erhalt der Verlagsbranche und/oder dem „Forschungsmarkt“ dienen und ihre Ergebnisse schwierig erhältlich und/oder teuer für die breite Öffentlichkeit und die Industrie sind?

Gemäß dem Millennium Projekt wird die Globale Herausforderung 14 dann erfolgreich adressiert sein, wenn die Finanzierung von Forschung und Entwicklung für gesellschaftliche Bedürfnisse Parität erreicht hat mit der Finanzierung von Waffen und wenn eine internationale wissenschaftliche und technologische Organisation gegründet worden ist, die routinemäßig weltweites Wissenschafts- und Technologiewissen für den Einsatz in Forschungs- und Entwicklungsprioritätensetzung und -gesetzgebung verbindet.

Chancen: Beitrag grüner nanotribologischer Systeme zur Beschleunigung wissenschaftlicher und technologischer Durchbrüche, die die Bedingungen, unter denen Menschen leben, verbessern.

Durch nachhaltige nanotribologische Systeme gibt es keine negativen ökologischen oder gesundheitlichen Auswirkungen von Nanotechnologie auf die belebte Natur. Gesundheitliche Auswirkungen der Nanotechnologie werden derzeit intensiv beforscht (Balshaw et al. 2005; Holsapple und Lehman-McKeeman 2005; Hol-

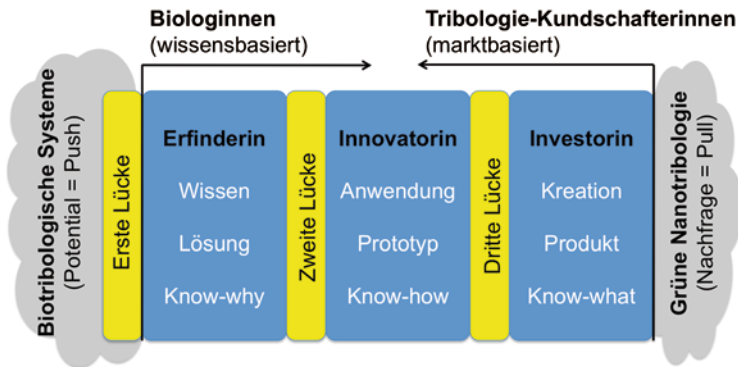


Abb. 3.5 Drei Lücken im Transfer von Natur zu Technik. Das Potential grüner nanotribologischer Systeme in der erfolgreichen Adressierung globaler Herausforderungen erfordert unter anderem die erfolgreiche Überbrückung von drei derzeit in der Wissenschaft und Technik allgegenwärtigen Lücken

sapple et al. 2005; Thomas und Sayre 2005; Borm et al. 2006; Powers et al. 2006; Thomas et al. 2006a, b; Tsuji et al. 2006; Gázsó 2008). Grüne Nanotribologie kann z. B. zur erfolgreichen Adressierung von Problemen mit Nanorobotern beitragen, in Themen wie Haftreibung und zu hohe Haftung, in gerade neu aufkommender 3D MEMS Tribologie (MEMS=mikroelektromechanisches System) (Rymuza 1989; Gebeshuber 2013b) die Qualität sichern und Lab-on-a-Chip Bausteine weniger fehleranfällig gestalten. Mikro- und nanotribologische Forschung hat darüberhinaus ein Konzept für ein globales kollektives Informationssystem inspiriert, das Fortschritte in Wissenschaft und Technologie dokumentiert (Gebeshuber und Majlis 2010) – dieses Informationssystem könnte erweitert werden, um Konsequenzen zu prognostizieren und eine Reihe von Ansichten zu dokumentieren, die wichtig sind in Bezug auf Politik und Governance.

Chancen in Globaler Herausforderung 14, Wissenschaft und Technik, sind darüber hinaus Verbesserungen des menschlichen Daseins, die auf einen Kontext von Wissen und auf ein Gleichgewicht von Generalisten und Spezialisten zielen. In diesem Zusammenhang stellen grüne nanotribologische Systeme Best-Practice-Beispiele für eine funktionierende Pipeline von der Erfindung über das Prototypenstadium (Innovation) bis zum Markt (Investor) (Abb. 3.5) dar. Nanotribologische Einheiten wie Scharniere, Verriegelungen und selbstreparierende Kleber in Kieselalgen (Gebeshuber et al. 2002; Gebeshuber und Crawford 2006), die ein- und ausschaltbare Haftung durch das Selektin/Integrin-System (Orsello et al. 2001) oder die trockenen Klebstoffe des Geckofußes (Autumn et al. 2000) sind aus der „Schatzkiste“ von Best-Practice-Beispielen von grünen nanotribologischen Systemen inspiriert von der Natur. Sie stellen ein großes Potenzial dar (Push, Abb. 3.5). Zwischen der Welt der Lösungen inkl. Best-Practice-Beispielen und der Welt der Wissenschaft und Entwicklung, den Erfindern und Erfinderinnen, ist die erste Lücke (Abb. 3.5). Mit wachsendem Erfolg versuchen Biologen und Biologinnen mit all ihrem Wissen über die belebte Natur, Tribologen und Tribologinnen zu errei-

chen, und ihre Lösungsansätze für eine gemeinsame Entwicklung von neuen Zugängen und Produkten anzubieten (Biologinnen, wissensbasiert, Abb. 3.5). Der deutsche Botaniker und Begründer des technischen Erfolgs des Lotuseffekts, Prof. Wilhelm Barthlott aus Bonn, hat der Autorin bei einer Tagung in China folgende Geschichte erzählt: Elf Jahre lang ging von einem Unternehmen zum nächsten, mit einem Lotusblatt in seinen Händen und versuchte, die Reinheit des Lotusblattes (Barthlott und Neinhuis 1997) als etwas zu verkaufen, das sich als interessant und lukrativ für die Technik herausstellen könne. Er wurde ignoriert, bis schließlich die Firma STO das Potenzial von selbstreinigenden Lacken erkannte. Barthlott ist jetzt ein wohlhabender Mann, der Lotus-Effekt weltweit bekannt, auch in der allgemeinen Öffentlichkeit, und Biomimetik ist ein Feld mit sehr positiver Konnotation. Die nächste Lücke gemäß Abb. 3.5 ist zwischen Erfindung und Innovation. Fragen, die hier auftreten, sind zum Beispiel: Wie werden aus Forschungsergebnissen Prototypen? Wer identifiziert vielversprechende Entwürfe/Entwicklungen und fördert deren Kommerzialisierung? Die dritte Lücke ist zwischen Innovation und Investition. Fragen, die hier auftreten, sind zum Beispiel: Wie werden aus Prototypen vermarktbarere Produkte? Wer verkauft die Prototypen an die Industrie? Wer sorgt für funktionierende Kommunikation zwischen Forschung, Entwicklung und Industrie? Von der technischen Seite her (Abb. 3.5 rechts) versuchen marktgeleitete grüne Nanotribologen und Nanotribologinnen über die oben identifizierten Lücken hinweg potentielle Geschäftspartner aus anderen Fachgebieten zu identifizieren, um die Nachfrage (Push) des Marktes zu erfüllen (Tribologie-Kundschafterinnen, markt-basiert, Abb. 3.5). Wir brauchen eine Pipeline vom Wissen über die Anwendung zur Kreation, von der Lösung über den Prototyp bis zum Produkt und vom Know-why über das Know-how zum Know-what.

Nachhaltige nanotribologische Systeme

Wir wollen nun einen Schritt weitergehen und den Sprung von grün zu nachhaltig machen. Der Begriff der Nachhaltigkeit entstand im Zusammenhang mit dem „Brundtland-Report“ (United Nations 1987), der erstmalig von einem „dauerhaften Gleichgewichtszustand“ sprach, der „den Bedürfnissen der heutigen Generation entsprechen“ soll, „ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden“. Neben diesem Ansatz gibt es weitere wissenschaftliche Ansätze, welche Grundlagen liefern für die Notwendigkeit, sich in der Politik und Wirtschaft mit dem Thema auseinanderzusetzen. (Lexikon der Nachhaltigkeit, http://www.nachhaltigkeit.info/artikel/nachhaltigkeit_1398.htm, link geprüft am 19. März 2014). Den Beginn der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit „nachhaltiger Entwicklung“ markiert die Studie zu den „Grenzen des Wachstums“ (Meadows et al. 1972). Bis zur Mitte der 1990er Jahre war das Thema Nachhaltigkeit fast nur in der wissenschaftlichen Diskussion zu finden. Heute wird der Begriff Nachhaltigkeit fast schon inflationär verwendet.

Tab. 3.4 Designlektionen von der belebten Natur. (Biomimicry Guild 2009)

1. Betriebsbedingungen der Erde
1.1. Wasserbasiert
1.2. Innerhalb von Grenzen und Schranken
1.3. In einem dynamischen Nichtgleichgewichtszustand
2. Leben schafft günstige Bedingungen für Leben
2.1. Optimiert anstatt maximiert
2.1.1. Multifunktionales Design
2.1.2. Anpassung der Form an die Funktion
2.1.3. Recycelt alle Materialien
2.2. Nutzt Interdependenz
2.2.1. Fördert kooperative Beziehungen
2.2.2. Selbstorganisierend
2.3. Sanfte Fertigung
2.3.1. Lebensfreundliche Materialien
2.3.2. Wasserbasierte Chemie
2.3.3. Automatischer Zusammenbau
3. Leben passt sich an und entwickelt sich
3.1. Lokal abgestimmt und empfänglich
3.1.1. Einfallsreich und opportunistisch
3.1.1.1. Struktur statt Material
3.1.1.2. Einfache, gemeinsame Bausteine
3.1.1.3. Freie Energie
3.1.2. Rückkopplungsschleifen
3.1.2.1. Antennen, Signal, Antwort
3.1.2.2. Lernt und ahmt nach
3.2. Integriert Kreisprozesse
3.2.1. Rückkopplungsschleifen
3.2.2. Gegenseitige Befruchtung und Mutation
3.3. Unverwüstlichkeit
3.3.1. Vielfalt
3.3.2. Dezentralisiert und verteilt
3.3.3. Redundanz

Definition

Dieser Abschnitt beschäftigt sich mit einem Konzept nachhaltiger nanotribologischer Systeme, wobei das verwendete Nachhaltigkeitskonzept auf Designlektionen aus der belebten Natur, den „Prinzipien des Lebens“ der US-amerikanischen „Biomimicry Guild“ (Biomimicry Guild 2009, 2012), basiert (Tab. 3.4, Abb. 3.6). Die Biomimicry Guild verbindet seit ihrer Gründung Ende der 1990er Jahre Nachhaltigkeit und Biomimetik, ja mehr noch, in ihrer Biomimicry Methodologie sind diese beiden Aspekte untrennbar miteinander verknüpft (Al-Solaiman 2012; Drack und

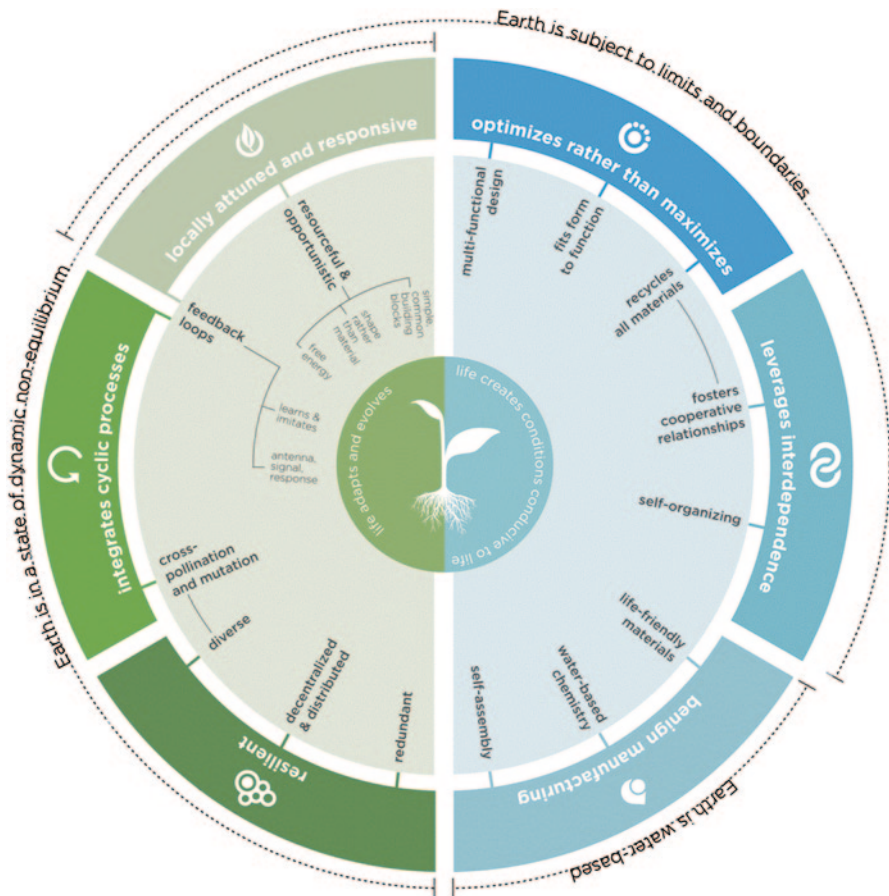


Abb. 3.6 Designlektionen von der belebten Natur, die „Prinzipien des Lebens“ nach der US amerikanischen Biomimicry Guild. Bildquelle: <http://osbsustainablefutures.files.wordpress.com/2010/04/picture5-lifes-principles.gif> (link überprüft am 18. März 2014)

Gebeshuber 2013). Biomimetik hingegen ist eine Design-Methode, und als solche unabhängig von einem Wert wie Nachhaltigkeit (Gebeshuber et al. 2009).

Gemäß Biomimicry Guild kann man nachhaltige Biomimetik in sechs verschiedene Hauptkategorien einteilen, mit weiteren Unterkategorien. Wir werden nun versuchen, diese Kategorien mit nanotribologischen Systemen in Relation zu setzen, Anwendungen grüner Nanotechnologie zu identifizieren und Beispielsysteme anzuführen, in denen einige dieser Prinzipien schon mitberücksichtigt sind. Diese Beispiele sind noch nicht alle umgesetzt und am Markt erhältlich; manche sind noch im Konzept-, Forschungs- oder Entwicklungsstadium.

Evolution sichert das Überleben

Prinzip: Nachhaltigkeit kann gewährleistet werden, wenn Informationen, die dauerhafte Leistung gewährleisten, kontinuierlich inkorporiert und verankert werden.²

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Die nanotribologischen Systeme immer am Puls der Zeit halten. Kontinuierliche Umsetzung neuester Forschungs- und Entwicklungsergebnisse sorgt für eine kontinuierliche Optimierung der verwendeten Materialien, Strukturen und Prozesse.

Die drei Hauptmöglichkeiten zur Umsetzung dieses Prinzips sind:

1. *Wenn funktionierende Strategien repliziert werden, wenn erfolgreiche Ansätze wiederholt werden.* Implikationen für grüne nanotribologische Systeme: biomimetische Ansätze, von der Natur lernen, Blick auf natürliche biotribologische Modellsysteme (biologische Best-Practice-Beispiele) und von ihnen lernen (Gebeshuber 2007; Gebeshuber et al. 2008; Gebeshuber et al. 2009; Gebeshuber et al. 2012).
2. *Wenn das Unerwartete integriert ist.* In Lebewesen kann das Einbauen von „Fehlern“ sehr erfolgreich zu neuen Formen und Funktionen führen. In ähnlicher Weise könnten bezüglich grüner nanotribologischer Systeme Richtlinien, die verantwortungsvollen und ökologisch denkenden Forschern und Forscherinnen tribologische Forschung entlang unkonventioneller Pfade erlauben, neue und interessante Möglichkeiten eröffnen.
3. *Austausch und Veränderung von Daten (Umschichtung von Informationen).* In Lebewesen gibt es einige sehr erfolgreiche Beispiele der Implementierung des Austausches und der Veränderung von Daten z. B. das Gen-Swapping in Bakterien (Pennisi 1999). Implikationen in grünen nanotribologischen Systemen wären z. B. Biomimetik (Gebeshuber 2007; Gebeshuber et al. 2008; Gebeshuber et al. 2012), Lernen von der Natur (Isenmann 2001) und tribologiebezogene Forschung und Entwicklung die von tiefem Verständnis der zugrunde liegenden Prinzipien geleitet wird (Wen und Huang 2012).

Ressourceneffizienz in Bezug auf Material und Energie

Prinzip: Geschickt und konservativ lokale Ressourcen und Möglichkeiten in Anspruch nehmen.

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Das Tribosystem geschlossen halten; Wiederverwendung und Recycling der Substanzen und der Abfallenergie.

² Kursiv gesetzter Text bis zum Ende dieses Abschnittes entspricht der deutschen Übersetzung von Material von der Webpage der Biomimicry Guild, das hier mit freundlicher Erlaubnis reproduziert wird.

Dieses Prinzip kann auf vier verschiedene Arten implementiert werden:

1. *Multifunktionales Design unterstützt das Erfüllen mehrerer Notwendigkeiten mit einem Lösungsansatz.* Oberflächentexturen, die Formulierung von Additiven oder tribologische Prozesse können – vergleichbar mit der Pluripotenz von Stammzellen – auf nachhaltige Art und Weise entworfen werden. Wenn nun die Texturen, Formulierungen und Prozesse pluripotent sind, und leicht für das jeweilige Tribosystem adjustiert werden können, wäre der Vorteil, dass man schon etablierte grüne Arten der Produktion, der Verwendung und des Entsorgens zur Verfügung hätte, und keine neuen Forschungen darüber, wie man neue Zugänge grün machen könnte, notwendig wären. In Lebewesen haben wir ja, wie oben schon angeführt, sehr oft nur ganz leichte Variationen in ein und demselben Material, der Struktur oder der Funktion, die dann völlig verschiedene Bedürfnisse befriedigen. Ein Beispiel dafür befriedigen. Ein Beispiel dafür ist Kollagen, das in Knochen, der Haut, in Sehnen und in der Hornhaut vorkommt, manchmal kristallin, manchmal amorph (Sanchez et al. 2005).
2. *Die Verwendung von Niedrigenergieprozessen ermöglicht minimalen Energieverbrauch.* Dies kann durch niedrigere Temperatur, niedrigeren Druck, oder Zeitersparnis realisiert werden. Ein herausragendes Beispiel dafür ist Biomineralisation. Organismen produzieren mehr als 60 verschiedene Mineralien – so zum Beispiel die natürliche Keramik unserer Zähne, Magnete in magnetotaktischen Bakterien, Schneckenhäuser aus Strontianit oder das amorphe Silikat in Kieselalgen (Odum 1951; Sigel et al. 2008; Behrens und Baeuerlein 2009; Abb. 3.3).
3. *Recycling aller Materialien behält alle Materialien in einem geschlossenen Kreislauf.* Nahrungsketten und zyklische Zerfallsprozesse in Ökosystemen sind Beispiele exquisiter geschlossener Materialnutzungskreisläufe (Bidlingmaier 2000; Bilitewski et al. 2000; Fischer-Kowalski et al. 1996). In Bezug auf grüne nanotribologische Systeme sind geschlossene Tribosysteme, die Wiederverwendung von Energie und Materialien sowie deren Recycling von Relevanz.
4. *Auswahl nach Form oder Mustern basierend auf Notwendigkeit erlaubt genaue Anpassung der Form an die Funktion.* Struktur-Funktionsbeziehungen sind omnipräsent in Organismen (Starr und Taggart 2008a, b; Thompson 1917). Dies ist in natürlichen Mikro- und Nanosystemen besonders evident, z. B. bei Scharnieren und Verbindungsstücken in Kieselalgen, und kann als Inspiration für neuartige technische mikro- und nanotribologische Systeme dienen (Gebeshuber et al. 2005; Gebeshuber und Crawford 2006; Gebeshuber et al. 2009).

Anpassung an sich verändernde Bedingungen

Prinzip: Angemessene Reaktion auf dynamische Kontexte.

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Multifunktionale reaktive Nanooberflächen, Nanoagenten und Nanoprozesse, die sich abhängig von der Umgebung verändern und die in so gering wie nötigen Mengen verwendet werden.

Es gibt drei große Möglichkeiten zur Umsetzung dieses Prinzips:

1. *Die Aufrechterhaltung der Integrität durch Regeneration sorgt für Persistenz durch ständige Zufuhr von Energie und Materie in das System.* Diese Energie und Materie werden verwendet, um zu heilen bzw. zu reparieren und das System zu verbessern. Beispiele dafür aus der Tribologie sind passive und aktive tribologische Systeme wie z. B. selbstreparierende Klebstoffe oder Korrosionsschutzschichten (Kumar et al. 2006; van der Zwaag 2007; Andreeva et al. 2008; Ghosh 2009).
2. *Unverwüstlichkeit durch Variation, Redundanz und Dezentralisierung gewährleistet die Aufrechterhaltung der Funktion nach einer Störung.* Unverwüstlichkeit – wie durch das entsprechende englische Wort ‚resilience‘ auf wordnet.princeton.edu definiert – bezeichnet die physikalische Eigenschaft eines Materials, das nach einer Verformung, die nicht seine Elastizitätsgrenze übersteigt, in seine ursprüngliche Form oder Position zurückkehren kann. In Organismen wird dies durch die Einbindung einer Vielzahl von doppelten Formen, Prozessen oder Systemen erreicht, die nicht ausschließlich zusammen angeordnet sind. Von besonderem Interesse sind weiters Systeme, die durch Belastungen nicht nur nicht kaputt werden, oder sich als unverwüstlich erweisen, sondern die durch Belastungen sogar noch stärker werden (antifragile Systeme; Taleb 2012). Derartige Antifragilität gibt es nach Taleb in ökonomischen, technischen, kulturellen und biologischen Systemen. Beispiele für antifragile Systeme sind Gerichte und unser Immunsystem. In der Konzeptentwicklung nachhaltiger nanotribologischer Systeme ist die Implementierung dieser Funktion kompliziert und einiges zusätzliches Brainstorming ist notwendig, um tribologisch relevante biologische Best-Practice-Beispiele und die damit verbundene Übersetzung in die Ingenieurwissenschaften zu identifizieren. Weiters besteht immer die Gefahr des gefährlichen Überschwingens, einer Überreaktion, des Herausbildens von emergenten Eigenschaften – derartiges können wir mit unseren heutigen technischen und mathematischen Möglichkeiten schwer beherrschen und berechnen.
3. *In Organismen hat sich Vielfalt (Einbeziehung mehrerer Formen, Prozesse oder Systeme) als sehr erfolgreich erwiesen, um funktionale Notwendigkeiten zu erfüllen.* Beispiele finden sich auf allen Größenskalen, von einzelnen Biomolekülen (mit einer Größe von einigen Nanometern), über Gewebe und Gliedmaßen (mit einer Größe von Zentimetern) bis zu ganzen Organismen und Ökosystemen. In Bezug auf Vielfalt im Nanobereich wurde im Jahr 2012 von der Autorin das Konzept der Nanodiversität eingeführt (Gebeshuber 2012a). Damit lässt sich der Beitrag geringster Variationen beschreiben, z. B. von Additiven in Schmierstoffen, die zu grundlegend verschiedener Performance führen. Nanodiversität ist besonders wichtig für effektive grüne nanotribologische Systeme und stellt eine sehr gute Basis dar, sie in Richtung Nachhaltigkeit zu entwickeln.

Integration von Entwicklung mit Wachstum

Prinzip: Optimal in Strategien investieren, die sowohl die Entwicklung als auch das Wachstum fördern.

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Neue Forschung und Entwicklung in nachhaltigen nanotribologischen Systemen sollte nicht nur mit dem Wachstum und den monetären Einnahmen dienen – auch wenn die Gewinne hoch sind, muss ein Gleichgewicht zwischen Entwicklung und Wachstum angestrebt werden. Neue Forschungsergebnisse müssen umgesetzt werden, auch wenn es kurzfristig nicht von Vorteil ist für die Wirtschaft. Denn auf lange Sicht gewährleisten nur nachhaltige Ansätze unser Überleben (Diamond 2005).

Drei wichtige Möglichkeiten zur Umsetzung dieses Prinzips sind:

1. *Die Kombination von modularen und verschachtelten Komponenten passt schrittweise mehrere Einheiten ineinander, von einfach bis komplex.* In der belebten Natur treten Hierarchie und Multifunktionalität in vielen Organismen (Lakes 1993; Vincent 2005; Fratzl und Weinkamer 2007) und auch Systemen auf. Für Tribosysteme, und vor allem für nanotribologische Systeme, haben wir gerade erst begonnen, derartige (derzeit noch aufwendige) Ansätze zu entwickeln. Beispiele dafür sind nanotribologische multiskalige Reibmechanismen und hierarchische Oberflächen (vgl. Nosonovsky und Bhushan 2007).
2. *Bottom-Up Aufbau, also Aufbau von unten nach oben, vom kleinen zum großen, ermöglicht die Verwendung von Code, das Arbeiten mit molekularen Bausteinen und die Einbeziehung von Funktionalitäten.* Alle Organismen sind Bottom-Up gewachsen, unsere aktuellen technischen Werkzeuge werden jedoch (noch) in den meisten Fällen mit Top-Down Techniken produziert. Die Entwicklung und erfolgreiche Anwendung von nanotribologischen Bottom-Up Ansätzen wären sehr interessant, unter anderem für die Oberflächenveredelung, einen der wichtigsten Optimierungshebel für tribologische Systeme (Gebeshuber 2012b).
3. *Selbstorganisation, die Schaffung von weltweit einheitlichen Mustern, einzig und allein aus lokalen Wechselwirkungen, ohne zentrale Steuerung.* Realisierungen dieser Implementierung kann man in der belebten Natur auf allen Längenskalen beobachten, von einzelnen Molekülen bis zu sozialem Verhalten. In grünen nanotribologischen Systemen wäre es vorteilhaft, wenn die Tribosysteme lokal den unterschiedlichen Anforderungen nach reagierten, nur so gut wie nötig und nicht so gut wie möglich.

Empfänglichkeit und lokales Abgestimmtsein

Prinzip: Einfügen in die Umgebung und sich mit ihr vernetzen.

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Manchmal übertreiben wir es mit unseren derzeitigen Technologien: Manchmal sind sie zu gut, zu teuer oder ent-

lang einem anderen Parameter maximiert. Empfängliche grüne nanotribologische Systeme wären nur genauso gut wie nötig, mit zusätzlichen Vorteilen in Bezug auf Energieeinsparung und Umweltverträglichkeit.

Es gibt vier große Möglichkeiten zur Umsetzung dieses Prinzips:

1. *Die Verwendung von leicht verfügbaren Materialien und leicht verfügbarer Energie.* In Lebewesen wird sehr oft auf Struktur statt auf Material gesetzt. Das Geheimnis und der Trick liegen in der Information, im Code, der diese Strukturen generiert. Die Materialien, die verwendet werden, sind alle lokal verfügbar. Die Umsetzung dieses Prinzips gewährleistet ein Arbeiten mit reichlich vorkommenden, leicht zugänglichen Materialien, mit paralleler Nutzung frei verfügbarer Energie (Priya und Inman 2010; Okada und Kaneko 2010). Eine mögliche Realisierung wären flexible nanotribologische Systeme, die nur jeweils leicht verfügbare Materialien und Energie verbrauchen.
2. *Die Ausbildung von kooperativen Beziehungen findet durch Win-Win-Interaktionen Wert.* Dieser Aspekt ist in der belebten Natur allgegenwärtig, und fehlt vielfach in heute verwendeten technischen Ansätzen. Auch dies ist ein Punkt, wo Brainstorming interessante neue Ansätze ergeben könnte.
3. *Die Hebelwirkung zyklischer Prozesse nutzt sich wiederholende Phänomene aus.* Auch dieser Aspekt ist in der belebten Natur allgegenwärtig, und fehlt vielfach in heutigen technischen Ansätzen. Auch hier ist Brainstorming für neue Ansätze notwendig.
4. *Die Verwendung von Rückkopplungsschleifen greift in den zyklischen Informationsfluss ein, um eine Reaktion entsprechend zu verändern.* Verstärkung durch Feedback-Schleifen ist wichtig und wird in der belebten Natur und in der Technik angewendet (Thomas und d’Ari 1990; del Pobil et al. 1998; Haikonen 2007). Bezüglich Nanoprozessen sind wir mit der Anwendung von zyklischen Informationsflüssen erst ganz am Anfang (Jones 2009; Liu et al. 2010; Macqueen et al. 2011).

Verwendung lebensfreundlicher Chemie

Prinzip: Die Verwendung von Chemie, die Lebensprozesse unterstützt.

Anwendung in grünen nanotribologischen Systemen Grüne Chemie ist eine der Grundvoraussetzungen grüner nanotribologischer Systeme (Nosonovsky und Bhusan 2010a, b; Gebeshuber 2012b).

Es gibt drei große Möglichkeiten zur Umsetzung dieses Prinzips:

1. *Selektives Verwenden einer kleinen Untergruppe von chemischen Elementen (Aufbau von Materie in eleganter Art und Weise, unter Verwendung relativ weniger chemischer Elemente oder Verbindungen).* Dieses Prinzip ist stark in der belebten Natur umgesetzt. In biologischen Materialien finden nur ein paar der chemischen Elemente in großen Mengen Verwendung, und auch nur rela-

tiv wenige chemische Verbindungen. Gerade in kleinen biologischen Einheiten (Moleküle, nanostrukturierte Oberflächen, Nanostrukturen) bestimmt in vielen Fällen die Struktur anstatt des Materials die Funktion (Fan et al. 2000; Richert et al. 2008; Kessel und Ben-Tal 2010). Dies geht so weit, dass es Eigenschaften von biologischen Einheiten gibt, die auf der Struktur allein basieren. Ein beeindruckendes Beispiel in dieser Hinsicht sind Strukturfarben, das sind Farben, bei denen die Färbung nicht von Pigmenten stammt, sondern von der Interaktion des sichtbaren Lichts mit winzigen Strukturen von der Größenordnung der Wellenlänge des sichtbaren Lichts. Die Farben entstehen durch physikalische Mechanismen wie Beugung, Streuung und Interferenz (siehe z. B. Vukusic und Sambles 2003; Berthier 2006; Lee 2007; Kinoshita 2008; Gebeshuber und Lee 2012). Ein beeindruckendes Beispiel aus der belebten Natur für den Aufbau mit einer kleinen Gruppe von chemischen Elementen sind Kieselalgen, einzellige Algen mit einem Skelett aus Siliziumdioxid (siehe Abb. 3.3; Round et al. 1990). Das Siliziumdioxid von Kieselalgen ist in verschiedenen funktionalen Hierarchieebenen strukturiert, mikromechanisch optimiert (Hamm et al. 2003), hat optische Eigenschaften, die von großem Interesse für die Nanotechnologie sind (Vucusic und Sambles 2003; de Tommasi et al. 2010) und wird unter Umgebungsbedingungen erzeugt. All dies macht Kieselalgen interessant für Nanotechnologieingenieure, die versuchen, unter Umgebungsbedingungen Strukturen mit integrierten Funktionen zu bauen, unter Zuhilfenahme lebensfreundlicher Chemie.

2. *Zerlegung von Produkten in gutartige Bestandteile mit Hilfe von Chemie, in der bei der Zersetzung keine schädlichen Nebenprodukte entstehen.* Die belebte Natur macht es genau so, und wir mit unserer aktuellen Technologie sind noch weit davon entfernt – obwohl es sehr vorteilhaft wäre in Bezug auf neue grüne Herangehensweisen. Mit grünen nanotribologischen Systemen konnten wir einen neuen Versuch starten, Einheiten zu entwickeln, die sich in unschädliche Endprodukte zersetzen (Gebeshuber 2012b).
3. *In der Chemie des Lebens ist Wasser das allgemein verwendete Lösungsmittel.* Derartige wasserbasierte Ansätze tauchen zusehends auch in unseren technischen Zugängen auf. Israelachvili und Mitarbeiter betonen in ihrem Artikel über nicht-lineare Reibungseigenschaften, der 2004 in der Zeitschrift Nature erschienen ist, dass die derzeit verwendeten, ölbasierten Schmiermittel durch die Gleitmittel auf Wasserbasis, wie sie in der gelebten Natur auftreten, bei weitem übertroffen werden (Urbakh et al. 2004). Das Hüftgelenk mit seinem erstaunlich niedrigen Reibungskoeffizienten ist eines der Beispiele aus der Natur für hocheffiziente Tribosysteme, die mit wasserbasierter Chemie geschmiert sind (Mansour 2003).

Wichtige Ziele in der Entwicklung grüner nanotribologischer Systeme sind die Erhaltung der Ressourcen und bewusster Umgang mit Energie sowie ein Anstoß der Gesellschaft nach vorne in Richtung Nachhaltigkeit.

Die Bereiche, in denen grüne nanotribologische Systeme von der belebten Natur profitieren können, umfassen optimierte Energiebilanz des Systems, Schutz der Umwelt vor Prozessrückständen, die Umweltkosten des Prozesses selbst und Erhaltung der Nanodiversität. Tabelle 3.3 gibt die Hauptziele effizienter grüner na-

notribologischer Systeme, eine Evaluierung ihrer Wichtigkeit und verschiedenste Beispielorganismen. Dadurch stellt sie eine Vielzahl von möglichen Zugängen vor, von denen für die erfolgreiche Entwicklung grüner nanotribologischer Systeme gelernt werden kann.

Schlussfolgerungen und Ausblick

Grüne nanotribologische Systeme und nachhaltige nanotribologische Systeme weisen ein hohes Potenzial in Wissenschaft und Technik auf. Tribologie und andere Bereiche der Technik werden zunehmend die Bereitstellung nachhaltiger Lösungen anstreben (müssen). Wir brauchen ethische Verhaltenskodizes für die Verwendung neuer Technologien, um diesen Übergang glatt vor sich gehen zu lassen. Erfolgreiche Tribologen sind inhärent transdisziplinäre Denker – das ist in unserer zunehmend komplexen Welt sehr wichtig. Tribologen können – wenigstens in wichtigen Teilbereichen – erfolgreich dazu beitragen, die großen globalen Herausforderungen zu adressieren.

In diesem Buch Kapitel wird ein Nachhaltigkeitsaspekt verwendet, der auf den „Prinzipien des Lebens“ der US amerikanischen Biomimicry Guild basiert. Offene Punkte in Bezug auf nachhaltige nanotribologische Systeme, die in diesem Kapitel nicht angesprochen werden, betreffen Anpassung an sich verändernde Bedingungen, Reaktionsfähigkeit und lokale Abgestimmtheit. Weiters ist auch noch zu untersuchen, wie Unverwüstlichkeit durch Variation, Redundanz und Dezentralisierung erreicht werden können, um sicherzustellen, dass die Funktion auch nach Störungen aufrechterhalten bleibt, sowie die Kultivierung von kooperativen Beziehungen, die durch Win-Win-Interaktionen Wert erhalten. Weiters sollte auch noch die Hebelwirkung zyklischer Prozesse ausnutzt werden, wodurch sich wiederholende Phänomene in das Konzept implementiert werden. Berücksichtigung weiterer Nachhaltigkeitsansätze anderer Autorinnen und Autoren soll helfen, diese Konzepte weiterzuentwickeln, mit dem Resultat nachhaltiger nanotribologischer Systeme zum Vorteil der Gesellschaft und der Umwelt.

Wie oben angeführt, finden in der belebten Natur nur wenige chemische Elemente und chemische Verbindungen Verwendung, geschickt zugeschnitten auf die jeweiligen Aufgaben. Eine Umsetzung derartiger ressourcenrelevanter Zugänge in nanotribologischen Systemen, in der Nanotechnologie, und generell in allen Lebensbereichen, in denen produziert und gebaut wird, und somit das Themengebiet „Struktur statt Material“, „Smart Materials“ wichtig ist, könnte uns vor den sehr nachteiligen Folgen unserer derzeitigen Ressourcenwirtschaft bewahren, und dem „Ressourcenfluch“ (Auty 1993) entgegenarbeiten. Der Begriff Ressourcenfluch wurde von Richard Auty vom Environment Centre der großbritannischen Lancaster University geprägt, um zu beschreiben, warum rohstoffreiche Länder oft nicht in der Lage sind, ihren Reichtum für einen wirtschaftlichen Aufschwung zu nutzen. Kein Tier lässt sich Bestandteile seines Körpers oder seines Hauses aus tausenden Meilen Entfernung anliefern – wäre es nicht wunderbar, wenn auch wir Menschen uns 100% auf einfache, lokale Materialien verlassen könnten, ohne Abstriche in

unserer Lebensqualität machen zu müssen? Eine parallele vielversprechende Entwicklung in Richtung neuartigem Umgang mit Ressourcen und ihrem Transport sind 3D Drucker, die nicht nur alle möglichen dreidimensionalen Strukturen aus verschiedenen Grundmaterialien drucken können, sondern sogar Medikamente und andere chemische Verbindungen (Symes et al. 2012)

Die Risiken und Chancen von Nanotechnologie für die Umwelt sind vielfältig und komplex (Shapira und Youtie 2012), dies gilt natürlich auch für grüne nanotribologische Systeme. Insbesondere miteinander kommunizierende Nanosysteme, in denen als emergente Eigenschaft so etwas wie Bewusstsein oder Überlebenstrieb entsteht, bergen Gefahren. Generell ist zu sagen, dass wir in einer Welt, die wir durch unsere industriellen Aktivitäten an den Rand eines 6. Massenaussterbens der Arten gebracht haben (Barnosky et al. 2011) und die jederzeit in einen anderen, vielleicht für uns Menschen nicht so lebenswerten Gleichgewichtszustand flippen kann (Barnosky et al. 2012), gar keine andere Wahl haben, als nachhaltige Technologien zu produzieren, wenn wir nicht nur um derzeitige Chancen und Risiken für die Umwelt besorgt sind, sondern auch unseren zukünftigen Generationen eine lebenswerte Welt übergeben wollen.

Danksagung Teile dieses Buchkapitel sind Übersetzungen aus englischsprachigen tribologischen Fachartikeln der Autorin (Gebeshuber 2012a, b). Die Nationale Universität von Malaysia hat einen Teil dieser Arbeit im Rahmen des Arus Perdana Forschungsprojektes finanziert (Projekt-nummer UKM-AP-NBT-16–2010).

Literatur

- Al-Solaiman S (2012) Proceedings of the sustainability through biomimicry conference, sustainability through biomimicry 2012. College of Design, Dammam, Kingdom of Saudi Arabia, Nov. 27–28, 274 p
- Andreeva DV, Fix D, Moehwald H, Shchukin DG (2008) Self-healing anticorrosion coatings based on pH-sensitive polyelectrolyte/inhibitor sandwichlike nanostructures. *Adv Mater* 20:2789–2794
- Anonymous (2010) Summary: world tribology congress 2009 (WTC IV) international tribology council information 191. <http://www.itctribology.org/itcnews.php?issue=191> & Go2=Go. Zugriffen: 18. Mär 2014
- Autumn K, Liang YA, Hsieh ST, Zesch W, Chan WP, Kenny TW, Fearing R, Full RJ (2000) Adhesive force of a single gecko foot-hair. *Nature* 405:681–685
- Auty RM (1993) Sustaining development in mineral economies: the resource curse thesis. Routledge, London
- Balshaw DM, Philbert M, Suk WA (2005) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part III: nanoscale technologies for assessing risk and improving public health. *Toxicol Sci* 88:298–306
- Bar-Cohen Y (2005) Biomimetics: biologically inspired technologies. CRC Press, Boca Raton
- Barnosky AD, Matzke N, Tomiya S, Wogan GOU, Swartz B, Quental TB, Marshall C, McGuire JL, Lindsey EL, Maguire KC, Mersey B, Ferrer EA (2011) Has the earth's sixth mass extinction already arrived? *Nature* 471:51–57
- Barnosky AD, Hadly EA, Bascompte J, Berlow EL, Brown JH, Fortelius M, Getz WM, Harte J, Hastings A, Marquet PA, Martinez ND, Mooers A, Roopnarine P, Vermeij G, Williams JW,

- Gillespie R, Kitzes J, Marshall C, Matzke N, Mindell DP, Revilla E, Smith AB (2012) Approaching a state shift in Earth's biosphere. *Nature* 486:52–58
- Barthlott W, Neinhuis C (1997) The purity of sacred lotus or escape from contamination in biological surfaces. *Planta* 202:1–8
- Baumgartner W, Saxe F, Weth A, Hajas D, Sigumonrong D, Emmerlich J, Singheiser M, Böhme W, Schneider JM (2007) The sandfish's skin: morphology, chemistry and reconstruction. *J Bionic Eng* 4:1–9
- Behrens P, Baeuerlein E (2009) *Handbook of biomineralization: biomimetic and bioinspired chemistry*. Wiley VCH, Weinheim
- Berthier S (2006) *Iridescences: the physical colors of insects*. Springer, New York
- Bhushan B (Hrsg) (2010) *Springer handbook of nanotechnology*, 3 Aufl. Springer, Heidelberg
- Bidlingmaier W (Hrsg) (2000) *Biologische Abfallverwertung*. Ulmer Verlag, Stuttgart
- Bilitewski B, Härdtle G, Marek K (2000) *Abfallwirtschaft – Handbuch für Praxis und Lehre*, 3. Aufl. Springer, Berlin
- Biomimicry G (2009) <http://www.asknature.org/article/2ea4b67b8957b94ffc5b3321582693fb/>. Zugegriffen: 23. Dez 2012
- Biomimicry G (2012) <http://osbsustainablefutures.files.wordpress.com/2010/04/picture5-lifes-principles.gif>. Zugegriffen: 18. Mär 2014
- Borm P, Klaessig FC, Landry TD, Moudgil B, Pauluhn J, Thomas K, Trottier R, Wood S (2006) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part V: role of dissolution in biological fate and effects of nanoscale particles. *Toxicol Sci* 90:23–32
- Daniel TL (1981) Fish mucus: *in situ* measurements of polymer drag reduction. *Biol Bull* 160:376–382
- Davim JP (Hrsg) (2013) *Biomaterials and medical tribology: research and development*. Woodhead Publishing, Cambridge (Rev Mech Eng Series 4)
- de Tommasi E, Rea I, Mocella V, Moretti L, De Stefano M, Rendina I, de Stefano L (2010) Multi-wavelength study of light transmitted through a single marine centric diatom. *Opt Express* 18(12):12203–12212
- del Pobal AP, Mira J, Moonis A (Hrsg) (1998) *Methodology and tools in knowledge-based systems*. 11th Int Conf Indust Eng App Artif Intell Exp Syst. Notes in Artificial Intelligence, vol I. Springer, Berlin
- Demirbas A (2008) *Biodiesel: A realistic fuel alternative for diesel engines*. Springer, London
- Diamond J (2005) *Collapse: how societies choose to fail or succeed*. Viking Books, New York
- Drack M, Gebeshuber IC (2013) Comment on „innovation through imitation: biomimetic, bio-inspired and biokleptic research“ by A. E. Rawlings, J. P. Bramble and S. S. Staniland, *Soft Matter*, 2012, 8, 6675. *Soft Matter*, in press. doi:10.1039/c2sm26722e
- Fan H, Lu Y, Stump A, Reed ST, Baer T, Schunk R, Perez-Luna V, López GP, Brinker CJ (2000) Rapid prototyping of patterned functional nanostructures. *Nature* 405:56–60
- Fischer-Kowalski M, Haberl H, Payer H, Steurer A, Winiwarter V (1996) *Gesellschaftlicher Stoffwechsel und Kolonisierung von Natur – Ein Versuch in Sozialer Ökologie*. Gordon und Breach – Fakultas, Amsterdam
- Fratzl P, Weinkamer R (2007) Natures hierarchical materials. *Progress Mater Sci* 52:1263–1334
- Gazsó A (2008) The Austrian experience – project NANOTRUST, OECD Database, <http://www.oecd.org/dataoecd/35/58/42326290.pdf>. Zugegriffen: 18. Mär 2014
- Gebeshuber IC (2007) Biotribology inspires new technologies. *Nano Today* 2:30–37
- Gebeshuber IC (2012a) Green nanotribology. *Proceedings IMechE part C. J Mech Eng Sci* 226:374–386
- Gebeshuber IC (2012b) Green nanotribology and sustainable nanotribology in the frame of the global challenges for humankind. In: Nosonovsky M, Bhushan B (Hrsg) *Green energy and technology series Ch 5*. Springer, Berlin, S. 105–125. (Green Tribology – Biomimetics, Energy Conservation, and Sustainability)
- Gebeshuber IC (2013a) We have to establish a common language. What is the architect doing in the jungle? *Biornametics*. In: Imhof B, Gruber P (Hrsg) *Edition angewandte*. Springer, Wien

- Gebeshuber IC (2013b) Biomimetic inspiration regarding nano-tribology and materials issues in MEMS. In: Kumar SS, Satyanarayana N et al (Hrsg) Nano-tribology and materials issues in MEMS, Ch. 2. Springer
- Gebeshuber IC, Crawford RM (2006) Micromechanics in biogenic hydrated silica: hinges and interlocking devices in diatoms. *Proc IMechE Part J: J Eng Tribol* 220:787–796
- Gebeshuber IC, Drack M (2008) An attempt to reveal synergies between biology and engineering mechanics. *Proc IMechE Part C: J Mech Eng Sci* 222:1281–1287
- Gebeshuber IC, Lee DW (2012) Nanostructures for coloration organisms other than animals. In: Bhushan B, Nosonovsky M (Hrsg) Springer encyclopedia of nanotechnology. Springer, 1790–1803. 3200 pages. ISBN 978-9048197507
- Gebeshuber IC, Majlis BY (2010) New ways of scientific publishing and accessing human knowledge inspired by transdisciplinary approaches. *Tribol Mater Surf Interf* 4:143–151
- Gebeshuber IC, Majlis BY (2011) 3D corporate tourism: A concept for innovation in nanomaterials engineering. *Int J Mater Eng Innov* 2:38–48
- Gebeshuber IC, Thompson JB, Del Amo Y, Stachelberger H, Kindt JH (2002) *In vivo* nanoscale atomic force microscopy investigation of diatom adhesion properties. *Mater Sci Technol* 18:763–766
- Gebeshuber IC, Stachelberger H, Drack M (2005) Diatom bionanotribology – Biological surfaces in relative motion: their design, friction, adhesion, lubrication and wear. *J Nanosci Nanotechnol* 5:79–87
- Gebeshuber IC, Drack M, Scherge M (2008) Tribology in biology. *Tribol Surf Mater Interf* 2:200–212
- Gebeshuber IC, Gruber P, Drack M (2009a) A gaze into the crystal ball – biomimetics in the year 2059. *Proc IMechE Part C: J Mech Eng Sci* 223:2899–2918
- Gebeshuber IC, Majlis BY, Stachelberger H (2009b) Tribology in biology: biomimetic studies across dimensions and across fields. *Int J Mech Mater Eng* 4:321–327
- Gebeshuber IC, Stachelberger H, Ganji BA, Fu DC, Yunas J, Majlis BY (2009c) Exploring the innovational potential of biomimetics for novel 3D MEMS. *Adv Mat Res* 74:265–268
- Gebeshuber IC, Drack M, Aumayr F, Winter HP, Franek F (2010) Scanning probe microscopy: from living cells to the subatomic range. In: Fuchs H, Bhushan B (Hrsg) Biosystems investigated by scanning probe microscopy, 1 Aufl. Springer, New York, S 834
- Gebeshuber IC, Majlis BY, Stachelberger H (2012) Biomimetics in tribology. Biomimetics – materials, structures and processes. In: Bruckner D, Gruber P, Hellmich C, Schmiedmayer H-B, Stachelberger H, Gebeshuber IC (Hrsg) Ideas and case studies. Biological and medical physics series, biomedical engineering. Springer, Berlin
- Ghosh SK (2009) Self-healing materials: fundamentals, design strategies, and applications. Wiley-VCH, Weinheim
- Glenn JC, Gordon TJ, Florescu E (2012) 2012 state of the future. The Millennium Project. MP Publications, Washington
- Haikonen PO (2007) Robot brains: circuits and systems for conscious machines. Wiley-Interscience, Chichester
- Hamm CE, Merkel R, Springer O, Jurkojc P, Maier C, Prechtel K, Smetacek V (2003) Architecture and material properties of diatom shells provide effective mechanical protection. *Nature* 421:841–843
- Haugstad G (2012) Atomic force microscopy: understanding basic modes and advanced applications. Wiley, Hoboken
- Hazel J, Stone M, Grace MS, Tsukruk VV (1999) Nanoscale design of snake skin for reptation locomotions via friction anisotropy. *J Biomech* 32:477–484
- Holsapple MP, Lehman-McKeeman LD (2005) Forum series: research strategies for safety evaluation of nanomaterials. *Toxicol Sci* 87:315
- Holsapple MP, Farland WH, Landry TD, Monteiro-Riviere NA, Carter JM, Walker NJ, Thomas KV (2005) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part II: toxicological and safety evaluation of nanomaterials, current challenges and data needs. *Toxicol Sci* 88:12–17

- Isenmann R (2001) Innovationsquelle Natur – Was wir von der Natur zur Ableitung von ökologischen Innovationen lernen können. In: Wisser A, Nachtigall W (Hrsg) Biona-Report 15, S 224–242
- Jakowska S (1963) Mucus secretion in fish – a note. *Ann N Y Acad Sci* 160:458–462
- Jones RAL (2009) Challenges in soft nanotechnology. *Faraday Discuss* 143:9–14
- Kessel A, Ben-Tal N (2010) Introduction to proteins: structure, function, and motion. Chapman & Hall/CRC mathematical & computational biology. CRC Press, Boca Raton
- Kinoshita S (2008) Structural colors in the realm of nature. World Scientific Publishing Company, Singapore
- Kobayashi A, Yamamoto I, Aoyama T (2004) Tribology of a snail (terrestrial gastropod). *Tribol Series* 41:429–436 (Proceedings 29th Leeds-Lyon Symp Tribology, Elsevier B.V.)
- Kumar CSSR (Hrsg) (2010) Biomimetic and bioinspired nanomaterials. Series nanomaterials for life sciences. Wiley VCH, Weinheim
- Kumar A, Stephenson LD, Murray JN (2006) Self-healing coatings for steel. *Progr Org Coat* 55:244–253
- Lakes R (1993) Materials with structural hierarchy. *Nature* 361:511–515
- Lee D (2007) Natures palette: the science of plant color. University of Chicago Press, Chicago
- Ling SC, Ling TYJ (1974) Anomalous drag-reducing phenomenon at a water/fish-mucus or polymer interface. *J Fluid Mech* 65:499–512
- Liu Y, Kim E, Ghodssi R, Rubloff GW, Culver JN, Bentley WE, Payne GF (2010) Biofabrication to build the biology-device interface. *Biofabrication* 2:022002
- Macqueen MO, Mueller J, Dee CF, Gebeshuber IC (2011) GEMS: A MEMS-based way for the innervation of materials. *Adv Mater Res* 254:34–37
- Mansour JM (2003) Biomechanics of cartilage (Ch 5). In: Oatis CA (Hrsg) *Kinesiology: the mechanics and pathomechanics of human movement*. Lippincott Williams and Wilkins, Philadelphia
- Meadows D, Meadows D (1972) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit (Übers: E Zahn). DVA, München
- Meadows DH, Meadows DL, Randers J, Behrens WW III (1972) Die Grenzen des Wachstums. Bericht des Club of Rome zur Lage der Menschheit. Deutsche Verlags-Anstalt, Stuttgart
- Morina A, Liskiewicz TW, Neville A (2007) Opportunities and challenges for obtaining effective lubricated engineering systems inspired by the lubrication of synovial joints. *Comp Biochem Physiol A* 146:135
- Nachtigall W (1997) Vorbild Natur: Bionik-Design für funktionelles Gestalten. Springer, Berlin
- Neville A, Morina A, Liskiewicz T, Yan Y (2007) Synovial joint lubrication – does nature teach more effective engineering lubrication strategies? *Proc IMechE Eng Part C J Mech Eng Sci* 221:1223–1230
- Nosonovsky M, Bhushan B (2007) Multiscale friction mechanisms and hierarchical surfaces in nano- and bio-tribology. *Mater Sci Eng R Rep* 58:162–193
- Nosonovsky M, Bhushan B (2010a) Green tribology: principles, research areas and challenges. *Phil Trans R Soc A* 368:4677–4694
- Nosonovsky M, Bhushan B (2010b) Theme issue green tribology. *Phil Trans Roy Soc A* 368:4675–4890
- Nosonovsky M, Bhushan B (2011) Green tribology: biomimetics, energy conservation, and sustainability. Springer, Heidelberg
- Odum HT (1951) Notes on the strontium content of seawater, celestite radiolaria and strontianite snail shells. *Science* 114:211–213
- Okada T, Kaneko M (Hrsg) (2010) Molecular catalysts for energy conversion. Springer series in materials science. Springer, Berlin
- Orsello CE, Lauffenburger DA, Hammer DA (2001) Molecular properties in cell adhesion: a physical and engineering perspective. *Trends Biotechnol* 19:310–316
- Pennisi E (1999) Microbes, immunity, and disease: Is it time to uproot the tree of life? *Science* 284:1305–1307

- Powers KW, Brown SC, Krishna VB, Wasdo SC, Moudgil BM, Roberts SM (2006) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials. Part VI. Characterization of nanoscale particles for toxicological evaluation. *Toxicol Sci* 90:296–303
- Priya S, Inman DJ (Hrsg) (2010) Energy harvesting technologies. Springer, New York
- Ramshaw JAM, Werkmeister JA, Glattauer V (1996) Collagen-based biomaterials. *Biotechnol Genet Eng Rev* 13:335–382
- Richert L, Vetrone F, Yi J-H, Zalzal SF, Wuest JD, Rosei F, Nanci A (2008) Surface nanopatterning to control cell growth. *Adv Mater* 15:1–5
- Round FE, Crawford RM, Mann DG (1990) The diatoms: biology and morphology of the genera. Cambridge University Press, Cambridge
- Rymuza Z (1989) Tribology of miniature systems. Tribology series. Elsevier Science Ltd, Amsterdam. ISBN 978-0444874016 576 pp
- Sanchez C, Arribart H, Giraud-Guille MM (2005) Biomimetism and bioinspiration as tools for the design of innovative materials and systems. *Nat Mater* 4:277–288
- Scherge M, Dienwiebel M (2010) Book of synopses 17th int coll tribology: solving friction and wear problems, Technische Akademie Esslingen TAE. In: Bartz WJ (Hrsg) Levers of tribological optimization. Ostfildern, S 13
- Schmitt OH (1982) Biomimetics in solving engineering problems. Talk given on April 26, 1982. <http://160.94.102.47/OttoPagesFinalForm/BiomimeticsProblem%20Solving.htm>. Zugegriffen: 18. Mär 2014
- Shapira P, Youtie J (2012) The economic contributions of nanotechnology to green and sustainable growth. OECD/NNI international symposium on assessing the economic impact of nanotechnology, Background paper 3. <http://www.oecd.org/sti/nano/49932107.pdf>. Zugegriffen: 19. Mär 2014
- Sigel A, Sigel H, Sigel RKO (Hrsg) (2008) Biomineralization: from nature to application. Metal ions in life sciences, Bd 2. Wiley, Chichester
- Starr C, Taggart R (2008a) Animal structure and function, (Biology: the unity and diversity of life), Bd 5. Brooks Cole, Stamford
- Starr C, Taggart R (2008b) Plant structure and function Vol. 4, biology: the unity and diversity of life. Brooks Cole, Stamford
- Symes MD, Kitson PJ, Yan J, Richmond CJ, Cooper GJT, Bowman RW, Vilbrandt T, Cronin L (2012) Integrated 3D-printed reactionware for chemical synthesis and analysis. *Nat Chem* 4:349–354. (<http://www.nature.com/nchem/journal/v4/n5/full/nchem.1313.html>). Zugegriffen: 18. Mär 2014
- Szathmáry E, Maynard Smith J (1994) The major evolutionary transitions. *Nature* 374:227–232
- Taleb NN (2012) Antifragile: Things that gain from disorder. Random House, New York
- Thomas R, d’Ari R (1990) Biological feedback. CRC, Boca Raton
- Thomas K, Sayre P (2005) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, Part I: evaluating the human health implications of exposure to nanoscale materials. *Toxicol Sci* 87:316–321
- Thomas T, Thomas K, Sadrieh N, Savage N, Adair P, Bronaugh R (2006a) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part VII: evaluating consumer exposure to nanoscale materials. *Toxicol Sci* 91:14–19
- Thomas K, Aguar P, Kawasaki H, Morris J, Nakanishi J, Savage N (2006b) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part VIII: international efforts to develop risk-based safety evaluations for nanomaterials. *Toxicol Sci* 92:23–32
- Thompson DAW (1917) On growth and form. Cambridge University Press, Cambridge
- Tiffany MA, Gordon R, Gebeshuber IC (2010) *Hyalodiscopsis plana*, a sublittoral centric marine diatom, and its potential for nanotechnology as a natural zipper-like nanoclash. *Pol Bot J* 55:27–41
- Tsuji JS, Maynard AD, Howard PC, James JT, Lam CW, Warheit DB, Santamaria AB (2006) Research strategies for safety evaluation of nanomaterials, part IV: risk assessment of nanoparticles. *Toxicol Sci* 89:42–50

- United Nations (1987) Our common future. Report of the World Commission on Environment and Development. <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf>. Zugegriffen: 18. Mär 2014
- Urbakh M, Klafter J, Gourdon D, Israelachvili J (2004) The nonlinear nature of friction. *Nature* 430:525–528
- van der Zwaag S (Hrsg) (2007) Self healing materials: An alternative approach to 20 centuries of materials science. Springer Series in Materials Science, Springer, Dordrecht
- Vernes A, Böhm J, Vorlauffer G (2010) *Ab initio* optical properties of tribological/engineering surfaces. *Tribol Lett* 39:39–47
- Vester F (1999) Die Kunst, vernetzt zu denken – Ideen und Werkzeuge für einen neuen Umgang mit Komplexität. DVA, Stuttgart, S 127 ff
- Vincent JFV (2005) Deconstructing the design of a biological material. *J Theor Biol* 236:73–78
- Vincent JFV, Bogatyreva OA, Bogatyrev NR, Bowyer A, Pahl A (2006) Biomimetics – its practice and theory. *J R Soc Interface* 3:471–482
- Vukusic P, Sambles JR (2003) Photonic structures in biology. *Nature* 424:852–855
- Wen S, Huang P (2012) Principles of tribology. Wiley, Singapore