

## Makromolekulare Chemie 2006

**Makromoleküle sind „intelligent“ geworden, bilden anspruchsvolle Strukturen und erfüllen immer komplexere Funktionen. Besonders stark entwickeln sich in der Grundlagenforschung biologisch inspirierte Polymere und Biohybride. Sie bieten enormes Anwendungspotential.**

◆ Die Trendberichte der letzten Jahre haben viele Strömungen in der makromolekularen Chemie aufgezeigt. Dazu gehören beispielsweise komplexe Polymerarchitekturen,<sup>1,2)</sup> schaltbare Polymere und Hydrogele,<sup>3-6)</sup> polymere Flüssigkristalle,<sup>7,8)</sup> Halbleiter<sup>9)</sup> und Leuchtdioden,<sup>10)</sup> Membranen<sup>11)</sup> und Mikrokapseln,<sup>12)</sup> elektrogesponnene Polymerfasern<sup>13-15)</sup> und Hybridmaterialien aus anorganischen Verbindungen und Polymeren.<sup>16-20)</sup>

Zu jedem dieser Themen wird täglich mindestens eine Arbeit veröffentlicht – damit sind sie nicht mehr Trends, sondern ausgewachsene Forschungsrichtungen.

Waren bislang Verzahnungen der makromolekularen Chemie mit der Physik und den Materialwissenschaften besonders stark ausgeprägt, rücken nun zusehends die Biowissenschaften in den Vordergrund. Dabei werden Konzepte und Mechanismen aus der Biologie in die synthetische Polymerchemie integriert. So ergeben sich Materialien mit neuen Funktionen und Anwendungsmöglichkeiten. Biologisch inspirierte Polymere sind bereits heute aus biomedizinischen und biotechnologischen Anwendungen kaum mehr wegzudenken.<sup>21-24)</sup>

### Synthese

◆ Der Trend bei den Polymersynthesen geht zusehends hin zur chemischen Modifizierung von Polymeren und zur Kombination von „einfachen“ Polymerisationsverfahren, insbesondere kontrolliert radikalischen und ringöffnenden Synthesen. Auf dem Vormarsch ist auch die bakterielle Synthese von Polyestern.<sup>25)</sup> Enormes Potential gibt es bei der mit Mikrowellen-unterstützten Polymerisation von Oxazolinen<sup>26)</sup> in „grünen“ Lösungsmitteln, z. B. ionischen Flüssigkeiten,<sup>27)</sup> und in der festphasengebundenen Synthese synthetischer Oligoamide mit definierter Kettenlänge und Monomerequenz.<sup>28,29)</sup>

Für Modifizierungen und Kupp-

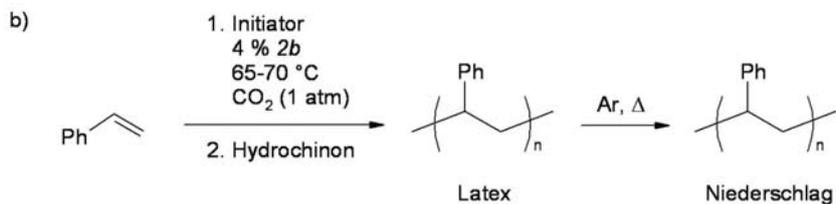
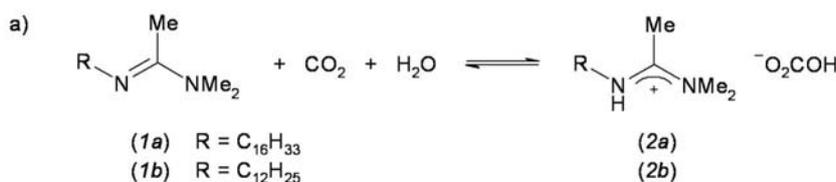
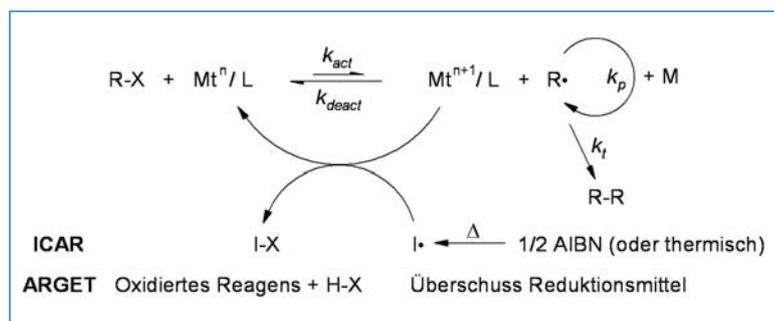


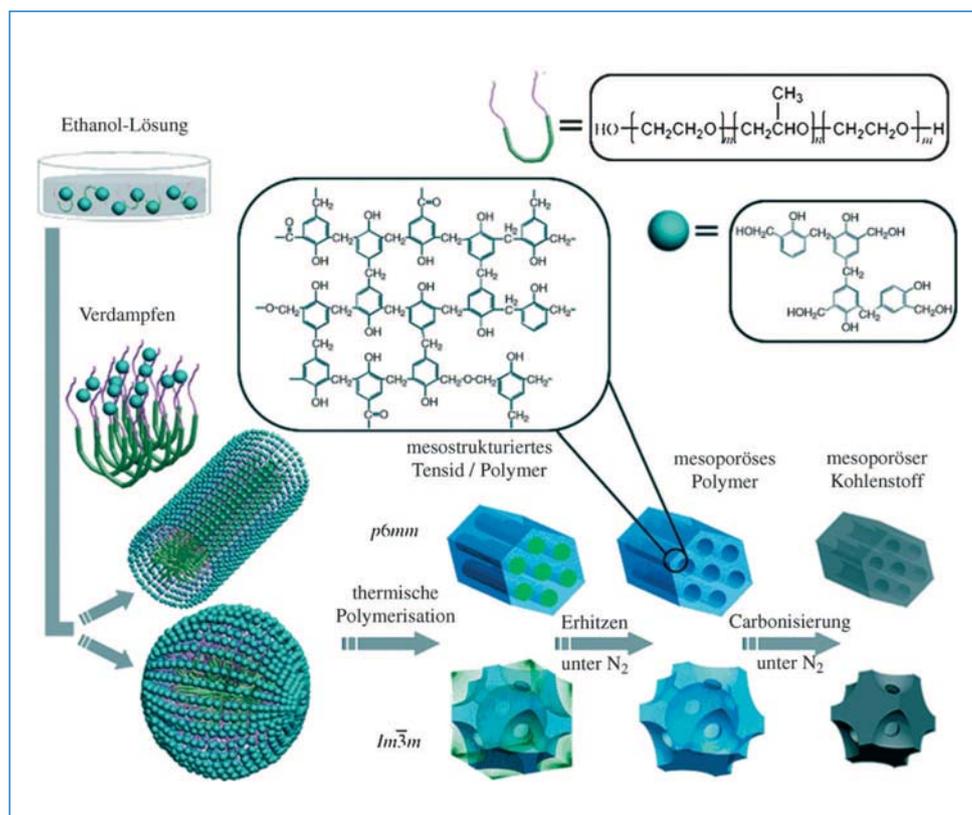
Abb. 2. a) Schaltbares Tensid auf Amidinbasis. b) Emulsionspolymerisation von Styrol. (Nachdruck aus Lit.<sup>41)</sup>, Copyright American Association for the Advancement of Science)

lungsreaktionen von Polymeren findet das Konzept der „Click Chemistry“ immer breitere Anwendung. Die wohl bekannteste Strategie ist dabei die Kupfer(I)-katalysierte 1,3-dipolare-Cycloaddition von Aziden an Alkine (Huisgen-Reaktion), mit der Dendrimere, Blockcopolymere, funktionalisierte Polymere und nun erstmals auch Polyacrylat-Oligopeptid-Konjugate synthetisiert werden können.<sup>30)</sup> Metallfreie Alternativen zur Huisgen-Reaktion sind die Diels-Alder-Cycloaddition von Maleimiden an Polymere mit Anthracen-Seitengruppen und die radikalische Addition von Thiolen an Polybutadiene. Mit diesen, der präparativen organischen Chemie entnommenen Syntheserouten, können Pfropfcopolymere<sup>31)</sup> und zuckerhaltige Biohybride<sup>32)</sup> hergestellt werden.

Kontrollierte radikalische Polymerisationsmethoden, insbesondere „Atom Transfer Radical Polymerization“ (ATRP) und „Reversible Addition-Fragmentation Chain Transfer“ (RAFT) dienen immer häufiger zur Herstellung von Polymeren mit komplexen Strukturen und intelligenten Lösungseigenschaften.<sup>33–36)</sup> Bei der ATRP wurde durch eine kontinuierliche Regenerierung des Katalysators mit organischen Radikalen oder Reduktionsmitteln (Abbildung 1)<sup>37)</sup> eine Minimierung der Katalysatormengen (unter 50 ppm) erreicht und damit die industrielle Anwendbarkeit und Umweltfreundlichkeit des Verfahrens verbessert. Mit Vitamin C als Reduktionsmittel kann ATRP sogar an der Luft durchgeführt werden, sowohl in Substanz als auch in Mini-emulsionen.<sup>38)</sup>

Auch bei den „klassischen“ Polymerisationsverfahren sind noch immer neue, industriell relevante Entwicklungen zu beobachten. So gelingt mit einem komplexen Initiator bestehend aus Natriumhydrid und Trialkylaluminium die kontrollierte anionische Polymerisation von Styrol in Substanz bei 100°C („Retarded Anionic Polymerization“, RAP).<sup>39)</sup>

Eine Innovation bei der metallkatalysierten Polymerisation von Olefinen ist die Chain Shutling



Polymerization.<sup>40)</sup> Dabei werden Gemische von Olefinen mit monomerspezifischen Katalysatoren in Gegenwart eines metallorganischen Übertragungsreagens, welches den reversiblen Austausch zwischen den wachsenden Polymerketten steuert, polymerisiert. Dieser Prozess, der kontinuierlich geführt werden kann, führt zur Bildung von Multiblockcopolymereigenschaften wie Schmelz- und Glasübergangstemperatur.

Im Hinblick auf Polymerisationsprozesse und Verarbeitung von Polymeren seien zwei Beispiele herausgegriffen. Für Emulsionspolymerisationen sind schaltbare Tenside auf der Basis von Amidinverbindungen geeignet, die reversibel mit Kohlendioxid zu einem kationischen Tensid reagieren. Da diese Reaktion durch Einleiten von Argon oder Luft umgekehrt werden kann (Abbildung 2), fallen bei der Produktion von Polymeren in Emulsion keine grenzflächenaktiven Rückstände an.<sup>41)</sup>

Polyacetylen kann durch katalytische Polymerisation in Miniemulsion in Form von 20nm großen Partikeln als wässrige Dispersion erhalten werden. Das Halbleiterpolymer wird da-

mit erstmals leicht verarbeitbar, etwa mit Tintenstrahldruckern zum Drucken von Schaltkreisen auf Papier.<sup>42)</sup>

### Charakterisierung

◆ Architektur und Funktionalität von Polymeren werden immer komplexer und entsprechend hoch sind die an die Polymeranalytik gestellten Anforderungen. Ein wichtiges und sich stetig weiterentwickelndes Verfahren ist die 2D-Flüssigchromatographie, eine serielle Kopplung von Adsorptions- und Gelpermeationschromatographie, in Verbindung mit Detektions- und Analyseverfahren.<sup>43)</sup> Eine neuentwickelte Methodenkopplung von Flüssigchromatographie am kritischen Punkt der Adsorption (LACCC) oder Gradientenchromatographie mit der Maldi-TOF-Massenspektrometrie ermöglicht eine schnelle und vollständige Charakterisierung von Copolymeren, ohne daß auf eine Kalibrierung zurückgegriffen werden müßte.<sup>44)</sup>

Ein neues Werkzeug in der Kolloidanalytik ist die ellipsometrische Lichtstreuung, eine Kombination von Lichtstreuung und Polarisationsoptik eines Ellipsometers.<sup>45)</sup> Diese Metho-

Abb. 3. Herstellung mesoporöser Polymere im Sol-Gel-Verfahren. (Nachdruck aus Lit.<sup>47)</sup>, Copyright Wiley-VCH)

### ◆ Wirtschaftliche Entwicklung der Polymere

Das Geschäft mit Kunststoffen verlief 2006 besser als ursprünglich angenommen. Nach ersten Schätzungen von Experten wird der Umsatz mit Kunststoffen aus Deutschland mit einem Zuwachs von ungefähr fünf Prozent deutlich im Plus liegen. Die hiesigen Kunststoffhersteller sind zudem verhalten optimistisch, dass sich dieser Trend auch 2007 weiter fortsetzt. Die deutsche Polymerproduktion legte 2006 allerdings nur um etwa ein Prozent zu. Das gute Umsatzwachstum erklärt sich somit stärker aus Preissteigerungen als aus einem tatsächlichen Produktionszuwachs. Das hohe Preisniveau war dabei zum Teil durch die anhaltend hohen Rohstoffpreise bedingt. Der Preis für Rohöl stieg 2006 erneut auf ein Rekordhoch. Die verfügbaren Kapazitäten waren sehr gut – zum Teil über 90% – ausgelastet. Trotz dieser guten Auslastung waren manche Produkte am Markt knapp. Nach Jahren geringer Investitionsbereitschaft bedingt durch die schwache Inlandsnachfrage kündigen sich deshalb inzwischen wieder vermehrt Kapazitätsaufstockungen an. Einen wesentlichen Beitrag zu der erfreulichen Umsatzentwicklung leistete neben der anziehenden Inlandskonjunktur auch der expandierende Export. Während sich die Konjunktur in der Automobilbranche erst gegen Jahresende beschleunigte, zeigte sie

sich im Bausektor, der rund ein Viertel der Kunststoffherzeugnisse verarbeitet, überraschend stark. Die deutlichsten Zuwachsraten verzeichneten allerdings Elektro- und Elektronikindustrie, angetrieben durch eine weiter steigende Nachfrage nach Telekommunikationsprodukten und Konsumelektronik. Der Trend zur Abwanderung nach Asien oder Osteuropa aus Kostengründen hält in diesem Industriezweig allerdings nach wie vor an. Lediglich bei größeren Gütern bewirken die steigenden Transportkosten mittlerweile eine schwache Gegenbewegung zurück zur Produktion in räumlicher Nähe der wichtigen Abnehmermärkte im Westen.

An der Spitze der weltweiten Wachstumsdynamik steht der ostasiatische Raum, allen voran China. Die Länder dort sind damit auch für die exportorientierte deutsche Polymerwirtschaft zu einem Schlüsselmarkt geworden. China wird auch in Zukunft weiterhin überdurchschnittliche Wachstumsraten erzielen. Dadurch wird China innerhalb der nächsten zehn Jahre einen ähnlich großen Anteil am weltweiten Kunststoffverbrauch erreichen wie Europa oder Gesamtamerika. Im Jahr 1995 lagen das erweiterte Europa (incl. Mittlerer Osten und Afrika) und Gesamtamerika mit einem Marktanteil von rund einem Drittel noch weit vor China mit einem Anteil von lediglich 10%.

2005 hatte China seinen Anteil am Weltmarkt bereits auf 20% verdoppelt. 2015 wird China voraussichtlich mit ca. 25% des Weltverbrauchs auf gleichem Niveau mit Gesamtamerika und nur noch knapp hinter dem Spitzenreiter Europa mit fast 30% liegen (Abbildung).

Die große Wachstumsdynamik gilt in China mit wenigen Ausnahmen für alle Polymere. Der Verbrauch an Standardkunststoffen, speziell für Verpackungen (Beutel, Tüten, Hüllen, Folien, Flaschen) wächst dabei mindestens so stark wie der für technische Kunststoffe. Dies steht im Gegensatz zu reiferen Märkten, in denen der Verbrauch der meisten Standardkunststoffe nur noch moderat zunimmt.

Alle großen deutschen Polymerhersteller haben inzwischen eigene Aktivitäten in China gestartet. Sie unterhalten zum Teil bereits ausgedehnte Produktions- und Entwicklungsstandorte. Generell gilt, dass diese Standorte in erster Linie dazu dienen, um die stark wachsenden lokalen Märkte wettbewerbsfähig bedienen zu können. Dabei spielen sowohl die günstigeren administrativen Rahmenbedingungen und die vorteilhaften Kostenstrukturen eine Rolle als auch die Nähe zum Kunden. Im globalen Wettbewerb der Polymerindustrie ist der asiatische Raum damit attraktiv für Investitionen. Demgegenüber droht der Polymerwirtschaft in Deutschland mit der Umsetzung der Reach-Verordnung eine weitere Verschlechterung der Rahmenbedingungen, die insbesondere mittelständische Kunststoffhersteller vor Probleme stellen wird.

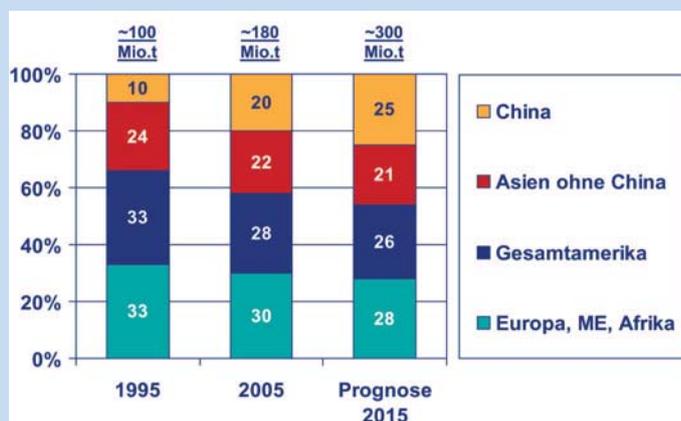
Der Autor dankt Frank Schnieders, Bayer MaterialScience, für die Bereitstellung und Diskussion der Marktinformationen.

Nicolas Stoeckel

Bayer MaterialScience, Leverkusen

nicolas.stoeckel

@bayermaterialscience.com



Weltverbrauch Thermoplaste, Veränderung der regionalen Strukturen in Prozent.

de erlaubt die Untersuchung der Grenzfläche von kolloidalen Teilchen in Lösung, zum Beispiel die Änderung der Ausdehnung thermosensitiver Schichten oder die Dicke von Vesikelmembranen. Solche Informationen waren bislang nur mit aufwendigen Methoden wie etwa der Neutronenstreuung zugänglich.

Eine Methode zur Untersuchung komplexer Proben entwickelt sich mit der CARS-Mikroskopie (CARS = Coherent-Anti-Stokes-Raman-Scattering) Mit diesem Verfahren gelingt es, Moleküle chemisch selektiv ohne „Anfärben“ abzubilden, und Bilder von lebenden Zellen oder von festen Polymerfilmen mit einer Auflösung von einigen hundert Nanometern zu erhalten.<sup>46)</sup> Damit wird die CARS-Mikroskopie sicherlich wichtige Beiträge bei der Untersuchung hierarchisch strukturierter Kompositmaterialien leisten können.

### Struktur – Funktion – Anwendung

◆ Ein deutlicher Trend geht in Richtung wohldefinierter Polymermaterialien mit zunächst kontrollierbarer, dann aber auch schaltbarer Struktur. Hier werden Strukturbildungskonzepte sowohl aus der Biologie als auch aus der Anorganischen Chemie in synthetische Polymersysteme integriert.

Eine Renaissance der klassischen Bakelitmaterialien in Form von mesoporösen Harzen mit geordneter und einstellbarer Porenstruktur ist absehbar.<sup>47)</sup> Über templatierte Polykondensationen oder Polyadditionen können funktionelle, poröse Organomaterialien (organische Funktionszeolithe) mit einstellbaren Porengrößen und definierten Funktionalitäten erhalten werden. Es ist zu erwarten, daß nicht nur das anorganische Sol-Gel-Konzept, sondern auch das Konzept der MOFs („Metal-Organic Frameworks“) auf Polymerstrukturen übertragen wird, indem dann etwa Polykondensationen in drei Dimensionen kontrolliert werden können (Abbildung 3).

Durch Übertragen von biologischen Strukturmechanismen auf Polymersysteme wird die Struk-

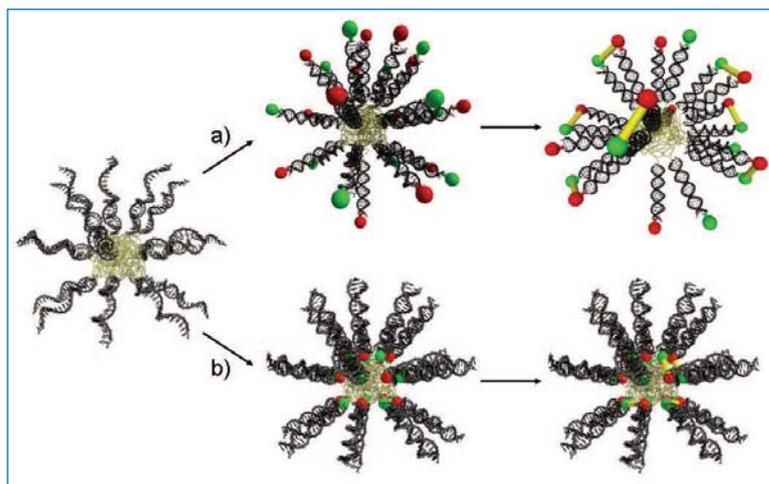


Abb. 4. Oligonucleotide als Template für Synthesen a) in der Korona oder b) im Kern von Micellen (Nachdruck aus Lit.<sup>52)</sup> Copyright Wiley-VCH)

tur- und Mikrostrukturkontrolle in Polymeren programmierbar. Dabei greift man auf die Hybridisierung (Doppelstrangbildung) von Oligonucleotiden und die Faltung sowie Selbstorganisation von Oligopeptiden zurück. Wichtige Werkzeuge sind Biokonjugate oder Biohybride, also Diblockcopolymere mit einem synthetischen und einem bioorganischen Segment. Der Trend geht dabei zu monodispersen Oligosegmenten mit definierter Monomersequenz. Damit können Blockcopolymere gestaltet werden, deren funktionelle Biosegmente definierte Eigenschaftsprofile aufweisen. Die mit solchen sequenzdefinierten Segmenten chemisch codierte Information kann dazu dienen, um auf biomimetische Weise Funktionen und Strukturen zu erzeugen.

Durch Selbstorganisation von solchen Polymer-Oligonucleotid-Konjugaten sind funktionelle Nanostrukturen zugänglich. Als micellare 3D-Strukturen können diese für Oligonucleotid-templatierte organische Synthesen eingesetzt werden (Abbildung 4), beispielsweise für eine Kupplung von Carbonsäuren und Aminen oder eine Michael-Addition von Thiolen an Maleimide.<sup>44)</sup>

Isolierte Nanoleiter wurden durch Organisation von Biokonjugaten aufgebaut. Dafür wurde hydriertes Polyisopren an ein (Alanin)<sub>4</sub>-Diacetylen-Segment angekuppelt. Durch Selbstorganisation des Alaninsegments in ein  $\beta$ -Faltblattmotiv wurden helicale Bänder gebildet. In der erhaltenen Struktur waren die Diacetyleneinheiten passfähig für eine topochemische

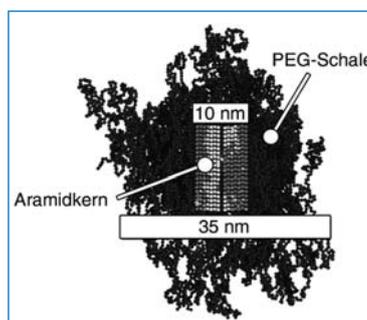


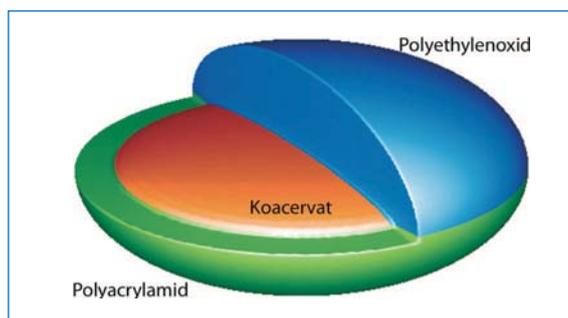
Abb. 5. „Hockeypuck“-Micelle eines Polyethylenoxid-Oligoaramid-Konjugats. (Nachdruck aus Lit.<sup>52)</sup> Copyright Wiley-VCH)

Polymerisation organisiert und konnten zu Oligo- und Polyacetylenen umgesetzt werden.<sup>49)</sup>

Thermosensitive Kern-Schale-Nanoröhren, die potentiell Kanalproteine imitieren können, entstehen durch Aufpfropfung von *N*-Isopropylacrylamid (NIPAM) auf selbstorganisierte Peptidnanoröhren. Dafür wurden die aus cyclischen Peptiden („Ghadiri Cycles“) aufgebauten Röhren mit ATRP-Initiatoren versehen und als Makroinitiatoren für NIPAM verwendet.<sup>50)</sup> Die Information zur Struktur und potentiellen Funktion der Nanoobjekte steckt also in der Sequenz der Cyclopeptide.

Die Kontrolle der Faltungs- und Aggregationskinetik von Peptidsegmenten in Konjugaten ähnelt der

Abb. 6. Struktur einer „Janus“-Micelle durch Koacervatbildung von Blockionomeren. (Nachdruck aus Lit.<sup>53)</sup> Copyright Wiley-VCH)



### ◆ Industrielle Makromolekulare Chemie 2006: Nanotechnologie

Die industrielle Umsetzung der Nanotechnologie nimmt gerade erst Fahrt auf. So investiert beispielsweise die BASF von 2006 bis 2008 rund 180 Mio. Euro in Forschung und Entwicklung in der Nanotechnologie. Dazu hat sie 2006 unter anderem ein Forschungszentrum in Singapur eröffnet, in dem an nanostrukturierten Oberflächen gearbeitet werden soll. Der Begriff Nanotechnologie umfasst Synthese, Modifikation, Charakterisierung und Steuerung von Strukturen und Partikeln, die in mindestens einer Dimension kleiner als 100 Nanometer sind und neue Eigenschaften oder Kombinationen von Eigenschaften haben. Nach dieser Definition sind auch die seit einigen Jahrzehnten in großen Mengen vermarkteten Polymerdispersionen und Emulsionspolymerisate in Lacken und Farben Produkte der Nanotechnik. Das Bewusstsein für die Teilchendimensionen führt auch hier zu neuen Entwicklungen. So hat Bayer Material Science Polyurethandispersionen für Lacke mit eingestellten Teilchengrößen eingeführt. Der erreichbare Feststoffgehalt liegt mit bis zu 60% nahe am theoretischen Maximum, ein Beitrag zur Ressourcenschonung. Ein weites Feld ist die Herstellung und Verwendung von Nanopartikeln. Die Makromolekulare Chemie konzentriert sich auf das Einbringen von Nanopartikeln in polymere Materialien. Auf diese Weise erhält man modifizierte oder völlig neue mechanische Eigenschaften, oft ohne dass sich das Erscheinungsbild des Materials verändert. Vielbeachtet sind mit Silberpartikeln antimikrobiell ausgerüstete Materialien oder Beschichtungen, wie sie beispielsweise Bio-Gate oder Sarastro anbieten. Im Vergleich zu makroskopischen Silberpartikeln haben Nanopartikel den Vorteil der Farbneutralität. Außerdem hält ihre Wirkung länger an, weil sie Ionen gleichmäßiger freisetzen.

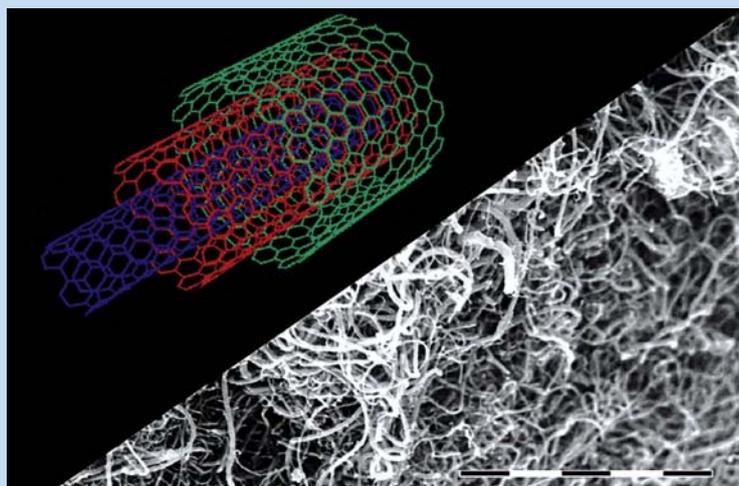


Bild: Bayer Technology Services.

**Kohlenstoff-Nanoröhren sind auch in größeren Mengen kommerziell verfügbar. Die Länge des eingblendeten Balkens entspricht 2  $\mu\text{m}$ .**

In der Elektronik erschließen Nanopartikel neue Felder. So gibt es zahlreiche Hersteller leitfähiger Tinten auf Basis von Silber- oder Kupfernanopartikeln, deren Stabilität auf der feinen Verteilung der winzigen Metallteilchen in der Flüssigkeit beruht. Diese Tinten können beispielsweise per Inkjet appliziert werden, so dass elektronische Komponenten durch Drucken hergestellt werden können. Eine weitere Anwendung von Nanopartikeln in der Elektronik sind Poliermittel für Silicium-Wafer. Sie müssen bei der Herstellung elektronischer Bauelemente in einem Veredelungsschritt eine möglichst glatte Oberfläche erhalten. Hierfür werden Nanopartikel (mit sehr homogener Teilchengrößenverteilung) als kleinste verfügbare Schleifmittel genutzt. Sie tragen zur Herstellung immer kleinerer elektronischer Bauelemente bei. Wegen des hohen Aspektverhältnisses, der elektrischen Leitfähigkeit und einer sehr hohen mechanischen Stabilität sind Kohlenstoffnanoröhren (Carbon-Nanotubes, Abbildung) interessant. Als Füllmaterial in Kunststoffen erhöhen sie deren mechanische Stabilität und verleihen ihnen elektrische Leitfähigkeit oder antistatische Eigenschaften. Bayer Material Sci-

ences macht Multiwall Carbon Nanotubes neuerdings auch großtechnisch verfügbar. Erste Anwendungen in Eishockey- oder Baseballschlägern für den Leistungssport zeigen, dass sich diese Kohlenstoffmaterialien für den Einsatz in leichten und gleichzeitig mechanisch hoch belasteten Bauteilen eignen.

Im Februar 2006 wurde gemeinsam vom BMBF und 13 Firmen, Universitäten und Forschungseinrichtungen das Projekt „NanoCare“ ins Leben gerufen. Es hat das Ziel, die Auswirkungen von Nanomaterialien auf Gesundheit und Umwelt zu untersuchen. Hierzu sollen Mess- und Prüfmethoden erarbeitet werden, mit denen Sicherheitsfragen zu Nanomaterialien zukünftig zuverlässig bewertet werden können. Damit könnte den aufkommenden Bedenken gegenüber dieser neuen Technologie mit allgemein akzeptierten Risikostudien begegnet und Vertrauen aufgebaut werden.

*Der Autor dankt Stefan Bahnmüller, Bayer MaterialScience, für seine Unterstützung.*

*Nicolas Stoeckel  
Bayer MaterialScience, Leverkusen  
nicolas.stoeckel  
@bayermaterialscience.com*

Kristallisation anorganischer Festkörper. Auch hier gelingt die Bildung von ausgedehnten Strukturen mit hoher Ordnung. Supramolekulare Makrobänder mit hierarchischem Aufbau und einer Länge von mehreren Millimetern lassen sich durch Organisation von Polyethylenoxid-Peptid-Konjugaten erzeugen. Dabei werden gestörte Peptidsegmente („Switch Peptides“) verwendet, deren Tendenz zur Aggregation kontrolliert angeschaltet werden kann.<sup>51)</sup> Somit sind nicht nur funktionelle Nanostrukturen, sondern auch makroskopische Strukturen zugänglich, die sich für materialwissenschaftliche Anwendung eignen.

DNA und Proteine als natürliche Vorbilder zum Erzeugen von Funktionen und Strukturen eröffnen einen Weg zu vollsynthetischen, monodispersen Oligo- und Polymeren mit definierter Monomersequenz. Die Möglichkeiten der Nutzung solcher Systeme zeigt z. B. die Konjugation von Polyethylenoxid an monodisperse Oligoaramide (Hepta-*p*-benzamid). Diese Pseudopeptid-Polymer-Konjugate aggregieren definiert zu anisometrischen „Hockeypuck“-Strukturen (Abbildung 5).<sup>52)</sup> Da das Oligoaramidsegment sequentiell an einer Festphase aufgebaut wurde, kann man nun beginnen, die Monomersequenz zu variieren.

Komplexe Strukturen können auch mit weniger bioinspirierten Polymeren hergestellt werden. Erstmals gelang die Bildung einer „Janus“-Mizelle, eines Aggregats mit gebrochener Symmetrie (Abbildung 6) durch Mischen von entgegengesetzt geladenen Blockionomeren.<sup>53)</sup>

Aber auch „einfachen“ Polymeren lassen sich neue Aspekte abgewinnen. Mit Polyethylenimin beschichtete Glasoberflächen zeigen beispielsweise eine Art medizinischen „Lotus-Effekt“. Das Polymer bildet eine stachelige Oberfläche, an der die Zellwand von Bakterien ebenso wie die Schutzhülle von Viren aufgerissen wird. Innerhalb von Minuten werden nahezu alle Erreger zerstört und sterile Oberflächen erhalten.<sup>54)</sup>

Polymethylmethacrylat, zusam-



Abb. 7.  
Verformung eines Cellulose-Papiers durch Anlegen eines elektrischen Felds (Bild: J. Kim, Inha-Universität, Korea)

men mit einer Mischung von primären/sekundären Aminen und einer Boronsäure ergeben ein Hydrogel, welches selektiv mit Glucose, nicht aber mit Fructose oder Galactose, expandiert. Dieses Material käme als selektiver Sensor für Glucose im Blut in Betracht.<sup>55)</sup>

Ein weiteres „intelligentes“ Material ist ein aus regenerierter Cellulose hergestelltes Papier, das sich bei Anlegen eines elektrischen Felds verformt. Hier ergeben sich Anwendungen für Miniaturflugmaschinen

(Abbildung 7), Mikroroboter oder bioabbaubare MEMS („Micro-Electro-Mechanical-System“).<sup>56)</sup>

Polymere auf Oberflächen sind gut etabliert, aber auch hier rücken biologische Polymere, biologische Molekülfragmente und entsprechende Anwendungen verstärkt in den Vordergrund. Beispiele hierzu sind die biomimetische Modifizierung von Oberflächen mit einem Konjugat aus Polyethylenoxid und dem Eisenchelator Anachelin<sup>57)</sup> sowie die Herstellung neuer bioaktiver Filme



**Helmut Schlaad**, Jahrgang 1967, studierte Chemie in Mainz und promovierte 1997 bei Axel H. E. Müller. Nach einem Postdoc-Aufenthalt bei Rudolf

Faust in Lowell, USA, ging er 1999 als Projektleiter an das Max-Planck-Institut (MPI) für Kolloid- und Grenzflächenforschung (Abteilung Kolloidchemie, Markus Antonietti) in Potsdam und habilitierte sich 2004 an der Universität Potsdam. Seine Forschungsgebiete sind kontrollierte Polymerisationsverfahren, insbesondere ringöffnende Polymerisationen von Heterocyclen, und bioinspirierte Strukturbildung mit synthetischen Polymeren.



**Hans G. Börner**, Jahrgang 1970, studierte Chemie an der FU Berlin und an der Universität Marburg, wo er bei Walter Heitz promovierte. Nach einem

Forschungsaufenthalt in Pittsburgh, USA, bei Kris Matyjaszewski leitet er seit 2002 eine Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe am MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung in Potsdam (Abteilung für Kolloidchemie, Markus Antonietti). Er forscht an Polymer-Biokonjugaten zur Erzeugung und Kontrolle von definierten Wechselwirkungen in makromolekularen Systemen.



**Andreas Taubert**, Jahrgang 1972, studierte Chemie in Basel und promovierte am MPI für Polymerforschung in Mainz bei Gerhard Wegner. Nach einem

Postdoc-Aufenthalt bei Karen I. Winey in Pennsylvania wurde er 2003 Gruppenleiter an der Universität Basel. Seit 2006 ist er Juniorprofessor für Supramolekulare Chemie an der Universität Potsdam und am MPI für Kolloid- und Grenzflächenforschung tätig. Seine Forschungsgebiete umfassen ionische Flüssigkeiten und Flüssigkristalle zur Synthese anorganischer Stoffe sowie biologisch inspirierte Hybridstrukturen.



**Nicolas Stoeckel**, Jahrgang 1974, studierte Chemie an der TU München und promovierte dort im Jahre 2002 bei Oskar Nuyken. Nach einem

zweijährigen Postdoc-Aufenthalt bei Mitsuo Sawamoto an der Kyoto University trat er im Sommer 2004 bei Bayer Material Science ein und ist dort in der Abteilung Innovation Coatings, Adhesives, Sealants tätig. Er beschäftigte sich zunächst mit strahlungshärtenden Lackrohstoffen und arbeitet heute an Materialien für die Holographie.

auf der Basis von Glycoacrylaten.<sup>58)</sup> Ebenso interessant sind Beschichtungen von Oberflächen aus thermosensitiven Materialien, etwa Poly-(N-isopropylacrylamid). Die Beweglichkeiten von Mikrotubuli können darauf durch Änderung der Temperatur gesteuert werden. Dies ließe sich zum kontrollierten Ein- und Ausschalten von biomolekularen Motoren nutzen.<sup>59)</sup>

Auch das Elektrosponnen von Polymeren geht mehr und mehr in Richtung Biologie: Elektrogessponnene Polymerfasern werden über „Molecular Imprinting“ mit Kavitäten zur molekularen Erkennung ausgestattet<sup>60)</sup> oder mit Lipasen funktionalisiert.<sup>61)</sup>

Man darf also gespannt sein, wie sich die bioinspirierte Polymerchemie in Zukunft weiter entwickeln wird. Dies gilt besonders für „intelligente“ Polymere und Oberflächen. Zweifelsohne werden polymere Materialien weiter an Bedeutung für biologische und medizinische Anwendungen gewinnen.

Helmut Schlaad, Hans G. Börner  
Max-Planck-Institut für Kolloid- und  
Grenzflächenforschung, Potsdam  
schlaad@mpikg.mpg.de  
boerner@mpikg.mpg.de  
Andreas Taubert  
Institut für Chemie  
Universität Potsdam  
ataubert@uni-potsdam.de

- 1) E. Kasemi, W. Zhuang, J. P. Rabe, K. Fischer, M. Schmidt, M. Colussi, H. Keul, D. Yi, H. Cölfen, A. D. Schlüter, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 5091.
- 2) S. Duschner, F. Gröhn, M. Maskos, *Polymer* 2006, 47, 7391.
- 3) K. Skrabania, J. Kristen, A. Laschewsky, Ö. Akdemir, A. Hoth, J. F. Lutz, *Langmuir* 2007, 23, 84.
- 4) D. Kuckling, C. D. Vo, H.-J. P. Adler, A. Völkel, H. Cölfen, *Macromolecules* 2006, 39, 1585.
- 5) L. Dong, A. K. Agarwal, D. J. Beebe, H. Jiang, *Nature* 2006, 442, 551.
- 6) C. Li, J. Madsen, S. P. Armes, A. L. Lewis, *Angew. Chem.* 2006, 118, 3590.
- 7) K. Severing, E. Stibal-Fischer, A. Hasenbinder, H. Finkelmann, K. Saalwächter, *J. Phys. Chem. B* 2006, 110, 15680.
- 8) N. Canilho, E. Kasemi, R. Mezzenga, A. D. Schlüter, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 13998.
- 9) K. Müller, M. Klapper, K. Müllen, *Macromol. Rapid Commun.* 2006, 27, 586.
- 10) A. Zen, A. Bilge, F. Galbrecht, R. Alle, K. Meerholz, J. Grenzer, D. Neher, U. Scherf, T. Farrell, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 3914.
- 11) N. Asano, M. Aoki, S. Suzuki, K. Miyatake, H. Uchida, M. Watanabe, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 1762.
- 12) A. G. Skirtach, A. M. Javier, O. Kreft, K. Köhler, A. P. Alberola, H. Möhwald, W. J. Parak, G. B. Sukhorukov, *Angew. Chem.* 2006, 118, 4728.
- 13) P. D. Dalton, K. Klinkhammer, J. Salber, D. Klee, M. Möller, *Biomacromolecules* 2006, 7, 686.
- 14) A. Greiner, J. H. Wendorff, A. L. Yarin, E. Zussman, *Appl. Microbiol. Biot.* 2006, 71, 387.
- 15) L. Wang, C. Li, A. J. Ryan, S. P. Armes, *Adv. Mater.* 2006, 18, 1566.
- 16) Y. Lu, Y. Mei, M. Drechsler, M. Ballauff, *Angew. Chem.* 2006, 118, 8273.
- 17) R. Mohr, K. Kratz, T. Weigel, M. Lucka-Gabor, M. Moneke, A. Lendlein, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2006, 103, 3540.
- 18) S. Ludwigs, U. Steiner, A. N. Kulak, R. Lam, F. C. Meldrum, *Adv. Mater.* 2006, 18, 2270.
- 19) T. X. Wang, A. W. Xu, H. Cölfen, *Angew. Chem.* 2006, 118, 4561.
- 20) M. S. Nikolic, M. Krack, V. Aleksandrovic, A. Kornowski, S. Förster, H. Weller, *Angew. Chem.* 2006, 118, 6727.
- 21) K. Kataoka, A. Harada, Y. Nagasaki, *Adv. Drug Delivery Rev.* 2001, 47, 113.
- 22) R. Duncan, *Nat. Rev. Drug Discov.* 2003, 3, 47.
- 23) A. Taubert, A. Napoli, W. Meier, *Curr. Opin. Chem. Biol.* 2004, 8, 598.
- 24) M. Yoshida, R. Langer, A. Lendlein, *J. Lahann, Polym. Rev.* 2006, 46, 347.
- 25) E. N. Pederson, C. W. J. McChalicher, F. Sreenc, *Biomacromolecules* 2006, 7, 1904.
- 26) C. Koopmans, M. Iannelli, P. Kerep, M. Klink, S. Schmitz, S. Sinnwell, H. Ritter, *Tetrahedron* 2006, 62, 4709.
- 27) C. Guerrero-Sanchez, R. Hoogenboom, U. S. Schubert, *Chem. Commun.* 2006, 3797.
- 28) H. M. König, R. Abbel, D. Schollmeyer, A. F. M. Kilbinger, *Org. Lett.* 2006, 8, 1819.
- 29) L. Hartmann, E. Krause, M. Antonietti, H. G. Börner, *Biomacromolecules* 2006, 7, 1239.
- 30) J. F. Lutz, H. G. Börner, K. Weichenhan, *Macromolecules* 2006, 39, 6376.
- 31) B. Gacal, H. Durmaz, M. A. Tasdelen, G. Hizal, U. Tunca, Y. Yagci, A. L. Demirel, *Macromolecules* 2006, 39, 5330.
- 32) L. You, H. Schlaad, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 13336.
- 33) H. I. Lee, J. Pietrasik, K. Matyjaszewski, *Macromolecules* 2006, 39, 3914.
- 34) X. Yin, A. S. Hoffman, P. S. Stayton, *Biomacromolecules* 2006, 7, 1381.
- 35) P. E. Millard, L. Barner, M. H. Stenzel, T. P. Davis, C. Barner-Kowollik, A. H. E. Müller, *Macromol. Rapid Commun.* 2006, 27, 821.
- 36) K. V. Bernaerts, N. Willet, W. Van Camp, R. Jérôme, F. E. Du Prez, *Macromolecules* 2006, 39, 3760.
- 37) K. Matyjaszewski, W. Jakubowski, K. Min, W. Tang, J. Y. Huang, W. A. Braunecker, N. V. Tsarevsky, *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* 2006, 103, 15309.
- 38) K. Min, W. Jakubowski, K. Matyjaszewski, *Macromol. Rapid Commun.* 2006, 27, 594.
- 39) S. Carlotti, S. Menoret, P. Desbois, N. Nissner, V. Warzelhan, A. Deffieux, *Macromol. Rapid Commun.* 2006, 27, 905.
- 40) D. J. Arriola, E. M. Carnahan, P. D. Hustad, R. L. Kuhlman, T. T. Wenzel, *Science* 2006, 312, 714.
- 41) Y. Liu, P. G. Jessop, M. Cunningham, C. A. Eckert, C. L. Liotta, *Science* 2006, 313, 958.
- 42) J. Huber, S. Mecking, *Angew. Chem.* 2006, 118, 6462.
- 43) D. Knecht, F. Rittig, R. F. M. Lange, H. Pasch, *J. Chromatogr. A* 2006, 1130, 43.
- 44) S. Weidner, J. Falkenhagen, R.-P. Krüger, U. Just, *Anal. Chem.*, im Druck.
- 45) A. Erbe, K. Tauer, R. Sigel, *Phys. Rev. E.* 2006, 73, 031406.
- 46) S. H. Lim, A. G. Caster, O. Nicolet, S. R. Leone, *J. Phys. Chem. B* 2006, 110, 5196.
- 47) Y. Lu, *Angew. Chem.* 2006, 118, 7826.
- 48) F. E. Alemdaroglu, K. Ding, R. Berger, A. Herrmann, *Angew. Chem.* 2006, 118, 4313.
- 49) E. Jahnke, I. Lieberwirth, N. Severin, J. P. Rabe, H. Frauenrath, *Angew. Chem.* 2006, 118, 5510.
- 50) J. Couet, M. Biesalski, *Macromolecules* 2006, 39, 7258.
- 51) J. Hentschel, E. Krause, H. G. Börner, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 7722.
- 52) T. W. Schleuss, R. Abbel, M. Gross, D. Schollmeyer, H. Frey, M. Maskos, R. Berger, A. F. M. Kilbinger, *Angew. Chem.* 2006, 118, 3036.
- 53) I. K. Voets, A. de Keizer, P. de Waard, P. M. Frederik, P. H. H. Bomans, H. Schmalz, A. Walther, S. M. King, F. A. M. Leermakers, M. A. C. Stuart, *Angew. Chem.* 2006, 118, 6825.
- 54) J. Haldar, D. An, L. Alvarez de Cienfuegos, J. Chen, A. M. Klibanov, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 2006, 103, 17667.
- 55) G. K. Samoei, W. Wang, J. O. Escobedo, X. Xu, H.-J. Schneider, R. L. Cook, R. M. Strongin, *Angew. Chem.* 2006, 118, 5445.
- 56) J. Kim, S. Yun, Z. Ounaies, *Macromolecules* 2006, 39, 4202.
- 57) S. Zürcher, D. Wäckerlin, Y. Bethuel, B. Malisova, M. Textor, S. Tosatti, K. Gademann, *J. Am. Chem. Soc.* 2006, 128, 1064.
- 58) S. Muthukrishnan, M. Nitschke, S. Gramm, Z. Ozyürek, B. Voit, C. Werner, A. H. E. Müller, *Macromol. Biosci.* 2006, 6, 658.
- 59) L. Ionov, M. Stamm, S. Diez, *Nano Lett.* 2006, 6, 1982.
- 60) I. S. Chronakis, B. Milosevic, A. Frenot, L. Ye, *Macromolecules* 2006, 39, 357.
- 61) P. Ye, Z.-K. Xu, J. Wu, C. Innocent, P. Seta, *Macromolecules* 2006, 39, 1041.