

ANGEWANDTE CHEMIE

102. Jahrgang 1990

Heft 11

Seite 1213–1414

Chemie für die Zukunft – Standortbestimmung und Perspektiven

Von Hans-Jürgen Quadbeck-Seeger*

Die Chemie als Wissenschaft von den Stoffumwandlungen steht in besonders enger Beziehung zur Entwicklung der menschlichen Lebensbedingungen. Als Technologie hat sie, obwohl erst etwas mehr als 150 Jahre alt, unsere Zivilisation stärker beeinflußt als die anderen technischen Disziplinen. Sie ist auch nicht aus dem Handwerk entstanden, sondern hat ihre Wurzeln in der wissenschaftlichen Forschung. Aus der Erkenntnis naturgesetzlicher Zusammenhänge wurden systematisch Lösungen für die Praxis erarbeitet. Dieser Strategie verdankt die Chemie ihren Erfolg. Neue Chancen ergeben sich aus neuen Erkenntnissen. Diese werden durch die Grundlagenforschung an Hochschulen und Instituten sowie auch in Industrielabotatorien gewonnen. Darauf aufbauend entwickelt die angewandte Forschung innovative Problemlösungen im technischen Maßstab. Ihre Zielsetzungen orientieren sich am Markt und an den Bedürfnissen der Menschen. Unser Wissen über naturwissenschaftliche Zusammenhänge wächst seit einigen Jahrzehnten mit ungebrochener Dynamik, zugleich aber auch die Einsicht in die ungeheure Komplexität der stofflichen Welt. Viele Probleme unserer Zivilisation bestehen deshalb, weil unser Wissen noch unzureichend ist. Nur durch intensive Forschung und Entwicklung werden wir weiterkommen. Selbstverständlich müssen die Wissenschaftler mit dem erworbenen Wissen verantwortlich umgehen und in der Öffentlichkeit durch Information Vertrauen in ihre Methoden und „Produkte“ schaffen. Dies ist die Voraussetzung für die Akzeptanz des technischen Fortschritts, zu dem es in Anbetracht der wachsenden Bevölkerungszahlen keine Alternative gibt. Die Ausgestaltung des Fortschritts unterliegt jedoch auch Einflüssen außerhalb der Wissenschaft, wie den gesellschaftlichen Normen und dem politischen Handeln. Ein an natürlichen Rohstoffen armes Land wie die Bundesrepublik Deutschland muß auch diesen Faktoren besondere Beachtung schenken, wenn es seine Innovationskraft erhalten will.

1. Einleitung

„Der Wechsel allein ist das Beständige“, so hat *Arthur Schopenhauer* eine alte Weisheit formuliert, die gerade in unserer Zeit eine ungeahnte Bestätigung erfährt. Auf politischem, wirtschaftlichem und gesellschaftlichem Sektor sind derzeit Umbrüche im Gange – vor allem auch in unserem Land, denen man dereinst in der Rückschau ebenso das Prädikat „Revolution“ verleihen wird wie den technischen

Umwälzungen im letzten Jahrhundert, die wir heute als erste industrielle Revolution bezeichnen. Damals entstanden die meisten der heutigen Industriezweige, darunter auch die Chemische Industrie, die sich zunehmend zu einem Motor des Wandels entwickelte.

Die Chemische Industrie ging nicht aus dem Handwerk hervor, sondern entstand durch konsequente industrielle Nutzung der Ergebnisse wissenschaftlicher Forschung. Mit neuen wissenschaftlichen Erkenntnissen kam die Entwicklung meist rasch, oft sogar sprunghaft voran. Als Wissenschaft von den Stoffumwandlungen stand und steht die Chemie in besonders enger Beziehung zu den Lebensbedingungen der Menschen. Solange die Menschheit allein auf

[*] Prof. Dr. H.-J. Quadbeck-Seeger
Mitglied des Vorstands
BASF Aktiengesellschaft
D-6700 Ludwigshafen

Produkte angewiesen war, die ihr die Natur anbot, konnte sie auf drohende Veränderungen wie Nahrungsmittelknappheit oder Krankheitsepidemien nur sehr eingeschränkt reagieren. Erst mit Hilfe der Methoden der Chemie wurde die Synthese von Produkten möglich, die die Natur nur in unzureichender Menge oder überhaupt nicht zur Verfügung stellt, wie Düngemittel oder wirkungsvolle Arzneimittel.

Die Erfolge der Chemie wurden mit Begeisterung und Bewunderung dankbar begrüßt, obwohl die Problemlösungen nach heutigen Maßstäben meist unzureichend waren. In unserer Zeit des hohen Lebensstandards steht sie trotz weit fortgeschrittenen Technologie dagegen in einer völlig anderen gesellschaftlichen Position.

Die Chemie hat mit ihren Produkten die Lebensbedingungen der Menschheit nachhaltig verbessert, und zugleich hat sie sich tiefgreifend mit dem Fortschritt des Wissens gewandelt. Die Entwicklung der BASF, die in diesem Jahr auf 125 Jahre Firmengeschichte zurückblickt, ist hierfür ein markantes Beispiel.

2. Die Anfänge der modernen Chemie

Die wissenschaftliche Chemie in Deutschland beginnt mit *Justus von Liebig*. Seine Schüler werteten ihre neuen Erkenntnisse häufig auch praktisch aus und schufen so die Anfänge der Chemischen Industrie. Als erstes wurden die neuen synthetischen Farbstoffe kommerziell hergestellt. Es herrschte ein wahres Gründungssieber von Farbenfabriken, die zumeist keinen langen Bestand hatten. Eigentlich als Nachzügler wurden Bayer (1863), Hoechst (1863) und BASF (1865) gegründet. Woran liegt es, daß diese Unternehmen dennoch erfolgreicher und lebenskräftiger waren als zahlreiche Konkurrenten der damaligen Zeit?

Die bis dahin bekannten und wirtschaftlich erfolgreichen Synthesefarbstoffe wie Mauvein, Fuchsin, Methylviolett hatten ihre Anwendungsgrenzen erreicht und Überkapazitäten stellten sich ein. Damit hatte sich das simple, aber zunächst so erfolgreiche Konzept der schlichten wirtschaftlichen Verwertung eines wissenschaftlichen Resultats rasch überlebt. Eine neue Unternehmensstrategie war erforderlich, nämlich die ergänzende eigene Erarbeitung von wissenschaftlichen Erkenntnissen. Die Forschung zog in die Unternehmen ein. In der BASF entstand bereits zwei Jahre nach ihrer Gründung das erste Betriebslaboratorium zur Auffindung weiterer Farbstoffe und zur Entwicklung neuer Synthesewege, die auch die Grund- und Vorprodukte einschloß. Damit verknüpft war jedoch auch ein steigender Kapitalbedarf. Die Einsicht in diese Zusammenhänge veranlaßte den Gründer der BASF, *Friedrich Engelhorn*, von Anfang an die Rechtsform einer Aktiengesellschaft zu wählen, ein Novum unter den damaligen Farbenfabriken. Für die Innovationsfähigkeit der jungen Chemieunternehmen erwies sich die Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern und Kaufleuten in führenden Positionen als sehr erfolgreich. Damit wurde bereits frühzeitig der großen Bedeutung der Forschung für die langfristige Sicherung des Unternehmenserfolges Rechnung getragen. Von Anbeginn war man sich auch der engen Wechselwirkung mit der Grundlagenforschung bewußt. In dieser frühen Einsicht chemischer Unternehmen liegt der Schlüssel zum Erfolg und zur heutigen Bedeutung der Chemischen Industrie.

Innerhalb der Chemieunternehmen führte diese forschungsorientierte Ausrichtung dazu, daß man nicht bei der Optimierung von Produktortimenten verharrte, sondern mit neuen Erkenntnissen auch neue Arbeitsgebiete erschloß. In der BASF wurden nach den Farbstoffen so unterschiedliche Produktlinien wie Düngemittel, Fasern, Kunststoffe, Pflanzenschutzmittel, Informationssysteme, Vitamine und Pharmaka aufgebaut oder aufgenommen (Abb. 1). Heute ist gerade diese Breite der Aktivitäten bei starker Integrationstiefe ein wichtiger Erfolgsfaktor.

Die entscheidenden Voraussetzungen für die Entwicklung eines neuen Arbeitsgebietes lagen dabei oft in Pionierleistungen der wissenschaftlichen Grundlagenforschung. Darauf aufbauend wurden von der angewandten Forschung marktgerechte Produkte und kostengünstige Verfahren erarbeitet. Diese so einfach scheinende Arbeitsteiligkeit bedarf jedoch der Erläuterung.

3. Grundlagen- und angewandte Forschung: ein Verhältnis im Wandel

In den Naturwissenschaften und damit auch in der Chemie unterscheiden wir zwischen zwei Arten von Forschung, der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung. Worin besteht der Unterschied? In den englischen Bezeichnungen *pure science* und *applied science* steckt eigentlich mehr Wertung als Erklärung. Aus den vielen Möglichkeiten der Definition ist, etwa im Sinne Platons nach der dahinterstehenden Idee fragend, folgende besonders prägnant: Grundlagenforschung will die Welt erkennen, angewandte Forschung will die Welt verbessern.

Zu Zeiten Liebigs gab es diese Unterscheidung noch nicht. Gerade er ist vielmehr ein Protagonist beider Arten von Forschung, wenn man die Breite seiner Aktivitäten betrachtet: Sie reichen von der Erforschung des Nährstoffbedarfs der Pflanzen und damit der Begründung der modernen Düngelehre bis hin zur kommerziellen Erzeugung von Fleischextrakt. Wann begann also die Unterscheidung zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung und was waren die Gründe dafür?

Die Geburtsstunde der angewandten chemischen Forschung war zweifellos die Einstellung von Chemikern zur wissenschaftlichen Bearbeitung von Problemen, die für die Unternehmen wesentlich waren. Durch die Einbindung in die Zielsetzungen ihrer Unternehmen fanden sich diese Forscher zusehends anderen Rahmenbedingungen gegenüber als ihre Hochschulkollegen. Dieser Trend hat sich heute eher noch verstärkt.

Während die Grundlagenforschung, entsprechend dem Gebot der Freiheit der Wissenschaften, nur durch einige grundlegende Gesetze und Bestimmungen geregelt wird, sieht sich die angewandte Forschung eingebunden in ein Netz von determinierenden Faktoren (Abb. 2). Die Impulse für ihre Aktivitäten kommen vor allem von den Forderungen des Marktes, die auf die Grundbedürfnisse und gehobenen Bedürfnisse unserer Bevölkerung zurückgehen. Sie lassen sich grob unterteilen in Ernährung, Gesundheit, Wohnung, Kleidung sowie Kommunikation und Freizeit. Bei der Deckung dieser Bedürfnisse mit neuen Produkten unterliegt die industrielle Forschung regulierenden Einflüssen durch gesellschaftliche Normen, wie sie z. B. in Gesetzen und Ver-

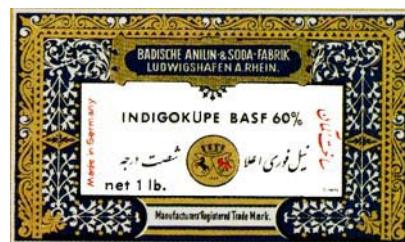
1867 Zwei Jahre nach Gründung des Unternehmens entsteht das erste Betriebslaboratorium für die Synthese neuer Farbstoffe, bereits ein Jahr darauf die zentrale Forschung.

1870 Verfahren zur technischen Herstellung des Farbstoffes Alizarin. Weitere wichtige Farbstoffe wie Echtrot, Auramin und Eosin folgen.

1877 Das erste deutsche Reichspatent auf dem Gebiet der Teerfarbstoffe wird für das Methylenblau angemeldet. Mit Hilfe des Methylenblaus gelingt es *Robert Koch* später, Bakterien im Mikroskop sichtbar zu machen.



1888 *Rudolf Knietsch* entwickelt das Verfahren zur Herstellung von Schwefelsäure aus Röstgasen. Das Schwefelsäure-Kontaktverfahren ist der erste katalytische Prozeß in großtechnischem Maßstab.



1897 Unter der Leitung von *Heinrich von Brunck* wird in der BASF nach 17jähriger Entwicklungsarbeit die technische Indigo-Synthese realisiert. Indigo, der „König der Farbstoffe“, ist damit in großer Menge preiswert verfügbar.

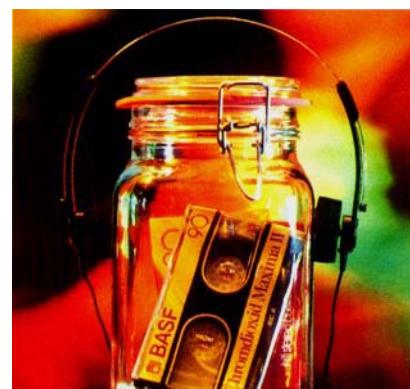
1913 Nach breit angelegten Forschungsarbeiten seit 1909 auf katalytischem und ingenieurtechnischem Gebiet kann die Produktion von Ammoniak nach dem Haber-Bosch-Verfahren aufgenommen werden. Damit ist die Rohstoffbasis für die Herstellung von Stickstoffdüngemitteln geschaffen. Die Weiterentwicklung der Hochdrucktechnik führt zur großtechnischen Synthese von Methanol und Harnstoff (1922).

1924 Mit alkylierten Naphthalinsulfonsäuren erschließt BASF eine neue Basis für synthetische Wasch- und Textilhilfsmittel (Nekal®).

1928 *Walter Reppe* findet ein Verfahren, Acetylen unter Druck gefahrlos zur Reaktion zu bringen. Ab 1938 wird diese Chemie erweitert auf die Umsetzung von Acetylen und Olefinen mit Kohlenmonoxid mit Hilfe von Metallcarbonylen als Katalysatoren (Reppe-Chemie).

1929 Die erste technische Styrolsynthese leitet die Ära der Kunststoffe ein: Polymere

Acrylverbindungen (1929), Polystyrol (1930), Polyvinylchlorid (1931), Polyisobutylene (1931), Polyvinylether (1928/1934), Polyethylen (1937). Es folgen Harnstoff-Formaldehyd-Kondensationsprodukte (z. B. Kaurit®-Leim) und zahlreiche andere Polymere mit speziellen Materialeigenschaften.



1935 Das in Zusammenarbeit mit der AEG entwickelte Magnetophonband der BASF wird auf der Funkausstellung in Berlin zum erstenmal der Öffentlichkeit vorgeführt. Beginn der Produktion von Phthalocyanin-Farbstoffen: Heliogen®-Blau B. 1936 folgt Heliogen-Grün G.

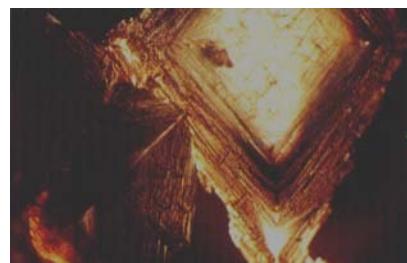
1951 Schaumkunststoff Styropor®. Schlagfestes Polystyrol.



1956 Die Synthese von Hydroxylamin durch katalytische Hydrierung von Stickstoff mit Wasserstoff erschließt einen wirtschaftlichen Herstellungsweg für Caprolactam und damit für den Polyamid-Kunststoff Perlon®.

1960 Neue Sortimente von Dispersions-(Palanil®) und kationischen Farbstoffen (Basacryl®) erweitern den Anwendungsbereich für neue Textilfasern.

1963 Neue technische Synthese von Vitamin A auf Basis der Wittig-Chemie.



Das neuartige, selektiv wirksame Pyridazon-derivat Chloridazon (Pyramin®) sichert die Konkurrenzfähigkeit des Zuckerrübenanbaus in Europa.

1968 Die nyloprint®-Platte, ein von der BASF für die Drucktechnik entwickeltes Photopolymer-Klishee, wird in den Markt eingeführt. Einstufige Erzeugung hochreinen Melamins in einem Wirbelbettreaktor.

1971 Auf Basis Polyethylen entsteht ein vielseitig anwendbarer, neuer Schaumstoff (Neopolen®). Das Morpholinderivat Trimorph (Calixin®) wirkt systemisch gegen echte Mehltauarten.

1974 Basagran®, ein substituiertes Thiadiazinon-dioxid, wirkt selektiv gegen Unkräuter in den großen Kulturen Reis, Soja, Getreide. Kali und Salz AG, eine Gesellschaft der BASF-Gruppe, gewinnt Magnesiumsulfat-Düngemittel erstmals auf trockenem Weg durch elektrostatische Aufbereitung von Rohsalzen, ein umweltfreundliches und energiesparendes Produktionsverfahren.

1977 Isotaktisches Polypropylen nach einem neuen Gasphasenprozeß der BASF. Die Produktion wird bei den Rheinischen Olefinwerken in Wesseling aufgenommen.

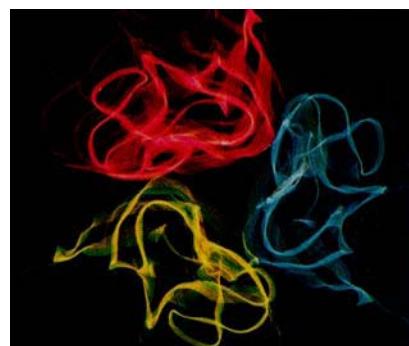
1980 Polycarboxylate auf Acrylsäurebasis als Additive für Waschmittel ermöglichen den Ersatz von Phosphaten.

1982 Citral, ein Terpen-Baustein für Vitamine, Carotinoide und Riechstoffe, wird nach einem neuen Verfahren aus petrochemischen Grundstoffen hergestellt.

1983 BASF entwickelt das Gräserherbizid Sethoxydim (Poast®) zur Marktreife für Soja- und Baumwollkulturen; es ermöglicht in erosionsgefährdeten Anbauzonen die Aussaat ohne Pflügen.

Styrolux®, ein glasklarer und schlagfester Polystyrol-Werkstoff für hochwertige Verpackungen und medizinische Geräte.

1989 Ein neu entwickeltes, umweltfreundliches Verfahren für Methylmethacrylat, das Monomer für Kunststoff-Gläser, geht in Betrieb.



1990 Tumor-Nekrose-Faktor (TNF), ein körpereigener Proteinwirkstoff, wird nach einem gentechnischen Verfahren zugänglich. Er erweist sich als wirksam zur Behandlung von maligner Bauchwassersucht und Nierenkrebs.

Biotechnologische Produktion von Vitamin B₂ aus nachwachsenden Rohstoffen. Die Produktion der hochtemperaturbeständigen Thermoplaste Ultrason® mit Polysulfon- und Polyethersulfonbausteinen erweitert das Anwendungsspektrum polymerer Werkstoffe.

Abb. 1. Marksteine aus 125 Jahren BASF-Forschung. Die Entwicklung der Chemischen Industrie von den Anfängen bis zu ihrer heutigen Bedeutung wurde wesentlich durch die chemische Forschung geprägt. Die Geschichte der BASF ist hierfür exemplarisch.

ordnungen niedergelegt sind. Auch die Konkurrenzsituation, d. h. die Stärke der eigenen Position am Markt oder Wissens- und Patentbesitz, sind Faktoren, die die angewandte Forschung beeinflussen. Unter Berücksichtigung und Wertung dieser Zusammenhänge wird entschieden, ob und welche Forschungsaktivitäten aufgenommen werden. Bei den einzelnen Forschungsprojekten bestimmen der Stand der wissenschaftlichen Erkenntnis, das eigene Wissen und der Zustrom neuer Methoden – vor allem auch durch den wissenschaftlichen Nachwuchs – sowie die Ideen, die Fertigkeiten und das Engagement der am Projekt Beteiligten maßgeblich den Weg zur innovativen Problemlösung. Da hierfür die gewachsenen Infrastrukturen und das interne Know-how genutzt werden, kann diese sehr unternehmensspezifisch ausfallen.

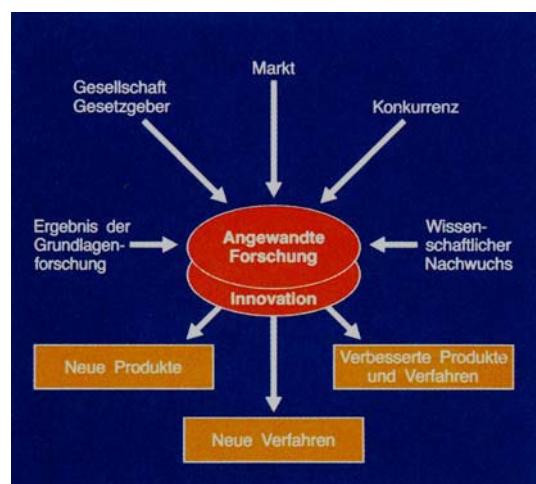


Abb. 2. Umfeld der angewandten chemischen Forschung. Die angewandte Forschung steht in enger Wechselwirkung mit vielfältigen Rahmenbedingungen, die sich zum einen auf die Auswahl der Forschungsprojekte auswirken und zum anderen deren Gang beeinflussen.

Die Arbeitsweisen in der Grundlagenforschung und der angewandten Forschung sind sich allerdings sehr ähnlich. Das hat R. B. Woodward zu der Aussage veranlaßt, er kenne keinen Unterschied zwischen pure und applied science, sondern nur den zwischen guter und schlechter Forschung. Es haben sich aber insbesondere in den letzten Jahrzehnten doch Veränderungen ergeben, und zwar sowohl in den beiden Arten der Forschung als auch im Verhältnis zueinander. So hat in der angewandten Forschung die Entwicklung einen zunehmend größeren Raum eingenommen. Was heißt Entwicklung? Während die Forschung definitionsgemäß der Gewinnung neuer Erkenntnisse dient, geht es bei der Entwicklung darum, mit vorhandenem Wissen neue Problemlösungen zu finden oder aber mit bekannten Methoden genau definierte technische Fragen zu beantworten.

Der Wandel der Beziehungen zwischen Grundlagenforschung und angewandter Forschung läßt sich am besten an einigen herausragenden Beispielen darstellen. Vor gut einem hundert Jahren ermittelte Adolf von Baeyer die Konstitutionsformel des Indigos. Den letztlich noch ausstehenden Strukturbeweis führte er mittels Totalsynthese. Damit war für den Grundlagenforscher das Problem gelöst. Für den ihm in Freundschaft verbundenen Heinrich Caro in der Badischen Anilin- & Soda-Fabrik begann dagegen erst das Problem. Eine technische Synthese mußte ausgearbeitet werden. Ganze sechzehn Jahre später war es dann soweit: 1897 kam die erste synthetische Indigo auf den Markt.

Bei der Ammoniaksynthese war der Schritt von der grundlegenden Lösung des Problems zur technischen Realisierung noch größer. Fritz Haber konnte zu Beginn dieses Jahrhunderts zeigen, daß sich Stickstoff der Luft mit Wasserstoff unter Druck in Gegenwart geeigneter Katalysatoren zu Ammoniak umsetzt. Die beeindruckend einfache Apparatur ist heute im Deutschen Museum in München zu besichtigen. Damit war aber die Lösung eines Menschheitsproblems, die Versorgung der Landwirtschaft mit Stickstoffdüngemitteln, nur im Grundsatz gezeigt. Um auf Basis der Haberschen Erkenntnisse eine Ammoniakfabrik zu bauen, bedurfte es gewaltiger Anstrengungen der angewandten Forschung in der BASF. Es zeigte sich erstmals in voller Breite, daß zur Lösung von technischen Problemen weitere Disziplinen notwendig sind, in diesem Falle war es vor allem die Ingenieurwissenschaft. Mit der Hochdrucktechnik wurde eine völlig neuartige Technologie der Stoffumwandlung erschlossen. Als 1913 die erste Ammoniakfabrik der Welt in Ludwigshafen in Betrieb genommen wurde, war die Voraussetzung für eine grundsätzliche Verbesserung der Ernährungssituation geschaffen. Gleichzeitig war das der Beginn einer sicher immer noch weit in die Zukunft reichenden Entwicklung der Verfahrenstechnik, die durch ihre vielseitige Anwendung den Lebensstandard in ungeahnter Weise beeinflußt hat. An diesem Beispiel läßt sich auch der Unterschied zwischen Invention und Innovation deutlich nachzeichnen. Die Invention oder die Erfindung zeigt die grundsätzliche Möglichkeit einer Problemlösung auf. Die Innovation dagegen ist die Entwicklung einer vollständigen Problemlösung im technischen Maßstab.

Beide geschilderten Beispiele erforderten damals die ganze Kraft des Unternehmens und beanspruchten viele Jahre Entwicklungszeit. Dabei handelte es sich um ausgesprochene Pionierprojekte. Heute hat sich die Zeitspanne sogar für solche Projekte, die eher den Charakter einer Weiterentwicklung besitzen, deutlich verlängert. Für die Entwicklung eines neuen Produkts oder eines Großverfahrens gehen nicht selten fünfzehn und mehr Jahre ins Land – trotz der enormen wissenschaftlichen Fortschritte. Woran liegt dies?

Mit zunehmendem Wissen auf allen Gebieten vertieft sich zwar unser Verständnis der Zusammenhänge, aber auch die Einsicht in die Komplexität nimmt zu. Dies hat zur Folge, daß die Forschung zunehmend multidisziplinär wird. Selbst einfach erscheinende Probleme erweisen sich bei genauerer Analyse als multifaktoriell und ihre Lösung wird in steigendem Maße nur möglich durch die Interaktion verschiedener Disziplinen. In der angewandten Forschung setzte dieser Trend bereits früh ein. Bei der Umsetzung der Ammoniaksynthese in den industriellen Maßstab kamen zum Chemiker und Ingenieur noch der Physikochemiker und der Physiker hinzu. Aber das war erst ein Anfang. Nachdem die Ammoniaksynthese den neuen „Kunstdünger“ zugänglich gemacht hatte, mußte man lernen, mit diesen synthetischen Düngemitteln umzugehen. Hierzu war die Mitarbeit von Biologen und Agronomen erforderlich. Bereits hier also war ein multidisziplinäres Team am Werk. Der Trend hat sich fortgesetzt: Die moderne Arzneimittelentwicklung z. B. erfordert die Zusammenarbeit von Naturwissenschaftlern fast aller Diszi-

plinen, Medizinern, Technikern bis hin zu Juristen und Kaufleuten.

Aber nicht nur die angewandte Forschung und die Entwicklung sind komplexer geworden, sondern auch Teile der Grundlagenforschung. Forschungsinstitutionen, die sich beispielsweise mit Fragen der Struktur der Materie oder der Kernfusion befassen, haben längst industrielle Dimensionen erreicht. Eine adäquate Antwort auf die wachsende Komplexität ist die zunehmende internationale Forschungskooperation. Die „Scientific Community“ ist das Modell einer wahren Weltbürgerschaft. Es ist daher auch nur folgerichtig, wenn sich die Wissenschaft und besonders die Grundlagenforschung der Fragen annimmt, die die gesamte Menschheit betreffen. Wir müssen heute feststellen, daß Problemen wie dem Waldsterben, dem Treibhauseffekt oder dem Ozonloch sehr komplexe Ursachen-Wirkungs-Geflechte zugrunde liegen. Und Menschheitsfragen wie die Nahrungssicherung sowie die langfristige Energieversorgung hängen zwangsläufig damit zusammen. Für die Grundlagenforschung stellen sich hier vielschichtige Aufgaben, die, zwar von anderer Dimension, aber in der Komplexität den Problemen der angewandten Forschung ganz ähnlich sind.

In diesem Zusammenhang muß auf eine Eigenschaft des wissenschaftlich-technischen Fortschritts aufmerksam gemacht werden, die gemeinhin übersehen wird. Mit zunehmendem Kenntnisstand werden auch die Instrumentarien zur Erkennung und Beobachtung von unerwünschten Effekten immer wirkungsvoller. Dieser an sich begrüßenswerte Mechanismus der Eigenkontrolle hat allerdings eine fatale Nebenwirkung. Die inzwischen unvorstellbaren Erfassungsgrenzen der Analytik werden von Teilen der Öffentlichkeit zunehmend als Bedrohung empfunden. Die Politik erliegt dann oft der Versuchung, das gerade noch Meßbare als neuen Grenzwert festzulegen. Das kann zu einer Fehlsteuerung der Ressourcen führen oder gar von den eigentlichen Problemen ablenken. So ist das Kernproblem für die nächsten Jahrzehnte die nahezu ungehemmt wachsende Zahl der Menschen. Naturwissenschaftlich-medizinisch ist dieses Problem längst gelöst, nun sind die einzelnen Menschen, die Politik und die Religionen gefragt.

Den wissenschaftlich-technischen Fortschritt für alles verantwortlich zu machen, ist geradezu Mode geworden. Nachdem C. P. Snow in den sechziger Jahren die „zwei Kulturen“ definierte, drängt es sich auf, die Entstehung einer dritten zu konstatieren. Diese sieht keine Fortschritte mehr, sondern nur noch Schwierigkeiten. Für sie gilt „everything is difficult“ und daher wäre eine Bezeichnung wie „difficulture“ vielleicht angebracht. Da es aufgrund der Fortschritte in der Kommunikationstechnologie immer leichter geworden ist, viele Menschen zu beeinflussen, muß dieses Phänomen ernst genommen werden. Gerade die Chemie – als Industrie und als Wissenschaft – ist davon besonders betroffen, weil sie zunehmend als Problemverursacher angesehen wird. Dagegen werden ihre Möglichkeiten zur Problemerkennung und technischen Problemlösung kaum gewürdigt.

Das Vertrauen der Öffentlichkeit zurückzugewinnen ist eine gemeinsame Aufgabe für Grundlagenforschung und angewandte Forschung. Sie erfordert Kooperation über alle Spezialisierung hinweg. Damit wird die Weiterentwicklung der Interdisziplinarität sogar noch über die fachliche Ebene hinaus notwendig, wobei sie auch dort noch weiter auszubauen ist.

4. Interdisziplinäres Arbeiten – ein Wesenszug der angewandten Forschung

Innerhalb der angewandten Forschung ist Arbeitsteiligkeit in fachübergreifenden Forschungs- und Entwicklungsteams heute unumgänglich. Dafür sind zwei Entwicklungen verantwortlich. Zum einen führt die enorme Zunahme an Wissen dazu, daß ein einzelner Wissenschaftler nur noch einen begrenzten Ausschnitt der Informationsflut übersehen und bewerten kann. Nimmt man als Maß für den Wissenszuwachs die Zahl der Referate in Chemical Abstracts, so zeigt sich insbesondere seit ca. 1950 ein gewaltiger Anstieg (Abb. 3). In der Hochschulforschung wird diese Flut dadurch bewältigt, daß man nur noch sein betreffendes Spezialgebiet vertieft verfolgt. In der Industrieforschung sind dagegen die anstehenden Probleme nie auf den Sachverstand eines Spezialisten allein zugeschnitten. Nur im Team ist es heute noch möglich, aus der Publikationsflut das Essentielle für eine bestimmte Aufgabenstellung herauszufiltern.

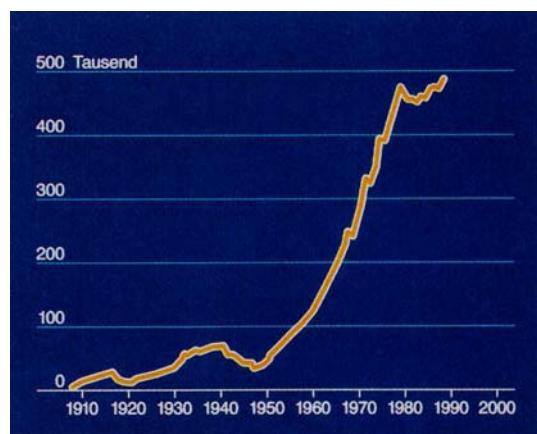


Abb. 3. Entwicklung der Zahl der Referate in Chemical Abstracts. Der Anstieg der chemischen Publikationen und damit chemischen Wissens verläuft exponentiell. Er erfordert einen immer höheren Spezialisierungsgrad der Wissenschaftler bei gleichzeitig fachübergreifender Kommunikation, um die für ein Forschungsprojekt essentiellen Fortschritte herauszufiltern.

Zum anderen werden Forschungsprojekte der angewandten Forschung mit fortschreitendem Entwicklungsstand immer komplexer, weil sie dann zunehmend mit vorhandenen Rahmenbedingungen (Rohstoff-, Marktsituation, Produktionseinrichtungen, Genehmigungen etc.) in Wechselwirkung treten und diesen angepaßt werden müssen. Deshalb verläuft der Weg von der Idee zum Produkt nicht mehr unidirektional vom Laboratorium in den Betrieb, sondern es sind gleichzeitig die unterschiedlichsten Fachstellen gefordert, die ein Projekt auf verschiedenen Ebenen parallel bis zur Entscheidungsreife bearbeiten. Angewandte Forschung wird deshalb, sobald sie das Laborstadium verläßt, mittlerweile praktisch nur noch im Team betrieben; an die Stelle der Dominanz einzelner Persönlichkeiten, die früher der Entwicklung ihre Prägung gaben, tritt der koordinierte Sachverständ, der sich nur im Rahmen eines einvernehmlichen Teamgeistes voll entfalten kann.

Die gewachsene Komplexität der Aufgaben hat zur Folge, daß in der Forschung der Chemischen Industrie nicht nur ein wachsender Personaleinsatz erforderlich ist, sondern daß

dieser gleichzeitig auch die ganze Breite der naturwissenschaftlichen Disziplinen abdecken muß. Verfolgt man die Zahl von Naturwissenschaftlern und Ingenieuren in der Chemischen Industrie seit 1964, so hat sich ihre Zahl in dieser Zeit mehr als verdoppelt (Abb. 4). Während die Chemiker

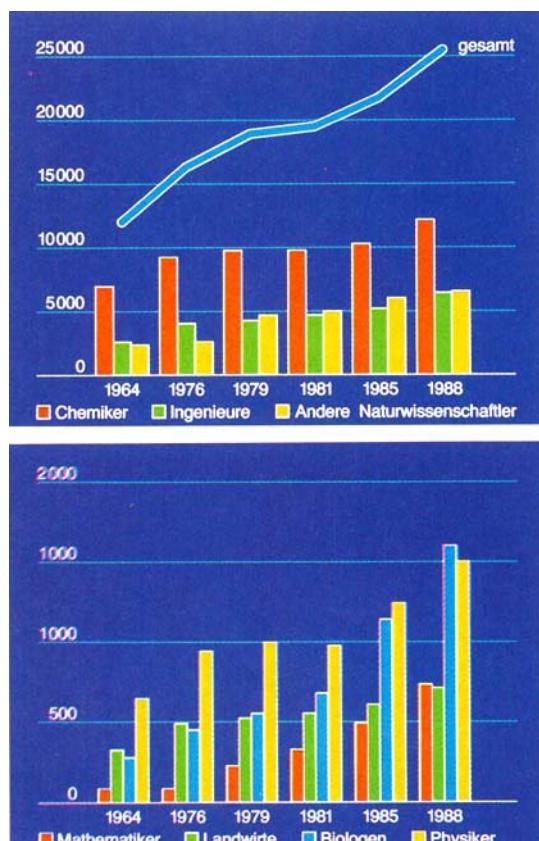


Abb. 4. Naturwissenschaftler und Chemiker in der deutschen Chemischen Industrie. Seit 1964 hat sich die Zahl der Naturwissenschaftler und Ingenieure in der Chemischen Industrie der Bundesrepublik Deutschland mehr als verdoppelt. Die Zahl der Chemiker und Ingenieure nahm stetig zu, die anderer Naturwissenschaftler, besonders Biologen, Physiker und Mathematiker, wuchs überproportional.

und Ingenieure stetig zugenommen haben, ist der Anteil anderer Naturwissenschaftler überproportional gewachsen. Die gewandelten Aufgaben in der angewandten Forschung spiegeln sich in der stark gestiegenen Zahl von Biologen, Physikern und Mathematikern. Hierin kommt die wachsende Bedeutung der Biowissenschaften, der Entwicklung instrumenteller Methoden und der EDV zum Ausdruck. Dagegen sind Landwirte seit jeher Partner der Chemiker im agrarchemischen Sektor, so daß ihr Zuwachs nicht so stark ausfiel.

5. Die angewandte Forschung im Wandel der Rahmenbedingungen

Neben den Veränderungen im wissenschaftlichen Bereich beeinflussen die wirtschaftlichen, gesellschaftlichen und politischen Entwicklungen ganz maßgeblich die Arbeitsweisen der angewandten Forschung. Der Aufwand wird insbesondere durch die ständig steigenden Anforderungen der Ge-

setzgebung laufend erhöht. Der Industrieforscher sieht sich einer zunehmenden Flut von Gesetzen, Verordnungen und Bestimmungen ausgesetzt (Abb. 5). Insbesondere in den letzten 20 Jahren ist der Anstieg atemberaubend. In den Chemieunternehmen kümmern sich mittlerweile stattliche Abteilungen nur darum, daß die richtigen Unterlagen zur richtigen Zeit bei der richtigen Behörde sind.

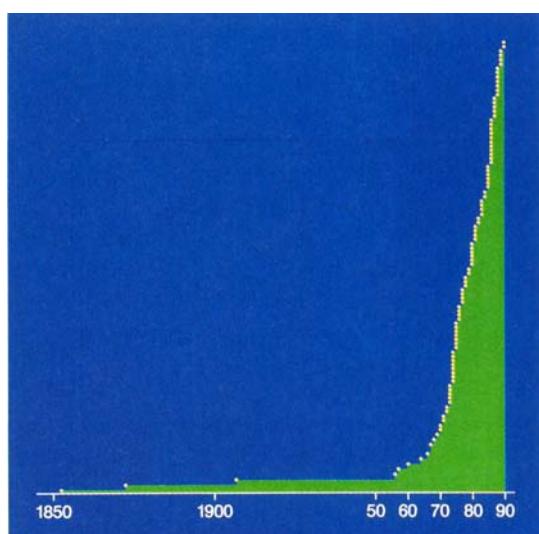


Abb. 5. Die Umweltgesetzgebung in der Bundesrepublik Deutschland hat seit etwa 1960 erdrückende Formen angenommen. Heute vergeht kein Jahr, in dem nicht die Zahl der Gesetze, Verordnungen und Novellen weiter zunimmt. Jeder Punkt der Graphik markiert den Erlass eines Gesetzes oder einer Verordnung. Viele Auflagen entwickelten sich aus einer berechtigten Fragestellung; mittlerweile kommt es aber mehr und mehr zu bürokratischen Hindernisläufen, und es werden beträchtliche personelle Ressourcen in Unternehmen und Behörden gebunden.

Ein bedenklicher Effekt der zahlreichen gesetzlichen Auflagen, die oft von einer berechtigten Frage ausgehen, aber nicht selten in einem bürokratischen Perfektionismus enden, ist eine Verlagerung der Schwerpunkte forschischer Tätigkeit. Der innovative Anteil der Forschung, der nach neuen Erkenntnissen sucht, wird immer kleiner gegenüber dem Teil, der dazu dient, die Problemlösung abzusichern, d.h. potentielle Nebenwirkungen zu überprüfen oder die Umweltverträglichkeit zu belegen. Auf die innovative Forschung, die nach neuen Problemlösungen sucht, kommt heute ein fast gleich hoher Anteil an „defensiver“ Forschung, die dazu dient, den Auflagen zu genügen. In der Wirkstoffforschung nimmt diese Arbeit schon deutlich über drei Viertel der Aufwendungen in Anspruch.

Obwohl die gesetzlichen Auflagen in aller Regel auf die industrielle Produktion zielen, treffen sie doch unmittelbar die innovative Forschung. Die aufgerichteten Hürden für neue Produkte oder Verfahren lassen die Kosten steigen, und die Entwicklungszeiten verlängern sich drastisch. Dadurch werden gerade auch Fortschritte durch umweltfreundliche Herstell- und Entsorgungsverfahren oder durch verbesserte Anwendungseigenschaften ungebührlich verzögert. Selbst Einrichtungen, die unmittelbar auf die Verbesserung der Umweltsituation zielen, wie Abfallverbrennungsöfen, Abluftfilter, Abgaswäschen oder Abwasservorbehandlungen unterliegen immer länger dauernden Genehmigungsverfah-

ren. Hier steht sich die Umweltgesetzgebung manchmal selbst im Wege.

Dabei hat die Chemische Industrie in eigener Regie, lange bevor die Umweltdiskussion eingesetzt hat, in Forschung und Produktion die Ansprüche an die Wirtschaftlichkeit und Sicherheit ihrer Prozesse und Produkte drastisch nach oben geschraubt. In der Chemie hat die Suche nach Verwertungsmöglichkeiten von billigen Rohstoffen oder bislang ungenutzten Nebenprodukten eine lange Tradition. Die ersten chemischen Fabriken verdankten ihre Existenzgründung der Verwertung des bei der Energieerzeugung angefallenen Teers aus den Kokereien. Aus ihm wurden die Rohstoffe für die synthetischen Farben gewonnen. Zur Verbesserung der Wettbewerbsfähigkeit waren Ausbeutessteigerung, Nebenproduktverwertung oder Energieeinsparung seit jeher wirkungsvolle Instrumente. Auch heute im Zeichen der umweltverträglichen Gestaltung unserer industriellen Produktionsprozesse genießen solche Anstrengungen oberste Priorität. Hinzugekommen ist die Verpflichtung zur fachgerechten Entsorgung von Rückständen, die weder stofflich noch energetisch verwertet werden können. Neben ständigen Verbesserungen der Deponietechnik sind in der Chemischen Industrie beachtliche Fortschritte bei der Verringerung des Deponiegutes gemacht worden. Außerdem gibt es große Anstrengungen der Chemischen Industrie, gemeinsam mit den Weiterverarbeitern Recycling-Konzepte zu entwickeln.

Auch der Energieaufwand für die Herstellung chemischer Produkte wurde mit dem Fortschritt in der Verfahrensentwicklung laufend verringert. In der ersten Ammoniakfabrik des Jahres 1913 mußte zur Ammoniakherstellung, bezogen auf den Energieinhalt des NH₃-Moleküls, noch ein Mehrfaches an Energie aufgewendet werden. Heute hat sich diese Relation aufgrund des ständig verbesserten Verfahrens auf das 1.3fache reduziert.

Die wachsenden Ansprüche an die Anwendungssicherheit und Wirkungsspezifität der chemischen Produkte lassen sich anhand der Entwicklung von Pflanzenschutzmitteln eindrucksvoll darlegen. Während in den sechziger Jahren für

einen neuen Pflanzenschutzwirkstoff noch etwa 4000 neue Substanzen synthetisiert wurden, stieg die Zahl auf mittlerweile 15–20 000 an (Abb. 6). Die reduzierte Trefferquote ist eine Folge davon, daß die Suche immer stärker in Richtung spezifischer Wirkung bei geringster Aufwandmenge geht. Vor allem aber tritt die toxikologische und ökotoxikologische Unbedenklichkeit immer mehr in den Vordergrund. Etwa ein Drittel der Entwicklungskosten entfällt heute auf diese toxikologischen Prüfungen. Der zunehmende Aufwand hat zu einem stetigen Anstieg der Entwicklungsdauer geführt (Abb. 7). Sie erreicht mittlerweile bei Pflanzen-

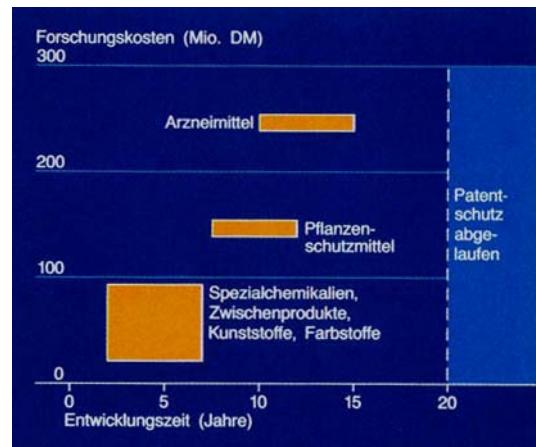


Abb. 7. Der Forschungsaufwand und die Entwicklungsdauer für ein neues Produkt oder Verfahren sind allgemein deutlich angestiegen. Am längsten dauert die Entwicklung eines neuen Arzneimittels. Die Entwicklungszeiten nähern sich mehr und mehr den Patentlaufzeiten. Gerade für die Arbeitsgebiete mit den höchsten Entwicklungskosten wird dadurch die Wiedereinbringung kaum mehr möglich. Die in der Vorbereitung befindliche Verlängerung der Patentnutzungsdauer ist für die Erhaltung der Innovationskraft auf diesen Gebieten lebensnotwendig.

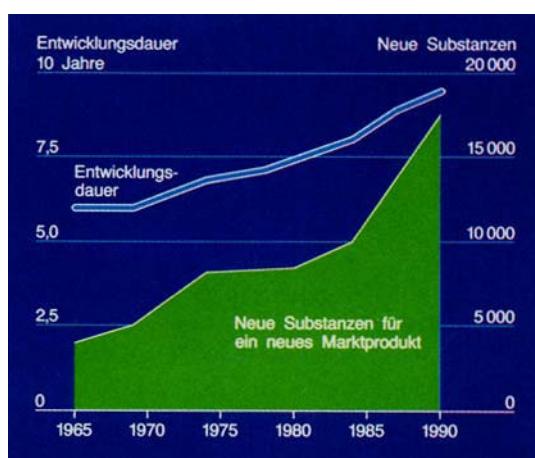


Abb. 6. Entwicklungsdauer und Trefferquote in der Pflanzenschutzforschung. Die Zahl der notwendigen Synthesen für einen neu in den Markt eingeführten Pflanzenschutzwirkstoff hat sich in den letzten 25 Jahren von 4000 auf über 15 000 erhöht. Dabei spiegelt die gesunkenen Trefferquote den Anstieg in den Ansprüchen an die Wirksamkeit, ökologische Unbedenklichkeit und immer geringere Aufwandmengen wider. Damit verbunden hat sich die Entwicklungsdauer von sechs auf fast zehn Jahre erhöht.

schutzmitteln fast zehn Jahre. Im Pharmasektor müssen bereits zwölf bis fünfzehn Jahre veranschlagt werden. Wegen der langen Entwicklungszeiten und der damit einhergehenden hohen Kosten wird die Wirkstoffsuche zu einem finanziellen Risiko mit den entsprechenden Konsequenzen. Zudem nähert sich hier die Entwicklungsdauer für ein neues Marktprodukt mehr und mehr der Patentlaufzeit von 20 Jahren, nach deren Ablauf die Nutzung auch Nachahmern offensteht. Da diese keinen nennenswerten Forschungs- und Entwicklungsaufwand leisten, können sie ihre Preise deutlich unter denen der Originalpräparate ansiedeln. Durch das Gesundheitsreformgesetz mit seinen Festpreisregelungen wird die Wiedereinbringung von Entwicklungskosten in der Bundesrepublik Deutschland kaum noch möglich sein. Das wird mittelfristig auch Auswirkungen auf den Forschungsstandort Bundesrepublik Deutschland haben.

Die angewandte Forschung wird heute auch stärker von Eigenheiten der einzelnen Märkte beeinflußt als in der Vergangenheit. Durch die zunehmende Spezifizierung der Kundenwünsche und die unterschiedlichen, aber insgesamt gestiegenen Anforderungen an die Eigenschaften und die Qualität der Produkte sowie durch Auflagen des Gesetzgebers bleibt die Forschung bis weit in die Produktionsphase eines Produktes oder Verfahrens eng mit diesem verflochten. Dies gilt seit jeher für Pharma und Pflanzenschutz. Dort begleitet

die Forschung über das sogenannte Monitoring ein Produkt über dessen gesamten Lebenszyklus. Auch in anderen Bereichen, wie beispielsweise bei Lacken und Farben, Spezialkunststoffen oder Prozeßchemikalien für die Papier- und Lederindustrie, verstärkt sich die Einbindung der Forschung in die Produktion und Vermarktung ständig.

Nur durch intensive Zusammenarbeit von Forschung, anwendungstechnischer Beratung und Produktion können Impulse des Marktes rasch aufgenommen werden, um sie in verbesserte oder neue Produkte umzusetzen. Damit gewinnen für die Qualität eines Forschungsstandortes auch die allgemeinen industriellen Rahmenbedingungen vor Ort immer mehr an Bedeutung.

Für ein Land, das wie die Bundesrepublik Deutschland arm ist an natürlichen Rohstoffen, basiert der Wohlstand im wesentlichen auf der Innovationsfähigkeit. Die Voraussetzung für Innovation ist Wissen. Und Wissen wird durch Forschung erworben. Wir haben unseren Lebensstandard durch überzeugende Forschungsleistung und leistungsfähige Produktionsstrukturen erreicht. Dazu trugen auch die Rahmenbedingungen in der Vergangenheit bei. Für die Zukunft müssen wir sehr darauf achten, diesen hohen Standard nicht preiszugeben. Den Wohlstand zu genießen ist angenehm, ihn zu erhalten, bleibt anstrengend.

6. Die angewandte Forschung im Technologiewandel: Den Wandel bewirkt – vom Wandel erfaßt

Von den wichtigsten Chemierohstoffen Erdöl, Erdgas und Steinsalz verfügt die Bundesrepublik nur über letzteres in ausreichendem Maße. Wir müssen deshalb überlegene Technologien entwickeln und die Synergien aus unserem gewachsenen Verbund und unseren Infrastrukturen nutzen, um gegenüber den Rohstoffbesitzern auf Dauer bestehen zu können.

Aus den Basisrohstoffen werden heute weltweit ca. 300 bedeutende Grund- und Zwischenprodukte hergestellt, auf denen die weitverzweigte Veredelungskette mit etwa 20 000–30 000 Produkten aufbaut, die in die vielfältigen Fer-

tigerzeugnisse eingehen (Abb. 8). Kennzeichnend für die Grund- und Zwischenprodukte ist, daß ihre Folgechemie breit diversifiziert ist. Anders als viele Endprodukte, die im Laufe der Zeit durch bessere abgelöst werden, haben jene selbst keinen sogenannten Lebenszyklus. Der Wandel erfaßt bei ihnen jedoch die Verfahren zu ihrer Herstellung. Er wird einerseits durch neue technische Möglichkeiten und Fortschritte seitens der Forschung initiiert, andererseits aber auch von der jeweils herrschenden Rohstoffsituation diktiert. Zu Beginn dieses Jahrhunderts waren die Produktlinien auf den Rohstoff Kohle zugeschnitten, ab etwa 1940 verschoben sie sich in Richtung Erdöl. Neuerdings wird dieses zunehmend durch Erdgas ergänzt, und in Zukunft wird auch Biomasse als Rohstoff eine wachsende Bedeutung gewinnen.

Dem Wandel unterliegen ganze Arbeitsgebiete ebenso wie Produktgruppen und einzelne Produkte. Sie durchlaufen eine Lebenskurve, die durch eine Entstehungsphase, eine Wachstumsphase und einen Prozeß der Reife beschrieben werden kann. So setzt sich das Portfolio eines Unternehmens oder des gesamten Industriezweiges aus Arbeitsgebieten und Produkten unterschiedlichen Entwicklungsstandes zusammen.

Ein besonders interessantes Beispiel für den Wandel in einem an sich reifen Arbeitsgebiet durch die Wechselwirkung von Lebensbedingungen und Produktanforderungen sind die Wasch- und Reinigungsmittel. Diese können als Indikator des Standes unserer Zivilisation gelten und spiegeln damit auch die mit dem wachsenden Lebensstandard einhergehenden Probleme wider. Vor wenigen Jahren drohte unseren Gewässern die Eutrophierung aufgrund des hohen Phosphateintrages aus den Waschmitteln. Der kurzfristige Ersatz von Natriumpolyphosphat erwies sich jedoch als schwierig, da es eine vielfältige Kombination von benötigten Eigenschaften beiträgt. Der Ersatz von Phosphat durch Zeolithe bot zwar eine Möglichkeit, die Überdüngung der Gewässer zu beenden, hätte aber zu Ablagerungen auf den Gewebefasern und den Heizstäben der Waschmaschinen geführt. Erst mit der Entwicklung zusätzlicher polymerer Additive (Polycarboxylate) durch die BASF wurde der Ersatz von Phosphat in Waschmitteln unter Erhalt der gewohnten Wascheigenschaften möglich.

Dieses Beispiel zeigt einerseits wie Markt- und Umweltbedürfnisse Innovationen auslösen können. Andererseits steht gerade das Gebiet der Wasch- und Reinigungsmittel exemplarisch für einen generellen Trend in der angewandten Forschung: Die Entwicklung verläuft mehr und mehr weg von Monosubstanzen hin zu Stoffkombinationen, die man als molekulare Systeme sehen muß. Alle Komponenten müssen exakt aufeinander abgestimmt sein. Dabei sind Eigenschaftskombinationen durch maßgeschneiderte Substanzkombinationen in weiten Grenzen variierbar. Neutralisierte Polyacrylsäure läßt sich beispielsweise allein über das Molekulargewicht an so unterschiedliche Einsatzgebiete anpassen wie Dispergier- und Flockungsmittel, z. B. für die Wasseraufbereitung, Waschrohstoffe oder Verdickungsmittel zur Viskositätseinstellung von Reinigungsmitteln (Abb. 9). Dieses Prinzip der Optimierung molekularer Systeme hat auch bei der Textil- und Lederausrüstung, der Galvanotechnik, im Drucksektor und besonders zukunftsrichtig bei neuen polymeren Werkstoffen überragende Bedeutung erlangt.

Ein Kennzeichen reifer Arbeitsgebiete ist die Tatsache, daß Basisinnovationen durch grundlegende neue Erkennt-



Abb. 8. Ausgehend von wenigen Chemierohstoffen baut sich die Palette der chemischen Produkte über breit diversifizierte Grund- und Zwischenprodukte bis zu den Veredelungsprodukten auf. Nur letztere unterliegen einem Lebenszyklus und werden stetig durch bessere Produkte ersetzt.

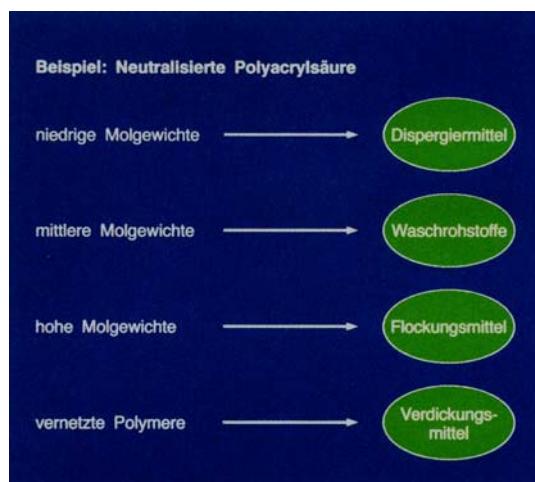


Abb. 9. Für die meisten Verbraucherprodukte genügen heute diskrete Substanzen nicht mehr den gewachsenen Ansprüchen. Vielmehr werden molekulare Systeme, z. B. durch spezielle Formulierungen oder Einstellungen, für den jeweiligen Verwendungszweck maßgeschneidert.

nisse nur noch sehr vereinzelt erfolgen. Vielmehr werden neue Produkte oder technische Problemlösungen zumeist durch Anwendungsnachteile konventioneller Marktprodukte initiiert. Bei Arbeitsgebieten in der Wachstumsphase gestalten dagegen die Fortschritte, die sich aus neuen Erkenntnissen und Möglichkeiten ergeben, zugleich den Markt für neue Anwendungen.

Ein solches Gebiet sind die polymeren Werkstoffe. Obwohl schon über ein halbes Jahrhundert alt, ist hier noch kein Ende der Entwicklung abzusehen. Die verschiedenen Polymerklassen haben dabei sehr unterschiedliche Reifestadien erreicht (Abb. 10). Die Standardkunststoffe (grün) haben durchweg einen recht hohen Reifegrad und aufgrund ihrer breiten Anwendbarkeit ein bedeutendes Marktvolumen. Das Marktsegment der technischen Kunststoffe (gelb) ist kleiner, da sie stärker in spezielle Anwendungen eingehen.

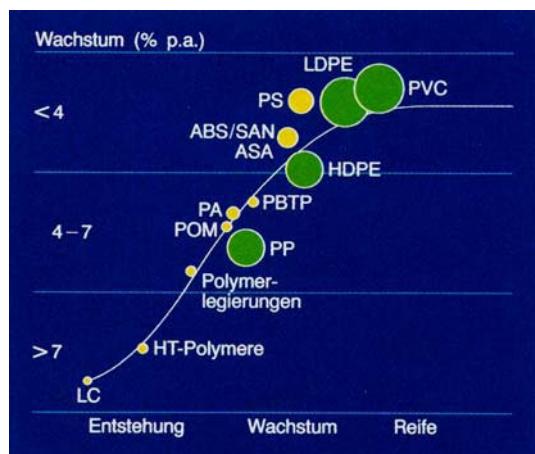


Abb. 10. Reifestadien polymerer Werkstoffe. Bei den grün markierten Produktgruppen handelt es sich um Standardkunststoffe, bei den gelb markierten um technische Kunststoffe. Die Ordinate gibt das Mengenwachstum wieder, die Größe der Kreisfläche markiert das Marktvolumen (Bezugsjahr 1989). LC = flüssigkristalline Polymere; HT-Polymer = hochtemperaturbeständige Polymere; POM = Polyoxymethylen; PA = Polyamid; PBTP = Polybutylenterephthalat; ASA, SAN, ABS = Styrolcopolymer; PS = Polystyrol; PP = Polypropylen; HDPE, LDPE = Niederdruck- bzw. Hochdruckpolyethylen. p. a. = pro Jahr.

In der frühen Entstehungsphase überwiegen in der Regel die Entwicklungskosten die Erträge aus den sehr kleinen Märkten. Eine ausgewogene Zusammensetzung des Produktportfolios stärkt deshalb vor allem auch die Möglichkeiten zur Neuentwicklung.

7. Neue Chancen durch neue Werkstoffe

Die Fortschritte der jüngsten Zeit bei neuen Werkstoffen sind möglich geworden durch neue Erkenntnisse über die Zusammenhänge von Morphologie und Eigenschaften. Hierbei wird eine Eigenschaft der Materie genutzt, die sich bei der Evolution eindrucksvoll bewährt hat: die Fähigkeit zur Selbstorganisation bei definierten molekularen Rahmenbedingungen.

Die Eigenschaften polymerer Werkstoffe werden nicht nur von der chemischen Zusammensetzung, sondern ganz wesentlich auch von Strukturen im molekularen und supramolekularen Bereich, d. h. vom morphologischen Aufbau, bestimmt. Bei den Kunststoffen der ersten Generation fehlten diese Kenntnisse noch weitgehend. Heute lässt sich die innere Ordnung in erheblichem Maß vorausbestimmen und fast unbegrenzt modifizieren. Dazu werden Polymere – ähnlich wie Metalle – miteinander legiert, wobei sich die Eigenschaften der einzelnen Komponenten nicht einfach addieren, sondern es entstehen ganz neue Eigenschaftsbilder. Solche Polymerlegierungen sind in der Regel nicht homogen einphasig, sondern aus mikroskopisch kleinen Bereichen unterschiedlicher chemischer Zusammensetzung und zum Teil auch unterschiedlichen physikalischen Zustandes aufgebaut. Der Schlüssel zur Wirksamkeit einer solchen Morphologie liegt in der Struktur der einzelnen Mikrophasen und der festen Verankerung dieser Mikrophasen untereinander.

Eine Polymerlegierung aus Polyamid, Polyphenylenether und Kautschuk (Abb. 11) zeigt Eigenschaften, die aus dem

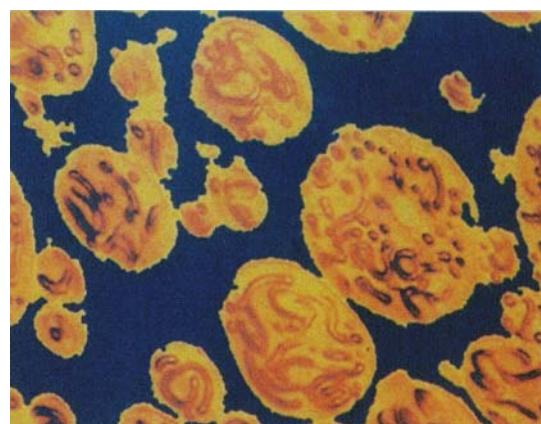


Abb. 11. Elektronenmikroskopische Aufnahme einer Legierung aus Polyamid, Polyphenylenether und Kautschuk. Der blaue Bereich repräsentiert die Polyamidmatrix; der Polyphenylenether ist gelb dargestellt. In die Polyphenylenetherpartikel ist der Kautschuk (rote Bereiche) inkludiert.

Eigenschaftsprofil der Komponenten nicht unmittelbar ablesbar sind: Eine sehr hohe Wärmeformbeständigkeit ($> 150^{\circ}\text{C}$), eine außerordentliche Schlagzähigkeit und nicht zuletzt eine stark reduzierte Wasseraufnahmefähigkeit, die

einen Hauptnachteil von Polyamid als technischem Werkstoff beseitigt.

Eines der ehrgeizigen Ziele der Polymerforschung war und ist es, Metallen auch den Rang in der Energieaufnahmefähigkeit bei höchsten Belastungen streitig zu machen. Das Bauprinzip der sogenannten Hochleistungsverbundwerkstoffe besteht darin, endlose Fasern als lastragende Elemente in polymere Harze einzubetten. Dieses Konstruktionsprinzip kennt man aus der Natur: Die Rolle der Rippen von Blättern oder der Cellulosefasern von Pflanzenstengeln übernehmen in den Verbundwerkstoffen Kohlenstoff- oder Glasfasern. In den Fertigteilen müssen die Fasern so angeordnet sein, daß sie die meist mehrachsig angreifenden Kräfte aufnehmen können. Die Bauteile bestehen deshalb aus mehreren Schichten, in denen sich die Faserrichtungen unter bestimmten, vorher berechneten Winkeln kreuzen. Einen solchen Aufbau erreicht man beispielsweise mit Hilfe von rechnergesteuerten Wickelanlagen (Abb. 12). So kommt

zu etwa 5 % für die mechanische Beanspruchbarkeit genutzt. Neuentwicklungen, wie die Kohlenstoff-Fasern, schöpfen dieses Potential bereits zu über 50 % aus. Dementsprechend höher ist die Belastbarkeit dieser Werkstoffe. Weitere Entwicklungen zielen in zwei Richtungen: Zum einen sollen verbesserte Fertigungstechniken die stabilitätsmindernden Fehlstellen minimieren. Zum anderen wird das Potential der chemischen Bindungen der Polymere immer stärker genutzt, indem man z. B. die extreme Anisotropie physikalischer Eigenschaften (beispielsweise Graphitschichten in Kohlenstoff-Fasern) durch chemische Vernetzung benachbarter Schichten beseitigt.

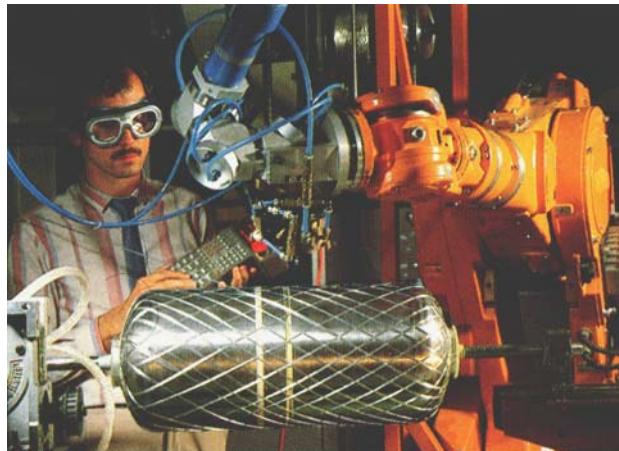


Abb. 12. Wickeltechnik für die Herstellung von Hochleistungsverbundwerkstoffen. Ein Roboter verschweißt kunststoffgetränkte Glasfasern mittels Laserstrahl zu einem hochbelastbaren Wickelkörper.

man, vor allem mit Kohlenstoff-Fasern, zu Verbundwerkstoffen, die es hinsichtlich Steifigkeit, Zug- und Ermüdungsfestigkeit sogar mit herkömmlichen Stählen aufnehmen können – und dies in Verbindung mit wesentlich niedrigerem Gewicht, mit Korrosionsbeständigkeit und absoluter Maßhaltigkeit. Diese Eigenschaften sind besonders interessant für die Luft- und Raumfahrt, denn hier spielt die Gewichtseinsparung – gleichbedeutend mit der Reduzierung des Treibstoffbedarfs oder der Erhöhung der Nutzlast – eine ganz entscheidende Rolle.

Mit den Polymerlegierungen und den Hochleistungsverbundwerkstoffen seien hier nur zwei besonders zukunftsreiche Entwicklungslinien polymerer Werkstoffe erwähnt. In den letzten Jahren wurde auf diesem Gebiet eine Reihe neuer Produkte mit Kombinationen außergewöhnlicher Eigenschaften entwickelt, die sich mit herkömmlichen Stoffen nicht realisieren lassen (Abb. 13). Das betrifft z. B. höhere Temperaturbeständigkeit, Zähigkeit, Festigkeit, Maßhaltigkeit, geringe Brennbarkeit, Korrosionsbeständigkeit, spezifische optische Eigenschaften oder elektrische Leitfähigkeit. In herkömmlichen organischen Polymeren wird das Potential, das in Form chemischer Bindungen in ihnen steckt, nur

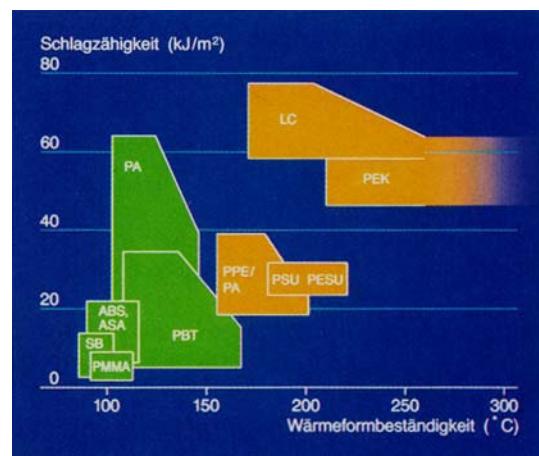


Abb. 13. Neuartige Thermoplaste vereinen hohe Wärmeformbeständigkeit mit hoher mechanischer Festigkeit. Das sind beispielsweise Polymerlegierungen aus Polyphenylenether und Polyamid (PPE/PA), Polysulfone (PSU), Polyethersulfone (PESU), Polyetherketone (PEK) oder flüssigkristalline Polymere (LC). SB = schlagzähes Polystyrol; PMMA = Polymethylmethacrylat; ABS, ASA = Styrolcopolymer; PA = Polyamid; PBT = Polybutylenterephthalat.

Dieser Trend in der Kunststoffentwicklung wird in Zukunft noch raschere Fortschritte in der Elektrotechnik, Eletronik, im Fahrzeug- und Flugzeugbau, im Maschinenbau und in der Informations- und Kommunikationstechnik ermöglichen. Aufgrund der Spitzenposition, die unser Land in der Kunststofftechnologie sowohl in der Wissenschaft, der Produktion als auch in der Anwendung erreicht hat, wird hier die Zukunft von uns entscheidend mitgestaltet werden. Auf einem anderen Sektor, der sich im Aufbruch befindet und der erhebliche Verbesserungen unserer Lebensbedingungen verspricht, sieht die Lage dagegen anders aus.

8. Gentechnik – eine zukunftsweisende Methode der Biotechnologie

Die Biotechnologie begleitet den Menschen schon seit seinen Anfängen. Mikroorganismen werden seit jeher bei der alkoholischen Gärung und der Sauerteig- oder Käsebereitung genutzt. Dabei wurden und werden Mikroorganismen selektiert, die den jeweiligen Prozessen gut angepaßt waren. Ein modernes Beispiel dafür stellt das neue biotechnologische Verfahren für die Herstellung von Vitamin B₂ dar, das von der BASF in diesem Jahr kommerzialisiert wurde. Das Verfahren nutzt mit Pflanzenöl einen nachwachsenden Rohstoff und führt mit Hilfe eines optimierten, gentechnisch je-

doch nicht veränderten Mikroorganismus direkt zum Vitamin B₂, während chemische Verfahren über viele Zwischenstufen verlaufen.

Neuerdings hat uns die Gentechnik Methoden zur Verfügung gestellt, mit denen man Mikroorganismen durch gezielte Änderung der Erbinformation rascher als bisher zu Synthesehochleistungen bringen kann. Neben Substanzen, die damit ökonomischer als mit klassisch-chemischen Methoden hergestellt werden können, gibt es auch solche Produkte, die nur auf diesem Weg zugänglich sind. Die Vorteile der Gentechnologie werden besonders offenkundig bei einer Reihe neuer Pharmawirkstoffe, bei denen es sich um körpereigene Proteine handelt. Laut einer Erhebung der Weltgesundheitsorganisation WHO gibt es ca. 30 000 Krankheiten, von denen erst rund ein Drittel mit Medikamenten ursächlich heilbar ist. Dies zeigt wie notwendig weitere therapeutische Fortschritte sind. Herz-Kreislauf-Erkrankungen, Virusinfektionen, Rheuma und Krebs sind weitverbreitete Krankheiten mit schicksalhaften Konsequenzen für die Patienten. Neuartige Substanzen für den therapeutischen Fortschritt werden also dringend benötigt. Derzeit sind weltweit zwölf gentechnisch hergestellte Therapeutika im Handel. Dabei handelt es sich um Antikörper, um Enzyme aus der Gerinnungskaskade wie den Gewebeplasminogenaktivator tPA oder Faktor VIII, Impfstoffe (z. B. für Hepatitis B), körpereigene Modulatoren des Immunsystems wie Interferone sowie Peptidhormone wie Insulin. Die Zahl der Projekte, die sich in präklinischer und klinischer Entwicklung befinden, liegt bei ca. 100. Dies unterstreicht die Dynamik dieser erst knapp 20 Jahre alten Technologie.

Die BASF hat mit dem Tumor-Nekrose-Faktor (TNF), einem Mediator des Immunsystems, ein gentechnisches Präparat in fortgeschritten klinischer Prüfung. TNF wurde 1975 identifiziert, und im Jahre 1984 gelang die Klonierung des TNF-Gens, die Aufklärung der Aminosäuresequenz und die gentechnische Herstellung des Wirkstoffs mit Hilfe von

E.-coli-Bakterien. Mittlerweile konnte das Protein kristallisiert und seine Struktur in Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe in Oxford bestimmt werden (Abb. 14). Damit lassen sich jetzt die aktiven Zentren identifizieren und pharmakologisch charakterisieren. In der klinischen Prüfung hat sich TNF mittlerweile als wirksames Mittel gegen malignen Ascites erwiesen. Dieser tritt infolge von Krebserkrankungen im Bauchraum auf und führt zu übermäßiger Ansammlung von Gewebezwässe. Er konnte bisher nicht medikamentös behandelt werden. Inzwischen hat sich auch ein weiterer Erfolg gezeigt: Bei einer Kombinationsbehandlung von metastasierendem Nierenzellkarzinom mit TNF und α -Interferon wurde bei 50 % der Patienten der Tumor zurückgebildet. Obwohl die technische Synthese ausgearbeitet ist und die erforderlichen Untersuchungen einschließlich der klinischen Studien weit vorangeschritten sind, benötigen die Vorbereitungen für die Produktionsgenehmigung gemäß Bundesimmissionsschutzgesetz einen immensen Aufwand. Der Stapel der Unterlagen für den Genehmigungsantrag für die TNF-Produktionsanlage mit einem Fermentervolumen von 200 L und einer Jahresproduktion von 0,5 kg hat die Höhe des Reaktors mittlerweile überschritten (Abb. 15). Hier dokumentiert sich die bisherige Rechtsunsicherheit in der Bundesrepublik Deutschland auf dem Gebiet der Gentechnologie.

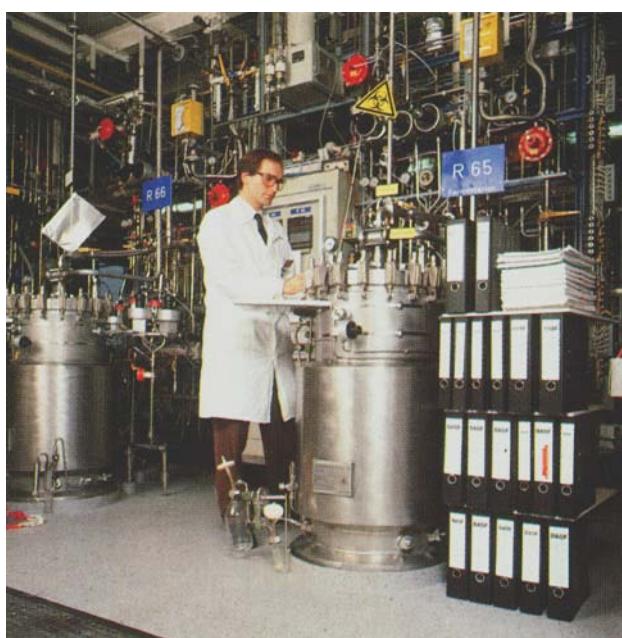


Abb. 15. Die in der Genehmigungsphase befindliche Produktionsanlage für TNF hat ein Fermentationsvolumen von 200 L. Die Jahresproduktion soll 0,5 kg betragen. Sie wird in einem bestehenden Gebäude errichtet und nutzt vorhandene Infrastruktur. Im Bild der Fermenter, daneben die Unterlagen, die für die Herstellungsgenehmigung erstellt wurden.

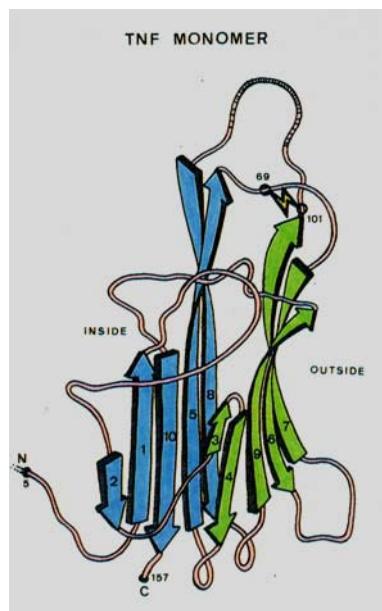


Abb. 14. Struktur des Tumor-Nekrose-Faktors (TNF) im Kristall. Nachdem es in der BASF gelungen war, TNF kristallin zu erhalten, konnte in Zusammenarbeit mit einer Arbeitsgruppe an der Universität Oxford die Struktur aufgeklärt werden. In seiner wirksamen Form besteht TNF aus drei gleichen Domänen mit je 157 Aminosäuren.

bleibt zu hoffen, daß die praktische Umsetzung der Vorschriften vom Sachverstand und nicht von Ideologien bestimmt wird.

Angesichts der Chancen, die die Gentechnik insbesondere für die Medizin aber auch für die Nahrungsmittelproduktion bietet, wäre eigentlich eine stärkere Akzeptanz in der Öffentlichkeit zu erwarten. Leider ist dies in der Bundesrepublik Deutschland – im Unterschied zu den USA oder Japan – nicht der Fall. Dies mag zum Teil daran liegen, daß in der öffentlichen und politischen Diskussion nicht streng genug zwischen der Gentechnologie und der Reproduktionsbiologie mit ihren ethischen, moralischen und rechtlichen Problemen unterschieden wird. Letztere fällt eindeutig in den Bereich der Medizin. Die chemisch-pharmazeutische Industrie arbeitet nicht auf diesen Gebieten.

9. Die Verantwortung der Chemie für unsere zukünftige Gesellschaft

Der Erkenntnisgewinn in der Gentechnologie geht derzeit stürmisch voran, wobei Europa nicht die Schrittmacherrolle spielt, sondern eher Mühe hat, den Anschluß zu halten. Unser Verständnis der molekularen Dimension der Lebensvorgänge zu erweitern, ist eine Herausforderung für die Wissenschaftler in aller Welt. Die Anwendung des neu erarbeiteten Wissens wird segensreich sein, aber Mißbrauch kann nicht ausgeschlossen werden. Es bestätigt sich stets aufs neue:

Wissen erweitert unsere Möglichkeiten, vergrößert aber auch unsere Verantwortung. Sich dieser Verantwortung bewußt zu sein und entsprechend zu handeln, legitimiert den Freiraum, den Grundlagenforschung und angewandte Forschung für sich beanspruchen und den sie tatsächlich auch benötigen. Daß wir uns unserer Verantwortung bewußt sind, müssen wir der Öffentlichkeit immer wieder deutlich machen; nur so läßt sich Vertrauen zurückgewinnen.

Die Aufgaben der angewandten Forschung erwachsen aus den Problemen unserer Zivilisation, die durch das Kernproblem des ungebremsten Bevölkerungswachstums verursacht werden. Daraus ergeben sich nicht nur die Aufgaben, sondern gleichzeitig die Verantwortung, den technischen Fortschritt zum Wohle der Menschheit weiterzuentwickeln. Die Chemie spielt dabei die Rolle einer Schlüsselindustrie, da sie allein in der Lage ist, durch Stoffumwandlungen neue Lösungsmöglichkeiten zu erschließen. Ihre Bedeutung für andere Industrien wird weiter wachsen, wobei die Aufgabenfelder immer komplexer werden. Dies hat naturgemäß unmittelbare Konsequenzen für die chemische Forschung. Über die traditionellen Chemiearbeitsgebiete hinaus wird das interdisziplinäre Erschließen neuer Technologiefelder immer bestimmender für erfolgreiche Problemlösungen. Dabei wird der Wissenschaftler stets aufs neue gefordert sein, die Konsequenzen seiner Handlungen zu überprüfen. Im Gegenzug muß er seinerseits beanspruchen, daß sein fachliches Urteil Beachtung in den Entscheidungsabläufen findet.

Eingegangen am 9. August 1990 [A 796]