FASZINATION Forschung

Harte Arbeit an weicher Materie

Was haben Seidenblusen, Disketten und die Membranen lebender Zellen gemeinsam? Alle drei bestehen aus weicher Materie: Betrachtet man einzelne Moleküle, scheinen sie ungeordnet zu sein, doch auf einer größeren, supramolekularen Skala bilden sie geordnete Strukturen. Unordnung und Ordnung spielen zusammen und beeinflussen die Eigenschaften der weichen Materie. An den Max-Planck-Instituten für Polymerforschung in Mainz und für Kolloid- und Grenz-Flächenforschung in Golm widmen sich Wissenschaftler dieser "Soft Matter".

Hans Wolfgang Spiess mit dem Probenhalter eines NMR-Spektrometers (im Hintergrund).



ie kulturelle Entwicklung der Menschheit ist untrennbar mit der Entwicklung neuer, hochwertiger Materialien verbunden", sagt Prof. Hans Wolfgang Spiess, Geschäftsführender Direktor des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung in Mainz: "Nicht umsonst spricht man von der Steinzeit, der Bronzezeit oder der Eisenzeit." Nach diesen harten Vorzeiten sind wir heute offenbar in der Ära der weichen Materie angekommen: Seit # Jahrtausenden sind Leder, Naturfasern wie Wolle und Seide oder Papier wichtige Wirtschaftsgüter. Und in den vergangenen fünfzig Jahren 🖔 traten die Kunststoffe einen Siegeszug ohnegleichen an. Selbst die Information, heute gern als einer der wichtigsten Rohstoffe bezeichnet, kann nur durch Kunststoffe massenhaft erzeugt, gespeichert und verbreitet werden. Ohne lichtempfindliche Lacke gäbe es keinen Mikrochip – auch Disketten, CD-ROMs und Videobänder bestehen aus beschichteten Kunststoffen.

Zur wahren Meisterschaft in der Entwicklung weicher Materialien hat es jedoch die Natur gebracht. Seit Milliarden von Jahren, seitdem es Leben auf der Erde gibt, entstehen hoch komplexe Strukturen aus weicher Materie. Raffiniert ist oft ihre Entstehungsweise: Die Moleküle organisieren sich selbst zu komplexen Zellmembranen, die wichtige Lebensfunktionen ausführen. Oder sie bilden extrem reißfeste Fasern, die Pflanzen Form und Halt geben. Biologen, Chemiker, Materialforscher und Physiker versuchen, die erstaun-

meint: "Weiche Materie entfaltet ihre komplexen Eigenschaftskombinationen durch genau aufeinander abgestimmte Bereiche von Ordnung und Unordnung der Bausteine." Und Professor Helmuth Möhwald, Direktor der Abteilung "Grenzflächenforschung" am MPIKG, ergänzt: "Etwas vereinfacht gesagt, zeichnen sich weiche Materialien dadurch aus, dass ihre Struktur durch mehrere schwache Kräfte bestimmt wird. Daher hängen ihre Eigenschaften sehr stark von Umgebungs- und Herstellungsbedingungen ab."

Die Antworten der drei Wissenschaftler sind typisch in ihrer unterschiedlichen Sichtweise. Manche Forscher bezeichnen mit weicher Materie fast flüssige, andere dagegen auch sehr reißfeste Materialien wie Natur- oder Kunstfasern. Doch ob flüssig oder fest – es gibt Eigenschaften, die alle Formen weicher Materie gemeinsam haben. Was die drei Forscher mit Fachbegriffen (die

auf S. 60 erklärt sind) skizziert haben, kann in einfachen Worten etwa wie folgt beschrieben werden:

- ► Erstens bilden in weicher Materie die Moleküle eine viel ungeordnetere Struktur als es die Atome oder Moleküle im Kristallgitter eines echten Festkörpers tun. Andererseits wirbeln sie nicht so hochgradig ungeordnet durcheinander wie in einem Gas. Weiche Materialien sind auch keine richtigen Flüssigkeiten, aber Bereiche, die flüssig sind, können entscheidend zu ihren Eigenschaften beitragen.
- ► Zweitens sind die Strukturen weicher Materialien flexibel, aber trotzdem stabil.
- Drittens kann weiche Materie spontan supramolekulare Strukturen durch Selbstorganisation bilden. Ohne diese besonders interessante Fähigkeit könnte kein natürlicher Organismus entstehen und leben

Am Mainzer Max-Planck-Institut für Polymerforschung beschäftigen sich die Wissenschaftler mit einer Sorte weicher Materie, ohne die Leben (und unser Alltagsleben heute) nicht denkbar wäre: natürliche und

Klaus Müllen beherrscht Polymere auch in Form eines Fußballs...

lichen Konstruktionen und Herstellungsverfahren der Natur zu verstehen und nachzubilden.

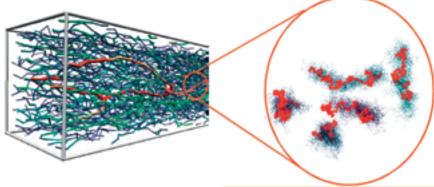
"Der Begriff weiche Materie bezieht sich auf Aggregatzustände, die zwischen dem geordneten Festkörper und dem ungeordneten Gas liegen. Es handelt sich typischerweise um supramolekulare Strukturen und Kolloide in flüssigen Medien. Besonders komplexe Beispiele findet man im Bereich der Biomaterialien", sagt Prof. Reinhard Lipowsky, Direktor der Abteilung "Theorie" am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung (MPIKG) in Golm bei Potsdam. Wolfgang Spiess



52 MaxPlanckForschung 3/2001 MaxPlanckForschung 53

künstliche Materialien, die aus Polymeren bestehen. Polymere sind große Moleküle, in denen sich Hunderte oder Tausende gleicher, einfacher Grundbausteine, die Monomere, aneinander reihen. Jeder Kunststoff, von der Kontaktlinse bis zur modernen Gewebefaser, ist ein Polymer. Eine noch gewaltigere Vielfalt an Polymeren birgt die Natur. Die Träger der Erbinformation des Lebens, die Nukleinsäuren, sind Polymere. Proteine - also Eiweiße - sind genauso Polymere wie die Stärke aus Kartoffeln oder Getreide. Polymere verleihen tierischem Gewebe in Form von Kollagenfasern Elastizität und zugleich Stabilität. Dieselbe Funktion erfüllen andere Polymere, die Zellulosefasern, in pflanzlichem Gewebe.

In Mainz spielen zwei Arbeitsgruppen bei der Analyse der Eigenschaften der Polymere eine besondere Rolle. Sie entwickeln immer genauere Instrumente, um in die Welt der Moleküle hineinschauen zu können. Dank dieser Sehhilfen können die Forscher in den Labors viel bes-



ser verstehen, welche Eigenschaften die Polymermoleküle haben. Sie können viel gezielter als früher Materialien untersuchen und neu ent-

Eine dieser Sehhilfen ist die Computersimulation. Die Experten hierfür gehören zur Arbeitsgruppe "Theorie der Polymere", die von einem der Institutsdirektoren, Prof. Kurt Kremer, geleitet wird. Die Forscher bauen aus einzelnen, virtuellen Molekülen das zu simulierende Polymer-Material auf und berechnen seine Eigenschaften. Zwar sind weiche Materialien immer noch zu komplex,

Abb. 1: Diese dreidimensionale "Momentaufnahme" aus einer Mainzer Computer-Simulation zeigt, wie die langen Polymer-Kettenmoleküle im geschmolzenen Polymer fließen.



Abb. 2: Das eingeschobene Reparaturrohr, bevor es aufgeblasen wird.

simulieren (Abb. 1). Dabei lernen sie, wie sich die einzelnen Moleküle im Polymer verhalten. Auch wenn eine Simulation virtuell ist, schafft sie doch wie eine Lupe einen Einblick in die molekularen Prozesse, die in echten Polymeren stattfinden.

> ein realitätsnahes Bild der untersuchten Materialien zeichnen können, müssen sie durch handfeste Messdaten gleichsam festen Boden unter die Füße bekommen. Diese Daten liefert die Arbeitsgruppe "Polymer-Spektroskopie" von Hans Wolfgang Spiess. Die Spektroskopie ist die zweite Sehhilfe für die Materialentwickler in den Labors. Hier werden die Materialproben aus den Labors mit verschiedenen Verfahren durchleuchtet. Besonders wichtig ist die NMR-Spektroskopie. NMR steht

Damit die Computersimulationen

um sie im Computer exakt in allen

Details nachbilden zu können. Doch

die wesentlichen Eigenschaften kön-

nen die Theoretiker verblüffend gut

skopikern können die Materialforscher in Mainz sehr effektiv experimentieren. Im Mainzer Institut ist neben der Grundlagenforschung auch die angewandte Forschung wichtig, bei der marktreife Produkte entstehen sollen. Sogar herkömmliche Massenkunststoffe können die Mainzer so weiterentwickeln, dass sie ganz neue Eigenschaften bekommen: Zum Beispiel Rohrleitungen aus Polyethylen - dem Kunststoff, aus dem Plastiktüten sind.

Ein Beispiel für eine erfolgreiche Industriekooperation des Max-Planck-Instituts für Polymerforschung ist die Entwicklung eines Kunststoffs für Rohrsanierungen gemeinsam mit einer Tochter des ehemaligen Hoechst-Konzerns. Wer hatte nicht schon einmal massiven Ärger mit Rohrleitungen? Nicht nur Rohre aus Keramik oder Metall, sondern auch PVC-Kunststoffrohre können Risse bekommen oder porös werden. "Amerikanische Rohrher-

steller haben deswegen bereits eine Milliarde US-Dollar Schadenersatz zahlen müssen, das entspricht dem Jahresetat der Max-Planck-Gesellschaft", erwähnt Hans Wolfgang Spiess beiläufig.

HIGH-TECH-ROHRSANIERER

Seine Gruppe hat entscheidend zur Entwicklung eines Produkts beigetragen, das die Sanierung von Gasund Wasserrohren raffiniert vereinfacht. Es ist ein flexibles Polyethylenrohr. Die Sanierer schieben es zuerst zusammengefaltet in das alte Rohr hinein. Sobald es in Position ist, blasen sie es einfach auf - fertig! Das neue Rohr schmiegt sich an die Wand des kaputten Rohrs an, überbrückt lecke Dichtungen und Risse und dichtet es auf diese Weise vollkommen ab (Abb. 2).

So genial einfach diese Idee ist, sie stellt extrem gegensätzliche Anforderungen an den verwendeten Kunststoff: Er muss einerseits sehr flexibel sein, zugleich muss er jedoch hohem Druck standhalten. Weil er über Jahrzehnte nicht altern darf, schafft die Flexibilität ein Problem.

Kurt Kremer leitet die Mainzer Theorie-Abteilung.

für "Nuclear Magnetic Resonance", zu Deutsch kernmagnetische Resonanz. Die NMR nutzt aus, dass viele Atomkerne sich wie winzige Magnete verhalten. Ein NMR-Spektrometer regt in einem starken Magnetfeld diese Kerne dazu an, elektromagnetische Signale zu senden. Daraus können die Wissenschaftler ableiten, wie das untersuchte Material aufgebaut ist. Spiess und seine Mitarbeiter haben neue Festkörper-NMR-Verfahren entwickelt, die speziell für die Aufklärung der Struktur von Polymermaterialien geeignet sind.

Durch die Zusammenarbeit mit den Theoretikern und den Spektro-



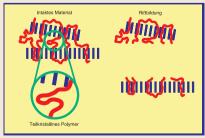


Abb. 3 links: Die Langkettenmoleküle (rot) halten im unbeschädigten Kunststoff die Kristalline (blau) zusammen. Rechts: Unter Stress reißen die Ketten und der Riss öffnet sich.

Flexibilität basiert nämlich auf einer hohen Fließfähigkeit der Moleküle im Kunststoff. Dadurch neigen die Moleküle jedoch dazu, einem Stress allmählich nachzugeben. Die Rohre altern und können an stark belasteten Stellen reißen.

Zunächst mussten die Mainzer Forscher verstehen, wie sich im verwendeten Material aus Polyethylen (PE) solche Risse ausbilden. Dazu entwickelten sie ein spezielles NMR-Verfahren, das ihnen zeigte, was während des Alterns mit den Molekülen geschieht. PE ist ein typi-

EIN JUNGES FORSCHUNGSGEBIET

Als der französische Physiker Pierre-Gilles de Gennes 1991 den Nobelpreis für Physik erhielt, wurde ein Forscher geehrt, den viele den "Vater der weichen Materie" nennen. Er hatte wichtige theoretische Beiträge zu einem jungen Forschungsgebiet geliefert, das erst in den achtziger Jahren Konturen annahm. Neben neuen theoretischen Modellen trugen dazu auch bessere Messmethoden und die wachsende Leistungsfähigkeit von Computern bei. So fanden die Forscher, dass die Eigenschaften sehr unterschiedlicher und komplex aufgebauter Materialien ein verbindendes Element aufweisen: das Zusammenspiel von Ordnung und Unordnung auf der Ebene der Moleküle. Ob fast flüssig oder sehr reißfest – diese Materialien sind immer flexibel. Deshalb wurden sie "Soft Matter", also weiche Materie getauft.

sches weiches Material, das seine Eigenschaften dem Zusammenspiel zwischen Ordnung und Unordnung verdankt. Es besteht aus kristallinen Bereichen, in denen die langen Molekülketten des Polymers hoch geordnet wie Spaghetti in einer Tüte nebeneinander liegen. Um diese Kristallite wickeln sich lange Kettenmoleküle wie unordentliche Fadenknäuel. Sie halten die Struktur zusammen. Unter Stress - etwa durch zu hohen Druck - können diese Kettenmoleküle reißen. Geben mehrere benachbarte Ketten nach, dann entsteht eine Schwachstelle im Material. Mit der Zeit wachsen solche Schwachstellen, bis sich Risse öffnen (Abb. 3).

Nachdem die Max-Planck-Forscher den Alterungsmechanismus aufgeklärt hatten, konnten die Industrieforscher den Kunststoff gezielt verbessern, indem sie die Kettenverbindungen zwischen den Kristalliten verstärkten. Mit dem modifizierten Kunststoff produziert die Industrie nun flexible Rohre, die bis zu fünfzig Mal länger halten als bisher.

Weiche Materialen der Zukunft könnten auch völlig neue Eigenschaften haben. Zum Beispiel könnten sie Licht in elektrischen Strom umwandeln. Solarzellen haben ein enormes Wachstumspotenzial. Heute bestehen sie aus Silizium, also einem harten und spröden Material mit eingeschränkten Einsatzmöglichkeiten. Könnten Solarzellen auch als leichte, biegsame Folien hergestellt werden, so würden sie ganz neue Anwendungsgebiete erschließen.

SOLARZELLEN AUF FOLIEN

Die Arbeitsgruppe von Prof. Klaus Müllen, einem weiteren Direktor am Mainzer Institut, entwickelt Folien aus organischen Materialien, die Licht in elektrischen Strom umwandeln können. Die Grundbausteine des neuen Materials sind Kohlenstoffato-

Wolfang Knoll, Direktor der Mainzer Materialforschung,

muss wie jeder Forscher Papierberge bewältigen.

me in Form von Grafit, der uns im Alltag als Ruß oder auch im Bleistift begegnet. Die Kohlenstoffatome bilden im Grafit wabenförmige Gitter, die leicht gegeneinander zu verschieben sind. Zuerst synthetisieren die Wissenschaftler auf einer Grafitoberfläche winzige Grafitinseln. Sie haben die Form eine Hantel oder einer Acht. Abb. 4 zeigt, welch regelmäßiges Muster diese Inseln auf der Oberfläche ausbilden.

Nun entwickeln die Inselstrukturen ein erstaunliches Verhalten: Sie stapeln sich von selbst zu mikroskopischen Doppelsäulen. Diese Säulen können das eingefangene Licht in Abb. 4: Auf einer Grafitoberfläche organisieren sich hantelförmige Grafitinseln. Zwei benachbarte Inseln haben etwa 3 nm Abstand.



Abb. 5: Wie die Mainzer Chemiker Nanoobjekte herstellen: Aus dem Ausgangsmaterial links oben entstehen durch unterschiedlich gesteuerte Quellen Blöcke, die verschiedene Nanostrukturen (gelb) enthalten. Lösungsmittel lösen den Polymerblock (blau) auf und geben die Nanobauklötze frei.

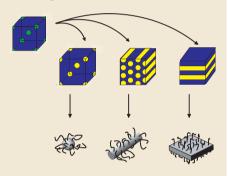


Abb. 6 : Eine mehrschichtige Nanokapsel entsteht: Der Kern wird schrittweise mit jeweils entgegengesetzt geladenen Polymermolekülen (rot oder blau) beschichtet (A bis D). Danach löst Säure den Kern heraus (E), übrig bleibt die fertige Hohlkapsel (F).

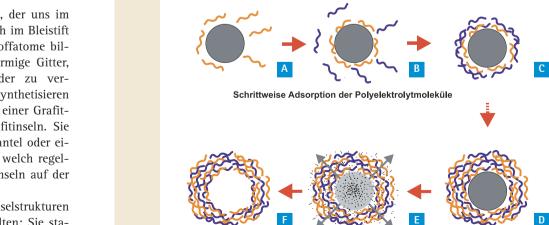
elektrischen Strom umwandeln. Ob die Säulen effizient arbeiten, hängt entscheidend von ihrer Gestalt ab. Die Wissenschaftler stießen wieder einmal auf die typische Eigenschaft des weichen Materials: Eine definierte "geordnete Unordnung" in den Stapeln macht die Säulen elektrisch so gut leitfähig, dass sie sich für Solarzellen eignen. Noch ist diese Entwicklung erst am Anfang. Doch vielleicht tragen wir eines Tages sogar Jacken, die die Akkus von Handys oder Walkmans mit Solarenergie aufladen können.

Kaum etwas fasziniert Forscher heute mehr als Nanoobjekte, die nur einige bis einige Hundert Milliardstelmeter groß sind. Die Arbeit an Nanoobjekten erweitert das Wissen über die chemischen, biochemischen und physikalischen Prozesse, welche die Vielfalt unserer Welt hervorbringen. Dabei dringen die Wissenschaftler gerade erst richtig in die Nanowelt ein (MaxPlanckForschung 3/2000). Und so verwundert es kaum, dass die heutige Forschung manchmal an das Spiel kleiner Kinder erinnert: Kinder hantieren mit Bauklötzen und "be-greifen" dadurch die Welt - Wissenschaftler spielen mit winzigen Nanobauklötzen, um die Eigenschaften der Nanowelt kennen und beherrschen zu lernen. Allerdings ist schon die Herstellung der Nanobauklötze selbst

eine Herausforderung an die heutige Experimentiertechnik.

Dr. Ulrich Wiesner, heute an der Cornell-Universität in den USA, hat mit Kollegen der Gruppe von Hans Wolfgang Spiess solche Nanoobjekte aus organisch-anorganischen Hybridmaterialien erzeugt. Aus solchen Materialien werden zum Beispiel Kontaktlinsen, kratzfeste Beschichtungen und Zahnfüllungen gemacht. Sie basieren auf zwei Phasen, die miteinander gemischt sind. Die eine Phase ist im Sprachgebrauch der Chemiker "organisch", sie besteht aus langkettigen Polymermolekülen. Der Einfachheit halber nennen wir sie hier Phase O. Die andere Phase ist "anorganisch", sie wird hier Phase A getauft. A wird aus kleineren Molekülen gebildet, die Metallatome (Aluminium) und eine Verbindung namens Silan enthalten. Silane bestehen aus Wasserstoff und dem Grundelement von Sand, dem Silizium. Sie sind übrigens die anorganischen Gegenspieler zu den Kohlenwasserstoffen der organischen Chemie.

Phase 0 ist ein weiches Material, A hingegen hart wie Gläser oder Keramiken. Die ausgeklügelte Mainzer Synthese geht nun vereinfacht in folgenden Schritten vor. Zuerst lösen die Chemiker Phase O in einem organischen Lösungsmittel auf und geben eine bestimmte Menge A hinzu. Dann kondensieren sie das so erhaltene Komposit aus, sodass es fest wird. Verblüffenderweise entstehen dabei durch Selbstorganisation sehr regelmäßige Nanostrukturen. Noch verblüffender: Die Form der Strukturen lässt sich über das Mischungsverhältnis der Phasen A und O genau steuern. Solange die Phase A nicht dominiert, bildet sich ein Polymerblock. Er trägt die Nanostrukturen in sich, die aus A und O entstanden sind. Je nach Mischungsverhältnis der Phasen während der Synthese sind das entweder Kugeln, Zylinder oder quaderförmige Schichten (Abb. 5, oben). Um diese Nanoobjekte freizulegen, müssen die Chemiker nun nur noch den Polymerblock auflösen



Entfernung des MF-Kerns

Fertiges Produkt:

eine Polyelektrolytkapsel

56 MAXPLANCKFORSCHUNG 3/2001 3/2001

Reinhard Lipowsky und seine Mitarbeiter entwerfen winzige Membranmaschinen.

(Abb. 5, unten). Neben ihrer Winzigkeit haben die Mainzer Nanobauklötze eine weitere Besonderheit: Aus ihren Oberflächen ragen lange Kettenmoleküle wie Haare heraus. Wer weiß, für welche Überraschung diese Haare noch gut sind ...

Auch am Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Golm gibt es eine enge Zusammenarbeit zwischen Experimentatoren und Theoretikern aus Chemie, Physik und Materialwissenschaften. Zu den Experimentatoren zählt das Team um Helmuth Möhwald. Es erfand ein modulares System für Nanokapseln, die als Nanoverpackungen eingesetzt werden können. Für diese bahnbrechende Arbeit gewann gerade einer der beteiligten Jungforscher, Dr. Gleb Sukhorukov, den mit 2,25 Millionen Mark dotierten Sofia Kovalevskaja-Preis der Alexander von Humboldt-Stiftung (siehe auch S. 88 dieser Ausgabe). Die Golmer Kapselherstellung baut auf einer Idee

auf, die so bestechend einfach wie experimentell anspruchsvoll ist. Grundbausteine sind mikroskopisch kleine Kerne. Das können anorganische Partikel sein, aber auch Polymerteilchen, Kristalle aus einem pharmazeutischen Wirkstoff oder sogar biologische Zellen. Die Forscher beschichten diese Kerne mit elektrisch geladenen Polymermolekülen, die sich in einer Lösung anlagern. Ist die erste Schicht fertig, so kommt die entstehende Nanokapsel in eine zweite Lösung mit entgegengesetzt geladenen Molekülen. Die Moleküle werden von der ersten Schicht angezogen und bilden auf ihnen eine zweite Schicht. Mit dieser Methode können die Forscher viele abwechselnd geladene Schichten wie Zwiebelschalen aufbauen und so die Eigenschaften der Kapsel breit variieren.

Was passiert nun mit dem Kern im Inneren der Kapsel? Wenn er nicht aus der Substanz besteht, die die Kapsel auch füllen soll, muss er aus



Abb. 7: Rasterkraftmikroskopische Aufnahme einer fertigen Nanokapsel. Dazu ist ein Vakuum nötig, in dem die Kapsel in Falten zusammensank.

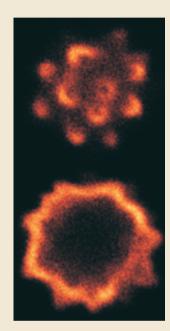


Abb. 8: Zwei Schnittbilder durch verschiedene Ebenen einer Kapsel, die durch Beschichtung eines roten Blutkörperchens in der "Stechapfelform" (Erythrozyt) entstand.

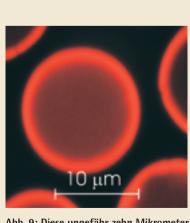


Abb. 9: Diese ungefähr zehn Mikrometer (Millionstelmeter) großen Kapseln sind mit einem Polymer ausgefüllt (rot). Es entstand erst in der Kapsel durch chemische Reaktion kleinerer Moleküle, die durch die poröse Kapselwand eindrangen.

der Kapsel heraus, ohne dass sie dabei zerstört wird. Dazu lösen ihn die Wissenschaftler in kleine Moleküle auf. Für solche kleinen Moleküle ist die Wand der Polymerkapsel nämlich durchlässig und die Kapsel leert sich von selbst. Übrig bleibt die fertige Nanokapsel (Abb. 6, 7 und 8). Die Golmer Forscher können die Wandstärke ihrer Hohlkapseln auf Milliardstelmeter genau einstellen und die chemische Zusammensetzung der Kapselwand breit variieren. So entstehen Kapselwände, die über Jahre stabil oder - im Gegenteil - gezielt zersetzbar sind.

Auch die Durchlässigkeit für verschiedene Wirkstoffe lässt sich einstellen. Variieren die Forscher zum Beispiel die Oberflächen der Schalen, dann können sie bestimmte chemische Substanzen dazu bringen, sich im Kapselinneren anzureichern. Die Kapseln befüllen sich sozusagen von selbst mit dem erwünschten Wirkstoff. Die Nanokapseln ermöglichen

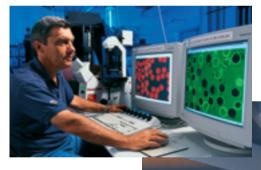
sich für sie durchlässig machen. So werden sie zu einem einfachen Modell für die - natürlich viel komplexeren - Membranfunktionen einer lebenden Zelle.

VON DER NANOKAPSEL ZUR VESIKELMEMBRAN

Die Golmer Kapseln sind ein Beispiel dafür, wie Grundlagenforschung zu einer völlig neuen Basistechnologie führen kann. Sie hat ein immenses Anwendungspotenzial in der Industrie. Möhwald denkt zum Beispiel daran, dass viele Kosmetika und Pharmazeutika in Wasser schwer löslich sind; deshalb kann sie unser Körper nicht richtig aufnehmen. Die Kapseln könnten solche schwer löslichen Stoffe wie mikroskopische U-Boote in den Körper hinein transportieren. Ihre Hülle könnte so gestaltet werden, dass sie gezielt zu dem Ort wandern, an dem ihr Inhalt wirken soll und dort den Wirkstoff kontrolliert freisetzen.

Auch der Grundlagenforschung eröffnet das Golmer System ganz neue Perspektiven. Helmuth Möhwald nennt als Beispiel das Studium von chemischen Reaktionen oder Kristallisationen unter den speziellen Bedingungen, die Nanohohlräume bieten. Abb. 9 zeigt ein solches Beispiel aus der Golmer "Trickkiste". Die Golmer Forscher demonstrierten hier, dass sie die Kapsel nicht nur mit kleineren Molekülen füllen können sie können aus ihnen sogar in der Kapsel durch chemische Reaktion größere Moleküle herstellen.

Im Gespräch mit Reinhard Lipowsky fällt immer wieder der Begriff Biomimetik. Damit bezeichnen Wissenschaftler die Methode, biologische Teilsysteme in vereinfachter Form nachzubauen und dabei etwas über sie zu lernen. Reinhard Lipowsky und seine Golmer Mitarbeiter sind Spezialisten für theoretische Biomimetik. Sie tauchen in die faszinierende Welt der Membranen ein und ahmen die Natur auf ihren Hochleistungsrechnern nach. Die Computersimulation in Abb. 10 zeigt in Schnappschüssen, wie Moleküle eine einfache Membran bilden. Dazu setzen



Helmuth Möhwald und seine Abteilung stellen Nanokapseln her.

es den Golmer Wissenschaftlern sogar, die Eigenschaften biologischer Zellen auf einfache Weise zu imitieren. Dabei geht es um die Hüllen der Zellen, die als Membranen das Zellinnere schützen. Diese Membrane können sich für bestimmte Substanzen durchlässig machen. So steuern sie den Austausch lebenswichtiger Stoffe zwischen dem Zellinneren und der Umgebung. Um das nachzuahmen, statten die Max-Planck-Forscher die Wände ihrer Nanokapseln mit einer Doppelschicht aus Lipidmolekülen aus (Lipide sind Fette). Danach können die Kapselwände ausgewählte Moleküle erkennen und



FASZINATION Forschung

Soft MATTER

AGGREGATZUSTÄNDE

Stoffe können drei Aggregatzustände annehmen: fest, flüssig und gasförmig. In festen Körpern sind die Grundbausteine der Stoffe, also die Atome oder Moleküle, am stärksten geordnet. Sie bilden räumliche Kristallgitter aus, in denen sie feste Plätze haben. Wird der Feststoff flüssig, dann brechen diese starren Strukturen auf und der Ordnungsgrad sinkt. Die Moleküle sind beweglich und gleiten eng aneinander vorbei. In Gasen gewinnen die Atome oder Moleküle genügend Energie, um sich voneinander zu lösen und (fast) frei durch den Raum zu fliegen. Gase sind deshalb am wenigsten geordnet.

SUPRAMOLEKULARE STRUKTUREN

Wie entstehen supramolekulare Strukturen? Stellen wir uns vor, dass die Moleküle Autos sind. Die Fahrer dieser Autos haben ganz verschiedene Fahrtziele. Könnten die Fahrer einfach geradlinig zu ihrem Ziel fahren, gäbe das bei vielen Autos ein unfallträchtiges Durcheinander. Individualverkehr ist im Grunde sehr ungeordnet. Erst eine Überstruktur aus Straßen, Ampeln und Kreuzungen gibt dem Durcheinander eine Ordnung und sichert so das Funktionieren des Verkehrs. Supramolekulare Strukturen tun Ähnliches. In der Natur entstehen diese supramolekularen Strukturen durch Selbstorganisation der Moleküle. Die Moleküle verhalten sich so, als wüssten sie, wo ihr Platz in einer komplexen Struktur ist und wandern dorthin. Zum Beispiel organisieren sich große Moleküle in strömenden Flüssigkeiten so, dass sie schneller fließen können. Oder rote Blutkörperchen ändern ihre Form, um auch durch engste Äderchen zu passen. Bei der Formänderung bilden die Moleküle ihrer Membran eine andere supramolekulare Struktur als zuvor. Selbstorganisation ist also eine grundlegende Eigenschaft der Natur, ohne die kein Leben existieren könnte. Selbstorganisation ließ die großen Moleküle entstehen, die die Bausteine lebender Organismen bilden. Sie prägt auch die biochemischen Prozesse aller Lebensfunktionen.

KOLLOIDE

Der Name der Kolloide geht auf das griechische Wort für "Leimartiges" zurück. Kolloide bestehen aus mikroskopisch kleinen Partikeln. Sie können in einem anderen Stoff, dem "Dispersionsmittel", verteilt sein. Beispiele für Kolloide sind die Partikel des Zigarettenrauchs in der Luft oder auch Lacke, in denen feine Farbpigmente in einem Lösungsmittel "dispergiert" sind. Ein Kolloid verdankt seine Eigenschaften der Tatsache, dass die Partikel viel größer als Atome oder "normale" Moleküle sind, iedoch immer mikroskopisch klein bleiben. Ihre Durchmesser bewegen sich zwischen wenigen Nanometern (Milliardstelmeter) und einigen zehn Mikrometern (Millionstelmeter). Kolloide haben eine enorme wirtschaftliche und technische Bedeutung. In der Natur spielen sie zum Beispiel eine wichtige Rolle in lebenden Zellen.

die Forscher virtuelle, amphiphile Moleküle in virtuelles Wasser und lassen den Computer berechnen, was passiert. Amphiphile Moleküle haben ein Wasser anziehendes und ein Wasser abweisendes Ende. Das Wasser abweisende Ende will den Kontakt mit den Wassermolekülen tunlichst vermeiden – und genau das treibt die amphiphilen Moleküle an, sich zu einer zweischichtigen Membran zu organisieren. Beide Membranschichten richten sich nämlich so aus, dass die wasserscheuen Enden im Inneren der Membran sitzen.

Die Computersimulation zeigt auch anschaulich das für weiche Materie charakteristische Wechselspiel zwischen Ordnung und Unordnung. Die zufällig verteilten Moleküle sind in der Membran stärker geordnet als zuvor. In Abb. 10 ist schön zu sehen, wie die Ordnung von Schnappschuss zu Schnappschuss zunimmt. Doch auch in der fertigen Membran bleibt ein Rest Unordnung erhalten. Die Moleküle sind nämlich nicht starr in der Membranstruktur fixiert, sondern können innerhalb der Membranfläche wandern und ihre Plätze vertauschen. In ihren zwei Dimensionen verhält sich also die Membranfläche fast, als ob sie flüssig wäre. Diesem Mechanismus verdankt die Membran ihre hohe Flexibilität.

Eine solche Zweischicht-Membran ist nur vier bis fünf Nanometer dick. Ihre Fläche kann dagegen einen erheblich größeren Durchmesser haben. Er kann sich über einige Mikrometer, also Millionstelmeter, bis sogar zu Millimetern erstrecken. Im letzteren Fall ist die Membran also Millionen Mal ausgedehnter als dick! Die Membranen einer Nervenzelle können sogar Abmessungen im Dezimeterbereich erreichen. Doch wie weit die Membran sich auch erstrecken mag - sie hat ein Problem, und das sind ihre Kanten. An einer Kante würden die wasserscheuen Molekülenden bloß liegen und so auf das umgebende Wasser stoßen. Das kann die Membran nur vermeiden,

indem sie einfach keine Kanten ausbildet. Sie krümmt sich und schließt sich zu einem flüssigkeitsgefüllten Bläschen, einer Vesikel, zusammen.

Eine solche Vesikel kann unterschiedlichste Formen annehmen. Sie steuert allerdings immer diejenige Form an, bei der ihre Membran möglichst wenig Biege-Energie aufbringen muss. Das Energieminimum – und damit die Vesikelform – hängen von der Umgebungstemperatur, dem Volumen und der Art der Füllung der Vesikel ab. Auch Moleküle, die sich an die zwei Flächen der Membran anheften, können ihr eine andere Form aufzwingen.

Was passiert zum Beispiel, wenn sich in einer Vesikelmembran zwei verschiedene Molekülsorten befinden, die sich gegenseitig abstoßen? Das können zum Beispiel Lipide und Cholesterole sein, die in den Membranen roter Blutkörperchen vorkommen. Abb. 11a zeigt, was nach der Computersimulation geschieht. Die einander "unsympathischen" Moleküle versammeln sich in getrennten Membrandomänen, die in der Abbildung rot oder blau eingefärbt sind. Diese Zonen werden durch die Molekül-Zuwanderung immer größer. Dabei benehmen sich die roten Zonen besonders merkwürdig. Sie stülpen sich zu Knospen aus. Benachbarte Knospen finden sich wiederum gegenseitig so attraktiv, dass sie sich zu noch größeren Knospen zusammenschließen (Abb. 11b - d). So entsteht eine etwas gerupft aussehende "Nano-Brombeere". Das Verhalten dieses einfachen Systems vermittelt eine Ahnung davon, wie lebende Zellen Ausstülpungen bilden, zum Beispiel am Anfang einer Zellteilung.

Lässt sich eine Vesikel gezielt zwischen verschiedenen Formen umschalten? Eine interessante Möglichkeit dazu könnten lichtempfindliche Polymermoleküle, so genannte Azobenzen-Chromophoren, bieten. Ultraviolettes Licht lässt diese Moleküle von einer räumlichen Gestalt, das "cis-Isomer", in eine andere springen, das "trans-Isomer". Infra-

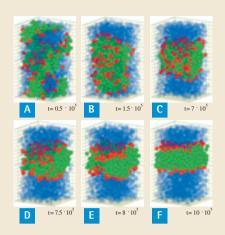


Abb. 10: Eine Zweischicht-Membran organisiert sich selbst. Die Computersimulation berechnete dazu ein System von 100 amphiphilen Molekülen (sie bestehen hier aus vier grünen Kugeln mit einem roten Kopf) in 840 Wasserpartikeln (blaue Kugeln). Zwischen den Schnappschüssen A, B und C bis F liegen jeweils etwa eine Femtosekunde (der millionste Teil einer Millardstelsekunde).

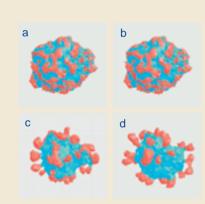


Abb. 11: Eine Vesikel bildet Knospen.

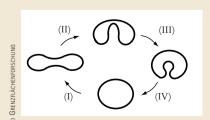


Abb. 12: Eine Vesikel, die verschiedene Formen einnimmt (schematisch).

Durchläuft sie diese Formen zyklisch, dann schwimmt sie wie ein lebender
Einzeller durch die umgebende
Flüssigkeit.

rotes Licht schaltet sie wieder zurück. Sitzen solche Moleküle auf der Membranoberfläche, dann ändern sie deren Krümmung. Dabei verbiegt das cis-Isomer die Membran anders als das trans-Isomer. Wäre eine Vesikel mit diesen Molekülen ausgerüstet, so könnten die Forscher sie tatsächlich mit Licht von einer Form in eine andere umschalten.

SCHWIMMKURS FÜR MEMBRANMASCHINEN

Das brachte Reinhard Lipowsky auf eine faszinierende Idee. Er entwarf das Modell einer Vesikel, die aktiv durch eine wässrige Flüssigkeit schwimmen kann. Dafür braucht die mikroskopisch kleine Membranmaschine allerdings ein spezielles Schwimmtraining: Zwei verschiedene Formen A und B reichen nicht aus. Die Vesikel würde dann nur im Wasser hin- und herwackeln, käme aber nicht vom Fleck. Um wirklich Strecke zu machen, muss sie einen Zyklus von mehreren Formänderungen durchlaufen, wie sie Abb. 12 zeigt. Hier kommt wieder die Biomimetik ins Spiel, denn das Prinzip dieser Schwimmtechnik wird seit Milliarden von Jahren von Einzellern erfolgreich eingesetzt. Gelänge eines Tages der Bau einer solchen Membranmaschine im Labor, dann hätten die Forscher dem Leben wieder ein Geheimnis abgeschaut.

Weiche Materie war und ist in allen Epochen ein Motor der menschlichen Kultur. Vielleicht wird die Nanotechnologie auf Basis weicher Materie der Zivilisation im 21. Jahrhundert einen ähnlichen Schub geben wie die Kunststoffe im 20. Jahrhundert. Von der Natur können die Materialforscher noch viel lernen, wie Hans Wolfgang Spiess feststellt: "Die Natur erreicht eine enorme Komplexität mit nur wenigen Bausteinen. Wir verwenden bei synthetischen Materialien eine insgesamt gewaltige Vielfalt von Bausteinen, erreichen damit zurzeit aber nur eine vergleichsweise geringe Funktionalität." ROLAND WENGENMAYR