

Werk- und Effektstoffe

Chimia 51 (1997) 76–81
© Neue Schweizerische Chemische Gesellschaft
ISSN 0009–4293

Von der Alchimie zu modernen Werk- und Effektstoffen

Rolf Mülhaupt*

Freiburger Materialforschungszentrum der Albert-Ludwigs-Universität Freiburg

Vortrag, gehalten anlässlich der Verleihung des Forschungspreises der Gödecke AG am 15. November 1996 im Historischen Kaufhaus in Freiburg i.Br.

Abstract. Chemistry has emerged from the dark ages of alchemy as modern science which is claiming a major part in securing our high quality of life and promoting development of future technologies, ranging from aerospace and automotive industries to microelectronics and biomedical applications. This remarkable progress is highlighted by selected advances, e.g., *Berthold Schwarz* and his black powder development, *Justus Liebig's* fertilizers, and finally *Hermann Staudinger's* concept of modern macromolecular chemistry with far-reaching consequences for the development of man-made fibers, rubbers, and plastics. Today research is aimed at the development of 'smart materials' which are capable of changing properties, e.g., viscosity of dispersions, as a function of sensor signal intensity.

Werkstoffe und Gesellschaft

Seit Anbeginn der menschlichen Zivilisationen stehen bahnbrechende Innovationen bei der Werkstoffentwicklung auch für den gesellschaftlichen Wandel. So werden Epochen der Geschichte nach Werkstoffen wie Stein, Bronze und Eisen benannt. Erst durch Fortschritte in der Metallurgie und durch die Entwicklung von in der Natur nicht vorkommenden Stoffen – den Kunststoffen – gelang es, die Sicherung der Grundbedürfnisse nach Nahrung, Kleidung, Wohnung, Gesundheit, Sicherheit und Kommunikation zu gewährleisten und unsere Lebensqualität entscheidend zu verbessern. Unsere hohen Ansprüche an den Lebenskomfort, z.B. Mobilität, Information, Freizeitgestaltung

und Selbstverwirklichung, wären ohne moderne Werkstoffe und Fortschritte in den Materialwissenschaften nicht zu erfüllen. Bei der Entwicklung von Werk- und Wirkstoffen spielt die Chemie seit Jahrtausenden eine herausragende Rolle. Seit der Mensch das Feuer beherrscht, um sich zu wärmen, zu kochen, zu backen, Bier zu brauen, Farbstoffe und Arzneistoffe aus Pflanzen zu extrahieren und Stahl und Zement aus Mineralien zu gewinnen, befassen sich Menschen mit chemischen Vorgängen. Alles, was uns umgibt – vom Fels bis zur belebten Natur – existiert nur dank komplexer chemischer Reaktionen.

In unserem Jahrhundert hat die Chemie eine explosionsartige Entwicklung durchgemacht. Kannte man Mitte des vorigen Jahrhunderts nur einige hundert chemische Substanzen, so sind heute in den *Chemical Abstracts* über 13 Mio. chemische Verbindungen verzeichnet und nummeriert. Die von *Chemical Abstracts* mit der Nummer 13.000.000 bezeichnete Verbindung wurde von *Norbert Steinhauser* im Rahmen seiner Dissertation im Freiburger Materialforschungszentrum synthetisiert. Keine andere Wissenschaft reicht

in ihren Anfängen so weit zurück und hat so viele Um- und Irrwege beschritten, um zu ihrem modernen wissenschaftlichen Gedankengebäude zu gelangen. Im folgenden soll an Meilensteinen aus der Geschichte der Chemie illustriert werden, wie sich die Chemie aus der Mythologie zur modernen Wissenschaft entwickelt hat, und wie sie heute der Materialforschung entscheidende Impulse vermittelt.

Alchimie und Mystik

Bereits vor 2500 Jahren postulierten griechische Philosophen wie *Leukipp von Milet* und sein Schüler *Demokrit*, dass die Welt aus leerem Raum und Stoffen, d.h. aus kleinen, unteilbaren Teilchen – den Atomen (griech. $\alpha\tau\omega\mu\omega\xi$ = unteilbar), besteht. Nach dieser modern anmutenden Theorie unterscheiden sich Atome lediglich in ihrer Gestalt und können sich auf vielfältige Art und Weise zusammenlagern und durch Variation ihrer Gestalt und Anordnung alle bekannten Stoffe aufbauen. *Aristoteles* lehnte diese materialistische Betrachtungsweise vehement ab und wies im dritten vorchristlichen Jahrhundert der Chemie den Irrweg mit seiner Elementlehre und Mischungstheorie. Nach *Aristoteles* sind die vier nicht korpuskularen Elemente Erde, Wasser, Luft und Feuer verschiedenartige Zustandsformen derselben 'prima materia' – der Grundmaterie (Fig. 1). Alle Elemente können nach *Aristoteles* von der Natur ineinander umgewandelt werden und so alle Stoffe unserer Welt aufbauen. So wie Gott in den Mysterien müssen die mineralischen Stoffe leiden, sterben und zu neuen Daseinsformen aufsteigen. Symbolisiert wird dieser ewige Zyklus der Materie in der alchimistischen Literatur durch den Drachen – den 'Ouroboros', der seinen eignen Schwanz verschlingt und dabei neu gebärt. Die Wandlung der Elemente kann mit dem Stein der Weisen herbeigeführt werden, nach dem die Gelehrten früher intensiv suchten.

Diese Transmutation der Elemente war ein Irrweg, der jahrhundertlang bis Ende des 19. Jahrhunderts das Denken in der Chemie bestimmte. Durch die Suche nach Transmutationsverfahren für die Goldherstellung geriet die Chemie im Mittelalter in die gefährliche Nähe der Scharlatanerie. Da der archaische Mensch die Vor-

*Korrespondenz: Prof. Dr. R. Mülhaupt
Albert-Ludwigs-Universität
Freiburger Materialforschungszentrum
Stefan-Meier-Strasse 21
D-79104 Freiburg

stellung hatte, dass Mineralien und Metalle im Schoß der Erdmutter gezeugt werden und dort heranwachsen, besass die Alchimie – abgeleitet vom arabischen Begriff 'chymia' für Metallguss – eine stark mystische Komponente. Sowohl der europäische und chinesische Alchimist als auch der alchimiekundige indische Yogi waren überzeugt, dass nur durch strenge Einhaltung kultischer Riten, Berücksichtigung der Konstellation der Gestirne sowie durch körperliche und seelische Reinigung Transmutation ermöglicht wurde. Im alten China in der 2. Han-Dynastie sollte das Trinken einer Goldtinktur, das Verzehren von Zinnober oder das regelmässige Essen aus Zinnobergefässen den Alchimisten den Göttern gleich unsterblich machen. Auf dem Gebiet der Alchimie vollbrachten arabische Gelehrte historische Leistungen: sie übersetzten eine Vielzahl von griechischen, syrischen und persischen alchimistischen Schriften und entwickelten ein Lehrgebäude, das Methoden, Verfahren, Stoffkunde und Geräte der Alchimie beinhaltet. Noch im 8. Jahrhundert lehrten die arabischen Alchimisten, dass alle Metalle Quecksilber und Schwefel enthalten. So sollte Gold aus viel Quecksilber und wenig Schwefel, Kupfer dagegen aus beiden Elementen zu gleichen Teilen bestehen.

Die mystische Komponente der Alchimie machte aus Handwerkern wie Schmieden und Metallgiessern Sendboten von Geheimreligionen und aus Mönchen Chemiker. In der Tat waren im 14. Jahrhundert die Mehrzahl der europäischen Alchimisten Mönche, die über Arabien Zugang zu alten alchimistischen Kenntnissen erlangten. Klosterapotheken und Werkstätten der Franziskaner waren die ersten funktionsfähigen chemischen Laboratorien, die sich sehr intensiv mit der Erforschung des Schiesspulvers – einer chinesischen Erfindung – befassten. Der Freiburger Franziskaner-Mönch *Berthold Schwarz* (Fig. 2), vielfach zu unrecht Erfinder des Schwarzpulvers genannt, erkannte um 1380, dass die Körnung des Schiesspulvers und der Druck der Pulvergase sehr wesentlich für die Wirkung des Geschützpulvers waren. Er entwickelte die berühmte oberrheinische Steinbüchse, die sich durch ihre erheblich verbesserte Treffsicherheit auszeichnete. Man kann *Berthold Schwarz* als Pionier der Materialwissenschaftler im alemannischen Dreiländereck von Schweiz, Frankreich und Deutschland werten.

Die Geschichte der Alchimie im Mittelalter wurde geprägt von Feudalherren, die auf der Suche nach Geldquellen für aufwendige Hofhaltung und Kriegsfüh-

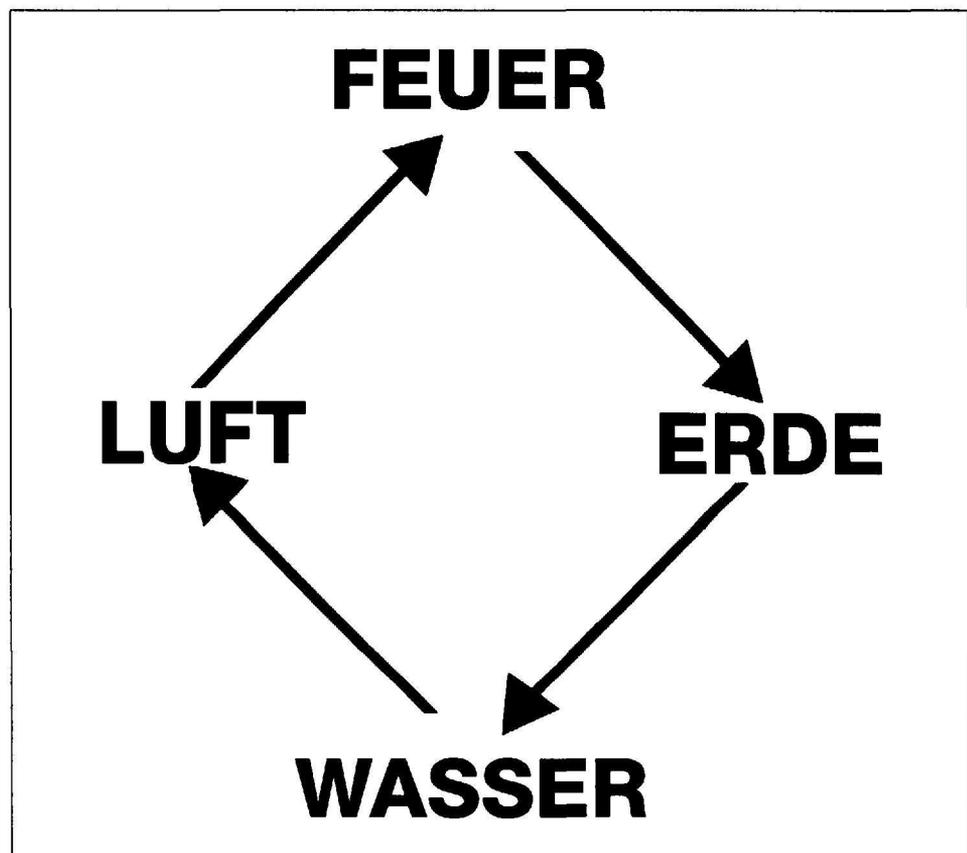


Fig. 1. Alchimie: Ewiger Zyklus und Einheit der Materie



Fig. 2. Bild der Tafel am Freiburger Denkmal des Franziskaner Mönchs und Alchimisten Berthold Schwarz. Sein Denkmal am Freiburger Rathausplatz trägt auf der Rückseite die Inschrift: 'Berthold Schwarz, Franziskaner, Ordensdoktor, Alchimist und Erfinder des Schiesspulvers, errichtet im Jahr 1853 zum Gedächtnis der fünften Säkularfeier'.

rung Alchimisten förderten und erwartungsfroh leichte Beute von Betrügnern wurden. Nicht selten wurden Alchimisten von ihren enttäuschten Auftraggebern hingerichtet. So nimmt man an, dass auch *Berthold Schwarz* auf dem Scheiterhaufen endete als er einem Ruf des Kaisers nach Prag folgte, dessen hohe Erwartun-

gen jedoch nicht erfüllen konnte. Die Suche nach Gold führte auch zu bemerkenswerten Materialinnovationen. Der junge Apothekergehilfe *JF Böttger* wurde nach seinen erfolglosen Gold-Transmutationsversuchen von *August dem Starken* in Sachsen inhaftiert und fand nach längeren Misserfolgen 1710 ein Verfahren für die

Herstellung von chinesischem Porzellan – Grundlage für das weltberühmte Meissener Porzellan. Auf der Suche nach der Herstellung des Steins der Weisen fand der Hamburger *Henning Brand* 1669 durch Destillation von verfaultem Menschenurin den Phosphor, dessen Dämpfe zu einer leuchtenden Masse kondensierten.

Die moderne Chemie bildet sich heraus

Bis Ende des 18. Jahrhundert wirkten Alchimisten im Verborgenen, um unbemerkt von der Bevölkerung ihren geheimen Künsten nachzugehen. Stets besorgt, sich Spionen zu offenbaren, entwickelten sie geheime chemische Zeichensprachen (Fig. 3), deren Bedeutung nur mit Mühe von Eingeweihten zu entschlüsseln war. Wie *Otto Krätz* treffend schreibt, 'gefielen sie sich darin, in Figuren, Symbolen und Analogien zu reden, damit sie nur von Besonnenen, Frommen und Erleuchteten verstanden würden'. Das besondere Verdienst von *Antoine de Lavoisier* war die Erkenntnis, dass bei der Herstellung von Stoffen die Mengenverhältnisse ('Stöchiometrie') der Komponenten bei chemischen Reaktionen genau einzuhalten sind. Dies führte zur Neubestimmung der chemischen Grundbegriffe 'Element' und 'Verbindung', die *Dalton* und *Avogadro* auf eine atomistische Struktur der Materie zurückführten. Leider wurde *Lavoisier* als Opfer der Französischen Revolution 1794 in Paris mit der Guillotine hingerichtet. Seine Tätigkeit als wohlhabender Generalsteuerpächter – nicht als Chemiker – hatte die Aufmerksamkeit der Revolutionäre erregt. Nach der überlieferten, berühmten Anekdote hatte *Lavoisier* das Revolutionstribunal gebeten, für fünfzehn Tage in sein Laboratorium zurückkehren zu dürfen, um

vor seiner Hichrichtung überaus wichtige Versuche zu vollenden, an denen er seit Jahren gearbeitet hatte. Dieses Ansinnen hatte *Confinal*, Präsident des Tribunals, mit den denkwürdigen Worten zurückgewiesen: 'Die Republik braucht weder Gelehrte noch Chemiker'.

Nach richtungsweisenden Fortschritten von Gelehrten wie *Lavoisier*, *Avogadro*, *Dalton*, *Berzelius*, *Wöhler*, *Erlenmeyer* und *Liebig* war es *Kekulé*, der definitiv die Grundlagen für die moderne Strukturchemie legte, als er 1858 seine berühmte Arbeit 'Über die Konstitution und die Metamorphose der chemischen Verbindungen und über die chemische Natur des Kohlenstoffes' veröffentlichte. Nach *Kekulé* ordnen sich Atome in einem Molekül zu einer definierten Struktur, 'so dass kein Chaos oder gar freie Beweglichkeit herrsche'. Er baute auch die ersten Strukturmodelle und verwendete dazu Stricknadeln, mit denen er Wollknäuel – Symbole für Atome – verknüpfte. *Kekulé's* Schüler *J.H. van't Hoff* – damals arbeitsloser Junglehrer und später der erste *Nobel*-Preisträger – entwickelte das Tetraedermodell des Kohlenstoffatoms, nach dem sich die vier Bindungspartner des Kohlenstoffatoms in den Ecken eines Tetraeders anordneten. Die genaue Definition von Molekül und Atom verdanken wir jedoch *Cannizzaro* – einem sizilianischen Revolutionär und 1848/49 kurzfristig Minister für Munitionsbeschaffung, der nach Niederschlagung der Revolution im Pariser Exil viel Zeit fand, grundlegende Betrachtungen über *Avogadro's* Arbeiten anzustellen, und nach *Garibaldi's* Sieg seit 1870 eine Professur an der Universität Rom innehatte. Mit der Einführung des Periodischen Systems der chemischen Elemente von *L. Meyer* und *D.I. Mendeleev* eröffnete sich für die Chemie in der zweiten Hälfte des 19. Jahrhunderts endlich der Ausweg aus dem Labyrinth der Alchimie. Die moderne Atomtheorie und Quantenmechanik des 20. Jahrhunderts besiegelte endgültig den Untergang alchimistischen Denkens. Das neue theoretische Grundgerüst der Chemie erwies sich als tragfähig und ermöglichte die Entschlüsselung der Baupläne sowohl von natürlichen als auch synthetischen Materialien.

Von Ersatzstoffen zu modernen Werk- und Effektstoffen

Mit dem Aufstieg der Chemie und der chemischen Industrie im 19. Jahrhundert, der Industrialisierung und dem Bevölkerungswachstum ist ein deutlicher Gesinnungswandel in der Chemie verbunden,

die sich jetzt von der Goldherstellung abwendet, um dringende Probleme, z.B. Steigerung der Ernteerträge, Konservierung von Nahrungsmitteln, Verbesserung der medizinischen Versorgung durch neue Arzneistoffe und Bereitstellung von neuen Werkstoffen anzugehen. Die neue Vision der Chemie wird um 1816 treffend vom Erlanger Professor *K.W.G. Kastner* formuliert: 'Es ist die vornehmste Aufgabe der Naturwissenschaften, insbesondere der Chemie, die Gewerbe zu fördern, den Wohlstand der Nation zu heben, den Bürger zu nähren und zu kleiden. Es ziemt dem Wissenschaftler, sich um die Hebung der Gewerbe zu kümmern und der nationalen Wohlfahrt zu dienen.' Sein weltberühmter Schüler *Justus Liebig* liess diesen markanten Worten Taten folgen. Mit seinen neuen Methoden der Elementaranalyse konnte er die Fruchtbarkeit von Böden und die Wirkung von Düngemitteln beurteilen. Diese Grundlagenforschung führte zur Entwicklung von *Liebig's* Patentkünstdünger. Schon damals wies *Liebig* darauf hin, dass lösliche Düngemittel in das Grundwasser gelangen können. Weitere kommerzielle Erfolge waren *Liebig's* Fleischextrakt, *Liebig's* Suppen für Kinder und Kranke sowie Backpulver, während *Liebig's* Suche nach einem löslichen Kaffee-Extrakt damals der Erfolg versagt blieb. In diese Zeit fällt auch die Entwicklung von Margarine und von *Julius Maggi's* Produkten, dessen damals eingeführte Maggi-Flasche noch heute im Handel üblich ist. Wichtige Wachstumsbranchen für die rasch aufblühende industriell genutzte Chemie waren damals Nahrungs- und Düngemittel, *Nobels* Sprengstoffe, pharmazeutische Wirkstoffe wie z.B. Aspirin und insbesondere die Teerchemie und die aus ihr abgeleiteten Farbstoffe.

Neben Ersatzstoffen ('Surrogaten') für Fleisch und Butter benötigte die Textilindustrie synthetische Ersatzstoffe für Seide, da die Produktion der Seidenraupen den Bedarf der rasch anwachsenden Bevölkerung in den industriellen Ballungszentren nicht mehr decken konnten. Nachdem der Basler Chemieprofessor *C.F. Schönbein* 1846 die 'Nitrierung' von Zellstoff (Cellulose) entdeckte, das zunächst als rauchloses Schießpulver militärische Anwendung fand, eröffnete sich der Zugang zu den ersten halbsynthetischen Kunststoffen. Weichgemacht mit Campher wurde Nitrocellulose (bekannt als *Celluloid*[®]) als – im Unterschied zur Cellulose – aus Lösung und Schmelze verarbeitbarer Werkstoff von *J.W. Hyatt* 1870 kommerzialisiert. Das *Celluloid*[®] fand als künstliches Elfenbein Einsatz und hat tausenden Elefanten das Leben gerettet. Bei



Fig. 3. Zeichensprache der Alchimie (abgedruckt mit Genehmigung der Akademischen Druck- und Verlagsanstalt Graz [4])

der Textilindustrie verhinderte jedoch die noch immer unverkennbare explosive Natur, kenntlich durch Verpuffen in Gegenwart von Feuer, den erfolgreichen Einsatz von Nitrocellulose als Kunstseide. Erst mit der Jahrhundertwende, zu Beginn des 20. Jahrhunderts, konnten mit Regeneratcellulose und Celluloseacetaten leistungsfähige seidenähnliche Chemiefasern als Ersatzstoffe für Naturfasern bereitgestellt werden. Die Suche nach Stoffen für elektrische Isolatoren – wichtige Komponente der damals im Entstehen befindlichen Elektrotechnik und der Elektrifizierung – führte 1907 zur Entwicklung des ersten vollsynthetischen Kunststoffes aus Phenol und Formaldehyd, bekannt als *Bakelite*[®], von *Leo H. Baekeland*. In der Zeit der beiden Weltkriege wurde intensiv nach Ersatzstoffen für Naturkautschuk gesucht, der aus dem Saft der Gummibäume in Malaysia und Brasilien gewonnen wurde und während der Seeblockade nicht mehr überall frei verfügbar war.

So entstand zu Beginn unseres Jahrhunderts jene Werkstoffklasse der Kunststoffe, die in ihrer Vielseitigkeit von keinem anderen Werkstoff übertroffen werden. Als Initialzündung für die moderne Kunststoffindustrie wirkten die Arbeiten des Chemieprofessors *Hermann Staudinger* von 1912 bis 1926 an der Eidgenössischen Technischen Hochschule in Zürich und anschliessend an der *Albert-Ludwigs-Universität Freiburg i.Br.* *Hermann Staudinger* erkannte, dass sowohl biologische Materialien, z.B. Eiweiss, Baumwolle, Seide, Naturkautschuk, als auch synthetische Kunststoffe, z.B. Phenolharze und Aminoplaste, aus riesigen Molekülen – von ihm Makromoleküle (von griech. $\mu\alpha\kappa\rho\omega\sigma$ = gross) genannt – bestehen, die ihre physikalische Deutung durch den Physikochemiker *Werner Kuhn* und sein Knäuel-Modell fadenförmiger Moleküle ab 1939 an der Universität Basel erhielten. Durch Verknüpfen von kleinen Molekülbausteinen, den sogenannten Monomeren, entstehen – wie in *Fig. 4* rechts dargestellt – Makromoleküle, wo Abfolge, Typ und Zahl der Molekülbausteine eigenschaftsbestimmend wirken. *Staudinger* setzte sich gegen die damals gängige Lehrmeinung durch, wonach sich kleine Moleküle – illustriert in *Fig. 4*, links, für Seifenmoleküle – zu grösseren losen Aggregaten zusammenlagern, und erbrachte den experimentellen Beweis, dass sich Makromoleküle durch kovalentes Verknüpfen von kleinen Molekülen – vergleichbar zu den auf eine Schnur aufgezugene Perlen einer Perlenkette – aufbauen lassen. Agglomeration von kleinen Molekülen wurde von *Graham* 1861 für Leime (griech.

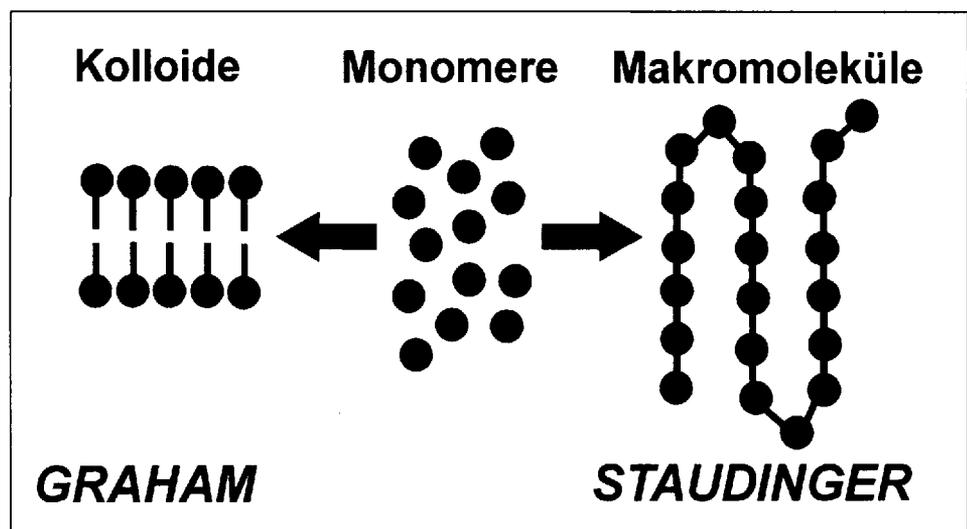


Fig. 4. Kolloide und Makromoleküle

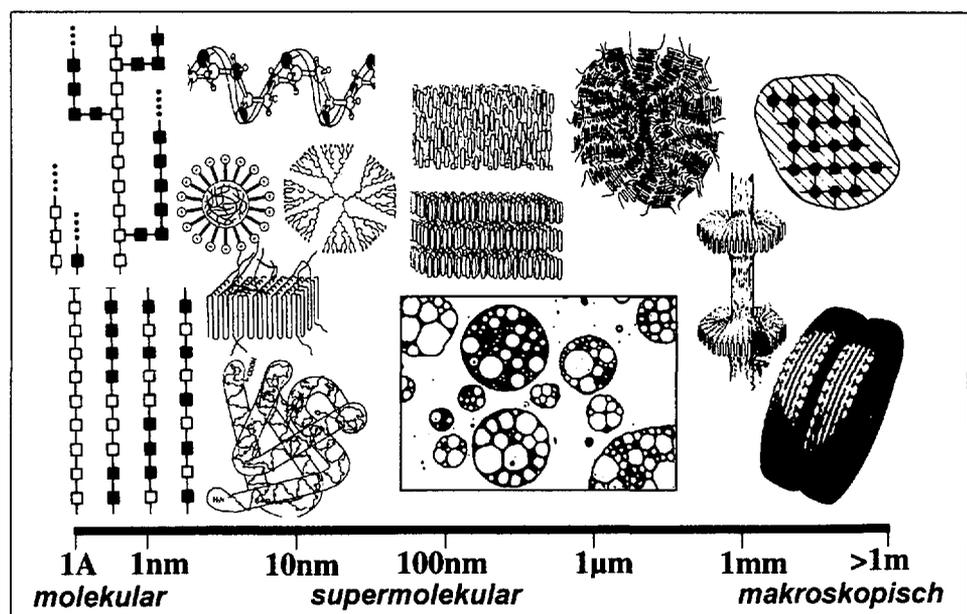


Fig. 5. Von der molekularen zur supermolekularen Architektur von Makromolekülen (abgedruckt mit Genehmigung des Hoppenstedt-Verlags [13])

$\kappa\omega\lambda\lambda\alpha$ =Leim) beobachtet und ist Grundlage der Kolloidchemie. Noch in den zwanziger Jahren – zu lesen in *Staudingers* Arbeitserinnerungen – sagte der Freiburger Nobel-Preisträger *H. Wieland* zu *Hermann Staudinger*: ‘Lieber Herr Kollege, lassen sie doch die Vorstellung mit den grossen Molekülen, organische Moleküle mit einem Molekulargewicht über 5000 gibt es nicht. Reinigen Sie Ihre Produkte, wie z.B. den Kautschuk, dann werden diese kristallisieren und sich als niedermolekular erweisen.’ Für seine bahnbrechenden Arbeiten und die Begründung der Makromolekularen Chemie wurde *Hermann Staudinger* 1953 mit dem Nobel-Preis ausgezeichnet.

Makromoleküle können heute anwendungsspezifisch massgeschneidert werden und sind in fast allen Lebensbereichen

anzutreffen. Je nach Architektur sind diese Materialien hart wie Stahl oder elastisch wie Kautschuk, durchlässig oder undurchlässig, leitend oder isolierend, gegen Abbau stabil oder thermisch wie auch biologisch abbaubar. Durch ihre geringe Dichte bei gleichzeitig hohen Beständigkeiten gegen mechanische Beanspruchung eignen sich Kunststoffe als Leichtbauwerkstoffe, und sie helfen im Verkehr und bei der Luft- und Raumfahrt Gewicht und Treibstoff einzusparen. Die moderne Makromolekulare Chemie ist in der Lage, sowohl die molekularen Architekturen durch Verknüpfung der Molekülbausteine als auch die Ausbildung von Superstrukturen im Nano- und Mikrometer-Bereich zu steuern. Illustriert ist diese bemerkenswerte Strukturvielfalt der makromolekularen Materialien in *Fig. 5*. In

der Regel sind Makromoleküle nur wenige 1/10.000 mm gross. Werden Makromoleküle jedoch vernetzt, wie z.B. bei der Vulkanisation des Gummis, so entsteht ein einzelnes Makromolekül, dessen Dimension der Form des Autoreifens entspricht und das so ohne mikroskopische Hilfsmittel mit dem Auge wahrnehmbar ist.

Fortschritte in der modernen Makromolekularen Chemie werden besonders bei den Standardkunststoffen deutlich. Noch Ende der fünfziger Jahre verursachte die Produktion von 1 t Polypropylen bis zu 200 kg Deponie-Abfall in Form von

Wachsen und Schwermetallrückständen. Mit den modernen Verfahren der achtziger Jahre, z.B. dem Gasphasenverfahren der BASF AG, können mit 1 g Katalysator rund 40 t Polypropylen ohne zu deponierende Nebenprodukte und Lösungsmittelausscheidungen hergestellt werden. Bei der Polymerisation von petrochemischen Bausteinen und nachfolgender Formgebung aus der Schmelze ist der Energiebedarf sehr gering, und der Energieinhalt des Polypropylens ist mit dem des Erdöls vergleichbar. Als 'schnittfestes Erdöl' kann Polypropylen werkstofflich, rohstofflich

oder als Erdölersatz energetisch verwertet werden. Heute ist das recyclingfreundliche Polypropylen das Material der Wahl in der Autoindustrie – sein Einsatzspektrum reicht von Stossfängern über die textile Innenverkleidung bis zu Batteriegehäusen. Wie kein anderes Material erfüllt Polypropylen die Forderungen nach nachhaltigen Entwicklungen ('sustainable development') und effizienter Schonung von Ressourcen für zukünftige Generationen.

Neben dem Ersatz von Metall, Holz und Glas bei Werkstoffanwendungen können mit Kunststoffen spezielle Effekte erzielt werden. Dies kann am Beispiel von Kunststoffdispersionen verdeutlicht werden. Kombiniert man Makromolekulare und Kolloidchemie, gelingt es, Kunststoffe in Gegenwart von Seifen als kleine Kunststoffteilchen mit weniger als 1/1000 mm Durchmesser in Wasser zu dispergieren ohne dass sich diese Teilchen beim Stehenlassen absetzen. Verdunstet das Wasser, so verfilmen die Kunststoffe und bilden eine korrosionsbeständige Kunststoffschicht. Über die Beschaffenheit dieser Dispersionen können Ablagen und Tröpfchenbildung beim Auftragen von Farben verhindert werden. Kunststoffdispersionen als Farben und Lacke schützen metallische Werkstoffe gegen Korrosion und verhindern jährlich volkswirtschaftliche Schäden in Milliardenhöhe.

Heute werden Kunststoffe massgeschneidert, um Eigenschaften Umweltveränderungen anzupassen. Beispiele für 'intelligente' Kunststoffe sind Kunststoffdispersionen (elektroviskose Fluide) von der Bayer AG, bei denen sich durch Einwirkung eines elektromagnetischen Feldes dispergierte Kunststoffteilchen zusammenlagern und so – je nach angelegter Spannung bzw. Signal seines Sensors – die Viskosität verändert (vgl. Fig. 6). Auf diese Weise könnte das Dämpfungsverhalten von Autos der Beschaffenheit des Strassenbelages angepasst werden. Bei rauher Fahrbahn wird die Dämpfung verstärkt und so der Fahrkomfort erheblich gesteigert. Dies ist nur ein Beispiel für neue Werkstoffklassen – im englischen 'smart materials' genannt –, die auf Umwelteinflüsse und Sensorsignale mit Eigenschaftsänderungen reagieren können. Dieses Beispiel illustriert, wie heute die Erkenntnis der molekularen und supermolekularen Architekturen das Design von modernen Werk- und Effektstoffen ermöglicht. Im Unterschied zur Farbstoffchemie ist die Chemie der Kunststoffe weit vom Reifestadium entfernt und wirkt als Schrittmacher bei der Materialentwicklung von Zukunftstechnologien – vom Fahrzeugbau bis zur Mikroelektronik.

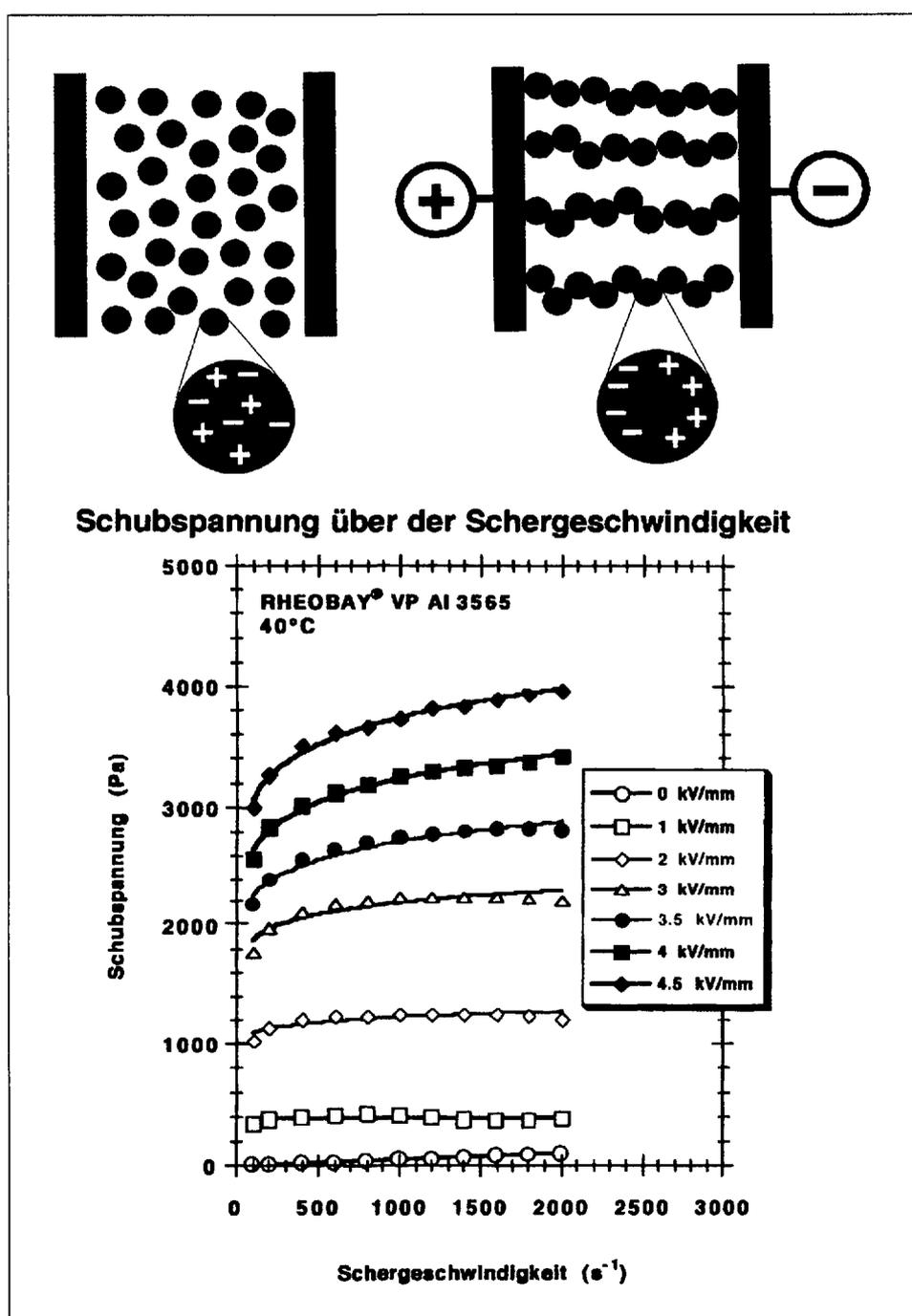


Fig. 6. Elektroviskose Fluide als Beispiel für 'smart materials': spannungsabhängige Änderung der Viskosität von Dispersionen. RHEOBAY®: Polyurethan-Siliconöl-Dispersionen der Bayer AG bestehen aus Polydimethylsiloxan-Ölen mit dispergierten, salzhaltigen Polyurethan-Partikeln, die sich im elektromagnetischen Feld orientieren.

Ausblick

Die Chemie kann bei der Entwicklung von Wirk-, Werk- und Effektstoffen beachtliche Erfolge vorweisen. Wie keine andere Wissenschaft trägt die Chemie zur Sicherung von Grundbedürfnissen wie Nahrung, Kleidung, Wohnung, medizinische Versorgung zu deutlich erhöhter Lebenserwartung und zur Erhaltung unseres hohen Lebenskomforts bei. Bei der Bevölkerung sind diese Leistungen weitgehend unbekannt, und die Chemie erfreut sich gegenwärtig geringer Beliebtheit. Was ist dafür verantwortlich? Einerseits wurden neue Technologien ohne Rücksicht auf die Regenerationsfähigkeit der Natur und die Sicherung der Lebensgrundlage zukünftiger Generationen vorangetrieben. Andererseits ist das Niveau des naturwissenschaftlichen Unterrichts an den Schulen bedenklich gesunken – wichtige Grundlagen der Chemie, auch im Hinblick auf unsere Umwelt, und Diskussionsbereitschaft bei naturwissenschaftlichen Themen werden nicht mehr im notwendigen Mass vermittelt. Zudem verfallen Chemiker heute wieder dem Fehler der Alchimisten und 'gefallen sich darin, in Figuren, Symbolen und Analogien zu reden, damit sie nur von Besonnenen, Frommen und Erleuchteten verstanden würden'. Chemiker müssen sich verstärkt auf ihre gesellschaftlichen Verpflichtungen besinnen. Statt sich im Elfenbeinturm abzukapseln, sollten Chemiker durch praxisnahe Grundlagenforschung dem Vorbild *Liebigs* nachzueifern und der Vision von *Kastner* folgen, der wie oben ausgeführt bereits Anfang des 19. Jahrhunderts unmissverständlich forderte: 'Es ist die vornehmste Aufgabe der Naturwissenschaften, insbesondere der Chemie, die Gewerbe zu fördern, den Wohlstand der Nation zu heben, den Bürger zu nähren und zu kleiden. Es ziemt dem Wissenschaftler, sich um die Hebung der Gewerbe zu kümmern und der nationalen Wohlfahrt zu dienen.' Nationale Wohlfahrt bedeutet heute einerseits die Sicherung von Arbeitsplätzen durch innovative Produkte und Know-how-Transfer von der Forschung in die Anwendung und andererseits die Gewährleistung der Umweltverträglichkeit neuer Produkte. Hier bieten sich viele Herausforderungen für die Chemie des 21. Jahrhunderts. Die Chemie von neuen Materialien ist weit vom Reifezustand entfernt. Nach *Hermann Hesse* endet alles Wissen und alle Vermehrung des Wissens nicht in einem Schlusspunkt, sondern mit Fragezeichen. 'Ein Plus an Wissen bedeutet ein Plus an Fragestellungen, und jede von ihnen wird immer wieder von neuen Fragestellungen

abgelöst'. Wichtig ist es, Fragen zu stellen und mit positiver, kreativer Einstellung die neuen Herausforderungen anzugehen. Dies scheint in unserer technologieverdrossenen, politisch polarisierten und durch Wohlstand saturierten Gesellschaft mit ausgeprägter Freizeitkultur in Vergessenheit zu geraten.

Eingegangen am 25. September 1996

- [1] O. Krätz, 'Faszination Chemie – 7000 Jahre Lehre von Stoffen und Prozessen', Verlag Georg W. Callwey GmbH & Co, München, 1990.
- [2] Antonio di Meo (Hrsg.), 'A History of Chemistry – From Neolithic Pottery to Modern Plastics', Enimont, Marsilio Editori, Venedig, 1989.
- [3] L. Braun, 'Paracelsus – Alchemist – Chemiker, Erneuerer der Heilkunde', René Coeckelberghs-Verlag, Luzern, 1988.
- [4] K.R.H. Frick, 'Eröffnete Geheimnisse des Steins der Weisen oder Schatzkammer der Alchymie', Akademische Druck- und Verlagsanstalt, Graz, 1976 (Nachdruck der Ausgabe Hamburg, 1718).
- [5] G. Latz, 'Alchemie', Fourier-Verlag GmbH, Wiesbaden (Originalausgabe erschien 1869).
- [6] W.G. Kramer, 'Der Fall Berthold Schwarz – Werk, Schicksal und Tod', Druckerei Weber, Freiburg, 1993.
- [7] Diderots Enzyklopädie 1762–1777, Weltbild Verlag.
- [8] H.W. Roesky, K. Möckel, 'Chemische Kabinettstücke', Verlag Chemie, Weinheim, 1994.
- [9] U. Tschimmel, 'Die Zehntausend-Dollar-Idee, Kunststoff-Geschichte vom Celluloid zum Superchip', ECON-Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [10] M. Antonietti, D. Horn, R. Iden, R. Müller-Mall, E. Winkler, 'Kolloide – Vorstoss in die Nanowelt', Broschüre der BASF AG, Ludwigshafen.
- [11] W. Abele, E. Theopel, W. Wolff, 'Kunststoffe – Werkstoffe unserer Zeit', Arbeitsgemeinschaft Deutsche Kunststoff-Industrie, Frankfurt, 5. Auflage, 1993.
- [12] G. Wegner (Hrsg.), 'Chemische Forschung – Zwischen Grundlagen und Anwendung', *Spektrum*, Akadem. Verlag, Heidelberg 1996.
- [13] R. Mülhaupt, 'Polymere Werkstoffe für das 21. Jahrhundert', in 'Kunststoff Kautschuk, Produkte 96/97', Hoppenstedt-Verlag, Darmstadt, 1996, S. 193.
- [14] H. Staudinger, 'Arbeits Erinnerungen', Heidelberg, 1961, S. 71.