

Bionik solarer Energiesysteme als Orientierungshilfe für Forschung und Technologieentwicklung

Einleitung

Die Solarenergie ist die bei weitem wichtigste Energiequelle für das Leben auf der Erde. Mit ihrer Hilfe haben lebende Systeme praktisch alle Klimazonen erobert. Sie reichen von den heißen Tropen über die trockenen Wüsten bis ins Hochgebirge, die arktischen Gebiete und in das Innere der Antarktis. Durch Entwicklung von ausgefeilten Energieumwandlungsmechanismen in Kombination mit wirksamer Energiespeicherung, ebenso wie extreme Materialsparsamkeit ist es den Lebewesen gelungen, letztlich nur mit Energie aus Sonne und Umwelt auszukommen. Auch der Mensch war, bis vor 200 Jahren, in dieses nachhaltige Energieversorgungssystem integriert. Blickt man aus technologischer Sicht auf die Leistungen der Natur, berücksichtigt ihre vielen effizienten Lebewesen, ihre schnellen Schwimmer, eleganten Flieger und nicht zuletzt auch das menschliche Gehirn, kommt man zum Schluss, dass die Natur letztlich den Beweis dafür geliefert hat, dass Solartechnologie nicht im Widerspruch zur Hochtechnologie steht sondern dass man dazu lediglich die richtigen Voraussetzungen entwickeln muss. Die Disziplin der Bionik beschäftigt sich mit dem Lernen von der Natur. Da Letztere ihre Materialien durch Selbstorganisation aufbaut und repariert was die Technik bisher nicht leistet, kann und will die Bionik keine technischen Kopien natürlicher Systeme anfertigen. Vielmehr geht es darum, die Prinzipien richtig zu verstehen, sie zu vereinfachen und mit technisch verfügbaren Materialien nachzuempfinden. Auch muss man berücksichtigen, dass die Natur mit ihren oft synergetischen Lösungen, andere und vielschichtiger Ziele verfolgt als der Mensch mit seinen technischen Produkten. Die Arbeitsrichtung der Bionik solarer Energiesysteme ist zu jung, um auf eine breitere Erfahrung zurückzugreifen. Deswegen sollen zunächst aus dem eigenen Arbeitsbereich drei

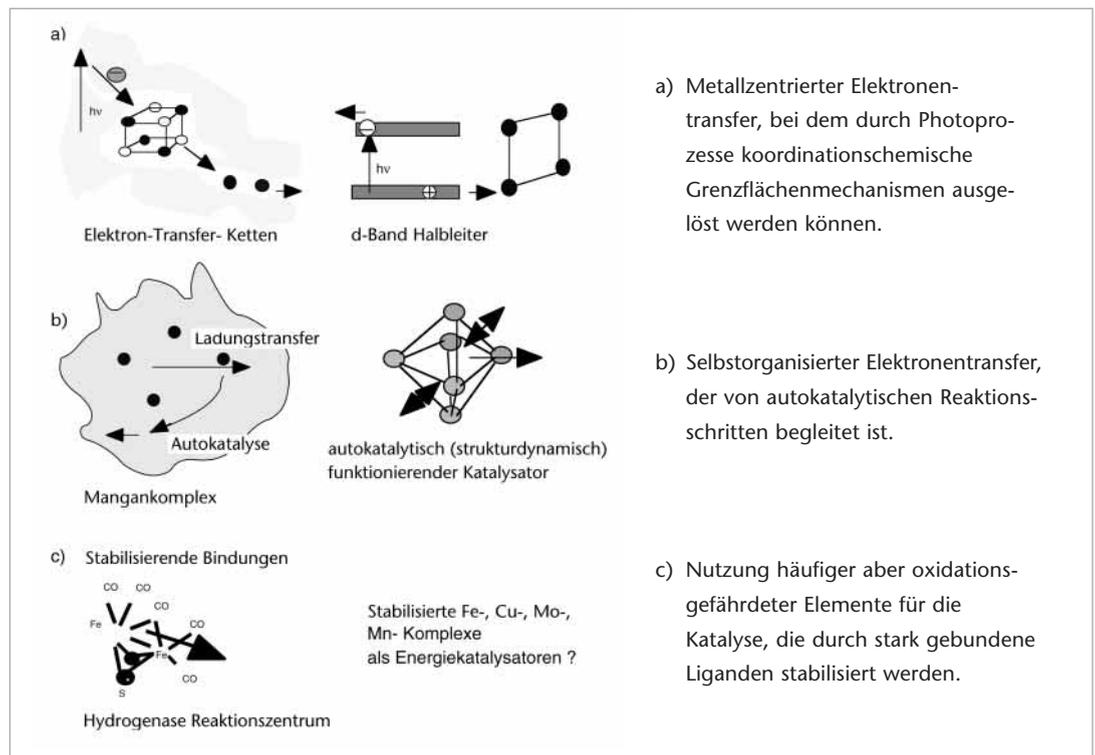
bionische Erkenntnisse im Zusammenhang mit der Photosynthese und der Energieumwandlungskatalyse vorgestellt werden, die zu sinnvollen Forschungsinitiativen geführt haben. Danach sollen eine Reihe von potentiellen bionischen Technologielösungen andiskutiert werden, bevor die Vision einer bionisch-photovoltaischen Zelle vorgestellt wird.

Bionisch motivierte Forschungsinitiativen zur Photosynthese und -katalyse

Über die Jahre hinweg wurden in der eigenen Arbeitsgruppe drei Forschungsinitiativen eingeleitet, deren Motivation einer genauen Analyse möglicher molekularbiologischer Abläufe in der Photosynthese entsprang (*Abb. 1*). Die erste Beobachtung war, dass entlang photosynthetischer Elektronentransferketten die Elektronenübertragung häufig über Metallzentren vermittelt wird. Die Erkenntnis war, dass auf diese Weise metallzentrierter Elektronentransfer möglich ist und somit koordinationschemische Mechanismen ablaufen. Die Konsequenz war, nach stabilen lichtempfindlichen Materialien zu suchen, bei denen nach Lichtanregung Ladungsträger ebenfalls metallzentriert übertragen werden können. Das Ergebnis war die Identifizierung einer Reihe von d-Band Halbleitern (MoS_2 , WS_2 , RuS_2 , FeS_2 , $\text{Ru}_2\text{Mo}_4\text{Se}_8$), welche photoelektrochemisch effiziente oder katalytisch sehr aktive Materialien ergaben [1, 2]. Darunter befindet sich auch RuS_2 , das zur Zeit das kinetisch wirksamste Material für die Spaltung von Wasser mit sichtbarem Licht darstellt (wenngleich eine Zusatzspannung nötig ist, da die Energielücke zu klein ist) [3].

Prof. Dr. H. Tributsch
HMI
tributsch@hmi.de

Abbildung 1
Drei Beispiele energetisch relevanter molekularbiologischer Mechanismen, die im Hinblick auf technische Modellsysteme entwickelt wurden.



Die zweite Forschungsinitiative betraf die hohe katalytische Fähigkeit für Mehrelektronenübertragungsreaktionen bei biologischen Energieumwandlungsmechanismen. Während Photosyntheseforscher in der Regel annehmen, dass positive Ladungen, die in den Mangankomplex fließen, über gewöhnliche elektrochemische Prozesse Sauerstoff aus Wasser frei setzen, fällt auf, dass kein einziger der vielen synthetisch hergestellten Mangankomplexe bisher diese Reaktion bewerkstelligte, noch dass es irgend ein technisches Katalysatematerial gibt, das auf der Basis von Mangan funktioniert. Dazu kommt noch, dass der Mangankomplex so labil ist, dass er z. B. bei der Kartoffelpflanze bereits bei 39° C zerstört wird. Mangan ist übrigens ein Element, das sehr leicht seine Koordination in Komplexen variieren kann. Auf der Basis dieser Widersprüche wurde ein neuer Elektronentransfermechanismus erarbeitet, der, im Gegensatz zur klassischen Theorie des Elektronentransfers (Markus-Theorie), nicht nahe am Gleichgewicht, sondern fern vom Gleichgewicht funktioniert. Durch die Mitwirkung von autokatalytischen Prozessen kommt es nicht nur zu einer viel schnelleren Elektronenübertragung, sondern auch zu wirklichen Mehrelektronenübertragungsprozessen, bei

denen das erste Elektron die nachfolgenden verklavt und somit Zwischenprodukte ausschließt [4, 5]. Zur Zeit wird nach synthetischen Katalysatoren gesucht, die diese Art von Selbstorganisation ermöglichen. Es müssen Komplexe sein, die während des Elektronentransfers dynamische Reaktionen zulassen.

Die dritte Forschungsinitiative, die sich gegenwärtig noch in einem frühen Stadium befindet, betrifft die Frage; warum die Biologie mit ihren vielseitigen Katalyseaktivitäten bei der Energieumwandlung mit häufigen Elementen wie Eisen, Molybden, Mangan oder Kupfer auskommt, während die chemische Technologie auf Platin, Rhodium, Palladium oder ähnlichen Edelmetallen bisher erzichten kann. Bei der Untersuchung eines bakteriellen Hydrogenasezentrums, bei dem das Bakterium mit Eisen-Schwefel-Komplexen auskommt und Wasserstoff ähnlich gut entwickelt wie Platin in künstlichen Katalysatoren, fiel eine wichtige Besonderheit auf: das Eisenzentrum wird durch stark gebundene kleine Liganden (CO, CN) so stabilisiert, dass es gegen eine Oxidation zu Eisenoxid geschützt ist. Man könnte also eventuell häufige und billige Katalysatoren einsetzen, wenn es gelingt, sie chemisch gegen

Oxidation zu schützen. Zur Zeit wird dies mit einem Brennstoffzellenkatalysator auf Rutheniumbasis studiert. Durch eine chemische Modifikation oxidiert er nicht zu RuO₂ und kann dadurch als wirksamer Sauerstoffreduktionskatalysator eingesetzt werden [6]. Das eigentliche Ziel ist aber, Eisenverbindungen für die Brennstoffumsetzung zu erschließen.

Bionik der Wärmedämmung

Durch bionische Betrachtung von Energiestrategien in der Natur lassen sich leicht relevante Vorbilder für relevante Energienutzung identifizieren [7]. Die Natur setzt für ihre vielfältigen Isolationsaufgaben im Wesentlichen nur drei Materialklassen ein: Zellulose, Chitin, Keratin in Kombination mit wenigen Zusatzstoffen (Abb. 2). Es gelingt ihr aber, durch eine extrem entwickelte Mikrostrukturierung eine Vielfalt von sehr unterschiedlich funktionierenden und wirksamen Dämmmaterialien zu erzielen.

Beispiele sind die Feder- und Pelzkleider vieler Tiere, die winzigste Lufträume einschließen und dynamisch einstellbar sind. Ein so optimiertes Federkleid gestattet es z. B. Kaiserpinguinen dem arktischen Winter im Freien zu trotzen. Bemerkenswert ist auch die volle biologische Rezyklierbarkeit dieser Materialien, in welchen vielfach sogar die intensivsten Farbtöne durch Mikrostrukturierung erzeugt werden (z. B. Tyndallstreuung, Reflexion an dünnen Schichten). Wenn man die Umweltprobleme betrachtet, die technische Dämmstoffe oft noch liefern (Glaswolle, Styropur, giftgetränkte Zellulose) fällt die chemisch-technische Perfektion auf, die biologische Systeme hier schon erreicht haben. Als Beispiel sei die Rinde der Sequoia genannt. Sie ist nicht nur extrem feuerfest sondern überdauert Jahrhunderte, ohne dass Mikroorganismen oder Insekten sie zerstören können (Abb. 2). Die Entwicklung umweltkompatibler und hocheffizienter Wärmedämmmaterialien ist eine wichtige Herausforderung für die Energieforschung.

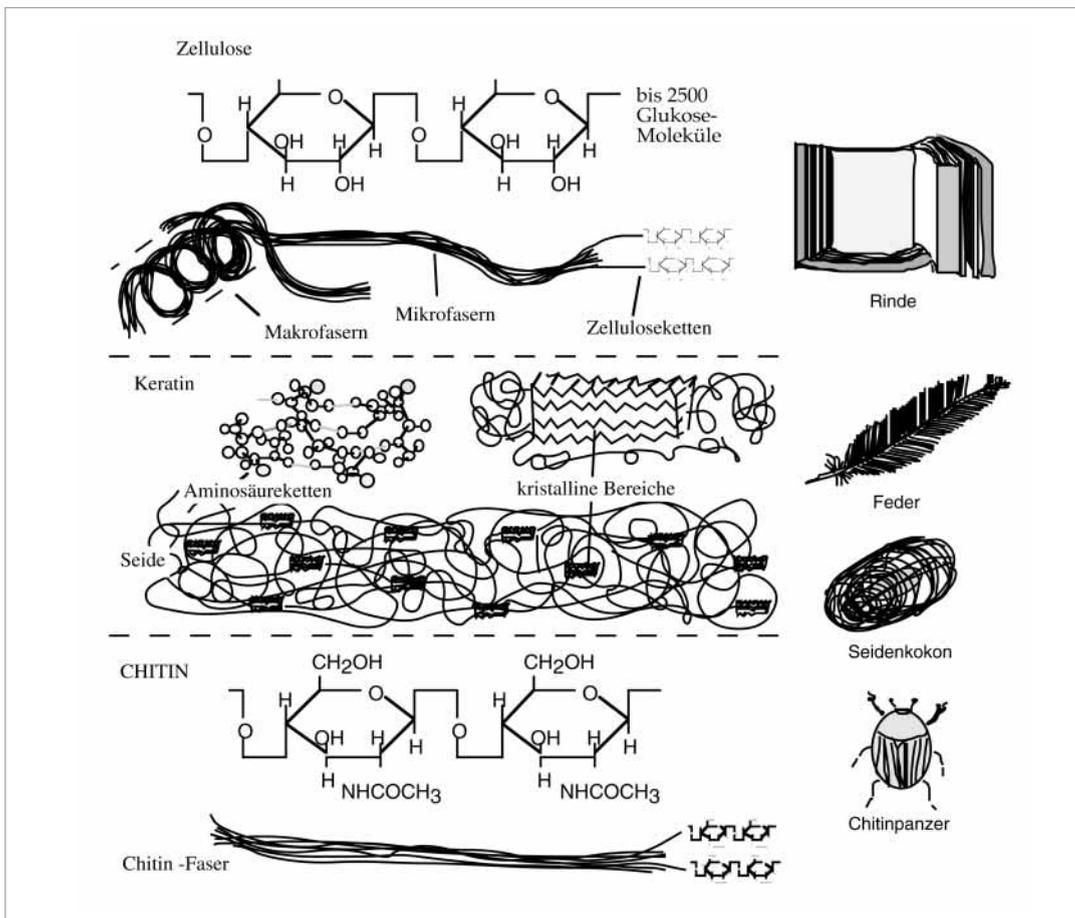


Abbildung 2
Hauptsächliche
Materialklassen für
die Wärmedämmung
in der Biologie
(Zellulose, Keratin,
Chitin und Beispiele
biologischer Anwen-
dungen)

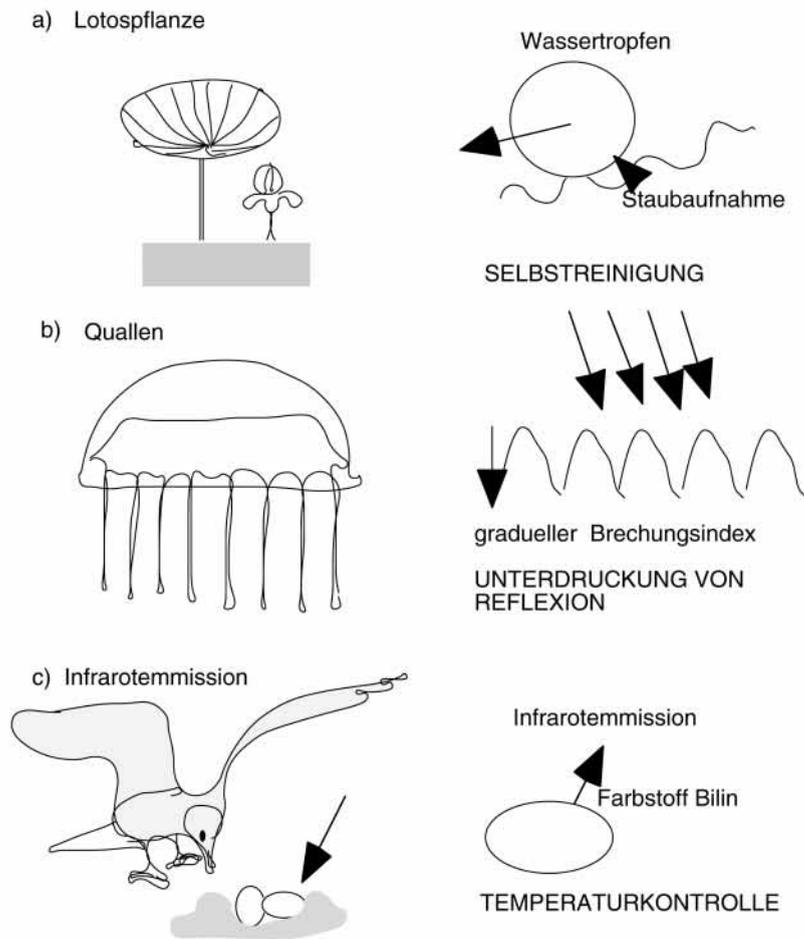


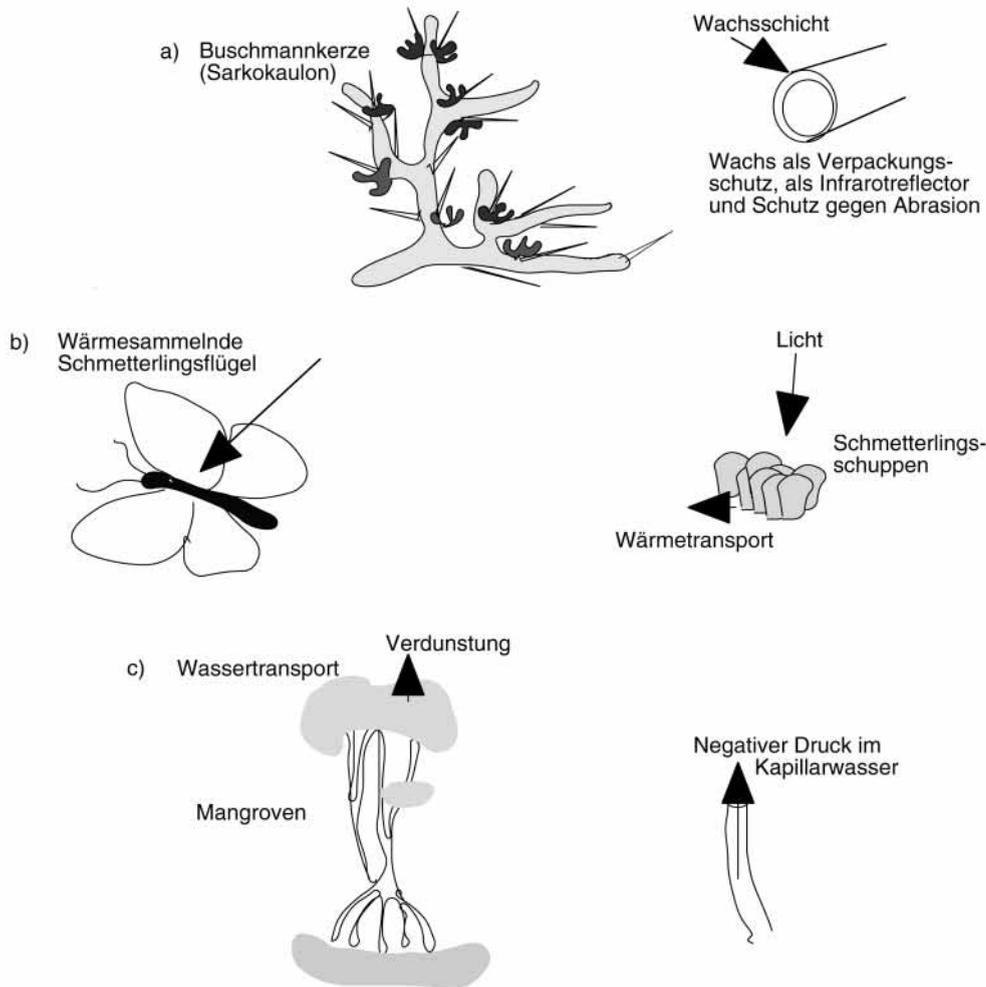
Abbildung 3
Beispiele energierelevanter Oberflächen-technologie bei biologischen Systemen:
a) Selbstreinigung,
b) Antireflexion und
c) Infrarotabstrahlung

Die Natur hat selbstverständlich auch die transparente Wärmedämmung entdeckt und bei vielen Lebewesen, vor allem im hochalpinen und arktischen Bereich, eingesetzt. Realisiert wird sie meistens über durchsichtige oder weißliche feine Härchen, die das Lichteinkoppeln lassen und es streuen, durch das Festhalten kleinster Lufträume den Abfluss von Wärme aber wirksam unterbinden. Ein Beispiel sind die wie Wattekneuel aussehenden Weidekätzchen, die sich sehr früh im Jahr entwickeln. Bei der arktischen Weide, die auf Spitzbergen gedeiht und wegen der harschen Witterungsverhältnisse so klein ist, dass sie nur wenige Zentimeter über dem Permafrostboden dahinkriecht, ist die transparente Wärmetechnik noch weiter entwickelt worden. Die gesamte Weide überzieht sich mit einem Flaumteppich, der die Lufträume stabilisiert und wie eine warme Decke die gesamte Pflanze überzieht.

Bionik von Oberflächen

Oberflächen spielen in der regenerativen Energienutzung eine hervorragende Rolle, weil durch sie die Energieflüsse kontrolliert werden müssen. Verschiedenartige Eigenschaften von Oberflächen müssen zu diesem Zweck kontrolliert werden. Abb. 3 zeigt wo wir von der Biologie noch lernen können. Als erstes Beispiel sei die Selbstreinigungsfähigkeit biologischer Oberflächen erwähnt. Der als "Lotuseffekt" popularisierte Vorgang besteht darin, dass durch eine mikroskopische Aufräumung der Oberfläche ihre Benetzbarkeit durch Wasser so verändert wird, dass die Tropfen abrollen und dabei Staub mitnehmen. Auch zukünftige Solarzellen könnten solche Oberflächen besitzen. Als zweites Beispiel sei die Antireflexionsstrukturierung von Oberflächen angeführt. Durch regelmäßige Fortsätze mit Dimensionen unter einer Wellenlänge kann man an Oberflächen einen graduellen Übergang des Brechungsindex erzielen, was die Lichtreflexion unterdrückt. Zahlreiche Lebewesen profitieren von solchen Einrichtungen, sei es die Hornhaut nächtlich jagender Insekten oder die Quallen, die im Meer unsichtbar bleiben möchten.

Zuviel Wärme ist nicht nur für die Photosynthese schädlich, sondern kann auch Leben bedrohen. Deswegen hat die Natur immer wieder versucht, die Wärme durch optimierte Abstrahlung im Infrarotbereich loszuwerden. Beispiele sind nicht nur die grünen Pflanzen, sondern z. B. auch die Eier von Möven, die im Sand ausgebrütet werden. Da die Möven die Eier häufig allein lassen müssen um zu jagen, müssen sie diese selbst gegen die Sonne schützen. Sie enthalten einen Farbstoff, Bilin, der Wärme wirksam im Infraroten abstrahlt und die Temperatur des Eies unter 30° C halten kann. Experimente mit ungeschützten weißen Eiern zeigen, dass ohne die Infrarotreflexion in der Mittagshitze ohne weiteres 45° C erreicht werden können, was für die Eier tödlich wäre. Viele solartechnische Anwendungen wären vorstellbar, denke man nur an die sich stark aufheizenden schwarzen Armaturen unter der Windschutzscheibe des Autos.



Abbildungen 4
Drei Beispiele möglicher Zukunftstechnologien für die solare Energieumwandlung: a) Wachsverpackung von Solarzellen, b) ultradünne Wärmekollektoren, c) Wassertransport und Meerwasserentsalzung über solare Verdunstung durch Mobilisierung kohäsiver Kräfte in Wasserkapillaren

Bionik solarer Energiesysteme: ein Weg zu wichtigen Innovationen

Aus der Vielzahl bionischer Vorbilder für die solare Energienutzung seien hier drei Beispiele ausgewählt, welche der Menschheit wesentliche technologische Innovationen liefern könnten (Abb. 4). Das erste Beispiel betrifft die Versiegelung photovoltaischer Systeme. Es ist erwiesen, dass die Verpackung unserer technischen Solarzellen rund ein Drittel des Kaufpreises verschlingt. Bekanntlich verpackt die Natur nicht mit Glas und Aluminium sondern nutzt Wachs. Sie schützt mit Wachs Blätter und Nadeln, Kaktusoberflächen und viele Früchte, aber auch Insekten. Wachs schützt nicht nur vor Feuchtigkeit, sondern erlaubt auch Infrarotreflexion oder schützt vor Abrasion durch

auffretende Sandteilchen. Dass Wachsbelege dauerhaft, d. h. 20-30 Jahre schützen könnten beweisen bereits die römischen Fresken. Sie sind in Pompeii heute noch vielfach durch die ursprüngliche dünne Wachsschicht geschützt, die einst aufgetragen worden ist. Ebenso könnten in vielen Fällen photovoltaische Zellen durch solche billigen Wachsschichten geschützt und im Notfall auch repariert werden. Das zweite Beispiel betrifft die Mobilisierung hydraulischer Kräfte durch solare Wasserverdunstung aus Kapillaren. Immer wieder wird die Reinigung, Bereitstellung und Entsalzung von Wasser als eine politische Zukunftsaufgabe dargestellt, von der einmal Krieg und Frieden abhängen könnten. Die Natur hat die technologischen Herausforderungen durch das Wasser bereits längst zufriedenstellend bewältigt. In der Natur wird über die Wasserverdunstung aus Kapillaren mehr Solarenergie umgewandelt

und genutzt (Wassertransport in Bäumen, Kühlung, Meerwasserentsalzung (Mangroven), Mobilisierung mechanischer Kräfte) als über die Photosynthese. Diese Mechanismen sind bisher technologisch nicht erschlossen. Die hauptsächliche Herausforderung besteht in der Aufrechterhaltung kohesiver Kräfte (in kapillarem Wasser), was eine präzise Optimierung der Kapillaroberflächen erfordern würde. Ein bemerkenswertes technisches Beispiel ist die Mangrove, die im Salzwasser steht und durch den Unterdruck in den Wasserkapillaren, die die Wasserverdunstung erzeugt, das Salzwasser durch Membrane zieht und auf diese Weise entsalzt. Das dritte Beispiel das hier erwähnt werden sollte, sind flexible Wärmekollektoren in ultraleichter Bauweise. Schmetterlinge in kühlen Regionen (z. B. im Gebirge tropischer Länder) nutzen die Flügel als hochwirksame solare Wärmekollektoren (in kurzer Zeit Aufheizung auf 60° C), die die Wärme auch zum Thorax leiten, wo sie für die Flugmuskulatur gebraucht wird. Die eingesetzte Material- und Systemtechnologie könnte wegberaubend für die Entwicklung ultraleichter flexibler Solarkollektoren für Wärme werden.

Wie werden bionische Energiesysteme, z. B. Photovoltaikkollektoren, aussehen?

Eine generelle Erfahrung beim Studium biologischer Systeme für die solare Energieumwandlung und -nutzung ist, dass die Natur in der Regel mehrere parallele Energietechnologien entwickelt und optimiert. Es ist zu erwarten, dass auch künstliche solartechnologische Produkte dieser Regel werden folgen müssen, um eine hohe Effizienz zu erzielen. Lassen Sie uns zum Abschluss darüber nachdenken, wie eine bionische photovoltaische Zelle der Zukunft aussehen könnte. Es ist ja bekannt, dass auch die Natur Licht in elektrische Energie umwandelt. Diese elektrische Energie aber weiter transformiert in chemische Produkte. Ein wesentliches Element photosynthetischer Ladungstrennung ist der Transport von Elektronen entlang von Proteinketten, die sich selbst aneinander reihen. Die Entwicklung der photovoltaischen Zelle vom jetzigen Marktprodukt

zu einem zukünftigen bionischen Produkt wird eine radikale Veränderung des Syntheseprozesses für das photovoltaische Material erleben. *Abb. 5* zeigt ganz oben eine konventionelle Dünnschichtzelle mit gut kristallisierten Halbleiterschichten. Bekanntlich sind diese Schichten zeitraubend und schwierig herzustellen. In der Farbstoffsensibilisierungszelle, die in der Mitte von *Abb. 5* dargestellt ist und die ursprünglich vom Autor als bionisches Produkt für die Ladungstrennung vom angeregten Chlorophyll konzipiert worden ist [8, 9], ist das photovoltaische Material wesentlich unproblematischer (Elektroneninjektion in TiO₂ oder ZnO, wo Elektronen Majoritätsladungsträger sind). Die Farbstoffsolarzelle ist im Wesentlichen durch eine sehr große Grenzfläche charakterisiert. Wenn man die Elektronentransferstrukturen in der photosynthetischen Membran aber konsequent berücksichtigt, müsste ein weiter verbessertes und vereinfachtes bionisches Modell für die photovoltaische Zelle aus einem Kompositmaterial bestehen, wie es in *Abb. 5* unten dargestellt ist. Ein solches Kompositmaterial müsste aus einer lichtabsorbierenden Komponente bestehen und aus einer elektronenabsorbierenden Komponente, die das Elektron so lange irreversibel zurückbehält, bis es aus der dünnen (100 nm) Photovoltaikschicht entkommt und die Kontaktelektroden (ITO auf der einen Seite und Aluminium auf der anderen) erreicht. Ein solches Kompositmaterial würde jeweils eine Elektronentransferkette zum Aluminiumkontakt und eine Löchertransferkette zum transparenten Kontakt ITO bereitstellen. Die Realisierbarkeit solcher Kompositmaterial-Solarzellen ist diskutiert worden und hat bei Gemischen von Polymeren mit Fullerenen bereits Energieausbeuten von 3,2 % erreicht [10]. Konsequenterweise müssten die lichtinstabilen und wenig absorbierenden Polymere durch hochabsorbierende Sulfidmaterialien ersetzt werden. Außerdem ist es notwendig, die Elektronendonatoren und -akzeptoren molekular zu verbrücken, um entsprechend günstige Elektronenübertragungen zu erzielen.

Die Natur arbeitet übrigens nicht nur mit Elektronentransferketten im Zusammenhang mit der solaren Energieumwandlung sondern auch mit Protonenkreisläufen. Das heißt, sie pumpt Elektronen mit Licht, erzeugt Protonen-

gradienten und Protonenströme, über die mechanische Arbeit (z. B. Flagellarotation bei Bakterien) bzw. chemische Produkte (z. B. Adenosintri-phosphat) bereitgestellt werden. In Analogie zu solchen natürlichen Beispielen (wie bei Halobakterium halobium) könnten auch photovoltaische Zellen entwickelt werden in denen das Licht nicht Elektronen sondern Protonen bewegt. Die grundlegenden Konzepte dazu sind in einer anderen Arbeit diskutiert worden [11].

Abschließend sei festgestellt, dass die Natur auf dem Gebiet solarer Energienutzung viele Vorbilder für eine sinnvolle Forschungsorientierung bzw. für interessante technologische Anwendungen bereitstellt, dass aber eine flexible Forschungspolitik vorausgesetzt werden müsste, um die Chancen bionischer Forschung wahrzunehmen.

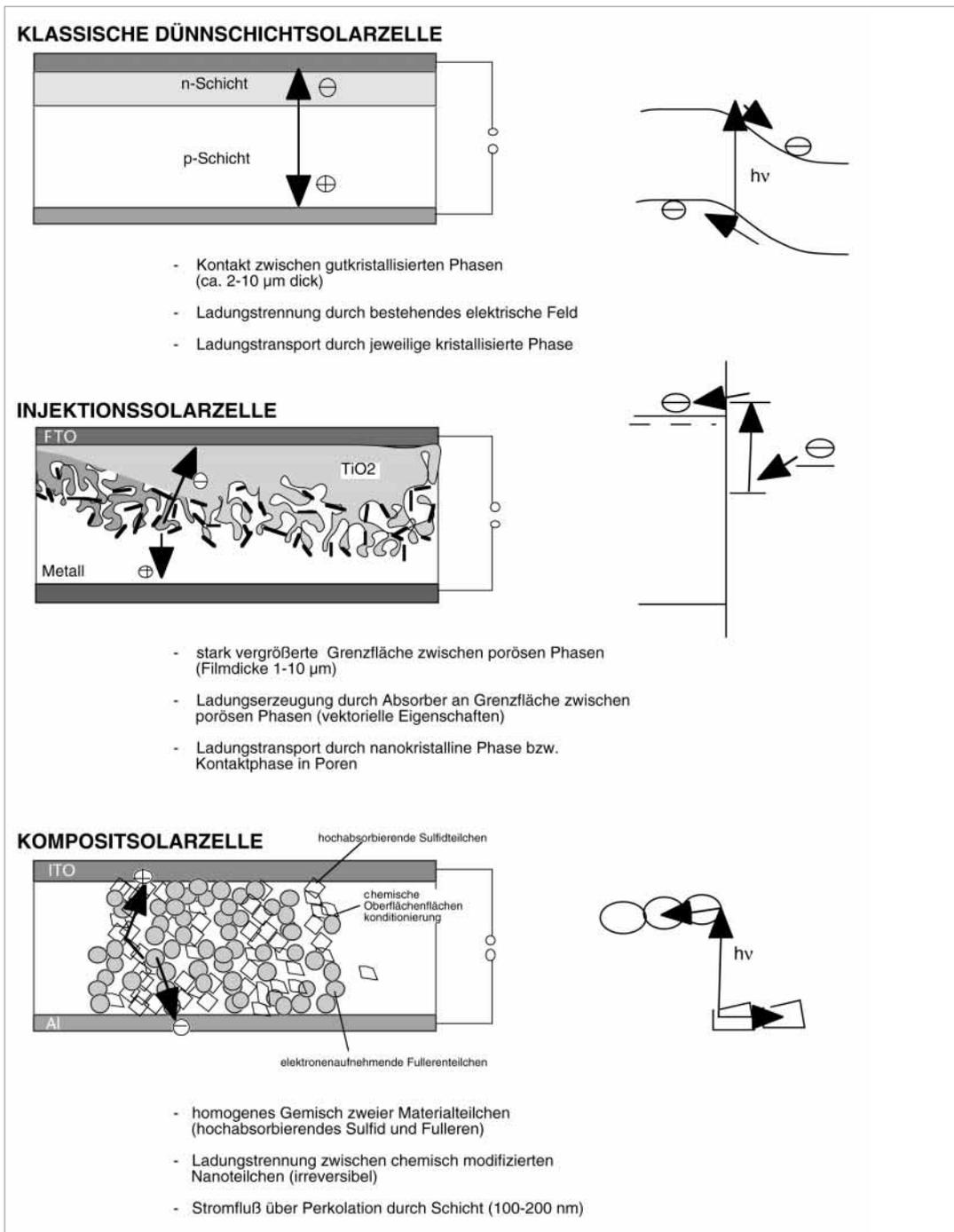


Abbildung 5
Klassische Dünnschichtsolarzelle (a), verglichen mit Injektions-solarzellen (b) und Komposit-solarzelle als mögliches photovoltaisch-bionisches Produkt

Referenzen

- [1] H. Tributsch: Photoelectrocatalysis in Photocatalysis (eds. N. Serpone, E. Pelizzetti), J. Wiley & Sons Inc., N.Y. (1968) 339-383
- [2] N. Alonso-Vante, H. Tributsch: Nature 323 (1986) 431
- [3] H.-M. Kühne, H. Tributsch: Ber. Bunsenges. Phys. Chem., 88 (1984) 10
- [4] L. Pohlmann, H. Tributsch: Electrochim. Acta, 42 (1997) 2737
- [5] H. Tributsch, L. Pohlmann: Science 279 (1998) 1891
- [6] H. Tributsch, M. Bron, M. Hilgendorff, H. Schulenburg, I. Dorbandt, V. Eyert, P. Bogdanoff, S. Fiechter: Appl. Electrochemistry, im Druck
- [7] H. Tributsch: Wie das Leben leben lernte, Physikalische Technik in der Natur, DVA 1976; BIONA Report 9 (1995) 147; Pharmazeutische Zeitung 141 (1996) 11
- [8] H. Tributsch, M. Calvin: Photochem. Photobiol. 14 (1971) 95
- [9] H. Tributsch: Photochem. Photobiol. 16 (1977) 261
- [10] N. S. Saricifci: Vortrag und Abstract, QUANTSOL 2000, Selva Gardena, Italien, März 2000
- [11] H. Tributsch: Ionics, Ionics 6 (2000)