

Die Welt der modernen Industriestaaten ist durch Kunststoffe geprägt. Sie begegnen uns in einer Vielzahl von Gebrauchsgegenständen, unserer Kleidung und Wohnumwelt, den Verpackungen von Lebensmitteln, im Verkehrsgeschehen und in der Medizintechnik. Chemiker und Ingenieure arbeiten kontinuierlich an der Verbesserung der Herstellungsverfahren für Polymere, mit dem Ziel, deren Eigenschaften noch besser steuern und kontrollieren zu können und neue Materialien für nanotechnologische und biomedizinische Anwendungen zu entwickeln. Die Verfahren der »kontrollierten radikalischen Polymerisation«, die im Institut für Physikalische Chemie der Universität Göttingen angewendet und erforscht werden, haben dabei große Fortschritte auf dem Gebiet der Synthese makromolekularer Architekturen und polymerer Materialien gebracht. Das Innovationspotenzial dieser Methoden ist dabei noch lange nicht ausgeschöpft. Sie erlauben eine verbesserte Steuerung von Polymereigenschaften und erschließen den Zugang zu neuartigen Materialien.

Maßgeschneiderte Makromoleküle

Neue Wege in der Polymersynthese

Michael Buback, Philipp Vana

Aus Makromolekülen aufgebaute Kunststoffe sind mit einer Weltjahresproduktion von weit mehr als 100 Millionen Tonnen neben den Grundchemikalien Schwefelsäure und Ammoniak die in größten Mengen hergestellten Chemieprodukte. Kunststoffe umgeben uns im Alltag, wobei der bloße Augenschein oft nicht klären kann, ob Bekleidungsgegenstände, Fußbodenbeläge, Gardinen, Möbel oder vielfältige andere Materialien aus einem natürlichen Werkstoff oder aus chemischer Produktion stammen. Haushaltsgeräte, Verpackungen und Dämmstoffe bestehen weit überwiegend aus Polymeren. Optische Datenspeicher nutzen die Transparenz, Formstabilität und geringe Wasseraufnahme des Werkstoffs Polycarbonat. Skier, Tennisschläger, aber auch Formel-1-Rennwagen enthalten zu einem erheblichen Anteil polymere Hochleistungs-Werkstoffe. Polymere sind für mobile Anwendungen besonders attraktiv, da sie eine enorme Gewichtsreduktion erlauben und dabei die sonstigen Werkstoff-Eigenschaften erhalten bleiben oder so-

gar noch verbessert werden. Der Pro-Kopf-Verbrauch an Polymeren ist ein wichtiger Indikator für den Wohlstand eines Landes. Er liegt in den armen Ländern bei wenigen Hundert Gramm im Jahr und bei über 100 Kilogramm in hoch entwickelten Ländern.

Polymere sind kettenförmige Moleküle, die sich aus verknüpften Grundbausteinen, den Monomeren (griechisch *mono* »einzeln« und *meros* »Teil«) aufbauen. Diese Kettenstruktur verleiht den Polymermaterialien einen starken inneren Zusammenhalt. Sie führt zu den bekannten Eigenschaften der Kunststoffe, wie Elastizität oder Zähigkeit. Während sich biologische Polymere oft aus mehreren Monomerarten zusammensetzen, sind synthetisch hergestellte Polymere meist aus nur ein oder zwei Monomerarten aufgebaut. Die erstaunliche Vielfalt der Materialeigenschaften von Kunststoffen, die trotz des relativ einfachen Grundaufbaus erzielt werden kann, ergibt sich aus der chemischen Natur der jeweiligen Monomerbausteine. Diese bestimmen beispielsweise, ob ein Kunststoff sauer-

stoff- und wasserdurchlässig ist, wodurch er etwa für medizinische Anwendungen wie Kontaktlinsen geeignet ist, oder ob er lösungsmittelresistent und leitfähig ist, was ihn für antistatische Beschichtungen oder Kunststoffbatterien verwendbar macht. Über die chemische Natur der Grundbausteine hinaus beeinflussen die Länge sowie die Gestalt der Makromoleküle die Eigenschaften der Polymere. Bei gleicher chemischer Zusammensetzung können polymere Werkstoffe in ihrer Zähigkeit, Härte und Elastizität sehr unterschiedliche Werte aufweisen. So kann der Kunststoff Polyethylen – das weltweit im größten Umfang hergestellte Polymer – je nach seiner Kettengestalt unter anderem eine weiche Folie für Plastiktüten wie auch ein fester Werkstoff für Prothesen sein.

Abbildung 1 gibt einen Überblick über Merkmale der Gestalt von synthetisch hergestellten Makromolekülen. Die Eigenschaften des Polymermaterials werden durch die Gestalt bestimmt. In der linken Spalte sind die unterschiedlichen Architekturen, wie fadenförmige Moleküle, Makromoleküle mit Kurz- und Langketten-Verzweigungen, sternförmige Moleküle, kammförmige sowie vernetzte Moleküle, gezeigt. Verzweigungen führen zu einer loseren Packung der Polymerketten im festen Zustand, wodurch die Kristallisation behindert und der Kunststoff weicher wird. Sternpolymere zeigen unter anderem eine verminderte Viskosität im Ver-



gleich zu linearen Polymerketten, und vernetzte Strukturen führen zu Unlöslichkeit, aber mechanischer Stabilität.

Die mittlere Spalte von Abbildung 1 illustriert die Polymer-Zusammensetzung. So genannte »Homopolymere« bestehen aus nur einer Art von Monomerbausteinen. Wenn das Makromolekül aus zwei Arten von Monomeren besteht – es wird dann »binäres Copolymer« genannt –, sind verschiedene Anordnungen entlang der Molekülkette denkbar. Die beiden Bausteine können unregelmäßig (statistisch) oder regelmäßig, etwa in Blöcken, angeordnet sein. Auch können die in Abbildung 1 gezeigten Kamm-Copolymer sowie Gradienten-Copoly-

stellen somit eine untrennbare Mischung zweier Homopolymere dar. So können Materialien erzeugt werden, die gleichzeitig plastisch und elastisch sind oder die sowohl wasserverträgliche und Wasser abstoßende Eigenschaften in sich vereinen. Durch letzteres Verhalten werden Selbstorganisationen im Mikro- und Nanometerbereich möglich, die Anwendungen der Materialien in der Mikroelektronik erlauben.

Die rechte Spalte von Abbildung 1 zeigt, dass die Verteilung der Molekülgrößen sehr breit oder recht schmal sein kann. Jedes synthetische Polymer ist eine relativ inhomogene Mischung aus Ketten sehr unterschiedlicher Länge. Darin unterscheiden sich syntheti-

heitlichkeit synthetischer Polymermaterialien zu verbessern.

Technisch werden Polymere vorwiegend durch »radikalische Polymerisation« erzeugt. Deren besondere Vorteile liegen in der weiten Anwendbarkeit auf viele Arten von Monomeren, in der enormen Variierbarkeit der Reaktionsbedingungen sowie in der Toleranz gegenüber Wasser und vielfältigen Verunreinigungen. Bei dieser Polymerisationsart werden durch Erhitzen oder Belichtung von »Starter«-Molekülen Radikale gebildet. Radikale sind extrem reaktionsfreudige Moleküle, die in einer Kettenreaktion Monomermoleküle addieren. Durch Bindungen werden die Moleküle solange miteinander verknüpft, bis das Kettenwachstum durch Reaktion mit einem weiteren Radikal in einer »Abbruchsreaktion« beendet wird. Im einfachsten Fall entsteht somit eine lineare Polymerkette. Die hohe Reaktivität der Radikale kann aber auch dazu führen, dass eine bereits gebildete Polymerkette von Radikalen angegriffen wird, wodurch Verzweigungen an der Angriffsstelle entstehen.

Die Radikal-Reaktionen laufen in der herkömmlichen radikalischen Polymerisation ungeordnet und nebeneinander ab. Die Länge und Struktur des fertigen Polymers werden somit durch das statistische Auftreten dieser Reaktionen bestimmt. Um Materialeigenschaften besser steuern zu können, besteht der Wunsch, den radikalischen Polymerisationsprozess so zu kontrollieren, dass Makromoleküle sehr einheitlicher Größe und Gestalt entstehen. Besonders bei Spezialanwendungen von Polymeren, wie im Bereich der Nanotechnologie und bei biomedizinischen Anwendungen, sind solch maßgeschneiderte Makromoleküle zunehmend gefragt. An der Universität Göttingen wird deshalb an Techniken gearbeitet, die die ungeordneten radikalischen Reaktionen kontrollieren. Bei synthetischen Polymeren wird dabei

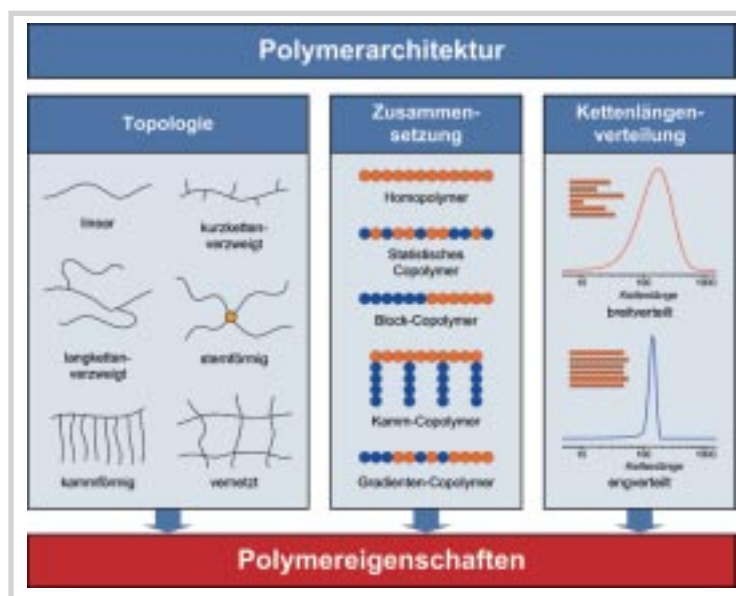


Abbildung 1: Merkmale der Gestalt von synthetischen Polymeren

mere gewünschte Anordnungen der Monomer-Bausteine darstellen. Statistische Copolymere zeigen in der Regel Mischungen der jeweiligen Homopolymereigenschaften. Copolymere mit Blöcken hingegen bringen die individuellen Eigenschaften beider Homopolymere in das Material ein. Da die Blöcke fest miteinander verbunden sind, findet keine Entmischung der beiden Polymere statt, wie sie bei einer Mischung (»Blends«) der beiden Homopolymere auftritt. Blockcopolymere

sche von den biologischen Makromolekülen, die meist eine wohldefinierte Kettenlänge aufweisen. Die üblichen Herstellungsmethoden von Kunststoffen erlauben keine genaue Einstellung einer bestimmten Kettenlänge. Es kann lediglich auf den Mittelwert der entstehenden Ketten Einfluss genommen werden. Mit neuen Polymerisationsmethoden, wie sie auch an der Universität Göttingen studiert werden, gelingt es aber, der Natur zunehmend ein Stück näher zu kommen und die Ein-

zwar nicht die enorme Struktur-treue biologischer Makromoleküle bezüglich Anzahl und Sequenz ihrer Bausteine erreicht, es ist aber dennoch ein faszinierender Aspekt, die vielfältigen, parallel und in Folge ablaufenden Teilschritte bei der Herstellung synthetischer Polymere so zu »dirigieren«, dass Makromoleküle mit komplexen Architekturen und einheitlicher Größe entstehen. Hierfür wurden Verfahren zur »kontrollierten radikalischen Polymerisation« entwickelt, wobei die RAFT- (Reversible Additions-Fragmentierungs-Ketten-Transfer) Polymerisation als besonders vielseitig und Erfolg versprechend gilt. In der Abteilung Technische und Makromolekulare Chemie am Institut für Physikalische Chemie werden die

mechanistischen Grundlagen der RAFT-Polymerisation studiert, um leistungsfähigere und für technische Anwendungen geeignete Systeme zu entwickeln. Diese Arbeiten werden im Rahmen des Europäischen Graduiertenkollegs »*Microstructural Control in Free-Radical Polymerization*« im Zusammenwirken mit Gruppen an der Universität Amsterdam (Niederlande), der Technischen Universität Clausthal und der Technischen Universität Eindhoven (Niederlande), aber auch in Kooperation mit industriellen Partnern durchgeführt. Im Rahmen des Göttinger Graduiertenkollegs 782 »*Spektroskopie und Dynamik molekularer Knäuel und Aggregate*«, in dem Arbeitsgruppen aus dem Bereich Chemie und Physik zu-

sammengefasst sind, werden grundlegende Fragen über den Zusammenhang zwischen Mikrostruktur der Makromoleküle und den entsprechenden Materialeigenschaften bearbeitet.

Das Grundprinzip der »kontrollierten radikalischen Polymerisation« ist in Abbildung 2 dargestellt und basiert auf einer umkehrbaren Deaktivierung des polymerisierenden Radikals. Durch Zugabe eines »kontrollierenden« chemischen Agens zu einer herkömmlichen radikalischen Polymerisation wird das Radikal geschützt und verliert für begrenzte Zeitintervalle seine Reaktivität. Es wird zu einem »schlafenden« Radikal. Das Radikal kann sich jeweils für kurze Zeit zurückbilden. In der dabei entstehenden,

Europäisches Graduiertenkolleg 585: Microstructural Control in Free-Radical Polymerization

(red.) Im Mittelpunkt des im Jahr 2000 eingerichteten Europäischen Graduiertenkollegs »Microstructural Control in Free-Radical Polymerization« steht die Förderung exzellenter junger Chemiker in der Promotionsphase und ihre Anbindung an den internationalen Forschungskontext. Auf der Basis eines gemeinsamen Forschungs- und Studienprogramms kooperieren Hochschullehrer in Deutschland mit Partnergruppen in den Niederlanden. In dem Kolleg arbeiten Doktoranden der Universitäten Göttingen und Clausthal sowie Amsterdam und Eindhoven (Niederlande) zusammen. Finanziert wird der deutsche Anteil von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), die zur Zeit 38 Europäische Graduiertenkollegs fördert. Inhaltliches Anliegen ist die intensive Bearbeitung aktuel-

ler Fragestellungen zur radikalischen Polymerisation, die bei der Kunststoffherstellung von zentraler Bedeutung ist. In den letzten Jahren haben Chemiker Methoden der kontrollierten radikalischen Polymerisation entwickelt, die zur Synthese sehr komplexer Polymerarchitekturen herangezogen werden. Damit können Kunststoffe für neue Anwendungen beispielsweise in der Medizintechnik und der Nanotechnologie entwickelt werden.

Im EGK 585 arbeiten zur Zeit rund 40 Kollegiaten und Postdoktoranden. Neue Anforderungen hinsichtlich Qualität und Interdisziplinarität werden in dieser gemeinsamen europäischen Graduiertenausbildung umgesetzt. So wird das Forschungsprojekt jedes Kollegiaten von einem Wissenschaftler seiner Heimatuniversität

und dem Professor einer Partnerhochschule betreut. Mit Blockveranstaltungen, Workshops, Exkursionen und Gastvorträgen bietet das begleitende Seminarangebot eine vertiefte und vielseitige Ausbildung über das Promotionsprojekt hinaus. Die Teilnehmer kommen aus Deutschland, den Niederlanden, Frankreich und Großbritannien, den osteuropäischen Staaten, sowie aus Afrika, Indien und Australien. Sprecherin des Europäischen Graduiertenkollegs ist Prof. Dr. Gudrun Schmidt vom Institut für Technische Chemie der Technischen Universität Clausthal. Für die Universität Göttingen koordiniert Prof. Dr. Michael Buback vom Institut für Physikalische Chemie, Abteilung Technische und Makromolekulare Chemie, das Forschungs- und Studienprogramm.

sehr kurzen »Wachphase« kann es polymerisieren, bevor es erneut deaktiviert wird. Da als Resultat ein geringerer Anteil an Radikalen in dem Polymerisationssystem vorhanden ist, werden die »Abbruchreaktionen« zwischen zwei Radikalen, welche zu einem dauerhaften Verlust der wachsenden Makroradikale führen, minimiert. Die kontrollierte Polymerisation wird deshalb auch als »lebend« bezeichnet, da die geschützten Radikale wieder zum Wachsen stimuliert werden können. Alle wachsenden Makroradikale besitzen zudem eine nahezu gleiche, mit dem Reaktionsfortgang stetig anwachsende Kettenlänge.

In der herkömmlichen, »konventionellen Polymerisation« ist die individuelle Lebensdauer wachsender Polymerketten auf höchstens einige Sekunden beschränkt, sodass ein Eingreifen in den Polymerisationsprozess zur Kontrolle der Mikrostruktur nicht gelingt. Dort werden fertige Makromoleküle durch einen sich stän-

alle Makromoleküle nach derselben Reaktionszeit nahezu dieselbe Länge, wodurch eine gute Kontrolle der Kettenlänge ermöglicht wird. So kann man etwa die Länge des entstehenden Makromoleküls in einfacher Weise verdoppeln, indem man die Polymerisation doppelt so lange ablaufen lässt. Da in der kontrollierten radikalischen Polymerisation die Lebensdauer der wachsenden Polymerketten bis zu Stunden beträgt, kann während deren Bildung in den Wachstumsprozess eingegriffen werden und beispielsweise durch einfachen Wechsel des Monomeren während der Polymerisation ein Blockcopolymer hergestellt werden.

Das Gleichgewicht zwischen aktiven und »schlafenden« Radikalen wurde bisher auf drei grundlegend verschiedenen Wegen realisiert. Bei dem *Dissoziations-Kombinations-Mechanismus* reagiert das wachsende Polymerradikal in einer reversiblen Reaktion mit einem stabilen Radikal, das

Beim *degenerativen Übertragungs-Mechanismus* reagiert das wachsende Radikal mit einem Makromolekül, das eine aktivierbare Gruppe am Kettenende trägt. Dabei wird das angreifende Radikal selbst deaktiviert und das angegriffene Makromolekül zum wachsenden Radikal. Dieser Mechanismus ist in der Reversiblen Additions-Fragmentierungs-Ketten-Transfer (RAFT)-Polymerisation verwirklicht, in der schwefelorganische Verbindungen eingesetzt werden. Da die Ausgangsstoffe und Produkte der individuellen RAFT-Reaktion zwischen wachsenden Makroradikalen und den kontrollierenden Agenzien chemisch identisch sind, ist eine Bestimmung der Reaktion mit herkömmlichen physikalisch-chemischen Messmethoden schwierig. Um den Mechanismus und die Geschwindigkeit dieser Reaktion dennoch bestimmen zu können, wird unter anderem das Schicksal eines kurzlebigen Zwischenproduktes verfolgt.

Die RAFT-Polymerisation übertrifft die anderen »lebenden« Polymerisationsverfahren aufgrund ihrer vielfältigen Einsetzbarkeit. Sie ist besonders attraktiv, da sie unempfindlich gegenüber Wasser ist, das in vielen technischen Prozessen wegen der geringen Kosten und der Umweltverträglichkeit eingesetzt wird. Sie ist zudem bei Monomeren anwendbar, die mit anderen kontrollierten radikalischen Techniken nicht oder nur schwer zu polymerisieren sind. Dazu gehören beispielsweise Monomere, die zu biologisch und medizinisch verträglichen Polymermaterialien führen, wie etwa Acrylsäure und Vinylacetat, dem wichtigen Vorläufermonomer für die Polyvinylalkohol-Synthese. Ein weiterer Vorteil der RAFT-Polymerisation besteht darin, dass im Gegensatz zu den anderen kontrollierten Polymerisations-Verfahren die Geschwindigkeit gegenüber der konventionellen Polymerisation nicht redu-

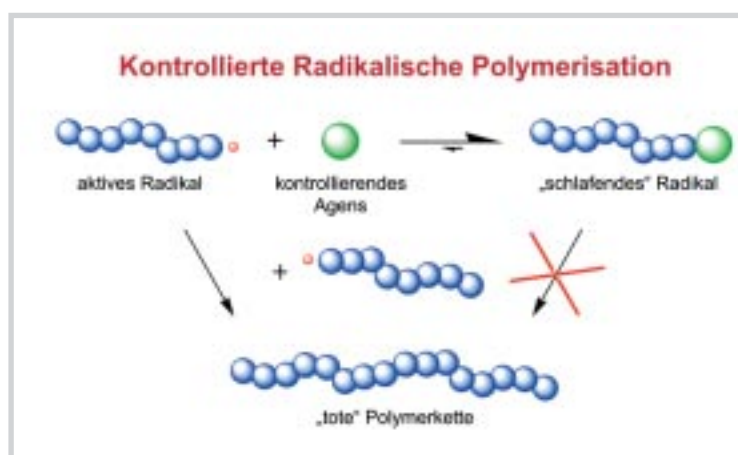


Abbildung 2:
Grundprinzip der kontrollierten radikalischen Polymerisation

dig wiederholenden Prozess von Start, Wachstum und irreversiblen Abbruch gebildet, bis alles Monomere verbraucht ist. In der *kontrollierten* Polymerisation hingegen werden alle Polymerketten gleichzeitig zu Beginn der Polymerisation gestartet und wachsen auch während des Polymerisationsprozesses mit einheitlicher Geschwindigkeit. Darum haben

selbst keine Polymerisation starten kann. Als stabile Radikale werden meist Nitroxyle verwendet, wie in der »Nitroxide-Mediated Polymerization« (NMP). Beim *Atomübertragungs-Mechanismus* wird beispielsweise ein Bromatom von komplexiertem Kupferbromid auf das wachsende Radikal übertragen (»Atom Transfer Radical Polymerization«, ATRP).

ziert wird. Bei industriellen Produktionsprozessen ist das ein wichtiger ökonomischer Aspekt.

Am Göttinger Institut werden zur Aufschlüsselung des komplexen RAFT-Mechanismus Experimente bei Drücken bis zu mehreren tausend bar, bei sehr hoher Temperatur und in überkritischem Kohlendioxid als umweltverträglichem Lösemittel [1] durchgeführt, wobei Puls-Laser-Techniken, infrarotspektroskopische Detektion des Reaktionsfortschrittes und Elektronenspinresonanz-Spektroskopie an charakteristischen Radikalen während der Polymerisation eingesetzt werden. Die Anwendung von hohem Druck bei der radikalischen Polymerisation gewährt Einblicke in den mechanistischen Ablauf der Reaktion. Zudem bewirkt hoher Druck eine

vorteilhafte Beschleunigung der Polymerisation. Außerdem haben wir herausgefunden, dass durch RAFT-Polymerisation bei hohem Druck die Einheitlichkeit der entstehenden Makromoleküle weiter verbessert werden kann [2].

Aufbauend auf den aus diesen mechanistischen Studien erhaltenen Struktur-Eigenschafts-Beziehungen wurden neuartige RAFT-Agenzien entwickelt, die für die Synthese komplexer makromolekularer Architekturen maßgeschneidert sind. So konnten an der Universität Göttingen etwa kontrollierende Substanzen entwickelt werden, durch die eine einfache Synthese von sternförmigen Makromolekülen gelingt, welche viel versprechende Materialeigenschaften zeigen: Wegen der geringeren Viskosität im Vergleich zu linea-

ren Polymeren derselben Kettenlänge und wegen der Widerstandsfähigkeit gegen mechanische Scherbelastungen werden Sternpolymere schon heute Motorölen und Kraftstoffen zugesetzt, um ein optimales Fließverhalten bei unterschiedlichen Temperaturen und starker Belastung zu gewährleisten. Außerdem zeigen Sternpolymere eine ausgeprägte Tendenz zur Selbstorganisation, die sich beispielsweise in der Bildung von regelmäßigen nanostrukturierten Membranen manifestiert. Sternpolymere können aber auch als molekulares Gerüst für die Herstellung unimolekularer Behälter, so genannter »nanocounter«, dienen, welche für den Transport von Wirkstoffen in Organismen verwendbar sind und eine neue Form der Medikamen-

Graduiertenkolleg 782: Spektroskopie und Dynamik molekularer Knäuel und Aggregate

(red.) Flexible kettenförmige Moleküle kommen einerseits überall in der Natur vor, beispielsweise in Eiweißmolekülen, und sind andererseits in Form von Kunststoffen aus unserem Alltag nicht wegzudenken. Sie sind daher zentraler Forschungsgegenstand der Materialwissenschaften und der Lebenswissenschaften. In dem Graduiertenkolleg 782 »Spektroskopie und Dynamik molekularer Knäuel und Aggregate« an der Universität Göttingen werden zwei Aspekte solcher Kettenmoleküle aus der Perspektive der physikalisch-chemischen Grundlagenforschung behandelt, die bei analoger Ursache unterschiedliche Auswirkungen haben können. Es handelt sich um die Fähigkeit von Molekülketten, mit sich selbst durch geordnete Faltung oder zufällige Knäuelung in Wechselwirkung zu treten, sich aber auch zu

größeren Einheiten zusammenzulagern (Aggregation). Letzteres ist zum Beispiel bei Krankheiten wie Alzheimer und Parkinson das Problem, bei synthetischen Polymeren dagegen ist die Aggregation der Schlüssel zu vielen erwünschten Materialeigenschaften. Weltweit werden solche Fragestellungen häufig isoliert betrachtet. Das Göttinger Kolleg konzentriert sich dagegen gerade auf Synergien und Analogien zwischen den biologischen und chemischen Anwendungsfeldern. Physiker und Chemiker schlagen den Bogen von einfachen Modellsystemen bis hin zu realen Anwendungen im Bereich der synthetischen Polymere und der Biopolymere. Bei ihrer Forschung spielen spektroskopische Methoden eine herausragende Rolle.

Im Graduiertenkolleg 782 arbeiten Physiker und Chemiker der

Universität Göttingen und des Max-Planck-Instituts für biophysikalische Chemie zusammen. Es besteht seit 2002 und steht vor der Bewilligung der letzten Förderperiode (2006 bis 2011) durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG), die es derzeit mit rund einer halben Million Euro pro Jahr finanziert. Für den erfolgreichen Übergangsantrag (Förderung 2005 bis 2006) wurde das Kolleg in seiner Konzeption und Fragestellung neu ausgerichtet. Aktuell sind elf Arbeitsgruppen mit 25 Kollegiaten beteiligt, von denen sich 16 über Stipendien der DFG finanzieren. Die Kollegiaten kommen aus Deutschland und dem europäischen Ausland sowie aus den USA und China, Indien, Kanada, Korea, der Mongolei und Russland. Sprecher des Kollegs ist der Chemiker Prof. Dr. Martin Suhm vom Institut für Physikalische Chemie.

tengabe darstellen könnten. Die Zugabe des neu entwickelten, sternförmigen RAFT-Agens zu einer herkömmlichen Polymerisation erlaubt die Kontrolle der Molekülgröße des fertigen Polymeres und prägt gleichzeitig durch seinen multifunktionellen Charakter dem entstehenden Makromolekül eine sternförmige Struktur auf [3].

Die Verfahren der *kontrollierten* radikalischen Polymerisation haben enorme Fortschritte auf dem Gebiet der Synthese makromolekularer Architekturen und polymerer Materialien gebracht. Das Innovationspotenzial dieser Methoden ist bei weitem noch nicht ausgeschöpft, und es wird intensiv sowohl an der Perfektionierung der kontrollierten Bildung von Makromolekülen als auch an der detaillierten Aufschlüsselung von Kinetik und Mechanismus gearbeitet. Durch diese neuen Techniken wird eine relativ einfache und auch kostengünstige Kontrolle der Schlüsseleigenschaften von synthetischen Polymeren, der Kettenlänge und der Gestalt, möglich. Dies erlaubt nicht nur eine verbesserte Steuerung von bekannten Polymereigenschaften, sondern erschließt auch den Zugang zu neuartigen Materialien. Das bereits enorm große Anwendungsfeld synthetischer Polymere wird somit weiter verbreitert, und neben verbesserten Kunststoffmaterialien werden auch neue Makromoleküle für vielfältige Einsatzgebiete zugänglich. ◀

Literatur:

- [1] Arita, T.; Buermann, S.; Buback, M.; Vana, P. RAFT Polymerization of Methyl Acrylate in Carbon Dioxide. *Macromolecular Materials and Engineering*, 2005, 290, 283-293.
- [2] Arita, T.; Buback, M.; Janssen, O.; Vana, P. RAFT Polymerization of Styrene up to High Pressure: Rate Enhancement and Improved Control. *Macromolecular Rapid Communications* 2004, 25, 1376-1381.
- [3] Boschmann, D.; Vana, P. Poly(vinyl acetate) and Poly(vinyl propionate) Star Polymers via Reversible Addition Fragmentation Chain Transfer (RAFT) Polymerization. *Polymer Bulletin* (Heidelberg, Germany) 2005, 53, 231-242.

Advanced polymeric materials have become available by the introduction of controlled radical polymerization techniques, which enable the controlled synthesis of synthetic polymers with predefined and narrowly distributed molecular weights as well as distinct end-group functionalities. Additionally, these techniques allow for the generation of complex macromolecular architectures, such as block, comb and star (co)polymers. The reversible addition fragmentation chain transfer (RAFT) polymerization is arguably the most versatile of these processes with respect to monomer type and reaction con-

ditions. At the University of Göttingen the kinetics of the RAFT process is studied under a wide variety of reaction conditions, e.g., at high pressure, at high temperature, or in solution of supercritical carbon dioxide, in order to obtain deeper insights into the RAFT mechanism and to pave the way for potential industrial applications. Novel star polymers with well-defined molecular masses and uniform end-group functionalities were generated. In addition, the unique features of the RAFT process were exploited for kinetic studies with relevance also for conventional radical polymerization.



Prof. Dr. Michael Buback, Jahrgang 1945, studierte Chemie an der Universität Karlsruhe, an der er 1972 promoviert wurde und sich 1978 habilitierte. Im Jahr 1981 wurde er an die Georgia Augusta berufen, bis 1995 als Professor für Angewandte Physikalische Chemie und im Anschluss auf den Lehrstuhl für Technische und Makromolekulare Chemie. Prof. Buback leitete zahlreiche Forschungsprojekte im Rahmen von Sonderforschungsbereichen und Graduiertenkollegs. Er war unter anderem Fachgutachter der Deutschen Forschungsgemeinschaft und ist Titular Member der International Union of Pure and Applied Chemistry (IUPAC). Für seine Forschung wurde er mit zahlreichen Preisen ausgezeichnet, darunter mit dem Carl-Duisberg-Gedächtnispreis (1989) und dem Dechema-Preis der Max-Buchner-Forschungstiftung (1990). Prof. Buback initiierte das Europäische Graduiertenkolleg »Microstructural Control in Free-Radical Polymerization« als gemeinsame Einrichtung der Universitäten Göttingen und Clausthal sowie Amsterdam und Eindhoven (Niederlande).



Dr. Philipp Vana, Jahrgang 1971, studierte von 1989 bis 1996 Chemie an der Universität Wien (Österreich). Anschließend absolvierte er an der Technischen Universität Wien ein postgraduales Studium der Betriebs-, Rechts- und Wirtschaftswissenschaften, das er als Diplomierter Wirtschaftstechniker im Jahr 2000 abschloss. Zwischen 1996 und 1999 arbeitete Dr. Vana am Institut für Physikalische Chemie der Universität Wien, an der er 1999 mit einem Thema zur radikalischen Polymerisation promoviert wurde. In den Jahren 2001 bis 2003 war er als Research Fellow an der School of Chemical Engineering and Industrial Chemistry der University of New South Wales in Sydney (Australien). 2003 erwarb Dr. Vana den Grad eines Master of Business Administration (MBA) der Donau-Universität Krems (Österreich). Im selben Jahr wechselte er an die Universität Göttingen. Gegenwärtig arbeitet er am Institut für Physikalische Chemie an seiner Habilitation.

Kunststoffproduktion: Neuer Katalysator für günstiges Herstellungsverfahren

Chemiker der Universität Göttingen entwickeln Polymerisationskatalysator für Polyethylene

(red.) Chemiker der Universität Göttingen haben einen neuen Katalysator für die Kunststoffherstellung entwickelt, der den bisherigen Einsatz einer teuren Chemikalie und damit die Herstellungskosten von Kunststoffprodukten wesentlich reduziert. »Mit diesem innovativen Katalysator, der chemisch den Prozess der Kunststoffbildung in Gang setzt, kann die Verwendung des Co-Katalysators Methylalumoxan um rund 60 Prozent verringert werden«, erläutert Prof. Dr. Herbert W. Roesky, der zusammen mit Dr. Guangcai Bai und Doktorand Sanjay Singh vom Göttinger Institut für Anorganische Chemie für die Entwicklung verantwortlich zeichnet. Die Forschungsergebnisse wurden im Journal of the American Chemical Society publiziert. Die Georg-August-Universität hat die Erfindung über die MBM ScienceBridge GmbH als Patent angemeldet.

Kunststoffe aus Ethylenprodukten haben weltweit den größten Marktanteil und werden 2006 voraussichtlich 10,6 Millionen Tonnen erreichen. Ein Hauptkostenfaktor bei ihrer Produktion ist die Menge der für

die Polymerisation benötigten Aktivierungskatalysatoren. Mit dem neuen Göttinger Verfahren wäre eine spürbare Kosteneinsparung möglich, so Prof. Roesky. »Unser Katalysator zeichnet sich durch einen innovativen, heterobimetallischen Kern aus, der die Ausgangsbasis einer Vielzahl von potenziellen anderen Katalysatoren sein kann. Heterobimetallische Katalysatorkerne für die Polymerisation sind bislang unbekannt und eröffnen zudem ein vollkommen neues Forschungsgebiet.« Der neue Katalysator ist stabil, temperaturbeständig und erreicht schnell die maximale Wirksamkeit in der chemischen Reaktion.

Die MBM ScienceBridge GmbH / Kompetenzzentrum MBM übernimmt für die Universität Göttingen die Vermarktung der Neuentwicklung. MBM ist ein Technologietransferdienstleister an der Georgia Augusta für die Bereiche Chemie, Physik, Agrar, Biotechnologie und Medizintechnik und koordiniert die Kontakte zwischen Erfindern, Patentanwälten und Partnern aus der Industrie.

FIDES | Treuhandgesellschaft

Mit ca. 270 Mitarbeitern zählen wir zu den führenden mittelständisch geprägten Wirtschaftsprüfungs- und Steuerberatungsgesellschaften unserer Region mit Büros in Bremen, Bremerhaven und Hamburg. Unsere Tätigkeitsschwerpunkte sind die Prüfung und Beratung mittelständischer Unternehmen jeglicher Rechtsform sowie öffentlicher Unternehmen.

Wir bieten Bewerbern mit überdurchschnittlichen Voraussetzungen

Berufseinstieg als Prüfungsassistent/in
Praktika in der Wirtschaftsprüfung/Steuerberatung
Referendariate in den Bereichen
Steuer- und Gesellschaftsrecht

an unseren Standorten in Bremen und Hamburg.

Wenn Sie an einer dieser Stellen interessiert sind, freuen wir uns auf Ihre aussagefähigen Bewerbungsunterlagen.

FIDES Treuhandgesellschaft KG
Wirtschaftsprüfungsgesellschaft · Steuerberatungsgesellschaft
Contrescarpe 97 · 28195 Bremen · www.fides-treuhand.de