

# Die makromolekulare Chemie<sup>1</sup>

Von Prof. Dr. H. STAUDINGER

Staatliches Forschungsinstitut für makromolekulare Chemie, Freiburg im Breisgau

428. Mitteilung über makromolekulare Verbindungen<sup>2</sup>

## I

Die Einladung zu einem Vortrag vor der Zürcher Chemischen Gesellschaft habe ich gerne angenommen, da mir so Gelegenheit geboten wird, über weitere Beobachtungen auf einem Gebiet zu berichten, das während meiner Tätigkeit an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in den Jahren 1920 bis 1926 bearbeitet wurde und dessen Ergebnisse damals stark umstritten waren. Es handelte sich dabei um die Frage nach der Konstitution von makromolekularen Stoffen, wie der Cellulose, der Stärke, des Kautschuks, der Proteine, und nach der Natur ihrer kolloiden Lösungen<sup>3</sup>. Die Bearbeitung dieser Fragen wurde in zwei ganz verschiedenen Richtungen versucht, und zwar einmal unter dem Gesichtspunkt der damals hauptsächlich durch die Bemühungen von Wo. OSTWALD aufkommenden Kolloidlehre und weiter im Sinne der Konstitutionsaufklärung nach der KEKULÉschen Strukturlehre<sup>4</sup>. Der Vergleich der kolloiden Lösungen der Seifen mit den Lösungen linearmakromolekularer Stoffe führte Vertreter der Kolloidlehre zu der Forderung, daß die Kolloidteilchen in beiden Gruppen von kolloiden Lösungen einen ähnlichen Bau haben müßten,

eines micellaren Baues verständlich machen wollte<sup>5</sup> (Abb. 1).

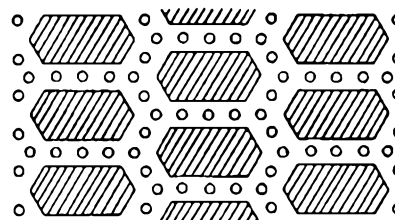


Abb. 1. Micellarstruktur nach NÄGELI und SCHWENDENER 1877

Auf Grund dieser Vorstellung wurde damals weiter gefolgert, daß die eigentlichen Moleküle dieser genannten Naturstoffe klein seien, ähnlich wie die Moleküle der Seifenmicellen. Es war verhängnisvoll, daß durch eine ganze Reihe von Beobachtungen, z. B. über Molekulargewichtsbestimmungen von Kautschuk in Menthol (R. PUMMERER), von Stärkeacetaten und Celluloseacetaten in Phenol (K. HESS und M. BERGMANN), diese

Tab. 1. Vergleich zwischen den Eigenschaften von niedermolekularen Stoffen, makromolekularen Stoffen und Micellkolloiden

Eigenschaften	Niedermolekulare Stoffe	Linearmakromolekulare Stoffe, z. B. Kautschuk, Cellulose	Micellkolloide, z. B. Seifen
lösen sich . . . . .	ohne Quellung	unter Quellung	unter Quellung
gelöste Teilchen sind . . . . .	monodispers	polydispers	polydispers
Lösung ist eine . . . . .	NEWTONsche	nicht NEWTONsche	nicht NEWTONsche
1 prozentige Lösung ist . . . . .	niederviskos	hochviskos	hochviskos
Viskosität der Lösungen beim Stehen	unveränderlich	Alterungserscheinungen	Alterungserscheinungen
gelöste Teilchen . . . . .	dialysieren	dialysieren nicht	dialysieren nicht

da diese Lösungen in vieler Hinsicht gleiches Verhalten zeigen, sich dabei aber von den Lösungen niedermolekularer Stoffe unterscheiden, wie aus Tab. 1 zu ersehen ist.

Um das Verhalten dieser linearmakromolekularen Stoffe, vor allem der Faserstoffe, verständlich zu machen, griffen Vertreter der Kolloidlehre auf Vorstellungen des Zürcher Botanikers C. NÄGELI zurück, der das besondere Verhalten der Faserstoffe, ihr Quellungsvermögen und die Bildung von kolloiden Lösungen durch folgendes Bild

Auffassung scheinbar belegt werden konnte, ebenso wie durch falsch gedeutete Röntgenuntersuchungen an kristallisierten makromolekularen Faserstoffen (H. MARK und E. OTT).

Dagegen wurde von mir die Auffassung vertreten, daß die besonderen Eigenschaften dieser Stoffe durch die Größe ihrer Moleküle bedingt sind, deren Konstitution also nach den klassischen Methoden der organischen Chemie aufgeklärt werden mußte. Für Moleküle, die die Größe von Kolloidteilchen haben, die also ein Molekulargewicht von weit über 10 000 besitzen, wurde damals gemeinsam mit J. FRITSCH<sup>6</sup> der Name «Makro-

<sup>1</sup> Vortrag vor der Zürcher Chemischen Gesellschaft, Zürich, 3. November 1954.

<sup>2</sup> 427. Mitteilung im Druck.

<sup>3</sup> H. STAUDINGER, *Organische Kolloidchemie*, 3. Auflage, Verlag Vieweg, Braunschweig 1950; *Makromolekulare Chemie und Biologie*, Verlag Wepf, Basel 1947.

<sup>4</sup> H. STAUDINGER, *Ber. deutsch. chem. Ges.* 59 (1926) 3019.

<sup>5</sup> C. NÄGELI, *Die Micellartheorie*, in *Ostwalds Klassiker der exakten Wissenschaften*, Nr. 227, Akademische Verlags-GmbH, Leipzig 1928.

<sup>6</sup> H. STAUDINGER und J. FRITSCH, *Helv. Chim. Acta* 5 (1922) 785.

molcküle» vorgeschlagen. Diese Auffassung wurde begründet durch Arbeiten über die Reduktion des Kautschuks, da dabei nicht – wie C. HARRIES und R. PUMMERER früher vermuteten – ein niedermolekularer destillierbarer Hydrokautschuk erhalten wird, sondern ein kolloidlöslicher gesättigter Paraffinkohlenwasserstoff. Weitere Untersuchungen über die Konstitution des Kautschuks mit W. WIDMER<sup>7</sup>, E. W. REUSS und E. GEIGER bestätigten diese Auffassung und führten zu dem Ergebnis, daß die Unbeständigkeit des Kautschuks und die seiner kolloiden Lösungen nicht auf einem Aufbau aus lockeren Micellen beruht, sondern auf die leichte Oxydation des Kautschukmoleküls an den Doppelbindungen zurückzuführen ist. Diese Folgerung ergibt sich dadurch, daß der Hydrokautschuk beständige kolloide Lösungen liefert. Die größere thermische Beständigkeit des Hydrokautschuks gegenüber Kautschuk wurde von A. RHEINER<sup>8</sup> auf die Allylgruppierung zurückgeführt, und zwar auf Grund von Untersuchungen über die thermische Beständigkeit des Dicyclopentadiens und seiner Reduktionsprodukte. Weitere Resultate lieferte die Bearbeitung der Polystyrole, die als Modell des Kautschuks betrachtet werden konnten, da diese glasartigen Massen von hochpolymeren Styrolen beim Erhitzen über 100°C elastisch werden. Die Lösungen dieser Polystyrole sind beständig, und es konnten so von S. WEHRLI und M. BRUNNER Zusammenhänge zwischen der Viskosität dieser Lösungen und dem Polymerisationsgrad studiert werden<sup>9</sup>.

Für die Arbeiten in der damaligen Periode war es besonders vorteilhaft, daß nicht nur eine Gruppe von makromolekularen Stoffen untersucht wurde, sondern daß die verschiedenartigsten Vertreter gleichzeitig zur Bearbeitung kamen. So wurde von M. LÜTHY<sup>10</sup> durch den acetolytischen Abbau der Polyoxymethylene nachgewiesen, daß dieselben aus langen Kettenmolekülen aufgebaut sind. Die gegen Natronlauge beständigen  $\gamma$ -Polyoxymethylene von F. AUERBACH und H. BARSCHALL wurden von H. JOHNER als Polyoxymethyldimethyläther erkannt.

Tab. 2. Formeln der Polyoxymethylene

$\text{HO}-\text{CH}_2-\text{O}-(\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{CH}_2-\text{OH}$
$\alpha$ -Polyoxymethylen; wird durch Alkali abgebaut
$\text{CH}_3\text{O}-\text{CH}_2-\text{O}-(\text{CH}_2-\text{O})_n-\text{CH}_2-\text{OCH}_3$
$\gamma$ -Polyoxymethylen; wird durch Alkali nicht abgebaut $n = 1-200$

<sup>7</sup> H. STAUDINGER und W. WIDMER, *Helv. Chim. Acta* 7 (1924) 842.

<sup>8</sup> H. STAUDINGER und A. RHEINER, *Helv. Chim. Acta* 7 (1924) 23.

<sup>9</sup> H. STAUDINGER, M. BRUNNER, K. FREY, P. GARBSCH, R. SIGNER und S. WEHRLI, *Ber. dtsh. chem. Ges.* 62 (1929) 241.

<sup>10</sup> H. STAUDINGER und M. LÜTHY, *Helv. Chim. Acta* 8 (1925) 41.

Vor allem von R. SIGNER wurde dieses Gebiet intensiv bearbeitet und dabei in der Polyoxymethylenfaser die erste vollsynthetische Faser erhalten<sup>11</sup>. Wenn bei diesen Untersuchungen lediglich der Abbau der Polyoxymethylene mit Benzoylchlorid studiert worden wäre, so hätte man dadurch einen Beleg für die Auffassung finden können, daß diese Polyoxymethylene sich durch Aggregation aus kleinen Molekülen bilden; denn bei der Einwirkung von Benzoylchlorid erhält man aus Polyoxymethylen das Dioxymethyldibenzoat, eine Beobachtung, die bisher nicht weiterbearbeitet wurde. Die auf Grund der Ergebnisse beim acetolytischen Abbau als lange Kettenmoleküle ausgewiesenen Polyoxymethylene wurden als Modell der Cellulose betrachtet, deren Konstitution in der gleichen Weise wie die der Polyoxymethylene durch acetolytischen Abbau von Cellulose-trimethyläther von K. FREY<sup>12</sup> aufgeklärt werden sollte. Diese Versuche führten zu keinem Ergebnis, da Cellulose-trimethyläther durch Umsetzung von Cellulosekalium mit Methyljodid nicht zu gewinnen waren.

Damals schienen zwei Gruppen von Polymeren zu existieren, deren Unterschiede in der Bildung und Löslichkeit aus Tab. 3 hervorgeht, worauf A. KRONSTEIN<sup>13</sup> hinwies.

Tab. 3. Arten der Polymerisation nach A. KRONSTEIN

		Beispiel
mesomorph mit Zwischenprodukten	Isokolloide	Styrol $\rightarrow$ Polystyrol
euthymorph ohne Zwischenprodukte	sofort unlösliche Polymere	Cyansäure $\rightarrow$ Cyamelid Vinylbromid $\rightarrow$ Polyvinylbromid

Die Polymerisation des Vinylbromids schien also scheinbar ganz anders zu verlaufen als die des Styrols. Deshalb wurde das Polyvinylbromid von M. BRUNNER<sup>14</sup> studiert. Durch Behandeln mit Zinkdimethyl wird dasselbe in einen höhermolekularen kolloidlöslichen Kohlenwasserstoff von der Zusammensetzung  $(\text{C}_{10}\text{H}_{18})_x$  übergeführt. Bei der Reduktion mit Zink wurde dagegen merkwürdigerweise nicht ein höhermolekulares Paraffin erhalten, sondern ein flüssiger Kohlenwasserstoff von der Zusammensetzung  $\text{C}_{18}\text{H}_{34}$ . Die Bildung dieses niedermolekularen Kohlenwasserstoffs hätte für einen Aufbau des Polyvinylbromids aus kleinen Grundmolekülen sprechen können. Später gelang dann die Reduktion des Polyvinylbromids mit Jodwasserstoff und Phosphor zu langkettigen Paraffinen<sup>14</sup>.

<sup>11</sup> H. STAUDINGER, H. JOHNER, R. SIGNER, G. MIE und J. HENGSTENBERG, *Z. physik. Chem.* 126 (1927) 425.

<sup>12</sup> H. STAUDINGER, K. FREY, R. SIGNER, W. STARCK und C. WIDMER, *Ber. dtsh. chem. Ges.* 63 (1930) 2308.

<sup>13</sup> A. KRONSTEIN, *Ber. dtsh. chem. Ges.* 35 (1902) 4150.

<sup>14</sup> H. STAUDINGER, M. BRUNNER und W. FEISST, *Helv. Chim. Acta* 13 (1930) 805.



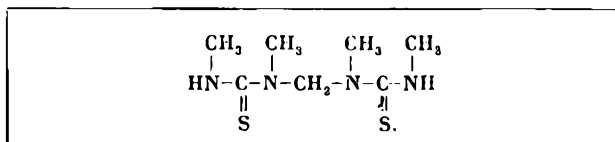


Bei dieser Kondensation von 1 Mol Thioharnstoff mit größeren Mengen Formaldehyd können auch Methylolgruppen mit den NH-Gruppen der Kette gebildet werden. Treten diese mit den NH-Gruppen von anderen Ketten in Reaktion, so entstehen vollständig unlösliche vernetzte Produkte. Die Gläser, die bei der Kondensation von Harnstoff bzw. Thioharnstoff mit mehreren Molekülen Formaldehyd erhalten werden, sind in allen Lösungsmitteln unlöslich, und es läßt sich deshalb über ihr Molekulargewicht nichts aussagen. Weiter gehen die löslichen Kondensate von Thioharnstoff und Formaldehyd häufig unter nicht genau definierbaren Bedingungen in solche unlöslichen Produkte über, die sich in der analytischen Zusammensetzung von den löslichen nicht unterscheiden. Wahrscheinlich bilden sich hier Verknüpfungen zwischen mehreren kurzen Ketten.

Analoge Untersuchungen wurden auch mit Harnstoff-Formaldehyd-Produkten durchgeführt. Diese sind in den wässrigen Lösungen von Lithiumjodid bzw. Lithiumbromid und in den wässrigen Lösungen von Magnesiumperchlorat löslich. Daß auch diese Produkte relativ niedere Kondensationsgrade haben, wurde durch Überführung von Methylolverbindungen in Methylätherderivate und Endgruppenbestimmung der letzteren bewiesen.

In den unlöslichen Kondensaten aus Harnstoff und Formaldehyd, ebenso in den daraus hergestellten Gläsern, können weitgehend vernetzte Produkte vorliegen, entsprechend den Vorschlägen von K. FREY und G. WIDMER<sup>19</sup>. Um die Bildung von seitenständigen Methylolgruppen zu vermeiden, die durch sekundäre Reaktion zu unlöslichen Produkten führen können, wurde die Kondensation von symmetrisch disubstituierten Harnstoffen von G. NIESSEN<sup>20</sup> untersucht. Aus Dimethylthioharnstoff bildet sich ein lösliches kristallisiertes Methylenderivat (Formel 5). Eine weitere Kondensation der endständigen NH-Gruppen mit Formaldehyd erfolgt auffallenderweise nicht.

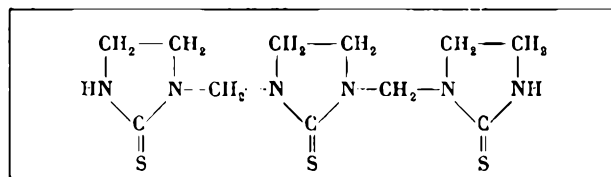
Formel 5. Kondensat aus Dimethylthioharnstoff und Formaldehyd



Überraschend waren die Resultate der Kondensation von Äthylthioharnstoff mit Formaldehyd, die bei Gegenwart von Säuren äußerlich ähnlich wie die von Thioharnstoff unter Ausscheidung eines pulverigen Niederschlages erfolgt. Dieses Kondensat ist vollkommen unlöslich, und zwar auch in den Lösungsmitteln für Thioharnstoffderivate, wie Dimethylformamid und Caprolactam. Nach der Analyse ist dieses Produkt ein Kondensat

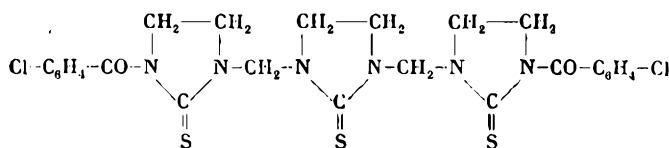
aus 3 Mol Äthylthioharnstoff und 2 Mol Formaldehyd folgender Konstitution:

Formel 6. Kondensat aus Äthylthioharnstoff und Formaldehyd



Daß dieses unlösliche amorphe Kondensationsprodukt entsprechend Formel 6 konstituiert ist, wurde durch Umsetzung der endständigen NH-Gruppen mit *p*-Chlorbenzoylchlorid bewiesen. Von dem löslichen Di-*p*-chlorbenzoylderivat konnte das Molekulargewicht kryoskopisch und nach der Endgruppenmethode bestimmt werden:

Tab. 7. Molekulargewichtsbestimmung von unlöslichen Äthylthioharnstoff-Formaldehyd-Kondensaten



	Molekulargewicht		
	gefunden	berechnet	
in Benzol	617	} 607	C <sub>23</sub> H <sub>24</sub> N <sub>6</sub> O <sub>2</sub> Cl <sub>2</sub> S <sub>3</sub> nach Analyse
in Caprolactam	590		
aus Cl-Endgruppen	619		

Die Vermutung, daß bei der Einwirkung von *p*-Chlorbenzoylchlorid und Pyridin auf das unlösliche Kondensat primär eine Spaltung desselben erfolgt, wurde dadurch widerlegt, daß das Di-*p*-chlorbenzoylderivat wieder zu dem unlöslichen Kondensat der Formel 6 verseift wurde und dieses von neuem in das lösliche Di-*p*-chlorbenzoylderivat übergeführt wurde. Es ist also auffallend, daß dieses relativ niedermolekulare Produkt amorph und vollkommen unlöslich ist. Man sieht daraus, daß aus diesen Eigenschaften nicht etwa ein Schluß auf ein besonders hohes Molekulargewicht der Stoffe gezogen werden kann.

Weiter ist bemerkenswert, daß hier die Möglichkeit zur Bildung längerer Kettenmoleküle durch weitere Kondensation mit Formaldehyd und Äthylthioharnstoff nicht ausgenutzt wird. Durch Variation der Versuchsbedingungen gelang es lediglich, ein unlösliches Kondensat zu erhalten, bei dem etwa 5 Thioharnstoffreste mit etwa 4 Mol Formaldehyd kondensiert sind. Die Kondensation von Äthylthioharnstoff mit Formaldehyd verläuft auch hier über unbeständige Methylolprodukte.

<sup>19</sup> Vgl. die zusammenfassenden Darstellungen von G. WIDMER und K. FREY in R. HOUWINK, *Elastomers and Plastomers*, Bd. II (1949), S. 95.

<sup>20</sup> H. STAUDINGER und G. NIESSEN, *Makromol. Chem.* 15 (1955) 75.



## III

Trotz der im vorigen Abschnitt mitgeteilten Ergebnisse existiert eine große Reihe vollsynthetischer makromolekularer Produkte und makromolekularer Naturprodukte. Der Beweis für die Existenz derselben ist, wie im ersten Abschnitt schon kurz angeführt, durch das Studium von polymerhomologen Reihen und vor allem durch polymeranaloge Umsetzungen nach den klassischen Methoden der organischen Chemie geführt worden. Für die in der folgenden Tabelle aufgeführten Verbindungen ist so der makromolekulare Bau gesichert (Tab. 8).

Tab. 8. Einteilung der makromolekularen Stoffe

<b>I. Naturstoffe:</b>	
1. Kohlenwasserstoffe:	Kautschuk, Guttapercha, Balata
2. Polysaccharide:	Cellulose, Amylose, Amylopektin, Glykogene, Mannane, Pektine, Polysaccharide, Chitine
3. Polynukleotide (Nucleinsäuren)	
4. Proteine und Enzyme	
5. Lignine und Gerbstoffe (Übergang von den niedermolekularen zu den makromolekularen Stoffen)	
<b>II. Umwandlungsprodukte von Naturstoffen:</b>	
	vulkanisierter Kautschuk, Zellwolle, Cellophan, Cellulosenitrat, Leder, Lanital, Galalith usw.
<b>III. Synthetische Stoffe: Kunststoffe (Polyplaste), entstanden durch:</b>	
Polymerisation:	Buna, Polystyrol, Polymethacrylester;
Polykondensation:	Bakelit, Nylon, Perlon, Terylen
Polyaddition:	Polyurethan

Eine Reihe von makromolekularen Produkten enthalten Makromoleküle überraschender Größe, in denen Tausende von Grundmolekülen zu langen Ketten- oder Kugelmolekülen nach den Gesetzen der KEKULÉschen Strukturlehre gebunden sind. Wenn auch jetzt nachgewiesen ist, daß die Kolloidteilchen in diesen Lösungen Makromoleküle sind, so ist doch die genaue Konstitution der makromolekularen Natur- und vollsynthetischen Produkte noch recht wenig bekannt. Wenn an die Konstitutionsaufklärung die strengen Maßstäbe angelegt werden, die ein Forscher auf dem Gebiet der niedermolekularen Chemie an seine Verbindungen stellt, so läßt sich von allen makromolekularen Naturprodukten, im Gegensatz zu den meisten niedermolekularen Naturprodukten, weder das Molekulargewicht genau angeben, noch ist ihre Konstitution in allen Einzelheiten bekannt, da eine übersichtliche schrittweise Synthese dieser Naturprodukte bis jetzt nicht durchgeführt werden kann. Das bestuntersuchte makromolekulare Naturprodukt, das Kettenmolekül der Cellulose, kann z. B. nach G. V. SCHULZ und E. HUSEMANN<sup>25</sup> nach je 500 Glucoseresiden anders-

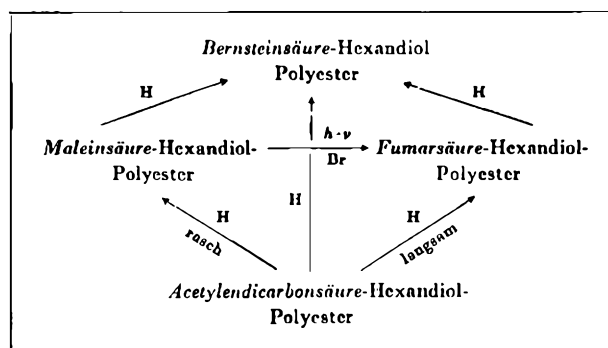
<sup>25</sup> G. V. SCHULZ und E. HUSEMANN, *Z. physik. Chem. (B)* 52 (1942) 23.

artige, schneller spaltende Gruppen in der Kette enthalten, ein Ergebnis, das bei seiner Bedeutung heute vielfach diskutiert wird.

Bei der Konstitutionsaufklärung von vollsynthetischen makromolekularen Verbindungen besteht der Vorteil, daß dieselben aus Grundmolekülen bekannter Konstitution hergestellt werden können. Bei der Kettenpolymerisation bilden sich nach neuen Untersuchungen von MELVILLE<sup>26</sup> vielfach langgestreckte Moleküle mit Seitenketten dadurch, daß Radikale den gebildeten Kettenmolekülen oder Makroradikalen Wasserstoffatome entreißen, wodurch Anlaß zu Verzweigungen gegeben ist. Die von der Technik beobachteten Unterschiede bei der Verarbeitung von Polyvinylchloriden gleichen Durchschnittspolymerisationsgrades dürften auf solche Verschiedenheiten in der Konstitution zurückzuführen sein.

Lediglich bei den von CAROTHERS<sup>22</sup> untersuchten Polykondensationsprodukten können solche unübersichtlichen Nebenreaktionen vermieden werden. So ist der Aufbau der Polykondensate vielfach auch in bezug auf die Endgruppen genau bekannt. CAROTHERS erhielt allerdings bei seinen Arbeiten nur Polyester und Polyamide bis zu einem Molekulargewicht von 30 000, und diese Produkte hatten infolge der hohen Kondensations-temperatur sekundäre Verkrackungen erlitten. Darum ist es wertvoll, daß H. BATZER und Mitarbeiter<sup>27</sup> im Freiburger Laboratorium unter schonenden Versuchsbedingungen mit geeigneten Katalysatoren Polyester genau bekannter Konstitution von einem Molekulargewicht von 100 000 und mehr erhalten haben. Dies wird dadurch bewiesen, daß bei der Kondensation von Maleinsäure, Fumarsäure und Acetylendicarbonsäure mit Hexandiol Polyester entstehen, die nach der Hydrierung Bernsteinsäurehexandiolpolyester liefern, die die gleichen Eigenschaften haben wie die aus Bernsteinsäure und Hexandiol direkt gewonnenen Produkte.

Tab. 9. Polymeranaloge Umsetzungen an ungesättigten Polyestern (nach H. BATZER)



<sup>26</sup> H. W. MELVILLE, G. M. GUZMAN und I. C. BEVINGTON, *Nature* 170 (1952) 1026; dieselben, *Proc. Roy. Soc.* 221 (1951) 437, 453.

<sup>27</sup> H. BATZER, *Makromol. Chem.* 5 (1950) 5; ders. und B. MOHR, *Makromol. Chem.* 8 (1952) 217; ders. und G. WEISSENERGER, ebenda 12 (1954) 1; ders. und G. FRITZ, ebenda 14 (1954) 179; F. LOMBARD, ebenda 8 (1952) 187; H. BATZER, *Angew. Chem.* 66 (1954) 513.

Natürlich sind diese Produkte polymolekular, aber durch sorgfältige Fraktionierung lassen sich hier Fraktionen von Polyestern gewinnen, die aus einem Gemisch von Polyestern nicht sehr verschiedenen Molekulargewichts bestehen. Derartig gut fraktionierte Polyester sollten zur Überprüfung der nach den verschiedenen Methoden erhaltenen Molekulargewichte, z. B. nach der osmotischen, der Lichtstreuungs- und viskosimetrischen Methode, herangezogen werden, um die Genauigkeit der einzelnen Methoden kennenzulernen. Bei sorgfältig hergestellten Fraktionen sollten die Unterschiede zwischen Gewichts- und Zahlenmittel verschwinden. Ferner bieten diese ein geeignetes Ausgangsmaterial zum Studium der Änderungen der physikalischen Eigenschaften der festen Stoffe mit dem Durchschnittspolymerisationsgrad. Bei Polyestern bekannter Konstitution sollten reproduzier-

bare Resultate erhalten werden, die bei den eigentlichen Polymerisationsprodukten, wie den Polystyrolen, die in den letzten Jahren vielfach als Untersuchungsobjekt benutzt wurden, nicht in dem Maße erwartet werden können, da die genaue Konstitution der Polystyrole noch nicht feststeht.

Trotz der großen Fortschritte der makromolekularen Chemie in Wissenschaft und Technik ist also die Konstitutionsaufklärung der meisten makromolekularen Naturprodukte und vieler vollsynthetischer makromolekularer Stoffe noch in den Anfängen; da infolge der Größe der Makromoleküle die genaue Konstitutionsaufklärung der Ausarbeitung weiterer neuer Methoden bedarf, stehen Wissenschaft und Technik vor mannigfaltigen und bedeutenden Aufgaben.