

Polymer forschung

POSITIONSPAPIER

in Deutschland

15. JULI 2018

Koordination und Redaktion

Prof. Dr. Martin Möller
RWTH Aachen und Leibniz-Institut DWI
Prof. Dr. Ulrich S. Schubert
Friedrich-Schiller-Universität Jena

Mit Beiträgen und
getragen von über 130
Professor_en_innen
der Polymerwissen-
schaften in Deutschland
sowie Industrie-
vertreter_n_innen und
Fachgruppen.



Dieses Positionspapier zur Polymerforschung stellt sich zur Aufgabe, einen Beitrag zur Profilierung des Forschungsfelds zu leisten, soll aber die Aufmerksamkeit auch auf eine längst stattfindende Erweiterung und Integration zu einem größeren Feld der „Molekularen Materie und Polymerwissenschaften“ lenken. Die Autoren sind überzeugt, dass dies eines der spannendsten und einflussreichsten Wissenschaftsgebiete des 21. Jahrhunderts ist, dessen Förderung wegen der interdisziplinären Vernetzung eine Herausforderung für Universitäten und Forschungsinstitute, aber auch für die zukünftige Entwicklung kompetitiver Förderstrukturen darstellt.

Ausgangspunkt ist die schnell zunehmende Integration des Forschungs- und Lehrgebiets der Polymerwissenschaften und weiterer Wissenschaftsbereichen der molekularen Materie. Dabei entspricht die Sichtbarkeit dieses Forschungsfelds in der Öffentlichkeit und in den deutschen Forschungsorganisationen nicht seiner fundamentalen und technologischen Bedeutung. Gleichzeitig leidet das Ansehen unserer Forschung unter der nur in einzelnen Fällen berechtigten Sorge um gesundheitliche und ökologische Belastungen (z. B. Plastikabfälle). Hier soll dieses Positionspapier nicht problem- sondern zukunftsorientiert auf die großen wissenschaftlichen Herausforderungen und technologischen Chancen hinweisen. Die Vielfältigkeit und die organische Natur der (makro)molekularen Materialien eröffnet insbesondere dort, wo Entwicklungen wesentlich durch die Verfügbarkeit und Beherrschung von Materialklassen angestoßen werden, nachhaltige und bahnbrechende Perspektiven. Die mit diesen Materialien mögliche Symbiose von menschengemachter Materialtechnologie und der Natur fokussiert sich auf zwei Punkte (i) neue und bessere Leistungen bei geringerem Ressourceneinsatz und (ii) die Integration in unsere natürliche Umwelt und geschlossene Kreisläufe. Im Kern betrifft die zukünftige Entwicklung des Forschungsfelds zum einen die Beherrschung der Eigenschaften und der Entstehung komplexer, hierarchisch strukturierter Materialien als Grundlage völlig neuer Produkt- und Verfahrensentwicklungen und zum anderen, als eine besondere fundamentale wissenschaftliche Herausforderung, das Verständnis des Übergangs von toter zu aktiver lebender Materie.

Die formulierten Zukunftsperspektiven richten sich zunächst an die Wissenschaftler_innen selbst, mit dem Ziel, die interdisziplinäre Zusammenarbeit und Konvergenz zu fördern, dann aber auch an Verbände, Medien und Zuwendungsgeber, um die grundsätzliche Bedeutung und die Fortschrittsperspektiven in einem größeren Rahmen darzustellen.

Die Herausgeber



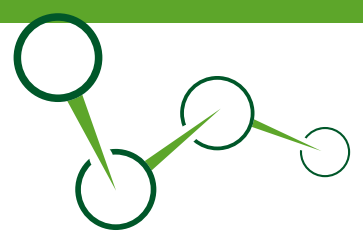
Prof. Dr. Martin Möller

RWTH Aachen und Leibniz-Institut DWI



Prof. Dr. Ulrich S. Schubert

Friedrich-Schiller-Universität Jena



Koordination

Prof. Dr. Martin Möller (RWTH Aachen und DWI – Leibniz-Institut für Interaktive Materialien, Aachen)
Prof. Dr. Ulrich S. Schubert (Friedrich-Schiller-Universität Jena)

Mit Beiträgen und getragen von folgenden Wissenschaftler_innen

Prof. Dr. Volker Abetz (Universität Hamburg), **Prof. Dr. Volker Altstädt** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Annette Andrieu-Brunsen** (TU Darmstadt), **Prof. Dr. Markus Antonietti** (Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung Golm), **Prof. Dr. Christopher Barner-Kowollik** (Karlsruhe Institute of Technology – KIT), **Prof. Dr. Matthias Ballauff** (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie), **Prof. Dr.-Ing. Martin Bastian** (SKZ Würzburg), **Prof. Dr. Mario Beiner** (Fraunhofer IMWS Halle), **Prof. Dr. Pol Besenius** (Johannes Gutenberg-Universität Mainz), **Prof. Dr. Sabine Beuermann** (TU Clausthal), **Dr. Ruth Bieringer** (Freudenberg, Weinheim), **Prof. Dr. Markus Biesalski** (TU Darmstadt), **Prof. Dr. Wolfgang H. Binder** (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), **Prof. Dr. Paul Blom** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Prof. Dr. Bernhard Blümich** (RWTH Aachen), **Prof. Dr. Alexander Böker** (Fraunhofer Institut für Angewandte Polymerforschung, Potsdam), **Prof. Dr. Mischa Bonn** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Prof. Dr. Hans G. Börner** (Humboldt-Universität zu Berlin), **Prof. Dr. Michael R. Buchmeiser** (Universität Stuttgart und Institut für Textilchemie und Chemiefasern in Denkendorf), **Prof. Dr. Hans-Jürgen Butt** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Prof. Dr. Marcelo Calderon** (Freie Universität Berlin), **Prof. Dr. Helmut Cölfen** (Universität Konstanz), **Prof. Dr. Xinliang Feng** (TU Dresden), **Prof. Dr. Andreas Fery** (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden – IPF), **Prof. Dr. Dagmar Fischer** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Stephan Förster** (Forschungszentrum Jülich), **Prof. Dr. Peter Fratzl** (Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung Golm), **Prof. Dr. Holger Frey** (Johannes Gutenberg-Universität Mainz), **Dr. Thomas Früh** (Arlanxeo Deutschland GmbH, Leverkusen), **Prof. Dr. Ulrich Giese** (Deutsches Institut für Kautschuktechnologie Hannover und Leibniz Universität Hannover), **Dr. Patrick Glöckner** (Evonik Essen), **Prof. Dr. Achim Göpferich** (Universität Regensburg), **Prof. Dr. Michael Gradzielski** (TU Berlin), **Prof. Dr. Andreas Greiner** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Jürgen Groll** (Julius-Maximilians-Universität Würzburg), **Prof. Dr.-Ing. Guido Grundmeier** (Universität Paderborn), **Prof. Dr. Franziska Gröhn** (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), **Jun.-Prof. Dr. André H. Gröschel** (Universität Duisburg-Essen), **Prof. Dr. Rainer Haag** (Freie Universität Berlin), **Prof. Dr. Christian Hackenberger** (Leibniz-Forschungsinstitut für Molekulare Pharmakologie Berlin), **Dr. Martin D. Hager** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Laura Hartmann** (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf), **Prof. Dr. Andreas Hartwig** (Fraunhofer-Institut für Fertigungstechnik und Angewandte Materialforschung und Universität Bremen), **Prof. Dr. Stefan Hecht** (Humboldt-Universität zu Berlin), **Prof. Dr. Gert Heinrich** (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden – IPF), **Prof. Dr. Thomas Heinze** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Andreas Herrmann** (RWTH Aachen), **Dr. Michael Hilt** (Forschungsgesellschaft für Pigmente und Lacke e.V.), **Prof. Dr. Dariush Hinderberger** (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), **Prof. em. Hartwig Höcker** (Aachen), **Prof. Dr. Sigurd Höger** (Universität Bonn), **apl. Prof. Dr. Eike G. Hübner** (TU Clausthal), **Jun.-Prof. Dr. Sven Hüttner** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Rainer Jordan** (TU Dresden), **Prof. Dr. Matthias Karg** (Heinrich-Heine-Universität Düsseldorf), **Dr. Stefan Kirsch** (BASF), **Prof. Dr. Doris Klee** (RWTH Aachen), **Jun.-Prof. Dr. Daniel Klinger** (Freie Universität Berlin), **Prof. Dr. Regine von Klitzing** (TU Darmstadt), **Prof. Dr. Joachim Koetz** (Universität Potsdam), **Prof. Dr. Friedrich Kremer** (Universität Leipzig), **Prof. Dr. Kurt Kremer** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Prof. Dr. Jörg Kressler** (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), **Prof. Dr. Lothar Kroll** (TU Chemnitz), **Prof. Dr. Dirk Kuckling** (Universität Paderborn), **Prof. Dr. Katharina Landfester** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Dr. Gerhard Langstein** (Covestro Leverkusen), **Prof. Dr. André Laschewsky** (Universität Potsdam), **Prof. Dr. Marga Lensen** (TU Berlin), **Prof. Dr. Yan Lu** (Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie), **Prof. Dr. Sabine Ludwigs** (Universität Stuttgart), **Prof. Dr. Gerrit Luinstra** (Universität Hamburg), **Prof. Dr. Robert Luxenhofer** (Julius-Maximilians-Universität Würzburg), **Prof. Dr. Robert Magerle** (TU Chemnitz), **Prof. Dr. Stefan Mecking** (Universität Konstanz), **Prof. Dr. Michael Meier** (Karlsruhe Institute of Technology – KIT), **Prof. Dr.-Ing. Dieter Meiners** (TU Clausthal), **Prof. Dr. Rolf Mülhaupt** (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg),

und unterstützung

Prof. Dr. Axel Müller (Johannes Gutenberg Universität Mainz), **Prof. Dr. Marcus Müller** (Georg-August-Universität Göttingen), **Prof. Dr. Dieter Neher** (Universität Potsdam), **Dr. Jürgen Omeis** (Altana Wesel am Rhein), **Prof. Dr. Georg Papastavrou** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Kalina Peneva** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Andrij Pich** (RWTH Aachen), **Prof. Dr. Matthias Rehahn** (TU Darmstadt), **Prof. Dr. Günter Reiter** (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg), **Prof. Dr. Markus Retsch** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Walter Richtering** (RWTH Aachen), **Prof. Dr. Bernhard Rieger** (TU München), **Prof. Dr. Jürgen Rühle** (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg), **Prof. Dr. Kay Saalwächter** (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), **Prof. Dr. Felix H. Schacher** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Dr. Volker Schaedler** (BASF Lemförde), **Prof. Dr. Thomas Scheibel** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Christoph Schick** (Universität Rostock), **Prof. Dr. Friederike Schmid** (Johannes Gutenberg-Universität Mainz), **Prof. Dr. Hans-Werner Schmidt** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Holger Schönherr** (Universität Siegen), **Prof. Dr. Peter H. Seeberger** (Max-Planck-Institut für Kolloid- und Grenzflächenforschung Potsdam), **Prof. Dr. Sebastian Seiffert** (Johannes Gutenberg-Universität Mainz), **Prof. Dr. Jens-Uwe Sommer** (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden – IPF), **Prof. Dr. Michael Sommer** (TU Chemnitz), **Prof. Dr. Stefan Spange** (TU Chemnitz), **Prof. Dr. Anne Staubitz** (Universität Bremen), **Dr. Nicolas Stöckel** (Covestro Leverkusen), **Prof. Dr. Peter Strohriegel** (Universität Bayreuth), **Prof. Dr. Andreas Taubert** (Universität Potsdam), **Prof. Dr. Patrick Théato** (Karlsruhe Institute of Technology – KIT), **Prof. Dr. Thomas Thurn-Albrecht** (Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg), **Prof. Dr. Jörg C. Tiller** (TU Dortmund), **Prof. Dr. Andrey Turchanin** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Mathias Ulbricht** (Universität Duisburg-Essen), **Prof. Dr. Philipp Vana** (Georg-August-Universität Göttingen), **Prof. Dr. Nico van der Vegt** (TU Darmstadt), **Prof. Dr. Nicolas Vogel** (Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg), **Prof. Dr. Brigitte Voit** (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden – IPF, TU Dresden), **Prof. Dr. Andreas Walther** (Albert-Ludwigs-Universität Freiburg), **Prof. Dr. Ralf Weberskirch** (TU Dortmund), **Prof. Dr. Tanja Weil** (Max-Planck-Institut für Polymerforschung Mainz), **Prof. Dr. Gerhard Wenz** (Universität des Saarlandes), **Prof. Dr. Carsten Werner** (Leibniz-Institut für Polymerforschung Dresden – IPF, TU Dresden), **Prof. Dr. Matthias Wessling** (RWTH Aachen), **Jun.-Prof. Dr.-Ing. Sven Wießner** (TU Dresden), **Prof. Dr. Manfred Wilhelm** (Karlsruhe Institute of Technology – KIT), **Prof. Dr. Alexander Wittemann** (Universität Konstanz), **Prof. Dr. Frank Würthner** (Julius-Maximilians Universität Würzburg), **Dr. Stefan Zechel** (Friedrich-Schiller-Universität Jena), **Prof. Dr. Rudolf Zentel** (Johannes Gutenberg Universität Mainz).

Unterstützt von folgenden Fachkollegien und Fachgesellschaften



Unterstützt durch das
Fachkollegium Polymerforschung
der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG)



Unterstützt durch den
Vorstand der Fachgruppe Lackchemie
der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)




Unterstützt durch den
Vorstand der Fachgruppe Makromolekulare Chemie
der Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)



Unterstützt durch den
Fachverband Chemische Physik und Polymerphysik (CPP)
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Teil I:	
Synopsis und Handlungsempfehlungen	7
Handlungsempfehlungen	11
Teil II:	
Polymerwissenschaften in Deutschland	12
1. Stand und Bedeutung der Polymerwissenschaften in Deutschland	14
1.1 Das Forschungsfeld.....	14
1.2 Die Anwendungen.....	14
2. Entwicklung eines erweiterten Forschungsfeldes der Molekularen Materialien, dessen Grenzen und Herausforderungen über den Kern der Polymerwissenschaften hinausgehen	17
2.1 Die Komplexität makromolekularer Materialien als ein Leitbild der Polymerforschung	18
2.2 Wohin führt die zunehmende Beherrschung der Komplexität?	20
3. Stellung des erweiterten Forschungsfelds in den Universitäten	23
4. Verankerung des erweiterten Forschungsfelds in den Förder- und Begutachtungsstrukturen der Deutschen Forschungsgemeinschaft	26
5. Organisatorische Herausforderungen für die zukünftige weitere Entwicklung	27



Teil I:
Synopsis und
Handlungs-
empfehlungen



usgehend von Staudingers Konzept der Makromoleküle (Nobelpreis 1953 „für seine Entdeckungen auf dem Gebiet der makromolekularen Chemie“, Freiburg) wurden einzigartige und die Welt verändernde wissenschaftliche Entdeckungen und Technologien erarbeitet. Verbunden ist diese Kenntnisexplosion aber auch mit einer tiefgehenden Spezialisierung und Diversifizierung der Wissenschaften, die sich mit unterschiedlichen Aspekten der (weichen) molekularen Materie beschäftigen. So bildeten sich Wissenschaftlerschulen, die sich einerseits an den synthetischen Makromolekülen als den Polymerwissenschaften und andererseits an der Erforschung der Funktion und den Anwendungen von Biomakromolekülen als Teil der Lebenswissenschaften orientieren. Getrieben wurde diese Spezialisierung zum einen durch den beispiellosen technischen Erfolg der Kunststoffe, Lacke, Elastomere, Funktionspolymere und Kompositmaterialien, zum anderen durch die bahnbrechende Entwicklung des molekularen Verständnisses in den Life Sciences.

Die Bedeutung der Polymere liegt wesentlich in deren Struktureigenschaften und der Verwendung als Werkstoffe. Hinzugekommen sind in den letzten Jahrzehnten die Gruppe der Funktionspolymere und polymerbasierte Additive. So betreffen heute beispielsweise ca. 20% des BASF-Umsatzes Kunststoffe, aber sogar mehr als 50% der BASF-Produkte enthalten Makromoleküle oder basieren wesentlich auf Makromolekülen. Diese wirtschaftliche Bedeutung der Polymere ist in den Endprodukten noch ausgeprägter. Der mit Biomakromolekülen verbundene Fortschritt liegt in der Aufklärung der Verbindung von Struktur-, Funktions- und Informationseigenschaften, ermöglicht aber auch zunehmend neue synthetische Ansätze (Stichwort: synthetische Biologie).

Hinsichtlich der Fähigkeit, Informationen molekular zu speichern und zu vermitteln, liegen die synthetischen Makromoleküle trotz aller Fortschritte in der präzisen Synthese weit zurück. Polymerwissenschaftler_innen haben begonnen, diese Herausforderungen systematisch zu bearbeiten. Die wichtigen Stichworte sind: Supramolekulare Chemie, Self-assembly und der Übergang vom Molekül zum Funktionssystem. Während die Beherrschung von gleichgewichtsgetriebenen Prozessen stürmisch weiterentwickelt wird und in technischen Anwendungen für Materialien der Material-, Lebens- und Biowissenschaft angekommen ist, sind andere notwendige Bausteine für die Entwicklung adaptiver molekularer Systeme noch in den Anfängen. Das betrifft u.a. die Schaltbarkeit durch äußere Einflüsse, wie sie für zukunftsorientierte Konzepte wie Selbstheilung, reversible und geschaltete Formänderungen oder für eine biomimetische Robotik notwendig sind. Diese auch als 4D-Materialien bezeichneten Systeme (3D Raum, 1D Zeit) stecken in vielen Aspekten noch in den Kinderschuhen. Konzepte für Selbstregulation, zielgerichtete Adaptation in komplexen sensorischen Landkarten oder gar für „Lernende Materialien“ sind teils noch vollkommen unbekannt. Hintergrund dieser Entwicklungen, die z.T. auch als „bioinspired materials engineering“ bezeichnet werden, ist unsere zunehmende Fähigkeit im Umgang mit skalenübergreifenden Zusammenhängen. Der Begriff „skalenübergreifend“ bezieht sich einerseits auf räumliche Dimensionen vom Molekül zum Bauteil, andererseits aber auch auf die Zeitskalen dynamischer Prozesse von weniger als einer Picosekunde bis zu Jahren sowie die Reichweite und Kooperativität der Wechselwirkungskräfte. Dies sind Themen, die vor allem in der Soft Matter Physik intensiv bearbeitet werden. Für die kenntnis- und verständnisorientierte Forschung ergibt sich, dass die zugrundeliegende Komplexität einer deterministischen Aufklärung der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen Grenzen setzt und als besondere wissenschaftliche Herausforderung im Extremfall zu emergenten Eigenschaften und Metamaterialeffekten führt. Schon die kritischen Phänomene zeigen, dass kollektives Zusammenwirken vieler Einheiten qualitativ neues Verhalten verursachen kann. Solche Aspekte werden auch als zentral für das Verständnis kollektiver Nichtgleichgewichtsphänomene gesehen.

Auch für auf den ersten Blick einfache Polymermaterialien stößt die Entwicklung eindeutiger (quantitativer) Struktur-Eigenschaftsbeziehungen zunehmend an ihre Grenzen. Hier sind es vor allem die während der Verarbeitung und Belastung stattfindenden komplexen Veränderungen und damit auftretenden neuen Morphologien oder Heterogenitäten, die der Entwicklung universeller Struktur-Eigenschaftsbeziehungen entgegenstehen. Zudem sollten die Materialien auch nach der Verarbeitung noch gezielt veränderbar sein. Das Ziel muss daher eine molekular informierte Struktur-Prozess-Eigenschaftsbeherrschung sein, die die Veränderung der Polymermaterialien bei bestimmungsgemäßem Gebrauch vorhersagbar und damit steuerbar macht.

Damit ist der Umgang mit der Komplexität synthetischer makromolekularer Materialien, Composite und Funktionseinheiten eine das gesamte Forschungsfeld überspannende gemeinsame Herausforderung für

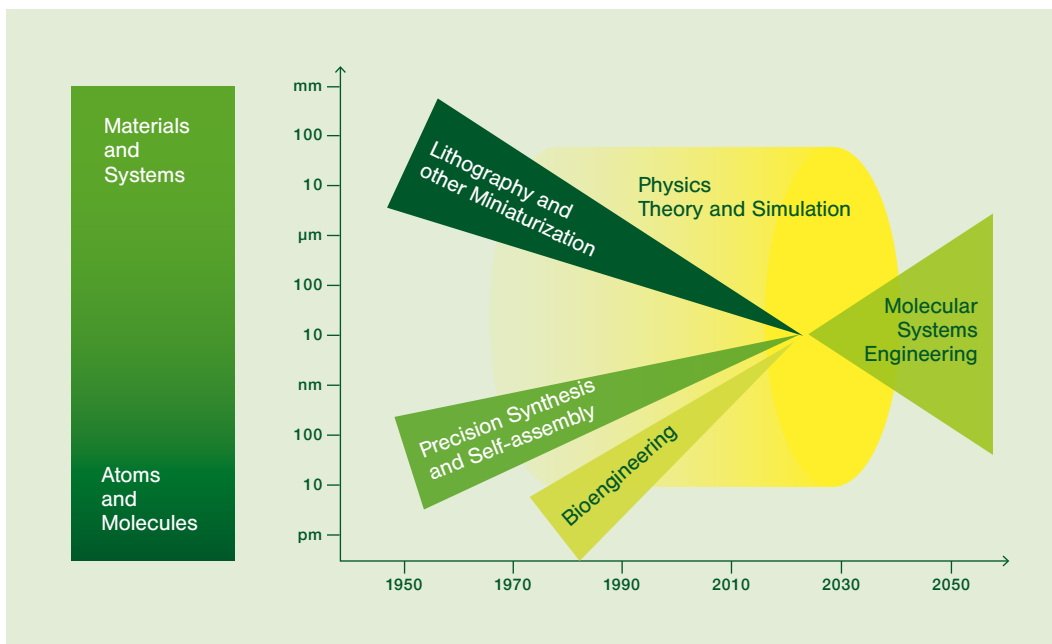


Abbildung 1: Übersicht über Treiber und interdisziplinäre Verknüpfungen für die Entwicklung molekularer Materialien. Neben der Beherrschung immer kleinerer Längenskalen (top-down) wird der Fortschritt durch die zunehmende Fähigkeit zur Synthese und der molekularen Simulation immer größerer Einheiten bestimmt (bottom-up).

Chemiker_innen, Physiker_innen und Ingenieur_e_innen. Methodische Schlüsselemente sind neben der chemischen Synthese die Weiterentwicklung physikalischer Charakterisierungsmethoden und der Umgang mit sehr detaillierten Informationen. Insbesondere betrifft dies die Fähigkeit zur Simulation skalenübergreifender Strukturen und Prozesse über den gesamten Zyklus von der Materialbildung, seiner Funktion und Alterung bis hin zur Metathese für eine neue Verwendung.

Wenn die Polymerwissenschaften sich in der Vergangenheit durch die Entwicklung spezieller Methoden und Kenntnisse als eigenständiges Wissenschaftsfeld etabliert haben, dann ergeben sich neue Fragen und Lösungen zunehmend aus der aufgabenorientierten fachübergreifenden Zusammenführung von Disziplinen, Methoden und Verfahren. So wirken die Polymerwissenschaften heute vermehrt in andere Disziplinen hinein, nehmen aber auch in zunehmendem Maße Entwicklungen und Fragestellungen aus anderen Bereichen auf. Es gilt diese Dynamik aufzugreifen und konsequent weiter zu entwickeln. Kennzeichnend ist die zunehmende transdisziplinäre Zusammenarbeit der in diesem Feld engagierten Wissenschaftler_innen.

Abbildung 1 zeigt ein schematisches Bild, wie gerade aus der Zusammenarbeit und Zusammenführung disziplinärer Erfolge eine Ausgangssituation entwickelt wird, aus der sich nicht nur ein besseres Verständnis der Struktur-Eigenschaftsbeziehungen ableitet sondern auch die Fähigkeit zur Gestaltung neuer Eigenschaften und Materialien (vom Molekül zum Material & System).

Vor diesem Hintergrund erfordert die zukünftige Forschung auf dem Gebiet der molekularen Materialien nicht nur eine Intensivierung der Zusammenarbeit von Chemiker_n_innen, Physiker_n_innen und Ingenieur_en_innen, sondern auch die zunehmende Einbindung von Mathematiker_n_innen, Informatiker_n_innen, Biolog_en_innen und Mediziner_n_innen. Eine Herausforderung für die etablierte Methodik ist hierbei die Zusammenführung und Quantifizierung deterministischer, stochastischer und heuristischer Methoden. In der Konsequenz ergibt sich für die Forschung auf diesem Gebiet eine Notwendigkeit, **Konvergenz der disziplinären Kompetenzen als ein neues Paradigma der Wissenschaftsstrategie und -organisation** zu etablieren.¹

1 „Convergence: Facilitating Transdisciplinary Integration of Life Sciences, Physical Sciences, Engineering, and Beyond“ by the Committee on Key Challenge Areas for Convergence and Health; Board on Life Sciences; Division on Earth and Life Studies; National Research Council, THE NATIONAL ACADEMIES PRESS 2014, ISBN 978-0-309-30151-0 | DOI 10.17226/18722

Längst stellen sich Wissenschaftler_innen zunehmend Herausforderungen der Konvergenz in der Forschung in vielen Ansätzen (strukturierte Programme der DFG wie SFBs, GRKs, des BMBF, der Europäischen Kommission u. a.). Demgegenüber bleiben die Strukturen unseres Wissenschaftssystems weitgehend disziplinär ausgerichtet. Hintergrund ist die in der Lehre verankerte Bewahrung und Weiterentwicklung der etablierten Kompetenzfelder und wissenschaftlicher Methodik. Damit ergibt sich eine Spannung zwischen der Notwendigkeit zur fächerspezifischen Lehre und den interdisziplinären wissenschaftlichen Fragestellungen, die in Deutschland im Vergleich zum internationalen Wettbewerb nur zögerlich und jeweils spät aufgelöst wird. Für die Polymerwissenschaften ergibt sich ein Dilemma zwischen etablierter Kompetenz und deren spezifische Weiterentwicklung einerseits und der Notwendigkeit zur Zusammenführung unterschiedlicher Disziplinen andererseits. Gleichzeitig bildet gelebte Konvergenz eine Herausforderung für die Sichtbarkeit des Fachs hinsichtlich der eigenständigen wissenschaftlichen Methodik und damit verbunden für die Lehre. Dabei sind nicht alle Bereiche der Polymerwissenschaften in gleichem Maße von der Notwendigkeit betroffen, sich für die Konvergenz zu öffnen. Während für viele neue Ansätze eine Abgrenzung zu anderen Bereichen der Chemie/Physik molekularer Systeme wie der supramolekularen Chemie und den Kolloidwissenschaften zunehmend aufgehoben wird, sind auch in der Zukunft wichtige und fachbestimmende Entwicklungen in den Kernbereichen polymere Werkstoffe, makromolekulare Synthese und Physik der Polymere zu erwarten. Aber auch hier muss es eine enge transdisziplinäre Verzahnung geben, ohne die viele Entwicklungen ins Leere laufen würden.

Basierend auf der in Teil II dieses Positionspapiers zusammengestellten Analyse des Zusammenspiels der disziplinären und der disziplinenübergreifenden Entwicklungen im Feld der molekularen und makromolekularen Materialien zielen wir darauf ab, Eckpunkte und Empfehlungen für die zukünftige Entwicklung dieses Forschungsgebiets aufzuzeigen. Eine klare Definition der Ziele, Chancen und Herausforderungen dieses Fachgebiets wird sowohl für den Wettbewerb um die besten Köpfe als auch für die Unterstützung durch die Gesellschaft von großer Bedeutung sein. Letztere beruht einerseits auf der Einsicht der Bedeutung makromolekularer Materialien für alle Lebensbereiche und andererseits auf dem Vertrauen, dass neue Entwicklungen umweltverträglich gestaltet werden können. Dies betrifft auch die Translation in Produkte, Wertschöpfung und Arbeitsplätze, die heute bereits häufig in Wertschöpfungsnetzwerke erfolgt und dabei die Geschäftsmodelle der beteiligten Unternehmen verändert. Wir stellen die Frage, wie eine erweiterte Definition des Forschungsgebiets getroffen werden kann, die einerseits nicht die Weiterentwicklung der Erfolgsgeschichte der Polymerwissenschaften verdünnt, andererseits aber auch genügend Raum lässt, die in der Zukunft zu erwartenden Erfolge aus der Konvergenz auf international kompetitivem Niveau zu fördern. Hieraus ergibt sich auch der Bedarf, neue Modelle für die Zuweisung von Ressourcen und auch für die Administration/Organisation der wissenschaftlichen Arbeit zur Förderung der Konvergenz zu entwickeln, damit wünschenswerte Wissensnetzwerke auch mittelfristig die notwendige Breite und Tiefe besitzen.

Der Teil II dieses Positionspapiers umfasst fünf Abschnitte:

- In **Abschnitt 1** des Anhangs werden **der Stand und die Bedeutung der Polymerwissenschaften** in Deutschland kurz umrissen.
- **Abschnitt 2** richtet sich auf die **Entwicklung eines erweiterten Forschungsfeldes der molekularen Materialien, dessen Grenzen und Herausforderungen über den Kern der Polymerwissenschaften hinausgehen.**
- **Abschnitt 3** behandelt die **Stellung des erweiterten Forschungsfelds in den Universitäten**
- **Abschnitt 4** analysiert die **Verankerung des erweiterten Forschungsfelds in den Förder- und Begutachtungsstrukturen der Deutschen Forschungsgemeinschaft**
- **Abschnitt 5** fasst die **organisatorischen Herausforderungen für die zukünftige weitere Entwicklung** zusammen.

Aufbauend auf der in Teil II zusammengestellten Analyse der Entwicklung der Polymerwissenschaften in Deutschland und den Erfahrungen mit den unterschiedlichen Anforderungen und Förderprogrammen der Polymerforschung in Deutschland und ihrer Position im internationalen Wettbewerb haben die an der Erstellung dieses Papiers Beteiligten eine Reihe grundsätzlicher und allgemeiner Handlungsempfehlungen formuliert.

Handlungsempfehlungen

1 Das Verständnis und die Beherrschung der Eigenschaften und der Entstehung komplexer, hierarchisch strukturierter Materialien ist eine der großen wissenschaftlichen Herausforderungen, die im Rahmen der gewachsenen Disziplinenstrukturen nicht oder nur schwer gemeistert werden kann. Gleichzeitig verspricht der Fortschritt in der Entwicklung der molekularen Materialien völlig neue Produkt- und Verfahrensentwicklungen und damit technologiebestimmend zu werden. Die Förderung und nachhaltige Verbesserung der Wettbewerbsposition dieser Forschung in Deutschland muss ein zentrales Anliegen der Forschungspolitik, der Forschungsförderung, der Bildungspolitik und der Wirtschaft sein. Eine stärkere Berücksichtigung in der deutschen und europäischen Forschungsförderung ist essentiell notwendig.

2 Es muss der Veränderung des Forschungsfeldes Rechnung getragen werden. Die Fortschritte der Vergangenheit und die Entwicklung einer Physik und Chemie, die zunehmend die Beherrschung des Übergangs vom Molekül zum System erlaubt, verlangen eine umfassendere Definition des Forschungsfeldes, die über den Kernbereich der Polymerwissenschaften hinausgeht. Vorgeschlagen wird der Begriff „Molekulare Materie und Polymerwissenschaften“. Ein verbindendes Element kann die Synthese sein, nicht als chemische Rezeptur sondern als naturwissenschaftliches Bau- und Funktionsprinzip komplexer molekularer Systeme („Biologisierung“ der Materialforschung).

3 Die Konvergenz der wissenschaftlichen Disziplinen muss durch organisatorische und administrative Maßnahmen in der Struktur der Forschungseinrichtungen unterstützt werden. Vorbild kann die disziplinenübergreifende Organisation der außeruniversitären Forschung sein, die erst in wenigen Universitäten eine Entsprechung in der Schwerpunktsetzung bei Berufungsverfahren gefunden hat (z.B. Bayreuth). Eine andere Möglichkeit ergibt sich aus den Allianzen mit der außeruniversitären Forschung (z.B. Aachen, Berlin-Potsdam, Dresden oder Mainz) in Forschung und Ausbildung.

4 Die wachsende Bedeutung der Konvergenz für die zukünftige Entwicklung des Forschungsfeldes muss in der Organisation der Forschungsförderung berücksichtigt werden. Hier muss in der anwendungsorientierten Forschung der langfristigen und nachhaltigen Bedeutung der Ermöglicher (Enabler) wie der Synthese und Katalyse, der Materialentwicklung, der Simulation und der Charakterisierung der Materialveränderungen während des bestimmungsgemäßen Produktlebens stärker Rechnung getragen werden. Für die Förderung der Grundlagenforschung ist zu erwägen, ein neues interdisziplinäres Fachforum der DFG einzurichten. Dies sollte auch weitere Aspekte der Materialforschung, Simulation, Photonik, synthetische Biowissenschaften etc. umfassen.

5 Die Sichtbarkeit des Forschungsfelds als eine fundamentale wissenschaftliche Herausforderung muss mit dem Ziel einer stärkeren Identifikation der beteiligten Wissenschaftler_innen gefördert werden:

a) durch eine verbesserte Verankerung in der Lehre und über die Stärkung der Profilierung der Standorte. Dabei soll die disziplinäre Grundausbildung, die die methodische Kernkompetenz der Fächer vermittelt, unter Verbindung der gemeinsamen Fragestellungen und methodischen Unterschiede erhalten bleiben: Chemiker_innen, Biolog_en_innen, Physiker_innen und Ingenieur_e_innen als Experten für molekulare Materialien.² Die Grenzbereiche Physik-Chemie-Biologie sollten für Masterarbeiten und insbesondere Dissertationen durchlässiger werden. Erreicht werden kann das durch eine strukturierte Graduiertenausbildung, in der fundamentale Zusammenhänge disziplinärer Erkenntnisse herausgearbeitet werden und die fächerübergreifenden Zusammenhänge auch in Prüfungen eine angemessene Rolle einnehmen. Beispiele finden sich in den amerikanischen Promotionsprogrammen.

b) Durch eine verbesserte Zusammenarbeit der Fachverbände bei der Vertretung des Forschungsfelds nach außen und der Organisation von Veranstaltungen (GDCh, Bunsen-Gesellschaft, DPG, Dechema, VDI).

c) Durch eine europäische Internationalisierung der Arbeit der Fachverbände. Angesichts der internationalen herausragenden Rolle der US-Verbände in der „Promotion of Science“ sollte eine solche Europäisierung auch eine Aufgabe der europäischen Integration sein und entsprechend gefördert werden.

2 Positionspapier – Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung.





Teil II: Polymerwissen- schaften in Deutschland



1. Stand und Bedeutung der Polymerwissenschaften in Deutschland

1.1 Das Forschungsfeld

Ungeachtet des großen wirtschaftlichen und wissenschaftlichen Erfolgs sind die Polymerwissenschaften im Vergleich zu den anderen klassischen Disziplinen der Chemie und der Physik mit gerade 100 Jahren ein recht junges Fachgebiet. Dieses zeichnet sich durch eine sehr hohe Interdisziplinarität aus. Als ein Teilgebiet der Polymerwissenschaften und mit einer starken Ausrichtung auf Struktur-Eigenschaftsbeziehungen verbindet die makromolekulare Chemie Kenntnisse und Forschungsfragen der organischen Chemie auch mit durchaus speziellen Ansätzen der physikalischen Chemie und der Kolloidchemie. Über Katalyse (von der Synthese von Polymeren bis hin zu polymeren Trägern), Kompositstrukturen und anorganischen Polymere kommen disziplinäre Querbeziehungen zur anorganischen Chemie hinzu. Ebenso sind Verknüpfungen zur Biotechnologie und Biologie mit der Synthese/Expression hochdefinierter Biomakromoleküle (z.B. Proteine, DNA) evident. Ergänzend zur physikalischen Chemie der Polymere entwickelte sich eine sehr viel breiter aufgestellte Physik der weichen Materie. Über die Polymerphysik, die Biophysik, die Kolloidphysik, die Nichtgleichgewichtsphysik und grundlegende Ansätze kritischer Phänomene trägt sie zur Entwicklung der Physik selbst bei. Über die biologische Kompatibilität von Makromolekülen und die Funktion von Biomakromolekülen ergeben sich zunehmend Anknüpfungspunkte der Polymerwissenschaften mit der Biologie, Biochemie sowie der Medizin und Pharmazie.

Entsprechend ihrer vielfältigen Bedeutung für technische Entwicklungen ist für viele Bereiche der Polymerwissenschaften eine starke Anwendungsorientierung charakteristisch. Über die Anwendungsorientierung hat sich aber auch ein Spannungsfeld zwischen molekülbezogener Betrachtung (Chemie/Physik) und technischer Orientierung auf die makroskopischen Eigenschaften entwickelt. Für die Zukunft wird das Fachgebiet in seiner Entwicklung von der Zusammenführung der ingenieurwissenschaftlichen heuristischen Modellbildung mit einer molekularen naturwissenschaftlichen Erkenntnis profitieren, indem einerseits das molekulare Verständnis neue ingenieurwissenschaftliche Lösungen ermöglichen kann, andererseits ingenieurwissenschaftliche Lösungen helfen, mit der Komplexität der Materialien umzugehen.

Derzeit leidet das Forschungsfeld darunter, dass die beteiligten Fächer zu wenig miteinander „reden“. Das wird auch durch die unterschiedlichen Terminologien in Publikationen deutlich, die eine Vernetzung und das gegenseitige Zitieren erschweren.

1.2 Die Anwendungen

Im Bereich der Kunststoffherzeugung und -verarbeitung, der Kautschuke und der Textiltechnologie sowie des Kunststoff-Maschinenbaus sind die Polymerwissenschaften ein wichtiger Innovationstreiber. Auch für andere Industrien spielen die Polymerwissenschaften aufgrund des breiten Anwendungsspektrums makromolekularer Materialien eine zentrale Rolle. So sind Polymere Grundbausteine von Lacken und Beschichtungen, werden als Additive z.B. im Beton und in Lebensmitteln oder als Klebstoffe in der Füge-technik genutzt. Elektronische Bauteile sind ohne Polymere nicht mehr denkbar. Eine vergleichbare Rolle spielen Elastomere im Bereich der Mobilität (z.B. Reifen, Antriebsriemen und Dämpfungselemente). Polymere werden eingesetzt für Membranen sowie als Fällungs- und Absorptionsmittel in der Umwelttechnologie und für kosmetische und medizinische Formulierungen, hier auch als Wirkstoffträger. Eine Stichwortliste für die Anwendungsfelder ist in Abbildung 2 aufgeführt. Darüber hinaus stellen Anforderungen an Umweltverträglichkeit und Biokompatibilität zunehmende und neue Herausforderungen bzgl. der Produktion, der Eigenschaften und der vollständigen Integration in wirtschaftliche und natürliche Kreisläufe dar. Diese Notwendigkeit wird insbesondere dadurch deutlich, dass bislang Kunststoffe nur unzureichend wiederverwertet werden (2015 weniger als 10%).³ Die unkontrollierte Freisetzung führt zu Umweltverschmutzung, insbesondere in den Weltmeeren – die Degradation der Kunststoffe dauert teilweise einige hundert Jahre. Hiermit verbunden ist

3 R. Geyer, J. R. Jambeck, K. L. Law, *Sci. Adv.* **2017**, 3, e1700782.



Abbildung 2: Stichwortliste zu den Anwendungsbereichen von Polymeren.

auch die Problematik des Mikroplastiks⁴, welcher zum einen durch Abbauprozesse entsteht oder als Primärteilchen durch Waschen von Synthetikfasern bzw. dem Abrieb von Reifen freigesetzt wird.

Die diese vielfältigen Anwendungen ermöglichende Polymerindustrie nimmt in Deutschland sowie auch in Europa eine zentrale Rolle ein. So entfallen von den weltweit produzierten 322 Mio. Tonnen Kunststoffen allein 60 Mio. Tonnen auf Europa. Hieraus resultiert ein Umsatz der Kunststoffindustrie von 350 Mrd. Euro im Jahr, davon in Deutschland 90 Mrd. Euro. Die Kunststoffindustrie hat einen Anteil von 6% an der industriellen Produktion in Deutschland. In ca. 6.600 Unternehmen sind in diesem Bereich 393.000 Beschäftigte tätig. Die deutsche Kautschukindustrie (Reifen und technische Elastomererzeugnisse) beschäftigt seit Jahren konstant 75.000 Mitarbeiter bei einem Umsatzvolumen von insgesamt 11,3 Mrd. Euro. Erst die hochentwickelten Eigenschaften von Kautschuken und Elastomeren ermöglichen moderne Transport- und Logistikkonzepte. Der Verbrauch von Synthetikgummi inklusive Hochleistungsspezialkautschuken lag 2016 national z. B. bei 41.400 t von insgesamt 674.500 t (inkl. Naturkautschuk).

Allerdings stammen die umsatzstärksten Polymerwerkstoffe bereits aus den 1930er bis 1950er Jahren (von den Polyamiden über die Polyolefine bis zum Polycarbonat). In der nachfolgenden Zeit wurden vor allem neue Spezialpolymere und sehr signifikante Eigenschaftsverbesserungen entwickelt, die wiederum auf grundlegenden chemischen Neuerungen beruhen. Beispielhaft für Massenprodukte können hierbei Kautschuke und Elastomere genannt werden. Erst deren hochentwickelte Eigenschaften ermöglichen moderne

Transport-, Verkehrs- und Logistikkonzepte. Hochleistungspolymere, polymere Additive für Schmierstoffe, Lacke, kosmetische Anwendungen u.a. zeigen, dass molekular gesteuerte Eigenschaften von Polymeren maßgeblich zur Entwicklung von komplexen Formulierungen und Bauteilen beitragen.

Abbildung 3 zeigt aber auch eine zunehmende Verlagerung der Produktionsanteile von Kunststoffen aus Europa weg. Allerdings sind hier die Produktionsanteile von Spezial-

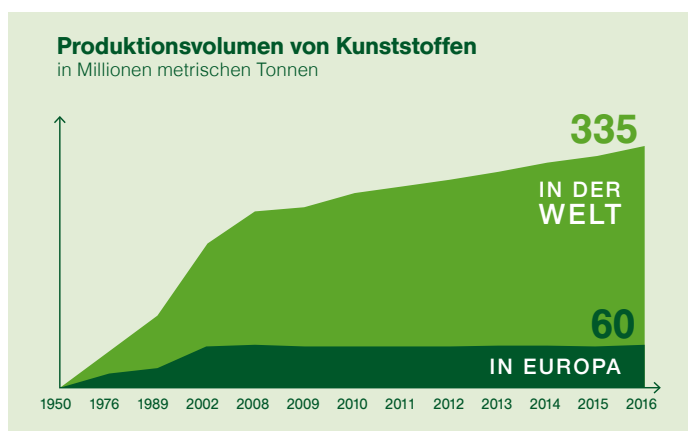


Abbildung 3a: Produktionsmengen von Kunststoffen.

4 Kleine Kunststoffteilchen von wenigen mm Größe.

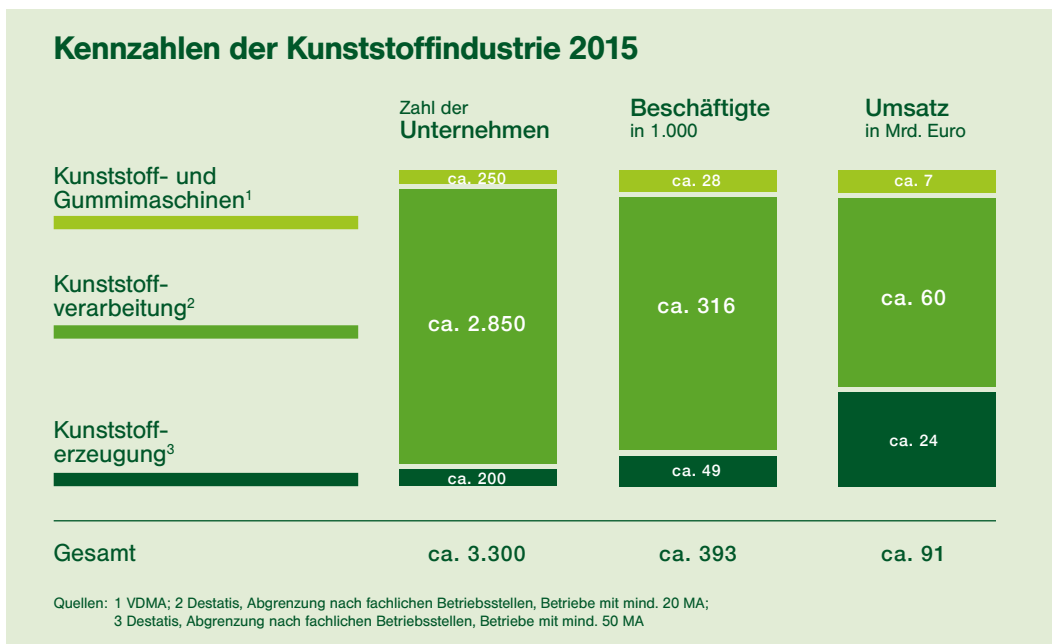


Abbildung 3b: Übersicht der Beschäftigten im Bereich der deutschen Kunststoffindustrie.⁵

polymeren für Formulierungen, und andere „versteckte“ Anwendungen nicht mitgerechnet. Gerade in der Entwicklung besonders hochwertiger und als Systembausteine spezialisierter Polymere steht dem schwindenden Anteil in den Basiskunststoffen ein weiter wachsender wirtschaftlicher Erfolg gegenüber.

Charakteristisch für die Zeit nach der Jahrtausendwende ist damit eine Entwicklung über die Basispolymere hinaus zu Spezialpolymeren und zu Innovationen in den Fertigungsprozessen. Das betrifft auch neue Polymerisationsmethoden, die eine wesentlich genauere Strukturkontrolle ermöglichen und erkenntnisbasierte neue Verarbeitungsverfahren, die die Basis für enorme Qualitätsverbesserungen sind. Letzteres betrifft vor allem die Temperaturbeständigkeit, das Versagensverhalten und die Gebrauchsfunktionalität. Eine wichtige Grundlage ist weiterhin die Beherrschung einer immer größeren Vielfalt von Kombinationen aus unterschiedlichen harten und weichen Komponenten. Damit konnten zunehmend auch zuvor nicht für möglich gehaltene Eigenschaften in Polymermaterialien integriert und makromolekulare Materialien so weiterentwickelt und perfektioniert werden, so dass diese neue Anwendungsbereiche erobern, die bislang anderen Materialklassen vorbehalten waren (z. B. als Konstruktionsmaterial im Flugzeugbau, OLED-Displays, Autoscheiben, komplette Gehäuse für Scheinwerfer, flexible Elektroden für Sensorik und medizinische Implantate, optische Elemente und Solarzellen). Diese immer größere Vielfalt der Komponenten führt aber gleichzeitig zu neuen wissenschaftlichen Herausforderungen. So ist die Vorhersagbarkeit der Eigenschaftsänderungen im Gebrauchtleben für komplexe Zusammensetzungen in den meisten Fällen ungenügend.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass ein weiter wachsender hoher Grad der Diversifizierung und Spezialisierung polymerer Produkte eine wichtige Säule des wirtschaftlichen Erfolgs in Deutschland ist. Für den Wissens- und Industriestandort Deutschland sichert die Polymer- und Methodenkompetenz eine international hervorragende Wettbewerbsposition.

⁵ www.plasticseurope.org: „Die Kunststoffindustrie in Deutschland“ 09/2016.

2. Entwicklung eines erweiterten Forschungsfeldes der Molekularen Materialien, dessen Grenzen und Herausforderungen über den Kern der Polymerwissenschaften hinausgehen



Wie kein anderes Materialsystem bieten molekulare Materialien neue Ansätze für die Lösung großer Herausforderungen des 21. Jahrhunderts, wie energieeffiziente Infrastrukturen, eine effektive Kreislaufwirtschaft und neue Gesundheitstechnologien. In allen Feldern, in denen technologische Entwicklungen wesentlich durch die Verfügbarkeit und Beherrschung von Materialklassen angestoßen und ermöglicht werden, bietet die Vielfältigkeit und die organische Natur der molekularen Materialien neue Perspektiven. Gleichzeitig verschiebt sich der technologische Bedarf von den ausschließlichen Anforderungen an das Material im Kontext seiner Verwendung zunehmend auch auf die ökologischen Konsequenzen, die mit der Herstellung und dem Einsatz der Materialien sowie der dabei angewandten Technologie verbunden sind (ökologischer Fußabdruck). Dies betrifft die Verfügbarkeit, den Energieeinsatz und eine zukunftsfähige Balance zwischen technologischem Nutzen und dem Einfluss auf die Vielfalt und Funktion der natürlichen Kreisläufe (sowohl im Hinblick auf die Herstellung als auch die Entsorgung). Insbesondere vor dem Hintergrund, dass der Einfluss der menschlichen Zivilisation längst die Erde verändert und zunehmend natürliche Kreisläufe bestimmt (man spricht nicht umsonst von einem neuen Erdzeitalter, dem „Anthropozän“), stellt sich damit die Frage nach einer neuen, um natürliche Konzepte und Bausteine erweiterten Materialtechnologie (Materials for a better Life).

Lösungsansätze, die auf die Schonung der Natur ausgerichtet sind, haben eine große Bedeutung, beinhalten aber im Grunde immer noch einen Gegensatz zwischen Technik und Natur, der überwunden werden muss. Die Symbiose von menschengemachter Materialtechnologie und natürlichen Systemen fokussiert sich im Kern auf zwei Punkte: (i) Bessere Leistung bei geringerem Ressourceneinsatz und (ii) die Integration in unsere natürliche Umwelt (Lernen von der Natur und die Hybridisierung mit natürlichen Systemen). Offensichtliche Herausforderungen für den ersten Punkt sind der Leichtbau, eine immer weiter verbesserte Funktionalität, effiziente Herstellungsprozesse, die Beherrschung von Alters- und Verschleißprozessen, den kontrollierten/beschleunigten Abbau von Polymermaterialien nach der Nutzung (z. B. Photodegradation, biologischer Abbau, chemischer Abbau) sowie die effizientere Verwertung ausgedienter Produkte. Dies umfasst die Vermeidung der unkontrollierten Freisetzung in die Umwelt, die Erhöhung des Anteils der wiederverwerteten Materialien als auch neue Ansätze zum effizienteren Recycling (z. B. Stabilisierung von komplexen Polymerblends). Eng verbunden hiermit ist die Herausforderung „Lernen von der Natur“. Deren evolutionär entwickelten Strukturen und Systeme sind Vorbilder für neue Lösungen und die natürlichen Kreislaufprozesse setzen die Randbedingungen unserer Lebenswelt. Vor diesem Hintergrund und angesichts der Komplexität natürlicher Strukturen und deren teilweise parallel ablaufenden Prozessen ergibt sich die Notwendigkeit der Hybridisierung, d. h. der Integration natürlicher Elemente in technische Bauteile sowie Prozesse und umgekehrt. Verbunden ist dies mit dem Begriff der „Biologisierung der Materialforschung“.⁶

International sind als Orientierungspunkte (benchmarks) für dieses sich stürmisch entwickelnde Forschungsgebiet vor allem das Harvard Wyss – Institute (gegründet 2009) und das Institute of Molecular Engineering, University of Chicago (gegründet 2013) zu nennen. Hervorzuheben sind weiterhin die neu gegründeten Soft-Matter Zentren in Asien wie das “International Research Center for Soft Matter” in Beijing, China (2014), und das “Center for Soft and Living Matter” in Ulsan, Südkorea. Darüber hinaus findet man, auch in Deutschland und Europa, vielfältige, aber eher spezielle Forschungsansätze, die mit der Ausnahme relativ kleiner außeruniversitärer Forschungseinrichtungen in der Regel nicht langfristig konzeptionell verankert sind.

⁶ vgl. auch „Biologisierung der Technik“: <https://www.vdi.de/technik/fachthemen/technologies-of-life-sciences/artikel/innovationspotenziale-an-der-schnittstelle-biologie-und-technik-1/> (letzter Zugriff am 26.02.2018).

2.1 Die Komplexität makromolekularer Materialien als ein Leitbild der Polymerforschung

Gemeinsamer Aspekt der Herausforderungen für bessere und effizientere Polymermaterialien und der Suche nach einer fortgeschrittenen, neuen Materialklasse, die sich anpassen kann und aktive Eigenschaften aufweist, ist, dass die Eigenschaften und die Funktionalität molekularer Materialien nur über skalenübergreifende Zusammenhänge zu erfassen sind. Die Funktion, die sich aus dem Verbund einzelner Moleküle ergibt, betrifft auch den Übergang von der Molekülstruktur zu molekularen Aggregaten und supramolekularen Assoziaten, die räumliche Organisation und Wechselwirkung dieser Nanostrukturen und die Vorgänge an den inneren Grenzflächen sowie die Strukturierung und die Heterogenitäten im sichtbaren Bereich. Charakteristisch sind hierbei die Ausbildung von Nichtgleichgewichtsstrukturen und das dynamische Wechselspiel über ein Frequenzspektrum von mehr als 20 Größenordnungen. Komplexe Strukturen bilden sich oft durch verschiedene ineinandergreifende Prozesse, die auf nicht klar trennbaren Raum- und Zeitskalen ablaufen. Dies erschwert sinnvolle theoretische Näherungen. Für das Verständnis dieser komplexen Zusammenhänge werden einerseits vielfältige Charakterisierungsmethoden benötigt, welche eine detaillierte zeitaufgelöste, strukturelle und morphologische Aufklärung solcher Strukturen erlauben. Zum anderen können die vielfältigen Informationen zunehmend nur mit aufwändigen mathematischen Modellen und Simulationen interpretiert und verwertet werden. Für die Polymertechnologie und -verarbeitung wird damit die zerstörungsfreie und hier insbesondere die Echtzeitcharakterisierung verbunden mit einer Datenauswertung über den gesamten Herstellungsprozess sowie die Lebensdauer eines Produktes immer bedeutender. Ebenso kann die Synthese und Herstellung von immer komplexeren Polymerstrukturen unter Nutzung von spezifischen Wechselwirkungen nur mit Hilfe neuer theoretischer Modelle und numerischer Simulationen erfolgreich sein, die es ermöglichen, alle Zusammenhänge auf verschiedenen **Längen- und Zeitskalen** zu erfassen.

Ein besonderer Aspekt betrifft Defekte und Verunreinigungen in Polymeren. Aufgrund ihres uneinheitlichen Aufbaus (uneinheitliche Molekülstrukturen, Mehrphasigkeit und Nichtgleichgewichtszustände) sind nur einfache Polymerschmelzen einigermaßen homogen. Schon beim Übergang in den glasigen Zustand, mehr noch bei der Kristallisation aber auch bei der Vernetzung, ergeben sich ausgeprägte Heterogenitäten, die in hohem Maße die Eigenschaften bestimmen. Dies ist nicht nur von großer Bedeutung für das Versagens- und Alterungsverhalten sondern mehr noch für die elektronischen Eigenschaften, insbesondere von konjugierten Polymeren. Für die Erforschung und Entwicklung solcher Funktionsmaterialien spielen der Umgang mit Verunreinigungen und die Definition von Defektstrukturen eine zunehmend wichtige Rolle. Defekte können sowohl nachteilig als auch gewollt sein und Materialeigenschaften gezielt verändern.⁷ Hier zeigen Beispiele der Natur, dass funktionierende Strukturen auch aus uneinheitlichen Komponenten aufgebaut werden können.

Im Kerngebiet der Polymerwissenschaften, den Polymerwerkstoffen, den Funktions- und den Spezialpolymeren ergeben sich neue Anreize und Möglichkeiten für die Weiterentwicklung der makromolekularen Chemie⁸ sowie der Polymerprozess- und Werkstofftechnik. So erfordern die Umstellung von erdölbasierten Grundstoffen und die Verringerung der Belastung der Umwelt eine Neuausrichtung auf Stoffströme, die entweder auf der Verwertung sehr heterogen zusammengesetzter Biomasse oder aus einer erst in den ersten Ansätzen entwickelten Power-to-X-Technologie beruhen. Gleichzeitig ergeben sich neue Anforderungen an die Bioverträglichkeit sowie die Bioresorbierbarkeit und einer stofflichen Verwertbarkeit im Sinne einer effizienten Kreislaufwirtschaft. Auch in der Konkurrenz zu den etablierten, sehr leistungsfähigen Polymeren ergibt sich hieraus ein Interesse an neuen Monomeren und Polymeren. Beispiele sind Furandicarbonsäure, 1,3-Propandiol, aber auch CO₂ und CO. Für bereits etablierte biobasierte und bioabbaubare Produkte wie PHAs und Polymilchsäure ergibt sich nach wie vor der Bedarf, deren Eigenschaftsspektrum nachdrücklich weiterzuentwickeln. Wegen der vielfältigen Auswirkungen der Monokulturen auf die Lebensgemeinschaften und Lebensverhältnisse in den tropischen Anbaugebieten unterschiedlicher Rohstoffe besteht darüber hinaus ein hoher Bedarf, den Weg von einer Plantagenwirtschaft hin zur Produktion in biologischen oder auch chemischen Synthesenanlagen zu finden.

7 K. Muellen, "Molecular Defects in Organic Materials", *Nat. Rev.* **2016**, *1*, 15013.

8 C. K. Ober, S. Z. Deng, P. T. Hammond, M. Muthukumar, E. Reichmanis, K. L. Wooley, T. P. Lodge, "Research in Macromolecular Science: Challenges and Opportunities for the Next Decade", *Macromolecules* **2009**, *42*, 465-471.

Noch lange nicht erreicht ist das Ende der Entwicklungsmöglichkeiten auch für die den Markt beherrschenden Polymere wie Polyethylen, Polystyrol u.a. Neue und verfeinerte Polymerisationsmethoden werden benötigt, um mit geringerem Ressourceneinsatz weiter verbesserte und für ihre Anwendung maßgeschneiderte Produkte verfügbar zu machen. Nach wie vor sind die Möglichkeiten zur Kontrolle der Molmassenverteilungen, der Kontrolle der Monomersequenz und der chemischen Funktionalisierung begrenzt. Hierbei liegen die Herausforderungen nicht allein im Bereich der Chemie, sondern zunehmend in der Polymertechnologie. Ein Beispiel ist die Entwicklung von ultrahochmolekularen Polyethylenen, die erst dann zu Hochleistungswerkstoffen wurden, als auch neue Verarbeitungsmethoden verfügbar waren.

Das enge Zusammenspiel von Polymerchemie und Polymertechnologie ist darüber hinaus notwendig, um chemische Strukturbildungsprozesse außerhalb der gegen die Umwelt gesicherten chemischen Fabrik durchzuführen. Etablierte Beispiele sind wasserbasierte Lacke und Beschichtungen, Klebstoffe und auch Anwendungen im Bau- sowie im Kosmetikbereich. Voraussetzungen sind neue Präpolymere, wasserbasierte nicht-toxische chemische Prozesse und die Beherrschung physikalischer Umwandlungen und Self-assembly-Prozesse. Eine grundsätzliche Herausforderung für eine ressourcenschonende Technologie bildet die Beherrschung der Alterung und des Versagensverhaltens. Neue und weiterführende Lösungen für die Stabilisierung, die Vorhersagbarkeit, die Selbstheilung und auch die kontrollierte Alterung (from novelty to vintage) sind nur im engen Zusammenspiel zwischen makromolekularer Chemie, Polymertechnologie, Polymerphysik und mathematischer Simulation zu erwarten. Gerade die Entwicklungen im Bereich des Hochleistungscomputing werden hier neue Wege eröffnen, *in silico* Voraussagen zu machen.

Ein nach wie vor großes Forschungs- und Entwicklungspotenzial ergibt sich auch für Hybridmaterialien, in denen Polymere mit feinverteilten anorganischen Teilchen so legiert sind, dass sich ein makroskopisch homogenes Erscheinungs- und Eigenschaftsbild ergibt.⁹ Insbesondere für feindisperse Systeme wird der Einfluss der Struktur und Dynamik der Bulk-Eigenschaften der einzelnen Komponenten zunehmend durch den Einfluss der inneren Grenzflächen überlagert. Gegenüber den etablierten Dispersionssystemen, wie High-Impact-Polystyrol oder ruß- und silicaverstärkten Elastomeren, zeigen Beispiele aus der Natur wie der Muschelperlmutter,¹⁰ Holz- oder Knochenstrukturen ein weiteres großes Entwicklungspotenzial für konstruierte und anisotrope Hybridstrukturen. Die Möglichkeit, Nanokomposite mit wohldefinierter Überstruktur herzustellen, eröffnet den Weg zu neuen Materialien mit besonderen elektronischen, optischen und mechanischen Eigenschaften. Hier ergeben sich Ansätze (i) durch weiter entwickelte Self-assembly-Methoden (Phasenmorphologie von Blockcopolymeren, gesteuerte Kristallitbildung, Kern-Schale-Strukturen sowie komplexe und mesoskopische Netzwerke) aber auch (ii) zunehmend durch top-down Strukturierungsverfahren, mit denen immer kleinere Größenskalen erreicht werden (layer-by-layer Techniken, lithographische Verfahren, Tintenstrahldruck). Der mit diesen Stichpunkten verbundene Siegeszug von 3D-Druck und anderen additiven Fertigungstechnologien wird sich weiter fortsetzen. Hier werden neue Monomere und Polymersysteme neben weiterentwickelten Druckverfahren essentielle Beiträge für die Digitalisierung der Materialsynthese und -konfektionierung im Sinne der Industrie 4.0 Konzepte leisten. Ein besonderes, grenzüberschreitendes Zukunftsgebiet öffnet sich im Bereich der personalisierten Gesundheitstechnik mit dem Forschungsfeld der biomedizinischen Hybridsysteme und der Entwicklung von Gewebezubereitungen (ATMPs).¹¹

9 G. Wegner, M. M. Demir, M. Faatz, K. Gorna, R. Munoz-Espi, B. Guillemet, F. Gröhn, "Polymers and Inorganics: A Happy Marriage?", *Macromol. Res.* **2007**, *15*, 95-99.

10 U. G. K. Wegst, H. Bai, E. Saiz, A. P. Tomsia, R. O. Ritchie, "Bioinspired Structural Materials", *Nat. Mater.* **2015**, *14*, 23-36.

11 https://www.pei.de/DE/arzneimittel/gewebezubereitungen/gewebezubereitungen-node.html;jsessionid=08A49878E280EF01135F96F01C886B1C.1_cid319

2.2 Wohin führt die zunehmende Beherrschung der Komplexität?

Die für molekulare Materialien charakteristische Komplexität des Materialaufbaus und der Struktur­dynamik beinhaltet damit auch eine fundamentale wissenschaftliche Herausforderung: Die Beherrschung des Übergangs vom Material zum Materialsystem, dessen Eigenschaften sich in seinem Bildungs- oder Fertigungsprozess entwickeln, durch eine funktionale hierarchische Heterogenität bestimmt werden und sich durch die Nutzung verändern bzw. auf die Anforderungen reagieren.

Komplexität im Aufbau und der Funktion polymerer Materialien ist dabei nicht nur eine Herausforderung für das Verständnis, sondern führt auch zu neuen wissenschaftlichen Fragestellungen, die weit über ein deterministisches Struktur-Eigenschafts-Verständnis hinausgehen. Das ist der Fall, wenn wir die Vielfalt möglicher Bausteine, ihrer Dynamik und der Hierarchie der Wechselwirkungskräfte als Ausgangspunkt für neue Eigenschaften ansehen. Vorbild sind biologische Systeme, deren Funktion durch das Wechselspiel vielfältiger Untereinheiten bestimmt wird. Natürliche Materialien zeigen in vielen Fällen, dass ihre Eigenschaften sich in synergistischer Weise durch eine evolutionär entwickelte intelligente Kombination von Einzelbausteinen ergeben und in Reaktion auf einen äußeren Einfluss verändert werden können. Analog können Fortschritte in der Synthese und in der Beherrschung der Interaktionen der Moleküle und ihrer definierten Überstrukturen den Übergang vom Molekül zu aktiven Funktionssystemen wie Polymeraktoren oder selbstreparierenden und adaptiven Kunststoffen ermöglichen. Diese wissenschaftliche Herausforderung weist nicht nur den Weg zu leistungsfähigeren Materialien, sondern auch zu intelligenten Materialien mit aktiven und adaptiven Eigenschaften. Voraussetzungen für die Entwicklung solch zunehmend komplexer adaptiver Polymersysteme sind (i) Fähigkeiten, über das durch die Erreichung des Gleichgewichts getriebene Self-assembly von Molekülen und fortgeschrittener Lithographiemethoden skalenübergreifend Strukturen „bauen“ zu können, (ii) die zunehmende Verfügbarkeit von schaltbaren Molekülstrukturen, (iii) die Beherrschung von bistabilen Strukturen und Hystereseeffekten sowie (iv) die Beherrschung dissipativer Strukturbildungsprozesse und (v) die Integration hierarchischer Rückkopplungsmechanismen (Feedback) (Abbildung 4). Zu allen Punkten zeigt die Literatur in den letzten Jahren eine stürmische Entwicklung.¹²

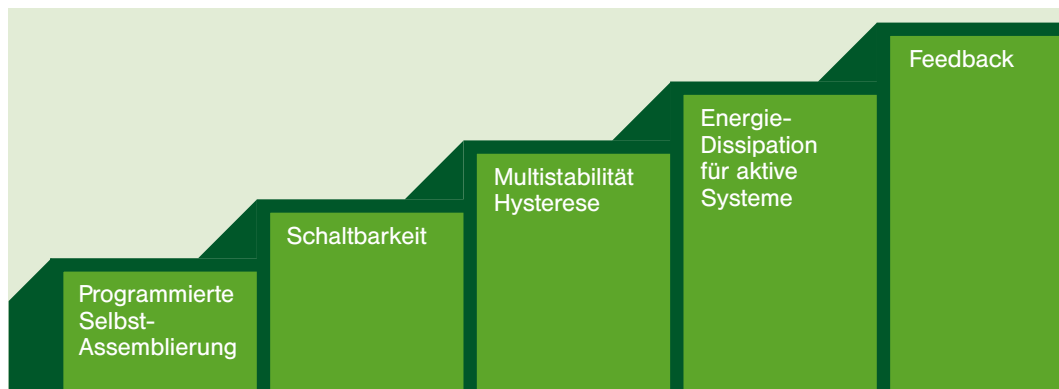


Abbildung 4: Kodierung von Systemeigenschaften auf Basis der Struktur- und Informationseigenschaften von Polymeren.¹³

Für die Physik ergeben sich zwei Handlungsfelder. Einerseits muss die Physik Zusammenhänge erklären, neue Phänomene beschreiben und universelle, paradigmatische Konzepte entwickeln. Hier hat die Physik als Wissenschaft von Polymeren auch einen klaren „Selbstzweck“ als Treiber neuer wissenschaftlicher Entwicklungen. Dieser Selbstzweck wird im Wettbewerb mit anderen modernen Feldern der Physik (z. B. Quantenoptik) leicht unterschätzt. Andererseits muss die Physik das Ziel haben, durch geeignete Experi-

12 R. Merindol, A. Walther „Materials Learning from Life: Concepts for Active, Adaptive and Autonomous Molecular Systems“, *Chem. Soc. Rev.* **2017**, 46, 5588-5619.

13 Self-assembly: Thermodynamisch getriebener Prozess; Selbstorganisation: Energiedissipative Strukturbildung in Nichtgleichgewichtsprozessen.

mente und quantitative Analyse den Zusammenhang zwischen Struktur und speziellen mechanischen, optischen oder elektrischen Eigenschaften für gegebene Materialien und Systeme besser zu verstehen. Hier liegt der Beitrag der Physik in der Entwicklung und Bereitstellung von experimentellen Methoden und in der Expertise bei der Nutzung derselben.

Eine grundlegende Herausforderung der Physik ist das Verständnis von Nichtgleichgewichtsphänomenen und aktiven Prozessen. Auch in der allgemeinen statistischen Physik gibt es noch keine universellen Ansätze hierfür – wir haben das Nichtgleichgewicht noch nicht annähernd verstanden. Weiche Materie, insbesondere Polymere, bilden hier eine interessante Ausgangsbasis, da Polymere bereits äußerst komplexe Gleichgewichtsphasen ausbilden können. Da im Gegensatz zu ‚Hard Matter‘ Energie und Entropie von vergleichbarer Bedeutung sind, kann man Soft Matter relativ einfach manipulieren. Durch z. B. Variation von Temperatur und Molekülgröße lassen sich Zeit- und Längenskalen in experimentell erreichbare Fenster verschieben und so moderne Konzepte der theoretischen Nichtgleichgewichtsphysik untersuchen. Polymere, die zusätzlich „metabolistischen“ Prozessen unterworfen werden, wie z. B. einer aktiv getriebenen dynamischen Spaltung oder Fusion, könnten zu dynamischen Phasenstrukturen führen, die in die Nähe biologischer Komplexität gelangen.

Moderne Multiskalensimulationsmethoden erlauben direkten Zugriff auf viele der genannten Eigenschaften und Größen, so dass eine bisher nicht dagewesene Nähe von Theorie und Experiment bis hin zur direkten Kopplung vom Experiment mit der Simulation in greifbare Nähe rückt. Kurz, die Verbindung der Vielphasenstrukturen von Polymeren mit aktiv getriebenen Prozessen stellt ein ideales Modellsystem für Materialien dar, die einerseits die klassischen Grenzen zwischen „fest“ und „flüssig“ überwinden, und andererseits Erinnerung und Information in ihren Eigenschaften speichern können. Damit ist Soft Matter prädestiniert, zu einem Treiber moderner Physik zu werden. Darüber hinaus eröffnet die Verbindung von multiskalen Simulationen mit Daten getriebenen Methoden, wie Machine Learning, gänzlich neue Optionen, die zurzeit noch nicht abzusehen sind.

Herausforderungen für die Strukturaufklärung finden sich für die Neutronen- und Röntgenstreuung sowie für Volumen- und Grenzflächeneigenschaften. Hier sind besonders die neuen Möglichkeiten im Rahmen des CFEL (Continuous Free Electron Laser) zu erwähnen. Diese ermöglichen nanoskopisch kleine Regionen oder Tröpfchen direkt abzubilden. Die hier angedachten und z.T. schon durchgeführten Experimente aus dem Bereich der Biomoleküle können auf allgemeine Fragestellungen der Soft Matter Physik erweitert werden und zu nie dagewesener Präzision führen (z. B. Abbildung einzelner Miniemulsionströpfchen oder einzelner Defekte). In der Elektronenmikroskopie ermöglichen hochempfindliche, ultraschnelle Detektoren in Kombination mit Kryotechniken zunehmend die Aufklärung molekularer Strukturen und Veränderungsprozesse bis in den atomaren Bereich. Weiterentwicklungen in der chemischen Markierung erlauben im Rahmen der höchstauflösenden Lichtmikroskopie die zeitaufgelöste Verfolgung von Prozessen mit molekularer Auflösung unter Normalbedingungen. Die Verbindung von Konformation, Komposition und Morphologie mit elektronischen Eigenschaften ergeben nicht nur neue Optionen für elektronische Bauelemente, sondern auch neue Einblicke in modernen Fragen der Halbleiterphysik. Organische Halbleiter werden mit dem gesamten Instrumentarium der modernen Festkörperphysik untersucht und bieten mit ihren Möglichkeiten langfristig die Option, konventionelle Halbleiter in bestimmten Anwendungen zu ersetzen. AFM- und STM-Experimente verbinden das mit einer lokal sehr hohen Auflösung. Neue spektroskopische Ansätze, die z.T. analog zu mehrdimensionalen Verfahren der NMR-Spektroskopie entwickelt wurden, erlauben Detailsichten in Grenzflächen, die wiederum universell von Bedeutung sind, da Soft Matter in den meisten Fällen voller innerer Grenzflächen ist.

Für die makromolekulare Chemie ergeben sich neue Anreize, die „Perfektion“ der Synthese von Polymeren voranzutreiben und ein besseres Verständnis des Zusammenspiels hochdefinierter und strukturell flexibler Komponenten zu erlangen. Beispiele für die Fortschritte in der Polymersynthese sind die Metallocenkatalyse, lebende und kontrollierte Polymerisationsreaktionen¹⁴ sowie auch die Fortschritte in der Polykondensationschemie sowie in der precision polymer synthesis.¹⁵ Hier bleiben die bislang möglichen

14 a) P. B. Zetterlund, S. C. Thickett, S. Perrier, E. Bourgeat-Lami, M. Lansalot, "Controlled/Living Radical Polymerization in Dispersed Systems: An Update", *Chem. Rev.* **2015**, *115*, 9745-9800; b) K. Matyjaszewski, "Controlled Radical Polymerization: Mechanisms", *ACS Symp. Ser.* **2015**, *1187*, 1-17.

15 J.-F. Lutz, "Sequence-controlled Polymerizations: the Next Holy Grail in Polymer Science?", *Polym. Chem.* **2010**, *1*, 55-62.

synthetischen Ansätze aber noch weit hinter der Genauigkeit natürlicher Systeme zurück. Biomakromoleküle wie DNA, Proteine und Glykane sind einheitlich und gleichzeitig aus vielfältigen Bausteinen aufgebaut. Dies ermöglicht auch die Encodierung von „Informationen“ für die Kontrolle der Ausbildung von Überstrukturen bis hin zu hierarchischen Strukturen. Vor diesem Hintergrund wird die gezielte Platzierung von Monomeren¹⁶ sowie auch die supramolekulare Chemie in den Polymerwissenschaften eine weiter zunehmende Rolle einnehmen.^{17,18} Ein schrittweises Self-assembly und neue adaptive Eigenschaften erfordern neue Verfahren zur Funktionalisierung und Umfunktionalisierung, wie sie z.B. durch Click-Reaktionen möglich sind. Top-down Methoden (Lithographie, Layer-by-Layer) und bottom-up Verfahren können für die Strukturbildung zunehmend kombiniert werden und eröffnen so die Möglichkeiten für die skalenübergreifende Zusammenführung von Strukturbausteinen.¹⁹

Neue Herausforderungen ergeben sich auch im Grenzgebiet zur Biologie, aber vor allem in der biomedizinischen Technik und Pharmazie. So würde für Polymere mit Anwendungen in der Pharmazie und Medizin eine genaue Sequenzbestimmung die Möglichkeit zur Registrierung und zum Schutz der Einsatzgebiete wesentlich verbessern („Polymeromics“).²⁰ Ein besonders großes Potenzial ergibt sich aber im Verbund mit biologischen Systemen, d.h. in der Hybridisierung mit biologischen Komponenten sowie der Steuerung und Regeneration biologischer Funktionen. Beispiele sind biohybride Implantate, *ex vivo* Modelle von Organen, synthetische Scaffolds für das Tissue-Engineering, der gezielte Transport und die Freisetzung von Wirkstoffen, Diagnostika und vieles mehr. Hier überlappt das Forschungsfeld der molekularen Materie und Polymerwissenschaften mit Entwicklungen, die unter dem Begriff synthetische Biologie zusammengefasst werden. Anders als die Ansätze der Biolog_innen, die grundsätzlich biologische Mechanismen für synthetische Systeme mit neuen Eigenschaften einsetzen, liegt der Schwerpunkt auf nicht-biologischen Bausteinen und daraus abgeleiteten Systemen mit aktiven Eigenschaften. Stichworte sind adaptiv, responsiv und interaktiv. Da man aktive Eigenschaften vornehmlich aus der Natur kennt, spricht man hier auch von einer biomimetischen Chemie. Überlappungen ergeben sich daraus, dass eine biomimetische Chemie nicht nur zum Verständnis der biologischen Vorgänge beiträgt, sondern den gleichen physikalischen Grundregeln wie die Biologie folgt. Überlappungen ergeben sich aber insbesondere für Hybridkonstrukte, in denen künstliche Funktionsbausteine mit biologischen Komponenten verbunden werden. Diese Überlappungen zeigen deutlich, dass beide Forschungsansätze in hohem Maße aufeinander angewiesen sind. Somit liefern die modernen Polymerwissenschaften wertvolle Impulse für das Gebiet der synthetischen Biologie durch die Verwendung neuer Bausteine und Verfahren für die Herstellung bioaktiver Makromoleküle.

Die Anforderungen für die technologische Umsetzung in effiziente, nachhaltige Prozesse und Verfahren sind vielfältig. Im Mittelpunkt der Werkstoffentwicklung stehen Ausbildung und Eigenschaften von Grenzflächen. Insbesondere die Beherrschung von Grenzschicht- und Oberflächeneigenschaften bestimmt wesentlich die Funktionalität eines Materials und ergibt bereits für dünne Beschichtungen ein großes Nutzungspotenzial für adaptive und responsive Fähigkeiten (angefangen von schmutzabweisend, selbstreinigend, über selbstheilend bis zu aktiven optoelektronischen Eigenschaften). Dünne Filme als Funktionselemente und Membranen mit maßgeschneiderten und adaptiven Eigenschaften sind die Voraussetzung für Innovationen in der Energie-, Bau- und Umwelttechnik. Zudem bieten Polymere als Energiematerialien neue Anwendungsmöglichkeiten, beispielsweise in polymerbasierten Batterien.

Es ergeben sich auch völlig neue Herausforderungen für die technologische Umsetzung in effiziente, nachhaltige Prozesse und Verfahren. Hier kann man die Natur als ein gutes und gleichzeitig schlechtes

16 G. Gody, P. B. Zetterlund, S. Perrier, S. Harrison, "The Limits of Precision Monomer Placement in Chain Growth Polymerization", *Nature Commun.* **2015**, *7*, 10514.

17 a) E. Krieg, M. M. C. Bastings, P. Besenius, B. Rybtchinski, "Supramolecular Polymers in Aqueous Media", *Chem. Rev.* **2016**, *116*, 2414-2477; b) T. Rossow, S. Seiffert, "Supramolecular Polymer Networks: Preparation, Properties, and Potential", *Adv. Polym. Sci.* **2015**, *268*, 1-46.

18 W. H. Binder, M. Schunack, F. Herbst, B. Pulamagatta, "Biomimetic Principles in Macromolecular Science", in *Bioinspiration and Biomimicry in Chemistry: Reverse-Engineering Nature* (Editor G. F. Swiegers), John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA **2012**.

19 L. Persano, A. Camposeo, D. Pisignano, "Integrated Bottom-up and Top-down Soft Lithographies and Microfabrication Approaches to Multifunctional Polymers", *J. Mater. Chem. C* **2013**, *1*, 7663-7680.

20 E. Altuntaş, U. S. Schubert, "Polymeromics: Mass Spectrometry based Strategies in Polymer Science toward Complete Sequencing Approaches: a Review", *Anal. Chim. Acta* **2014**, *808*, 56-69.

Beispiel ansehen. So sind natürliche Strukturbildungs- und Wachstumsprozesse in hohem Maße selbst-regulierend und ermöglichen die Ausbildung komplexer hierarchischer Strukturen, gleichzeitig sind solche Prozesse jedoch auf großen Längenskalen langsam und letztlich auch nicht effektiv. Die Strukturbildung ist in den meisten Fällen gepaart mit durch einen Energie- und/oder Materialfluss getriebene Dissipation. Es gibt nur wenige Systeme in der Natur, die im Gleichgewicht oder einer statischen Struktur fixiert sind. Dies erfolgt beispielsweise in den tragenden Strukturmaterialien aus Energiespargründen (z. B. Holz). Die gesamte Ausrichtung der Biologie auf energiegetriebene Nichtgleichgewichtsstrukturbildung ermöglicht in vielen Fällen allerdings überhaupt erst das hochgradig adaptive Verhalten biologischer Systeme. Synthetische Beispiele für eine solche dynamisch-dissipative Selbstorganisation sind bisher in den allerersten Anfängen. Besonders interessant im Bereich des gleichgewichtsgerichteten Self-assembly sind top-down gesteuerte Self-assembly-Prozesse, die in vielen Bereichen zur Ausbildung besonderer, meist metastabiler Strukturen und Eigenschaften genutzt werden (Spinnprozesse für Fasern und Membranen, Stratifizierung und Pigmentausrichtung in der Lack- und Oberflächentechnologie, Template) und für die sich mit den 3D-Druckverfahren neue Perspektiven ergeben.

3. Stellung des erweiterten Forschungsfelds in den Universitäten

In der Forschung und Lehre der Universitäten spiegeln sich diese zahlreichen Facetten in unterschiedlichen institutionellen Zuordnungen der Lehrstühle der makromolekularen Chemie, der physikalischen Chemie der Polymere und Kolloide wider. Für das Forschungsgebiet wichtige Physikprofessuren sind in der Mehrzahl an außeruniversitäre Forschungseinrichtungen angebunden (Ausnahmen: Halle, Mainz, Freiburg, Berlin-Potsdam, Bayreuth). In den Ingenieurwissenschaften sind die Polymerwissenschaften vor allem im Maschinenbau und in einigen Fällen auch in der Verfahrenstechnik sowie Werkstoffwissenschaften vertreten.

Der aktuelle Hochschullehrerführer „Makromolekulare Chemie in Deutschland“ fasst die Situation in Deutschland sowie die Forschungsrichtungen der Arbeitsgruppen zusammen (siehe Anlage „Hochschullehrerführer“).²¹ Es wird deutlich, dass die Hauptarbeitsgebiete der universitären Gruppen im Bereich der Polymersynthese, -analytik sowie der -physik liegen (Abbildung 5, links). Weiterhin sind 46 anwendungsnahe universitäre und außeruniversitäre Forschungseinrichtungen auf dem Gebiet der Polymer- und Materialforschung tätig. Neben den traditionellen Anwendungen als Werkstoff finden zunehmend Fragestellungen für funktionale und neue aktive Eigenschaften das Interesse der Forscher. Im Mittelpunkt stehen hier Hybridmaterialien und Biomaterialien, letztere mit Schwerpunkt auf medizinischen Anwendungen (siehe Abbildung 6). Vergleichsweise jung ist das Interesse an der Entwicklung von Polymeren mit adaptiven und schaltbaren Eigenschaften.

Der Überblick zeigt aber auch eine örtliche Diversifizierung der jeweiligen Forschungsschwerpunkte. So sind die Polymerwissenschaften nicht in allen Universitäten in Forschung und Lehre vertreten. Die Diversifizierung der Polymerwissenschaften bei gleichzeitiger Konzentration auf eine begrenzte Zahl von Universitäten spiegelt sich auch in den Studienangeboten wider. Abbildung 7 gibt einen Überblick über das Angebot der curricularen Lehre innerhalb der klassischen Chemiestudiengänge (Bachelor und Master) sowie das Angebot der vertiefenden Veranstaltungen (z. B. Wahlfächer, Vertiefungsfächer) im Bereich der Polymerwissenschaften. In wenigen Fällen werden in der makromolekularen Chemie spezialisierte Master angeboten (z. B. Bayreuth mit Polymer- und Kolloidchemie; Freiburg/Strasbourg: Int. M.Sc. Sustainable Materials: Polymer Science oder Hannover mit dem Weiterbildungsstudium Kautschuktechnologie; Berlin-Potsdam M.Sc. Studiengang "Polymer Science")²².

21 Link Hochschullehrerführer <https://www.macrochem.org>.

22 Unter: <http://polymerscience-plasticsengineering.de/#> ist ein Überblick der Universitäten in Deutschland zu finden.

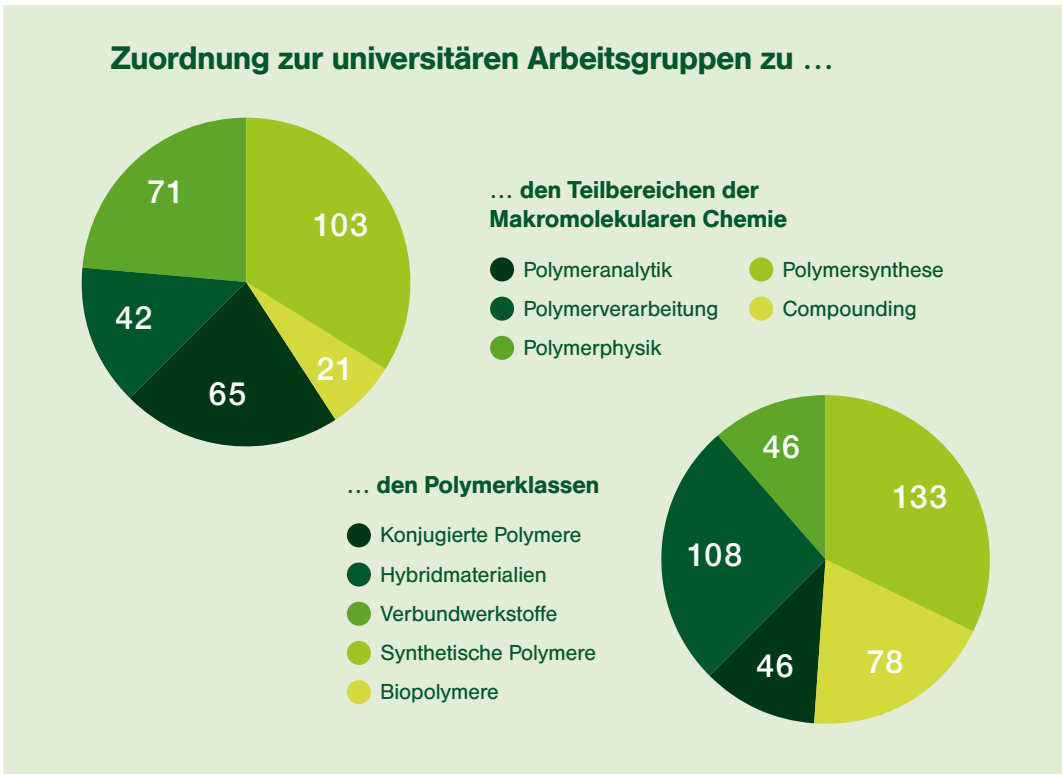


Abbildung 5: Zuordnung der universitären Arbeitsgruppen zu den Teilbereichen der makromolekularen Chemie (links) und Polymerklassen (rechts).²³

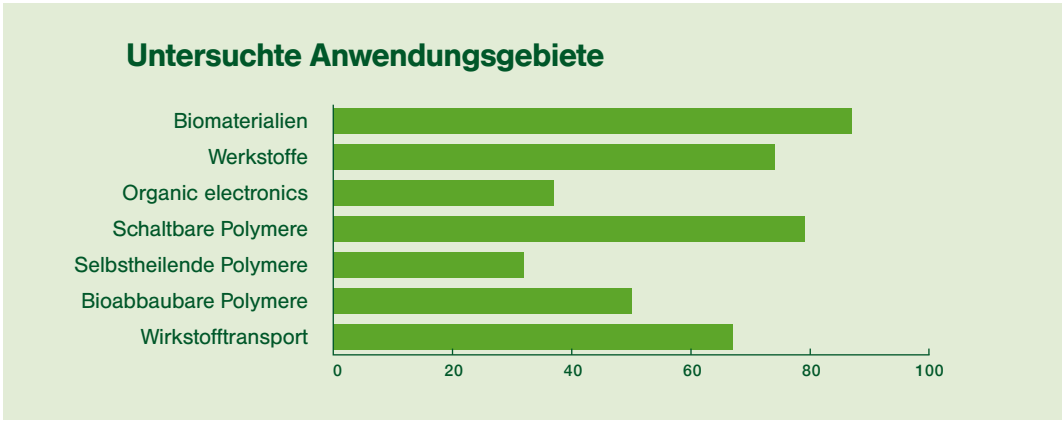
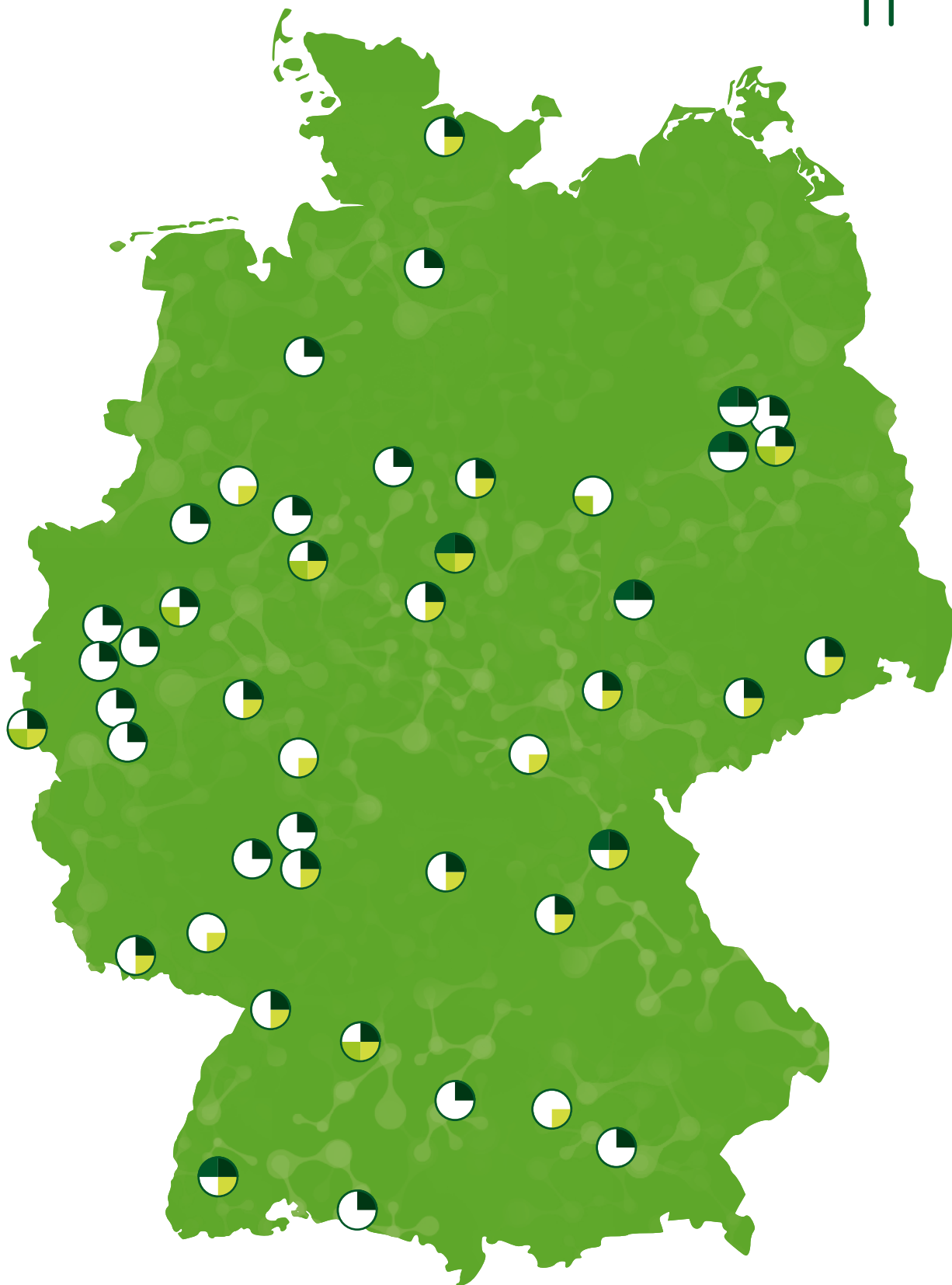



Abbildung 6: Anwendungsgebiete der polymeren Materialien, welche in den universitären Arbeitsgruppen derzeit untersucht werden.²¹

Im Rahmen der Ausbildung ist zu beachten: „Die Breite der chemischen Grundausbildung, bei Betonung materialwissenschaftlicher Fragestellungen, muss erhalten bleiben, um die Rolle des Chemikers als Experte für molekulare Materialien zu stärken.“²⁴

²³ Auf Basis der Rückmeldungen (Gesamtanzahl 183), Mehrfachnennungen möglich.

²⁴ Positionspapier – Chemie als ein Innovationstreiber in der Materialforschung.



 Lehre in der makromolekularen Chemie (Polymerchemie)

 Ingenieursstudium mit Polymerlehre bzw. Kunststofftechnologie

 Separater Studiengang im Bereich Polymerchemie

 Materialwissenschaft bzw. Werkstoffwissenschaft

Abbildung 7: Angebote der Universitäten und Hochschulen in Deutschland im Bereich der makromolekularen Chemie

4. Verankerung des erweiterten Forschungsfelds in den Förder- und Begutachtungsstrukturen der Deutschen Forschungsgemeinschaft

Polymerwissenschaften und molekulare Materialien sind ein Teilbereich der Forschungen zu Fragestellungen der Bildung und Funktion der (makro)molekularen Materie. In der vier Hauptfelder umfassenden Organisationsstruktur der DFG-Förderung (Abbildung 8) nehmen Themen der molekularen Materie eine breite Querschnittsfunktion ein, indem sie sowohl Fragestellungen der Lebenswissenschaften, der Naturwissenschaften und der Ingenieurwissenschaften betreffen. Diese Breite zeigt einerseits die fundamentale Bedeutung, bewirkt aber andererseits eine geringe Sichtbarkeit und Koordination der grundlegenden Fragestellung über die Fachgrenzen hinweg.

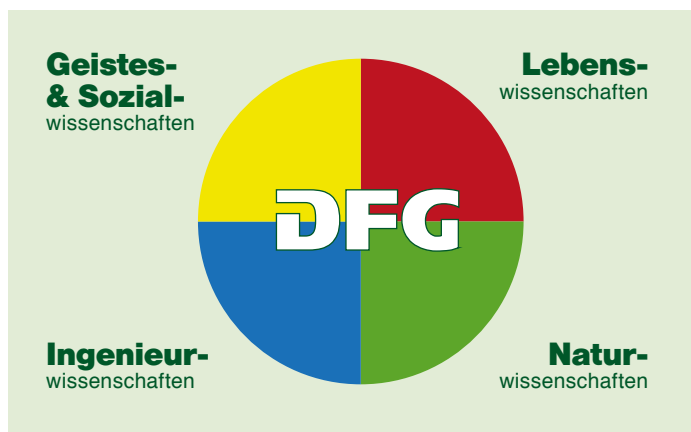


Abbildung 8: Organisationsstruktur der DFG in vier Bereiche der Förderung.

molekularen Materialien auf das grundlegende physikalische Verständnis vergleichsweise einfacher Strukturen, vor allem mit dem Ziel der Entwicklung neuer Materialien (vom Molekül zum System). Es liegt in der Natur dieser Aufgabenstellungen, dass sie sich nicht scharf abgrenzen, sondern sich gegenseitig ergänzen. Stichworte sind die Biophysik, die biomimetische Materialentwicklung und die Biomaterialien für die Lebenswissenschaften.

Forschungsvorhaben aus den auf die Synthese und Anwendung ausgerichteten Bereichen der molekularen Materialien als einem Unterbereich der molekularen Materie werden in der DFG vor allem in vier Fachkollegien behandelt:

- 306-1 Präparative und physikalische Chemie von Polymeren
- 306-2 Experimentelle und theoretische Polymerphysik
- 306-3 Polymermaterialien
- 401-4 Kunststofftechnik

Dabei werden Fragestellungen der Kolloidwissenschaften in der Regel dem Bereich der Polymerwissenschaften zugeordnet (306). Darüber hinaus betreffen Forschungsvorhaben zu molekularen Materialien auch weitere Fachkollegien wie:

- 310 Statistische Physik, weiche Materie, biologische Physik, nichtlineare Dynamik
- 403 Verfahrenstechnik, technische Chemie
- 301 Molekülchemie
- Sowie die interdisziplinäre Sektion Medizintechnik der Fachkollegien 205, 306, 402, 404, 407, 409 und 410

Eine strukturelle Abgrenzung der Polymerwissenschaften und der Wissenschaft der molekularen Materialien gegenüber den Lebenswissenschaften ergibt sich aus der unterschiedlichen Motivation und Zielsetzung der beteiligten Forscher_innen. Während die Lebenswissenschaften vor allem das Ziel verfolgen, höchstkomplexe, lebende Systeme zu verstehen und in ihre Entwicklungen und Reaktionen (Entscheidungen) einzugreifen (vom System zum Molekül), richtet sich die Forschung auf dem Gebiet der

Ein Effekt dieser Aufteilung ist, dass die Sichtbarkeit des Forschungsgebiets der molekularen Materialien und Polymerwissenschaften nicht die wissenschaftliche und wirtschaftliche Realität widerspiegeln. Dies ist verbunden mit Einschränkungen ein Problem für die wissenschaftsinterne Kommunikation aber auch für die Darstellung der Bedeutung des Forschungsgebiets nach außen.

Hinter dieser Frage steht ein grundsätzliches Dilemma zwischen der Förderung gewachsener disziplinärer Kompetenz und der Entwicklung neuer Forschungsgebiete, die aus dem disziplinären Rahmen ausbrechen. Die DFG stellt sich dieser Herausforderung durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Struktur der Fachkollegien und in einzelnen Fällen auch durch die Einrichtung interdisziplinärer Sektionen (siehe Medizintechnik). Ebenfalls begegnet die DFG einer disziplinären Begrenzung durch die fachübergreifende Auswahl der Gutachter_innen. Dennoch kann die Frage gestellt werden, inwieweit die Entscheidungsfindungen zur Förderung eines Vorhabens durch die unterschiedliche Abdeckung des an sich sehr breiten und interdisziplinären Fachgebiets der molekularen Materialien und die disziplinenorientierte Zusammensetzung der DFG-Gremien beeinflusst wird. Nicht zuletzt ergibt sich aus der disziplinären Zuordnung auch ein gewisser Druck für die Antragsteller, sich in ihren Forschungszielen auf die Zuordnung der Fachkollegien auszurichten. Auffallend ist, dass bei den koordinierten Programmen der DFG (Forschergruppen, Schwerpunktprogrammen, Sonderforschungsbereichen, Graduiertenkollegs) aktuell eine sichtbare Unterrepräsentanz der Polymerwissenschaften besteht (siehe www.dfg.de). Hier müssen durch die Forscher_innen selbst neue Anstrengungen unternommen werden, regelmäßig polymerwissenschaftliche Themen einzubringen. Auffällig erscheint auch der in den Statistiken ersichtliche Rückgang der Nachwuchswissenschaftler_innen (bis 35 Jahre) hinsichtlich der bewilligten Forschungsstipendien und der Förderung im Rahmen des Emmy-Noether Programms.

5. Organisatorische Herausforderungen für die zukünftige weitere Entwicklung

Wenn Deutschland in der Polymerforschung, nicht zuletzt wegen des sehr bedeutenden Anteils der außeruniversitären Forschung, auch im internationalen Vergleich eine sehr kompetitive Position einnimmt, so ergeben sich doch wichtige zukünftige Herausforderungen.

Die Fortschritte der Vergangenheit führen dazu, dass eine Konzentration auf den engeren Bereich der synthetischen Makromoleküle, deren Eigenschaften und Verwendung in der Kunststoff-, Kautschuk-, Lack- und Faserindustrie der Entwicklung des Forschungsgebiets seit langem nicht mehr gerecht wird. Einerseits erschließen sich Polymerwissenschaftler_innen immer neue Funktionseigenschaften, andererseits gibt es eine zunehmende Anzahl von Grenzgänger_innen aus anderen Fachgebieten. Diese Verbreiterung des Forschungsfelds zeigt sich sehr deutlich in den Beteiligungen an den Forschungsschwerpunkten wie Aachen, Berlin-Potsdam, Bayreuth, Dresden, Freiburg, Halle, Stuttgart und Mainz. Darüber hinaus und verbunden mit dem Fortschritt in der rechnergestützten Modellierung und Simulation haben neue Methoden zur Synthese, der molekularen Charakterisierung und in den Abbildungsverfahren, das Verständnis optischer und elektronischer Eigenschaften, Fortschritte in der Physik stochastischer Prozesse und komplexer Systeme und der Nanotechnologie sowie neue Möglichkeiten des Bioengineering das Forschungsfeld stark verändert.

Gleichzeitig etabliert sich ein erweitertes Forschungsgebiet mit der Fragestellung „vom Molekül zum System“ als ein neues fundamentales Wissenschaftsfeld mit einem außerordentlichen Potenzial. Hierbei grenzt es sich von den Lebenswissenschaften dadurch ab, dass Fragestellungen nicht auf das molekulare Verständnis natürlicher sondern auf den Aufbau technischer Systeme gerichtet sind. Stichworte sind hier (i) die skalenübergreifende Beherrschung von Struktur-Eigenschafts- und Struktur-Prozess-Eigenschafts-Beziehungen, (ii) die Entwicklung von Materialien mit aktiven und adaptiven Eigenschaften und

(iii) die Verbindung synthetischer und biologischer Systeme. Verknüpft ist dies mit der sozioökonomischen Herausforderung für eine neue Materialwirtschaft im Einklang mit der Natur. Hierfür ist es von geringer Bedeutung, ob der Begriff „System“ eng gefasst ein molekulares Funktionssystem oder weiter gefasst die Verwendung, Verarbeitung und Funktion der molekularen Bausteine in einem übergeordneten System bezeichnet.

Aus diesen Punkten ergibt sich ein hoher Anspruch für ein transdisziplinäres Vorgehen, bei dem die traditionellen Grenzen zwischen Physik, Chemie, Biologie, Informatik und Polymerwissenschaften sowie Medizin und Ingenieurwissenschaften überschritten werden, und es zeigt sich die Notwendigkeit einer auf Konvergenz ausgerichteten Organisation der Forschung. Angemerkt werden kann, dass es im Kernbereich der Polymerwissenschaften immer schon eine Kultur der disziplinären Konvergenz gegeben hat. Diese wurde lange Zeit vor allem durch große Forschungslabore der Industrie gefördert, in denen interdisziplinäre Forschergruppen aufgabenorientiert auch grundlegende wissenschaftlichen Fragestellungen bearbeiteten (BASF, Bayer, Hoechst, Dupont, IBM, Xerox, Bell Labs u. v. a.). Aufgrund der Restrukturierungen der großen Industrieunternehmen und ihrer stärker und kurzfristiger auf die Produktentwicklung ausgerichteten Forschungsstrukturen trägt dieser Push-Pull-Mechanismus zwischen akademischer und industrieller Forschung heute weniger zur Entwicklung der Wissenschaft bei. Gleichzeitig steht die Konvergenz wissenschaftlicher Disziplinen nicht im Einklang mit der traditionellen Organisation unseres Wissenschaftssystems und bildet eine Herausforderung für die disziplinäre Organisation der Forschung. Letztlich erfordert Konvergenz somit neue Modelle für die Zuweisung von Ressourcen und die Administration/Organisation der wissenschaftlichen Arbeit. Gegeben ist das bisher vor allem für die Einrichtungen der außeruniversitären Forschung. Diese erfüllen auch am ehesten die Bedingung, dass eine kritische Zahl an Forschenden an den Standorten zusammen kommen, die das sich verbreiternde Feld umfänglich vertreten. Trotz der großen interdisziplinären und praktischen Bedeutung bleiben die Polymerwissenschaften aber auch in einer erweiterten Form ein Fachgebiet, für das eine konvergente Forschungsstrategie nicht überall möglich ist. Begründet durch die grundlegenden Perspektiven und die Bedeutung des Forschungsfelds für die deutsche Industrie ist es sinnvoll und notwendig, die Polymerwissenschaften an ihren wenigen Standorten zu stärken und die Vernetzung mit anderen materialorientierten Forschungsaktivitäten auszubauen. Das sollte sich auch in der Berufungspolitik an den deutschen Universitäten niederschlagen.

Ein wichtiger Punkt ist hierbei auch die Identifizierung der beteiligten Wissenschaftler_innen mit dem Forschungsfeld. Nur hieraus ergibt sich eine klare Sichtbarkeit. Diese ist wiederum Voraussetzung für eine weiterführende Integration des Fachgebiets, die Definition gemeinsamer Ziele, eine gemeinsame Terminologie, neue Kooperationen und nicht zuletzt eine seiner Bedeutung angemessene Förderung. Disziplinäre Kultur- und Methodengrenzen ergeben sich hier zwischen Ingenieur_en_innen und Naturwissenschaftler_n_innen einerseits und innerhalb der Naturwissenschaften zwischen Chemie, Physik und Biowissenschaften. Konvergenz erfordert, dass die Grenzen abgebaut werden, ohne die disziplinäre Kompetenz aufzugeben. Ein Aspekt für die Sichtbarkeit liegt in der Bemessung der Forschungsergebnisse. Diese erfolgt einerseits nach den in der Wissenschaft üblichen Kriterien (Impact, der allerdings fachspezifisch sehr unterschiedlich definiert wird), zum anderen nach dem sichtbaren gesellschaftlichen und ökonomischen Nutzen. In beiden Fällen leiden Materialentwicklungen darunter, dass sie in der Regel langwierig und als Ermöglicher häufig in einer Bauteilentwicklung versteckt sind. Voraussetzung für eine Verbesserung ist eine intensive Diskussion, die Erarbeitung gemeinsamer Qualitätsmaßstäbe sowie die Ausbildung eines Verständnisses für übergreifende Fragestellungen. Ein besonderer Ansatz für eine fachübergreifende Entwicklung ergibt sich mit der Digitalisierung des Materialverständnisses und aus der gemeinsamen Herausforderung durch die Komplexität der Materialstrukturen und Materialverarbeitungsprozesse. Für die Physik beinhaltet das, dass Polymere in ihrer besonderen Konnektivität und Komplexität auch neue grundlegende Fragen aufwerfen.

Vor diesem Hintergrund stellt sich auch die Frage, inwieweit der Begriff Polymerforschung nicht erweitert werden muss: „(Kondensierte oder weiche) Molekulare Materie und Polymerwissenschaften“. Diese Erweiterung hat in Frankreich schon Tradition, und die moderne Forschung an polymeren Halbleitern ist in vielen Bereichen Festkörperphysik im besten klassischen Sinne. Mit der Herausforderung, das Forschungsfeld national wie auch international darzustellen, haben die nationalen Organisationen wie die Fachgruppe Makromolekulare Chemie der Gesellschaft der Deutschen Chemiker (GDCh), die Bunsen-

gesellschaft, die Deutsche Physikalische Gesellschaft, DPG, und beteiligten Ingenieurwissenschaftler, eine wichtige Aufgabe²⁵. Die Organisation auf europäischer Ebene und die internationale Vernetzung sind im Vergleich zu Nordamerika nach wie vor gering entwickelt. Zunehmend ist dabei auch die Industrie gefragt, ihren Standortvorteil für das Forschungsfeld zu stärken. Die Verbesserung der Sichtbarkeit und die Integration sind aber Voraussetzung dafür, die Innovationspotenziale den Entscheidern und Förderern klar vermitteln zu können. Für die Forschungseinrichtungen betrifft dies insbesondere die Darstellung des Forschungsfelds innerhalb der DFG, gegenüber dem BMBF, dem BMWi sowie gegenüber der Politik und der Öffentlichkeit.

Im Rahmen der Organisationsstruktur der Deutschen Forschungsgemeinschaft werden Vorhaben der Polymerwissenschaften vor allem durch das Fachforum Chemie empfohlen. Diese Vorhaben werden damit getrennt von Vorhaben der statistischen Physik und der Ingenieurwissenschaften behandelt. Zwar werden die Gutachten vorhabenspezifisch von Expert_en_innen unterschiedlicher Fächer eingeholt, die letztendliche Empfehlung bleibt aber chemie-, physik- oder ingenieursbestimmt. Nachteil dieser Einteilung ist die Abgrenzung der ingenieurwissenschaftlichen Vorhaben und die begrenzte Abstimmung mit physikalischen und materialwissenschaftlichen Herausforderungen. Selbst im Fachforum Chemie kann man für die Beurteilung der Vorhaben in vielen Fällen eine Interessen- und Kompetenzabgrenzung erkennen. Das ist einmal das Interesse an den Struktur-Reaktivitätsbeziehungen, zum anderen das Interesse an den Struktur-Eigenschaftsbeziehungen. Selbst für synthetische Vorhaben der makromolekularen Chemie und die physikochemische Charakterisierung von Makromolekülen fallen die Kompetenzen nur begrenzt zusammen. Relativ deutlich zeigt sich dies in der Förderung von Nachwuchswissenschaftler_innen. So sind junge, später sehr erfolgreiche Forscher_innen bei der Vergabe von Emmy-Noether-Förderungen eher unterrepräsentiert.²⁶

Vor dem Hintergrund der oben aufgeführten Entwicklung als fundamentale Herausforderung in der Forschung, der besonderen Notwendigkeit für die Konvergenz der beteiligten Forschungsgebiete und der zukünftigen Weiterentwicklung der Polymerwissenschaften zu einer Soft Matter Chemie und Physik stellt sich die Frage, inwieweit ein spezielles interdisziplinäres Fachforum das Forschungsfeld fördern kann. Anders als im Bereich der Medizintechnik ist das gemeinsame Interesse hier grundlegend und nicht primär anwendungsorientiert.

Eine weitere Voraussetzung für eine international erfolgreiche zukünftige Entwicklung der Forschung zu molekularen Materialien und den Polymerwissenschaften ist eine starke Verankerung des Feldes in der Ausbildung. Im Hinblick auf die wissenschaftliche Konvergenz besteht zukünftig die Herausforderung einerseits die transdisziplinäre Entwicklung im Rahmen der Ausbildung zu fördern, d.h. die Studierenden werden in die Lage versetzt, interdisziplinär arbeiten zu können. Andererseits müssen gerade in der Ausbildung die ursprünglichen Kompetenzen gestärkt werden, um die etablierten Kompetenzfelder zu bewahren.

Im Bereich der Ausbildung sollte diskutiert werden, inwieweit ein Fächerkanon analog der technischen Chemie (DECHEMA) eingeführt werden sollte, um vergleichbarere Ausbildungsstandards in allen polymerwissenschaftlichen Studiengängen zu sichern.

25 Beispielhafte Aktivitäten sind der von der Fachgruppe Makromolekulare Chemie verantwortete neue Flyer, ein Hochschulführer, eine neue Webseite mit Übersicht der Arbeitsgebiete der Arbeitsgruppenleiter, zusammen mit der Übersicht über die Studiengänge in Deutschland im Bereich Polymerwissenschaften. Zur Verbesserung der Sichtbarkeit sollte auch das kommende Jubiläum der Polymerwissenschaften (100 Jahre Makromolekulare Chemie, 2020) intensiv genutzt werden. Hierzu sollte es eine intensive Interaktion der Hochschullehrer der Polymerwissenschaften, der entsprechenden Fachkollegiaten bei der DFG, dem Vorstand der Fachgruppe Makromolekulare Chemie sowie der Industrie geben, in dem auch die „modernen Begriffe“ der Polymerwissenschaften transportiert werden sollten („jenseits der Plastiküte“).

26 Für die genaue Klärung wäre es interessant, die Werdegänge der Antragsteller für Emmy-Noether-Vorhaben der letzten 12 Jahre hinsichtlich der Fachzugehörigkeit auszuwerten.

notizen



IMPRESSUM

Verantwortlich für den Inhalt

Prof. Dr. Martin Möller
Prof. Dr. Ulrich S. Schubert

Herausgeber

Makromolekulare Chemie
Eine Fachgruppe der GDCh
Vorsitzender: Dr. Thomas Früh
Arlanxo Deutschland GmbH
Chemiepark Leverkusen
Geb. K-10, Raum 0093
51369 Leverkusen

Stellvertreter: Prof. Dr. Ulrich S. Schubert
Friedrich-Schiller-Universität Jena
Lehrstuhl für Organische und
Makromolekulare Chemie (IOMC)
Humboldtstr. 10, 07743 Jena

ISBN: 978-3-947197-07-1
Auflage: 2.000
Online-Version (PDF): www.makrochem.org

Gestaltung und Gesamtherstellung



GMK GmbH & Co. KG
Medien. Marken. Kommunikation.

Bindlacher Str. 10, 95448 Bayreuth
Jörg Lichtenegger (verantw.), www.gmk.de

Danke

Wir danken der Deutschen Forschungs-
gemeinschaft (DFG) für die Finanzierung
und Durchführung von vier Rundgesprächen,
die zu diesem Positionspapier geführt haben.

Gefördert durch



Deutsche
Forschungsgemeinschaft

Unterstützt durch das Fachkollegium
Polymerforschung der Deutschen
Forschungsgemeinschaft (DFG)

Unterstützt durch den Vorstand der
Fachgruppe Makromolekulare Chemie der
Gesellschaft Deutscher Chemiker (GDCh)

Unterstützt durch den Vorstand der
Fachgruppe Lackchemie der Gesellschaft
Deutscher Chemiker (GDCh)

Unterstützt durch den Fachverband
Chemische Physik und Polymerphysik (CPP)
der Deutschen Physikalischen Gesellschaft

Mit Beiträgen und getragen von über
130 Professor_innen der Polymer-
wissenschaften in Deutschland sowie
Industrievertreter_innen aus den
Fachgruppen (siehe S. 4/5).