

ANGEWANDTE CHEMIE

86. Jahrgang 1974

Heft 3

Seite 109–138

Wo steht die makromolekulare Wissenschaft?^[**]

Von Paul J. Flory^[*]

Der Mensch versteht es seit frühester Zeit, polymere Stoffe zu gebrauchen und zu verändern. Verfahren zur Bearbeitung von Fasern, Tierhäuten, Holz, Gummi und natürlich vorkommenden Harzen stammen schon aus prähistorischer Zeit. Sie gehören zu den ältesten Technologien, die über die Jahrhunderte hinweg bis in unsere Zeit entwickelt wurden. Im Gegensatz dazu ist die *Wissenschaft* von den Polymeren oder Makromolekülen erst spät in Erscheinung getreten – spät im Vergleich zu anderen Zweigen der Wissenschaft. Die moderne Wissenschaft von den Molekülen, die Chemie, begann um 1860. Die Grundlagen der Quantentheorie und Quantenmechanik wurden von 1900 bis 1925 geschaffen, die Relativitätstheorie von 1905 bis etwa 1920. Der Grundstein der makromolekularen Wissenschaft wurde jedoch erst gelegt, nachdem diese bahnbrechenden Fortschritte Richtung und Inhalt von Chemie und Physik für die kommenden Jahrzehnte bestimmt hatten. Die Leitidee der makromolekularen Architektur – die Zusammenlagerung von Atomen oder Atomgruppen zu covalent gebundenen, sehr langen Ketten – wurde erst 1930 als Strukturprinzip anerkannt, das allen polymeren Stoffen zugrunde liegt, und noch einige Jahre danach wurden Zweifel an der Richtigkeit dieser Vorstellung laut. Polymere chemische Strukturen waren schon 70 Jahre vorher vorgeschlagen – und sogar verteidigt – worden. Aus Gründen, die man hinterher schwer begreifen kann, wurden jedoch lineare makromolekulare Strukturen überall abgelehnt. Stattdessen ordnete man Substanzen, die wir heute als polymer kennen, die Struktur kleiner Ringe zu. So wurden für Proteine, Gummi, Cellulose, Stärke und

mehrere synthetisch hergestellte Polymere drei- bis zwölfgliedrige Ringe vorgeschlagen. Die allgemeine Voreingenommenheit der Chemiker für Moleküle mit prägnanten Formeln, die sich bequem zu Papier bringen lassen, scheint die überwältigende Überzeugung verursacht zu haben, daß alle Substanzen so beschaffen sein müßten. Die viel größeren chemischen Strukturen, die von Zeit zu Zeit für die gewöhnlichsten und zugleich wichtigsten Stoffe im Leben des Menschen vorgeschlagen wurden, schob man wahrscheinlich aus diesem Grund beharrlich zur Seite.

Erst Ende der zwanziger Jahre war es klar bewiesen, daß Cellulose und Stärke Hochpolymere sind, deren Moleküle aus langen Ketten bestehen. Das Epos des Naturkautschuks lautet ähnlich: Ermittlung der chemischen Struktur der Einheit zu Beginn des Jahrhunderts, Diskussion einer Anzahl von Ringformeln, und schließlich Ende der zwanziger Jahre die verspätete Anerkennung der Kettenformel des Polymeren.

Auch die von *Hofmeister* und von *Emil Fischer* etwa 1902 aufgestellte Polypeptidhypothese für die chemische Struktur der Proteine erlangte vor 1930 keine breitere Anerkennung. Noch Mitte der zwanziger Jahre wetteiferten führende Organiker der damaligen Zeit miteinander um die Erfindung geheimnisvoller Ringstrukturen, offenbar im vergeblichen Bemühen, die Anerkennung der Polypeptidkettenstruktur als Bauplan der lebenswichtigen Proteine zu verhindern, ungeachtet der Fülle an chemischen und physikalischen Beweisen. Offensichtlich war die Vorstellung einer polymeren Struktur für Stoffe von so überragender Bedeutung unangenehm. Ob die Polypeptidkette als solche schon als anstößig betrachtet wurde oder ob man ihr nur deshalb entgegentrat, weil sie von den Strukturen abwich, mit denen sich die Chemiker überwiegend beschäftigten, kann nur vermutet werden. Man erinnere sich, daß *Emil Fischer* während des ersten Jahrzehnts dieses Jahrhunderts in einer Gewalttour ein Polypeptid mit 30 Einheiten synthetisiert hatte. Doch auch er blieb dem Glauben treu, daß Proteine aus Kettenmolekülen bestanden, die nicht länger

[*] Prof. Dr. P. J. Flory
Department of Chemistry, Stanford University
Stanford, California 94305 (USA)

[**] Nach einem Vortrag anlässlich der Eröffnung des Midland Macromolecular Institute in Midland, Michigan (USA) am 28. September 1972. Der Text wird auch in der Zeitschrift „International Journal of Polymeric Materials“ und in *H.-G. Elias: Trends in Macromolecular Science* (Midland Macromolecular Monographs, Vol. 1) bei Gordon & Breach, New York–London, erscheinen.

waren als die von ihm synthetisierten, und von denen mehrere „kolloidal“ zum Protein-„Körperchen“ vereinigt waren.

Noch überraschender ist die Saga von den Polynucleotiden. Nach Meinungen, die bis Mitte der vierziger Jahre im wesentlichen unangefochten blieben, sollten sie tetramer sein. Erst in den fünfziger Jahren wurde sichergestellt, daß lange Ketten aus Nucleotideinheiten vorliegen, deren Zahl in die Hunderttausende reicht.

Die Entwicklung der Vorstellungen über synthetische Polymere ging einen ähnlichen Weg. Die Chemie dieser Verbindungen entwickelte sich schnell, nachdem ihre molekulare Natur erkannt worden war und der Chemiker nun systematisch mit der Herstellung einer Vielzahl synthetischer Polymerer beginnen konnte. Der Einfluß der Pionierarbeiten von *Staudinger* und von *Carothers* in dieser Zeit kann nicht hoch genug geschätzt werden. Ihre Arbeiten stellten die makromolekulare Hypothese auf ein festes Fundament und schufen sowohl Meßmethoden als auch Syntheseverfahren.

Wichtig ist nun die Feststellung, daß Makromoleküle von ihren Analogen niedrigeren Molekulargewichts nicht scharf getrennt sind. In jeder Reihe makromolekularer Homologe gibt es Vertreter mittlerer Kettenlänge. Die chemischen Bindungen zwischen den Atomen in Makromolekülen unterscheiden sich nicht merklich von denen in kleinen Molekülen; sie können auch durch dieselben geometrischen Parameter beschrieben werden. Jede scharfe Unterscheidung zwischen dem Bereich der Moleküle, mit denen man es täglich im Laboratorium zu tun hat, und den Makromolekülen, die sonst überall vorhanden sind, muß daher notwendigerweise willkürlich sein. Damit ist die Wissenschaft der Makromoleküle in die übrige Chemie und in Teilgebiete der Physik integriert. Allerdings darf nicht übersehen werden, daß für das Verständnis der Makromoleküle Abwandlungen von Begriffen und Theorien erforderlich sind. Wissen auf dem Gebiet der Riesemoleküle kann nicht einfach aus den Vorstellungen und Regeln abgeleitet werden, die man an kleinen Molekülen erarbeitet hat. Veränderungen von Standpunkt und Methode sind erforderlich, in mancher Hinsicht muß man sich an anderen Leitlinien orientieren.

Das relativ späte Aufkommen der makromolekularen Wissenschaft hatte eine schwerwiegende Konsequenz für Gegenwart und Zukunft. Die Einteilung der Chemie als Lehrfach in ihre traditionellen Unterabteilungen war abgeschlossen, bevor die molekulare Natur der Polymeren erkannt und Theorien und Verallgemeinerungen zur Beschreibung ihres Verhaltens formuliert worden waren. Daher wurden die Makromoleküle einfach aus dem Programm herausgelassen. In den Lehrbüchern fanden nur wenige oberflächliche Bemerkungen über Kolloide Platz, und diese waren irreführend, wenn nicht sogar falsch. Die Makromoleküle haben bis heute keinen Eingang gefunden. Ungeachtet der eigenen Meinung über den Platz, den Chemie und Physik der Polymeren im Lehrplan einnehmen müßten, hat man zur Zeit damit zu rechnen, daß diese Gebiete überhaupt nicht berücksichtigt wurden.

Die Bedeutung der Polymerwissenschaft für die industrielle Technologie ist offensichtlich und wird wohl auch überall anerkannt. Auf den engen, zeitlichen Zusammenhang zwischen dem Aufkommen der Polymerwissenschaft und der Erzeugung

synthetischer Polymerer wurde schon hingewiesen. Wenn auch die Polymerwissenschaft nicht den Hauptimpuls für die Herstellung von Polymeren gegeben hat, so hat sie doch eine große Rolle beim Aufbruch in das Zeitalter der Kunststoffe gespielt, wie es die Nachwelt vielleicht einmal nennen wird. Man darf wohl annehmen, daß die reine und die angewandte Polymerwissenschaft sich auch weiterhin einer fruchtbaren Wechselbeziehung erfreuen werden.

Die Bedeutung der Polymerwissenschaft für die Biologie scheint dagegen nicht so hoch eingeschätzt zu werden. Gewohnheit und ein vielleicht in der nicht aussterben-wollenden vitalistischen Betrachtung lebender Dinge wurzelndes Vorurteil scheinen den Eindruck aufrechtzuerhalten, daß die Biopolymeren mit den technisch erzeugten Mitgliedern der Polymeren-Familie nicht verwandt sind. Biopolymere haben zwar im Laufe ihrer Evolution gewisse Eigenheiten erworben, die ihre weniger feinen Verwandten nicht aufweisen, doch gibt es Grundeigenschaften und Verhaltensmuster, die allen Polymeren gemeinsam sind: die Thermodynamik ihrer Lösungen, Gesetzmäßigkeiten in bezug auf die räumliche Konfiguration, die Erscheinung hoher Elastizität unter geeigneten Bedingungen, die Kristallisation etc. Die Tendenz, Biopolymere und technische Polymere in verschiedene Kategorien einzuordnen, wirkt sich nachteilig für das bessere Verständnis von beiden aus. Wenn die Molekularbiologie auf einer soliden molekularen Basis beruhen soll, dann verlangt die Logik, daß diese Basis von der Wissenschaft der polymeren Moleküle geschaffen wird. Zu diesem Zweck ist eine Polymerwissenschaft notwendig, die sich mit den Grundlagen des makromolekularen Verhaltens im weitesten Sinne beschäftigt.

Es gibt noch eine weitere Rolle für die makromolekulare Wissenschaft, eine, für die sie besonders geeignet erscheint: die Verbindung zwischen Wissenschaft und Öffentlichkeit. Die meisten Themen im Brennpunkt der Wissenschaft betreffen Dinge, die für den Nichtspezialisten unverständlich sind und von seinem Interesse und Bewußtsein weit entfernt liegen. Die Chemie ist ein gutes Beispiel: Ihre Verbindungen, Theorien und Reaktionen bieten nur relativ selten die Gelegenheit, das Interesse einer breiten Öffentlichkeit zu wecken. Polymere Stoffe, in einer Fülle von Beispielen belegt durch eine Unzahl von Handelswaren, ganz abgesehen von den allgegenwärtigen Biopolymeren, sind ideal dazu geeignet, die Wissenschaft einem größeren Zuhörerkreis zugänglich zu machen. Somit ist die Polymerwissenschaft dank ihres Gegenstandes und ihres Anwendungsbereiches in dieser Hinsicht besonders bevorzugt. Trotzdem hat die makromolekulare Wissenschaft noch einen weiten Weg vor sich, wenn sie den angedeuteten Ansprüchen genügen will. Grundlagenforschung und Arbeiten auf neuerschlossenen Gebieten müssen vorangetrieben werden. Der Zusammenhalt des Faches durch Systematisierung des vorhandenen Wissens gewinnt wachsende Bedeutung, wenn sich die Forschung in neue Richtungen ausbreitet. Zugleich sollte nicht übersehen werden, wie wichtig der Ausbau von Querverbindungen zwischen der makromolekularen Wissenschaft und verwandten Gebieten ist.

Eingegangen am 15. Juni 1973 [A 982]
Übersetzt von Doz. Dr. Klaus Wegmann, Tübingen