

Elektrisch leitende Kunststoffe

Preiswert, haltbar, leicht und vielseitig anzuwenden – das waren bislang wesentliche Vorzüge von Kunststoffen; und als ausgezeichnete Isolatoren galten sie auch. Neuartige Polymere aber leiten den elektrischen Strom schon so gut wie Metalle. Damit eröffnen sich neue Einsatzmöglichkeiten für diese Vielzweckwerkstoffe.

Von Richard B. Kaner und Alan G. MacDiarmid

Vor zwanzig Jahren hätte der Titel dieses Artikels bei den meisten Lesern ungläubiges Erstaunen erweckt. Damals galten Kunststoffe noch generell als Isolatoren. Als noch abwegiger wäre wohl die Vorstellung erschienen, ein derartiger Werkstoff könne elektrischen Strom ebenso gut leiten wie Kupfer.

Doch in den vergangenen Jahren ist das Kunststück gelungen, gewöhnliche Polymere durch einfache Modifikationen elektrisch leitend zu machen. Die neuen Substanzen verbinden die elektrischen Eigenschaften von Metallen mit den typischen Vorteilen von Kunststoffen, die in den dreißiger und vierziger Jahren soviel Aufsehen erregt haben.

Um ein Polymer elektrisch leitend zu machen, baut man geringe Mengen bestimmter Chemikalien in es ein – ein Verfahren, das in Anlehnung an die Halbleitertechnik als Dotierung bezeichnet wird. Das Dotieren ist bei Polymeren freilich viel einfacher als bei klassischen Halbleitern wie Silicium. Tatsächlich waren die technischen Voraussetzungen für die Herstellung leitender Polymere schon viel früher gegeben. Doch mußte man sich überhaupt erst einmal mit der Vorstellung vertraut machen, Kunststoffe könnten elektrisch leitend sein.

Danach aber ging die Entwicklung stürmisch voran. Der erste leitfähige Kunststoff wurde 1977 synthetisiert und 1981 bereits der Prototyp einer Batterie mit Polymerelektroden vorgestellt. Im letzten Sommer erreichten Polymere

die Leitfähigkeit von Kupfer, und vor nur wenigen Monaten kam der erste Polymerakkumulator auf den Markt.

Die seitherigen Fortschritte deuten darauf hin, daß sich Kunststoffe synthetisieren lassen, deren Leitfähigkeit die von Kupfer, ja die aller anderen Werkstoffe bei Zimmertemperatur übertrifft. Polymerfasern könnten dann Kupferdrähte in Anwendungsbereichen ersetzen, in denen – wie etwa im Flugzeugbau – die Gewichtsersparnis von entscheidender Bedeutung ist.

Leitende Kunststoffe bieten aber auch interessante optische, mechanische und chemische Eigenschaften, die ihnen möglicherweise für Kupfer verschlossene Einsatzmöglichkeiten eröffnen. So könnte man Fensterscheiben zum Schutz vor Sonneneinstrahlung mit dünnen Polymerschichten überziehen, deren Färbungsgrad durch eine angelegte Steuerspannung bestimmt wird. Vielleicht ließen sich leitfähige Kunststoff-Fasern dank ihrer praktisch unbegrenzten chemischen Beständigkeit sogar als künstliche Nerven in den menschlichen Körper implantieren.

Ein folgenreicher Fehler

Am Anfang stand wie so oft ein Zufall. Zu Beginn der siebziger Jahre versuchte ein Doktorand im Labor von Hideo Shirakawa am Institut für Technologie in Tokio, den Kunststoff Polyacetylen aus gewöhnlichem Acetylen-schweißgas herzustellen. Polyacetylen,

ein dunkles Pulver, war das erste Mal 1955 synthetisiert worden, aber niemand wußte viel darüber. Zu seiner Überraschung erhielt der Student anstelle eines dunklen Pulvers einen silbrig glänzenden Film, der wie Aluminiumfolie aussah, sich aber wie eine Plastikfolie strecken ließ.

Ein nochmaliger Blick auf die Synthesevorschrift zeigte die Ursache des Fehlers: Der junge Forscher hatte tausendmal mehr Katalysatorsubstanz zugesetzt, als in der Anleitung angegeben war. Dabei war zwar Polyacetylen entstanden, aber in einer ganz anderen Form als jemals zuvor.

Als einer von uns (MacDiarmid) 1976 Shirakawas Labor besuchte, hatte die Suche nach sogenannten synthetischen Metallen gerade begonnen, und das Polyacetylen in seiner neuen Erscheinungsform schien sich für weitere Untersuchungen anzubieten. Shirakawa verbrachte anschließend ein Jahr an der Universität von Pennsylvania bei MacDiarmid und dessen Kollegen Alan J. Heeger, um die Möglichkeiten des veränderten Polymers zu erforschen. Die Zusammenarbeit trug erste Früchte, als die drei auf die Idee kamen, dieses Polyacetylen mit Iod zu dotieren. Die biegsamen, silbrigen Filme verwandelten sich dadurch in metallisch goldene Folien mit der milliardenfachen Leitfähigkeit von normalem Polyacetylen.

Seither hat sich herausgestellt, daß etwa ein Dutzend Polymere und Polymerabkömmlinge beim Dotieren diesen Übergang zeigen. Alle bestehen sie aus

monomeren Bausteinen, die im wesentlichen aus Kohlenstoff- und Wasserstoffatomen aufgebaut und zu Polymeren verkettet sind (Bild 2). Bei einigen enthalten die Bausteine auch Stickstoff- oder Schwefelatome.

Polyacetylen, das einfachste der elektrisch leitenden Polymere, besteht aus einer durchgehenden Kohlenstoffkette, bei der an jedem Kohlenstoffatom ein Wasserstoffatom hängt. Die Kohlenstoffatome sind entlang der Kette abwechselnd über Einfach- und Doppelbindungen verknüpft (Bild 2 unten), die fortwährend miteinander die Plätze tauschen und so im Endeffekt ein Mittelring zwischen einer Einfach- und einer Doppelbindung bilden. Diese sogenannte konjugierte Struktur ist typisch für leitfähige Polymere.

Trotz der Ähnlichkeiten in der Struktur können sich diese Kunststoffe in ihren Eigenschaften stark unterscheiden. Ihre Beständigkeit gegenüber Wärme und Sauerstoff, ihre Löslichkeit und Formbarkeit und auch ihre Leitfähigkeit hängen entscheidend vom Polymer- und vom Syntheseverfahren ab. Eine besonders günstige Kombination von Merkmalen weisen Polyparaphenylene, Polythiophen, Polypyrrol und Polyanilin auf. Auf sie hat sich daher in letzter Zeit vor allem das Augenmerk der Forscher gerichtet.

Dennoch ist Polyacetylen immer noch der Prototyp leitfähiger Kunststoffe und am besten erforscht. Es hält bisher auch den Leitfähigkeitsrekord unter den Polymeren: Im letzten Jahr erzeugten Wissenschaftler der BASF AG in Ludwigshafen durch Dotieren einer sehr reinen Form von Polyacetylen ein Polymer mit äußerst hoher Leitfähigkeit – sie betrug pro Volumeneinheit ein Viertel und, bezogen auf die Masse, sogar das Doppelte derjenigen von Kupfer (siehe „Bester Stromleiter: ein Kunststoff“, in Monatsspektrum, Spektrum der Wissenschaft, Oktober 1987). Wie kommt es, daß gewisse dotierte Polymere so gut leiten?

Die Grundlage der Leitfähigkeit

Welche elektronischen und strukturellen Veränderungen die Dotierung hervorruft, wird derzeit noch diskutiert, aber in den Grundzügen ist der Leitfähigkeitsmechanismus bekannt. Die spezifische Leitfähigkeit wird in Siemens pro Zentimeter angegeben und ist nichts anderes als der Kehrwert des spezifischen Widerstandes, gemessen in Ohm mal Zentimeter.

Zwischen Isolatoren und Leitern besteht ein gewaltiger Unterschied in der Leitfähigkeit: Bei guten Isolatoren wie

Teflon oder Polystyrol beträgt sie etwa 10^{-18} Siemens pro Zentimeter, bei guten Leitern wie Kupfer oder Silber dagegen knapp 10^6 Siemens pro Zentimeter. Das Polyacetylen der BASF hatte eine Leitfähigkeit von etwa $1,47 \times 10^5$ Siemens pro Zentimeter.

Der elektrische Stromfluß beruht auf der Bewegung von Elektronen; das heißt, in einem elektrischen Leiter müssen einige Elektronen frei umherwandern können. In Festkörpern mit ihrem ausgedehnten Netzwerk aus Bindungen zwischen den Atomen „bewegen“ sich die Elektronen innerhalb von und zwischen diskreten Energiebereichen, die man als Bänder bezeichnet. Jedes dieser Bänder kann nur eine begrenzte Zahl

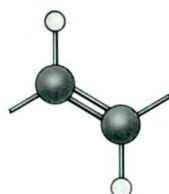
von Elektronen aufnehmen, aber auch leer bleiben. Die Elektronen müssen eine bestimmte Energie besitzen, um ein vorgegebenes Band besetzen zu können. Wenn sie von einem Band in ein anderes höherer Energie überwechseln sollen, brauchen sie sozusagen eine Energiespritze.

Elektronen können sich nur in teilweise gefüllten Energiebändern bewegen. Leere Bänder leiten den elektrischen Strom ebensowenig wie gänzlich gefüllte. Der Leitungsvorgang ähnelt nämlich einem Staffellauf, bei dem Elektronen den Strom durch die Energiebänder wie Läufer den Stab auf Bahnen transportieren. Damit der Strom weiterfließen kann, muß sozusagen je-

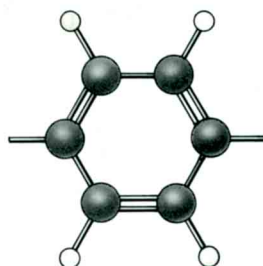


Bild 1: Polyacetylen – ein Polymer, das durch Dotierung elektrisch leitend wird – ändert während der Synthese seine Farbe. Der dünne Film ist in der Durchsicht rot, wenn er an der Wand des Glasreaktors polymerisiert, und färbt sich bei Erwärmung des Gefäßes blau.

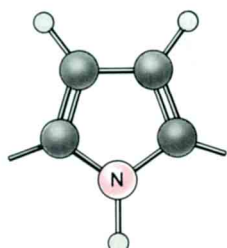
Zur Demonstration des Farbübergangs wird das Polyacetylen hier durch Trockeneis (unten) und Heizelemente (oben) auf zwei unterschiedlichen Temperaturen gehalten. Dickere Schichten wie die in Bild 5 reflektieren mehr Licht, als sie durchlassen, und glänzen daher metallisch.



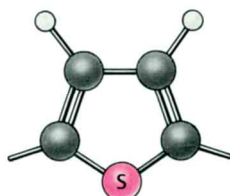
Polyacetylen



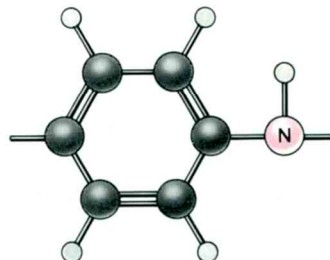
Polyparaphenylene



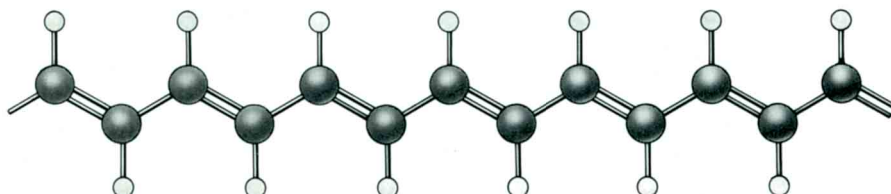
Polypyrrol



Polythiophen



Polyanilin



Polyacetylenkette

Bild 2: Die hier gezeigten monomeren Bausteine bilden, zu Ketten verknüpft, die darunter genannten Polymere. Das gemeinsame Merkmal all dieser Makromoleküle ist die Wechselfolge aus Einfach- und Doppelbindungen. Sie

bedingt eine elektronische Struktur, durch die nach Dotierung ein Strom fließen kann. Oben sind die monomeren Bausteine der fünf wichtigsten leitfähigen Polymere dargestellt, unten sieht man eine undotierte Polyacetylenkette.

weils ein weiterer Läufer in der Bahn warten – also darf das Band nicht leer sein. Anfangs müssen Elektronen aber auch die Bahn betreten können, in der die anderen Läufer warten – was ein volles Band ausschließt.

Metalle leiten den elektrischen Strom, weil sie teilweise gefüllte Energiebänder besitzen. Bei Isolatoren und Halbleitern sind die Energiebänder dagegen entweder gänzlich gefüllt oder völlig leer. Das höchste gefüllte Band nennt man Valenzband und das leere unmittelbar darüber (auf der Energieskala) Leitungsband. In Isolatoren sind die beiden Bänder durch eine große Energielücke voneinander getrennt, in Halbleitern ist diese Lücke etwas kleiner. Nur Elektronen, die durch Wärme oder Licht zusätzlich Energie erhalten, können sie überspringen.

Gewöhnliche Polymere haben die gleiche Elektronenbandstruktur wie Halbleiter und Isolatoren: Ihr Valenzband ist gefüllt, ihr Leitungsband leer,

und die beiden sind durch eine erhebliche Energielücke voneinander getrennt. Die Dotierung verändert diese Struktur, indem Elektronen aus dem Valenzband herausgenommen (*p*-Dotierung für positive Dotierung, weil das Molekül sich positiv auflädt) oder in das Leitungsband eingebracht werden (*n*-Dotierung für negative Dotierung, weil das Molekül sich negativ auflädt). Im Prinzip wird das Polymer also deswegen leitend, weil nach der Dotierung entweder das Valenz- oder das Leitungsband teilweise gefüllt ist.

In Wirklichkeit verhält sich die Sache etwas komplizierter. Die Ladung, die man bei der Dotierung auf das Polymergerüst aufbringt, bewirkt eine geringfügige, aber wichtige Verschiebung der Atome untereinander. Dadurch bilden sich bei hoher Dotierungsdichte im Umkreis der Fremdladungen Ladungsinseln, von denen es drei Arten gibt: Solitonen, Polaronen und Bipolaronen. Wenn ungefähr ein Ion auf fünfzehn

Kohlenstoffatome kommt, beginnen sich die Ladungsinseln schließlich zu überschneiden. Dabei erzeugen sie neue Energiebänder, die zwischen Valenz- und Leitungsband liegen oder diese sogar überlappen. In diesen neuen Bändern können sich die Elektronen frei bewegen, so daß es in Wahrheit die Solitonen, Polaronen und Bipolaronen sind, welche die elektrische Leitfähigkeit eines Polymers hervorrufen.

Unterschiede zu dotierten Halbleitern

Die exotischen Energiebänder elektrisch leitender Polymere treten in dotierten Halbleitern nicht auf. Vielleicht aber spielen sie eine Rolle beim Leitungsmechanismus in den neuen Hochtemperatur-Supraleitern. Die Entdeckung von Solitonen in dotiertem Polyacetylen hat deshalb auch weltweit das Interesse der theoretischen Physiker geweckt, weil sich an dem leitfähigen Polymer dieses einzigartige Phänomen ausgezeichnet untersuchen läßt.

Auch die Beziehung zwischen Fremd- und Wirtsmolekülen ist in Polymeren anders als in klassischen Halbleitern. Bei der Dotierung von Silicium werden beispielsweise einige Siliciumatome durch Fremdatome ersetzt, die entweder mehr oder weniger Elektronen als das Wirtatom besitzen. Im Fall der Polymere gibt es keinen solchen Austausch von Molekülbausteinen; die Fremdmoleküle fungieren nur als Partner, die den Energiebändern des Makromoleküls Elektronen spenden oder entziehen. Bei hohen Dotierungsgraden, wenn die Ladungsinseln aus Solitonen, Polaronen oder Bipolaronen ineinander übergehen, ist die auf das Polymer gebrachte Ladung stärker delokalisiert und sozusagen über mehrere Kohlenstoffatome verschmiert (Bild 3).

Ist der Elektronentransport innerhalb der Kohlenstoffketten noch nicht in allen Einzelheiten geklärt, so gilt dies erst recht für das Übertreten der Elektronen von einer Kette zur anderen. Irgendwie aber muß es stattfinden; denn eine Kette reicht ja nicht über die gesamte Breite eines Polymerfilms. Vielleicht gibt es eine Art Hüpfmechanismus zwischen den Ketten. Im Falle eines Polyacetylen mit mittlerem Dotierungsgrad kann man sich auch vorstellen, daß sich die Ladung über eine bewegliche, gleichsam flüssige Solitonstruktur verteilt, die auch benachbarte Polymerketten umfließt.

Keine einzelne Theorie kann bisher auch den weiten Leitfähigkeitsbereich erklären, den leitende Polymere überdecken. Trotzdem hat man aus der

praktischen Erfahrung mit ihnen ein empirisches Verständnis dafür entwickelt, welche Faktoren ihre Leitfähigkeit wesentlich beeinflussen.

Der nächstliegende Faktor ist sicherlich der Dotierungsgrad; außerdem läßt er sich exakt steuern. Eine wichtige Rolle spielt aber auch die Ausrichtung der Polymerketten im Material. Die Kettenstruktur bedingt eine Anisotropie (räumliche Asymmetrie): Die Kette leitet in einer Richtung besser als in einer anderen. In dotiertem Polyacetylen kann so die Leitfähigkeit in Kettenrichtung bis zu tausendmal höher sein als senkrecht dazu.

Die Leitfähigkeit von Polymeren läßt sich daher maximieren, indem man die Ketten möglichst parallel ausrichtet. Dies macht man sich auch bei dem BASF-Polyacetylen zunutze: Nach der Synthese wird das Polymer vor der Dotierung zunächst gestreckt, damit sich die Ketten ausrichten (Bild 4).

Die Reinheit hat ebenfalls großen Einfluß auf die Leitfähigkeit. Verunreinigungen beeinträchtigen die Elektronenbeweglichkeit, weil sie Fehlstellen in der Polymerkette hervorrufen, welche die Elektronen nicht passieren lassen. Vielleicht der Hauptgrund für die hohe Leitfähigkeit (und Stabilität) des BASF-Polymers liegt in dem verwendeten speziellen Syntheseverfahren, das ein bemerkenswert einheitliches und reines Polymer liefert.

Synthese und Dotierung

Die Synthese und Dotierung von Polymeren geschieht auf chemischem oder elektrochemischem Wege. Das gängige Darstellungsverfahren für Polyacetylen ähnelt im wesentlichen der bereits von Shirakawas Student verwendeten Methode. Dazu wird das Innere eines Glasbehälters mit einem Katalysator beschichtet, der die Polymerisation för-

dert. Anschließend flutet man den Behälter mit gasförmigem Acetylen. Auf der Glasoberfläche wächst nun ein zusammenhängender Polymerfilm auf, der nach etwa fünf Minuten so dick wie ein Blatt Papier ist. Nach dem Auswaschen kann man ihn von der Wand abschälen (Bild 5) und *p*- oder *n*-dotieren, indem man ihn mit einer Iodlösung oder mit einer Lösung von Natriummetall in Quecksilber behandelt.

Bei elektrochemischen Verfahren laufen Synthese und Dotierung parallel. Zwei Metallelektroden tauchen in eine Lösung ein, die das Monomer zusammen mit dem Dotierungsmittel enthält. Bei einer typischen *p*-Dotierungssynthese zieht beim Anlegen einer elektrischen Spannung die positive Elektrode von Monomeren in ihrer Umgebung Elektronen ab. Dadurch beginnt das Monomer auf der Elektrodenoberfläche zu polymerisieren.

Im Verlauf der weiteren Polymerisation werden zusätzlich Elektronen vom zunächst gebildeten reinen Polymer abgezogen; dadurch lädt es sich positiv auf und zieht die negativen Ionen des Dotierungsmittels aus der Lösung an. Auf diese Weise scheidet sich dotiertes Polymer auf der positiven Elektrode ab, das sich anschließend abstreifen läßt.

Der Dotierungsgrad hängt vom Betrag der positiven Ladung auf dem Polymer ab, die wiederum von der Stärke der an der positiven Elektrode angelegten Spannung bestimmt wird. Über diese Spannung kann man also den Dotierungsgrad und damit die Leitfähigkeit des Polymers steuern.

Überdies lassen sich Polyacetylen und viele andere Polymere auch nach der chemischen Synthese in einem getrennten Schritt elektrochemisch sowohl *p*- als auch *n*-dotieren. Dazu befestigt man sie als Streifen an der positiven oder negativen Elektrode, die in eine Lösung mit dem Dotierungsmittel eintaucht. Durch weitere Verbesserun-

gen der Synthese- und Dotierungsmethoden sollten sich immer reinere und einheitlichere Polymere gewinnen lassen, deren Leitfähigkeit eines Tages die von Kupfer nicht nur pro Massen-, sondern auch pro Volumeneinheit übersteigen könnte.

Die Leitfähigkeit ist freilich nur ein Kriterium für die Praxistauglichkeit eines Werkstoffs. Nach der erfolgreichen Synthese der ersten leitenden Polymere sah es so aus, als seien sie wegen ihrer chemischen und physikalischen Eigenschaften nur begrenzt technisch einsetzbar. So waren sie unlöslich und ließen sich nicht unzersetzt schmelzen, konnten also nicht wie gewöhnliche Kunststoffe gegossen und geformt werden. Viele zersetzten sich auch beim Kontakt mit Sauerstoff an der Luft, was ihre Verwendbarkeit besonders stark einschränkte.

In den letzten zwei Jahren gelang es, die erste Schwierigkeit zu überwinden. Der Trick war, an das Kohlenstoffgerüst andere chemische Gruppen anzuhängen, welche die Eigenschaften des Moleküls verändern. So ergaben Untersuchungen bei der Firma Allied Signal, daß Polythiophen in herkömmlichen Lösungsmitteln löslich wird, wenn man ein Wasserstoffatom durch eine größere Kohlenwasserstoffgruppe wie die Butylgruppe mit vier Kohlenstoffatomen ersetzt. Hängt man ferner an jedes Monomer eine Gruppe mit zwölf Kohlenstoffatomen, so läßt sich das Polymer schmelzen und zu Fasern verspinnen, die nach Dotierung mit Iod in der Leitfähigkeit an Metalle herankommen.

Der Polymerakkumulator

Dies hat die Perspektiven für den Einsatz leitender Polymere beträchtlich erhöht. Die am weitesten fortgeschrittene und in der Öffentlichkeit wohl bekannteste Anwendung ist der Plastikak-

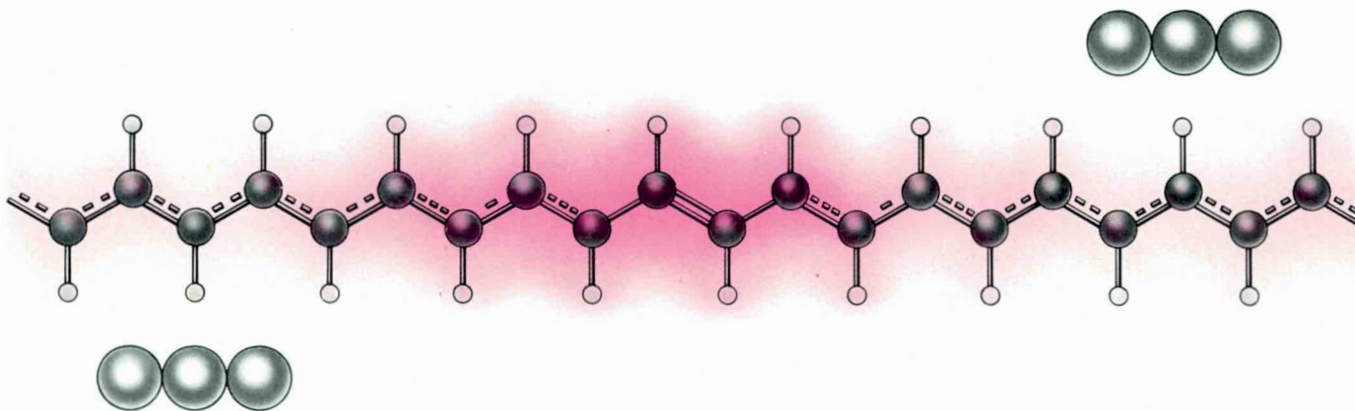


Bild 3: *P*-dotiertes Polyacetylen enthält delokalisierte positive Ladungen, die es metallisch leitend machen. Die Elektronendichte (Farbe) ist längs des Kohlenstoffgerüsts in Form einer Wolke verschmiert, die sich

in Richtung auf das negative Dotierungs-Ion hin ausdünn. Auch der Unterschied zwischen Einfach- und Doppelbindungen verwischt sich dort; dieser Effekt ist durch die unterbrochenen Bindungsstriche angedeutet.

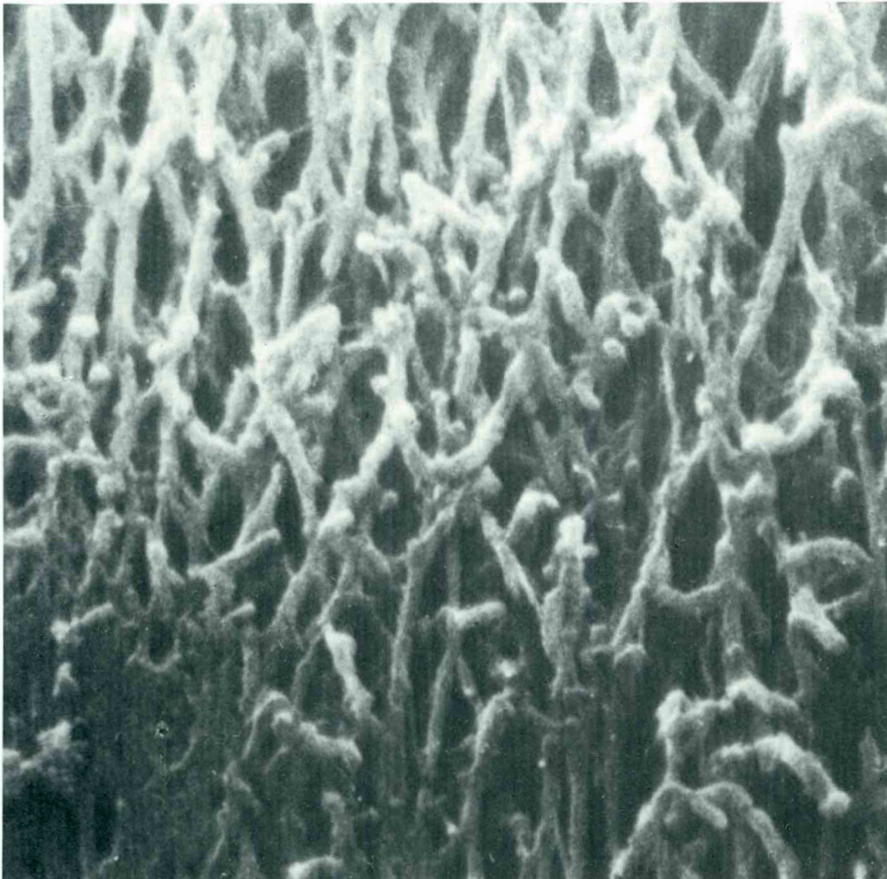
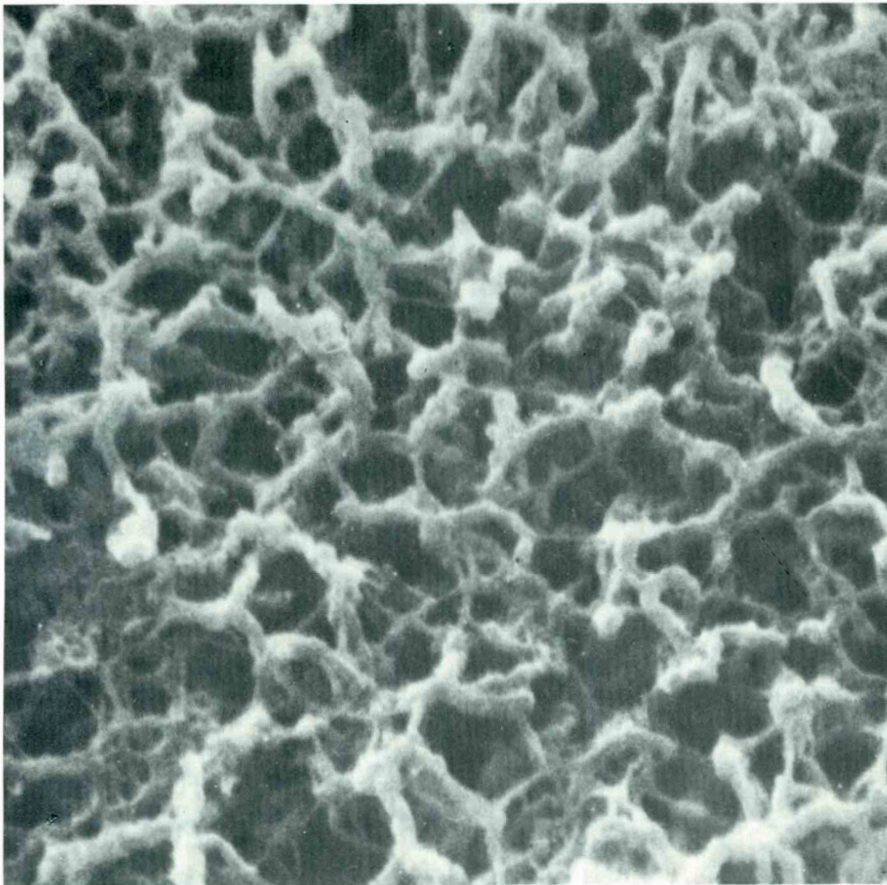


Bild 4: Durch Strecken von Polymerfilmen werden die Fasern ausgerichtet, was die Leitfähigkeit in Streckrichtung erhöht, da die Elektronen nun glatter längs der Polymersträn-

ge fließen können. Diese elektronenmikroskopischen Aufnahmen zeigen Polyacetylenstränge vor (oben) und nach dem Strecken (unten). Jede Faser besteht aus etwa 1500 Polymerketten.

kumulator. Anfang der achtziger Jahre konnten MacDiarmid und Heeger zeigen, daß sich *p*- und *n*-dotiertes Polyacetylen als Elektroden eines solchen wiederaufladbaren Stromspeichers verwenden ließen. Damit schien das Elektroauto in greifbare Nähe gerückt, weil die leichten Polymerakkumulatoren wesentlich mehr Leistung pro Gewichtseinheit erbringen sollten als herkömmliche Bleiakkus.

Obwohl das Interesse am Elektroauto inzwischen etwas erlahmt ist, erscheinen Akkumulatoren mit Polymerelektroden nach wie vor als vielversprechend. So sollten Elektroden aus Kunststoff wesentlich haltbarer sein als herkömmliche Metallelektroden, weil die an Ladungstransport und -speicherung beteiligten Ionen aus der Lösung und nicht aus der Elektrode selbst stammen. Damit unterbliebe der Verschleiß, den das Lösen und Abscheiden von Elektrodenmaterial beim Lade- und Entladevorgang in herkömmlichen Akkumulatoren mit sich bringt. Anders als Nickel-Cadmium- oder Blei-Schwefelsäure-Akkumulatoren enthalten Polymerbatterien zudem keine giftigen Stoffe, so daß sich kaum Entsorgungsprobleme ergeben.

Die Firmen Bridgestone und Seiko Electronics Parts haben gemeinsam einen münzengroßen Akkumulator mit einer Polyanilinelektrode entwickelt, der in Japan vor wenigen Monaten auf den Markt gekommen ist. Die zweite Elektrode ist aus Lithium. Die Batterien sollen eine dreimal so hohe Kapazität wie die derzeit erhältlichen Lithiumakkus gleichen Typs haben, während ihre Spannung zwei- bis dreimal so hoch wie bei Nickel-Cadmium-Batterien und etwa eineinhalbmal so hoch wie bei den gewöhnlichen Autobatterien mit Bleielektroden ist. Ihr Selbstentladestrom, der die Lagerzeit von Batterien begrenzt, ist auch bedeutend geringer als bei Nickel-Cadmium- und Bleiakkus.

In der Bundesrepublik testen die BASF und Varta gemeinsam einen flexiblen Akkumulator mit einer Elektrode aus Lithium und der anderen aus Polypyrrolfilm. Ein Versuchsmodell ist eine etwa vier Millimeter dicke Zelle von der Größe einer Postkarte, die drei Volt Spannung liefert und sich wie ein Stück Karton biegen läßt. Bei Allied-Signal wird ebenfalls an einem Akkumulator mit einer Elektrode aus leitendem Polymer gearbeitet. Über Einzelheiten seiner Funktionsweise schweigt sich die Firma bislang zwar aus, aber es scheint, daß die Batterie fast doppelt soviel elektrische Energie pro Gewichtseinheit speichern kann wie ein herkömmlicher Nickel-Cadmium-Akkumulator.



Bild 5: Die fertigen Polyacetylenblätter können nach der Synthese einfach von der Gefäßwand abgehoben werden. Sie sind silbrig

glänzend und biegsam wie Papier. Ihre hohe Leitfähigkeit erhalten sie erst durch Behandeln mit einem Dotierungsmittel wie Iod.

Andere Anwendungen

So ermutigend der Fortschritt bei Polymerelektroden ist – die Einsatzmöglichkeiten elektrisch leitender Kunststoffe sind keineswegs auf Batterien beschränkt. Bei Allied-Signal zum Beispiel laufen bereits Projekte, in denen die Eignung solcher Polymere für Sensoren erprobt wird.

Mehrere Strategien sind denkbar. Einige dotierte Polymere zersetzen sich bei Erwärmung unter entsprechender Verminderung der Leitfähigkeit. Zusammen mit einem Ohmmeter könnten sie beispielsweise beim Transport von empfindlichen Medikamenten das Überschreiten einer kritischen Temperatur anzeigen, bei der die Pharmaka ihre Wirksamkeit einbüßen.

Leitfähige Polymere haben bereits bei Lagerung und Transport von Gefriergut als Sensoren gedient, die ein vorübergehendes Auftauen der Produkte zu erkennen geben. Auf ähnliche Weise läßt sich die Konzentration von Giften, die als Dotierungsmittel wirken, mit einem undotierten Polymer überwachen. Ebenso wäre ein Einsatz als Strahlungssensor denkbar, wenn man die Polymere in Gase einschließt, die sich bei Bestrahlung in Dotierungsmittel umwandeln.

In mehreren Staaten laufen derzeit Forschungsarbeiten über die Einsatzmöglichkeiten von Polythiophen und Polyanilin in elektrochromen Anzeigeelementen. Diese ändern bei Anlegen einer elektrischen Spannung ihre Farbe. Dünne Polythiophenfilme beispielsweise sind im dotierten Zustand rot und im

undotierten tiefblau. Derartige Bauteile ließen sich für Anzeigetafeln auf Flughäfen und Bahnhöfen, für Werbeflächen mit bewegten Bildern, in Taschenrechnern, Computern und Uhren, kurz in allen Geräten verwenden, die heute mit Flüssigkristall-Anzeigen ausgestattet sind. Obwohl sie in einer Vielzahl von Farben herstellbar wären, ist allerdings schwer vorauszusagen, ob sie gegenüber den Flüssigkristall-Elementen wirkliche Vorteile hätten; vor einem praktischen Einsatz müßten jedenfalls ihre Schaltzeiten und Betriebsdauern erheblich verbessert werden.

Der elektrochrome Effekt ließe sich auch für abdunkelbare Fensterscheiben nutzen. Hauchdünne Polymerschichten, in einen farblosen festen Elektrolyten eingebettet und zwischen zwei Glasscheiben gefaßt, könnten ein Fenster bei Anlegen einer elektrischen Spannung variabel kolorieren. Auch Konstrukteure von Solarzellen interessieren sich für leitende Polymere, weil diese Sonnenlicht absorbieren und in Strom umsetzen können. Ihr Wirkungsgrad ist bis jetzt freilich enttäuschend gering.

Leitende Polymere absorbieren zudem elektromagnetische Strahlung niedrigerer Frequenz und könnten deshalb als Abschirmfolien etwa in Computerbildschirmen dienen. Derzeit werden dafür mit Metall oder Kohlenstoff gefüllte Kunststoffe verwendet, aber die gute Verarbeitbarkeit und höhere Leitfähigkeit homogen dotierter Polymere verleiht ihnen besondere Vorteile. Die kürzlich beobachtete starke Abschwächung von Mikrowellen durch Polyanilin läßt hier einiges erhoffen.

Man hat dotierte Polymere auch auf ihre Eignung als Leiterbahnmaterialien in neuartigen gedruckten Schaltungen und als Ersatz für herkömmliche Halbleiterübergänge in Transistoren geprüft. Bei diesen Anwendungen sind sie den derzeit benutzten Werkstoffen bisher zwar noch weit unterlegen; Fortschritte im Syntheseverfahren, die höher geordnete Polymere mit weniger Fehlstellen liefern, sowie eine Weiterentwicklung der Dotierungsverfahren könnten dies jedoch ändern. Ihre ungewöhnlichen optischen Eigenschaften lassen sie überdies als aussichtsreiche Werkstoffe für die bevorstehende Generation optischer Computer erscheinen.

Auch im menschlichen Körper könnten elektrisch leitende Polymere eines Tages eine Rolle spielen. Weil sie chemisch wenig angreifbar und stabil sind, hat man sie als Material für Neuralprothesen – künstliche Nerven – in Betracht gezogen. Insbesondere Polypyrrol gilt als nicht toxisch und kann zuverlässig passende elektrische Ladungen bereitstellen. Dotieren ließe es sich mit Heparin, einem Stoff, der die Blutgerinnung verhindert und erwiesenermaßen als Dotierungsmittel für Polypyrrol geeignet ist.

Polymere könnten außerdem als Implantate zur dosierten Abgabe von Medikamenten im Körper dienen. Dazu würden sie mit Stoffen dotiert, die gleichzeitig pharmakologisch wirksam sind. Der Wirkstoff würde dann kontrolliert durch eine angelegte Spannung freigesetzt, die das Polymer in den Neutralzustand überführt.

In vieler Hinsicht ähnelt der Entwicklungsstand bei den elektrisch leitenden Polymeren heute dem der gewöhnlichen Kunststoffe vor etwa 50 Jahren. Obwohl damals rund um die Welt über die neuen Materialien geforscht wurde, brauchte es noch langwierige Entwicklungsarbeit, bis daraus durch geeignete chemische Modifikationen technisch brauchbare Substanzen geworden waren. In ähnlicher Weise müssen die chemischen und physikalischen Eigenschaften der heutigen stromleitenden Polymere noch genau auf jede einzelne Anwendung abgestimmt werden, bevor die Produkte sich ökonomisch durchsetzen können.

Unabhängig von der praktischen Wertbarkeit dieser Kunststoffe bilden sie jedoch auch für die kommenden Jahre eine Herausforderung an die Grundlagenforschung, sich mit neuen und unerwarteten Phänomenen auseinanderzusetzen. Die Zukunft muß zeigen, ob diese neuen Kunststoffleiter unsere Welt ebenso verändern werden, wie ihre isolierenden Vorgänger das getan haben.