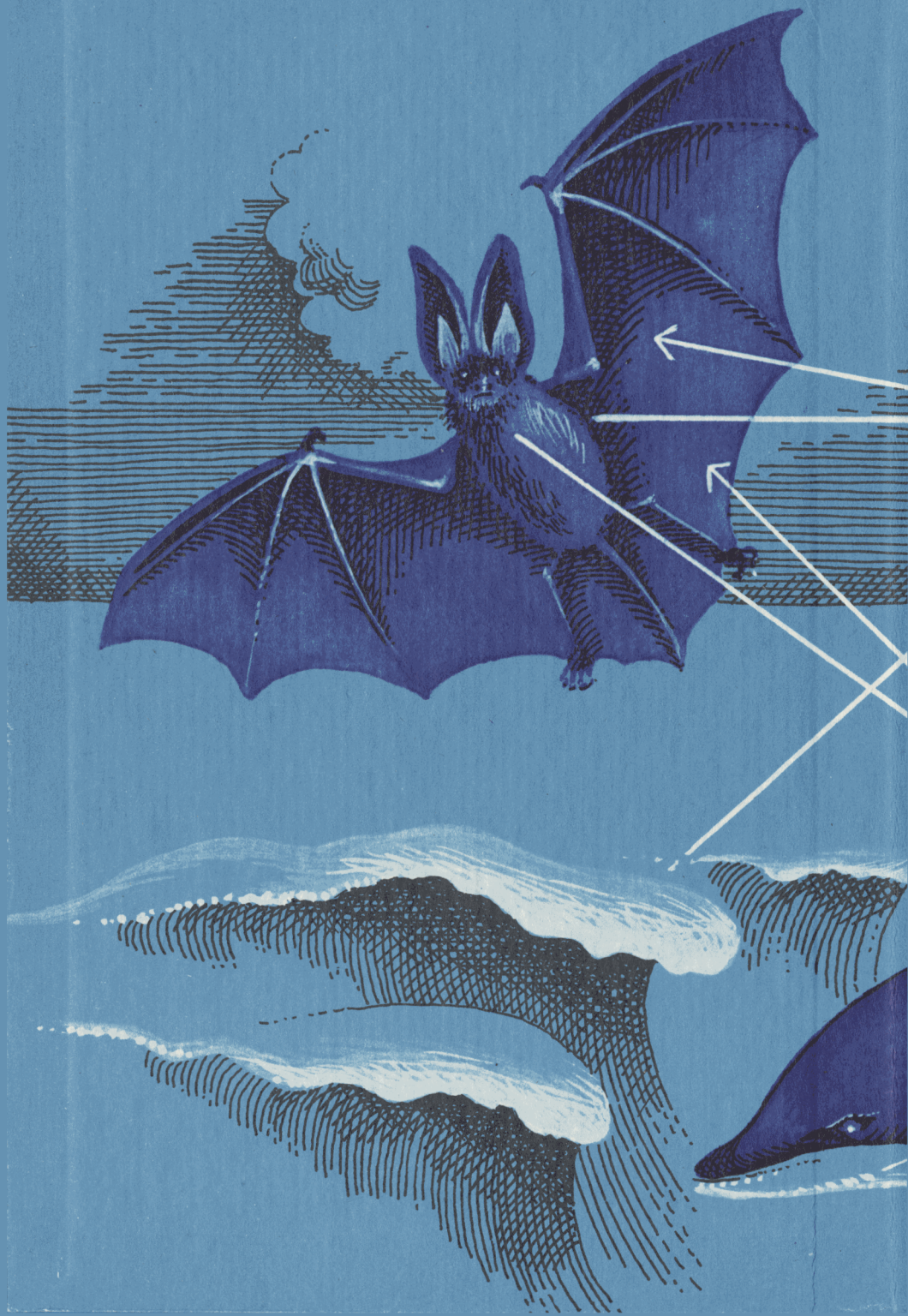


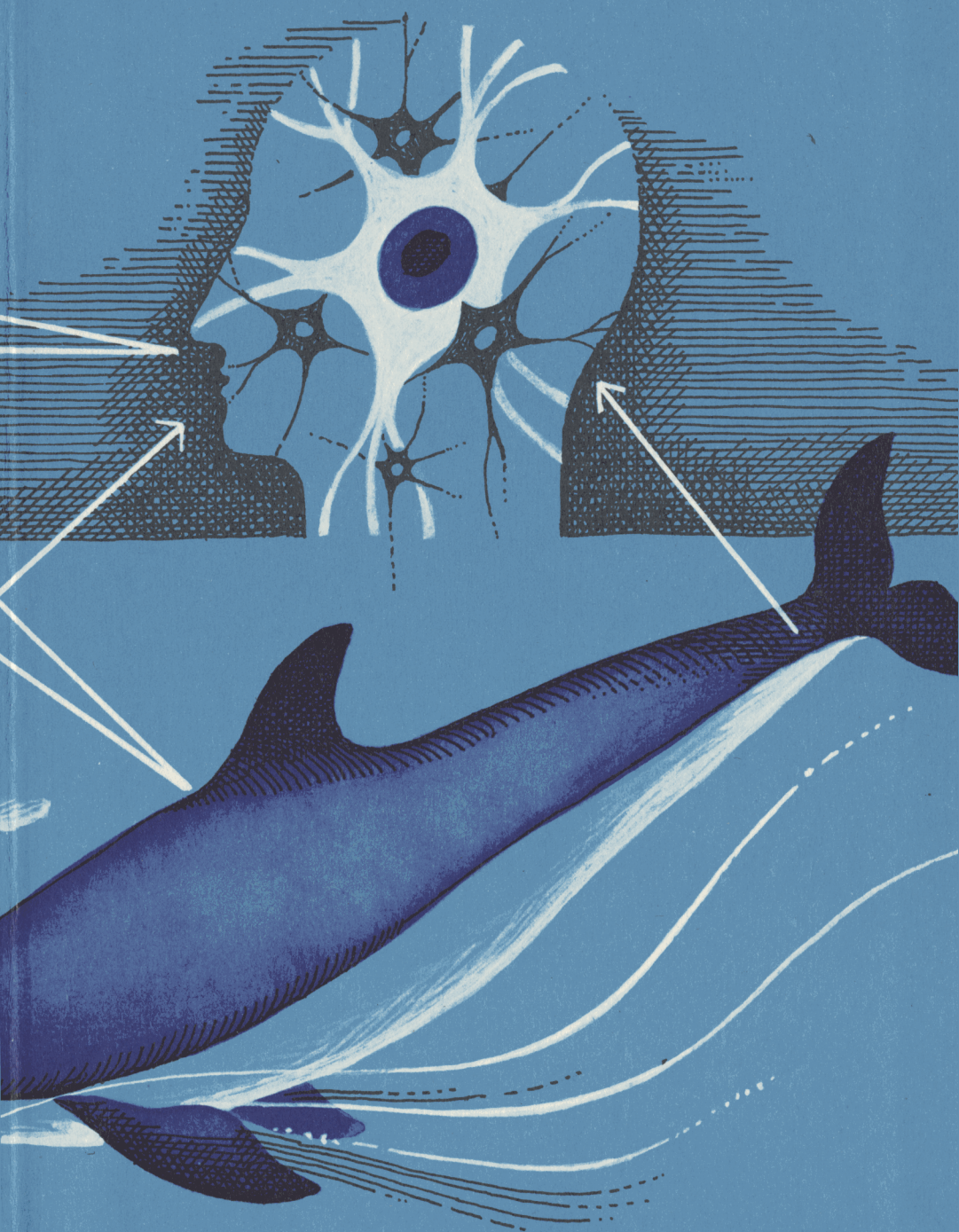


NATUR- Vorbild der Technik

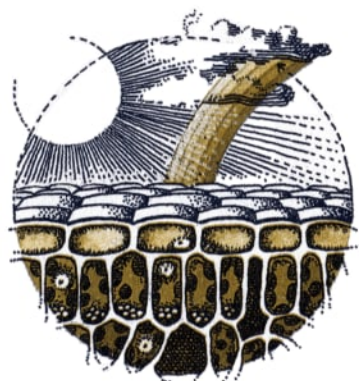
Herbert Krause







HERBERT KRAUSE
NATUR -
VORBILD DER TECHNIK



Urania-Verlag
Leipzig Jena Berlin

Inhaltsverzeichnis

1. TECHNIK DER ZUKUNFT UND DAS VORBILD NATUR 7

Vom Wert der Technik 7

Vorbilder der Natur in Vergangenheit und Gegenwart 11

Entwicklungsstrategie 15

Negative Aspekte biologischer Vorbilder 18

Grenzen technischer Entwicklung 21

2. BAUMEISTER NATUR 31

Bautechnik zwischen gestern und morgen 31

Baustoff Holz 34

Vom Fachwerk zum Metalleichtbau 38

Modelle für Wände, Decken und Dächer 47

Verkettungen und Verhakungen 51

Schalen und Schläuche 53

Architektur des Sonnenlichtes 55

3. ENERGIERESERVEN 61

Alte Gewohnheiten und neue Probleme 61

Eine Energiebilanz der Erde 65

Kleine und große Sonnenkraftwerke 70

Energien im Wasser 78

Antriebsenergien 83

Tiere, die Strom und Licht erzeugen 87

4. DIE ÜBERLEGENE CHEMIE IN PFLANZEN UND TIEREN 91

Die chemische Forschung und das Vorbild Natur 91

Vom Geheimnis der Biokatalysatoren 97

Biotechnologien 102

Das Müllproblem 105

Katalysatoren gegen Verschmutzung der Luft 109

Ein aussichtsloser Wettlauf 110

Pflanzenfasern, Spinnentiere und Textilchemie 113

Neue Stoffe — neue Wege 117

5. SCHWIMMEN UND FLIEGEN 120

Über alle sieben Meere 120

Der Traum vom Fliegen	127
Aerodynamik der Luftkraftherzeugung	130
Moderne Flugtechnik und das Vorbild Natur	131
Flugleistungen der Tiere	141
Modelle, Testfahrzeuge und Variationen	144

6. ORIENTIERUNG IM LEBENSRAUM 146

Vom inneren Bild der Außenwelt	146
Miniaturmeßsonden der Lebewesen	151
Lichtrezeptoren	155
Auf dem Wege zum Sehen mit elektronischen Augen	158
Infrarotortung, Ultraschall und elektrische Orientierung	161
Mechanorezeptoren	167
Rätsel des Hörens	170
Chemorezeptoren	173
Biologische Wettervorhersage	175
Mikromeßsonden mit Meßdatenverständnis	177

7. VON NERVENZELLEN UND SCHALTKREISEN ZU LERNFÄHIGEN AUTOMATEN 179

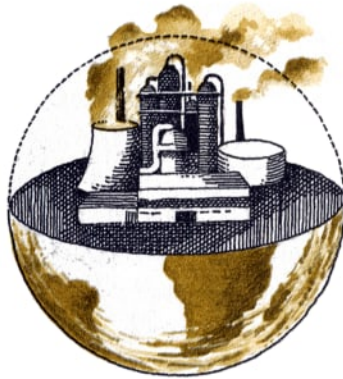
Information – was ist das?	179
Gehirn und Computer	181
Leistungen des Zentralnervensystems in technischen Maßstäben	185
Bausteine, Strukturen und Funktionen des Zentralnervensystems	187
Technische Neuronenmodelle	195
Reflexbögen und Verhaltensprogramme	199
Vom Rechenbrett zum assoziativen Computer	200
Rätsel um das Gedächtnis	203
Lernfähige Automaten	205

8. MENSCHLICHE ZIELE – MENSCHLICHE VERANTWORTUNG 211

Rückblick und Ausblick	211
Abenteuer Technik	214

1. Kapitel

Technik der Zukunft und das Vorbild Natur

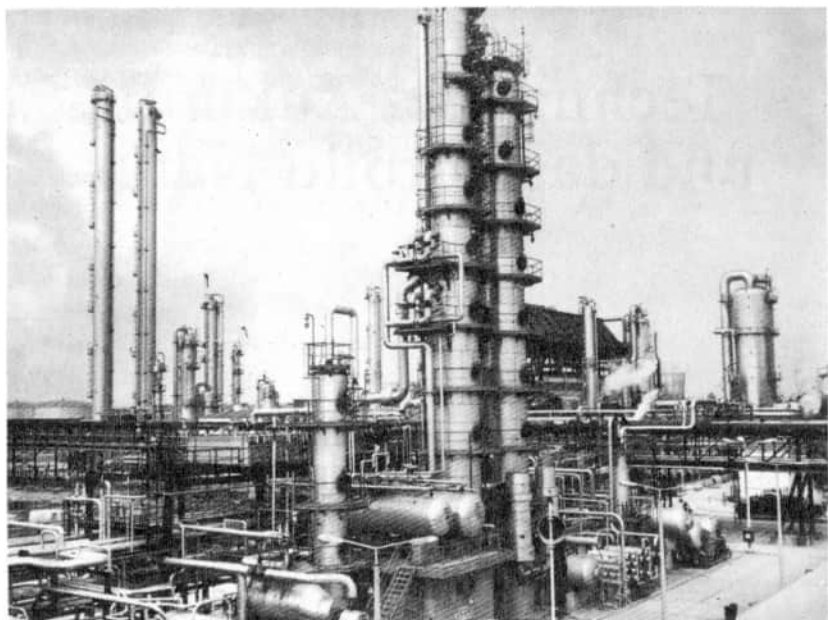


Vom Wert der Technik

Die Technik besaß immer etwas Faszinierendes für junge und wohl auch für ältere Leute. Kommt das nicht daher, daß in technischen Werken, ob winzig klein oder gewaltig groß, Schöpferkraft und Leistungsfähigkeit des Menschen unmittelbar sichtbar werden und man das Gefühl haben kann, zu denen zu gehören, die alle diese Wunderwerke geschaffen haben?

In unserer Zeit ist die hoch differenzierte Arbeitsteilung unter den Menschen schon so weit fortgeschritten, daß es für den einzelnen sehr schwer geworden ist, den Wegen technischer Entwicklung zu folgen. Oft sehen sogar die Spezialisten nur die unmittelbar gestellten Aufgaben, nicht aber Tendenzen und Konsequenzen, die in technischen Fortschritten enthalten sind.

Andererseits ist in vielen Ländern der Erde eine bemerkenswerte Aufmerksamkeit gegenüber Problemen moderner Technik entstanden. Sie gilt der Versorgung mit Rohstoffen und Energie, dem Schutz der natürlichen Umwelt vor lebenbedrohenden Schäden durch die Technik und vor allem dem tatsächlichen oder möglichen Mißbrauch naturwissenschaftlich-technischer Errungenschaften durch kleine Gruppen von Menschen für ihre egoistischen Interessen.



Gewaltige Industrieanlagen prägen das Bild unserer Zeit

Eine der Gefahren besteht auch darin, daß man bisher — das haben zahlreiche Untersuchungen von Biologen und Biochemikern, Hydrologen, Medizinern und anderen Naturwissenschaftlern aus jüngster Zeit erwiesen — bei weitem nicht alle Folgen irdischer Technik sorgfältig genug erforscht hat und übersieht. Es fällt nicht schwer, diese Tatsache zumindest z. T. als Konsequenz kapitalistischer Wirtschaftsordnung zu erkennen, in der nur gefördert wird, was profitabel ist.

Der Fortgang der Technik ist Produkt der gesellschaftlichen Entwicklung. Sie wird durch die jeweils herrschenden Interessen innerhalb einer Gesellschaftsordnung bestimmt und gelenkt. Solange auf der Erde verschiedene Gesellschaftsordnungen mit ihren gegensätzlichen Interessen existieren, wird auch die Entwicklung der Technik durch diese Gegensätze maßgeblich beeinflußt werden.

Man könnte versucht sein zu sagen, daß die Entwicklung von sehr komplexen Waffensystemen und Massenvernichtungswaffen eine der schlimmsten Ausgeburten der Technik sei. Indessen wissen wir, daß auch diese Probleme differenziert betrachtet werden müssen, daß Bedroher und Bedrohte zu unterscheiden sind. Die historische Entwicklung gesellschaftlicher Verhältnisse in allen Teilen der Erde gibt leicht Auskunft über die Verteilung

dieser Rollen. Solange es Unterdrücker und Unterdrückte gibt, wird es Kriege und die Gefahr neuer Kriege geben, in denen die Anwendung immer neuer, größerer technischer Möglichkeiten zur Vernichtung von Menschen und ihres Lebensraumes zur ungeheuren Gefahr wird.

Dennoch sind wir überzeugt, daß es der überwiegenden Mehrheit friedliebender Menschen schließlich und endlich gelingen wird, alle diese Gefahren zu bannen, daß es eine Technik der Zukunft in friedlicher Entwicklung ohne Herren und Sklaven dieser Technik geben wird.

Trotz ihrer unübersehbar gewordenen Ausmaße, Potenzen und Vielfältigkeiten bleibt die Technik, was sie immer war – das Arsenal aller Verfahren, Methoden und Werkzeuge des Menschen, um alle Güter seines Bedarfs herzustellen, alle materiellen Einrichtungen des gesellschaftlichen Lebens zu schaffen und zu erhalten und wissenschaftliche Forschungen zu betreiben, mit deren Hilfe das gesellschaftliche Leben und als ein Teil dessen auch die Technik in all ihrer Vielfalt weiterentwickelt werden können.

Im Zuge der voranschreitenden Arbeitsteilung ist das Verhältnis des Menschen zur Technik komplizierter geworden. In früherer Zeit war es für den einzelnen leichter, Zusammenhänge zwischen den eigenen Fähigkeiten, der selbst genutzten Technik und den Erzeugnissen seiner Tätigkeit zu übersehen. Meist konnte er sein Produkt vorzeigen und mußte für dessen Qualität einstehen. Diese Beziehungen zwischen Mensch und Technik gehen heute mehr und mehr vom einzelnen an das Kollektiv über. In sehr vielen Fällen handelt es sich dabei – betrachtet man Erzeugnisse von den Rohstoffen bis zum Endprodukt – um große Kollektive oder um mehrere Kollektive in verschiedenen Bereichen oder Betrieben.

Dennoch sind Erfolgserlebnis und Freude an der eigenen Arbeit nicht möglich ohne ein enges Verhältnis zu dem Ausschnitt der Technik, der zu den eigenen Aufgabenbereichen gehört. Nur das Bewußtsein, diese Technik genau zu verstehen und zu beherrschen, aus ihr das Maximale und Optimale herauszuholen und dadurch im Kollektiv geachtet und anerkannt zu werden, schafft volle Befriedigung in der Arbeit. Darüber hinaus gibt es immer noch die unmittelbare Freude am Gelingen, an der erzeugten Qualität sowie am Funktionieren eines Prozesses, den man so oder so erwartet und vorausgedacht hat. Aus dieser Einstellung resultieren viele technische Neuerungen und Erfindungen.

Sie entstehen unmittelbar in Produktionsbetrieben und anderen gesellschaftlichen Einrichtungen, und ihr Anteil wächst von Jahr zu Jahr. Dies ist der Beweis, daß der Strom des technischen Fortschritts aus zahllosen Quellen gespeist wird, die nicht nur in den dafür geschaffenen Institutionen zu suchen sind, sondern überall sprudeln können.

Dieser Faktor kann, so wie bei uns, durch staatliche Förderung verstärkt werden, er ist aber auch ohne Förderung vorhanden und wirksam, weil das

schöpferische Element zum Wesen des Menschen gehört. In ungezählten Fällen sind es erst diese schöpferischen Leistungen vor Ort, die großen technischen Projekten zum Durchbruch in die Wirklichkeit verhelfen.

Angesichts dieser breiten Beteiligung vieler Menschen an der gesamten technischen Entwicklung sowie der hoch differenzierten Arbeitsteilung, in der Investitions- und Gebrauchsgüter fast nur noch aus dem Zusammenwirken großer Kollektive entstehen können, auch angesichts der immer komplizierter werdenden Maschinen, Geräte, Automaten und Roboter und angesichts dieser ganzen hochproduktiven Technik, die nie und nirgends auf der Stelle steht, sondern eben durch die Schöpferkraft des Menschen ununterbrochen zu noch größeren Fähigkeiten und Möglichkeiten fortschreitet, erkennen wir erst recht die Technik als Werk der ganzen menschlichen Gesellschaft.

Verfechter der kapitalistischen Ordnung möchten die Technik als etwas darstellen, das sich nach eigenen, vom Menschen nicht zu beeinflussenden Gesetzen entwickelt, um dahinter die Konsequenzen des längst paradox gewordenen Privatbesitzes an Produktionsmitteln zu verbergen. Damit hoffen sie, Angst und Zorn der Menschen, die als Strandgut technischer Entwicklung um ihre Zukunft betrogen wurden, auf eine anonyme Technik zu lenken.

Die Technik ist kein menschenfeindlicher Moloch, und wo sie so erscheint, kann das nur das Werk von Menschen sein. Technik wird erst lebendig durch den Menschen, durch Mühen und Ideen von Millionen von Menschenhirnen, die unablässig mit den Schwierigkeiten *ihrer* Technik beschäftigt sind.

Diese Bemerkungen wurden vorangestellt, um zumindest die gesellschaftlichen Bedingungen und Beziehungen anzudeuten, unter denen sich eine Entwicklung der Technik nur vollziehen kann. Es ist nicht möglich, Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft der Technik zu verstehen, ohne die Gesamtheit der gesellschaftlichen Probleme in der jeweiligen Zeit zu berücksichtigen. Bei allen technischen Perspektiven müssen wir uns immer der gesellschaftlichen Bedingungen bewußt bleiben, die diese Perspektiven bestimmen werden.

Dieses Buch will einen Blick besonderer Art in die Zukunft der Technik werfen, indem es die Natur als Vorbild moderner Technik zeigt. Dieses Vorbild hat es immer gegeben und ist von Erfindern und Konstrukteuren auch immer benutzt worden. Es handelt sich also durchaus nicht um etwas neu Entdecktes. Überraschend aber mag vielleicht manchem erscheinen, daß Vorbilder aus der Natur für die Technik von morgen viele neue Aspekte erhalten und Bedeutungen in neuen Dimensionen bekommen.



Ein klarer Bach im Wiesengrund

Die besondere Rolle von Vorbildern aus der Natur für zukünftige technische Entwicklungen in unserer Zeit tiefgreifender gesellschaftlicher Auseinandersetzungen zwischen Staaten unterschiedlicher Gesellschaftsordnung und innerhalb der kapitalistischen Ordnung besteht auch darin, daß sie dazu beitragen können, Wege zu einer menschenwürdigen Technik zu zeigen, in der Qualitäten der Umwelt erhalten bleiben, in der Gefahren technischer Fehlentwicklungen vermieden werden und in der neue Maßstäbe für erreichbare und erreichenswerte Ziele gültig sind.

Vorbilder der Natur in Vergangenheit und Gegenwart

Die frühesten technischen Erfindungen des Menschen sind mit sehr großer Wahrscheinlichkeit nach Vorbildern aus der belebten und unbelebten Natur entstanden. Die Brechstange und andere Formen des Hebels mögen aus dem Umgang mit Ästen und Baumstämmen hervorgegangen sein. Das gestielte Werkzeug, Keil und Schneide hatten wohl ihre Vorläufer in natürlichen Gebilden, etwa günstig geformten Steinen und Astteilen. Vor dem Rad waren der rollende Stein und der runde Baumstamm da. Laub- und

Reisighütten verbesserten den natürlichen Schutz, den die Blätterdächer der Bäume boten. Man kann noch viele solcher Beispiele finden. Die Menschen der Frühgeschichte beobachteten die Natur und sammelten Erfahrungen. Sie erprobten neue Ideen zur Lösung ihrer Probleme, darunter auch viele ohne direkte Vorbilder in der Natur, etwa das Herstellen wasserdichter Gefäße, das Entzünden von Feuer oder den Bau von Jagdwaffen und Wildfallen.

So entstand ein ständig wachsender Fundus von technischen Erfahrungen, aus dem Vorstellungen und Anregungen für die Lösung neu auftretender Probleme geschöpft werden konnten.

Schon bei den einfachsten Erzeugnissen frühgeschichtlicher Technik erkennen wir einerseits natürliche Vorbilder, andererseits aber auch die erfinderischen Leistungen der Menschen, die Gebilde aus der belebten Natur als prinzipielle Lösungen für bestimmte technische Probleme erkannten, diese zu praktikablen Lösungen umschufen, Naturgesetze in den Erscheinungen begriffen und zu ihrem Nutzen anwandten. Die natürlichen Vorbilder stellten so vor allem Ausgangspunkte menschlicher Technik dar.

Im Zeitalter Galileis setzten sich naturwissenschaftliche Denkweisen mehr und mehr durch. Dennoch galten intensive Beobachtungen der Natur auch weiterhin nicht nur der Erkenntnis grundlegender Naturgesetze, sondern auch allen möglichen technischen Problemen, die Menschen sich selbst stellten und zu lösen versuchten. Eines der hervorragenden Beispiele dafür ist der Jahrhunderte alte Wunsch der Menschen, sich in die Luft zu erheben und zu fliegen, zu dessen Erfüllung sie nach vielen Fehlversuchen schließlich auch technische Lösungen fanden.

Heute haben Natur- und Technikwissenschaften einen so hohen Stand erreicht und besitzen für den einzelnen kaum noch übersehbare Erfahrungsbereiche, daß man meinen sollte, aus der Natur seien nur noch die Rohstoffe für unsere moderne Technik zu schöpfen. Gibt es Vorbilder aus der Natur für die Technik von morgen? — Das scheint auf den ersten Blick abwegig zu sein, ist es aber ganz und gar nicht. Dafür lassen sich mehrere Gründe anführen.

Neuere Forschungen aus verschiedenen Teilgebieten der Biologie, z. B. der Zell- und Molekularbiologie, der Biochemie, der Sinnesphysiologie und der Neurobiologie, haben gerade erst in jüngster Zeit viele bedeutende Ergebnisse erreicht, die belebte Strukturen und deren Funktionen, ihre Steuer- und Regelmechanismen und vielfältigen Formen der Informationsaufnahme und -verarbeitung auf neue, tiefere Weise verstehen lassen. Dabei bieten sich Parallelen zu aktuellen technischen Problemen an, die vorher nicht zu erkennen waren.

Ein zweiter Grund für die wachsende Bedeutung biologischer Vorbilder, vor allem für technische Fragen der Informationsaufnahme und -verarbei-

tung, erwächst aus Ergebnissen der Kybernetik und Computertechnik, die viele Leistungen im Bereich der Sinnes- und Nervenbiologie durch Vergleiche mit entsprechenden technischen Apparaten erst in vollem Maße erkennen lassen. Aufgabenstellungen wie die Ausstattung von Forschungs- und Industrierobotern mit empfindlichen Sensoren sind eben erst auf die Tagesordnung gesetzt worden.

Es gibt einige frühe Stimmen aus der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts, die auf die aktuelle Bedeutung der Natur als Vorbild der Technik aufmerksam zu machen suchten. In den Jahren 1919 und 1920 veröffentlichte R. H. Francé zwei Bücher mit den Titeln »Die technischen Leistungen der Pflanzen« und »Die Pflanze als Erfinder«, die aber kaum Beachtung fanden. Auch das 20 Jahre später erschienene Buch »Technik des Lebens« von A. Niklitschek hatte wenig Erfolg.

Erst in der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts erkannten Forscher und Ingenieure die Möglichkeiten deutlicher, die in der belebten Natur dem angeboten werden, der sie sucht. Man sprach von der Natur, nannte sie die größte Patentsammlung der Welt und begann, gezielt nach technischen Anwendungsmöglichkeiten natürlicher Vorbilder zu suchen. Die Vertreter dieses neuen Programms verstanden sich als Mittler zwischen Biologie und Technik, der von ihnen eröffnete Forschungsbereich stellte eine neue Disziplin dar und wurde »Bionik« genannt. Im September 1960 fand das erste öffentliche Bionik-Symposium mit Wissenschaftlern aus vielen Ländern statt. Die Bionik wurde damit gewissermaßen aus der Taufe gehoben.

Sie hat mit ihrer programmatischen Zielstellung eine Pionierrolle übernommen. Es gelang, in mehreren Bereichen der Technik mit den spezifischen Denkansätzen der Bionik beachtliche Erfolge zu erzielen. Den Bemühungen und Resultaten der Bioniker ist zu danken, daß die Aufmerksamkeit vieler Techniker und Naturwissenschaftler gegenüber Vorbildern der Natur inzwischen stark gewachsen ist.

Es gibt eine Reihe von Paradebeispielen der Bionik, z. B. die Metall-Glas-Konstruktion des Londoner Kristallpalastes, das Medusen-Barometer oder die Ergebnisse O. Kramers über die Dämpfungshaut des Delphins. In diesen und ähnlichen Beispielen wurden Prinziplösungen der Natur im ganzen in Technik umgesetzt oder eine solche direkte Umsetzung vorgeschlagen. Der ganze Reichtum an Möglichkeiten, der in Vorbildern der Natur für die Lösung technischer Probleme enthalten ist, besteht aber vor allem darin, daß Vorbild-Elemente zu neuen technischen Problemlösungen kombiniert werden können. Solche Kombinationen von vorbildhaften Struktur- und Funktionselementen aus der Natur eröffnen dem schöpferischen Denken des Menschen sehr wahrscheinlich ein Vielfaches an Möglichkeiten. Die Anwendung von Vorbildern aus der Natur, in konstruktives und erfinderisches Denken verwoben, kann dann nicht mehr einer wissen-

schaftlichen oder technischen Spezialdisziplin vorbehalten sein, sondern wird alle Bereiche der technischen Entwicklung durchdringen.

Wir befinden uns bereits mitten in diesem Prozeß der Neuorientierung naturwissenschaftlich-technischen Denkens auf die Natur als ungeheuer reiche Sammlung von Vorbildern für neue technische Konzeptionen und Prinziplösungen, aber auch als Maß und Beispiel gleichgewichtserhaltender Grenzen des technisch Möglichen.

Viele Forscher und Ingenieure haben begonnen, ihre speziellen Probleme in größere natürliche Zusammenhänge einzuordnen und Vorbilder aus der Natur in ihre Arbeit einzubeziehen. In der modernen Bautechnik finden von der Konstruktion von Wand- und Stützelementen bis zur Fassadengestaltung Erkenntnisse vielfache Anwendung, die an biologischen Strukturen gewonnen wurden. Biologische Mechanismen und Reaktionen zur Energieumwandlung und Energiespeicherung werden zwar nicht zur zukünftigen Hauptquelle der technischen Energieversorgung werden, aber doch eine ganze Reihe spezieller oder lokaler Energieprobleme lösen helfen. Für die Entwicklung neuer Stoffe – von Düngemitteln, Faserstoffen und Baumaterialien bis zu chemischen und medizinischen Wirkstoffen – bietet die Natur eine ungeheure Vielfalt an Vorbildern. Für neue Konstruktionen und Formgestaltungen von Schiffen, Fahrzeugen und Flugkörpern hält die Natur ungezählte optimierte Varianten bereit. Zu den Problemen moderner Meß- und Sensortechnik finden wir in tierischen Sinnesorganen für Temperatur, Druck, Vibrationsschwingungen, elektrische Felder und andere physikalische Größen teilweise erstaunliche Leistungen, mit denen unsere Technik zur Zeit weder in bezug auf Empfindlichkeit noch in bezug auf Kleinheit, Energieverbrauch und Zuverlässigkeit konkurrieren kann. Schließlich werden wir sehen, daß die technische Informationsverarbeitung im menschlichen Gehirn und auch in anderen biologischen Strukturen bedeutende Vorbildelemente finden kann und bestimmte aktuelle Probleme der optischen und akustischen Zeichenerkennung anscheinend nur gleichzeitig und gemeinsam von biologischer und technischer Seite her erfolgreich bearbeitet werden können.

So wie es falsch wäre, die große Bedeutung biologischer Vorbilder für die Gestaltung der Technik zu ignorieren, so wäre es andererseits auch einseitig und hieße, die Möglichkeiten menschlicher Intelligenz unzulässig eng zu sehen, wenn man alles von Vorbildern der Natur erwarten wollte. Die Natur hält ihr reiches Angebot für uns bereit. Wir sollten es zu unseren Möglichkeiten hinzunehmen – nicht mehr, aber auch nicht weniger. Wenn wir von Vorbildern der Natur für die Technik sprechen, so sollte auch gesagt werden, daß Physik, Chemie und Technik ihrerseits viele Vorbilder für die biologische Forschung liefern. Um das bestätigt zu finden, braucht man nur an die zahlreichen Begriffe, Vorstellungen und Bilder aus Ergebnissen

der Physik und Chemie oder aus technischen Konstruktionen zu denken, die auf biologische Objekte übertragen wurden — Skeletteile als Hebel, das Herz als Pumpe, biologische Trennwände als Membranen und viele andere. Überdies haben die Biologen viele Forschungsmethoden aus Physik und Chemie übernommen. Die moderne Technik stellt ihnen hervorragende Geräte zur Verfügung — Rasterelektronenmikroskope, Zeitlupen- und Zeitrafferkameras, Spektralphotometer, um nur einige zu nennen —, mit deren Hilfe sie erst ihre Forschungsergebnisse erreichen konnten.

Diese Wechselwirkungen zwischen Naturwissenschaft und Technik sind charakteristisch für den Stand von Erkenntnis und Entwicklung, den wir erreicht haben, und man könnte die Anwendung von Vorbildern aus der Natur für die Technik auch als einen Teil dieses Zusammenwirkens und gegenseitigen Durchdringens auffassen. So gesehen, ist Natur als Vorbildreservoir für die Technik beinahe selbstverständlich und nichts Neues, sondern nur in eine höhere Phase eingetreten.

Entwicklungsstrategie

Im Jahre 1859 erschien das Werk von Charles Darwin »Über die Entstehung der Arten durch natürliche Zuchtwahl«, das auch heute noch der Schlüssel zum Verständnis der Entwicklungsstrategie der Natur ist. Diese als Selektionstheorie bezeichnete Lehre wurde nach Darwin weiterentwickelt und gilt heute unumstritten, obwohl es noch nicht überall gelungen ist, den nach Steinabdrücken und Skelettfunden rekonstruierten historischen Ablauf der stammesgeschichtlichen Entwicklung mit der Selektionstheorie in Einklang zu bringen.

Die Grundannahme der Selektionstheorie, durch viele Beispiele beweisbar richtig, geht davon aus, daß in den Erbanlagen von einzelnen Individuen einer Art Veränderungen — Mutationen — auftreten. Die Nachkommen dieser Individuen unterscheiden sich dann von ihren Artgenossen in der von der Mutation betroffenen Eigenschaft. Eine solche Veränderung kann diesen Pflanzen oder Tieren Entwicklungsvorteile oder -nachteile gegenüber den Artgenossen verschaffen. Im Laufe der Zeit erfolgt nun eine natürliche Auslese (Selektion) der bevorteilten Individuen, während die übrigen allmählich verschwinden. Dieser Grundmechanismus der natürlichen Evolution, das Auftreten von Mutationen, die zur Selektion führen, kann allein die Entwicklung aller Pflanzen und Tierarten in den Zeiträumen der Erdgeschichte nicht befriedigend erklären. Es müssen noch andere zusätzlich wirkende Faktoren vorhanden sein, so z. B. die Einnischung, der Zufall und Abweichungen von der vollständigen Durchmischung der Erbanlagen.

Unter Einnischung versteht man, daß für bestimmte Arten Lebensbereiche und Nahrungsquellen erhalten blieben, die von bevorteilt weiter entwickelten Nachkommen nicht mehr beansprucht wurden. Dieser Einnischung verdanken wir, daß heute noch stammesgeschichtlich sehr alte Arten — etwa die Kopffüßler — erhalten blieben.

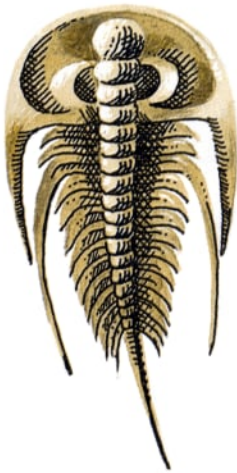
In dem Faktor »Zufall« sind alle die wirkenden Ursachen zusammengefaßt, die zu bestimmten Zeiten zufällig zusammentrafen und zu größeren Sprüngen der Entwicklung geführt haben.

Zu Abweichungen von der vollständigen Durchmischung der Erbanlagen führten alle Arten von Isolation, z. B. die räumliche Isolation bestimmter Arten, aber auch die biologische Isolation, die durch sexuelle Fortpflanzung entsteht.

Man schätzt das Alter der Erde, gestützt vor allem auf Altersbestimmungen von Gesteinen aus ihrem Gehalt an Zerfallsprodukten der radioaktiven Elemente Uran, Thorium und Aktino-Uran, auf etwa 5 Mrd. Jahre. Nach rund einer Milliarde von Jahren hatte sich der glühende Planet so weit abgekühlt, daß sich eine feste Gesteinskruste ausbilden konnte. In den Becken dieser Kruste sammelte sich im Laufe von vielen Millionen Jahren Wasser. Damit war die Voraussetzung für die Entwicklung belebter Materie entstanden. Die Erdatmosphäre besaß zu dieser Zeit eine völlig andere Zusammensetzung als heute. Sie enthielt große Mengen Wasserstoff, Methan, Ammoniak und Wasserdampf, dagegen nur sehr geringe Mengen von freiem Sauerstoff.

A. I. Oparin entwickelte eine Theorie, nach der sich unter Einwirkung von Wärme, UV-Strahlung der Sonne und elektrischen Entladungen aus Reaktionen zwischen den Gasen der Uratmosphäre die ersten organischen Moleküle als Vorstufen belebter Materie gebildet haben. Später konnte mehrfach in Experimenten nachgewiesen werden, daß sich aus den genannten Gasen unter ähnlichen Bedingungen tatsächlich Aminosäuren und andere Moleküle bilden, die wir heute als Bausteine des Lebens kennen.

In der zweiten Jahrmilliarde des Erdalters entstanden in den großen Wasserbecken die ersten einzelligen Lebewesen und aus diesen mehrzellige Lebewesen mit fortschreitender Differenzierung ihrer Zellen. Ammoniak und Methan verschwanden aus der Gashülle. Gleichzeitig nahm der Sauerstoffgehalt allmählich zu. In der dritten und vierten Jahrmilliarde bildeten sich dann mehr und mehr vielzellige Pflanzen und Tiere im Wasser. Erst vor etwa 400 bis 450 Mill. Jahren begannen Pflanzen das Festland zu besiedeln. Wiederum mehrere Millionen Jahre später traten die ersten Landtiere auf. Die ältesten Wirbeltierreste wurden in Gesteinsschichten gefunden, die 350 Mill. Jahre alt sind. Die Entwicklung von höheren Primaten (Menschenaffen) zum Menschen — so nimmt man nach Skelettfunden an — vollzog sich erst in den letzten 10 Mill. Jahren.



Tribolit (Cambrium)



Koralle (Devon)



Molluske (Jura)

Niedere Tiere aus der Urzeit der Erde

In diesen gewaltigen Zeiträumen entstanden durch fortgesetzt auftretende Mutationen und nachfolgende Selektion im Zusammenwirken mit den übrigen Evolutionsfaktoren die zahllosen wunderbaren Strukturen der Pflanzen- und Tierwelt: bis zum äußersten optimierte Gerüste, Gewebe, Stoffwechselreaktionsketten, Mechanismen, Informationsaufnahme- und -verarbeitungsorgane. Wir finden Regelkreise äußerster Stabilität und Variabilität, Informationsspeicher verblüffender Leistungsfähigkeit und biologische Sensoren, die auf ein Lichtquant oder ein Fremdmolekül reagieren. Überall in der Natur wird mit einem Minimum an Material, Volumen und Energie ein Höchstmaß an Wirksamkeit und Zuverlässigkeit erreicht. Diese Resultate der Entwicklungsstrategie der Natur sind häufig vergleichbaren technischen Konstruktionen und Systemen in ihren Leistungsparametern weit überlegen. Vieles, was wir heute durch Probieren oder auch mit Computerrechenprogrammen zu optimieren versuchen, hat die Natur durch die Evolution in vielen Millionen Jahren längst optimiert.

Dafür ein Beispiel: Im Blut beträgt der Volumenanteil der roten Blutkörperchen etwa 44%. Eine Optimierungsrechnung ergibt für maximale Förderleistung 43,3%. Die Evolution hat also längst zu diesem Optimum geführt. Wir werden noch eine ganze Reihe solcher Beispiele kennenlernen.

Vorbilder der Natur für die Technik zu nutzen bedeutet, sich der ungeheuren Fülle an Resultaten der Evolution sinnvoll zu bedienen. Es ist unmöglich, heute schon den ganzen Umfang, die Vielfalt der Möglichkeiten zu übersehen, die in diesem Angebot der Natur enthalten sind.

Anfangsform



optimierte Endform



Optimierung einer Düse für maximalen Schub nach der Evolutionsstrategie (I. Rechenberg)

Aber damit nicht genug. Man kann mit Erfolg die Entwicklungsstrategie der Natur selbst als Methode auf die Technik übertragen. Mit dieser Möglichkeit beschäftigte sich I. Rechenberg in mehreren Arbeiten nach 1970. Er übertrug die Evolutionsfaktoren, zunächst nur die Schritte Mutation und Selektion, in ein technisches Handlungsschema. Eine Mutation ist darin eine willkürliche Abweichung von einer gegebenen Konstruktion. Danach wird die veränderte Konstruktion getestet und die ungünstigere Variante verworfen, eine verbesserte Variante beibehalten. Diese Entscheidungen entsprechen der Selektion.

Nach dieser Methode führte Rechenberg die Optimierung einer Strahldüse auf maximalen Schub durch. Er zerlegte dazu die Düse in Segmente, deren Formen schrittweise einzeln verändert wurden. Es gelang ihm so, in etwa 50 simulierten Mutationsschritten die optimale Form aufzufinden. Beispiele für Probleme, die nach demselben Verfahren lösbar sind, stellen z. B. die Optimierung der Gestalt von Kühlrippenkörpern oder das Aufsuchen einer Stabtragwerkkonstruktion dar, bei der bei vorgegebener Tragfähigkeit ein Minimum an Material und Gewicht erreicht wird.

Bei den Beispielen handelt es sich um solche Aufgaben, die mathematisch nicht exakt genug erfaßbar sind, wo folglich langwierige Berechnungen, auch wenn sie mit Computern durchgeführt werden, nicht zum Ziel führen. Eine rechnergestützte Evolutionsstrategie bietet da offenbar bessere Erfolgsaussichten.

Rechenberg verbesserte die beschriebene Anwendung der Evolutionsstrategie auf technische Probleme durch eine Reihe von theoretischen Überlegungen und durch Einführung weiterer Evolutionsfaktoren. So fand er z. B., daß das Verfahren nur dann zufriedenstellend konvergiert, wenn die Mutationsschritte richtig eingestellt sind. Die Schrittweite ist optimal,

wenn jede fünfte Mutation zu einem Erfolg führt. Variable Schrittweiten repräsentieren gewissermaßen den als Zufall bezeichneten Faktor. Weitere Verfeinerungen der Methode mögen gelingen, denn auch in der Natur ist die Evolutionsmethode nicht immer gleichgeblieben, sondern hat sich selbst weiter entwickelt.

Negative Aspekte biologischer Vorbilder

Viele Ergebnisse und Erkenntnisse aus biologischer Forschung der letzten zwei Jahrzehnte, besonders auf den Gebieten der Biochemie, der Zell- und Molekularbiologie, lassen neue »Welten« erkennen, zu denen sich der Mensch mit modernen Geräten und Untersuchungsmethoden den Weg bereitet hat. Dabei zeichnen sich auch sehr viele Möglichkeiten der Übertragung biologischer Erkenntnisse in technische Bereiche ab. Wir haben schon darauf hingewiesen, daß gerade diese Situation dazu beigetragen hat, die Natur als Vorbild der Technik attraktiv werden zu lassen.

In diesem Zusammenhang müssen aber einige negative Aspekte biologischer Vorbilder bedacht werden.

Zunächst ist bei allen biologischen Strukturen, Funktionseinheiten und Systemen genau zu prüfen, für welche äußeren Bedingungen sie im Laufe der Evolution optimiert wurden. Wir stellen bei Pflanzen und Tieren immer wieder eine äußerst präzise Anpassung an die Bedingungen ihrer Umwelt fest. Wir dürfen dann aber nicht erwarten, daß unter anderen Bedingungen auch noch optimales Verhalten vorhanden ist.

Das oberste Prinzip der Optimierung aller Strukturen und Funktionen in der Natur ist die Erhaltung der Art. Diesem ist die Erhaltung des Individuums untergeordnet. Pflanzen und Tiere besitzen sehr unterschiedliche Lebenszeiten. Wir finden tausendjährige Bäume, daneben aber Stauden und Gräser, deren Stengel und Halme nur einen Sommer lang bestehen müssen. Neben vielen Säugetieren, die ein oder mehrere Jahrzehnte leben, ist die Natur reich an Arten, deren Individuen nur Monate oder Wochen existieren.

Ein anderer Aspekt ist die über längere Zeit dauernde Funktionsweise biologischer und damit verglichener technischer Objekte. Für die Funktion biologischer Systeme und Organe sind Ruhepausen notwendig, ohne die sie ihre Leistungsfähigkeit nicht erhalten können. Muskeln ermüden, Rezeptor- und Nervenzellen und die aus ihnen aufgebauten Organe brauchen Erholungsphasen, ohne die sie in kurzer Zeit versagen würden. Die extrem hohe Zuverlässigkeit, die wir in den meisten biologischen Funktionssystemen finden, besteht nur unter der Voraussetzung, daß ein einigermaßen gleichbleibender Rhythmus von Arbeit und Ruhe ständig eingehalten wird.

Die Natur läßt diesen Wechsel von Arbeits- und Ruhephasen auch zu. In der Technik verlangen wir aber oft zuverlässiges Funktionieren über alle 24 Stunden des Tages. Wir sehen gerade das ermüdungsfreie Arbeiten von Maschinen, Signalanlagen und Computern als Vorteil an. Biologische Vorbilder und technische Systeme müssen also Vergleiche von Art und Dauer der auftretenden Belastungen bestehen können.

Die spezialisierten Zellverbände und Organe der Pflanzen und Tiere sind in den Stoffwechsel des Lebewesens eingebettet. Es gelingt nur in wenigen Fällen, die Funktionen von bestimmten Organen, etwa die eines Froschherzens, eines Muskels oder eines Auges, außerhalb des Tierkörpers längere Zeit aufrechtzuerhalten. Abgesehen von der Energieversorgung durch den Stoffwechsel, wirkt dieser auch Abnutzungerscheinungen entgegen. Ferner erhalten viele Organe materielle Steuerimpulse über den Stoffwechsel. Diese und ähnliche Effekte müssen in technischen Systemen grundsätzlich anders erzeugt werden.

Schließlich wollen wir noch einige Probleme der Größenverhältnisse in biologischen und andererseits in technischen Gebilden erwähnen. Vergleicht man etwa einen Grashalm mit einem Stahlmast, den fliegenden Vogel mit dem Flugzeug oder die Ultraschallortung der Fledermäuse mit einem Radarsystem, so ist es unzureichend, oft sogar unzulässig, wenn nur geometrische Verhältnisse, relative Gewichte oder andere relativierte Größen betrachtet werden, so als ob sie sich beliebig in viel größere Dimensionen übertragen ließen. Das ist meist nicht der Fall, weil sich dabei andere physikalische Parameter, etwa Festigkeit, Luftwiderstand oder Energiebedarf, nicht proportional, sondern nach anderen naturgesetzlichen Zusammenhängen ändern.

Wenn wir dennoch hier nicht auf derartige Vergleiche verzichten, so nur deshalb, weil sie die ungeheure Vielfalt der Leistungen im Pflanzen- und Tierreich demonstrieren und nicht als Ganzes, aber manchmal in bestimmten Details Vorbildelemente für technische Ideen abgeben können.

Es gibt aber noch eine andere Art negativer Aspekte biologischer Vorbilder, die zu ernststen Gefahren für die Menschheit werden können. Die großen Fortschritte bei der Erforschung der Lebensfunktionen in Pflanzen, Tieren und Menschen, die Resultate der Biochemiker und Molekularbiologen über Strukturen und Funktionen der Erbinformationen, der Neurobiologen über Informationsverarbeitungsprozesse in Nervensystemen oder auch die Forschungsergebnisse der Agrarwissenschaftler enthalten zunehmend Möglichkeiten für Entwicklungen, die dem Sinn des Lebens, dem Wohl der menschlichen Gesellschaft zuwiderlaufen. Es ist kaum möglich, die Vielzahl solcher Gefahren für die Zukunft heute schon zu übersehen.

Anfang der siebziger Jahre gelang es, bei bestimmten Bakterienstämmen (*Escherichia coli*) gezielt Gene, die Träger der Erbinformationen, auszutau-

schen. Seitdem wurden an vielen Orten solche Experimente fortgesetzt. Ziel ist dabei unter anderem, bestimmte Wirkstoffe in Bakterienkolonien produzieren zu lassen. Das ist inzwischen in einigen Fällen gelungen. Es ist nicht leicht, die Gefahren zu ermessen, die sich mit dieser Entwicklung verbinden. Eingriffe in Gleichgewichte der Natur mit unübersehbaren Folgen können daraus entstehen. Deshalb forderte im Juli 1974 eine Gruppe von Molekularbiologen in einem Memorandum die Einstellung bestimmter Gen-Experimente. Daraufhin wurde eine Reihe von Sicherheitsmaßnahmen für Laboratorien festgelegt, in denen Gen-Experimente mit Bakterienstämmen durchgeführt werden. Diese erlauben z. B. das Arbeiten nur in Räumen, die ein Übertragen von Bakterien in die Außenwelt mit Sicherheit ausschließen.

Gezielte Veränderungen an Genen, etwa in Zuchtungsversuchen oder zur Behandlung von Erbkrankheiten, führen zu Methoden, die auch zu ganz anderen Zwecken der Manipulation eingesetzt werden könnten.

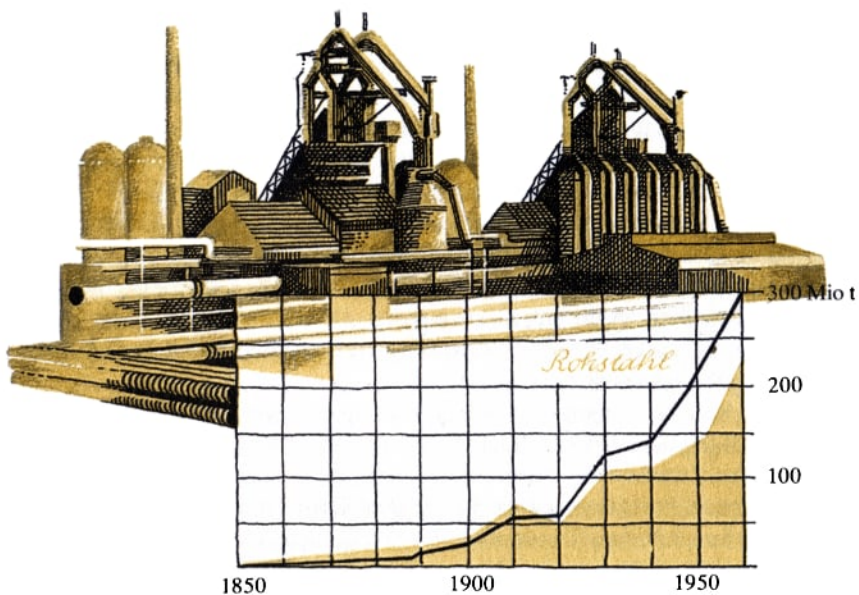
Zu ähnlichen Problemen führt die weitere Erforschung der Zentralnervensysteme von höheren Tieren und vom Menschen. Die fortschreitenden Erkenntnisse über Neuronen (Nervenzellen), Nervenbahnen oder Vorgänge innerhalb der Neuronen und deren Zusammenwirken schaffen Ansatzpunkte für Manipulationen von Menschen oder Menschengruppen.

An diesen Beispielen wird die ungeheure Verantwortung der Menschen für Wissenschaft und Technik offenkundig. Und sie wächst mit jedem Fortschritt der Technik, mit jeder neuen Entdeckung.

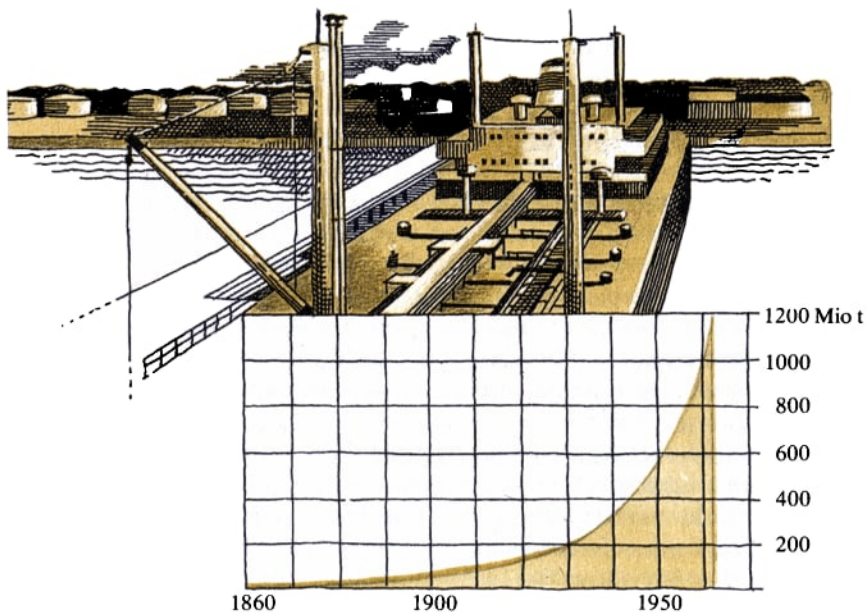
Grenzen technischer Entwicklung

Die Entwicklung der Technik vollzieht sich heute schon in einem atemberaubenden Tempo, das in Zukunft nur noch zunehmen wird. Geräte, Maschinen, ja ganze Fertigungsstraßen werden nicht mehr dann verschrottet, wenn sie funktionsuntüchtig geworden sind, sondern viel früher, weil andere Geräte und Maschinen rationeller arbeiten, schneller, besser produzieren, weniger Material und Energie verbrauchen oder menschliche Arbeitskraft einsparen. Und auch diese werden in wenigen weiteren Jahren wieder »moralisch veraltet« sein.

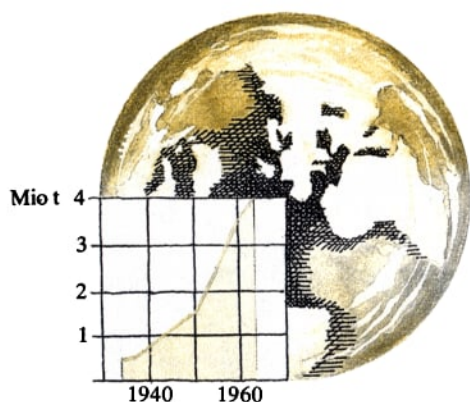
Wo sich noch vor sechzig Jahren einzelne Forscher, Erfinder und Ingenieure um die Lösung von Problemen mühten, wo vor dreißig Jahren auf der ganzen Erde zwei oder drei kleine Gruppen am gleichen Problem arbeiteten, da sind heute, sofern es sich um Schwerpunkte technischer Entwicklung handelt, zahlreiche große Teams aus Spezialisten aller einschlägigen Fachrichtungen am Werke, ausgerüstet mit modernstem Forschungsgerät. Über internationale Fachliteratur, auf Tagungen und Kongressen findet



Welterzeugung Roheisen und Rohstahl



Weltförderung Erdöl



Welterzeugung Aluminium

ein intensiver Austausch ihrer Erfahrungen und Ergebnisse statt, der die wissenschaftlich-technische Zusammenarbeit bis zu einem gewissen Grade wahrhaft weltweit macht.

Angesichts dieses Aufwandes ist wohl die Frage erlaubt, wo diese Entwicklung noch hinführen soll. Sind da nicht Grenzen, die der Mensch nicht überschreiten kann?

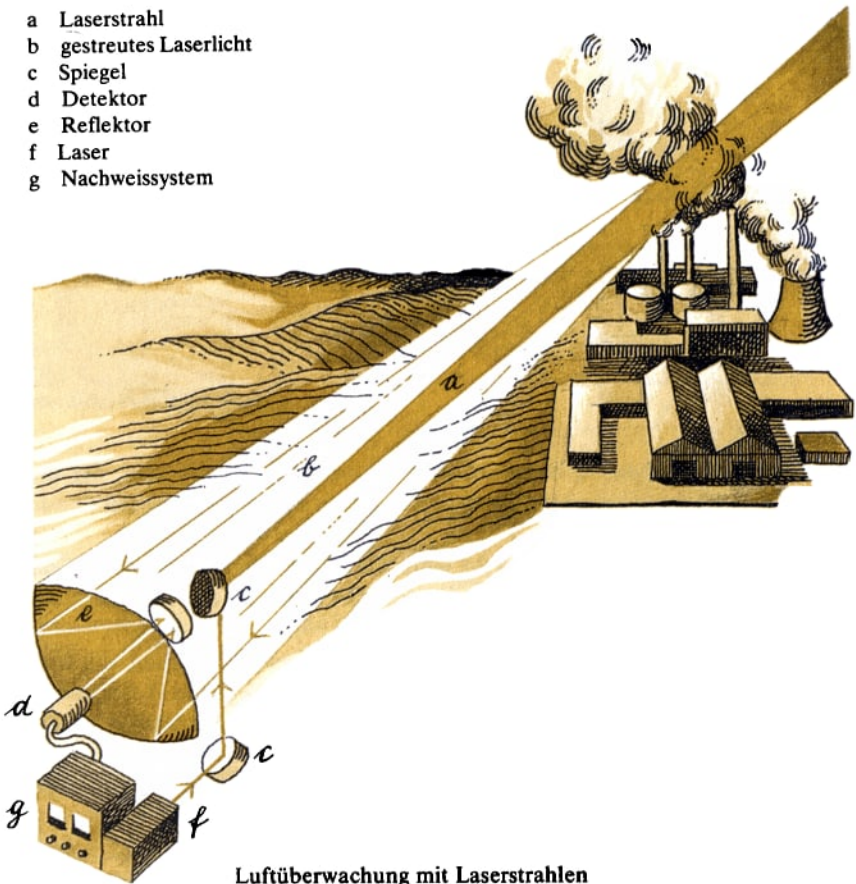
Betrachtet man Statistiken – die Zunahme der Erdbevölkerung, die Entwicklung der Nahrungsgüterproduktion, den Anstieg des Energieverbrauchs der Erdbevölkerung – und extrapoliert diese Statistiken in die kommenden Jahrzehnte, so scheinen große Probleme und Schwierigkeiten unausweichlich. Für die technische Entwicklung sind vor allem die Perspektiven der Energie- und Rohstoffversorgung zu betrachten.

Die Vorräte der Erde an fossilen Brennstoffen, an Metallen und Salzen sind sicher nicht unendlich groß. Auch die Produktion an pflanzlichen und tierischen Rohstoffen, wie Holz, Fette, Wachse, Leder und Wolle, kann nicht beliebig gesteigert werden.

Es gibt Schätzungen, nach denen die Metalle Silber, Aluminium, Zink, Quecksilber, Blei und Zinn bis zum Jahr 2000 erschöpft sein werden, einige Jahrzehnte später auch Chrom, Wolfram, Nickel und Eisen. Viel ist schon über die Erschöpfung der Erdölvorräte geschrieben worden. Für die Erdöllagerstätten der arabischen Halbinsel liegen z. B. recht genaue Ermittlungen vor, nach denen diese bei der gegenwärtigen Produktion in fünfzig bis sechzig Jahren zu Ende gehen werden.

Gegen solche Schätzungen und Statistiken gibt es zahlreiche Einwände. Zum ersten erfassen sie meist nicht die Vorräte der Erde, sondern die ökonomisch abbauwürdigen Vorräte. Zum zweiten sind weite Bereiche der Erde noch nicht oder nur mit unzureichenden Methoden auf Bodenschätze untersucht worden. Neue geologische Forschungen, neue Erkundungsme-

- a Laserstrahl
- b gestreutes Laserlicht
- c Spiegel
- d Detektor
- e Reflektor
- f Laser
- g Nachweissystem



Luftüberwachung mit Laserstrahlen

thoden, z. B. mit Hilfe von Erdsatelliten, haben gerade in den letzten Jahren zu bedeutenden Funden geführt. Schürf- und Bohrtechnik stoßen in immer größere Erdtiefen vor. Teile des Meeresbodens werden für die Technik immer besser erreichbar. Dennoch sagt uns die Vernunft, daß hier Grenzen sein müssen. Optimistische Statistiken mögen diese Grenzen weiter hinauschieben, sie bleiben aber eine ernste Herausforderung!

Andere Grenzen ergeben sich aus der nicht beliebig belastbaren Umwelt durch Abwärme sowie durch Abfallstoffe in fester und flüssiger Form und durch Abgase und Dämpfe. Daß aus der jüngeren Vergangenheit und Gegenwart schon erhebliche Belastungen verschiedener Art entstanden sind, die nicht immer leicht rückgängig gemacht werden können, wurde als Folge einer ausschließlich profitorientierten Produktionsweise bereits erwähnt.

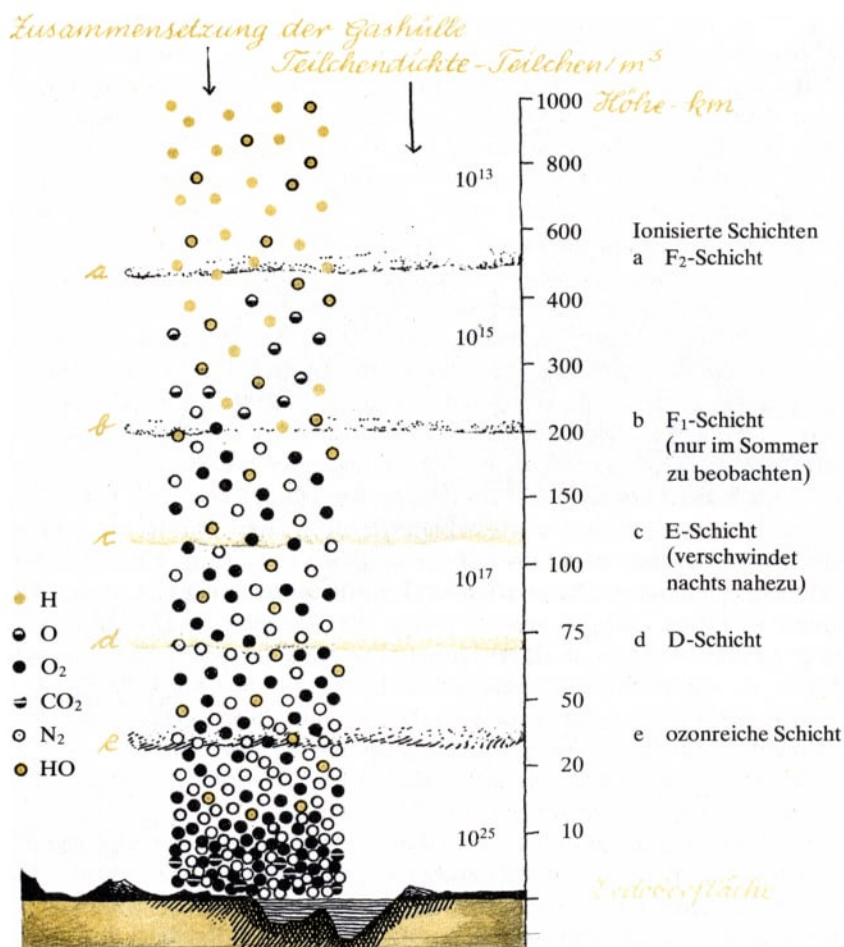
Über Großstädten und Industriegebieten, besonders über solchen mit gewissen klimatisch bedingten Sonderlagen, bilden sich, abhängig von der Wetterlage, Dunstglocken aus Industrie- und Autoabgasen. Kohlenmonoxid, Schwefeloxide, nitrose Gase, Dämpfe von Lösungsmitteln, Staub, Ruß und Rauch bilden einen Smog, der lebensgefährlich werden kann.

Inzwischen wurden Kontrollmethoden entwickelt, die sehr genaue Analysen der Luft liefern. Andere Methoden gestatten, Verursacher von Luftverunreinigungen sofort zu orten. Meist werden Lasergeräte verschiedener Art für diese Aufgabe eingesetzt.

Wesentlich kostspieliger als das Aufspüren und der Nachweis von Schadstoffen in der Luft ist die Beseitigung. Ruß, Staub und Ascheteilchen können durch elektrostatische oder mechanische Filter zurückgehalten werden. Gase werden durch spezielle reaktive Feststoff- oder Flüssigkeitsfilter aufgefangen. Das erfordert manchmal den Bau kombinierter Schadstofffilteranlagen. Derartige Abgasfilter können aber außer der Reinhaltung der Luft andere Vorteile mit sich bringen, denn Industrieabgase enthalten oft noch verwertbare Stoffe. In der UdSSR wird z. B. ein Fünftel des gesamten Schwefelsäurebedarfs aus Industrieabgasen gewonnen. Filterung und Wiedergewinnung von Rohstoffen aus Industrieabgasen sind im Begriff, zu einem wichtigen Zweig moderner industrieller Technologie zu werden, der in gewissem Maße zu Stoffkreisläufen führt. Das entspricht dem Vorbild Natur, wo wir überall den Kreislauf der Stoffe vollendet vorfinden.

Trotz einer ganzen Reihe von Forschungen mit geophysikalischen Vertikalraketen, Satelliten, Ballons und bemannten Raumschiffen wissen wir noch sehr wenig darüber, ob und wie sich Luftverunreinigungen auf die oberen Bereiche der irdischen Gashülle auswirken.

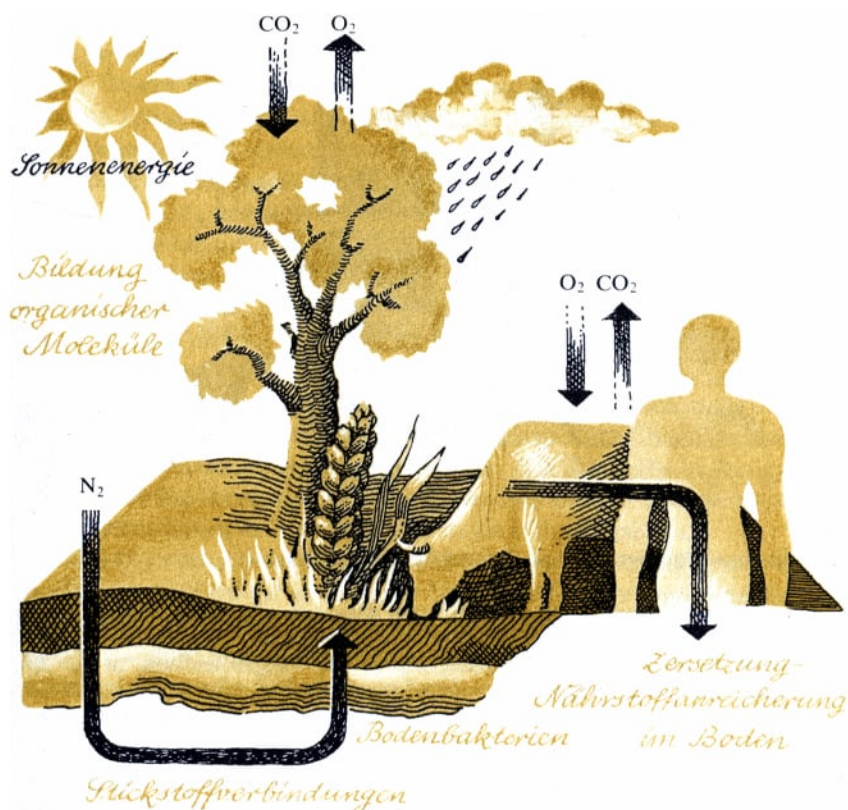
Die Bestandteile der bodennahen Atmosphäre – molekularer Stickstoff und Sauerstoff, etwa 1 Vol.-% Edelgase, hauptsächlich Argon und 0,03 Vol.-% Kohlendioxid – verändern sich in größeren Höhen vollkommen. Der Gehalt an Sauerstoff und Stickstoff nimmt ab, die leichten Gase Helium und Wasserstoff nehmen zu und bilden in Höhen über etwa 1000 km die einzigen Bestandteile der Gashülle. Schon in 10 bis 15 km Höhe – und mit der Höhe zunehmend – werden die molekularen Gase durch die UV-Strahlung der Sonne teilweise in die Atome gespalten. Dadurch entsteht atomarer Sauerstoff. Die Sauerstoffatome haben aber ein gewisses Bestreben, sich wieder zu Molekülen zu vereinigen. In diesem dynamischen Gleichgewicht zwischen Molekülsplaltung und Molekülbildung entsteht auch ein Teil von Sauerstoffmolekülen, die aus drei Sauerstoffatomen bestehen, Ozon genannt. Diese ungefähr von 10 bis 30 km Höhe reichende ozonhaltige Schicht hat eine lebenswichtige Funktion für die Biosphäre. Sie absorbiert große Teile der »harten« UV-Strahlung der Sonne, die, würde sie den Boden erreichen, alles Leben verbrennen würde.



Gashölle der Erde

Man hat deshalb Untersuchungen angestellt, welche neueren technischen Prozesse diese Ozonschicht verändern könnten. In Betracht gezogen wurden zunächst die Flüge von Überschallflugzeugen bis 18 km Höhe und Kernwaffenexplosionen. Von Flugzeugen werden keine merklich negativen Wirkungen erwartet. Steigen Rauchpilze von H-Bomben über 1 Megatonne TNT über 20 km Höhe, so kann man nicht mehr vor Beeinträchtigungen der Ozonschicht sicher sein.

1974 erschien eine aufsehenerregende Arbeit von M. J. Molina und E. S. Rowland über die ozonzerstörende Wirkung von Chlorfluormethan, dem üblichen Treibgas in Spraydosen. Es entweicht in die obere Atmo-

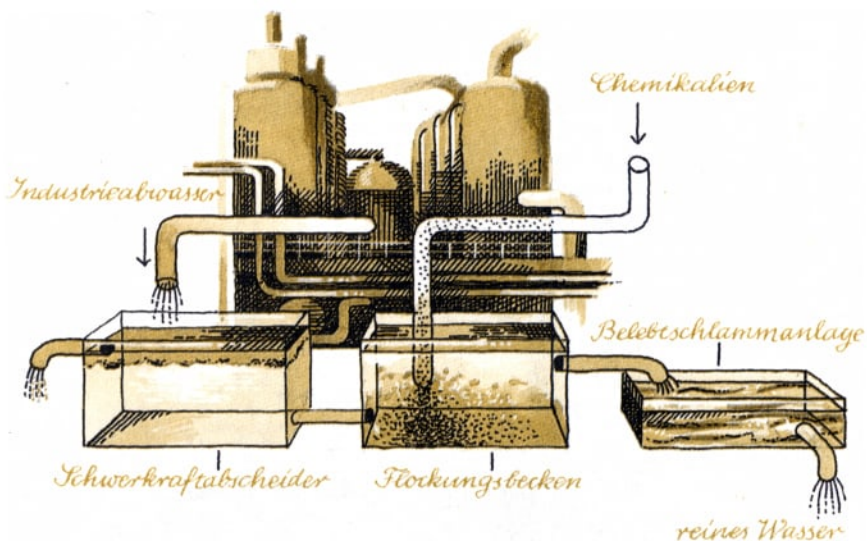


Geschlossene Stoffkreisläufe in der Natur

sphäre und kann sich dort jahrzehntelang halten. Neuere Überlegungen ergaben aber, daß dadurch nur maximal 3% des Ozons abgebaut werden.

Ernster scheint der Einfluß der weltweit eingesetzten Stickstoffdüngemittel zu sein. Er führt zur Nitratanreicherung des Bodens und als Nebenwirkung zu erhöhter Bildung von N_2O , das an die Atmosphäre abgegeben wird. N_2O (Distickstoffoxid) wird durch Ozon oxydiert, verbraucht also Ozon. Zur Zeit ist auch dieser Effekt gering. Er zeigt aber, wie kompliziert die Zusammenhänge bei Energie- und Stoffgleichgewichten in unserem irdischen Lebensraum sein können und wie groß die Verantwortung für alles Leben ist, die mit allen technischen Projekten übernommen wird.

Man kann fragen, ob die Sauerstoffbilanz der irdischen Gashölle in Zukunft so stabil sein wird, wie sie es bis heute war. Der Luftsauerstoff wird fast ausschließlich durch die grünen Pflanzen erneuert. Menschliche und tierische Atmung sowie technische Verbrennungsprozesse, ferner Mi-



Schema einer Wasserreinigungsanlage für Industrieabwässer

Im Schwerkraftabscheider werden Öle und schwimmende Schmutzstoffe abgetrennt. Im Flockungsbecken werden durch Zusatz bestimmter Chemikalien im Wasser gelöste Verunreinigungen wie Salze, Säuren und Laugen entfernt. In der Belebtschlammanlage bauen Mikroorganismen organische Verunreinigungen (z. B. Lösungsmittel) ab und reichern das Wasser mit Sauerstoff an.

kroorganismen und Pflanzen im Dunklen verbrauchen etwa die gleiche Menge Sauerstoff (ca. 10^{11} t O_2 /Jahr), die durch Photosynthese der Grünpflanzen des Festlandes erzeugt werden. Der Anteil technischer Verbrennungsprozesse in dieser Bilanz wird gegenwärtig auf etwa 14% geschätzt. Eine Steigerung dieses Anteils ist gegenüber dem gegenwärtigen Niveau sicher noch möglich, aber doch nicht unbegrenzt für alle Zukunft.

Die genannten Probleme sind durchaus nicht die einzigen bezüglich Einwirkungen menschlicher Tätigkeit auf lebenswichtige Gleichgewichte in der irdischen Gashülle. Im 3. Kapitel werden wir auf die Bedeutung des Kohlendioxids für den Wärmehaushalt der Erde zurückkommen. Wir müssen gewärtig sein, daß neue oder umfangreichere Beobachtungen auf neue Gefahren aufmerksam machen.

Ernste Gefahren resultieren auch aus der zunehmenden Verunreinigung der Gewässer. Allen Unrat dem fließenden Wasser anzuvertrauen ist eine Gewohnheit der Menschen, die bis in die Anfänge der Gewerbe im frühen Mittelalter zurückreicht. Durch die gewachsene Bevölkerung, vor allem aber durch die modernen chemischen Betriebe, ist die Flut der übelriechenden, giftigen Abwässer so gestiegen, daß in allen Industriestaaten Maßnah-

men ergriffen werden mußten, um Flüsse und Seen davor zu bewahren, zu toten, stinkenden Kloaken zu werden. Allmählich setzt sich das Prinzip durch, Wasser nicht erst vor der Gewinnung von Trinkwasser zu reinigen, sondern schon am Ort der Verunreinigung durch kombinierte physikalisch-chemisch-biologische Reinigung von Ballaststoffen wie Salzen, Säuren, Laugen und organischen Stoffen zu befreien. Dabei gelingt es auch, wie im Fall der gasförmigen Abprodukte, mehr und mehr, wertvolle Stoffe als Sekundärrohstoffe zurückzugewinnen.

Schlimme Ausmaße hat die Verunreinigung der Meere vor allem durch Rohöl angenommen. So berichtet z. B. Thor Heyerdal von seinen Expeditionen Kontiki und Ra, daß sie sowohl im Pazifik als auch im Atlantik tagelang durch Wasser fuhren, in dem Öklumpen in großen Mengen trieben.

Durch Tankerhavarien werden ganze Küsten mit Ölschlamm bedeckt. Schiffe lassen ihr Altöl auf offener See ab. Küstennahe Chemiebetriebe leiten ihre Abwässer ungereinigt ins Meer. Die Eingriffe in biologische Gleichgewichte lassen sich oft lokal feststellen, in ihren Langzeitfolgen für das gesamte Leben auf der Erde aber meist nicht übersehen.

Schließlich müssen wir auch auf das Wachsen des Anfalls fester Abfallstoffe, insbesondere auf alles, was in dem Begriff Müll zusammengefaßt ist, hinweisen. Dieser Müll türmt sich zu Tausenden von Tonnen auf Halden an den Rändern unserer Städte. Was da aber auf den Halden liegt, enthält noch viele wertvolle Rohstoffe und z. T. erhebliche Aufwände an Energie und Arbeitskraft. Metallschrott ist mit viel weniger Aufwand wieder zu Metallen zu verarbeiten als entsprechende Roherze. Rohglas ist aus Glasbruch weit billiger zu erschmelzen als aus Glassand und Soda. Gummi alter Reifen, Zellstoffe und Plaste lassen sich aufbereiten.

Man kann heute feststellen, daß vom einfachen Sammeln und Sortieren von Altstoffen bis zur Entwicklung neuer Technologien der Nutzung von industriellen Abprodukten die Gewinnung von Sekundärrohstoffen zu einem bedeutenden Faktor in der Rohstoffversorgung geworden ist. In der DDR stammen z. B. schon 40% der Rohstoffe für Papier und Pappe aus gesammelten Altstoffen. 75% des Stahlbedarfs der DDR, 40% des Kupfers, 17% des Aluminiums werden aus dem Metallschrottaufkommen gedeckt. Ähnliche Zahlen weist die Wirtschaft der UdSSR aus, die wegen ihrer absoluten Größe noch bedeutsamer sind. In den Jahren 1970 bis 1975 konnten in der UdSSR durch gesammelte Altstoffe 36 Mill. m³ Nutzholz, 2 Mill. t Baumwolle, Wolle und andere Faserstoffe und über 600 000 t Kautschuk eingespart werden.

Auch bei der Nutzung von industriellen Abfallstoffen werden viele neue Wege beschritten. Auf dem ersten Symposium der RGW-Länder zur Problematik der Nutzung industrieller Abprodukte 1976 in Dresden wurden mehr als hundert wirtschaftliche Lösungen solcher Probleme vorgetragen.

Sie alle sind Schritte auf dem Wege zu Stoffkreisläufen, durch die Rohstoffversorgungsfragen auf neue Art gelöst werden.

Betrachten wir die Grenzen unserer Technik – begrenzte Rohstoffvorräte und Energiereserven, Grenzen der Verunreinigung von Luft, Wasser und Land –, so sind es die Grenzen der Technik in ihren gegenwärtigen Formen und Methoden. Wenn die kapitalistische Gesellschaftsordnung durch die ihr innewohnenden Maßstäbe andere Formen und Zielbestimmungen nicht zuläßt, so sind das Grenzen, die zu dieser Gesellschaftsordnung gehören. Für die technische Entwicklung schlechthin sind Naturgesetze Rahmenbedingungen, in denen sie sich zu bewegen hat. Es ist geradezu Aufgabe und Sinn einer menschenwürdigen Technik, sich eben ohne Schaden für die menschliche Gesellschaft innerhalb dieser Grenzen weiterzuentwickeln.

Es ist naheliegend, daß sich gerade für so gestellte Aufgaben Vorbilder in der Natur finden lassen.

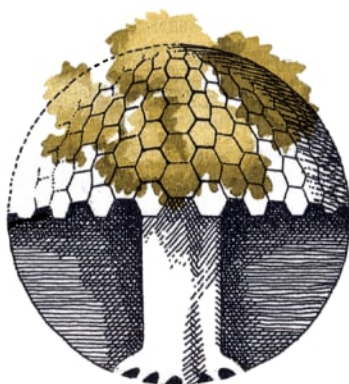
Man hat z. B. erst in den letzten Jahren herausgefunden, daß sich Wasser- und Uferpflanzen bis zu einem gewissen Grade auf Ballast- und Giftstoffe in den Gewässern einzustellen vermögen. Sie können z. B. Quecksilbersalze, Sulfate, Phenole, Cyanide und andere Stoffe aufnehmen und damit das Wasser von diesen Verunreinigungen weitgehend befreien. So scheiden Binsen ein Überangebot an Salzen über ihre Halme wieder ab. Viele Pflanzen können durch Wurzelabscheidungen im Wasser verteilte organische und anorganische Schwebeteilchen binden, manche sogar saures oder alkalisches Wasser neutralisieren. Man hat Pflanzen, z. B. die oft an Bachufern wachsenden Schwarzerlen, gefunden, an deren Wurzeln Bakterienkolonien leben, die Erreger von Cholera, Typhus und Ruhr im Wasser abtöten. Gelöste Stoffe werden von Pflanzen mineralisiert.

Wir werden in den folgenden Kapiteln auf weitere Beispiele stoßen, die neue Wege zur humanen Technik weisen und Vorbilder der Natur zur Hilfe haben.

Schwieriger ist die Problematik der sich erschöpfenden Ressourcen. Es ist jedoch fragwürdig, aus dem gegenwärtigen Rohstoffverbrauch auf den Bedarf in kommenden Jahrzehnten zu schließen. Bisher haben sich die meisten Prognosen als falsch erwiesen. Überall wird intensiv daran gearbeitet, die Materialeinsätze zu verringern, Verluste durch Korrosion zu senken sowie neue Stoffe mit besseren Eigenschaften zu entwickeln. Die wichtigen Element-Rohstoffe, vor allem die Metalle, sind sämtlich wiedergewinnbar. Es ist immer nur eine Frage der Aufwände, der Verfahren und der Kosten. Manches, was wir heute als undurchführbar oder unwirtschaftlich verwerfen müssen, wird vielleicht durch künftige Aufbereitungsverfahren zugänglich.

2. Kapitel

Baumeister Natur



Bautechnik zwischen gestern und morgen

Burgen und Schlösser, Kirchen und Stadtmauern, alte Häuser, Brücken und Türme stehen als Zeugen für Baukunst und Bautechnik früherer Jahrhunderte. Sie beeindruckten oft nicht nur durch ihr Alter, sondern auch durch Ausgewogenheit der Proportionen, durch eine Schönheit, die man erfaßt, ohne sie sofort ergründen zu können.

Wir erwarten auch von zukünftigen Bauwerken nicht nur hohe Zweckmäßigkeit durch moderne Technik. Die Bautechnik prägt große Teile der sichtbaren Umwelt, in der sich der Mensch wohl fühlen soll. Bauwerke müssen deshalb auch nach Maßstäben der Ästhetik bewertet werden. Diese entwickelt der Mensch aus Anschauungen von der Natur. Das Vorbild Natur erhält daher für Bautechnik und Architektur eine doppelte Bedeutung.

Ein wesentliches Charakteristikum der Bautechnik ist die Tatsache, daß die Bauwerke aus allen Jahrhunderten durch die Baumaterialien geprägt sind, die gerade zur Verfügung standen. Häufig finden wir in den älteren Bauwerken der Städte das Gestein der Umgebung wieder. Im Flachland, wo Gestein als Baumaterial nicht vorhanden war und nur Fürsten oder später reiche Kaufleute Steine von weither heranschaffen lassen konnten,

herrscht der gebrannte Ziegel vor. Wir sind erstaunt, was Bauhandwerker früherer Jahrhunderte aus diesen Materialien geschaffen haben.

Die Bautechnik unserer Zeit erhält ihr Gepräge durch die Stahlbetonbauweise. Erst durch die Kombination von Baustahl und Beton, auf die wir noch einmal zurückkommen wollen, werden tragende Baukonstruktionen möglich, die den Bau von Hochhäusern, großen, flach überdachten Hallen oder weit gespannten Brücken gestatten. Die Kombination von Stahl und Beton erlaubt auch, zu industriell vorgefertigten Blockbauteilen überzugehen und damit die Produktivität in der Bautechnik enorm zu erhöhen.

Die moderne Bautechnik hat sich mit einer ganzen Reihe von Problemen auseinanderzusetzen, die teils durch neue Bauweisen entstanden sind, vor allem aber durch Umweltbedingungen und andere technische Zusammenhänge hervorgerufen werden. Drei seien genannt:

Mit jedem neuen Bau wächst der Bedarf an Wärme- und Elektroenergie. In früheren Jahrzehnten spielten Fragen der Wärmedämmung in der Bautechnik nur eine Nebenrolle und wurden wenig beachtet. Das war teilweise bedingt durch die ältere Bauweise, teilweise auch durch die alten Methoden der Raumheizung und durch bescheidenere Komfortforderungen. Heute verlangt sparsamer Einsatz von Energie eine äußerst wärmedämmende Gestaltung der Außenwände. Parallel zu diesem Problem steht das der Schalldämmung, insbesondere für Wohn- und Bürobauten. In der Bautechnik wurden dazu in den vergangenen Jahren schon beachtliche Lösungen entwickelt. Wir werden sehen, daß man dabei Vorbildern der Natur, ob sie als solche gesehen wurden oder nicht, schon recht nahegekommen ist.

Ein zweites großes Problem für die Bautechnik ist die Gestaltung von Bauaußenwänden, besonders solchen von Hochhäusern in Großstädten. Durch Industrie- und Autoabgase sind die Außenwände der Bauten korrodierenden Angriffen in einem früher ungekannten Maße ausgesetzt. Zudem sind die Fassaden von Hochhäusern für Reparaturarbeiten nur noch mit sehr hohem Aufwand zugänglich. Man setzt daher vorwiegend witterungsstabile Materialien, z. B. Glas, glasierte Keramik oder Metall, zur Außenverkleidung ein. Solche Oberflächen besitzen aber keine ausreichende Atmungsaktivität mehr. Man geht zur Zeit dieser Schwierigkeit durch die Installation von Klimaanlage aus dem Weg. Der Luftaustausch erfolgt so gewissermaßen kanalisiert. Bei entsprechender Auslegung bietet natürlich eine Klimaanlage mehr als bloßen Luftaustausch. Sie kann Luftfeuchte, Raumtemperatur und Staubgehalt der Luft regulieren. Jede Klimaanlage verbraucht aber relativ viel Elektroenergie und benötigt einen nicht unbeträchtlichen Teil des Gebäuderaumes.

Aus diesen Betrachtungen sollten sich künftige Aufgaben für die Entwicklung neuer Werkstoffe und Schichtstrukturen zur Gestaltung von Au-

Benwänden ergeben. Wir werden sehen, daß die Natur dazu interessante Vorbilder bereithält.

Ein drittes Problem – eigentlich ist es ein ganzer Kreis von Problemen – liegt in der Baumaterialbereitstellung. Jede intensive Bautätigkeit, die auch hohen Qualitätsansprüchen genügen soll, bedarf relativ großer Mengen hochwertiger Baumaterialien. Dazu ist eine Industrie erforderlich, in der diese Stoffe nicht nur hergestellt werden, sondern in der durch umfangreiche Entwicklungsarbeiten ständig neue Rohstoffquellen erschlossen und neue, materialsparende Methoden angewendet werden. In der DDR waren 1979 etwa 1500 Mitarbeiter der Baustoffindustrie in Forschung und Entwicklung tätig. Dazu kommen noch die Leistungen der Institute der Bauakademie, der Akademie der Wissenschaften und der Hoch- und Fachschulen.

Ein beträchtlicher Teil dieses Forschungs- und Entwicklungspotentials ist darauf gerichtet, Abprodukte aus anderen Industriezweigen als Sekundärrohstoffe für die Bauindustrie zu erschließen. Vor allem im Bergbau, bei der Verhüttung von Erzen und in der chemischen Industrie entstehen Aschen, Schlacken, Granulate und Faserstoffe, die als Baustoffkomponenten geeignet sind oder sein könnten. Oft fallen solche Abprodukte auch in großen Mengen an, was ja eine wichtige Voraussetzung für lohnende Weiterverarbeitung in der Baustoffindustrie ist.

Hier sei ein interessantes Beispiel für Forschungsergebnisse dieser Richtung genannt. In Entschwefelungsanlagen für bestimmte Industrieabgase wird Kalk als Absorptionsmittel verwendet. Schwefeloxide ergeben zusammen mit Kalk Gips, also einen Stoff, der in der Bauindustrie gebraucht wird. Einem Team in Kobe, Japan, gelang es, aus solchem Gips mit einem besonders präparierten Katalysator nadelförmige Gipskristalle – sogenannten Gipsbart – zu erzeugen, aus denen sich unbrennbares Gipspapier herstellen ließ.

Unser Beispiel zeigt, daß gerade die Bautechnik viele Möglichkeiten sinnvoller Weiterverwendung von Stoffen bietet, die sonst die Umwelt belasten würden.

Eine weitere wichtige Zielstellung der Bautechnik und Baustoffforschung besteht darin, leichter und mit insgesamt geringerem Materialeinsatz zu bauen. Hochwertige Stoffe mit solchen Eigenschaften wie hohe Wärme- und Schalldämmung, Widerstandsfähigkeit gegen Korrosion durch chemisch aggressive Luftverunreinigungen, die hohe Druck- und Biegefestigkeit ausweisen, dabei relativ leicht sind und ohne Stabilitätsverlust verringerte Querschnitte und Wandstärken zulassen, sind nicht leicht zu finden. Die Baustoffforscher müssen bis zu den atomaren Strukturen und Bindungskräften in den Stoffen vordringen. Sie tun dies mit Hilfe aller zur Verfügung stehender physikalischer und chemischer Erkenntnisse, Methoden und Geräte.

Das Vorbild Natur kann ihnen dabei viele wertvolle Material- und Strukturmodelle liefern. Die Ausleseprinzipien bei der Evolution der Lebewesen waren den obengenannten Zielstellungen sehr ähnlich. Wir finden in der belebten Natur überwiegend sehr leichte Stoffe. Die meisten organischen Substanzen sind leichter als Wasser. Dennoch weisen sie sehr hohe Festigkeitswerte, hervorragende elastische Eigenschaften und viele andere Vorzüge auf.

Die organischen Gebilde erhalten ihre ausgezeichneten mechanischen Eigenschaften vorzugsweise durch innere Strukturen, die zu wesentlichen Konstruktionselementen werden. Von den mikroskopisch kleinen Wundergebilden der Diatomeen und Radiolarien bis zu den Riesenstämmen der Bäume finden wir überall optimierte Lösungen der Natur. Dabei sollte auch erwähnt werden, daß oft erst durch Überlegungen und Berechnungen der Bauingenieure die Strukturen der Natur durchschaut und verstanden wurden.

Baustoff Holz

Zu den ältesten und auch heute noch unentbehrlichen Baustoffen gehört das Holz. Es bot sich dem Menschen überall da, wo Wälder große Teile des Festlandes bedeckten, als Baumaterial geradezu an. Holz ist auch heute noch das meist verwendete Material. Der Holzverbrauch der Weltwirtschaft wurde 1979 mit 2,5 Mrd. m³/Jahr angegeben und liegt damit nach Volumen und auch nach Gewicht über dem Weltverbrauch von Stahl und Kunststoffen.

Festigkeit, Härte, Elastizität und spezifisches Gewicht der Holzarten sind unterschiedlich, meist aber für bautechnische Belange sehr günstig. Auch im Wuchs und erreichbaren Alter weichen die einzelnen Baumarten voneinander ab. Tannen erreichen Höhen von über 40 m. Eukalyptusbäume können über 100 m hoch werden. Verschiedene Laubbäume entfalten ihre Äste zu eindrucksvollen Breiten, wenn ihnen genügend Raum zur Verfügung steht. Kronendurchmesser von Buchen und Linden können mehr als 30 m betragen. Die gewaltigsten Kronen entwickeln alte Feigenbäume. Sie können bis zu 7000 m² Fläche überdecken.

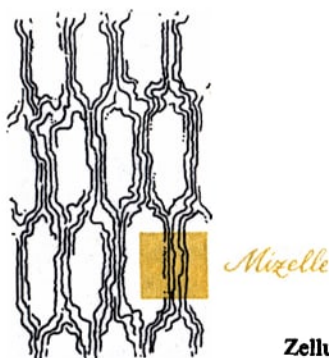
Das Alter vieler Bäume zeugt für die Widerstandsfähigkeit ihrer Stämme. 400jährige Buchen und Tannen sind keine Seltenheit. Eichen können ein Alter von 800 bis 1000 Jahren erreichen. Einzelne Exemplare sind wohl noch älter. Auf Teneriffa stehen Drachenbäume, deren Alter auf bis zu 6000 Jahre geschätzt wird. Sie sind also mehr als 1000 Jahre älter als die ägyptischen Pyramiden, die ältesten erhalten gebliebenen Großbauwerke der Menschen. Auch Affenbrotbäume und andere Arten erreichen ein Alter von mehreren tausend Jahren.



Buchenhochwald

Betrachten wir nun genauer die Strukturen des Holzes, der Rinde und der Blätter eines Baumes. Sie werden uns eine Menge interessanter Feinheiten verraten und erklären, wie in der Natur so dauerhafte Dinge zustande kommen.

Holz erhält seine bemerkenswerte Festigkeit und Elastizität durch eine relativ komplizierte innere Struktur. Sie besteht hauptsächlich aus den langen, zickzackförmigen Kettenmolekülen der Zellulose. Diese entstehen beim Zellwachstum aus Glukosemolekülen, die zuvor durch Photosynthese



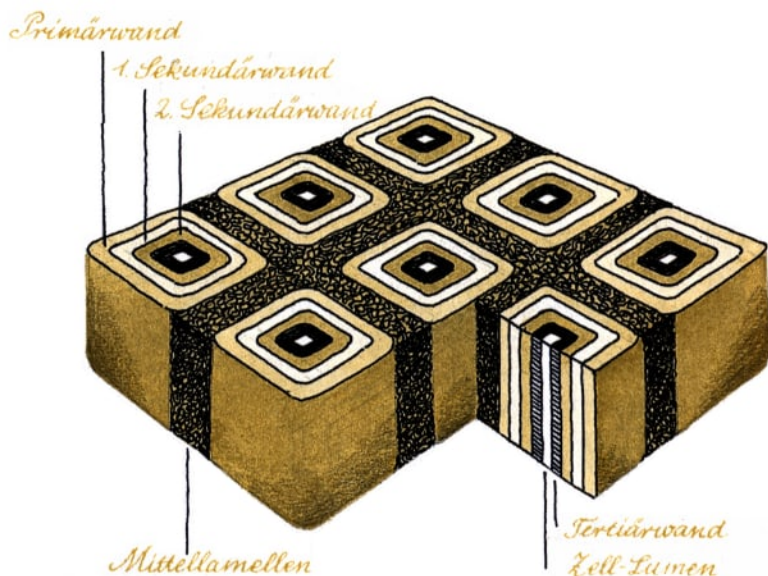
Zellulose-Molekül-Bündel (Fibrille)

in den Blättern des Baumes gebildet worden sind. Annähernd 15000 Glukosemoleküle setzen sich unter Abspaltung von Wasser zu einem Zellulosemolekül zusammen, das dann eine Länge von rund $10\text{ }\mu\text{m}$ (Mikrometern) oder $0,01\text{ mm}$ besitzt. Seine Dicke beträgt nur etwa $0,5\text{ nm}$ (Nanometer) oder $0,0005\text{ }\mu\text{m}$.

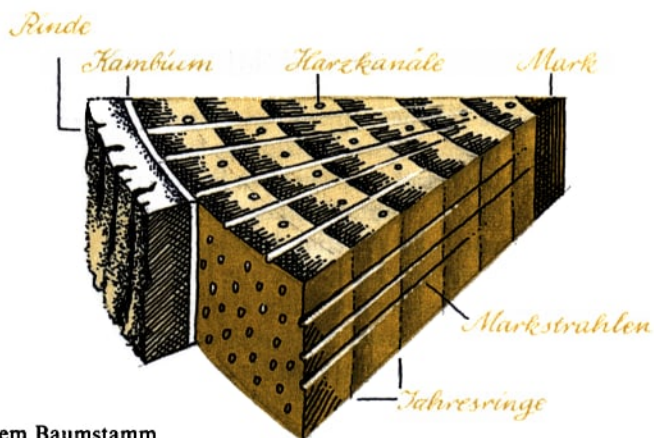
Viele Zellulosemoleküle lagern sich zu Mikrofaserbündeln zusammen, auch Mikrofibrillen genannt, die $0,1$ bis $0,2\text{ }\mu\text{m}$ dick sind. Diese Mikrofibrillen enthalten kristalline Bereiche, sogenannte Micellen. Flächig angeordnete Fibrillenbündel bilden schließlich die Lamellen, aus denen die Zellwandschichten aufgebaut sind.

Die gesamte Wand einer Holzzelle besteht nun aus mehreren Zellwandschichten, die aufgrund unterschiedlicher Strukturen und stofflicher Bestandteile verschiedene Eigenschaften zur Zellwand beitragen. Die äußere Primärwand ist aus sehr lockerem, dünnem Fibrillengewebe aufgebaut, in dem die Mikrofasern regellos verflochten sind und von dem aus Fibrillenverbindungen zu den benachbarten Zellen bestehen. Auf diese Weise fügt sich die einzelne Zelle fest in den gesamten Zellverband ein. An die Primärwand schließt sich nach innen die erste Sekundärwand an. Sie besteht aus mehreren aufeinanderliegenden Lamellen, die schraubenförmig gewickelt sind. Dadurch wird die Zellwand verstrebt und versteift. Die zweite Sekundärwand ist die dickste Schicht. Sie besteht aus parallel zur Zellachse orientierten Fibrillen. Die Tertiärwand endlich bildet die Innenwand, die das Zellumen umschließt. Im Zellumen, einer lockeren, von vielen Hohlräumen durchzogenen Struktur, geht der Transport von Wasser und Nährstoffen von Zelle zu Zelle vor sich. Die Tertiärwand wird nur von einer Lamelle gebildet, die besondere Eigenschaften besitzt. Sie wird z. B. von verschiedenen Pilzen und Chemikalien nicht angegriffen, die die Sekundärwände zerstören können.

Die Zellschicht zwischen Rinde und Holz, das sogenannte Kambium, stellt die Zone des Wachstums dar. Hier entstehen durch fortgesetzte Zell-



Holzzellen im Verband



Keilstück aus einem Baumstamm

teilung nach innen immer neue Holzzellen, nach außen die Zellen der Baumrinde.

Eine zweite wichtige Bausubstanz des Holzes außer der Zellulose ist das Lignin. Es wird auch aus Glukose aufgebaut, ist amorph und wird in den eben beschriebenen Zellaufbau eingelagert. Es hat die Eigenschaft, das

Zellulosegewebe zu verfestigen – zu verholzen. Es wirkt gewissermaßen für die Zelle antiseptisch und konservierend. Damit beeinflusst das Lignin auch die mechanischen Eigenschaften des Holzes. Nadelbäume bilden z. B. an Stellen erhöhter Druckbelastung besonders ligninreiche Zellen. An den Astunterseiten findet man Zellen, die bis zu 30% mehr Lignin enthalten. Umgekehrt findet man besonders bei Laubhölzern an vorzugsweise zugbelasteten Stellen ligninarmes Holz mit ligninfreien Zellwandschichten. Der Holzfachmann spricht in diesen Fällen von Druckholz und Zugholz.

Der Aufbau der Holzzellwand aus mehreren Schichten, die Einlagerung einer verfestigenden, konservierenden Substanz – das sind Methoden, die auch in unserer Bautechnik neue Möglichkeiten erschließen. Es gibt dafür schon zahlreiche Beispiele. Man kann durch Einspritzen spezieller Dichtmittel in stehende Ziegelwände deren Wasserdurchlässigkeit verringern und so die Wetterseiten älterer Häuser beständiger gestalten.

Die beschriebene Struktur des Holzes ist ein Beispiel für den Materialverbund – einer Prinziplösung, die in der Natur sehr verbreitet ist. In der modernen, größtenteils noch in Entwicklung befindlichen Bautechnik gibt es viele Ansätze, sich die Vorteile solcher Materialverbünde zunutze zu machen.

Vom Fachwerk zum Metalleichtbau

Die Äste eines Baumes wirken wie Stützen und Verstrebungen, die das Blätterdach tragen. Dieses Prinzip der Verstrebungen finden wir auch in der Bautechnik überall – in den alten Fachwerkbauten wie im Metalleichtbau unserer Zeit. Es führt gegenüber einer massiven Bauweise zu erheblichen Einsparungen an Material, Energie und Zeit.

Nach dem gleichen Prinzip sind alle Laubblätter von Bäumen und Stauden aufgebaut. Die sich nach außen verjüngenden Rippen eines Blattes verleihen diesem ausreichende Steifigkeit bei minimalem Gewicht. Ein Pflanzenblatt war auch Ausgangspunkt für die Idee zum ersten großen Gebäude in Metalleichtbauweise, dem Londoner Kristallpalast.

Vor der Weltausstellung 1851 in London gewann der Architekt Sir John Paxton mit seinem Entwurf ein Preisausschreiben für den Bau einer großen Ausstellungshalle. Paxton war nebenbei Amateurgärtner. Bei seiner Suche nach Ideen für eine möglichst leichte, raumüberspannende Bauweise hatte ihn, wie er selbst berichtete, die Blattkonstruktion der *Victoria amazonica* auf den entscheidenden Gedanken gebracht. Die runden Blätter dieser Seelilie, mit Durchmesser bis zu 2 m, zeigen auf der Unterseite eine sich von innen nach außen fortsetzende Verzweigung der Blattrippen. Auf diese



Fachwerkhäuser in Wernigerode (Harz), erbaut um 1680



Melastomaceenblatt (Salpingia, Brasilien)

Weise sind die Flächen zwischen den Rippen überall ungefähr gleich groß. Dieses Prinzip der Verrippung einer Fläche setzte Paxton um in die Konstruktion einer Halle aus Stahl und Glas. Der 600 m lange Londoner Kristallpalast wurde nach Paxtons Entwurf aus vorgefertigten Teilen in nur vier Monaten errichtet. Er wurde zum Vorbild einer Bauweise, die später in



Der Londoner Kristallpalast und sein Vorbild

vielfach abgewandelter Form als Metalleichtbau, Skelettbau oder Fachwerkrahmenbau in die Bautechnik einging. So werden heute Produktionshallen, mehrgeschossige Mehrzweckgebäude, Kaufhallen, Stallgebäude, Gewächshäuser oder Garagen gewissermaßen am Fließband produziert und an Ort und Stelle in kurzen Montagezeiten aufgestellt:

Eine Reihe von Problemen tritt bei der Wand-, Fußboden- und Dachgestaltung in diesen Bauweisen auf. Natürlich sollen nicht nur die Stahlroskelette der Gebäude oder die Metallrahmentteile, sondern die gesamten Gebäude schnell montierbar sein, also auch Wände, Böden, Zwischendecken und Dachverkleidungen. Als Baumaterialien verwendet man dazu häufig Gasilitbeton, profilierte und beschichtete Blech- oder Kunststofftafeln, Mineralwollmatten, Asbestwelltafeln, auch Holz, Glas und Plastdämm-



Moderne Gewächshäuser



Beheizbare Metalleichtbauhäuschen, hergestellt in Fürstenwalde für den Einsatz im sowjetischen Tjumen-Gebiet (Westsibirien) zur Erschließung von Erdölvorkommen

stoffe. Zur Schall- und Wärmeisolierung werden Asbestpappe, Kieselgur, Torfmull, Glas- und Mineralwolle, Kork und Schaumstoffe in Matten- oder Ziegelform eingesetzt. Die schall- und wärmeisolierende Wirkung dieser Stoffe beruht auf dem relativ großen Schallwellenwiderstand und der geringen Wärmeleitfähigkeit von Luft, die in Hohlräumen dieser Materialien oder zwischen ihren Fasern eingeschlossen ist. Zusätzliche Wärme- und Schalldämmung wird durch reflektierende Oberflächen erreicht.

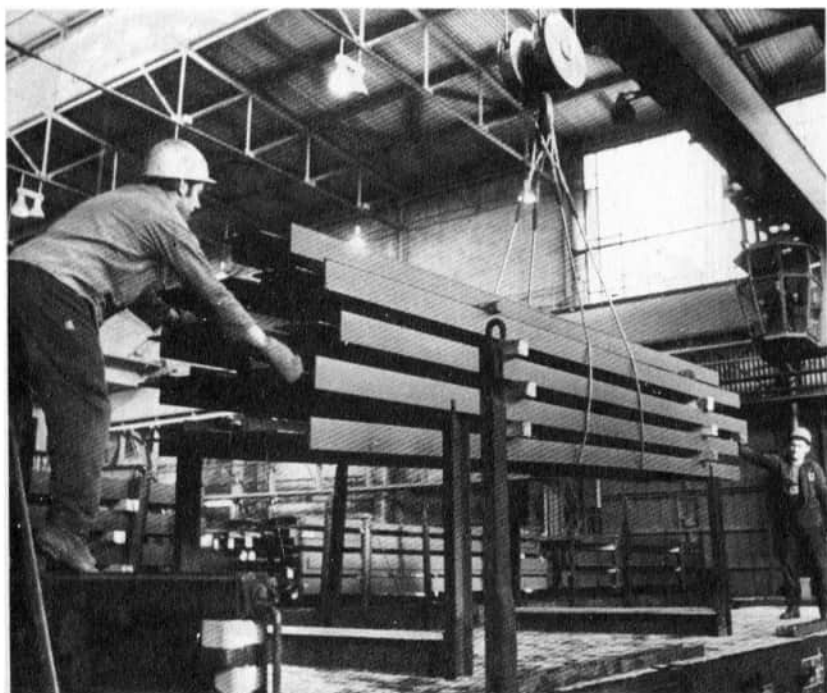
Wir finden in verschiedenen technischen Lösungen, z. B. in plastbeschichteten Blechtafeln oder in gespritzten Schaumstoffen auf Wandverkleidungen, schon gute Ansätze eines effektiven Materialverbundbaus. Die Ergebnisse hinsichtlich Schall- und Wärmedämmung oder der Atmungsaktivität derartiger Flächen sind aber noch längst nicht befriedigend.

Die Natur zeigt vergleichsweise perfekte Lösungen, die unserer technischen Weiterentwicklung Anregungen geben könnten. Die Rinden der Bäume, die die für den Baum lebenswichtige zellbildende Kambiumschicht vor Hitze und Kälte zu schützen haben, besitzen eine wärmedämmende Wirkung. Sie ist etwa gleich der von Glasfasermatten, die zu den besten Isoliermaterialien zählen. Sie werden nur noch von Kunstharzschäumen (z. B. Polystyrol-Hartschaum) übertroffen. Sehr interessant ist auch die Struktur der Schalen von Zitrusfrüchten. Der innere Teil dieser Schalen besteht aus schwammartigem, geschichtetem Gewebe. Den äußeren Abschluß bildet eine pigmentreiche, glatte, aber porige Schicht, die so widerstandsfähig und dicht ist, daß z. B. oft angewandte chemische Konservierungsmittel nicht ins Innere der Früchte dringen können. Diese Schalen schützen die Früchte zuverlässig gegen Überhitzung durch die direkte Sonnenstrahlung und sind außerdem geeignet, Druck- und Schlagwirkungen weitgehend aufzufangen.

Der Gasaustausch durch Wände und Hüllen, die auch Wärmeisolation bieten sollen, erfolgt durch faserartige Schichten besser als bei Materialien mit vorwiegend kugelförmigen Hohlräumen. Bei Pflanzen finden wir isolierende Filze in vielfältigen Formen, die besonders Blütenblätter vor Eis und Kälte schützen, so die Weidenkätzchen oder die Blütenblätter des Edelweiß. Die Haarpelze der Säugetiere beweisen ebenso eine hohe Atmungsaktivität bei hervorragendem Wärmeschutz.

Mineralfaser- oder organische Faserschichten in der Bautechnik sind eine Übernahme dieser Prinzipienlösung der Natur in die Technik, die durch Einsatz neuer Materialien und die Entwicklung von Schichtkombinationen wahrscheinlich noch sehr ausbaufähig ist.

Einfache Wände oder Dächer erhalten eine erhebliche Versteifung durch Wellen oder Falten. Die Tragfähigkeit eines Papierblattes kann durch Faltung ver Hundertfacht werden. Man macht sich das lange schon bei Wellpappe und Wellblech zunutze. In der Natur finden wir das Falt- oder Well-



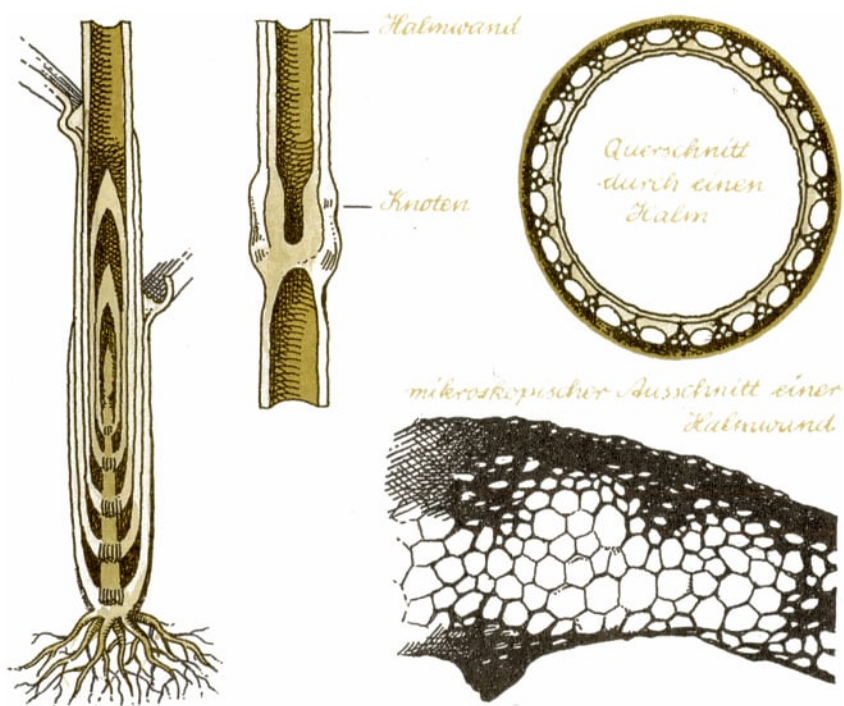
Im Metalleichtbaukombinat Zwickau werden Spezialkonstruktionen für den Bau eines Zellulosekombinats an der Angara hergestellt.

Auch die Bauhalle des Zwickauer Betriebes ist in Metalleichtbauweise errichtet.

prinzip im einfach gefalteten Grashalm oder bei den gefächerten Blättern mancher Palmen. Es gibt Riesenblätter von Fächerpalmen, die bis zu 15 m lang und 3 bis 4 m breit sind, also Flächen zwischen 30 und 40 m² besitzen. Sie widerstehen dem Wind und tropischen Regengüssen, sind aber doch so leicht, daß sie vom Blattstiel getragen und durch diesen immer zum Licht gedreht werden können.

Im Frühsommer besitzt ein Grashalm eine solche Elastizität, daß er sich bis zum Boden biegen und wieder aufrichten kann. Später, wenn die reife Ähre immer schwerer wird, versteift sich der Halm mehr und mehr, wird härter und trotzt fast jedem Wetter. Man wird kaum einen gebrochenen Halm finden, es sei denn, Tiere oder Menschen haben ihn niedergetreten. Bei wilden Gräsern stehen die fruchttragenden Halme auch meist in solchen Abständen, daß sie sich nicht gegenseitig beeinträchtigen, wie es bei angesäten Getreidefeldern der Fall ist.

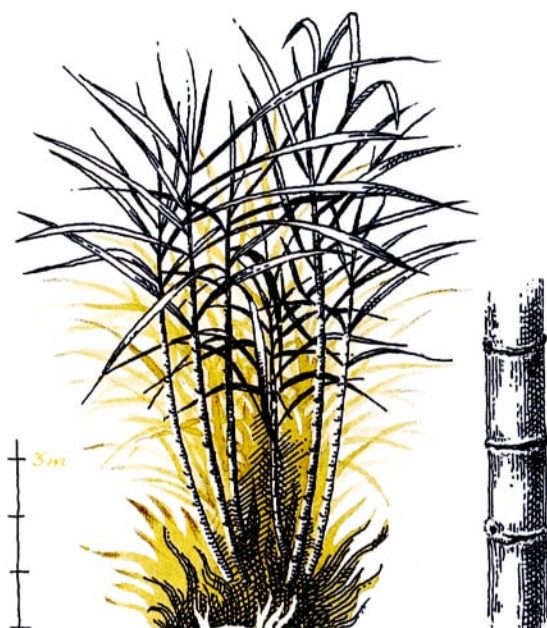
Der Querschnitt durch einen Grashalm läßt erkennen, daß er aus einer röhrenförmigen Hülle besteht, die eine weichere Marksubstanz umschließt.



Waben-Sandwich-Bauweise eines Getreidehalms

Die Hüllröhre besteht aus parallel zur Halmachse angeordneten Fasern, die mit dem wachsenden Alter des Halmes zu einer harten Wand werden. Die Marksubstanz besitzt eine wabenartige Struktur. Das ergibt für die Hülle ein Stützgewebe, das nach allen Seiten Belastung aufnimmt, verteilt und extrem leicht ist. In wesentlich größeren Dimensionen beobachten wir den gleichen oder ähnlichen Aufbau beim Schilf, beim Zuckerrohr und bei den Stangen des Bambus. Von den verschiedenen Arten der Bambusgewächse erreichen manche Höhen von 20 m, ja sogar 40 m. Die Knickfestigkeit einer Bambusstange liegt außerordentlich hoch. An den ganz ähnlich aufgebauten Röhrenknochen der Wirbeltiere sehen wir, daß in der Natur häufig die gleichen Bauprinzipien immer wieder anzutreffen sind.

Es gibt Versuche, dieses Prinzip in die Bautechnik zu übernehmen. Sowjetische Ingenieure entwickelten ein sogenanntes Sandwich-Spritzgußverfahren, bei dem zunächst eine stabförmige Form mit einem plastisch fließenden Kunststoff ausgefüllt wird. Danach wird ein Plastschaum eingespritzt, der den ersten Kunststoff als Hülle nach außen an die Formwandung drückt. Auf diese Weise entsteht ein poriger Stützkern mit dichter,



Zuckerrohr, rechts:
Stück eines Halms

zugfester Außenhaut. Man erhält je nach der Form Stützelemente oder Wandelemente, die durch den Materialverbund zwischen zwei unterschiedlichen Komponenten leistungsfähiger sind als einfache Stäbe oder Platten, dabei leichter und materialsparend.

Auch der Stahlbeton ist ein bewährter Verbund zwischen zwei Materialbestandteilen. Sein Erfinder, der Franzose Monier, war ein Gärtner. Es wird erzählt, daß er sich häufig über zerbrochene Blumentöpfe und Pflanzkübel ärgerte. Da kam er 1867 auf die Idee, diese durch Stahleinlagen fester zu machen. Das wurde zur Geburtsstunde des Stahlbetons, der heute aus unserer Bautechnik nicht mehr wegzudenken ist. Von einfachen Zaunsäulen mit einem Stahlstab bis zu Brückenteilen gewaltiger Spannweite, die komplizierte Armierungskörbe enthalten, prägt der Stahlbeton das Gesicht vieler Bauwerke.

Betrachtet man die Skelette aus verholzten Strängen alter Kandelaberkakteen, die in Arizona mehr als 15 m hoch werden, so glaubt man die Vorbilder der Armierungskörbe von riesigen Stahlbetonsäulen zu sehen. Die Natur hat offenbar auch das Prinzip des Stahlbetonbaus vorweggenommen. Diese Kakteenstränge erreichen in ihrer Zugfestigkeit und auch in ihrer Biegefestigkeit tatsächlich die Werte des Stahls. Ihre Dehnbarkeit übertrifft noch die des Stahls.

In der Natur beobachten wir überall die Kontinuität des Materials, den



Gewaltige Stahl-
konstruktionen
(Kabelkrananlage der
Warnowwerft)

echten Materialverbund. Alle Teile, Glieder und Organe eines Lebewesens sind miteinander verwachsen, durch Häute, Sehnen und Adergeflechte miteinander verbunden. Übergänge zwischen verschiedenen Materialien werden durch ineinandergreifende organische Makromoleküle hergestellt, die fast immer äußerst feste Bindungen erzeugen. Diese Bindungen besitzen so hohe Elastizität und Plastizität, daß sie starke Verbiegungen und Zerrungen zulassen. Sie erreichen sehr hohe Schlag- und Stoßfestigkeit, und das alles ohne Verlust der stabilen Normallage.

Die Zugbeanspruchung eines Bienenflügels erreicht an der Flügelbasis maximal das Eigengewicht der Biene, etwa 80 mg. Dabei wiegen Vorder- und Hinterflügel zusammen nur etwa 0,14 mg. Sie können also mit ihrer Fläche von rund 28 mm² das 570fache ihres Eigengewichtes an Last aufnehmen. Schulter-, Arm- und Handgelenke eines Menschen nehmen Lasten von mehreren hundert Kilogramm auf. Das Wort von »Muskeln und Sehnen wie Stahl« ist gar nicht so übertrieben. Dennoch sind es immer nur eiweißartige Substanzen mit spezifischen Massen unter 2 g/cm³.

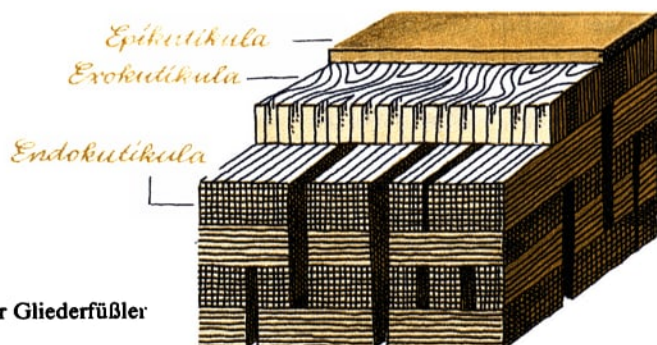
Modelle für Wände, Decken und Dächer

In der Technik kennen wir den Materialverbund durch Klebe- oder Bindemittel, haftende Schichten oder Filme, wie Anstriche und Schmiermittel. Verschiedene Bauteile werden vorzugsweise durch einzelne Verbindungselemente, wie Schrauben, Nieten und Nägel, untereinander befestigt. Letztere ergeben zwar ausreichend hohe Festigkeit, sind aber starre Verbindungen, die bei kurzzeitigen starken Überbelastungen, z. B. durch die Stöße eines Erdbebens, sofort zum Bruch führen.

Wiederkehrende Erdbebenkatastrophen in besiedelten Gebieten lassen für die gefährdeten Länder immer stärker die Forderung nach erdbebensicheren Bauweisen entstehen. Technische Lösungen werden nicht überall gleich aussehen können. Sie werden sich z. B. nach den klimatischen Bedingungen der betreffenden Gebiete richten müssen. Das Prinzip wird aber überall das gleiche sein: Die einzelnen Teile der Bauwerke müssen leicht genug sein und elastisch miteinander verbunden werden. Vorbilder dazu können Materialverbunde aus der belebten Natur liefern.

Eines der interessantesten Beispiele für einen mehrfachen Materialverbund sind die Panzerskelette der Gliederfüßler, zu denen die Insekten, die Tausendfüßler und die Krebse gehören. Man spricht auch oft vom Chitinpanzer dieser Tiere, weil Chitin, eine eiweißhaltige Substanz von hoher chemischer Widerstandsfähigkeit, der Hauptbaustoff der Panzerskelette ist.

Die Panzerskelette entstehen aus Sekreten, die von Zellen der Oberhaut des Tieres abgesondert werden und sich in Schichten um diese legen. Sie härten an der Luft und bilden eine mehrschichtige Struktur, die man als Kutikula bezeichnet. Unter dem Mikroskop erweist sich diese Kutikula, die bei Insekten weniger als 1 mm dick ist, als eine sehr kompliziert aufgebaute Hülle. Man kann von außen nach innen drei Schichten unterscheiden, die Epikutikula, die Exokutikula und als dickste Schicht die Endokutikula.



**Panzerskelett der Gliederfüßler
(Ausschnitt)**

Die äußere, oft nur 1 μm dicke Epikutikula, ist lipoidreich und hemmt die Verdunstung von Körperflüssigkeit. Sie ist sehr dicht, ermöglicht aber doch den notwendigen Gasaustausch zwischen Körper und Außenwelt. Darunter liegt die druckfeste, farbstoffreiche Exokutikula, die überwiegend aus Chitin aufgebaut ist. Chitin besteht aus langen Kettenmolekülen, die, parallel aneinandergelagert, Kristallite bilden. Diese Kristallite haben die Form eines Kettengitters, in das Lockerstellen eingelagert sind. Die Kristallkettenenden sind ausgebogen und dadurch mit Nachbarketten verhakt. So entsteht ein in sich stabil verankerter Mikrofilm mit hoher Scherfestigkeit.

Bei manchen Tierarten sind etwa 1 μm lange Säulchen senkrecht zur Oberfläche zu beobachten, die auch aus Chitinfasern bestehen. Schichten mit einer solchen Säulchenstruktur ergeben eine besonders hohe Druckfestigkeit.

Epi- und Exokutikula bilden zusammen einen makromolekularen Gerüstverbund in drei Richtungen, der mechanisch und chemisch sehr hoch belastbar ist. Die darunter befindliche Endokutikula, eine eiweißarme Schicht, besitzt sehr hohe Zugfestigkeit, die sie durch oberflächenparallele Fibrillenschichten erhält. Mehrere Fibrillenschichten verlaufen so, daß sie sich überschneiden. Diese sogenannte Kreuzstreifigkeit macht die Schicht zugfest nach allen Seiten. Aus den Köpfen der darunterliegenden Hautzellen ragen Fibrillen in die kreuzstreifigen Lagen der Endokutikula hinein und schaffen einen festen Verbund zwischen Haut und Chitinpanzer.

Das gesamte Panzerskelett mit der eben beschriebenen Vertikalstruktur zieht sich nicht als starre Hülle über den ganzen Tierkörper, sondern es setzt sich aus vielen Platten mit weicheren Verbindungszonen zusammen. Dadurch erhält es eine ausreichende Elastizität und Dehnbarkeit. Das ist, vom bautechnischen Standpunkt gesehen, eine nahezu ideale Lösung für die Gestaltung von Außenwandteilen, die – in ähnlicher Weise technisch realisiert – fast allen Anforderungen gerecht würde.

Wir dürfen natürlich nicht übersehen, daß es sich immer nur um relativ kleine Gebilde handelt. In größere Dimensionen erhoben, könnten bestimmte Eigenschaften und Verhältnisse anders aussehen. Die bis ins kleinste optimierte Mikrostruktur ließe sich wahrscheinlich auch gar nicht in beliebig größere Verhältnisse übertragen. Immerhin könnte man sich Wände oder Dächer, bestehend aus Geweben, Metall- oder Plastplatten, Füllstoffen und Stützelementen, vorstellen, die der beschriebenen biologischen Struktur ähneln und dann auch ähnliche Eigenschaften besitzen würden.

Natürlich spielen dann immer die Kosten eine entscheidende Rolle für die Frage, ob eine Lösung tatsächlich für Anwendungen in großen Maßstäben brauchbar ist. Die Aufgabe würde darin bestehen, neue Technologien zu entwickeln, nach denen geeignete Materialien und Strukturen in kosten-



Bauprinzip der Muschelschalen, rechts: Herzmuschel mit Rippenversteifungen

günstiger Weise produziert werden könnten. Die biologischen Vorbilder sagen uns nur, wie mit einem Minimum an Materialaufwand ein Maximum an Sicherheit zu erreichen ist. Sie verraten uns gewissermaßen Konstruktionsprinzipien. Bestehen bleibt das technische Problem, solche Erkenntnisse in die Dimensionen und Verhältnisse unserer Bauwirtschaft umzusetzen.

Die Panzerskelette der Gliederfüßer sind eines unter vielen Beispielen von biologischen Strukturen, die in ihrer Art vollkommenen Verbundbau zur Gestaltung von Wänden und schützenden Hüllen darstellen.

Die Natur bietet eine Fülle weiterer Vorbilder. Da sind die Panzer der Schildkröten, die Häute der Säugetiere, die verschiedensten Fruchthüllen oder auch die Schalenskelette von Weichtieren, wie Schnecken und Muscheln. Außer Muschelschalen und Schneckengehäusen gibt es noch einige andere Gebilde, die zu den Schalenskeletten zu zählen sind. Die Bezeichnung Skelett rührt daher, daß die betreffenden Tiere ebenso wie die Gliederfüßer keine anderen Stützelemente, wie Knochen oder Gräten, besitzen, sondern eben nur durch diese schalenartigen Hartgebilde gestützt und geschützt werden.

Die Schalen der Weichtiere entstehen je nach Tierart auf verschiedene Weise. Sie können z. B. aus Fremdkörpern, wie Sand, kleinen Steinen oder Pflanzenresten, gebildet werden, die auf der weichen Oberfläche des Tieres haften. Bestimmte Amöben erzeugen im Zellplasma Plättchen aus Siliziumdioxid, die zur Schale werden. Schneckengehäuse sind stark verkalkte Eiweißschalen. Technisch besonders interessant ist der Verbundbau bei Muschelschalen. Diese bestehen aus einer äußeren, chemisch widerstandsfähigen Schicht aus hornartigem Eiweiß, dem Konchin oder Konchiolin. Unter

dieser befindet sich eine stark verkalkte, druckfeste Prismenschicht. Eine dritte, die innere Schicht, besteht aus kalkigem Perlmutter. Die Ähnlichkeit zum strukturellen Aufbau der Panzerskelette der Gliederfüßer ist nicht zu übersehen. Die Natur hat in vielen Fällen, bei ganz unterschiedlichen Tieren und Pflanzen, gleiche oder sehr ähnliche Problemlösungen entwickelt.

Man ist in der Bauindustrie zu technischen Lösungen für einen zweckmäßigen Materialverbundbau natürlich auch aus physikalischen und technologischen Überlegungen gekommen. Es lag beispielsweise nahe, die schlechte Wärmeleitfähigkeit der Luft in porigen Schaumstoffen zur thermischen Isolation zu nutzen oder durch faserverstärkte Matten höhere mechanische Festigkeit anzustreben. Durch sogenannte Sandwichbauweise, bei der durch Material oder Struktur verschiedene Schichten zu Flächenelementen kombiniert werden, erreichte man höherwertige Eigenschaften solcher Elemente. Technische Versuche und Messungen bestätigten die Voraussagen und ließen gleichzeitig exakte, meßbare Vergleichswerte zu biologischen Strukturen entstehen. So wurden glasfaserbeschichtete Kunststoffplatten entwickelt, die hervorragende Eigenschaften besitzen. Dabei wurde untersucht, ob dickere oder besser dünnere, ob längere oder kürzere Fasern einzusetzen sind. Es ergab sich, daß durch Geflechte oder regellose Fasern verstärkte Schichten möglichst viele dünne Fasern enthalten sollten und daß die Faserlänge maximal das 2000fache der Faserdicke betragen sollte. Untersucht man vergleichbare pflanzliche und tierische Strukturen, so findet man, daß dort dieses Ergebnis längst genauso verwirklicht ist.

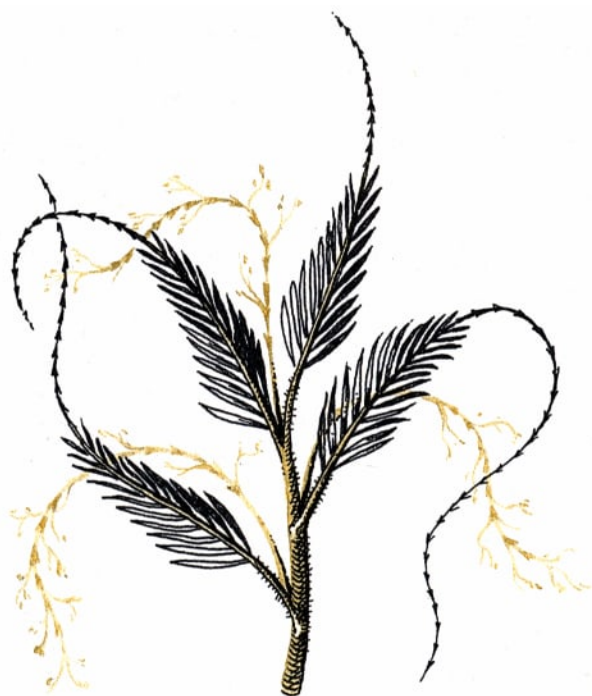
Ähnlich der Säulchenstruktur in Panzerskeletten sind die Flügeldecken mancher Käfer aufgebaut. Eine dickere und härtere Oberplatte ist durch Säulchen mit der Unterplatte verbunden. Solche Doppelplatten besitzen hohe Druck- und Scherfestigkeit bei relativ geringem Gewicht. Technisch realisiert werden sie z. B. im Fahrzeugbau durch zwei Metallplatten oder Bleche, die durch verschweißte Rohrstutzen verbunden sind, oder im Hochbau durch Platten aus Kunststoff mit zwischengeleimten Holz- oder Kunstharzbrücken. Derartige Doppelplatten bieten außerdem eine relativ gute Wärmeisolation.

Wand-, Decken- und Dachelemente aus Mehrschichtstrukturen in festem Materialverbund nach biologischen Vorbildern zu entwickeln bedeutet, sehr leichte Baumaterialien dafür einzusetzen. Damit wird auch die Zielstellung erfüllt, insgesamt leichtere Bauwerke zu schaffen. Gegenwärtig beträgt das Gewicht unserer Bauwerke ungefähr das Doppelte ihrer Nutzlast, was natürlich nur als pauschale Aussage zu verstehen ist. Experten schätzen, daß es möglich sein wird, dieses Verhältnis umzukehren. Das bedeutet, daß es möglich sein sollte, mit einem Viertel des gegenwärtig aufgewandten Materialgewichtes Bauwerke zu errichten, deren Gebrauchseigenschaften in allen Punkten höher liegen werden, als es heute der Fall ist.

Verkettungen und Verhakungen

Nicht weniger wichtig und interessant ist das Problem des Materialverbunds bei Verankerungen und Verbindungen von tragenden Gerüstelementen von Bauwerken. In der Natur finden wir dafür wiederum eine Fülle von Beispielen, etwa die Gelenkverbindungen durch Muskeln und Sehnen oder die Übergangsstrukturen zwischen Stamm und Ästen, zwischen Zweigen und Blättern bei Pflanzen. Studienobjekte stehen auch in rankenden Pflanzen zur Verfügung. In Mitteleuropa treffen wir Efeu, Wein, Kürbis, Winden und rankende Bohnen. Im tropischen Urwald finden wir einen großen Artenreichtum rankender Gewächse, die mit Haftwurzeln und Kletterranken, mit Ästen und Blättern Halt suchen und so mit allen Mitteln zum Licht drängen. Das sind vor allem die zahlreichen und mächtigen Lianengewächse, aber auch rankende Kakteen und viele andere Pflanzen mit schillernden Blüten und leuchtenden Früchten.

Eines der interessantesten Gewächse dieser Art ist die Rotangpalme. Diese kletternde Palme – es gibt ungefähr 340 Arten davon – besitzt an



Zweig einer Rotangpalme mit peitschenartigen Kletterranken



Rankende Pflanze (Schwarzbeerrige Zaunrube)

den Blattstielen ihrer gefiederten Blätter 1 bis 2 m lange, seilartige Fortsätze mit vielen sehr festen Stacheln. Diese Geißeln bestehen überwiegend aus sehr festen, elastischen Fasern von hoher Tragfähigkeit. Auf Sri Lanka hat man über 170 m lange Triebe von Rotangpalmen gefunden. Aus verholzten Trieben dieser Art, auch als spanisches Rohr bekannt, stammt das Material, aus dem Rohrmöbel hergestellt werden. Haben die Geißeln der Rotangpalmen einmal einen Halt gefunden, so verdicken sie sich, werden damit haltbarer und stabiler. Besonders im Bereich des Schlinggriffs bilden sich solche Verdickungen, um diese wichtigen Stellen besser zu befestigen. Ähnlich verhalten sich Kürbisranken. Diese wickeln sich zwischen den Verankerungsstellen zu Spiralen auf und stellen so eine elastische Verbindung her, die Bewegungen der Stütze und Belastungen durch Wind und Regen abfangen kann. Später verholzen die Ranken und werden so zu fast unlösbaren Verbindungen.

In der Bautechnik verwendet man Kabel zur Verankerung von Masten, als tragende Elemente bei Hängebrücken (Kabelbrücken), auch Kabelnetze, die hängende Dächer tragen. Derartige Stahlkabel mit großen Querschnitten werden mechanisch gesponnen. Kabelschlingen herzustellen erfordert eine besondere Technik, die eine hohe Festigkeit für große Zugbelastbarkeit garantieren muß.

Einfache Lösungen des Problems einer mechanischen Verankerung und

Verkettung finden wir in der Natur bei einigen Pflanzensamen, z. B. bei der Klette. Die Haltehaken der Klette verfangen sich fest im Fell eines vorbeistreichenden Tieres, lösen sich aber wieder bei genügend starkem Zug, wenn das Tier ernsthaft versucht, das Anhängsel loszuwerden. Der Sinn der Kletthaken ist dann auch erfüllt, denn das Tier hat den Samen von der Mutterpflanze weggetragen.

Überaus formenreich sind Schuppen, Borsten, Dornen und Haken im Dienst der Samenverbreitung in der großen Familie der Korbblütler ausgebildet. Hier finden wir z. B. bei der Gattung Zweizahn sehr schön ausgebildete Harpunen, nur wenige Millimeter lang, aber sehr exakt geformt, mit scharfen Widerhaken besetzt, wie sie technisch nicht besser hergestellt werden könnten.

Das einfache Verhakungsprinzip der Kletthaken ist erst in jüngster Zeit technisch als Klettband angewandt worden. Das ist ein Gazeband mit eingearbeitetem Kunststoffhäkchen, die sich bei Berührung mit einem samtartigen Gegenband in dieses verhaken, bei kräftigem Zug aber wieder lösen lassen. Klettband wird zum Befestigen von Gardinen und Vorhängen, als Taschenverschluß, zum Anheften in der Bekleidungsindustrie und für viele ähnliche Zwecke eingesetzt. Es ist technisch viel einfacher und weniger störanfällig als der bekannte Reißverschluß. Dieses Beispiel zeigt, wie einfache Vorbilder der Natur, obwohl seit Jahrhunderten bekannt, lange Zeit unbeachtet blieben.

Schließlich wollen wir noch eine Methode des Materialverbunds betrachten, die von Tieren besonders zu Zwecken der Brutpflege verwendet wird. Auch sie ist technisch nicht unbekannt, aber vielleicht zu Unrecht in Vergessenheit geraten. Viele Insekten befestigen ihre Larven durch feste, dichte Gespinste beispielsweise an Blättern oder Ästen. Diese Gespinste bestehen immer aus sehr dünnen Fäden, die dicht gewickelt und oft noch verklebt sind. Sie stellen dann wasserdichte, oft sogar luftdichte Hüllen dar und haften für begrenzte Zeit außerordentlich fest. Technisch interessant daran ist, daß sie die Struktur des tragenden Materials nicht verändern, dessen Belastungsfähigkeit an der Verbundstelle also nicht herabsetzen. Sie beziehen einen großen Bereich in den Verbund ein und erhöhen so dessen Zuverlässigkeit und Elastizität.

Schalen und Schläuche

Ohne jede Verstrebung und Versteifung ist das Vogelei ein erstaunlich festes, widerstandsfähiges Gebilde, das seine Festigkeitseigenschaften, abgesehen vom Material der Schale, durch seine Form erhält. Diese Form nimmt außen angreifende Kräfte so auf, daß sich diese in den meisten prak-

tisch auftretenden Fällen in der Schalenwölbung nach allen Seiten verteilen. Dieses natürliche Vorbild spielt in vielen technischen Baukonstruktionen eine erhebliche Rolle. Man nennt sie räumliche Tragwerke, weil eben ohne besondere tragende Verstrebungen die gesamte räumliche Wölbung trägt. Neben dem Ei gibt es andere Beispiele für räumliche Tragwerke in der Natur, etwa die Schädelknochen der Säugetiere oder die Schalen der Muscheln. In der Geschichte der Baukunst wurde dieses Prinzip schon sehr früh angewendet. Wir staunen heute, welche Wölbungsweiten Baumeister des Mittelalters zu gestalten imstande waren. Die Dresdener Frauenkirche – 1945 durch amerikanische Bomben zerstört – war ein hervorragendes Beispiel. Heute werden Betonschalen, Stahlkuppeln und Hallenkonstruktionen nach diesem Prinzip in die Bautechnik einbezogen. Da die Suche nach günstigsten Wölbungsformen je nach dem Zweck und den auftretenden Kräfteverhältnissen mit theoretischen Methoden sehr schwierig und mühsam ist, könnten uns bewährte Formen in der Natur wertvolle Hilfe beim Auffinden optimaler Lösungen sein.

Die Natur bietet für viele Probleme der Statik, der Baukonstruktion, der Materialauswahl und Materialkombination Prinziplösungen an. Sie zeigen das Erreichbare, das meist noch über dem heute technisch Möglichen liegt. Natürlich ist die Arbeit des Ingenieurs nicht damit getan, für konkrete Probleme der Bautechnik passende Lösungen der Natur aufzufinden. Man wird kaum mit räumlichen Tragwerken aus Kalkstein bauen und auch nicht Baustoffe auf Eiweißbasis entwickeln. Die Natur lehrt uns aber, daß man aus leichten Stoffen harte, witterungsbeständige, stabile Bauteile von hoher Belastbarkeit herstellen kann. Diese erhalten ihre hervorragenden Eigenschaften durch besondere Formen oder durch Mikrostrukturen, die uns kompliziert erscheinen mögen, aber meist das Äußerste an Material- und Gewichtsparsnis bieten.

Zur Lösung einer Reihe von speziellen Problemen, die der Bautechnik zuzuordnen sind, treten Pneus und elastische Hüllen als Konstruktionselemente auf. Auch sie haben ihre natürlichen Vorbilder in Eihüllen, in den Schalen von Traubenfrüchten, in Blutgefäßen und Häuten. Material und Struktur derartiger Hüllen und Schläuche zu studieren kann im Zusammenhang mit bestimmten technischen Vorhaben sehr vorteilhaft sein. Zum Beispiel ist es für den Bau von Traglufthallen wichtig, die verwendeten Überzüge beständig gegen starke Erwärmung durch Sonnenstrahlen sowie gegen Wechsel von Nässe und schneller Trocknung durch Wind und Sonne zu gestalten. Hinzu kommt die Forderung nach Widerstandsfähigkeit gegen chemische Einflüsse, da die Luft in der Nähe von Industriegebieten alle möglichen Verunreinigungen enthält.

In Küstengebieten, die von Sturmfluten bedroht sind, sollen Schlauchkonstruktionen zum Dichten von Deichbrüchen eingesetzt werden. Dieser

Gedanke wurde weiterentwickelt und hat zu einem großen Projekt, zur technischen Sanierung der vom Meer bedrohten Stadt Venedig geführt. Um umfangreiche bautechnische Maßnahmen zur Sanierung der Bausubstanzen durchführen zu können, soll in Venedig der Wasserspiegel vorübergehend gesenkt werden. Die Stadt ist an drei Stellen mit der Adria verbunden, die zu diesem Zweck dicht abgesperrt werden müßten. Das erwähnte Projekt sieht nun vor, riesige, mit Wasser gefüllte Schläuche aus beschichtetem Kunststoffgewebe über die drei Meeresarme zu legen und zu verankern. Solche Schläuche hätten gewaltigen Belastungen standzuhalten. Das Meerwasser wirkt durch seinen Salzgehalt und zusätzlich durch die wachsenden Verunreinigungen aggressiv auf die Oberflächen der Schläuche. Der Erfahrungsschatz für ein derartiges Projekt ist relativ gering. Es liegt deshalb nahe, in der Natur nach Vorbildern für korrosionsfeste, flexible Hüllen, für Konstruktionen zu deren Verankerung oder anderen Detailproblemen des Projektes zu suchen.

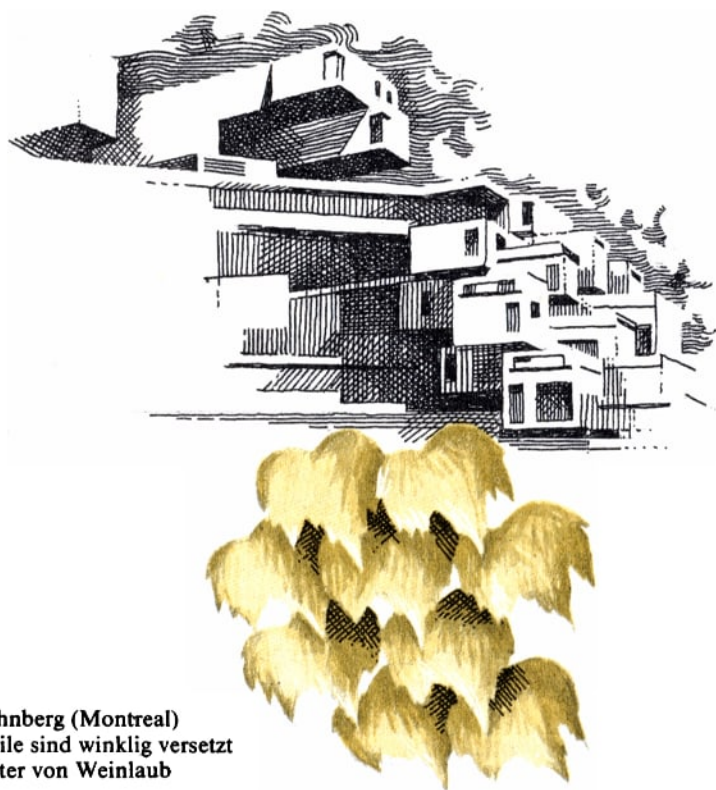
Freilich kann unsere kleine Zahl ausgewählter Beispiele für natürliche Vorbilder und aussichtsreiche Anwendungen den wirklichen Umfang der Möglichkeiten nicht annähernd wiedergeben. Vor allem entstehen ja durch neue Erkenntnisse sowohl der Biologie als auch der Technik mit all ihren speziellen Fachrichtungen immer wieder neue Perspektiven. Diese Ausichten auf das ungeheuer reiche Angebot der Natur lassen sich heute noch nicht ermessen. Die schon vorliegenden Resultate erfolgreicher Nutzung von Vorbildern der Natur zeigen aber, daß wir an diesem Angebot nicht vorbeigehen dürfen.

Architektur des Sonnenlichts

Auch die äußere Gestaltung eines Bauwerks, z. B. eines Wohn- oder Bürohauses, soll vielen Ansprüchen genügen. Zu den wichtigsten Forderungen, die der Architekt erfüllen muß, gehört die gute Gestaltung der Lichtverhältnisse im Inneren eines Bauwerks. In mittleren Breiten will man Räume und Gänge hell und lichtreich haben, also müssen möglichst viele Fenster der Sonne zugewandt sein. In äquatornahen, heißen Zonen erwartet man dagegen in Gebäuden möglichst viel Schutz gegen direkte Sonneneinstrahlung. Fassaden und Dächer werden deshalb so gestaltet, daß Fenster und Balkone in der Haupttageszeit im Schatten bleiben.

Die grünen Pflanzen haben sich seit Millionen Jahren den Lichtbedingungen in ihren Lebensbereichen angepaßt. Es liegt nahe, im Bau der Pflanzen auch Vorbilder für lichtgerechte Formen von Bauwerken zu suchen.

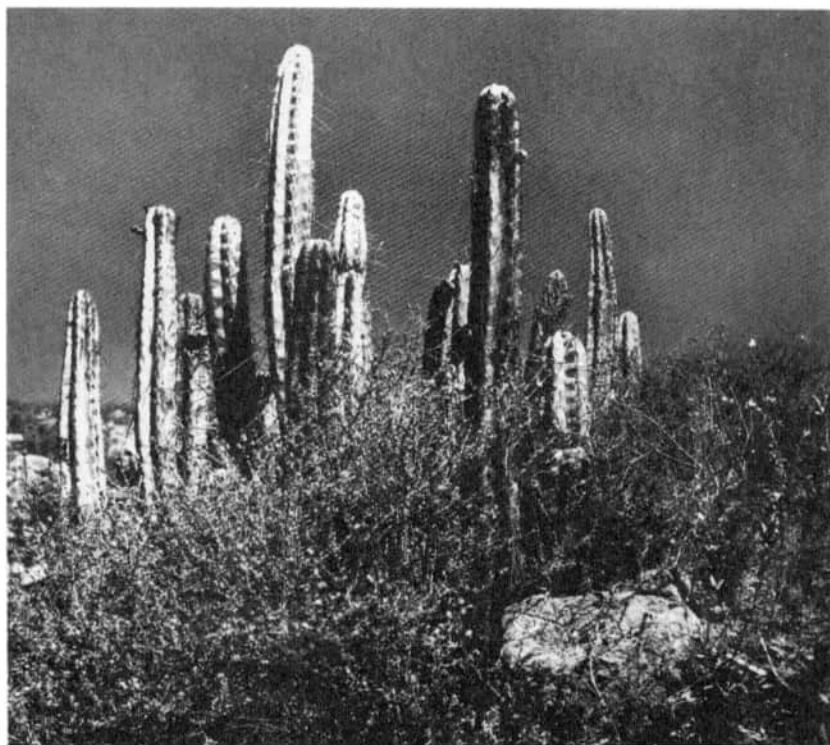
Im Blätterdach eines großen Laubbaumes sind alle Blätter so angeord-



Habitat-Wohnberg (Montreal)
Die Wohnteile sind winklig versetzt
wie die Blätter von Weinlaub

net, daß sie ein Maximum an Sonnenlicht auffangen. Es kommt nicht vor, daß zwei Blätter dicht übereinander stehen, so daß das obere den größten Teil des unteren verdeckt. In einem solchen Falle würde das untere überflüssig. Es würde verkümmern und abfallen. Dasselbe geschieht mit ganzen Ästen von Laub- und Nadelbäumen im dichten Wald. Die Bäume behalten nur die oberen Äste, die ihr Laub ins Licht bringen können. Ein frei stehender Baum dagegen entwickelt sich breit und voll, denn ihm steht Licht von allen Seiten zur Verfügung.

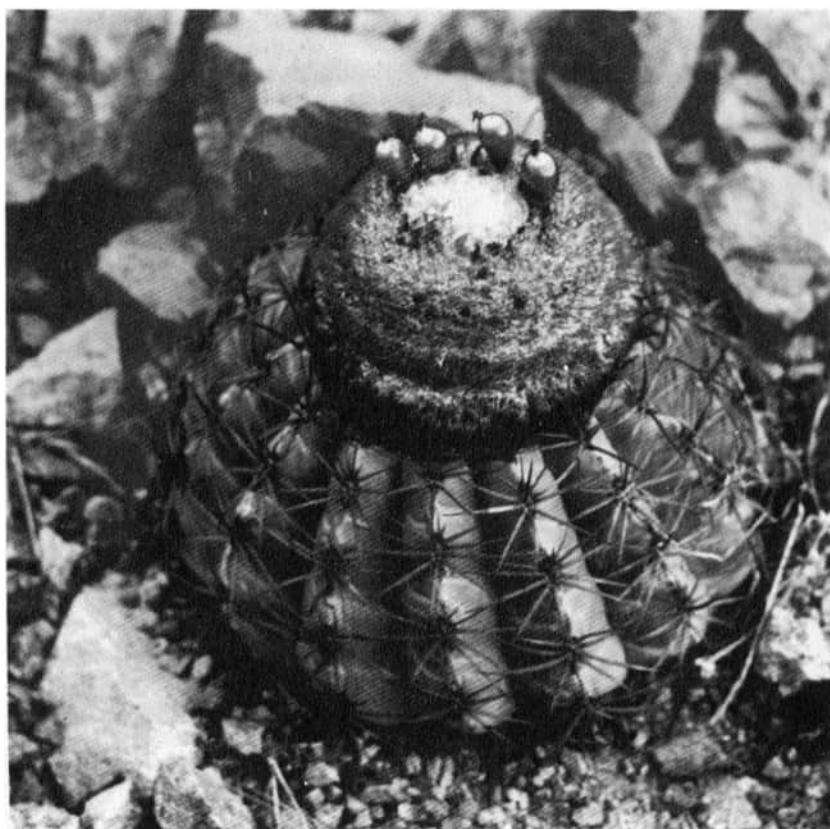
In den sechziger Jahren beschäftigte sich der Architekt M. Safdie mit Studien über Blattstellungen an Laubbäumen und rankenden Blattgewächsen, wie Efeu und wildem Wein. Seine Ergebnisse wandte er auf die Fassadengestaltung von Wohnhäusern an. Zur Weltausstellung 1967 in Montreal entstand nach seinen Plänen die Habitatwohnstadt, die zu den Sensationen dieser Weltausstellung gehörte. In einem zwölfstöckigen »Wohnberg« waren die einzelnen Etagen gegeneinander versetzt, so daß alle Räume ein Optimum an Sonneneinstrahlung erhielten.



Säulenkakteen (*Corrilocactus puguimgis*)

Die Laubblätter von Bäumen, Sträuchern und Stauden drehen sich im Laufe des Tages nach dem Licht. Sie besitzen eine regelrechte Lichtnachlaufsteuerung, die mit einfachsten strukturellen Mitteln arbeitet. Etwas Ähnliches technisch zu realisieren wäre aus vielen Gründen sehr interessant. So könnten z. B. die Sonnenbatterien eines Satelliten oder die Spiegel von Sonnenöfen mit höherer Energieausbeute arbeiten. Als eine realisierte Anwendung sei erwähnt, daß es Jalousien gibt, die sich, der Sonnenstrahlungsintensität angepaßt, automatisch öffnen und schließen.

In Ländern mit starker und langer Sonneneinstrahlung besteht der Wunsch nach Schatten. Zu den häufigen Pflanzen in solchen Ländern gehören die Kakteen. Sie gedeihen noch in Gegenden, wo monatelang kein Regen fällt. An solches Klima angepaßt, sind sie so aufgebaut, daß sie Flüssigkeit lange zu halten vermögen und kleinste Feuchtigkeitsmengen aus der Atmosphäre aufnehmen können. Die Stacheln der Kakteen dienen ihnen nicht nur zum Schutz. Ihre Spitzen bilden vor allem Kondensationspunkte, an denen sich die Feuchtigkeit der Luft zu Tautropfen sammeln kann.



Kugelkaktus, blühend (*Melocactus peruvianus*)

Interessant für uns ist die bei Kakteen häufig auftretende Gliederung der Oberfläche in gratartige Längsrippen. Diese führt dazu, daß der größte Teil der Pflanzenoberfläche immer im Schatten liegt, gleichgültig, aus welcher Richtung das Licht einfällt. Unterstützt wird die Wirkung durch die Kugelform vieler Kaktusarten. Sie stellt bei vorwiegend senkrechter Sonneneinstrahlung die beste Anpassung dar.

Kugelform, Längsrippung und Stacheln sind Prinziplösungen der Natur, die nicht nur bei Kakteen zu finden sind. Andere Pflanzen, die in gleicher Umgebung leben, haben die gleichen Lösungen entwickelt. Auch der Mensch versucht sich ihrer zu bedienen. Beispiele sind die halbkugelförmigen Kuppeln vieler Moscheen und anderer Bauwerke im Orient. Sie überdachen einen großen Raum mit minimaler Oberfläche. Eine Architektur, die sich noch besser als bisher den Bedingungen der Sonnenstrahlung an-

passen würde, brächte auch einen Beitrag zur Energieeinsparung, einmal an Licht- und Wärmeenergie, zum anderen an Energie für Kühl- und Klimaanlage. Mit dem Vorbild Natur findet der Baufachmann auch in der äußeren Gestaltung die beste Anpassung an die klimatischen Bedingungen der Umwelt.

Es gäbe noch vieles über das Vorbild Natur für die Bautechnik zu sagen. Schon in der Frühgeschichte lernten die Menschen von der Natur, z. B. Dächer aus Blättern herzustellen oder ihre Pfahlbauten im Boden zu verankern. In tropischen Gegenden besiedeln Mangroven die Ufer vieler Flüsse. Sie halten sich mit Luftwurzeln, die oft 2 bis 3 m hoch sind, im Wasser und weichen Ufergrund. Von den Mutterbäumen werden fertig ausgebildete Jungpflanzen abgeworfen, die sich mit ihren Wurzeln innerhalb weniger Stunden im Erdreich festkrallen.

Interessant dürfte auch die Problematik der optimalen Raumausnutzung sein. Man könnte z. B. das Vorbild der sechseckigen Bienenwaben als Modell für den Wohnungsbau mit seinen Vor- und Nachteilen untersuchen.

Von besonderer Bedeutung ist zweifellos nach vielen Naturkatastrophen, deren Fortsetzung auch in der Zukunft erwartet werden muß, eine erdbebensichere Bauweise.

Wir sahen bei den Panzerskeletten der Gliederfüßer das Prinzip der elastischen Verbindung zwischen festen Platten, in der Struktur des Holzes die Ausbildung von belastungsangepaßten Teilen. All das sind Möglichkeiten, Bauwerke stabiler und weniger empfindlich gegen Erschütterungen zu machen.

In Alma-Ata entstand ein Versuchszentrum, wo sich sowjetische Ingenieure seit einigen Jahren mit dem Problem des Baus erdbebensicherer Häuser befassen. Sie entwickelten eine besondere Zellenbauweise, bei der leichter Keramsitbeton verwendet wird. Eine solche Zellenbauweise hat ihre Vorbilder auch in der Natur. Sie ist außerdem für die weitere Mechanisierung der Bautechnik einer der aussichtsreichsten Wege.

Schließlich sollte der Aspekt der Ästhetik in der architektonischen Gestaltung der Bauwerke stärker als bisher beachtet werden. Unser Auge empfindet als schön, was in Formen, Zwecken und Inhalten übereinstimmt. Unser ästhetisches Empfinden ist in unserer irdischen Natur gewachsen. Der Mensch vergleicht Proportionen, Farben und Umrisse von Gegenständen, Figuren oder Bauwerken immer mehr oder weniger bewußt mit ähnlichem in der Natur.

Bei der Gestaltung von Häusern, Industriebauten, Brücken und Türmen, aber ebenso bei vielen Details von Bauwerken, z. B. bei Säulen, Geländern, Dächern, Fassaden und Toren, führt das Vorbild Natur fast zwangsläufig zu Lösungen, die auch als schön empfunden werden.

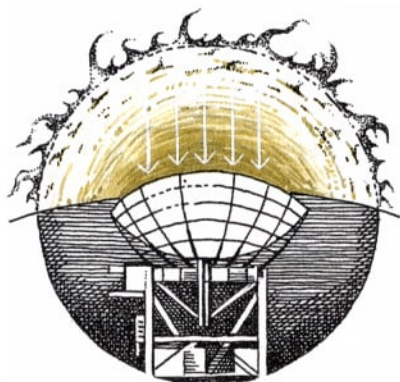
Man darf das natürlich nicht nur im engeren Sinne verstehen. Schön ist

nicht nur, was in der Natur vorkommt. Schön und natürlich ist die materialgerechte Gestaltung und Ausführung, das Verwenden sachgerechter Materialien, das Sicheinfügen von Bauwerken in die natürliche Umgebung.

Bauen nach dem Vorbild Natur wird so nicht nur in technischer Hinsicht, sondern auch in bezug auf die äußere Gestaltung unserer Umwelt höhere Qualität für das menschliche Dasein mit sich bringen.

3. Kapitel

Energiereserven



Alte Gewohnheiten und neue Probleme

Es wird erzählt, daß einst im Erzgebirge ein Hirtenjunge zum Bau seiner Feuerstelle einige schwarze Steine nahm, die er in der Umgebung aufgelesen hatte. Als die Glut seines Holzfeuers zu verlöschen begann, bemerkte er, daß diese schwarzen Steine hell glühten. Sie strahlten noch lange Wärme aus, als schon alles Holz zu Asche geworden war. Es fanden sich mehr von diesen seltsamen Steinen.

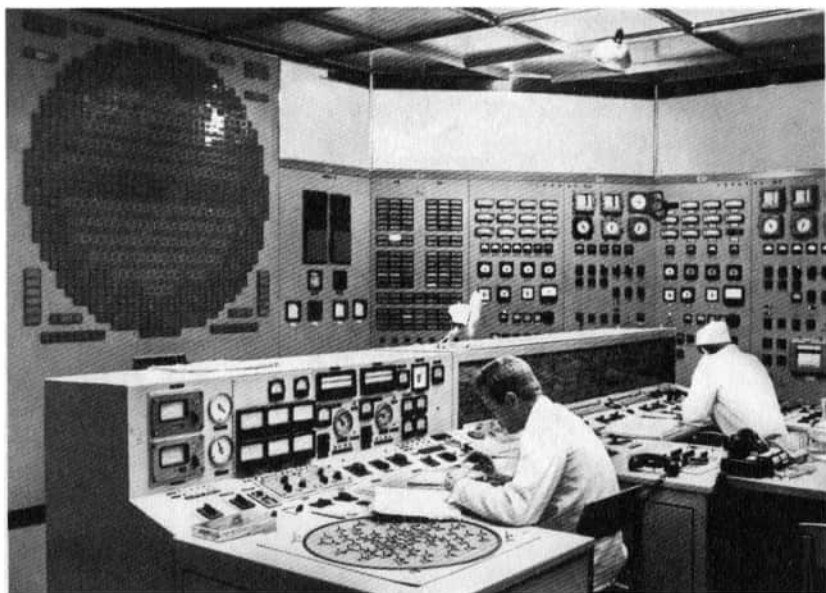
Aus der Suche nach Kohle entwickelte sich der Kohlebergbau über und unter Tage. Im 19. Jahrhundert wurde die Kohle zur Energiebasis der in England und wenig später in den übrigen europäischen Ländern rasch wachsenden Industrie. Die Erfindung der Dampfmaschine, der wichtigsten Antriebsmaschine vor den Erfindungen von Diesel- und Elektromotor, hatte gewissermaßen den Energieträger Kohle zur Voraussetzung.

Seit einigen Jahrzehnten sind Erdöl und Erdgas zu bevorzugten Energieträgern geworden. Sie lassen sich billiger fördern, besser verarbeiten und liefern Brennstoff mit höheren Heizwerten als Kohle. Alle zusammen werden als fossile Brennstoffe bezeichnet. Sie stammen sämtlich aus einem bestimmten Erdzeitalter, dem Karbon, das vor etwa 270 bis 350 Mill. Jahren mit sehr intensivem Pflanzenwuchs, wahrscheinlich hauptsächlich baumar-

tigen Farnen, die Substanz entstehen ließ, die wir heute in verwandelten Formen als fossile Brennstoffe zwischen bestimmten Gesteinsschichten vorfinden. Die riesigen Wälder des Karbon müssen in weit ausgedehnten Sümpfen gewachsen und immer wieder unter Wasser gesunken sein, bevor sie in Gegenwart des Sauerstoffs der Luft in Fäulnis übergehen konnten. Man findet heute noch in der Kohle baumstamm- und wurzelartige Strukturen, die diese Herkunft beweisen. Später abgelagerte Sedimente und andere Gesteine brachten die fossilen Stoffe unter immer stärker werdenden Druck, unter dem sie sich in die gegenwärtigen Formen umwandelten. In den wenigen auf der Erde übriggebliebenen Torfmooren finden wir Frühstufen dieser geologischen Entwicklung.

Wir verdanken also das Vorhandensein von Kohle, Erdöl und Erdgas besonderen Bedingungen in einer bestimmten Periode der Erdgeschichte, die sich in so großem Umfang nicht mehr wiederholten. Angesichts der Einseitigkeit der Energietechnik auf der Basis der fossilen Brennstoffe sei die Frage erlaubt, was die Menschen wohl getan hätten, wenn sie die fossilen Rohstoffe nicht vorgefunden hätten. Niemand wird daran zweifeln, daß dann andere Wege zur Gewinnung von mechanischer, elektrischer Licht- und Wärmeenergie erschlossen worden wären. Wir sehen heute, daß solche Wege vorhanden sind und auch schon bei einem viel früheren Stand der Technik hätten begangen werden können. Sie wurden vernachlässigt, weil Kohle und Erdöl vorhanden waren, im Laufe der Zeit billig genug geworden waren und jeder andere Weg neue Entwicklungskosten verursacht, möglicherweise Monopole gebrochen, kurz: Profite geschmälert hätte. Heute, da das Ende der Vorräte an fossilen Brennstoffen in Sichtweite gekommen ist, wird das Erschließen neuer Energiequellen unausweichlich. Man kam nicht umhin festzustellen, daß das ein Erbe kapitalistischer Entwicklung ist, mit dem man fertig werden muß. Die Einseitigkeit der Kohle-Erdöl-Energiebasis drückt sich auch darin aus, daß andere Möglichkeiten der Gewinnung von Nutzenergien fast immer an den Kosten gemessen werden, die für eine Energie- oder eine Treibstoffeinheit entstehen. Der über hundert Jahre betragende Entwicklungsvorsprung, den Energieumwandlungstechnologien aus Kohle und Erdöl haben, wird dabei ganz außer acht gelassen.

So hielt man noch vor zwanzig Jahren die Energie aus Kernkraftwerken wegen zu hoher Kosten für nicht konkurrenzfähig. Heute läßt sich 1 kWh Elektroenergie zu annähernd gleichen Kosten aus einem Kernspaltungsreaktor wie aus Kohle, Erdöl oder Erdgas herstellen. Die Möglichkeit, Energie aus den nuklearen Brennstoffen (Uran, Thorium) zu gewinnen, sichert unsere Energieversorgung für die nächsten Jahrhunderte, soweit es die Elektroenergie betrifft. Zwar sind noch einige Probleme zu lösen, die im Zusammenhang mit dem Betrieb solcher Kernkraftwerke auftreten, vor al-



Schaltwarte eines Kernkraftwerkes

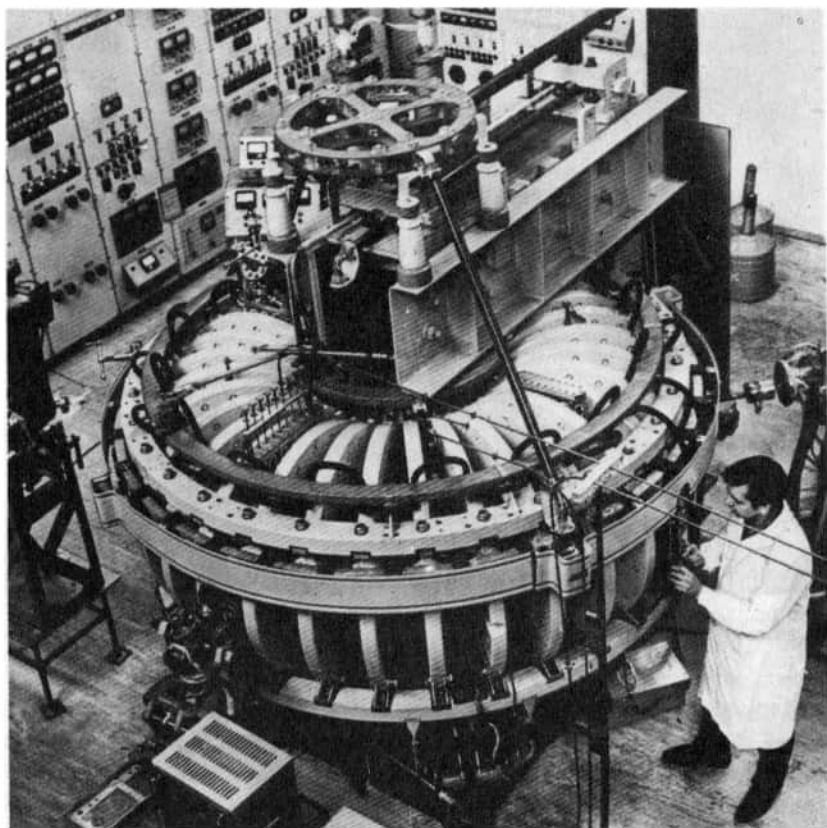
lem die gefahrlose Deponie der radioaktiven Abfallstoffe bzw. die Erforschung aller dabei möglicherweise auftretenden Gefahren und deren Abwehr, aber das sind Aufgaben, unüberwindliche Hindernisse sind es nicht.

Geht man davon aus, daß die Kernenergie in den kommenden Jahrzehnten die Energie aus fossilen Brennstoffen bei der Versorgung mit Elektroenergie weitgehend ablöst, so kann nach Recherchen über die Uranvorräte in der Erdkrinde dieser Hauptteil des Energieproblems prinzipiell für längere Sicht als gelöst angesehen werden.

Wir werden aber noch sehen, daß die Kernspaltungsenergie nicht die Lösung für alle Zeiten und vor allem nicht für beliebige Steigerungsraten der Energieerzeugung sein kann.

Kernkraftwerke arbeiten um so wirtschaftlicher, je größer ihre Leistung ist. Sie können ohne Schwierigkeiten in die großen, Ländergrenzen überschreitenden Verbundnetze eingefügt werden. Aber in der Leitung von Energie über weite Entfernungen liegen auch Nachteile. Man braucht große Mengen Metall für Freileitungen oder Kabel, umfangreiche Schalt- und Umspannstationen sind zu errichten. Leitungsverluste von rund 10% müssen in Kauf genommen werden.

Zweifellos ist es richtig, die Kernenergie – auf die Perspektiven der Kernfusionsenergie werden wir noch eingehen – als sicheren Weg der



Kernfusionsreaktor „Tokamak 6“ im Moskauer Kurtschatow-Institut

künftigen Energieversorgung anzusehen. Doch sind damit schon alle Energieprobleme gelöst? Zum ersten gibt es viele Formen des Energiebedarfs, die sich so nicht zweckmäßig befriedigen lassen. Zum zweiten gibt es eine ganze Reihe von lokalen Energiereserven, die eine ausreichende Versorgung bedeutend vereinfachen und die Verbundnetze entlasten können. Außerdem funktionieren sie zumeist umweltneutral. Der letztgenannte Punkt fällt um so stärker ins Gewicht, je höher die Steigerungsraten erzeugter Nutzenergie auf der gesamten Erde sind, wie wir noch sehen werden.

Eine Energiebilanz der Erde

Solange man nur nach dem Energiebedarf fragt und die Perspektiven der Deckung dieses Bedarfs betrachtet, sieht man nur eine Seite des ganzen Energieproblems. Die andere besteht darin, daß wir gar nicht beliebig viel Nutzenergie gewinnen können — ganz gleich wie —, weil sich über einer bestimmten Grenze die Temperatur der Erde so erhöhen würde, daß alles Leben auf der Erde, in Jahrmlionen an die irdischen Klimabedingungen angepaßt, zugrunde gehen müßte. Es lohnt sich, in das Verständnis des eben Festgestellten einzudringen, denn daraus lassen sich neue Erkenntnisse und neue Gründe für eine intensive Nutzung der von der Natur direkt angebotenen Energien der Sonnenstrahlen, des Wassers und des Windes ableiten.

Wir müssen dazu von den beiden Hauptsätzen ausgehen, deren Gültigkeit die physikalische Forschung bisher in allen Bereichen — von den Elementarteilchen bis zu den Sternsystemen — bestätigt gefunden hat. Der erste Hauptsatz der Wärmelehre, zuerst 1842 von Julius Robert Mayer formuliert, sagt aus, daß bei allen Prozessen die Gesamtenergie eines Systems erhalten bleibt. Energie kann sich aus einer Form, z. B. aus chemischer Energie, gespeichert in den Molekülen der Brennstoffe, in eine oder mehrere andere Energieformen umwandeln, z. B. in Licht und Wärme. Energie kann aber weder gewonnen werden noch verlorengehen.

Wenn man in der Umgangssprache Begriffe wie Energiequellen oder Energieverbrauch benutzt, so meint man stillschweigend Nutzenergieformen, mit »Energiequellen« solche Energiespeicher, aus denen sich Nutzenergien umwandeln lassen, und mit »Energieverbrauch« und »Energieverlust« die Umwandlung der Nutzenergie in nicht mehr nutzbare Energie, meist Wärme, die an die Umgebung abfließt.

In Verbrennungskraftwerken werden Kohle, Erdöl oder Erdgas entweder direkt, oder nachdem sie durch spezielle Verfahren gereinigt und fraktioniert wurden, zur Dampferzeugung verbrannt. In Dampfturbinen wird die im überhitzten Dampf geballte Wärmeenergie in mechanische Energie verwandelt. Mit den Turbinen sind Generatoren gekoppelt, die schließlich die mechanische Energie in elektrische umwandeln.

Diese mehrfachen Energieumwandlungsprozesse lassen sich prinzipiell nur mit einem begrenzten Wirkungsgrad gestalten. Insbesondere die Umwandlung von Wärme in mechanische Energie (mechanische Arbeit) gelingt nur zu einem Teil, der etwa bei 30% liegt. Die restlichen 70% der Wärme lassen sich bei entsprechender Prozeßgestaltung teilweise noch zu Heizzwecken, z. B. als Fernwärme, verwenden, aber eben nicht in andere Nutzenergieformen umwandeln. Letzten Endes werden sie als Abwärme an die Umgebung abgegeben.

Es gibt neuere technische Konzeptionen von Kraftwerken, mit denen höhere Wirkungsgrade zu erreichen sind. Natürlich ist dies von großer wirtschaftlicher Bedeutung. Aber selbst bei Wirkungsgraden von 40% und 50% sind die Wärmeverluste an die Umgebung noch gewaltig. Kernkraftwerke unterscheiden sich nur in der ersten Stufe von diesem Schema, also in der Art der Wärmeerzeugung. Dann aber entstehen auch große Wärmeverluste, die meist über Kühlkreisläufe an die Umgebung abgeführt werden. Die Unmöglichkeit, Wärme vollständig in andere Energieformen zurückzuverwandeln, erwies sich als fundamentales physikalisches Gesetz und wurde als zweiter Hauptsatz der Wärmelehre formuliert. Man kann die Wärmeabgabe an die Umgebung prinzipiell nicht vermeiden. Technische Erzeugung von Elektroenergie aus Brennstoffen (auch aus Kernbrennstoffen) erfordert die Umsetzung der dreifachen Menge gespeicherter Energie in den gegenwärtig arbeitenden Verbrennungs- und Kernkraftwerken.

Auch der größte Teil der Nutzenergie wird letzten Endes in Wärme umgewandelt, wie jeder mehr oder weniger aus eigener Erfahrung weiß: bei der Bearbeitung von Werkstücken zur Formgebung, als Reibungswärme bei allen Bewegungsvorgängen oder als Wärmestrahlung der Lichtquellen.

Wenden wir nun die Hauptsätze der Wärmelehre auf das System »Erde« an: Die Erde samt der sie umgebenden Gashölle kann Wärmeenergie nur durch Strahlung an den Weltraum abgeben. Die von der Erde abgestrahlte Wärmeenergie steht im langzeitlichen Mittel im Gleichgewicht mit der zugestrahlten Sonnenenergie. Die auf der Erde erzeugte Wärmeenergie stört dieses Gleichgewicht nicht, solange ihre Menge vernachlässigbar klein gegen die zugestrahlte Sonnenenergie ist.

Berechnungen haben ergeben, daß schon heute in der Umgebung moderner Großstädte so viel Wärme erzeugt wird, daß sich Boden und Luft um einige Grade erwärmen müßten, wenn nicht durch Luftströmung ständige Kühlung erfolgte. Stellt man sich nun aber vor, daß die Zahl und Größe der Wärmequellen auf der Erdoberfläche in Form von Verbrennungskraftwerken und allen anderen technischen Prozessen drastisch zunehmen, so muß man an eine Grenze kommen, wo eine Gesamterwärmung der Erdoberfläche merklich wird.

Der amerikanische Wissenschaftler A. Rose kommt in einer 1979 veröffentlichten Arbeit zu dem Ergebnis, daß diese Grenze unter durchaus vernünftigen Voraussetzungen erreicht werden könnte. Er nimmt ein Wachstum der Erdbevölkerung auf 4 Mrd. Menschen an. Wenn diese den Lebensstandard der hochentwickelten Industrienationen, also auch deren Energieverbrauch, erreichen sollen und wenn sich dieser noch verdoppelte, so würde die gesamte Verlustwärme aus dieser Energieerzeugung die Erdoberfläche zu tropischem Klima aufheizen. Dann würden die Polkappen und alle Gletscher abtauen, der Meeresspiegel würde ansteigen, und weite

Landteile würden überschwemmt, die zur Nahrungsmittelproduktion unentbehrlich sind.

Unser Zentralgestirn, die Sonne, strahlt seit vielen Millionen von Jahren und wird aller Wahrscheinlichkeit nach auch für weitere Millionen Jahre unverändert diesen Zustand konstanter Energiestrahlung beibehalten. Von der Strahlungsleistung der Sonne erreichen rund 200 W/m^2 die Erde. Summiert man über die Erdoberfläche und über die Zeit, so ergibt sich eine der Erde zugestrahlte Sonnenenergie von $2 \cdot 10^{17} \text{ kWh}$ pro Jahr. Das ist etwa das 10 000fache der gesamten gegenwärtigen technischen Energieerzeugung auf der Erde. Nach den vorher erwähnten Berechnungen von A. Rose ist eine Steigerung der Energieerzeugung aus technischen Verbrennungsprozessen auf das 100fache des gegenwärtigen Standes die äußerste Grenze, bis zu der das gegenwärtige Erdklima noch erhalten bliebe.

Als Hauptenergiequelle der Zukunft wird heute allgemein die Gewinnung von Nutzenergie aus gesteuerten Kernfusionsreaktionen angesehen. Die Entwicklungsarbeiten dazu laufen in der Sowjetunion, in den USA und in einigen anderen Ländern schon seit mehr als zwanzig Jahren. Es ist zwar noch nicht gelungen, einen funktionsfähigen Fusionsreaktor herzustellen, man hat aber immerhin solche experimentellen Fortschritte erzielt, daß es Hoffnung gibt, am Ende dieses Jahrhunderts das erste Demonstrationskraftwerk zu realisieren. Als sehr aussichtsreich wird das sowjetische Tokamak-Prinzip angesehen. Als Fusionsstoffe würden Deuterium und Lithium auftreten, die im Meereswasser zwar nur in Spuren vorhanden sind, sich aber leichter trennen lassen als z. B. die Uranisotope und insgesamt Brennstoffvorräte für praktisch beliebige Zeiten darstellen.

Vieles ist beim gegenwärtigen Stand der Entwicklung noch nicht klar zu sehen. So weiß man einerseits, daß aus den erwarteten Fusionsreaktionen keine langlebigen radioaktiven Isotope entstehen. Es tritt aber flüchtiges radioaktives Tritium auf. Außerdem würden Anlagenteile im Laufe des Betriebes radioaktiv. Diese und andere Probleme können aber erst bearbeitet werden, wenn es einmal gelungen ist, einen Fusionsreaktor in Betrieb zu setzen. Eines aber läßt sich schon jetzt sagen: Auch für die Energieerzeugung aus Kernfusionsprozessen gilt die obere Grenze, die sich aus dem Strahlungsgleichgewicht zwischen Sonne und Erde ergibt, denn es wird aus Energie, die in den Atomkernen der Fusionsbrennstoffe gespeichert ist, letztlich Wärme entstehen, die in die Gesamtbilanz eingeht.

Für die Perspektive der Energietechnik, wenn nicht für die nahe, so doch für die fernere, kann folgende fundamentale Tatsache von großer Tragweite sein: Jede Art der Gewinnung von Nutzenergie aus der zugestrahlten Sonnenenergie verändert das Gleichgewicht zwischen Sonne und Erde nicht, wie sofort einzusehen ist. Man erzeugt nicht Wärme aus Brennstoffen, sondern wandelt nur Wärmestrahlung um, die auf jeden Fall die Erde



Glashauswirkung

trifft. Es geht auch keine Wärme verloren, denn die technischen Nutzungswege enden früher oder später in der Energieform Wärme.

Dies sollte ein Grund mehr sein, der Umwandlung von Sonnenenergie Aufmerksamkeit zu schenken. Wir vermeiden den Begriff der Alternativenergie, weil es beim gegenwärtigen Stand der Technik ein »Entweder – Oder« gar nicht gibt. Wenn wir im folgenden Möglichkeiten der Nutzung von Sonnenenergie darstellen, so ist das in dem Sinne gemeint, daß diese Energiequelle zusätzlich erschließbar ist und daß sie an bestimmten Orten für spezielle Zwecke Vorteile bringt. Wird erst einmal die wissenschaftlich-technische Basis der Sonnenenergietechnik breiter geworden sein, so wird sich klarer das Gewicht ihrer Perspektive absehen lassen.

Das Energiegleichgewicht zwischen Sonne und Erde wird außer durch die Wärmeenergie, die wir aus irdischen Brennstoffen erzeugen, auch durch Veränderungen der Atmosphäre beeinflusst. Diese Veränderungen können, als Prozentgehalt ausgedrückt, sehr klein sein, aber dennoch das Verhältnis zwischen zugestrahlter und von der Erde abgestrahlter Energie deutlich verschieben. Die Sonnenenergie wird an den Gasmolekülen der Luft und deren Dichteschwankungen gestreut, und zwar kurzwellige Strahlung stärker als langwellige. Durch diese Streuung entsteht die blaue Farbe des wolkenlosen Himmels. Die an der Erdoberfläche auftreffende Strahlung wird z. T. absorbiert und erwärmt die Erde. Der Rest wird reflektiert. Das Energiemaximum der einfallenden Sonnenstrahlung liegt im gelbgrünen Bereich des sichtbaren Lichts. Die reflektierte Strahlung dagegen ist insgesamt langwelliger. Sie wird nun zu einem erheblichen Teil in die Atmosphäre zurückgestreut, und zwar um so mehr, je größer die Zahl der Mo-

leküle ist, deren Durchmesser über dem der Stickstoff- und Sauerstoffmoleküle liegt. Das betrifft in erster Linie die CO_2 -Moleküle, aber auch dem CO_2 ähnliche Moleküle aus Industrieabgasen und größere Partikeln. Die Atmosphäre hält also einen Teil der an Erd- und Wasseroberfläche reflektierten Strahlungsenergie fest. Sie wirkt ganz ähnlich wie das Glasdach eines Gewächshauses. Man spricht deshalb auch vom Glashaus-Effekt der Atmosphäre. Würde dieses »Glasdach« verändert, etwa — bildhaft ausgedrückt — dicker durch vermehrten CO_2 -Gehalt oder trüber durch erhöhte Staubpartikeldichte, so wäre eine Erwärmung der Erde die zwangsläufige Folge. Eine derartige Verschiebung des Gleichgewichtes hätte die schon erwähnten Folgen, vermutlich auch noch viele andere, z. B. starke Zunahme der Lufterlektrizität, Gewitter und verheerende Stürme. Dieser Zustand würde sich, wenn überhaupt, nur unter äußersten Schwierigkeiten und innerhalb langer Fristen rückgängig machen lassen.

Diese Überlegungen zeigen, wie verwickelt die Zusammenhänge in globalen Dimensionen tatsächlich sind. Die Reinigung von Abgasen hat nicht nur saubere Atemluft zur Folge, bringt nicht nur Rückgewinnung von Stoffen, sondern kann auch bedeutsam für das irdische Energiegleichgewicht und damit für das Erdklima werden.

Bisher — das haben die meteorologischen Beobachtungen ergeben — hat sich das mittlere Erdklima als stabil erwiesen. Einer der führenden Klimatologen der Welt, H. E. Landsberg von der Universität Maryland, USA, stellt fest, daß einige feuchte Sommer oder warme Winter nur als natürliche Klimafluktuationen anzusehen sind. Insgesamt kann von einem Einfluß technischer Abgase auf das Klima vorläufig keine Rede sein.

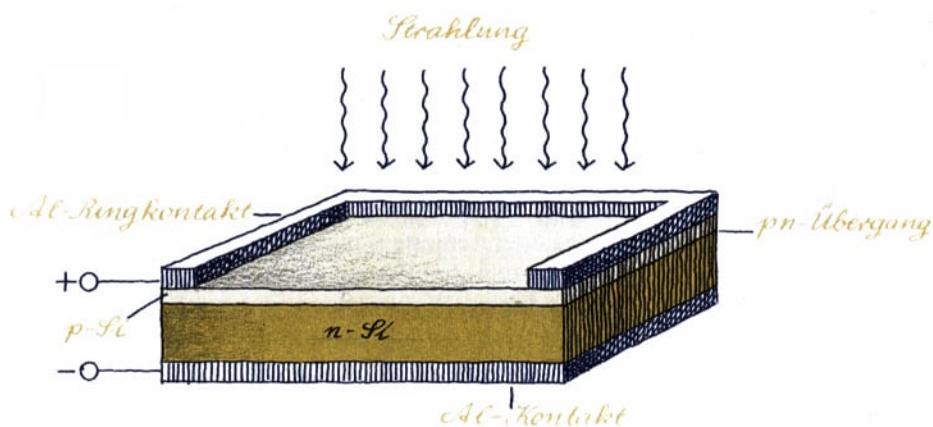
Allerdings treten auch technikenabhängige Faktoren auf, z. B. große Staubmengen und Gaseruptionen bei Vulkanausbrüchen und durch Wind in die Atmosphäre geworfener Staub in Steppen- und Wüstengebieten. Meteorologisches Beobachtungsmaterial liegt erst seit verhältnismäßig kurzer Zeit vor. Die wissenschaftlichen Erfahrungen reichen für viele Zwecke nicht aus. Um so sorgfältiger muß in der gesamten technischen Perspektive auf Gefahren geachtet werden, die sich aus noch nicht gründlich genug erforschten natürlichen Zusammenhängen ergeben könnten.

Unter den Möglichkeiten, auf der Erde technisch nutzbare Energie zu gewinnen, gibt es viele, die ohne oder wenigstens mit viel geringerer Störung lebenswichtiger Gleichgewichte zum Ziel führen, als es bei Verbrennung von Kohle und Erdöl mit niedrigem Wirkungsgrad und beträchtlichem Ausstoß von Abgasen, Ruß und Asche der Fall ist. Je größer unser Energiebedarf wird, je intensiver wir alle Räume der Erde technisch erschließen, um so wichtiger wird es sein, daß wir uns bei allen Projekten und Unternehmen der natürlichen Energieangebote bedienen. Wir fügen uns auf diese Weise in die natürliche Umwelt ein, anstatt sie zu zerstören.

Kleine und große Sonnenkraftwerke

Zunächst erscheint die Tatsache faszinierend, daß man die Strahlungsenergie der Sonne in Solarzellen direkt in elektrische Energie umwandeln kann. Es ergibt sich die Frage nach dem technischen Aufwand und dem Nutzeffekt. Ferner müssen Probleme der Energiespeicherung und der Nutzenergieertragsschwankungen infolge unterschiedlicher Einstrahlung berücksichtigt werden.

Solarzellen sind aus Silizium, Galliumarsenid, Kadmiumsulfid und anderen Halbleitern entwickelt worden. Mit den relativ teuren Siliziumsolarzellen erreicht man Wirkungsgrade von 10 bis 12%, mit den noch teureren Galliumarsenidzellen 15 bis 19%. Billiger herzustellende Kadmiumsulfidzellen oder solche aus anderen polykristallinen Halbleitern, die auf Kunststofffolien gesprüht werden, wandeln nur 5 bis 7% der eingestrahlichten Sonnenenergie in elektrische Energie um. Für ein Sonnenkraftwerk mit einigen Megawatt Leistung würde man bei diesen Wirkungsgraden mehrere Quadratkilometer Fläche für Solarbatterien benötigen. Die Baukosten liegen dann, verglichen mit denen von Kohle-, Wasser- oder Atomkraftwerken, enorm hoch. Allerdings wäre ein derartiges Kraftwerk, abgesehen vom Sauberhalten der Solarbatterieflächen, auf Jahrzehnte nahezu wartungsfrei, verbrauchte keine Rohstoffe und erzeugte keinerlei Abfallprodukte. Die Betriebskosten wären also sehr niedrig. Gegenwärtig werden die niedrigen Wirkungsgrade von Solarzellen als entscheidendes Hindernis angesehen. Einige Forscher nehmen an, daß mit organischen Halbleitern höhere Wirkungsgrade zu erreichen sind. Der relativ große Flächenbedarf und die Probleme, die sich aus stark schwankender Strahlungsintensität am Erdboden



Schema einer Silizium-Solarzelle (aufgeschnitten)

ergeben, sollten nicht so sehr vom Standpunkt des Europäers gesehen werden. In Afrika und Asien stehen riesige, landwirtschaftlich nicht nutzbare Flächen mit günstigen Strahlungsbedingungen zur Verfügung. Hier könnten große Solarkraftwerke errichtet und in kontinentale Verbundnetze einbezogen werden. Der gegenwärtige Stand der Entwicklung zur Nutzung der Sonnenenergie ist jedoch noch nicht soweit, derartige Vorhaben zu verwirklichen. Weder existieren irgendwo in der Welt Produktionskapazitäten zur Herstellung so riesiger Mengen von Solarzellen, noch gibt es einschlägige Erfahrungen aus größeren Versuchsanlagen. In den USA, in Australien und einigen anderen Ländern werden lediglich Projekte für Solarkraftwerke ausgearbeitet, darunter auch solche, die die Umwandlung von Sonnenenergie mittels Solarzellen in den erdnahen Weltraum verlagern, wo eine viel intensivere und gleichmäßigere Einstrahlung zur Verfügung steht. Die elektrische Energie soll dann vom Satellitenkraftwerk durch einen Sender in Form von Mikrowellen zur Erde übertragen werden.

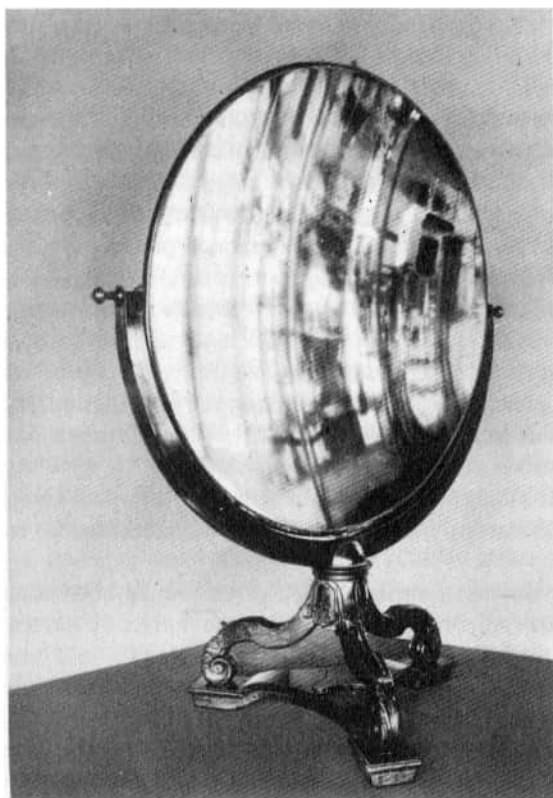
Insgesamt müssen wahrscheinlich in der Solarzellentechnik noch einige wichtige Grundlagen geklärt werden, bevor größere Sonnenkraftwerke errichtet werden können.

Die Umwandlung der Sonnenenergie mittels Solarzellen ist aber nicht der einzige Weg, das große Angebot an Sonnenenergie technisch zu nutzen. Viel älter und einfacher ist die Methode, die Sonnenstrahlung direkt zum Erwärmen von Wasser, Speisen oder sogar zum Schmelzen von Metallen zu verwenden.

Im Mathematisch-Physikalischen Salon des Dresdener Zwingers kann man die großen Hohlspiegel besichtigen, die um 1700 der Freiherr von Tschirnhaus zum Schmelzen von Metallen benutzt haben soll. Aus der Antike wird berichtet, daß der griechische Mathematiker Archimedes im Jahre 212 v. u. Z. bei der Belagerung von Syrakus durch die Römer mit Hohlspiegeln die Sonnenstrahlen so auf die feindlichen Schiffe vor der Stadt konzentriert haben soll, daß diese zum Staunen seiner Mitbürger in Flammen aufgingen.

Strahlungsenergie zum Schmelzen von Metallen zu benutzen ist die denkbar beste Methode, um Metalle in höchster Reinheit herzustellen, weil die Strahlung direkt auf das Schmelzgut ohne starke Erwärmung des Tiegels konzentriert werden kann. Das schmelzende Metall ist dann von nicht-geschmolzenen Teilen seiner eigenen Art umgeben. Zur Zeit des Freiherrn von Tschirnhaus wußte man mit diesem Vorteil noch nicht viel anzufangen. Heute aber haben hochreine Metalle und andere hochreine Werkstoffe erhebliche Bedeutung in Wissenschaft und Technik erlangt. Man beschäftigt sich deshalb schon seit einer ganzen Reihe von Jahren in mehreren Ländern mit der Projektierung und dem Bau von sogenannten Sonnenöfen.

In Odeillo-Font Romeu in den französischen Pyrenäen wurde 1970 ein

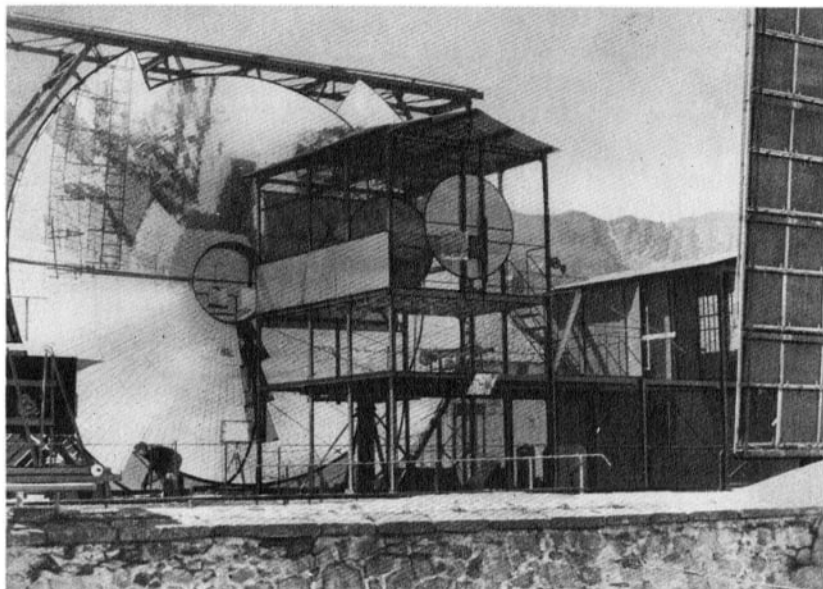
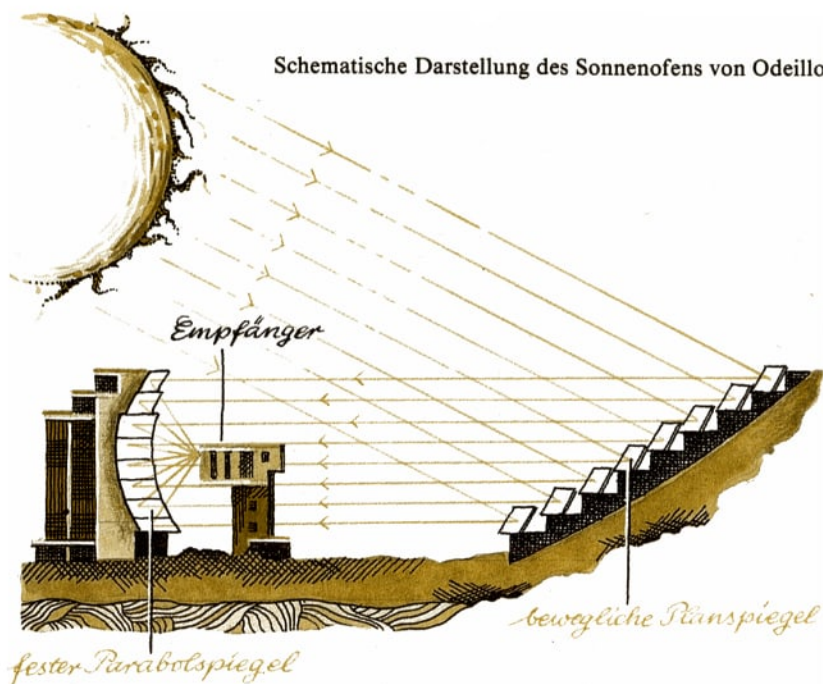


Brennspiegel des Freiherrn von Tschirnhaus im Mathematisch-Physikalischen Salon des Dresdener Zwingers

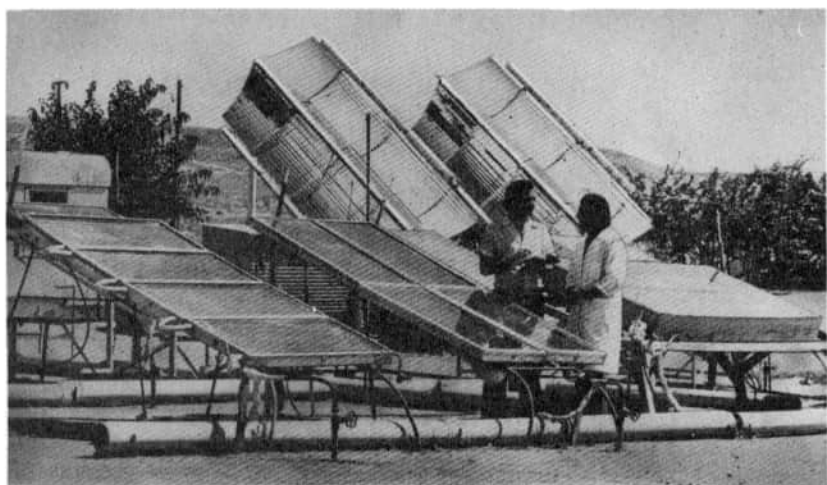
Sonnenofen mit einer Leistung von 1 MW errichtet, mit dem Temperaturen bis zu 4000°C erreicht werden. Bei so hohen Wärmegraden werden Metalloxide und Erden geschmolzen. Der Sonnenofen von Odeillo besteht aus einem Parabolspiegel von 40 m Höhe und 54 m Breite, der aus 9500 einzelnen Hartglasspiegeln zusammengesetzt ist. Diesem festen Parabolspiegel wird die Sonnenenergie von 65 Planspiegeln zugestrahlt, die dem Lauf der Sonne nachgeführt werden. Im Brennpunkt des großen Parabolspiegels ist die Schmelzwanne angeordnet. Mit dieser Anlage werden Forschungsarbeiten, aber auch Aufträge für die Industrie durchgeführt.

Praktisch seit Jahren bewährt und in viel stärkerem Maße eingesetzt, als uns Mitteleuropäern allgemein bekannt, ist die Nutzung von Sonnenenergie in Kleinanlagen zur Erzeugung von Elektroenergie, z. B. zur Versorgung von Leuchttürmen und Forschungsstationen, in Satelliten und Raumsonden, ferner zur Wasserdestillation (Wasserentsalzung), zum Fördern von Trinkwasser aus Grundwasserreservoirs und in Sonnenküchen zum Erwärmen von Wasser und Speisen.

Schematische Darstellung des Sonnenofens von Odeillo



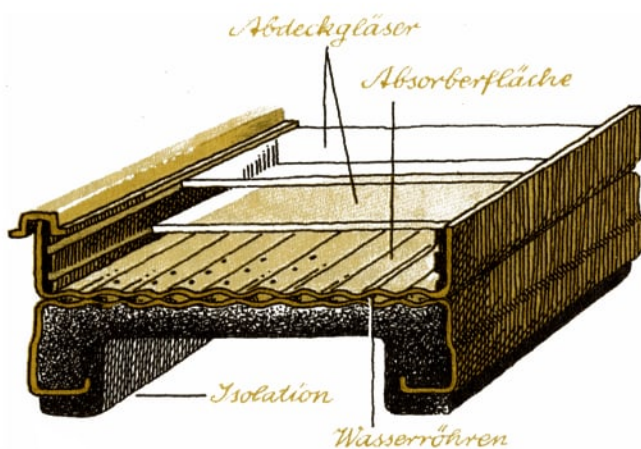
Großer Sonnenofen in den französischen Pyrenäen, rechts der 125 m² große Spiegel, der sich mit der Sonne bewegt, links der feste Parabolspiegel



Mit Sonnenenergie betriebene Destillationsanlage für salziges Grundwasser in der Wüste Karakum – die Anlage liefert an einem Tag bis zu 20 m³ Trinkwasser.

In Buchara produziert ein Werk bereits jährlich 25 000 Sonnenküchen, die in den südlichen Sowjetrepubliken in weit abgelegenen Orten für provisorische Unterkünfte von Geologen, Bautrupps und Viehzüchtern unschätzbare Dienste leisten. In der Wüste Karakum arbeitet seit 1971 eine Wasserentsalzungsanlage mit Sonnenenergie, die aus unterirdischen Reservoirs täglich 30 000 l Trinkwasser gewinnt. Ähnliche Anlagen gibt es in der Wüste Kysylkum und in Arizona. Die erste große Sonnendestillationsanlage wurde schon 1872 von dem schwedischen Ingenieur Carlos Wilson in Las Salinas in Chile errichtet, um die Bergarbeiter mit Trinkwasser zu versorgen. Von amerikanischen Technikern wurde ein kleines Gerät zur Meerwasserentsalzung mittels Sonnenenergie zur Ausstattung von Rettungsbooten entwickelt. Auf einer ganzen Reihe griechischer Mittelmeerinseln dienen kleinere und größere Sonnendestillatoren zur Trinkwasserversorgung der Bewohner.

Eine weitere einfache Methode, die Sonnenenergie zu nutzen, besteht darin, in sogenannten Sonnenabsorbern heißes Wasser zu erzeugen. Fällt Sonnenstrahlung auf Stoffe mit hohem Absorptionskoeffizienten, dann tritt in diesen Stoffen eine beträchtliche Erwärmung auf. Aus Blechtafeln mit hochabsorbierender Oberfläche und eingelagerten Wasserröhren oder aus Schlauchmatten können Anlagen zur Warmwasser-Raumheizung oder zur Beheizung von Schwimmbecken geschaffen werden. Kleinere Häuser, deren Dach teilweise aus solchen Sonnenabsorbern besteht, können so ganz oder teilweise mit Sonnenenergie beheizt werden. In einem Versuchs-

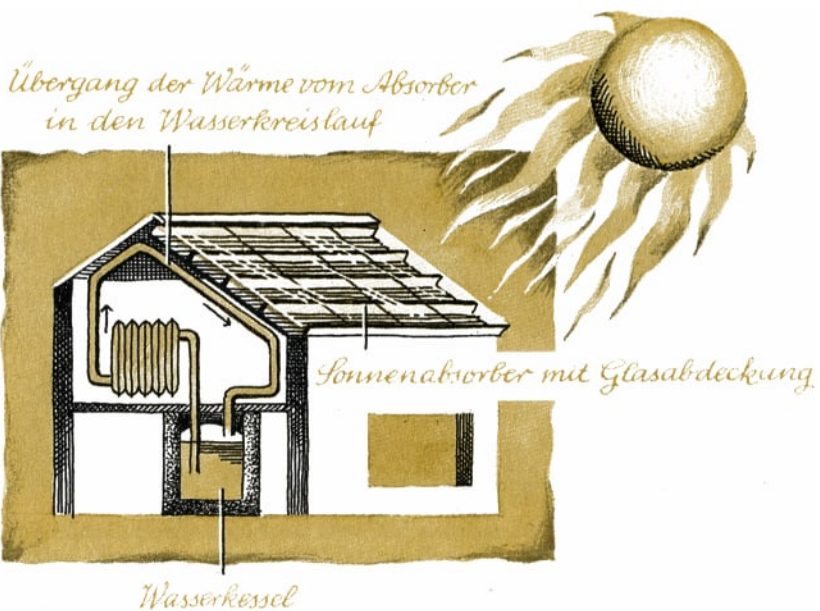


Solarkollektor-Bauelement (für Gebäude)

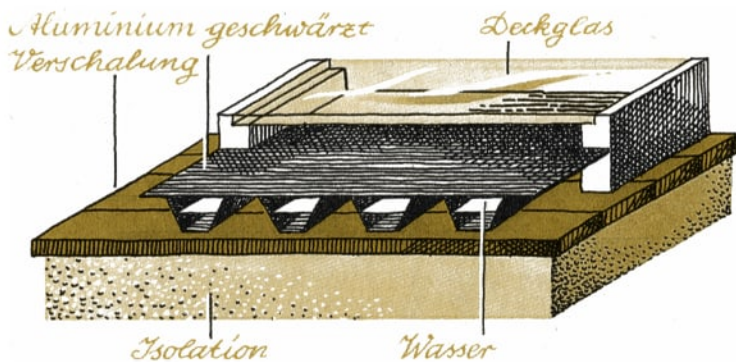


Freibad in Freyburg (Unstrut)

Die 200 m² große Sonnenkollektorfläche im Hintergrund erzeugt eine Heizleistung zwischen 50 und 100 kW und mit dieser eine im Durchschnitt um 3 °C höhere Wassertemperatur

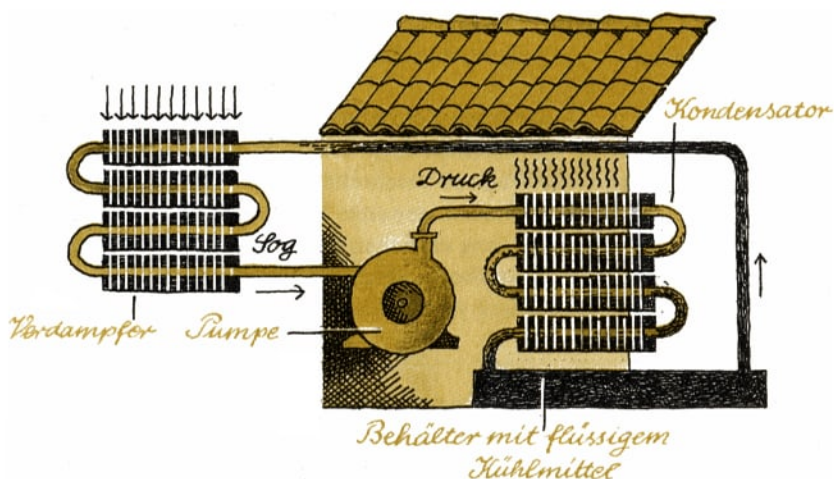


Raumheizung durch Sonnenenergie



Sonnenkollektor für Warmwassergewinnung

haus mit Sonnenabsorberdach in der BRD wurden selbst im Winter noch 52°C in der Warmwasser-Heisanlage erreicht. Die Sonnenabsorber werden meist zusätzlich noch mit ein oder zwei Kunststoff- oder Glasschichten abgedeckt. Die früher schon besprochene Glashaushwirkung erhöht dann die Erwärmung noch beträchtlich.



Prinzip einer Wärmepumpe

Das bei niedrigem Druck im Verdampfer verdampfende Kühlmittel entzieht der Umgebung Wärme. Im Kondensator gibt das Kühlmittel Wärme ab, während es (unter dem hier herrschenden höheren Druck) verflüssigt wird.

In einem Versuchsobjekt der amerikanischen Universität Delaware, 1973 fertiggestellt, einem sehr weitentwickelten »Sonnenhaus«, besteht das erweiterte Dach aus kombinierten Sonnenkollektoren, die nicht nur Sonnenenergie in Wärme umwandeln, sondern zusätzlich mit einer Schicht Solarzellen aus Kadmiumsulfid-Kupfersulfid ausgerüstet sind und Strom an das Hausnetz und zum Betrieb von Wärmepumpen abgeben. Zum Ausgleich über die Nacht hat man chemische und thermische Wärmespeicher entwickelt. Solarzellenstrom kann in Akkumulatorenbatterien gespeichert werden. Man erreicht so zwar keine völlige Unabhängigkeit von einer äußeren Energieversorgung, kann den Energiebedarf aber sehr stark einschränken.

Amerikanische Wissenschaftler entwickelten besonders beschichtete Stahlbleche, deren Oberfläche nahezu alle auftreffende Sonnenenergie absorbiert. Sie erwärmen sich bei normaler Einstrahlung bis auf 540°C . Man kann mit Absorbern aus diesen Blechen Wasser so hoch erhitzen, daß damit Dampfturbinen zu betreiben sind. So würde man mit einer Absorberoberfläche von 8 m^2 etwa 1 kW Elektroenergie erzeugen können.

Alle diese Beispiele zeigen, daß direkt genutzte Sonnenenergie an sehr vielen Stellen nahezu wartungsfreie Energieversorgung ermöglicht, die Verbraucher unabhängig von Verteilernetzen und Brennstoffen macht und erhebliche Anteile an der Gesamtenergieversorgung übernehmen könnte.

Elektro- und Wärmekraftwerkskapazitäten und beträchtlicher Aufwand zur Übertragung und Verteilung von Energie könnten so eingespart werden.

Es ist natürlich nur in größeren Zeiträumen möglich, vorhandene Energieversorgungssysteme umzustellen. Dies erfordert hohe Anfangsinvestitionen und den Mut, neue Wege zu beschreiten. Sicher werden noch einige Jahrzehnte vergehen, bis technisch genutzte Sonnenenergie nennenswerte Anteile an der Energieversorgung erreichen kann. Vielleicht treten in dieser Zeit neue ökonomische Maßstäbe oder sogar Zwänge auf, die diesem Entwicklungsweg mehr Nachdruck verschaffen, als das heute der Fall ist.

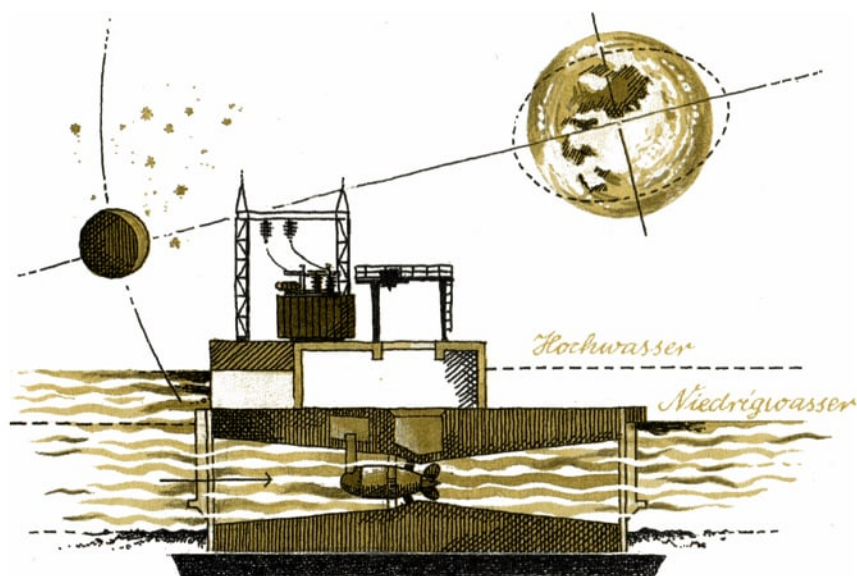
Energien im Wasser

Im strömenden Wasser der Flüsse enthaltene Energie – in Wasserkraftwerken z. T. genutzt – ist eine Energieform, die wir ebenfalls der Sonne verdanken. Die auf diesem Wege zu gewinnende Elektroenergie ist durch Wassermenge und Gefälle der Flüsse begrenzt. In der DDR liefern Wasserkraftwerke knapp 2% der insgesamt erzeugten Elektroenergie. In anderen Ländern, z. B. in Schweden oder im sibirischen Teil der Sowjetunion, erbringen Wasserkraftwerke höhere Anteile. Überall, wo ihre Anlage technisch möglich ist, werden Wasserkraftwerke anderen Kraftwerken vorgezogen, denn sie arbeiten mit hohem Wirkungsgrad und erzeugen weder nennenswerte Abwärme noch Abgase.

Schon alt ist die Idee, die Energie zu nutzen, die im strömenden Meer-



Die Niagara-Fälle in Kanada



Gezeitenkraftwerk (Querschnitt durch den Kraftwerksblock) — oben: Entstehung der Gezeiten, überwiegend durch die Gravitation des Mondes

wasser beim Wechsel zwischen Ebbe und Flut enthalten ist. Bereits 1438 schlug Jacopa Mariano vor, ein Staubecken zu bauen, das sich bei Flut füllt und mit dem bei Ebbe abfließenden Wasser eine Mühle treibt. Moderne Gezeitenkraftwerke arbeiten nach dem gleichen Prinzip. Sie haben mehrere Becken, die gleichzeitig gefüllt, aber nacheinander geöffnet werden. Das Wasser treibt Turbinen, die die Energie des abströmenden Wassers in Elektroenergie umwandeln. Für den Bau solcher Kraftwerke eignen sich besonders Buchten und Fjorde. Die Baukosten sind sehr hoch, der Betrieb aber billig und absolut umweltneutral. Wichtig für die Leistung eines Gezeitenkraftwerks ist der Tidenhub — das ist die Differenz der Wasserstände zwischen Ebbe und Flut. Das erste Gezeitenkraftwerk wurde bei Saint Malo an der französischen Atlantikküste errichtet. Es arbeitet seit 1963 bei einem Tidenhub von 13,5 m mit 24 Turbinen und erzeugt im Mittel jährlich 540 Mill. kWh. In der UdSSR wird in der Meeresbucht von Kuslaja, 100 km nördlich von Murmansk, eine Versuchsanlage betrieben. Ein Gezeitenkraftwerk an der Passamaquoddy Bay in Kanada, dessen Bau mehrfach verschoben wurde, soll eine elektrische Leistung von 1000 MW erbringen.

Beim Betrieb von Gezeitenkraftwerken bedingen Spring- und Nippfluten Schwankungen in der Energieausbeute. Sie entstehen durch unterschiedliche Stellungen von Mond und Sonne sowie durch Windeinflüsse.

Das allmähliche Verschlicken der Becken verlangt entsprechende Wartungsarbeiten. Dennoch überwiegen die Vorteile: kein Brennstoffverbrauch und -transport, keine Umweltbelastung durch Abwärme und Abgase. In verschiedenen Ländern wurden mehr oder weniger große Projekte entwickelt. In Frankreich sollen zehn weitere Werke zwischen Brest und Le Havre entstehen. Die Engländer wollen im inneren Bristolkanal einen 2 km langen Damm errichten, der ein 44 km² großes Becken abriegelt. Ein Gezeitenkraftwerk soll an dieser Stelle später jährlich 2,4 Mrd kWh liefern. In der UdSSR ist zunächst eine mittlere Anlage am Kuloi-Fluß am Weißen Meer vorgesehen, die 1,3 Mrd. kWh pro Jahr liefern wird. Später soll ein Großprojekt in Angriff genommen werden, das die Abdämmung einer 6800 km² großen Bucht des Weißen Meeres vorsieht. Hier sollen die Gezeiten einmal 1000 Turbinen treiben. Weitere Projekte gibt es in Argentinien, für die Küsten Indiens, in Australien und China. Man hat offenbar erkannt, daß viel Versäumtes nachzuholen ist. Gezeitenkraftwerke hätte man schon vor fünfzig oder mehr Jahren bauen können. Der Plan für das französische Saint-Malo-Werk bestand schon 1923, aber erst 1945 kam es zum ersten Modellversuch, und erst 1961 begann der Bau. Allzulange hielten die billiger zugänglichen fossilen Brennstoffe davon ab, andere Reserven auszunutzen.

An der kubanischen Nordküste arbeitet seit einigen Jahren eine Versuchsanlage, mit der die Temperaturdifferenzen zwischen kaltem Tiefenwasser und dem von der Sonne auf 25 bis 30 °C erwärmten Oberflächenwasser des Meeres zur Energiegewinnung ausgenutzt wird. Die Anlage liefert 7000 kW. Man hat ferner vorgeschlagen, die Strömungsenergie des Golfstromes oder anderer stabiler Meeresströmungen zu nutzen. Würde man nur 5% dieser Energie in elektrische Energie umwandeln können, so erhielte man eine Leistung von 25 Mrd. kW. Das ist nicht so hypothetisch, wie es den Anschein haben mag. Ebenso, wie man die imposante Technik der Bohrinseln entwickelt hat, um im Schelf der Kontinente nach Erdöl zu bohren, könnte man auch Turbinenkraftwerke schaffen und im Meer verankern, z. B. nahe der Küste von Miami, wo der Golfstrom eine Strömungsgeschwindigkeit von 6 bis 8 km/h hat.

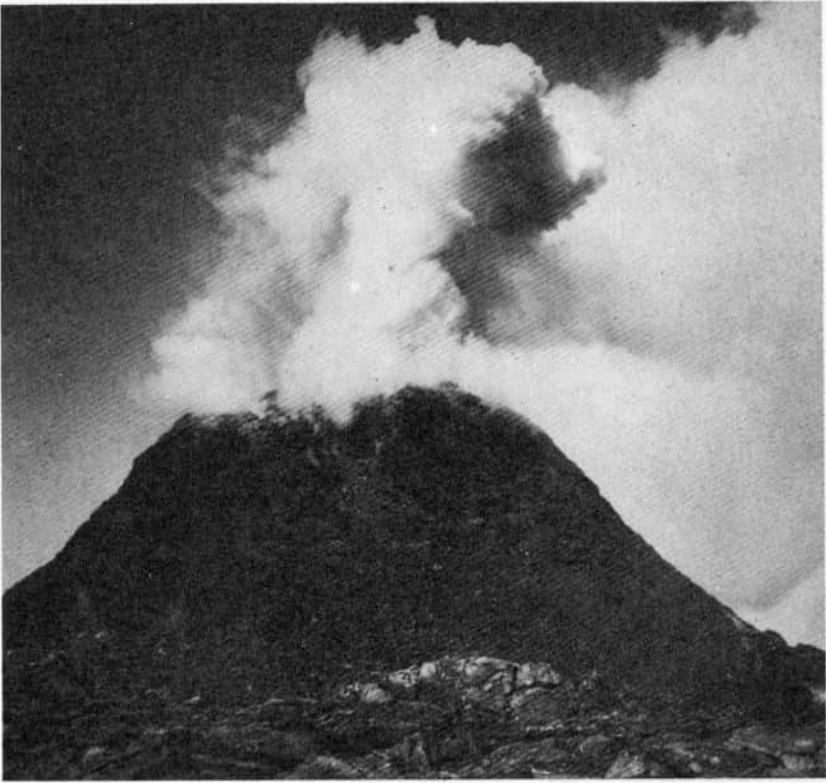
Manche Energiereserven sind in unterirdischen Heißwasservorkommen vorhanden. Französische Geologen stellten fest, daß bei Paris und im Elsaß in etwa 1800 m Tiefe riesige Heißwasserbecken existieren, aus denen allein soviel Energie entnommen werden könnte, wie die gesamte gegenwärtig installierte Leistung aller französischen Kraftwerke ausmacht. In vulkanischen Zonen treten an vielen Orten Heißwasserquellen an die Erdoberfläche. Solche Heißwasserquellen werden bereits auf Island, in Oberitalien, in Nordamerika, auf Kamtschatka und in Japan zur Raumbeheizung und zur Erzeugung von Elektroenergie genutzt. Natürlich sind diese Heißwasser-



Dampfquellen bei Gryla auf Island

vorkommen immer nur von lokaler Bedeutung, aber wo sie vorhanden sind, bieten sie unübersehbare Vorteile.

Nahe liegt dann auch die Idee, vulkanische Energien mittels Tiefenbohrungen lenkbar zu machen und Methoden zur direkten Nutzung der Wärmeenergie des Erdinneren zu entwickeln. Diese und andere Ideen mögen gegenwärtig noch recht hypothetisch sein. Sie sollen nur die Vielfalt der Möglichkeit zeigen, die uns offenstehen. Natürlich erfordert jeder einzelne



Auswurfkegel des Vesuv

Vesuv in voller Tätigkeit



Weg seine Technologie, die erst einmal zu entwickeln wäre. Aber sicher wird man nicht mehr lange die Wirtschaftlichkeit solcher neuer Wege nur aus Kostenvergleichen mit der Energie aus fossilen Brennstoffen errechnen.

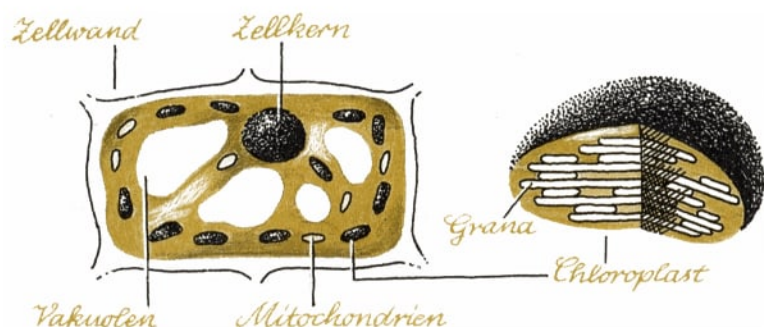
Antriebsenergien

Kraftfahrzeuge, Schiffe und Flugzeuge beziehen ihre Antriebsenergie – sehen wir von großen, durch Atomreaktor getriebenen Schiffen ab – aus chemischer Energie, die in Treibstoffen wie Benzin oder Dieselmotorkraftstoff gespeichert ist. Seit langer Zeit suchen Forscher und Techniker andere Wege, um zu Energieträgern für Antriebe zu kommen, die bei ausreichender Leistungsabgabe leicht genug sind und mit wirtschaftlich vertretbaren Kosten produziert werden könnten. Wesentliche Aspekte sind heute auch Menge und Zusammensetzung der bei der Energieumwandlung der Treibstoffe entstehenden Abgase.

Viele Wissenschaftler sind überzeugt, daß sich mit einiger Aussicht auf Erfolg solche Möglichkeiten realisieren lassen müßten. Vieles spricht dafür, daß dabei auch Vorbilder der Natur hilfreich sein können. Wenn z. B. kleine Vögel, wie Stare und Kolibris, Flüge zwischen 500 und 1000 km über offenes Meer, also ohne Nahrungsaufnahme, bewältigen können, dann muß es in der organischen Welt Energiespeicher und Umwandlungsprozesse von der gesuchten Art geben.

Alle Tiere und Pflanzen synthetisieren ihre Kraftstoffe aus den aufgenommenen Nahrungsstoffen. Als energiereiche Verbindung tritt dabei Adenosintriphosphat, allgemein abgekürzt ATP, auf. Es gibt keinen irdischen Organismus, der ohne ATP leben könnte. ATP-Moleküle bestehen aus der stickstoffreichen Base Adenin, einem Zucker (Ribose) und drei Phosphatresten mit einem Magnesiumion. Diese Moleküle werden in jeder Zelle mit Hilfe von Enzymen synthetisiert. Das geschieht in bestimmten Gebilden innerhalb der Zelle. In Pflanzenzellen sind es die Chloroplasten, die mit ihrem hohen Chlorophyllgehalt Sonnenlicht absorbieren und diese für alle folgenden biochemischen Reaktionen als primäre Energie zur Verfügung haben. In tierischen Zellen sind es die Mitochondrien. Das in Muskelzellen gebildete ATP liefert die Energie zur Muskelkontraktion. Dies geschieht, indem sich bei ATP-Zufuhr die Filamente des Muskelweißes Myosin gegen die Filamente eines zweiten Muskelweißes, Aktin, verschieben; der Prozeß führt insgesamt zu einer Verkürzung der ganzen Struktur.

Die Synthese von ATP in den tierischen Zellen ist Teil eines komplizierten Kreises von Reaktionen, den man auch als Atmungskette, innere oder



Schematische Darstellung einer Pflanzenzelle

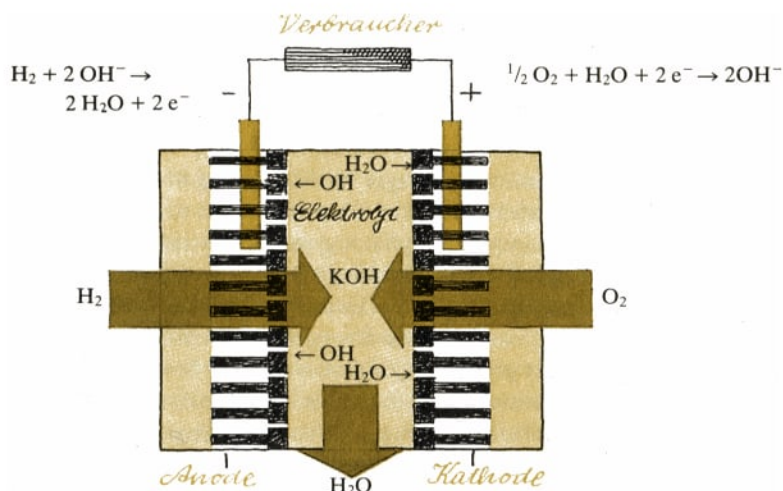
Zellatmung bezeichnet. Summarisch wird in dieser Reaktionskette Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser verbrannt. Das biologisch Wesentliche ist aber, daß diese sogenannte Knallgasreaktion nicht direkt, sondern über eine Reihe von annähernd reversiblen Zwischenreaktionen mit hohem Wirkungsgrad erfolgt.

Ähnlich verlaufen die Vorgänge in Pflanzenzellen. In den Chloroplasten wird mit Hilfe der absorbierten Lichtenergie ATP gebildet und in der Bilanz aus mehreren Teilreaktionen Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Der Wasserstoff (an ein Enzym gebunden) reduziert Kohlendioxid zum Einbau des Kohlenstoffs in Glukosemoleküle, aus denen alle anderen Pflanzenstoffe aufgebaut werden.

Biochemiker haben die komplizierten Prozesse in pflanzlichen und tierischen Zellen, die wir hier nur in einem kleinen, sehr unvollständigen Einblick kennengelernt haben, sehr genau erforscht, obwohl längst noch nicht alles aufgeklärt werden konnte. So ist z. B. noch unbekannt, warum gerade ATP eine so dominierende Stellung im Zellstoffwechsel einnimmt. Wichtig ist, daß die biochemischen Energietransformationen in den Chloroplasten bzw. in den Mitochondrien an mehrschichtige Membranstrukturen gebunden sind. Diese aus Proteinen und Phospholipoiden aufgebauten, z. T. mehrfach gefalteten Membranen trennen einerseits Reaktionsräume, enthalten aber andererseits aktive Transportmechanismen für bestimmte chemische Verbindungen und sorgen auf diese Weise für den geordneten Ablauf des gesamten Zellstoffwechsels.

Die Knallgasreaktion setzt einen sehr hohen Energiebetrag frei, etwa 0,066 kWh/Mol. Beim Durchlaufen der Atmungskette werden drei ATP-Moleküle synthetisiert, in denen etwas weniger als die Hälfte dieser Energie, etwa 0,028 kWh/Mol, gespeichert ist.

Eine technische Parallele zu den Energie umsetzenden Reaktionen in lebenden Zellen ist die Brennstoffzelle, in der chemische Energie direkt in



Schema einer Brennstoffzelle (Knallgaszelle)

elektrische Energie umgewandelt wird. Erste Arbeiten zu diesen Problemen wurden schon 1894 von dem deutsche Physikochemiker Wilhelm Ostwald durchgeführt. Inzwischen liegen umfangreiche theoretische und experimentelle Arbeiten über diese Art technischer Energieumwandlung vor, die in vieler Hinsicht große Vorzüge verspricht, z. B. hohen Wirkungsgrad, geringen Wartungsaufwand und kein Auftreten schädlicher Abgase.

Von den heute bereits realisierten Brennstoffzellen ist am besten die Knallgaszelle erforscht. Ihre Brennstoffe sind Wasserstoff und Sauerstoff. Diese Gase werden zunächst getrennten Räumen der Zelle zugeführt. Sie treten durch die porösen Elektroden in den mittleren Teil der Zelle, wo die Gasmoleküle mit Hilfe des Elektrolyts zerlegt werden. An der Sauerstoffelektrode geben Wasserstoffionen ihre positive Ladung ab, an der Wasserstoffelektrode reagieren negative OH-Ionen mit dem Wasserstoff. An beiden Elektroden entsteht Wasser. Die gewonnene elektrische Energie stammt aus den chemischen Bindungsenergien der Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle.

Anstelle von Wasserstoff und Sauerstoff könnte man auch andere Stoffe verwenden. Der Elektrolyt kann durch eine Ionenaustauschermembran ersetzt werden. Es gibt auch Brennstoffzellen, die bei höheren Temperaturen von 200 °C bis zu 1100 °C arbeiten. Bisher sind praktisch einsetzbare Zellen noch sehr teuer. Sie haben Massen zwischen 10 kg und 40 kg und ein Leistungsvolumen von 20 dm³ bis 30 dm³ pro Kilowatt elektrischer Leistung. Ihr Einsatz beschränkt sich deshalb vorläufig auf Funk- und Navigationsanlagen und auf die Raumfahrttechnik. Sie erfordern fast keine War-

tung. Elektroden und Elektrolyt verbrauchen sich nicht. Sie arbeiten geräuschlos und können theoretisch einen Wirkungsgrad bis zu 100% erreichen. Brennstoffzellen mit genügend niedrigem Leistungsgewicht und mit niedrigen Kosten zu entwickeln erfordert wahrscheinlich noch die Überwindung einiger grundsätzlicher Schwierigkeiten.

Zur Gewinnung von Antriebsenergie ist der Umweg über Brennstoffzellen vorläufig offenbar nicht geeignet. Dennoch stellt die Brennstoffzelle eine gute Übernahme einer Prinziplösung der Natur in den Bereich der Technik dar. Der Weg sollte weiter verfolgt werden.

Eine andere Variante, an der zur Zeit intensiv gearbeitet wird, geht davon aus elektrische Energie, in chemische Energie umgewandelt, zu speichern, wie das im Akkumulator geschieht. Anders als in der Brennstoffzelle wird hier nicht Brennstoff, sondern elektrische Energie direkt zugeführt und damit transportabel gemacht. Sie kann mit hohem Wirkungsgrad in mechanische Antriebsenergie umgewandelt werden. Entscheidend ist die speicherbare Energiemenge, die in einem bestimmten Zellenvolumen und -gewicht unterzubringen ist. Gelingt es, diese gegenüber gegenwärtigen Akkumulatoren wesentlich zu erhöhen, so könnten Kraftfahrzeuge aus der Steckdose »aufgetankt« werden. Auch diese Methode hat für sich, die Verbrennungsabgase im Kraftverkehr aus der Welt zu schaffen.

Näherliegende technische Lösungen für das Problem, fossile Brennstoffe als Quellen für Treibstoffe zu ersetzen, bestehen darin, andere chemische Verbindungen – etwa Alkohole – in ähnlicher Weise zu verbrennen wie Benzin oder Dieselöl. Das bedeutet, solche Antriebsstoffe aus geeigneten Pflanzen – also letzten Endes aus Sonnenenergie – in ausreichender Menge und kostengünstig zu gewinnen. In Brasilien werden z. B. heute schon große Mengen an Zuckerrohr angebaut, zu Alkohol verarbeitet und dieser anteilig in speziell dafür entwickelten Vergasermotoren als Treibstoff eingesetzt.

Es ist heute wohl unmöglich vorauszusagen, wie Antriebsenergien in großem Umfang in ferner Zukunft gewonnen und die Verkehrstechnik bestimmen werden. Das Problem ist nicht nur wegen der Deckung des Bedarfs, sondern auch durch die oft umweltgefährdende Qualität der Verbrennungsabgase unserer gegenwärtigen Treibstoffe eine Herausforderung an Wissenschaftler und Techniker.

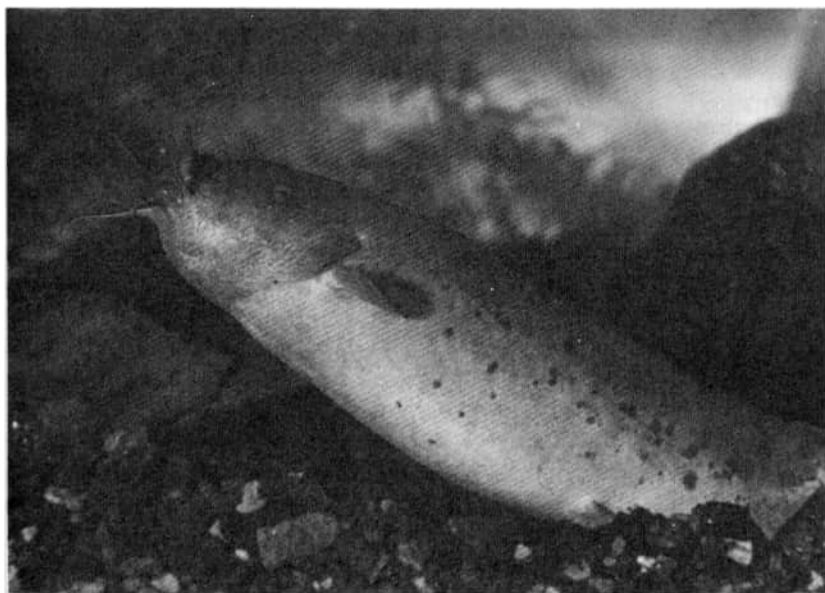
Die Energieumwandlungsprozesse in der Natur sind noch nicht so erschlossen, daß wir heute ihren Vorbildwert für die Technik übersehen können. In vielen Laboratorien wird daran gearbeitet, diese Prozesse bis in ihre feinsten Einzelheiten zu ergründen. Es ist nicht unwahrscheinlich, daß sich beide Wege – die Suche nach neuen technischen Antriebsenergien und die Erforschung der Energieumwandlungen in der belebten Natur – immer näherkommen und füreinander fruchtbar werden.

Tiere, die Strom und Licht erzeugen

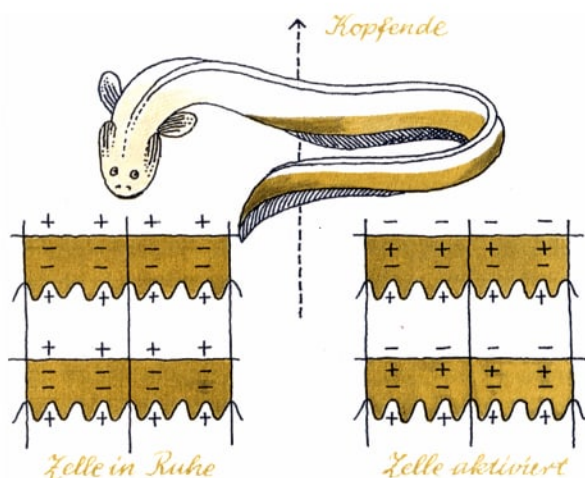
Wir finden in der Natur noch eine ganze Reihe von Vorgängen der Energieumwandlung, die technisch für viele kleine, aber effektive Anwendungen von Interesse sein können. Da sind z. B. die elektrischen Organe der Fische, deren Erforschung vielleicht sogar für die eben genannten Probleme der Brennstoffzellen und Energiespeicherzellen bedeutsam ist.

Zitteraale, Zitterrochen, Meeresaal, Nilhechte und einige andere Arten von Fischen sind in der Lage, zu Zwecken der Abwehr und des Beutefangs starke elektrische Schläge auszuverteilen. Sie besitzen besondere elektrische Organe, die aus modifiziertem quergestreiftem Muskelgewebe bestehen, das zu Säulen aus vielen übereinandergeschichteten Platten ausgebildet ist. Jede Platte erzeugt wie die Zelle einer Batterie eine bestimmte elektrische Spannung, die zwischen 10 und 150 mV liegt. Die Höhe der gesamten elektrischen Spannung ergibt sich also aus der Zahl der Platten in einer Säule, die Stromstärke aus dem Querschnitt der Platten und der Zahl der parallel geschalteten Säulen innerhalb eines elektrischen Organs. Jede Platte einer Säule ist enerviert. Die elektrische Entladung des Organs wird durch Nervenimpulse ausgelöst.

Die elektrischen Organe der im Süßwasser lebenden Arten sind der geringen elektrischen Leitfähigkeit des Süßwassers in der Weise angepaßt,



Zitterwels



Prinzip des elektrischen Organs eines Fisches

daß sie hohe Spannungen — bis zu mehreren hundert Volt — erzeugen können. Die im Salzwasser der Meere (höhere elektrische Leitfähigkeit) lebenden Arten erzeugen weniger hohe Spannungen, dafür aber elektrische Schläge mit Stromstärken bis zu einigen Ampere. Der Zitteraal, ein Süßwasserfisch, erzeugt mit seinem elektrischen Organ Spannungen zwischen 300 V und 800 V und Stromimpulse bis zu 1 A von 2 bis 3 ms Dauer. Der am Kopf befindliche positive Pol bewirkt, daß sich in dem relativ starken elektrischen Feld kleine Beutetiere direkt in Richtung auf sein Maul bewegen müssen. Die Natur hat also die Methode des elektrischen Fischfangs längst den Menschen vorweggenommen. Der im Meer lebende große Zitterrochen besitzt ein elektrisches Organ, das aus rund 500 parallelgeschalteten Säulen zu je etwa 375 Platten besteht. Damit erzeugt er Stromstärken bis zu 120 A und Schlagleistungen von 1,8 kW bis zu 5 kW.

Außer diesen Starkstromfischen, die ihre elektrischen Organe als Waffe benutzen können, gibt es sogenannte Schwachstromfische mit kleineren elektrischen Organen, die sie zur Orientierung benutzen. Darauf werden wir später eingehen. Die Fische benutzen ihre elektrischen Organe auch zur Verständigung mit dem Partner — zur Balz.

Interessante Vorbilder finden wir in der belebten Natur für die Erzeugung von Licht aus chemischer Energie. Eine ganze Reihe von Tieren — in unseren Breiten z. B. die bekannten Glühwürmchen, auch Fäulnisbakterien und Pilze (Hallimasch), Leuchtbakterien im Meer, Quallen, Manteltiere und viele Bewohner der Tiefsee — ist in der Lage, kaltes Licht zu erzeugen. Sie wandeln chemische Energie, wiederum in Eiweißmolekülen gespei-

chert, nahezu vollständig (ohne Wärmeerzeugung) in Licht um. Diese Erscheinung bezeichnen wir als Biolumineszenz oder Chemolumineszenz. Sie hat für die Tiere zum Erzeugen von Signalen bei der Suche nach dem Partner Bedeutung, dient manchmal auch zum Anlocken von Beutetieren oder zur Abschreckung von Feinden.

Technisch könnte die Chemolumineszenz für viele Zwecke benutzt werden, z. B. zur Beleuchtung von Instrumentenskalen und Zifferblättern oder als Notbeleuchtung in Räumen aller Art.

In letzter Zeit ist es verschiedenen Forschergruppen gelungen, Erfolge bei der Entwicklung technischer Lichtquellen zu erzielen, die auf der Chemolumineszenz beruhen. Die prinzipielle Lösung des Problems besteht darin, Substanzen zu finden, deren Moleküle sich unter Abgabe von Lichtquanten in andere umwandeln. Im biologischen Bereich hat man als eine solche Substanz das Luziferin entdeckt. Es wird mit Hilfe eines Enzyms, der Luziferase, durch molekularen Sauerstoff oxydiert, erreicht dabei einen angeregten Zustand, aus dem es unter Aussendung von Licht in den Grundzustand zurückkehrt.

Amerikanischen Wissenschaftlern gelang es, eine technische Lichtquelle zu entwickeln, die nach dem gleichen Prinzip arbeitet. In einem durchsichtigen Plastzylinder befinden sich eine Salizylsäureverbindung und als Oxydationsmittel eine Ampulle mit verdünnter Wasserstoffsuperoxidlösung mit einem Katalysator, der die Rolle des Enzyms zu übernehmen hat. Die Lichtquelle ist als Notleuchte gedacht. Wird die Wasserstoffsuperoxidampulle zerbrochen, so kommt die Reaktion in Gang, bei der eine relativ helle, gelbgrüne Leuchterscheinung auftritt. Die Leuchtdauer beträgt bis zu drei Stunden.

Der Gedanke, daß man zukünftig einen Lichtstoff in Tüten oder Flaschen mit sich führen kann und bei Bedarf nur in eine kleine Leuchte zu füllen braucht, hat doch viele praktische Anwendungsmöglichkeiten für sich. Er zeigt auch, daß unserer technischen Entwicklung bisher Möglichkeiten verborgen geblieben sind, die zu verfolgen sich durchaus lohnen könnte.

Der italienische Nobelpreisträger Professor Giulio Natta hat sogar einen kleinen Lichtmotor entwickelt. Er besteht aus Strängen einer Kunstfaser, die sich zusammenziehen, wenn sie sich unter der Einwirkung von Licht erwärmen. Mehrere solcher Stränge werden nacheinander bestrahlt und setzen eine Kurbelwelle in Drehbewegung.

Die Wirkungen von Licht auf organische Kettenmoleküle sind ein noch weitgehend unbekanntes Gebiet. Hier wird man die Antriebskräfte für die Lichtnachlaufsteuerungen finden, die wir in den Blättern der grünen Pflanzen beobachten. Wir haben schon auf verschiedene praktische Anwendungsmöglichkeiten für dieses Phänomen hingewiesen. Es erscheint durchaus möglich – würde man das Problem erst einmal technisch beherrschen

– auch größere Objekte, wie Solarbatterien oder Sonnenreflektoren, der Sonne nachzuführen, so wie man es bei den grünen Blättern sieht.

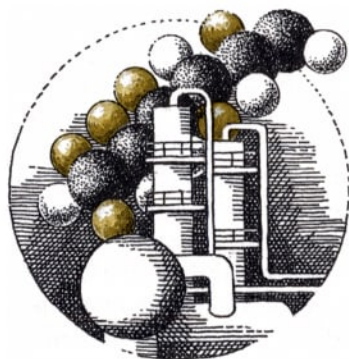
Pflanzen bewältigen diese Aufgabe offensichtlich mit sehr geringem Aufwand. Das Licht übt bei Sprossen und Blattstielen eine direkte Steuerwirkung aus. Die Sprosse mancher Pflanzenarten reagieren schon auf Licht von 1 s Dauer. Es steht auch eindeutig fest, daß jedes der Blätter einer Pflanze seine eigene Lichtnachlaufsteuerung besitzt. Es stellt sich immer senkrecht zum einfallenden Licht, kann aber dem Schatten eines benachbarten Blattes ausweichen. Die Fähigkeiten der Pflanzen zur Lichtsteuerung gehen sogar noch weiter. Das Löwenmäulchen z. B. dreht seine Blüten zum Licht, später aber mit denselben Stielen die Frucht in entgegengesetzter Richtung vom Licht fort.

Es kommt nicht darauf an, zu all diesen Beobachtungen in der Natur sofort eine technische Anwendung zu finden. Wir stellen vielmehr fest, daß wir in der Natur eine Fülle von Erscheinungen und Vorgängen vorfinden, bei denen mit äußerst geringem Aufwand große Nutzeffekte erzielt werden. Unser bisher praktizierter Umgang mit Energie ging allzusehr davon aus, daß uns Energie im Überfluß zur Verfügung steht. Wir sehen aber, daß dem nicht mehr lange so sein kann. Technische Entwicklung bedeutet für die Zukunft äußerst haushälterischen Umgang mit allen Formen der Energie – und das nicht nur wegen der Kosten, sondern, viel gravierender, wegen globaler Gleichgewichte, die zur Erhaltung der irdischen Lebensbedingungen nicht zerstört werden dürfen.

Die Natur bietet uns Energiereserven an, die auch darin bestehen, gleiche Effekte mit geringerem Energieaufwand zu erreichen, als das mit der gegenwärtigen Technik möglich ist.

4. Kapitel

Die überlegene Chemie in Pflanzen und Tieren



Die chemische Forschung und das Vorbild Natur

Die ersten Anfänge chemischer Erfahrungen reichen wohl schon in die Zeit zurück, als die Menschen versuchten, die natürlichen Rohstoffe für ihre Zwecke in besser geeignete Formen umzuwandeln – Nahrungsmittel zu garen oder zu konservieren, Felle zu gerben, Wolle zu färben, Ton zu brennen und Metalle zu schmelzen und zu schmieden. Zudem besaßen die Menschen schon vor tausend Jahren erstaunliche Kenntnisse über viele Heilkräfte in Pflanzen. Sogenannte Naturvölker beherrschen heute noch Bereiche der Pflanzenmedizin in einer Weise, die von der wissenschaftlichen Biochemie nur unvollkommen erklärt werden kann. Man lese dazu nur, was Egon Erwin Kisch in seinen »Entdeckungen in Mexiko« zu diesem Kapitel berichtet.

Man kann chemische Forschung und Praxis in drei Stufen einteilen, obwohl eine solche Einteilung weder eine deutliche sachliche Trennung noch eine historische Unterscheidung in den vielen Spezialbereichen chemischer Entwicklung ohne zahlreiche Widersprüche beschreiben kann. Sie soll nur dem Verständnis und dem Überblick über die Gesamtentwicklung chemischer Technologien dienen.

In der ersten Stufe wurden Rohstoffe der Natur nach bestimmten Ver-

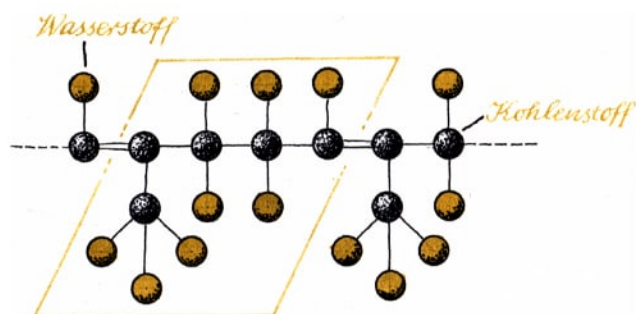
fahren gewonnen, aus natürlichen Stoffgemischen extrahiert und durch Zusammenbringen mit anderen natürlichen Stoffen verändert (veredelt). Schon auf dieser Stufe waren viele wichtige Ergebnisse chemischer Forschung und Technik erreichbar. So lernte man, Bindestoffe in der Bautechnik zu verwenden, Schmiermittel aus natürlichen Fetten und Wachsen zu gewinnen, entdeckte natürliche Farbstoffe (Krappwurzel, Indigo), destillierte Alkohol aus verschiedenen Früchten und konnte berauschende Getränke brauen. Knochenleim und andere Klebmittel, Seifen und ähnliche Waschmittel, Papier und Arzneimittel wurden aus natürlichen Stoffen gewonnen. Man bediente sich dabei oft anorganischer Säuren und Laugen, wobei hauptsächlich deren Vermögen zur Wirkung kam, chemische Verbindungen in bestimmter Weise zu zersetzen.

In der zweiten Stufe der Entwicklung chemischer Technik wurde die Synthese von Substanzen aus molekularen Grundbausteinen zum Hauptziel. Man hatte viele chemische Zersetzungsreaktionen erforscht und auf diesem Wege den molekularen Aufbau einer ganzen Reihe von Naturprodukten weitgehend aufgeklärt. Physikalische Methoden, vor allem die optische Spektroskopie, hatten dabei manche Hilfsdienste geleistet. Nun versuchte man, den umgekehrten Weg zu gehen, komplizierte Moleküle aus einfachen zusammenzusetzen. Dieses Bestreben hatte oft sehr offenkundige wirtschaftliche Ursachen.

Um 1840 hatte Justus von Liebig erkannt, daß dem Boden zur Steigerung landwirtschaftlicher Erträge Nährstoffe in Form von Stickstoffverbindungen, Kaliumsalzen, Phosphaten und Kalk zugeführt werden müssen. Daraus entwickelte sich bald ein starker Bedarf an geeigneten Düngemitteln. Als wertvolles Stickstoffdüngemittel wurde der schon rund hundert Jahre zuvor entdeckte Chilesalpeter erkannt. Die jährlich von Chile aus verschiffte Menge von bergmännisch abgebautem Salpeter stieg vom 935 t im Jahre 1825 auf 2 Mill. t im Jahre 1907. Die Erschöpfung dieser Vorräte war abzusehen. Die Chemiker sahen sich vor die Aufgabe gestellt, Salpeter zu produzieren. Als Rohstoff kam nur der Stickstoff der Luft in Frage.

Diese Aufgabe wurde durch das 1908 bis 1913 entwickelte Haber-Bosch-Verfahren gelöst, bei dem aus Luftstickstoff und Wasserdampf in hochdruckfesten Öfen bei Temperaturen von 600 °C und Drücken über 20 MPa Ammoniak (NH_3), ein stechend riechendes Gas, erzeugt wird. Ammoniak ist heute ein wichtiger Grundstoff der chemischen Industrie, der nicht nur den Ausgangsstoff für alle Stickstoffdüngemittel darstellt, sondern auch viele andere Anwendungen findet.

Eine interessante Entwicklung ist auch die des Kautschuks. Er war seit 1750 als Milch des Kautschukbaumes in Europa bekannt. 1839 fand der Chemiker Goodyear, daß Kautschuk durch Beimengung von Schwefel und Erhitzen auf 140 °C – wir nennen es heute Vulkanisieren – zu Gummi



Bau des Kautschuk-Moleküls $(C_5H_8)_x$ ($X = 1000$)

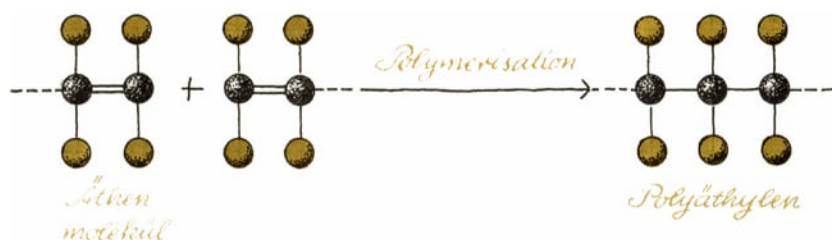
wird. Mischt man 8 bis 10% Schwefel bei, erhält man Weichgummi, mit 30% Schwefel Hartgummi.

Dieser neue Werkstoff erlangte rasch sehr hohe Bedeutung, insbesondere für die Fahrzeugindustrie. Der in den Urwäldern Brasiliens wildwachsende Kautschukbaum wurde nach Westindien exportiert und besonders auf den malaiischen und Molukken-Inseln in großen Plantagen angebaut.

Die Staaten, die Kautschuk importieren mußten, waren natürlich daran interessiert, einen Weg zu finden, diesen Rohstoff synthetisch herzustellen. Schon um 1860 versuchten Chemiker, den Bau des Kautschukmoleküls zu erkunden. 1909 gelang den Chemikern Harries und Hofmann die erste Synthese des Kautschuks. Erst weitere zwanzig Jahre danach erreichte ihr Verfahren eine ausreichende technische Reife.

Als Ausgangsstoff zur Kautschuksynthese dient Äthin, ein in reinem Zustand geruchloses Gas. Es wird aus Kalziumkarbid und Wasser gewonnen. Aus Äthin entsteht über mehrere Zwischenstufen der ebenfalls gasförmige Kohlenwasserstoff Butadien, dessen Moleküle polymerisationsfähig sind. Unter geeigneten Bedingungen bilden je rund 2000 Butadienmoleküle lange Ketten, die, mit anderen knäuelartig verfilzt, den synthetischen Kautschuk ergeben. Beim Vulkanisieren bilden Schwefelatome Brücken zwischen den Butadienketten und stabilisieren dadurch die hochmolekulare Substanz.

Äthin bildet übrigens mit dem Kohlenwasserstoff Äthen den Ausgangsstoff für viele andere polymerisationsfähige Verbindungen, z. B. für Vinylazetat, Vinylchlorid und Vinylazetylen, aus denen sehr viele Kunststoffe durch Polymerisation synthetisiert werden. Die Polymerisation stellt einen Hauptweg der chemischen Stoffsynthese dar, der den Zugang zu vielen Produkten eröffnete, ohne die unsere gesamte moderne Industrie nicht mehr denkbar wäre. Polymerisation ist ein Vorgang, bei dem sich kleinere,



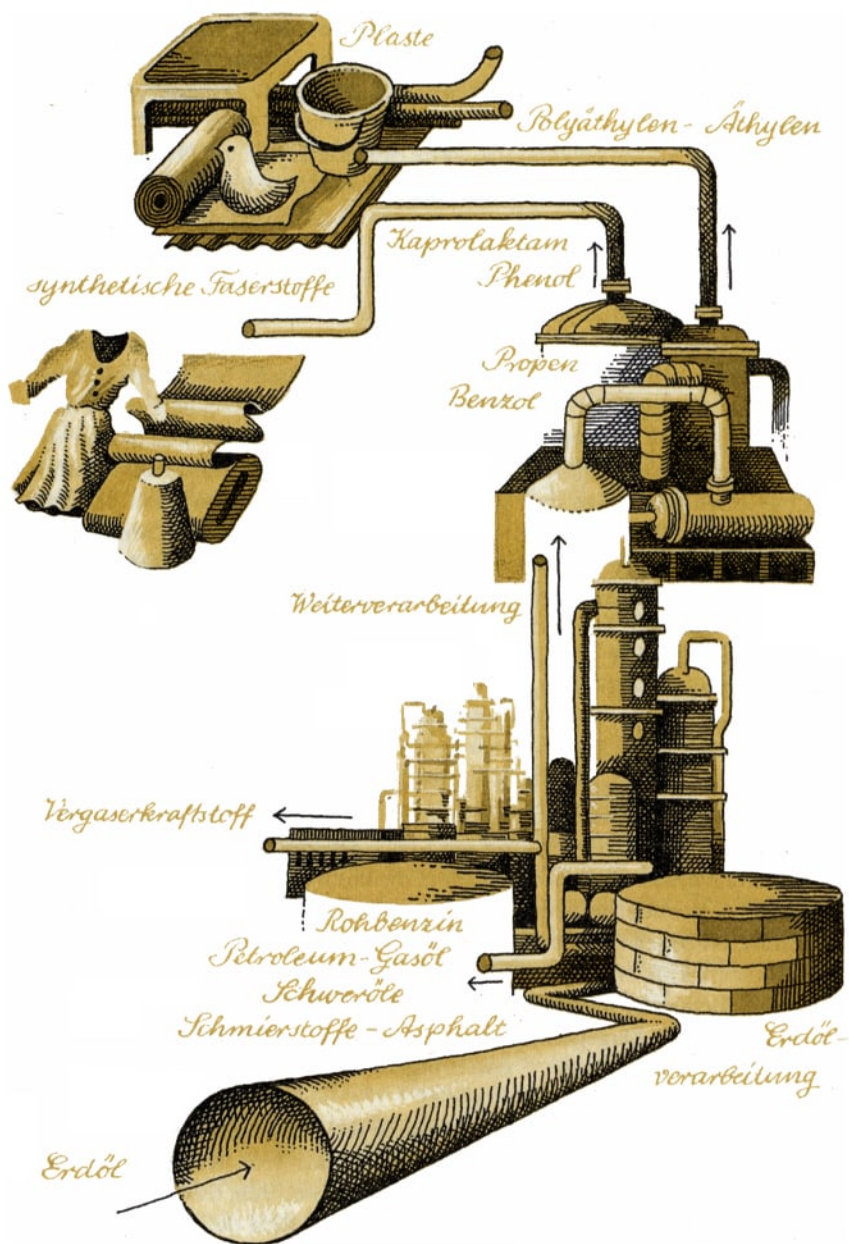
Polymerisation von Äthenmolekülen zu Polyäthylen durch Aufbrechen der Doppelbindungen zwischen den C-Atomen

meist gleichartige Moleküle miteinander zu Riesenmolekülen verketteten, die dann aus vielen tausend, manchmal aus mehr als hunderttausend Atomen bestehen. So entstehen aus den polymerisationsfähigen Molekülen des Vinylchlorids oder des Vinylazetats die bekannten Stoffe Polyvinylchlorid (PVC) und Polyvinylazetat.

Als Ausgangsrohstoffe zur Synthese vieler Kunststoffe, vor allem der Plaste und Faserstoffe, eignen sich Erdöl und Erdgas besonders gut. Ihre Hauptbestandteile sind ketten- und ringförmige Kohlenwasserstoffmoleküle, die sich relativ leicht polymerisieren lassen. Die auf der Basis des Erdöls und des Erdgases aufbauende Chemie – Petrolchemie genannt – führt auch zur Herstellung vieler Farbstoffe und Arzneimittel. Ihre Haupterzeugnisse sind jedoch Treibstoffe (Benzin, Dieselöl) und Heizöl. Übrigens eignet sich der Rohstoff Kohle in ähnlicher Weise als Ausgangsstoff zur Herstellung vieler Kunststoffe, auch zur Produktion von Benzin, Heizöl und Schmiermitteln. Man braucht aber rund 15 t Rohbraunkohle, um die gleiche Menge an chemischen Grundstoffen herzustellen wie aus 1 t Erdöl.

Während auf der ersten und der zweiten Stufe chemischer Technik sowohl Rohstoffe als auch Energie zur Produktion der Enderzeugnisse mit mehr oder weniger vollen Händen in den Verfahren eingesetzt werden und teilweise riesige Mengen an Abfallstoffen entstehen, erfüllt die Chemie auf der dritten Stufe ganz neue Bedingungen, die sich aus Rohstoffproblemen, aber auch aus anderen ökonomischen Gründen, aus Forderungen nach Umweltqualität und aus Erwägungen über lebenswichtige globale Gleichgewichte, ergeben. Chemische Technologien der Gegenwart haben an vielen Stellen diese Stufe schon erreicht, an anderen ist man noch entfernt davon. Die Aufgabenstellung dieser Stufe weist in die Zukunft und stellt die große Herausforderung chemischer Forschung und Verfahrensentwicklung dar.

Die Erde samt ihrer Gashölle ist einerseits der begrenzte Raum, in dem alles Leben sehr genau an physikalische und biologische Gleichgewichte angepaßt ist. Andererseits kann uns aber eben dieses Leben und können die



in all seinen Erscheinungsformen ablaufenden ungezählten biochemischen Reaktionen Vorbilder für die chemische Technik liefern, für eine Chemie, die sich mit der menschlichen Gesellschaft entwickelt, ohne ihren Lebensraum zu zerstören.

In der Natur laufen bewundernswerte Stoffkreisläufe ab, ohne alle Rückstände, ohne Schall und Rauch, bei normalem Druck und immer nahe der Erdoberflächentemperatur. Die überwiegende Zahl der Reaktionen läuft nahezu reversibel ab, das bedeutet, energetisch mit sehr hohem Wirkungsgrad. Außerdem besitzen alle biochemischen Reaktionen eine hohe Spezifität, das heißt: Jede Reaktion läuft genau gezielt und gerichtet, ohne daß in Nebenreaktionen störende oder überflüssige Nebenprodukte entstehen.

Eines unter Millionen Beispielen ist die biologische Stickstofffixierung, die für das ökologische Gleichgewicht im Stickstoffhaushalt der Natur sorgt. Freilebende Organismen – am bekanntesten unter ihnen sind die Azotobakter, ferner symbiotische Systeme, wie Leguminosen und Knöllchenbakterien oder Pilze und Blaualgen – binden Stickstoff aus der Luft und reichern so den Boden wieder mit Stickstoffverbindungen an, die von anderen Pflanzen und Mikroorganismen verbraucht werden. Nach neueren globalen Berechnungen beträgt die biologische Stickstofffixierung ungefähr 175 Mill. t pro Jahr.

Leguminosen (z. B. Lupinen, Bohnen) führen zu einer Stickstoffzunahme im Boden, der pro Jahr zwischen 100 und 200 kg/ha beträgt. Das entspricht etwa einer normalen Düngung, wie sie in der Landwirtschaft jährlich durchgeführt wird.

Die sehr hohe Effektivität und Spezifität biochemischer Reaktionen wird durch spezielle reaktionsvermittelnde Stoffe bewirkt, die man Enzyme nennt. Von diesen Enzymen sind in jeder lebenden Zelle bis zu mehreren tausend verschiedene Arten vorhanden, die nach dem Gencode der Zelle in dieser selbst gebildet werden. Das Enzym z. B., das die Stickstofffixierung vermittelt, Nitrogenase genannt, erreicht das Aufbrechen der Bindung des Stickstoffmoleküls N_2 zu zwei freien Stickstoffatomen, die dann wieder in eine neue chemische Verbindung eingebaut werden können, bei normalem Druck und 20 °C. Dagegen benötigt die Technik im Haber-Bosch-Verfahren 20 MPa Druck und 600 °C und bringt dabei die Reaktion nur mit einem Wirkungsgrad von etwa 12% zustande.

Wir kennen auch in der Technik ähnliche Reaktionsvermittler, Katalysatoren genannt. Bei der Suche nach neuen, effektiveren Katalysatoren für technische Verfahren finden wir in den Enzymen, den Biokatalysatoren, ein noch unübersehbares Angebot der Natur, aus dem die chemische Forschung schöpfen kann.

Vom Geheimnis der Biokatalysatoren

Für den Chemieingenieur, der ein Verfahren zur Produktion bestimmter Stoffe zu entwickeln hat, ist nicht nur wichtig, wie Ausgangssubstanzen miteinander reagieren und zum gewünschten Endprodukt führen, sondern vor allem, mit welcher Geschwindigkeit und mit welcher Ausbeute dies abläuft. Sehr viele chemische Reaktionen sind mehr oder weniger langsam und von gleichzeitig vor sich gehenden anderen Reaktionen begleitet. Diese beiden Faktoren — Reaktionsgeschwindigkeit und gleichzeitige Nebenreaktionen — beeinträchtigen häufig die Effektivität chemisch-technischer Verfahren ganz erheblich.

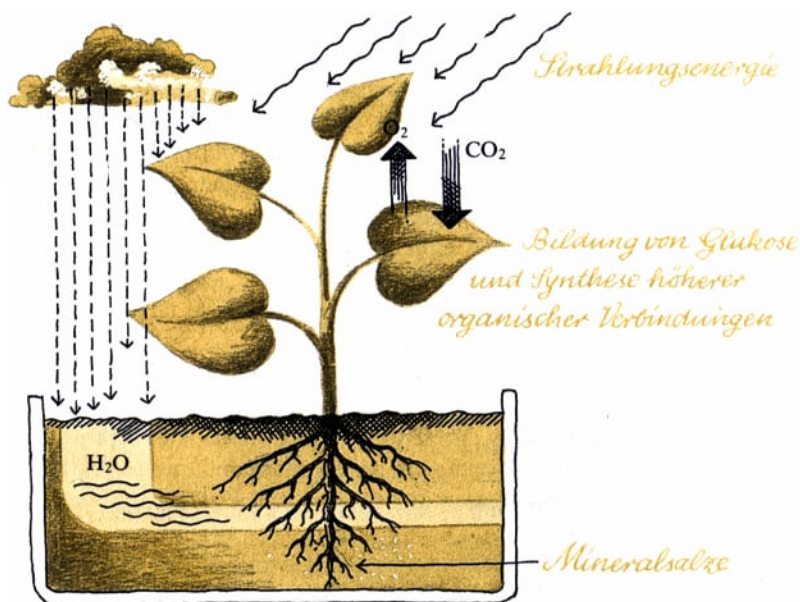
Nach einer Faustregel der Chemie verdoppelt sich die Geschwindigkeit einer Reaktion, wenn man die Reaktionstemperatur um 10°C erhöht. Deshalb wendet man in vielen Verfahren relativ hohe Temperaturen an. Ebenso laufen die meisten Reaktionen unter erhöhtem Druck effektiver ab. Hohe Drücke und Temperaturen kosten aber viel Energie und verteuern zudem die Ausrüstungen.

Schon seit mehr als 150 Jahren wissen die Chemiker, daß es Stoffe gibt, die schon erwähnten Katalysatoren, die bestimmte chemische Reaktionen beschleunigen können, ohne sich selbst dabei zu verbrauchen. Indem ein solcher Katalysator nur die gewünschte Reaktion beschleunigt, mögliche Nebenreaktionen dagegen unbeeinflusst läßt, bestimmt er auch die Richtung, in der ein Stoffgemisch vorzugsweise reagiert.

Ein bekannter katalytischer Effekt ist die 1823 von Döbereiner entdeckte Beschleunigung der Knallgasreaktion durch Platin.

Heute werden 80 bis 90% aller großtechnischen Verfahren in der chemischen Industrie unter Mitwirkung von Katalysatoren durchgeführt. Hier nur einige Beispiele: Im Haber-Bosch-Verfahren wird als Katalysator fein verteiltes Eisen auf einem Aluminiumoxidträger eingesetzt. Bei der Herstellung von Akrylnitril, einem Ausgangsprodukt für Plaste und synthetische Fasern, erwies sich ein Wismutoxid-Molybdänoxid-Katalysator als gut geeignet. Manche technischen Katalysatoren enthalten bis zu sieben oder acht Stoffkomponenten.

Außer der stofflichen Zusammensetzung ist bei einem Katalysator auch eine möglichst große Oberfläche wichtig, denn seine Wirkung vollzieht sich im Kontakt mit den reagierenden Stoffen. Man muß also Katalysatorsubstanzen in pulver- oder schwammartige Formen mit großen Oberflächen bringen. Es gibt Katalysatoren, die mehr als 10 m^2 Oberfläche pro Gramm Substanz besitzen. Obwohl sich technische Katalysatorstoffe nicht selbst verbrauchen, sind sie nicht unbegrenzt wirksam. Sie verlieren ihre Aktivität, wenn sie durch schlackeartige Ablagerungen bedeckt werden, und müssen dann regeneriert werden.



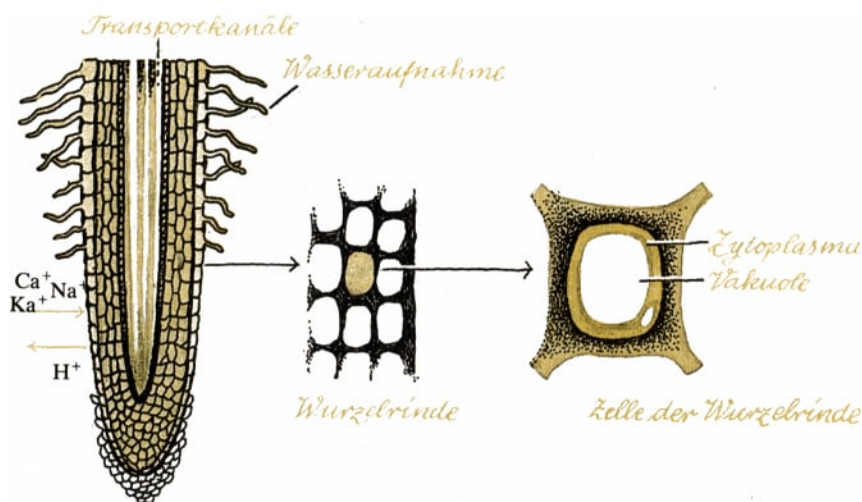
Synthese organischer Substanzen in der grünen Pflanze

Die große technisch-wirtschaftliche Bedeutung der Katalysatoren liegt auf der Hand. Ein guter Katalysator erhöht die Ausbeute eines Verfahrens, wirkt damit material- und energiesparend. Die Kostensenkung für das betreffende Verfahren setzt sich außerdem noch aus den eingesparten Folgekosten für Materialtransport, Anlagen und Arbeitskräfte zusammen. Katalyseforschung ist deshalb von hoher volkswirtschaftlicher Bedeutung.

Nach verbesserten Katalysatoren suchen gegenwärtig auf der Erde mindestens 50 000 Wissenschaftler. In Vierjahresabständen finden wissenschaftliche Kongresse zur Katalyseforschung statt, an denen Vertreter der meisten hochentwickelten Industriestaaten teilnehmen.

Es gibt Ansätze zu einer Theorie der katalytischen Prozesse, aber in der Praxis herrschen Suchen und Probieren in langwierigen Versuchsreihen vor. Im Ergebnis stehen die technischen Verfahren mit ihren besten Katalysatoren noch weit hinter der Effektivität der Biokatalysatoren zurück.

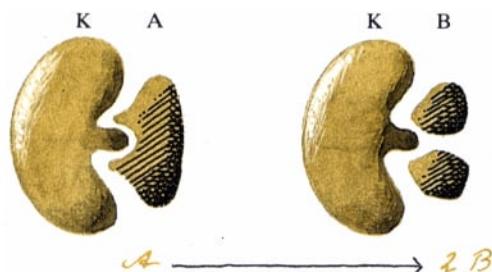
Man vergegenwärtige sich nur einmal die ungeheure Präzision, mit der die biochemische Stoffproduktion etwa bei einem Laubbaum abläuft. Im Frühjahr beginnen die Wurzeln Wasser und darin gelöste Nährstoffe aus dem erwärmten Boden aufzunehmen. Kapillarkräfte in den Holzzellen pumpen das Wasser bis in die äußersten Spitzen der Zweige. Die Zellen der Blattknospen beginnen ihre Stoffproduktion, vermehren sich durch Teil-



Ionenaustausch in einer Wurzelspitze

lung, bis die Knospen aufspringen und sich Blatt auf Blatt entfaltet. Nun kann die Glukoseproduktion aus Wasser und dem CO_2 der Luft in den Blättern beginnen. Ein großer Teil der in den Blättern gebildeten Glukosemoleküle wird durch das Konzentrationsgefälle aus den Blättern abwärts geführt zu Ästen, zum Stamm, bis hinunter zu den Wurzeln. An den verschiedenen Orten synthetisieren die Zellen aus Glukose Zellulose, Lignin, Harz und viele andere Stoffe. Neue Zellen der Rinde, des Stammholzes und der Wurzeln können sich bilden. Der Baum wächst. In voller Entfaltung dieses Prozesses werden in den Rinden der Zweige neue Zellen gebildet, die sich rasch zu Blütenknospen vermehren. Für die Blüten müssen unter anderem Duft- und Farbstoffe synthetisiert werden. Erinnern wir uns an den komplizierten Aufbau einer Holzzelle, so folgt, daß all diese Stoffe nicht nur schlechthin zu bilden sind, sondern daß sie auch in höchster Präzision nach in den Zellgenen gespeicherten Bauplänen zu spezifischen Strukturengefügt und angeordnet werden.

Aus den Blüten entstehen die Früchte, wiederum erstaunliche Syntheseleistungen spezialisierter Zellen. Im Herbst läuft die Glukoseproduktion in den Blättern allmählich aus. Die Blätter verfärben sich, sterben ab und fallen zu Boden. Aber hier setzt sich ihr Zerfall nicht gleich fort. Sie halten als Laubdecke den Boden warm, bis sich die Säfte des Baumes verbraucht und zurückgebildet haben. Sie wärmen noch im folgenden Frühjahr die aufkeimenden Jungpflanzen und zerfallen erst später, um wieder zu Nährstoffen für neues Leben zu werden. Es ist ein geräuschloser, rückstandsfreier Stoff-



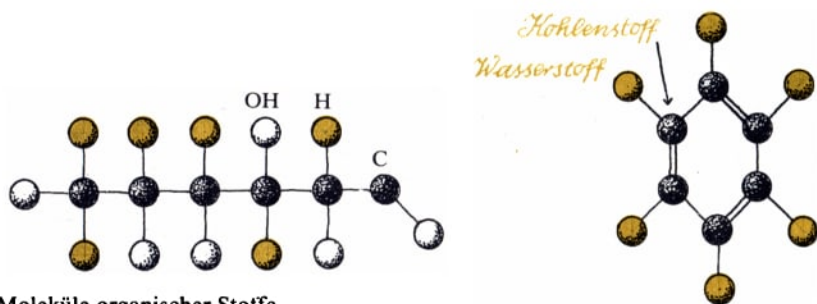
Ein Katalysatormolekül K (z. B. Enzym) vermittelt die Spaltung eines Moleküls A in zwei Moleküle B

kreislauf, bei dem pro Hektar mehrere Tonnen von Stoffen verschiedenster Art – Stärke, Zucker, Alkaloide, Saponine und Zellulose, um nur einige zu nennen – gebildet werden.

Diese Leistung, im Körper eines Wirbeltieres noch um vieles komplizierter, ist das große Geheimnis der Natur, dem wir auf der Spur sind. Über die Stoffsynthese in den Zellen wissen wir bereits, daß sie durch Enzyme – das sind große Proteinmoleküle mit spezialisierten Strukturen – vermittelt wird. An jeder biologischen Stoffsynthese wirken immer mehrere Enzyme mit, denn jedes einzelne ist auf eine bestimmte Teilreaktion spezialisiert. So übertragen die Oxidoreduktasen Wasserstoff oder Elektronen von einem auf ein anderes Molekül. Die Transferasen übertragen kleine Molekülgruppen, z. B. Phosphatreste. Hydrolasen spalten C-O- und C-N-Bindungen. Ligasen knüpfen neue chemische Bindungen. Es gibt noch mehr solcher Gruppen untereinander ähnlicher Enzyme. Bisher sind weit über tausend verschiedene Enzyme entdeckt worden. Die wirkliche Zahl der in der Natur vorkommenden Enzyme liegt sicher noch höher.

Mit dem Studium der Enzyme und ihrer Wirkungen wurden schon vor mehr als hundert Jahren auch praktische Zwecke verfolgt. Die gesamte Gärungschemie beruht auf der Wirkung mikrobieller Biokatalysatoren, die in Form von Hefen bei der Bier- und Weinbereitung, beim Brotbacken, bei der Milchsäuregärung, zur Konservierung von Futtermitteln und vielen ähnlichen Prozessen unersetzbare Dienste leisten. Man hat auch Stoffe wie Glycerin, Azeton, Butanol und Isopropanol aus kohlehydrathaltigen Abfällen mit Hilfe mikrobieller Enzyme hergestellt.

Nach der Entdeckung des Penizillins durch Fleming (1929) wurden großtechnische mikrobielle Antibiotika-Synthesen entwickelt. Man züchtete auf Nährböden oder in Nährlösungen bestimmte Mikroorganismen, z. B. Bakterien, um sie für pharmazeutische Zwecke einzusetzen. So wurden viele Impfstoffe, aber auch Vitamine und andere organische Substanzen, erzeugt.



Moleküle organischer Stoffe

links: das kettenförmige Molekül der Glukose $C_6H_{12}O_6$

rechts: das ringförmige Benzol-Molekül C_6H_6

In den letzten fünfzig Jahren hat die Enzymforschung bedeutende Fortschritte gemacht. 1926 gelang es J. B. Sumner, das Enzym Urease zu isolieren und in kristalliner Form darzustellen. In der Folge wurde noch eine ganze Reihe von Enzymen isoliert. Heute stellt man in der Welt mehr als tausend verschiedene Enzympräparate her, die in der Nahrungsgüterindustrie, in der Medizin, in der Textil- und Papierindustrie eingesetzt werden.

Enzyme sind große Proteinmoleküle, viel größer als die Teilchen, die sie zur Reaktion bringen. Sie bestehen, wie alle Proteine, aus Aminosäureketten, in denen verschiedene Aminosäuren in bestimmter Reihenfolge (Sequenz) angeordnet sind. Die Aminosäuren sind durch Peptidbindungen (kovalente Bindung C-N zwischen der NH_2 -Gruppe der einen und der $COOH$ -Gruppe der folgenden Aminosäure) verbunden. Man spricht deshalb auch von Peptidketten. Diese Ketten sind nicht langgestreckt, sondern durch Wechselwirkungskräfte zwischen den Teilchen schrauben- oder spiralförmig verdreht (s. dazu auch 7. Kap.). Man nennt dies Helixstruktur. Aber auch diese Helixstrukturen weisen durch Kräfte zwischen Teilen der Kette noch Krümmungen und Faltungen auf. In den in dieser Weise geformten Großmolekülen eines Enzyms befindet sich ein aktives Zentrum, eine Stelle, an der das Enzymmolekül ein bestimmtes Teilchen (ein Elektron, Atom oder kleines Molekül) aufnehmen kann. Das aufzunehmende Teilchen muß gewissermaßen an dieses aktive Zentrum »passen« wie ein Schlüssel ins Schlüsselloch. Diese vereinfachte Erklärung macht die außerordentlich spezifische Wirkung der Enzyme verständlich. Sehr wahrscheinlich kommt hinzu, daß die Enzyme die Teilchen, die sie in einer chemischen Reaktion übertragen, auch in der für diese Reaktion günstigsten räumlichen Anordnung zum aufnehmenden Substrat bringen.

Dieser kleine Einblick in Ergebnisse der Enzymforschung läßt vielleicht erkennen, wie die große Effektivität der Enzym-Katalyse zustande kommt. Selbst relativ träge Enzyme arbeiten noch viel wirksamer als die besten technischen Katalysatoren. Sehr aktive Enzyme sind bis zu hunderttau-

sendmal effektiver. So setzt ein Molekül des Enzyms Hexokinase pro Minute 20 000 Glukosemoleküle um, ein Molekül des Enzyms Cholinesterase sogar 90 000 Moleküle Azetylcholin.

Neben der einfachen katalytischen Wirkung müssen die Enzyme noch eine regulierende Wirkung im Zellstoffwechsel besitzen. Nur so sind die zeitlich begrenzten Ereignisse, wie wir sie vorhin im Leben eines Baumes beschrieben haben, ausreichend zu erklären.

Man nimmt heute im wesentlichen drei Mechanismen der Regulation des Zellstoffwechsels an: 1. das Massenwirkungsgesetz, also die direkte Regelwirkung durch die verschiedenen Konzentrationen der ab- und aufzubauenden Moleküle, 2. eine Rückwirkung der Substrate und Endprodukte auf die Enzymaktivität, indem entsprechend der Gesamtsituation der Zelle bestimmte Enzyme in eine inaktive Form übergeführt oder wiederum aktiviert werden, und 3. eine Regulation der Enzymsynthese an den Genabschnitten, die für diese Synthese zuständig sind. Für ein eingehendes Studium dieser Fragen muß der Leser auf Bücher über Biochemie verwiesen werden. Hier konnte nur andeutungsweise gezeigt werden, welche Fortschritte die biochemische Forschung bereits zum Problem der Enzymwirkungen erreicht hat.

Man hat nun versucht, synthetische polymere Moleküle zu erzeugen, die enzymartige Wirkung besitzen. Tatsächlich ist es gelungen, solche Verbindungen zu finden. Ein Beispiel sind synthetische Polymere wie Polyäthylenymin, das die Freisetzung von p-Nitrophenol aus p-Nitrophenylazetat und p-Nitrophenyllaurat katalysiert. Mit solchen Forschungsergebnissen vollzieht sich in unserer chemischen Technik ein Übergang von heute bekannten polymeren Werkstoffen zu polymeren Wirkstoffen, die möglicherweise große Perspektiven eröffnen.

Biotechnologien

Neben den teilweise sehr lange bekannten Möglichkeiten, Biokatalysatoren in der Nahrungs- und Genußmittelindustrie, in der Pharmazeutik, zur Konservierung und auf ähnlichen Gebieten technisch anzuwenden, gibt es eine ganze Reihe von Vorschlägen, Projekten und Versuchen, die Fähigkeiten biologischer Systeme zur Synthese hochwertiger organischer Stoffe industriell zu nutzen.

Einige solcher Vorschläge gehen von einer plantagenartigen Produktion von Biomasse aus. Unter Biomasse versteht man im allgemeinen sehr rasch wachsende Pflanzen, die möglichst hohe Anteile an hochwertigen organischen Substanzen besitzen. Zahlreiche Untersuchungen haben ergeben, daß es eine ganze Reihe geeigneter Pflanzen gibt, mit denen eine Biomasse-

produktion in größerem Umfang durchführbar wäre. Ein Beispiel sind Wasserlinsen, die kleinsten Blütenpflanzen. Sie enthalten etwa 40% Protein und 45% verwertbare Kohlehydrate (bezogen auf die Trockenmasse). Sie verdoppeln ihre Biomasse in zwei bis drei Tagen, tropische Arten sogar an einem Tag. Algenarten, ebenfalls mit hohem Eiweißgehalt, können diese Wachstumsgeschwindigkeit sogar noch übertreffen.

Man könnte in großen Becken gewaltige Mengen dieser Pflanzen produzieren und als Rohstoff weiterer chemischer Verarbeitung zuführen. Man sieht auf diesem Wege die Möglichkeit, dem Eiweißmangel zu begegnen, unter dem immer noch große Teile der Erdbevölkerung leiden. Dabei ist allerdings die Wertigkeit solcher Pflanzeneiweiße zu beachten.

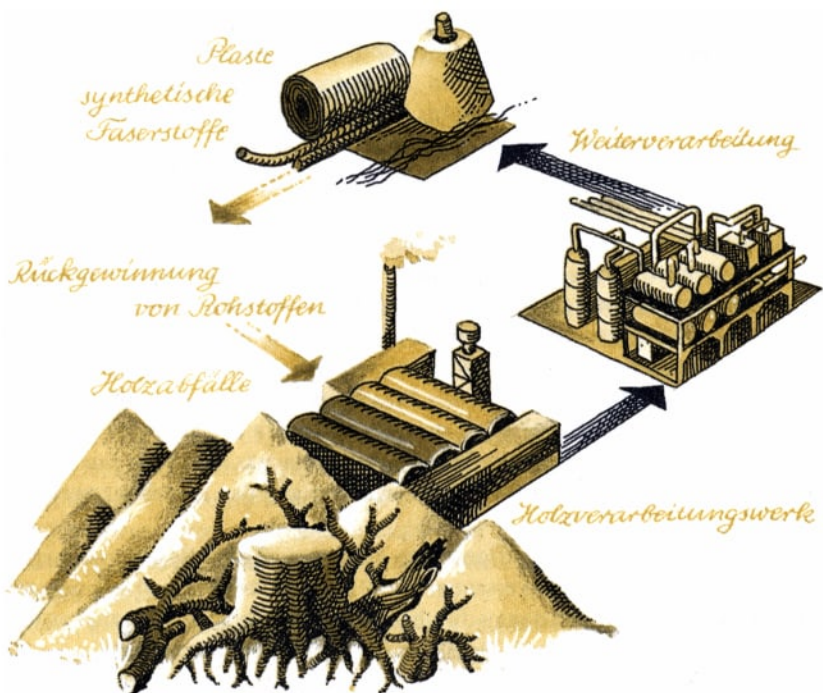
Der menschliche Körper braucht zehn verschiedene Aminosäuren, die essentiellen Aminosäuren, die in den Proteinen der Nahrung enthalten sein müssen, um daraus die körpereigenen Eiweißstoffe aufbauen zu können. Pflanzeneiweiße enthalten von diesen zehn Aminosäuren meist nur einige und ergeben deshalb keine umfassenden Lösungen des Eiweißmangelproblems.

Andere Vorschläge sehen Biomassen als Rohstoffgrundlage an, die später einmal Kohle und Erdöl ersetzen könnte; sie bestehen doch aus organischen Molekülen, die mit denen durchaus vergleichbar sein dürften, aus denen die Pflanzen der Sumpfwälder des Karbon aufgebaut waren.

Dennoch sind solche Vorschläge gegenwärtig noch recht hypothetisch. Sie sind vielleicht durchführbar, aber die Wege zu technischen Anwendungen sind sicher noch weit.

Das gleiche gilt auch für einen anderen Vorschlag, mit dem sich sowohl sowjetische als auch amerikanische Fachleute seit einiger Zeit beschäftigen. Dieser Plan geht davon aus, Holz anstelle von Erdöl als Rohstoff in der chemischen Industrie einzusetzen. Holzabfälle in Form von Ästen, Rinden, gebrochenen Stämmen oder Sägespänen, aber auch Blätter und Nadeln fallen jährlich in riesigen Mengen an. Im Jahre 1970 wies allein die Sägeindustrie der USA 50 Mill. t derartige Abfälle aus. Der amerikanische Chemiker Irving Goldstein schätzt, daß diese Menge reichen würde, um 95% der gegenwärtigen USA-Produktion an Plasten und synthetischen Faserstoffen herzustellen.

An das Holz würden für diese Zwecke so gut wie keine Qualitätsforderungen gestellt. Das Hauptproblem bestünde aber darin, daß erst eine Holzchemie entwickelt werden müßte, die an die Stelle der Petrolchemie zu treten hätte. Eine solche Holzchemie könnte entweder versuchen, die aus der Petrolchemie bekannten Ausgangsstoffe wie Ethin, Butadien und Phenole aus Holz zu gewinnen, oder sie könnte neue Ausgangsstoffe suchen, z. B. die im Holz vorkommenden Polymere selbst mit geringen Veränderungen zur Synthese verwenden.



Mögliche Form einer chemischen Industrie auf der Basis des Rohstoffes Holz

Holz wird zunächst in niedermolekulare Stoffe zerlegt. In der Weiterverarbeitung entstehen dann neue Polymere oder polymerisationsfähige Ausgangsstoffe.

Alle diese Projekte versprechen interessante Perspektiven, sind aber bei weitem noch nicht so weit entwickelt, daß sie morgen schon technisch realisiert werden könnten. Allzuvielen ist noch nicht ausgelotet. Kosten-Nutzen-Probleme lassen sich kaum überschauen. Immerhin dürften sie wert sein, genauer untersucht zu werden, denn man sollte alle Hypothesen prüfen und keinen Weg außer acht lassen.

Das Spektrum möglicher oder schon praktizierter Technologien, die die große Produktivkraft lebender Organismen benutzen, ist natürlich bei weitem breiter. Man kann, wenn man so will, die gesamte Land- und Forstwirtschaft hinzunehmen.

Mit Erfolg ist versucht worden, mittels Bakterien aus Methan Eiweiß zu synthetisieren. Es gibt ferner Mikroorganismen, die auf Erdöl als Nahrungsquelle angepaßt sind und dazu benutzt werden könnten, Wasser von Ölen zu reinigen. Alle diese Beispiele zeigen die große Anpassungs- und

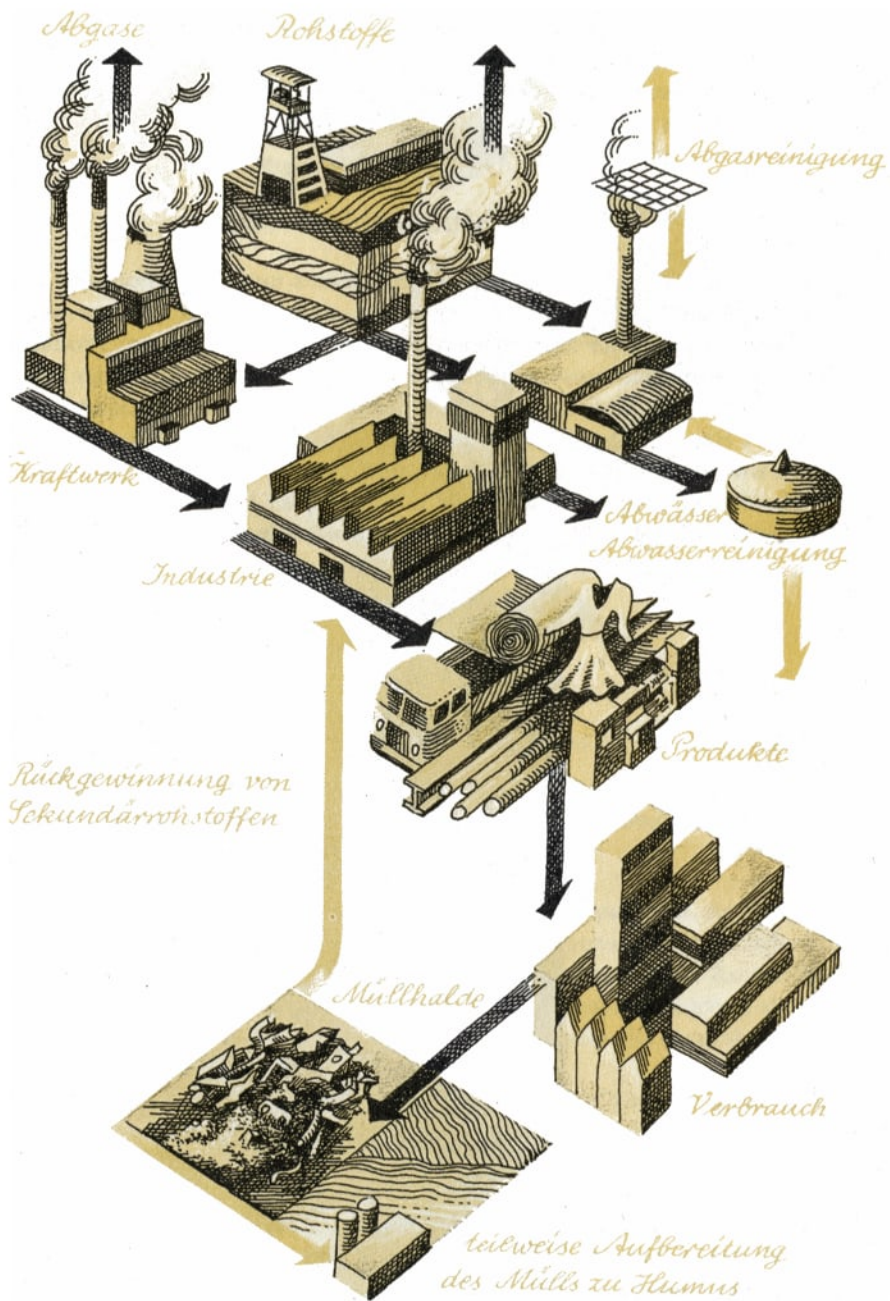
Wandlungsfähigkeit der Organismen. Das eröffnet eventuell große Möglichkeiten für neue biotechnische Verfahren, läßt aber auch gewisse Gefahren erkennen, vor denen die menschliche Gesellschaft sich selbst schützen und auf der Hut sein muß.

Das Müllproblem

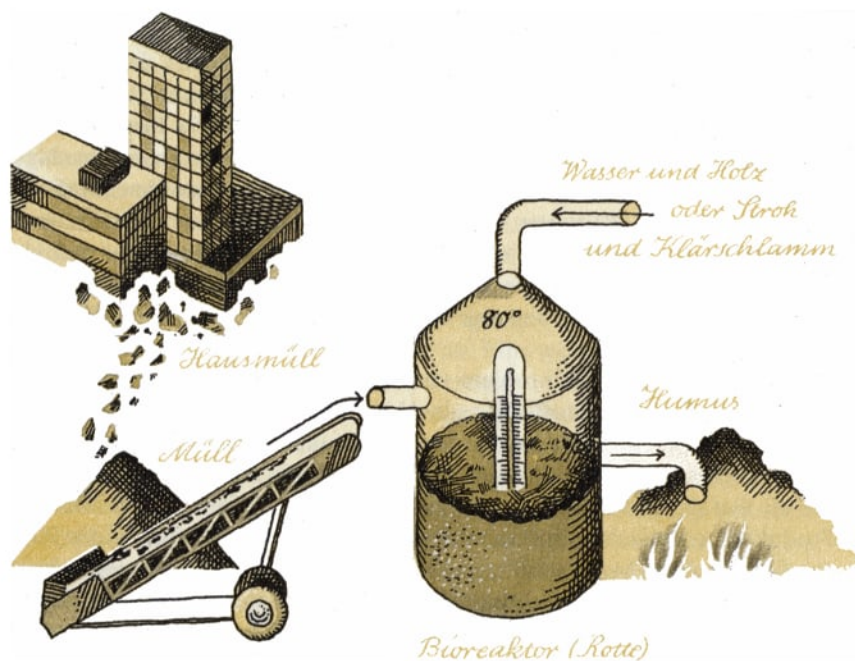
In den letzten Jahren ist man sich in Großstädten und in den hochentwickelten Industrieländern bewußt geworden, daß von Jahr zu Jahr eine wachsende Müllawine auf uns zukommt, die wir durch unsere Produktions- und Konsumtionsweisen selbst produzieren. Nach Angaben der Zentralverwaltung für Statistik der UdSSR fielen 1975 in der Sowjetunion rund 25 Mill. t Hausmüll an. 1980 werden etwa 40 Mill. t erwartet. In der DDR haben wir pro Jahr etwa 10 Mill. t Hausmüll. Diese Abfallstoffe enthalten zu erheblichen Teilen noch wertvolle Rohstoffe. Auf Müllhalden verstreut, sind sie verloren. Möglichst viele dieser Stoffe wiederzugewinnen und der



„Wilde“ Müllhalde
an einem Waldrand



Vom Rohstoff zum Müll – und Wege der Rückgewinnung von Stoffen



Umwandlung von Hausmüll in Humus

Industrie als Sekundärrohstoffe erneut zuzuführen ist eine Seite des Müllproblems. Hier stößt man auf eine ganze Reihe technischer Schwierigkeiten. Es gibt aber auch erfreuliche Fortschritte. Stahlschrott wird durch magnetische Sortiereinrichtungen eliminiert. Nichteisenmetalle werden z. T. in Aufbereitungsanlagen wiedergewonnen. Durch konsequentes Sammeln bestimmter Altstoffe, z. B. von Altölen, von Akkumulatorenblei, Altpapier und Alttextilien, entstehen Stoffkreisläufe in der Wirtschaft, die, weiter ausgebaut, uns dem näherbringen, was uns die Natur in ihren idealen Stoffkreisläufen als Vorbild gibt.

Die Hausmüllmengen aber bleiben immer noch gewaltig, auch wenn viele verwertbare Stoffe ausgesondert würden. Asche, Küchenabfälle, verunreinigte Verpackungsmaterialien, Glas- und Plastbruch, Matratzen und Altmöbelreste füllen riesige Halden, verbreiten üble Gerüche, sind Brutstätten für Ratten und andere Überträger von Krankheiten.

Seit einer Reihe von Jahren beschäftigen sich verschiedene Forschungsstellen, auch in internationaler Zusammenarbeit, mit der Aufgabe, diesen Müll mit Hilfe von Mikroorganismen in speziellen biochemischen Reaktoren in humusartige Stoffe zu verwandeln. Die dabei wirksamen Biokatalysatoren sind insbesondere saprophytische Bakterien, Arten, die von toten

organischen Stoffen leben. Sie benötigen Feuchtigkeit und Sauerstoff, erzeugen eine Selbsterhitzung des verrottenden Mülls und töten dabei Schadorganismen ab, so daß hygienisch einwandfreier Humus entsteht.

Im Institut für Kommunalwirtschaft in Dresden wurde ein Rottzellenverfahren entwickelt, das in der beschriebenen Weise in einer Versuchsanlage bei Waßmannsdorf arbeitet. Auch an anderen Orten wurden ähnliche Wege beschritten. Mitunter werden dem Müll Abwasserschlämme und Holzabfälle zugemischt. Die entstehenden Humusstoffe erwiesen sich als wertvolle Bodenzusätze, etwa von der Art wie Torf für die Garten- und Landwirtschaft. So entstehen aus Müll wieder nützliche Stoffe, die einen Kreislauf schließen.

Natürlich hat das Müllproblem viele Aspekte, die über die hier erörterten hinausgehen. Die Stoffe, die als Abfälle auf den Müllhalden erscheinen, müßten im einzelnen betrachtet werden, ihre Verwertbarkeit, ihr Verhalten als Neuprodukt und als Abfall. Nehmen wir als Beispiel die Plaste, die als Gefäße, Schläuche, Geräteteile, Überzüge, Folien und in anderen Produkten, chemisch aufgebaut auf verschiedenen Grundstoffen, die Halden füllen helfen. Meist zersetzen sie sich nicht. Dies gilt gerade als Vorzug der Plastikprodukte. Ihre Gebrauchswerte verlieren sie aus anderen Gründen. Sie zerbrechen, werden spröde, vergilben durch Lichteinwirkung, oder die aus ihnen gefertigten Erzeugnisse sind moralisch veraltet.

Die Weltjahresproduktion an Plasten betrug 1973 etwa 10 Mill. t. Sie wächst gegenwärtig noch beträchtlich, und sicher gilt dies auch für die Menge weggeworfener Plastikartikel. Bei einem Füllfederhalter, einem Eierbecher, einer Küchenmaschine oder auch einer Kraftwagenkarosse brauchen wir die fast unbegrenzte Haltbarkeit des Materials gar nicht. Wir wissen ungefähr im voraus, wann wir sie wegwerfen werden. Noch drastischer ist es bei Verpackungsmaterialien aus Plastik. Viel dienlicher wären eigentlich Plastikwerkstoffe, die entweder nach begrenzter Zeit von selbst wieder zerfielen oder die sich wenigstens auf einfache Weise wieder zersetzen ließen. Schwedischen Wissenschaftlern ist es gelungen, spezielle Zusätze für Plaste, wie Polyethylen und Polystyrol, zu entwickeln. Diese führen dazu, daß die Plaste nach einigen Monaten bei Einwirkung von Licht zu Pulver zerfallen. Dies ist vielleicht der Anfang eines Weges, aus dem wir zu neuen Kunststoffen gelangen, deren Lebensdauer vorausbestimmbar und den tatsächlichen Bedürfnissen angepaßt ist.

Katalysatoren gegen Verschmutzung der Luft

Auf der Erde werden jährlich rund 250 Mill. t des giftigen Kohlenmonoxids als Abgase in die Atmosphäre entlassen, davon rund 70% durch Verbrennungsmotoren. Moskauer Mikrobiologen stellten fest, daß es im Erdboden Mikroorganismen verschiedener Gattungen gibt, die Kohlenmonoxid verbrauchen. Ihnen ist es wahrscheinlich zu danken, daß der Kohlenmonoxidgehalt der Atmosphäre noch nicht angestiegen ist. Er beträgt 0,11 bis 0,23 mg/m³ Luft. In Großstädten steigt der Kohlenmonoxidgehalt der Luft aber mitunter auf über 100 mg/m³ an. Eine weitere Zunahme der Konzentration kann zu ersten Gefahren werden.

Man ist nun dabei, Katalysatoren zu entwickeln, die Autoabgase weitgehend entgiften. Ein Lanthan-Blei-Manganit-Katalysator wandelt das giftige Kohlenmonoxid zu Kohlendioxid schon bei niedrigen Temperaturen effektiv um. Er zerlegt gleichzeitig die bei der Verbrennung gebildeten Stickoxide zu Stickstoff und Sauerstoff. Man hat auch andere Metallverbindungen erprobt. Problematisch ist noch, Katalysatoren mit genügend großer Oberfläche herzustellen. Metallschwammeinsätze in den Auspuffrohren der Kraftwagen könnten künftig einen erheblichen Teil dieser Luftverschmutzung vermeiden helfen.

In den Verbrennungsrückständen der Autoabgase treten unter anderem auch Benzpyren und andere polyzyklische Kohlenwasserstoffe auf, von denen festgestellt wurde, daß sie stark krebserregend wirken. Sowjetische Mikrobiologen entwickelten Bakterienkulturen, die Benzpyren bis zu 80% abbauen. Es wäre also eine Aufgabe, technische Katalysatoren zu entwickeln, die denselben Effekt erzielen.

Denken wir an die sehr verschiedenartigen Industrieabgase, so haben wir ein weites Feld, wo jeweils spezifische Katalysatoren Funktionen übernehmen könnten, die nicht nur die Abgabe schädlicher Stoffe an die Atmosphäre verhindern, sondern auch verwertbare Substanzen rückgewinnbar machen.

An derartigen Problemen arbeiten Chemiker teilweise schon seit vielen Jahren. Wie sich leicht denken läßt, handelt es sich dabei meist um sehr komplexe Probleme, denn es sollen Lösungen für den Einsatz in großtechnischen Maßstäben gefunden werden. Es wird zwar höchstens in Ausnahmefällen möglich sein, Biokatalysatoren direkt zur Lösung solcher Aufgaben einzusetzen, die Suche nach technischen Katalysatoren nähert sich aber immer mehr den Formen und Wirkungen der biologischen Reaktionsvermittler, indem sie versucht, polymere Stoffe mit enzymartiger Wirkung zu entwickeln.

Ein aussichtsloser Wettlauf

Jede Art landwirtschaftlicher Kultur stellt für bestimmte Insekten, Weichtiere, Würmer und Asseln eine günstige Vermehrungsgrundlage dar. Sie finden die Nahrung im Überfluß, an die sie entweder schon angepaßt sind oder an die sie sich leicht anpassen können. Auf den Feldern und Plantagen oder in Speichern und Zwischenlagerplätzen treten sie als Nahrungskonkurrenten des Menschen auf. Überdies sind Monokulturen gegen Pflanzenkrankheiten viel anfälliger als einzelne Pflanzen. Etwa 14% der Weltermnte werden Jahr für Jahr durch tierische Schädlinge vernichtet, weitere 12% durch Pflanzenkrankheiten und 9% durch Unkraut.

Um die vielen Schädlinge zu bekämpfen, hat die chemische Industrie eine große Zahl von Schädlingsbekämpfungsmitteln entwickelt, mit denen der Mensch zu allen vier Jahreszeiten gegen tausend Arten von Schaderre-



Kahlfraß durch Goldfalterraupen

gern zu Felde zieht — mit Flugzeugen, Sprühwagen, Motorspritzen und anderem Gerät. Für den Pflanzenschutz wurden über hundert Wirkstoffe entwickelt — Saatgutbeizmittel, Insektizide, Mittel gegen Milben und Nagetiere, Bodendesinfektionsstoffe, Mittel gegen Schnecken, Textil- und Getreideschädlinge sowie Unkrautbekämpfungsmittel. Viele Chemiker setzen ihr Wissen, ihre hochentwickelten Forschungsmethoden ein, um all der Schädlinge Herr zu werden — aber sie haben sich auf einen aussichtslosen Wettlauf eingelassen, auf einen Wettlauf mit der Entwicklungs- und Anpassungsfähigkeit der Natur.

Die Schädlinge passen sich den Giftstoffen an — genauer: Unter ihnen findet eine natürliche Auslese statt. Tiere, die immun gegen die Bekämpfungsmittel sind, überleben und vererben ihre Fähigkeit auf eine zahlreiche Nachkommenschaft. Der Mensch muß neue Bekämpfungsmittel entwickeln. In der Zwischenzeit vermehren sich die Schädlinge. Bis 1968 waren nach einer Umfrage der Weltgesundheitsorganisation über hundert Insektenarten gegen DDT (Dichlordiphenylchloroethan), eines der stärksten Insektizide, resistent geworden. Die chemische Schädlingsbekämpfung verschlingt immer größere Summen und führt überdies zu zahlreichen ungünstigen Nebenerscheinungen an landwirtschaftlichen Erzeugnissen. Sie haben auch oft den Tod von Vögeln und anderen Tieren im Gefolge.

Diese Situation haben Agrobiologen und andere Wissenschaftler sehr wohl begriffen und versuchen, biologische Wege zu beschreiten. Die Wirkungen der meisten chemischen Schädlingsbekämpfungsmittel sind unspezifisch. Man tötet mit ihnen auch nützliche Lebewesen, oft auch gerade die, die dem Menschen helfen könnten, die Schädlinge zu vertilgen. Das Problem einer biologischen Schädlingsbekämpfung besteht darin, gezielte Methoden zur Vernichtung spezieller Schädlinge zu entwickeln. Dazu ist meist notwendig, mit Forschungen zum Verhalten einer Schädlingsart zu beginnen. Man muß wissen, wie und wann sie sich vermehren, wie groß ihr Aktionsradius ist, ob bestimmte Tages- und Jahresrhythmen auftreten und manches andere.

Es gibt inzwischen eine große Zahl von Beispielen für sehr erfolgreiche biologische Schädlingsbekämpfungsmethoden, die mit verblüffend einfachen Mitteln zum Erfolg führen. Eine der eindrucksvollsten Methoden entwickelten Wissenschaftler am Moskauer Institut für Helminthologie, das sich mit parasitären Würmern beschäftigt. Fadenwürmer (Nematoden) gehören zu den gefährlichsten, weit verbreiteten Parasiten. Es gibt über 10 000 Arten, z. B. Trichinen, Spulwürmer und viele mikroskopisch kleine Arten, die in verschiedenen Pflanzen schmarotzen. Sie vermehren sich ungeheuer stark. Ein Weibchen des Weizenälchens enthält bis zu 10 000 Eier, die bis zu zehn Jahre entwicklungsfähig bleiben. Ähnliches gilt für das Kartoffelälchen, mit dem sich die Moskauer Biologen speziell beschäftigen.



Rüben, von Raupen der Gattung *Gammarule* befallen

Die Eier sind chemisch kaum zu bekämpfen. Sie können bis zu mehreren Millionen pro Quadratmeter die Äcker verseuchen und ganze Gebiete für den Kartoffelanbau unbrauchbar machen. Auch eine Änderung der Fruchtfolge bringt nur mäßigen Erfolg.

Ein eingehendes Studium des Lebenszyklus der Kartoffelälchen ergab den entscheidenden Ansatzpunkt. Schlüpfen die Älchen als Larven aus den Eiern, dann stehen sie vor einer sehr empfindlichen Phase ihres Daseins. Sie brauchen sofort Nahrung und gehen ohne diese schnell zugrunde. Ihre Nahrung sind die keimenden Kartoffeln in den Äckern. Von Kartoffelkeimen ausgehende Duftstoffe sind für sie das Signal zum Schlüpfen.

Nachdem dies bekannt war, ergab sich eine äußerst einfache und billige Bekämpfungsmethode. Man versprühte ungefähr fünfzehn Tage vor der eigentlichen Kartoffelaussaat zerriebene, in Wasser aufgeschwemmte Kartoffelkeime über älchenverseuchte Äcker. Die Älchen schlüpften, betrogen durch das vermeintliche Nahrungssignal, und verhungerten, ehe die wirkliche Aussaat erfolgte. Für 1 ha brauchte man nur 165 g Kartoffelkeimmasse, die nur Pfennige kostet. Eine einfachere Methode läßt sich kaum denken.

Andere Verfahren biologischer Schädlingsbekämpfung bestehen darin, insektentötende Bakterien (Entomophagen) oder Raubmilbenarten auf die Schädlinge anzusetzen. In der UdSSR kommen bisher fünfzehn verschiedene biologische Präparate dieser Art zum Einsatz. Sehr wirksam zeigten sich Eiparasiten der Gattung Trichogamme. Sie werden bereits in 400 Biolaboratorien vermehrt. Nach Entwicklungsarbeiten des Allunionsinstitutes für Pflanzenschutz in Leningrad sollen derartige biologische Pflanzenschutzpräparate in automatischen Fabriken hergestellt werden. Man kann damit Ertragssteigerungen von 2 bis 4 dt/ha bei Weizen, 4 bis 7 dt/ha bei Mais und gar 15 bis 20 dt/ha bei Rüben erreichen.

Bekannt ist auch die Methode, durch radioaktive Bestrahlung oder durch Chemikalien sterilisierte Männchen einer Schadinsektenart freizulassen. Sie begatten weibliche Tiere, ohne Nachkommenschaft zu erzeugen, und verhindern dabei die Begattung durch zeugungstüchtige Männchen. In weiten Teilen der USA wurde auf diese Weise die Schraubenwurmflye vollständig ausgerottet. Diese Fliege befällt vor allem Rinderherden. Sie legt ihre Eier ins Fleisch der Tiere, wo sich dann die Larven tief einbohren. Eine wirksame Bekämpfung dieses Schädlings mit chemischen Mitteln wäre praktisch nicht möglich gewesen.

Lange Zeit sind biologische Methoden zur Bekämpfung all der vielen Schadinsekten und Pflanzenkrankheiten vernachlässigt worden. Für Forschungen der Art, wie sie hier in einigen Beispielen gezeigt wurden, besteht ein ungeheurer Nachholbedarf. Dieser Rückstand kann nicht in wenigen Jahren aufgeholt werden. Oft mögen die biologischen Methoden einfach sein und nur geringe Kosten verursachen, aber die Suche nach ihnen verlangt viel Aufwand und Zeit. Wir können deshalb zur Zeit nicht auf die Schädlingsbekämpfung mit chemischen Mitteln verzichten. Ein Übergang zu vorwiegend biologischen Methoden wird sich nur langsam – vielleicht über einige Jahrzehnte – vollziehen können. Dieser Weg muß aber mit aller Energie beschritten werden, wenn unser biologischer Lebensraum in all seiner Vielfalt erhalten bleiben soll.

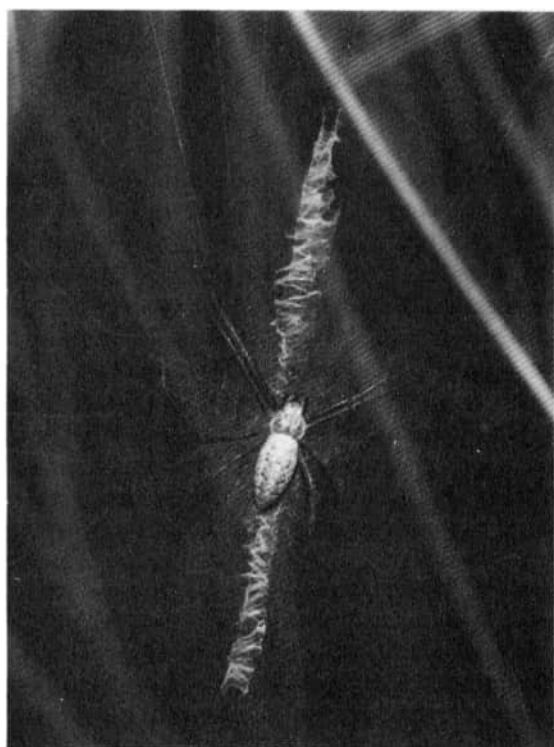
Pflanzenfasern, Spinnentiere und Textilchemie

Die Entwicklung synthetischer Faserstoffe für Bekleidungstextilien, aber auch für Textilgewebe, die in der Bauindustrie, in der Elektrotechnik sowie in der Möbel- und in der Autoindustrie verwendet werden, hat in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht, die wir in vielen Fällen durch ihre neuen Erzeugnisse gut kennen. Dennoch gibt es auf diesem Gebiet innerhalb der belebten Natur Erscheinungen, die den Chemikern und Textil-

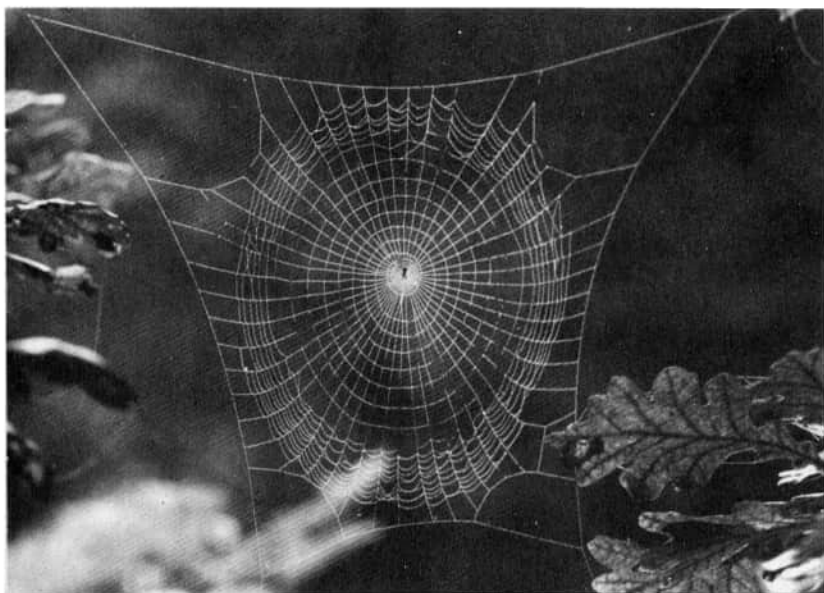
fachleuten Anregungen für weitere technische Entwicklungsarbeiten geben können. Wir finden Leistungen, die von der Technik noch nicht erreicht wurden, wie das folgende kleine Beispiel zeigt!

In einem Spezialbetrieb der optischen Industrie im Norden Englands, der Theodolite, Teleskope und andere optische Meßgeräte herstellt, werden seit vielen Jahren Kreuzspinnen der Art *Epeira Diademata* gefangen und gehalten, weil die Fäden der Netze dieser Spinnen das beste Material für die Fadenmarkierungen in den optischen Geräten darstellen. Die Fäden sind nur wenige Mikrometer dick, äußerst gleichmäßig und doppelt so fest wie Stahlfäden gleichen Durchmessers. Die Spinnennetze enthalten Fäden bis zu 12 m Länge. Sie werden auf Spezialspulen gewickelt und so bis zu ihrer Verwendung aufbewahrt.

An Spinnennetzen war lange Zeit ungeklärt, warum sie nicht austrocknen und wochenlang weder durch Bakterien noch durch Pilze angegriffen werden, obwohl sie doch aus einer eiweißartigen Substanz bestehen. Erst seit einigen Jahren weiß man, daß z. B. die Fäden der Kreuzspinne etwa 8% der hygroskopischen Substanz Pyrrolidon und verschiedene Salze enthal-



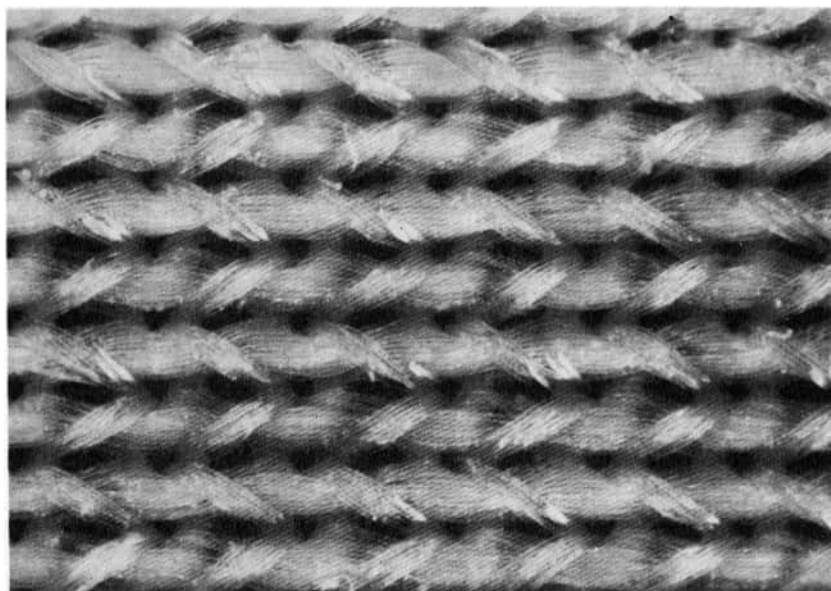
Junge Spinne (*Argiope bruennichi*), auf der Netznahe sitzend



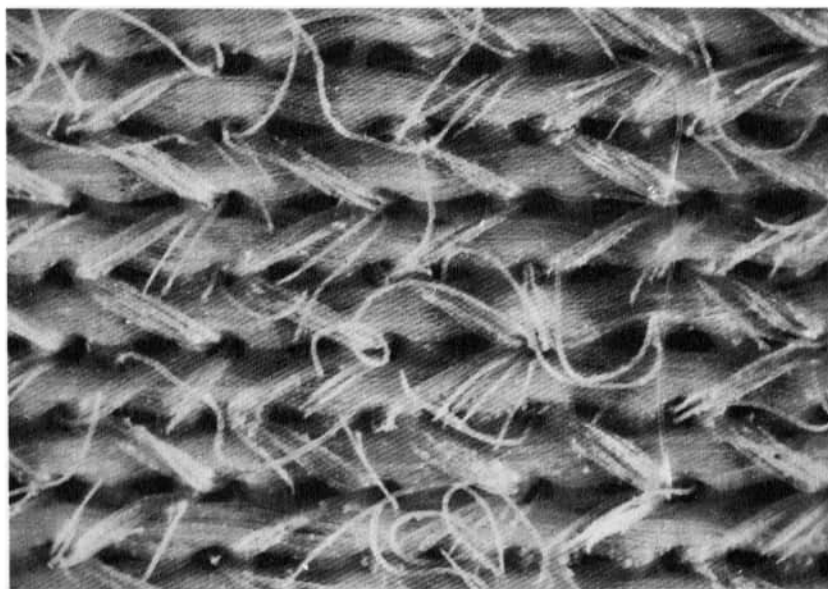
Fangnetz (unvollendet) der *Cyclosa conica* mit Fangspirale (außen) und Hilfsspirale (innen)

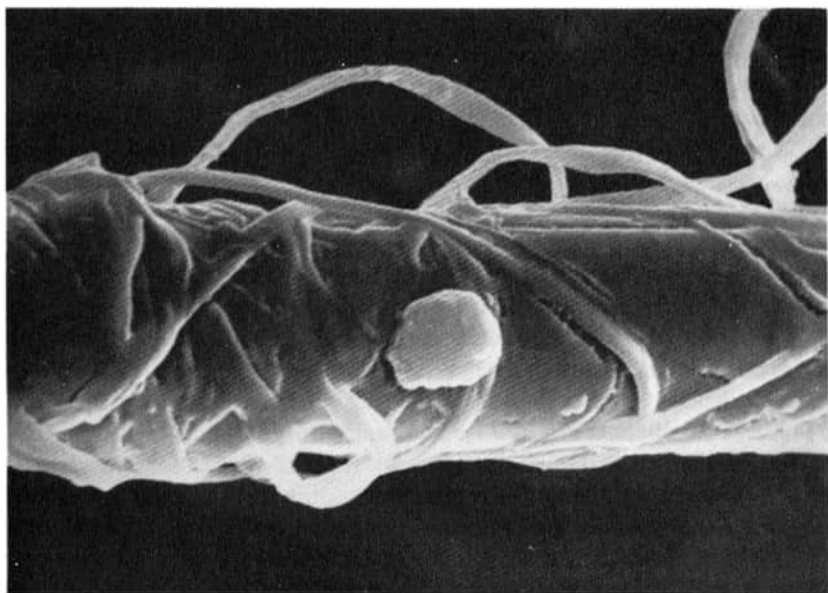
ten. Erstere verhindert das Austrocknen, letztere schützen vor bakterieller Zersetzung. Auch die Fadenerzeugung durch Spinndrüsen bei Spinnen, Raupen, Schmetterlingen und Köcherfliegen ist von großem technischem Interesse. Sie erfolgt durch Pressung in Austrittsröhrchen oder Drüsen oder in einer Muskelpresse am Ausführungsgang (bei Raupen). Eine Webspinne besitzt z. B. zwei Spinnwarzen, jede mit 700 bis 800 Spinndrüsen besetzt. Andere Spinnenarten besitzen Spinndrüsenkomplexe, die oft unterschiedliche Drüsen enthalten. Mit den Drüsen wird die Qualität der Fäden variiert. Auf diese Weise lassen sich verschiedenartige Fäden herstellen – Spur-, Halte- und Sicherungsfäden, Fang- und Signalfäden, die sich in ihrer Dicke, außerdem in Struktur und chemischer Zusammensetzung, unterscheiden können.

Die Möglichkeiten, die sich aus weiteren Forschungen über die molekularen Strukturen, die chemische Natur, den Fadenfeinbau und das Spinnvermögen verschiedener Tiere für die Technik ergeben, sind gegenwärtig noch nicht klar zu übersehen. Auch aus der Untersuchung von Tierhaaren, von Grannen, Tast- und Schwanzhaaren könnten noch manche wertvollen Erkenntnisse hervorgehen. Zum Teil haben die Faserstoffforscher solche Vorbilder bereits genutzt. Faultierhaare u. a. besitzen bestimmte Profile,



Strahlenchemisch veredeltes Gewirk aus Polyamidseide (a) im Vergleich zu unbehandeltem Material, (b) nach vergleichbarer Beanspruchung in einem Scheuerversuch. Das bestrahlte Material ist wesentlich haltbarer.





Oberflächenstruktur einer hochfesten und temperaturbeständigen Faser aus aromatischem Polyamid unter dem Rasterelektronenmikroskop. Die Faser zeigt eine ausgesprochene Fibrillenstruktur.

die ihnen besondere Eigenschaften verleihen. Analog hat man Dederon-profilfasern entwickelt. Flußpferde und Nashörner besitzen fibrillär auf-spleißende Schwanzhaare. Die pinselförmigen Schwanzquasten können dadurch besser den Kot verteilen, also die Markierung verbessern. Ein solches Aufspießen wurde z. B. beim Polypropylen nachentwickelt, denn es ist für das Verspinnen der Fasern von Vorteil und verbessert die Faden-struktur.

Diese wenigen Beispiele mögen genügen, um die Fundgruben ahnen zu lassen, die sich für Faserstoff- und Textiltechnik im Bereich der Pflanzen und Tiere aufgetan haben und mit neuen biologischen Forschungsergebnissen immer noch weiter erschließen.

Neue Stoffe – neue Wege

Die schon erwähnten Versuche, Stoffe mit enzymartigen Wirkungen synthetisch zu erzeugen, stellen sehr wahrscheinlich einen entscheidenden Schritt in der chemischen Technik dar, obwohl sie bisher von der Allge-

meinheit wenig beachtet werden. In der Natur der Erde vollzog sich vor Jahrmillionen der Übergang von der anorganischen zur organischen, belebten Materie. Im Pflanzen- und Tierreich entwickelte sich ein ungeheuer großes, auch heute noch nicht in seinem ganzen Umfang erkanntes Spektrum von Stoffen, die überwiegend aus sehr großen Molekülen bestehen. Bisher hat unsere Chemie nur die weniger wesentlichen Eigenschaften solcher Moleküle mit Erfolg kopiert, hat die Neigung vieler Molekülgruppen zur Kettenbildung — zur Polymerisation — entdeckt und zu technischen Anwendungen entwickelt. Schon das hat in vielen Bereichen der Technik zu folgenreichen Umwälzungen geführt, indem neue Werkstoffe wie Plaste, Schaumstoffe, Faserstoffe, Isolier- und Lagerstoffe viele neue Möglichkeiten eröffneten.

Wir haben an den Enzymen erfahren, daß große organische Moleküle in der Natur vor allem Wirkstoffe mit erstaunlichem Leistungsvermögen sind. Neben den Biokatalysatoren sind viele andere gut bekannt. Das Sauerstoff- und Kohlendioxid transportierende Hämoglobinmolekül, Licht absorbierende und umwandelnde Chlorophyll- oder (im Wirbeltierauge) Rhodopsinmoleküle, Erbinformationen speichernde Desoxyribonukleinsäuremoleküle (siehe 7. Kap.) und ungezählte andere. Alle diese Moleküle besitzen eine ungeheuer sichere Funktionsspezifität. Der Techniker würde sagen: Sie arbeiten mit nahezu 100%iger Ausbeute. Mit ihrer Funktionsspezifität sind sie in biologische Prozeßzyklen eingebaut, die mit unübertroffener Präzision ablaufen und gerade dadurch von extrem hoher Flexibilität und Leistungsbreite auf äußere Einflüsse reagieren können.

Wenn sich nun die chemische Forschung anschickt, synthetische Makromoleküle zu entwickeln, die ähnliche Wirkstoff-Verhaltensweisen besitzen, so kann man das als ein Nachahmen des natürlichen Weges der Entwicklung von der anorganischen zur organischen Materie ansehen. Wir haben schon erwähnt, daß es auf diesem Wege gelungen ist, erste Makromoleküle mit katalytischen Wirkungen zu gewinnen. Bei der sehr großen Bedeutung, die katalytischen Wirkungen in der chemischen Technik zukommt, ist es nur folgerichtig, wenn man in erster Linie makromolekulare (polymere) Katalysatorstoffe anstrebt. Die Möglichkeiten sind aber insgesamt wesentlich breiter. Dies zeigt das folgende Beispiel.

Man hat pharmakologisch aktive Polymere entwickelt, bei denen die wirksamen Molekülgruppen an große Kettenmoleküle mit günstigen Transporteigenschaften gebunden sind. Damit konnte man zum ersten eine höhere Zielsicherheit beim Einsatz solcher Pharmaka erreichen. Zum zweiten ist mit den polymeren Trägermolekülen eine vorteilhafte Depotwirkung verbunden, die daher rührt, daß das Medikament erst nach dem sehr langsamen Abbau des Trägermoleküls ausgeschieden wird.

Es gibt bereits Ansätze für eine Theorie polymerer Wirkstoffe, von der

wir hier natürlich nur einen ersten Einblick vermitteln können. Danach besteht ein polymerer Wirkstoff zunächst aus einem Kettenmolekül, dem Träger der folgenden Molekülgruppen. Zu diesen gehören reaktive Molekülgruppen, die die eigentlich beabsichtigte Reaktion bestimmen, ferner aktivierende oder hemmende, also insgesamt regulierende Komponenten, Löslichkeitsvermittler, die den Zugang des gesamten Molekülkomplexes zum Reaktionsort ermöglichen oder erleichtern, und schließlich Strukturbildner, die dem Trägermolekül mitsamt den vorher genannten Komponenten eine optimale Form geben. Dieser Aufbau mag kompliziert erscheinen, ist es wohl auch, kann aber durchaus synthetisiert und auch mit chemischen und physikalischen Methoden geprüft werden. In der Natur finden sich viele Stoffe mit ganz erstaunlichen Wirkungen, von denen zum Schluß dieses Kapitels noch einige eindrucksvolle Beispiele vorgestellt werden sollen.

Pflanzen sind in der Lage, fäulnishemmende Stoffe ähnlich den Antibiotika zu bilden. Solche Stoffe sammeln sich z. B. an beschädigten Kartoffelknollen und bilden eine Schutzschicht gegen Mikroorganismen.

Hochinteressant sind Vorgänge bei der Nahrungs- und Wassersuche durch Pflanzenwurzeln. Manche Arten finden Wasser über mehrere Meter Entfernung durch absolut trockenes oder gar steinigtes Erdreich. Gewisse Arten sind in der Lage, Mitbewerber aus dem Felde zu schlagen. Man hat z. B. festgestellt, daß die Wurzeln verschiedener Wüstenpflanzen Stoffe ausscheiden können, die fremde Wurzeln im Wachstum beeinträchtigen. Hier deuten sich neue Möglichkeiten für eine gezielte Unkrautbekämpfung an.

Bewegliche Bakterien suchen selbständig die Orte mit höchster Nährstoffkonzentration auf. Sauerstoffsuchende Bakterien reagieren so empfindlich, daß man sie zum Nachweis winzigster Sauerstoffspuren nutzen kann. Ähnlich empfindliche Bakterien existieren für den Nachweis einiger anderer Stoffe.

Ein interessantes Verhalten von Kleinlebewesen wurde im Bergbauinstitut von Maryland (USA) beobachtet. Hier stellte man fest, daß spezielle Hefepilze bestimmte seltene Metalle aufnehmen. Man entwickelte daraus eine Methode, mit der die in der Kernreaktortechnik wichtigen Metalle Zirkonium und Hafnium voneinander getrennt werden. Hefepilze für diese Aufgabe einzusetzen erwies sich als weit rationeller und billiger als die vorher genutzten Verfahren.

Diese Beispiele ließen sich fortsetzen. Auf die vielen pharmazeutischen Wirkstoffe in Pflanzen haben wir schon an anderer Stelle hingewiesen. Man beginnt bei uns erst seit kurzer Zeit wieder, sich auf dieses reiche Angebot der Natur zu besinnen.

5. Kapitel

Schwimmen und Fliegen



Über alle sieben Meere

Rund 77% der Oberfläche der Erde sind von Wasser bedeckt. Über die Meere führen Tausende von Kilometern weit die Schiffs- und Flugrouten, auf denen Schiffe zahlreicher Nationen ihren Kurs verfolgen und Flugzeuge Fracht und Passagiere zu ihren Zielhäfen bringen. Handel und Verkehr zwischen den Kontinenten, historisch in vielen Jahrhunderten zwischen den Völkern gewachsen, gehören zum Leben der menschlichen Gesellschaft als notwendiges Bindeglied, durch das Arbeitsteilung und Warenaustausch erst möglich werden.

Spezialschiffe aller Art, z. B. Tanker, Container- und Kühlschiffe, Erzfrachter und Frachter zum Transport von Holz, Papier, Kraftfahrzeugen und vielen anderen Spezialladungen, dazu Mehrzweckfrachter für Schütt- und Stückgut in allen Größen, transportieren täglich viele tausend Tonnen von Waren über die Meere, oft um den halben Erdball.

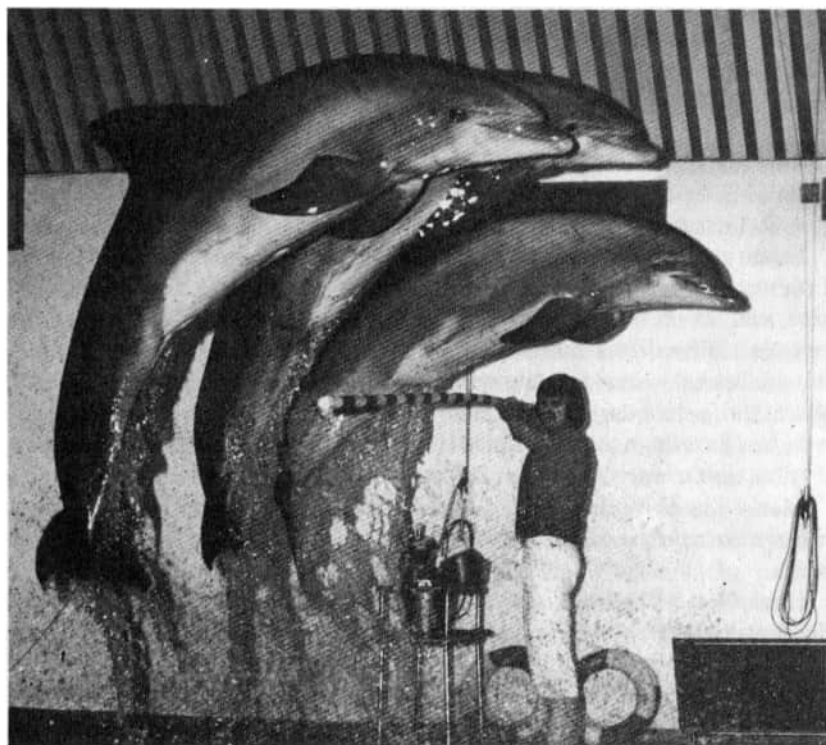
Der Warentransport auf dem Wasserweg ist auch dort vorteilhaft, wo der Landweg an sich möglich wäre. Deshalb werden ebenso Fluß- und Küstenschifffahrt intensiv betrieben.

Die zu transportierenden Warenmengen werden von Jahr zu Jahr umfangreicher, deshalb werden immer größere und schnellere Schiffe drin-

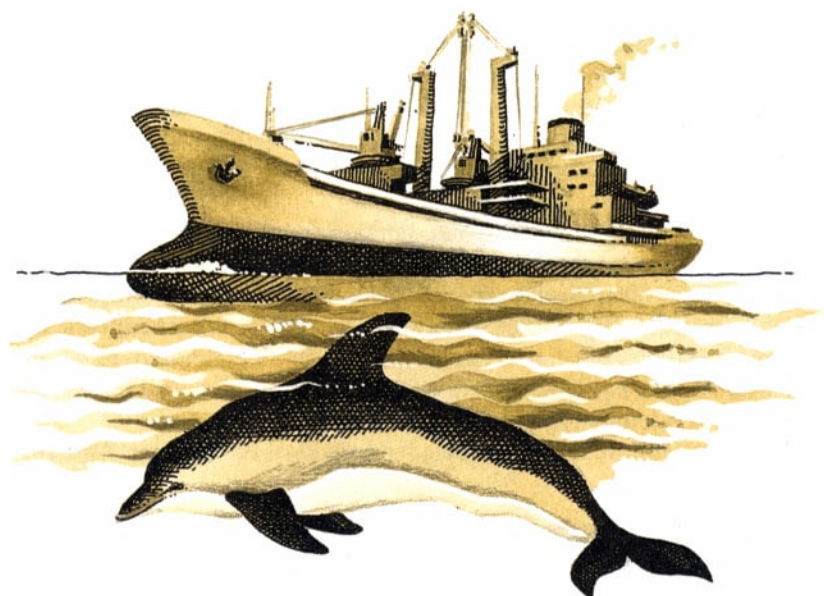
gend gebraucht. Die Schiffbauindustrie beschäftigt in vielen Ländern Tausende von Werktätigen. Schiffsbauingenieure entwickeln neue Fahrzeuge, neue Antriebsmaschinen, neue Be- und Entladevorrichtungen sowie bessere Navigations- und Radarsysteme. Das Verhältnis von Nutzlast zur Schiffsgröße ist zu verbessern. Der Treibstoffverbrauch soll gesenkt werden. Die Schiffe sollen schneller und sicherer werden. Wie sind alle diese Aufgaben zu lösen?

Boots- und Schiffbau werden seit Jahrtausenden betrieben. Schon vor 5000 Jahren befuhren die Ägypter mit Papyruschiffen den Nil. Die Phönizier, wohl die größten Seefahrer unter den alten Völkern, bewältigten den Atlantik. In griechischer Übersetzung ist das Reisewerk »Periplus« des Phöniziers Hanno (500 v. u. Z.) erhalten, in dem eine Schiffsreise bis zur Südspitze Afrikas beschrieben wird. Die Wikinger sollen im 11. Jahrhundert den Atlantik überquert und Nordamerika erreicht haben.

Über viele Jahrhunderte waren Ruder und Segel die einzigen Antriebs-



Delphine – Dressurvorführung im Duisburger Zoo



Wulstbug — Frachtschiff und tierisches Vorbild

mittel, bis im 19. Jahrhundert Dampfmaschinen, später Dieselmotoren an ihre Stelle traten.

Schon zur Zeit der Segelschiffahrt galt eine, wie man meinte, durch viele Erfahrungen gut begründete Ansicht, daß lange, schmale Schiffe mit spitzem, schlankem Bug am schnellsten durch das Wasser gleiten. Erst in der zweiten Hälfte dieses Jahrhunderts stieß man auf die Frage, warum denn die großen schnellen Schwimmer unter den Meerestieren, z. B. Delphine, Wale, Haifische oder Robben, ganz andere Formen besitzen. Alle diese gewandten Schwimmer haben Spindelformen. Sie sind vorn abgerundet, relativ dick und werden nach dem Schwanzende zu schmaler.

Man stellte in Versuchen fest, daß diese Formen tatsächlich deutlich geringere Strömungswiderstände aufweisen als die traditionellen Schiffsformen.

Nach diesen Ergebnissen wurden neue Schiffbugformen entwickelt. Auf der Warnowwerft, der Rostocker Neptunwerft und auch auf Werften anderer Länder wurden Fracht- und Tankschiffe mit Wulstbug gebaut, dessen Form vom Körperbau der Wale und Delphine abgeleitet ist. Mit diesen Schiffen erhielt man erhebliche Senkungen der Treibstoffkosten oder auch höhere Geschwindigkeiten bei gleicher Antriebsenergie. Die physikalische Begründung für dieses Ergebnis soll anschließend erläutert werden. Sie ist

deshalb von größerem Interesse, weil es sich dabei um allgemeine Probleme des Widerstandes von Körperprofilen in umströmenden Medien handelt, die nicht nur für Schiffskörper, sondern auch für Flugzeuge und andere Flugkörper zutreffen. Derartige Probleme sind so schwierig und mit derartigen Unsicherheiten zu berechnen, daß Modellversuche – z. B. im Windkanal – schneller und sicherer zu Ergebnissen führen. Dies mag als Erklärung dafür dienen, daß man nicht früher auf die besseren Lösungen gekommen ist.

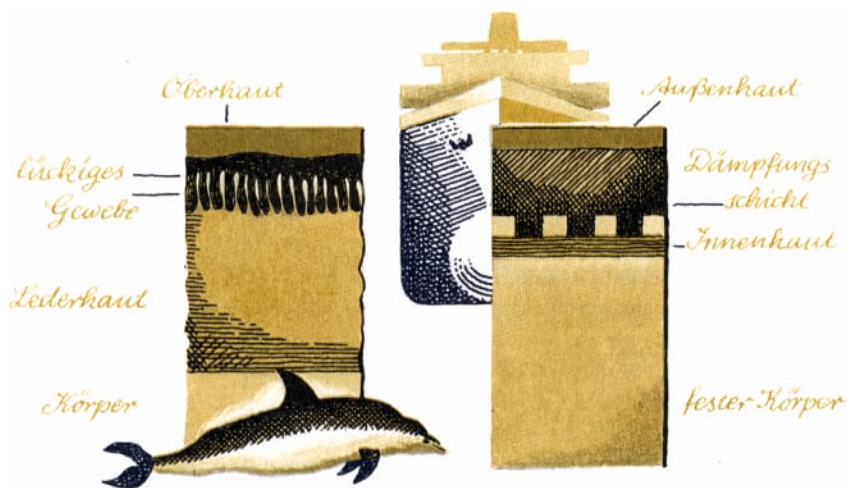
Im 19. Jahrhundert war man überzeugt, daß die theoretische Hydrodynamik weit von brauchbaren Erklärungen des Verhaltens strömender Flüssigkeiten entfernt sei, wie sie etwa beim Umströmen eines Schiffskörpers auftreten. Diese Kluft wurde teilweise überbrückt durch die Arbeiten des englischen Forschers Osborne Reynolds, der in den Jahren 1883 bis 1895 Strömungsversuche in Glasröhren anstellte. Er benutzte dabei gefärbte Flüssigkeitsfäden, wie man sie z. B. durch einen Tintentropfen leicht erzeugen kann. Reynolds stellte nun fest, daß die Flüssigkeitsfäden bei kleinem Röhrendurchmesser und niedriger Strömungsgeschwindigkeit parallel zueinander durch die ganze Röhre zogen, bei größerem Röhrenquerschnitt oder höherer Geschwindigkeit aber seitliche Bewegungen zeigten und sich durchmischten, so daß sie schließlich verschwanden und gleichmäßig gefärbte Flüssigkeit in den Röhren entstand.

Die erstere Form der Strömung nennt man laminare Strömung. Vor Reynolds hatte man in der Theorie angenommen, daß jede Flüssigkeit – zumindest solange sie nicht auf Hindernisse trifft – laminar strömt. Reynolds wies als erster eine andere Form der Strömung nach, die turbulente Strömung. Er fand auch Kriterien, nach denen eine laminare Strömung in turbulente Strömung übergeht.

Umfließt ein Medium (Wasser oder auch Luft) einen Körper, so ist die Strömung, wenn sie langsam genug ist, laminar. Das Medium schiebt sich gewissermaßen in Schichten um den Körper herum. An der Körperoberfläche haftet eine dünne Schicht des Mediums. Sie wird vom Körper mitgenommen. Die entfernteren Schichten besitzen eine um so höhere Geschwindigkeit relativ zum betrachteten Körper, je weiter sie von seiner Oberfläche entfernt sind. Zwischen den weitab liegenden Schichten und der am Körper haftenden Grenzschicht (Prandtlsche Grenzschicht, nach dem deutschen Aerodynamiker L. Prandtl so benannt, der 1904 erstmalig auf die Existenz dieser Schicht schloß) liegt die gesamte Geschwindigkeitsdifferenz zwischen Körper und Medium.

Wird nun die Geschwindigkeit des Körpers im Medium immer größer, so tritt insbesondere an der Grenzschicht ein so starkes Geschwindigkeitsgefälle auf, daß die Strömung turbulent wird.

Die spindelförmigen Körper der Delphine, Wale und Robben stellen



Dämpfungshaut des Delphins (links) und technische Nachbildung (rechts)

nun gerade die optimalen Formen dar, bei denen die Strömung auch bei relativ hohen Geschwindigkeiten noch laminar bleibt. Für den Vortrieb im Wasser müssen sie nur die innere Reibung der Flüssigkeit überwinden. Bei weniger günstiger Körperform entsteht bei gleicher Geschwindigkeit turbulente Strömung, die viel zusätzliche Energie verbraucht.

Unsere physikalische Erklärung konnte nur einen ersten Einblick in die Theorie der Strömungen geben, erleichtert uns aber doch das Verständnis für die aufsehenerregenden Untersuchungen, die M. O. Kramer nach 1950 über die Delphinhaut durchführte. Kramer wies nach, daß die Haut des Delphins bestimmte elastische Eigenschaften besitzt, die zu einer beträchtlichen Verminderung des Strömungswiderstandes führen.

Beim schnellen Schwimmen treten in der vorher erwähnten Grenzschicht, die — nur einen oder wenige Millimeter stark — an der Tierhaut anliegt, starke tangentielle Zugkräfte und auch vertikale Druckkräfte auf. Eben diese Kräfte sind es, die die Strömung turbulent machen und den Vortrieb bremsen.

Die Delphinhaut besteht aus einer rund 0,5 mm dicken Epidermisdecke, unter der sich das festere Gewebe der Epidermis befindet, verzahnt mit dem darunterliegenden schwammartigen Kutisgewebe. Im Schwammgewebe der Kutis wird bei örtlich erhöhtem Druck, der in der Grenzschicht entsteht und an den betreffenden Stellen Turbulenzen erzeugt, Lymphe verschoben. Dadurch wird der Druck an diesen Stellen aufgenommen und auf größere Flächen verteilt. Die Strömungsreibung der Lymphe

im Kutisgewebe dämpft lokale Druckkräfte. Man spricht deshalb auch von der Dämpfungshaut des Delphins.

Es sind also nicht nur die optimalen Formen der schnellschwimmenden Meerestiere, sondern auch die elastischen Eigenschaften ihrer Haut, die ihnen bei großen Geschwindigkeiten noch ein laminares Umströmen gestatten und damit die Strömungswiderstände für ihre Körper so klein wie möglich halten. Delphine bringen es auf Spitzengeschwindigkeiten von 60 km/h und können auch über lange Strecken hohe Geschwindigkeiten beibehalten. Sie erzeugen den Hauptvortrieb durch rhythmische Rumpfbiegung und durch den Schlag der Schwanzflosse. Sie gewinnen damit eine so enorme Antriebskraft, daß sie trotz beträchtlichen Gewichts mehrere Meter hoch aus dem Wasser springen können.

Etwa ab 1956 entwickelte M. O. Kramer Überzüge für Unterwasserfahrzeuge, die der Dämpfungshaut des Delphins nachgebildet waren. Sie bestanden aus einer Gummidoppelhaut mit spreizenden Gummipfropfen, gefüllt mit Silikonöl, das anstelle der Lympflüssigkeit die Dämpfung und Druckverteilung bewirkte. 1962 konnte Kramer an Modellen zeigen, daß auf diese Weise Widerstandsminderungen bis zu 50% zu erreichen sind.

Diese Beispiele beweisen, wie effektiv biologische Forschungen mit dem Ziel technischer Anwendungen sein können.

Der Gütertransport über die Weltmeere per Schiff muß nicht die einzige Möglichkeit bleiben, große Mengen von Stoffen wie Erdöl, Getreide oder ähnliche Schüttgüter von Kontinent zu Kontinent zu befördern. Ausgangspunkte von Überlegungen, andere, vielleicht ökonomischere Transportmethoden zu entwickeln, sind Beobachtungen an Schwimmsamen verschiedener Pflanzen.

Ein Beispiel bieten die Kokospalmen. Ihre Ausbreitung über viele Strände in den Tropen und Subtropen verdankt diese Art ihren Früchten, die Tausende von Kilometern auf den Meeren schwimmend überwinden können. Die Kokosnüsse sind wasserdichte Gefäße, die alles enthalten, was den eigentlichen Samen schützt und gedeihen läßt. Eingebettet in nahrhaftes Fruchtfleisch mit fetten Ölen und viel Eiweiß schwimmen sie, Meeresströmungen folgend, an ferne Strände. Sogar einen Süßwasservorrat, die Kokosmilch, führen sie mit sich. Ihre Schalen aus mehreren Schichten bieten den Samen hohe Transportsicherheit gegen Schläge und Stöße, etwa an steinigen Stränden, felsigen Klippen oder Korallenriffen. Die harte Schale der Nuß ist in einen Mantel aus zähem, elastischem Fasermaterial gebettet. Diese Kokosfasern sind das bekannte Material, aus dem die unverwüstlichen Kokosmatten hergestellt werden. Darüber befindet sich noch eine glatte äußere Schale. Dieses Materialverbundsystem hat sich in vielen Jahrtausenden als see- und wetterfest erwiesen.

In Anbetracht dieser Beobachtungen erscheint der Vorschlag sehr be-



Querschnitt durch eine Kokosnuß

merkenswert, den Seetransport von Erdöl in Plastballons durchzuführen, deren Hüllen, ähnlich der Kokosnuß, ausreichende Sicherheit gegen Beschädigungen bieten. Sie könnten, vollautomatisch gesteuert und angetrieben, ohne Besatzung die Meere passieren, eventuell Strömungen ausnutzend, vielleicht in Ketten gekoppelt, sich wie Containerzüge bewegen. Am Bestimmungsort, von gewaltigen Kränen aus dem Wasser gehoben oder in Systemen von Schleusen an sichere Ankerplätze transportiert, würden dieselben Ballons ohne Umpumpen des Inhalts als Speicherbehälter dienen.

So hypothetisch diese Idee heute sein mag, so spricht doch vieles für sie. Ihrer Realisierung dürfte unter den gegenwärtig herrschenden Verhältnissen vor allem entgegenstehen, daß die überwiegend privaten Seetransportunternehmen weder Interesse noch Potenzen haben, eine Idee dieser Tragweite mit all ihren Konsequenzen in die Tat umzusetzen.

Wir stoßen oft an diese Grenze, die private Interessen und Eigentumsverhältnisse großen technischen Projekten ziehen.

Technische Entwicklung kann sich nicht ohne gesellschaftliche Entwicklung vollziehen. Diese Tatsache tritt besonders dort ans Licht, wo es darum geht, neue Lebensräume für die Menschheit zugänglich und nutzbar zu machen.

Der Mensch hat sich angeschickt, den Lebensraum Meer in weit umfangreicherem Maße zu erschließen, als es in der Vergangenheit geschehen ist. Man sucht nach Erdöl und anderen Bodenschätzen im Schelf der Kontinente. Man denkt an Unterwasserplantagen zur Gewinnung von Nährstoff-

fen und an andere Projekte. Für alle diese Vorhaben bieten die Lebewesen in flacher und tiefer See Vorbilder für die Lösung technischer Probleme, die der Mensch heute vielleicht noch nicht einmal erkannt hat. Wir wissen vorerst nur, daß es auch in diesem Bereich ein solches Angebot der Natur gibt. Was aus ihm zu schöpfen ist, muß die technische Entwicklung der Zukunft erweisen.

Der Traum vom Fliegen

Dädalus und sein Sohn Ikarus – so erzählt die griechische Sage – fertigten sich Flügel aus Vogelfedern und Wachs und flogen damit in die Höhe. Aber Ikarus kam der Sonne so nahe, daß das Wachs seiner Flügel schmolz. Er stürzte ins Meer und ertrank.

Seit uralter Zeit schaut der Mensch den Vögeln nach und träumt davon, fliegen zu können. Im 15. Jahrhundert war es der geniale Leonardo da Vinci (1452–1519), Maler, Bildhauer, Mathematiker und Ingenieur, der sich intensiv mit der Kunst des Fliegens beschäftigte. Er studierte eingehend den Flug der Vögel, verfaßte darüber verschiedene Arbeiten, unter anderem auch ein 28 Seiten umfassendes Heft mit dem Titel »Sul volo degli uccelli« (»Über den Vogelflug«) mit Skizzen zum Bau künstlicher Flügel. Er



Flügelzeichnungen Leonardo da Vincis

setzte sich mit Fragen des von Flügeln zu tragenden Menschengewichts, mit der Steuerbarkeit des Fluges und mit der Gefahr des Abstürzens auseinander. Als Baumaterial für Flügel empfahl er grünes Tannenholz, auf Barchent geleimte Federn sowie Schnüre aus Rohseide und geseiftem Leder.

In den erhaltenen Blättern von Leonardo da Vinci finden sich auch die Urform des Hubschraubers und die Skizze eines Fallschirms mit dem Text: »Wenn ein Mensch einen Pavillon von dichtem leichtem Tuch besitzt, der zwölf Ellen breit und zwölf Ellen hoch ist, kann er sich ohne nennenswerten Schaden für sich von jeder großen Höhe herablassen.«

Seine Schriften gerieten in Archiven zunächst in Vergessenheit. Aber der Gedanke des Fliegens blieb unter den Menschen. Alte Chroniken berichten immer wieder von Versuchen, die oft mit dem Leben des Fliegers bezahlt wurden. Im 17. und 18. Jahrhundert reißt die Folge derer nicht ab, die mit selbstgefertigten Flügeln von Kirch- und Rathhaustürmen zu segeln versuchten. Da ist der Augsburger Schuster Salomon Idler, der »sich ein Flügelwerk aus Eisen und allerlei bunten Federn machte«, der Prior Caspar Mohr des Klosters Schussenried in Württemberg, der sich insgeheim mit Flügeln aus Gansfedern in der Kunst des Fliegens übte. Um die Mitte des 17. Jahrhunderts soll ein junger Franzose »... gegen eine Sammlung von hundert Guineen ...« von der Paulskirche zu London geflogen und wohlbehalten auf dem Boden gelandet sein. Viele andere Versuche sind bekannt. Oft bleibt bei den vielen Beschreibungen von Flugapparaten und Ideen zweifelhaft, ob die Verfasser jemals die beschriebenen Konstruktionen realisiert und Flugversuche wirklich ausgeführt haben.

Wichtige wissenschaftliche Vorarbeiten leistete der italienische Professor Johann Alfons Borelli (1608–1679) für das technische Verständnis des Vogelfluges. Er erkannte unter anderem die Bedeutung der einen Flugkörper umströmenden Luftmenge.

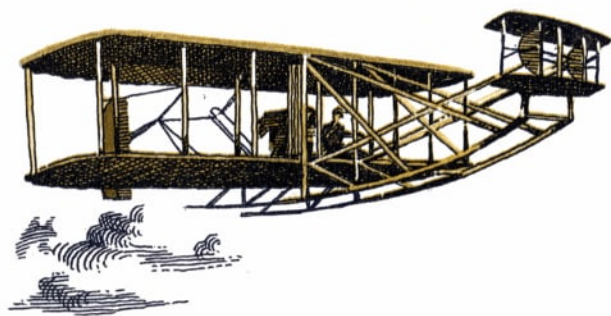
Für mehr als hundert Jahre drängten dann Ballon- und Luftschiffahrt die Gleit- und Schlagflügelmaschinen in den Hintergrund. Nachdem am 19. September 1783 der erste Heißluftballon der Gebrüder Montgolfiere mit einem Schaf, einem Hahn und einer Ente an Bord 8 Minuten lang über den Dächern von Paris geflogen und wohlbehalten wieder gelandet war, sah man hier den Weg zur Luftfahrt. Dagegen waren bis dahin alle ersten Flugversuche nach dem Vorbild der Vögel gescheitert.

In dieser Zeit wirkte der große englische Pionier der Aerodynamik Sir George Cayley (1773–1857). Er setzte die Studien über den Vogelflug fort, erkannte aber auch, daß für Flugmaschinen, die Menschen tragen sollen, technische Elemente unabhängig von biologischen Vorbildern zu entwickeln sind. Auf ihn geht die Idee der Luftschraube zurück.

Die Ursachen für das Scheitern aller Versuche mit Schlagflügelmaschinen lagen in ungenügenden Beobachtungen und Kenntnissen der natürli-



Doppeldecker Lilienthals (1895)



Motorflugmaschine der Gebrüder Wright (1908)

chen Vorbilder. So hatten altertümliche Flügelmodelle ebene Flügel. Ferner war man der Meinung, Vögel und fliegende Insekten schlugen mit den Flügeln einfach auf und ab.

Um 1873 erkannten die Brüder Gustav und Otto Lilienthal den gewölbten Vogelflügel als wesentliches Merkmal. Sie stellten sich als eingeschränktes Ziel den schlaglosen Gleitflug, den – davon waren sie überzeugt – der Mensch nach dem Vorbild großer Greifvögel mit einem Flugapparat verwirklichen kann. 1875 entstand ihr erster Fluggleiter. Zunächst mißlangen alle Versuche.

Später setzte Otto Lilienthal allein die Arbeiten fort. Erst 1891 hatte er am Windmühlenberg von Derwitz bei Werder mit den ersten Gleitflügen Erfolg. In den folgenden Jahren gelangen Otto Lilienthal immer höhere und weitere Flüge mit steuerbaren Gleitfluggeräten, bis ein tödlicher Absturz im Jahre 1896 seinem Schaffen ein Ende setzte. Begeisterte Schüler und Nachfolger setzten seine Arbeiten fort. Man sieht heute Lilienthals Ar-

beiten und Gleitflüge als eigentlichen Anfang der technischen Flugzeugentwicklung an, die vom ersten, mit einem 16-PS-Motor getriebenen Propellerflugzeug der Gebrüder Wilbur und Orville Wright (1903) bis zum Düsenflugzeug der Gegenwart eine stürmische Entfaltung erlebte. Diese wenigen Ausschnitte aus der Geschichte der Fliegerei zeigen, daß es wohl kein anderes Beispiel in der historischen Entwicklung der Technik gibt, bei dem lange und intensiv von vielen Erfindern und Konstrukteuren ein Vorbild der Natur angestrebt und endlich in gewissem Sinne erreicht wurde.

Aerodynamik der Luftkraftherzeugung

Schon Lilienthal hatte erkannt, daß die Tragfähigkeit der Flügel seiner Gleitfluggeräte mit der Geschwindigkeit der anströmenden Luft wächst, und berechnete daraus die erforderlichen Startgeschwindigkeiten.

Anders als ein im Wasser schwimmender Körper, dessen Auftrieb, resultierend aus dem verdrängten Wasser, ausreichend groß ist, um ein Sinken zu verhindern, und der sich mit minimalem Strömungswiderstand bewegen soll, muß sich ein Körper, der schwerer ist als Luft, zum Zwecke des Fliegens so bewegen, daß ein bestimmter Strömungswiderstand entsteht, der ihm den erforderlichen Auftrieb gegen die Schwerkraft verleiht.

Betrachten wir der Einfachheit halber eine dünne, ebene Platte in einer Luftströmung, z. B. in einem Windkanal. Steht diese Platte genau parallel zur Luftströmung, so erhält sie keinen Auftrieb. Sie wird herunterfallen. Besitzt sie aber einen bestimmten Anstellwinkel zur Luftströmung, so erfährt sie eine Kraftwirkung, deren Stärke und Richtung von eben diesem Anstellwinkel und der Strömungsgeschwindigkeit abhängt. Die schräg nach oben wirkende Kraft kann zerlegt werden in den reinen Strömungswiderstand parallel zur Strömungsrichtung und in die senkrecht nach oben gerichtete Auftriebskomponente. Die Platte wird in der Luft schweben, wenn Auftrieb und die entgegengesetzt wirkende Schwerkraft gerade gleich groß sind. Natürlich würde die Platte allein in der Strömung sofort umkippen. Verbindet man die Platte aber starr mit einer zweiten (kleineren) Platte, die sich, in Strömungsrichtung gesehen, hinter ihr befindet, so wird das ganze System in der Strömung stabilisiert.

Damit daraus ein Flugzeug wird, müssen anstelle der ebenen Platten profilierte Tragflügel treten, die ein gutes, laminares Umströmen gewährleisten. Eine nach unten konkave Wölbung der Tragflächen erhöht den Strömungswiderstand bei gleichem Anstellwinkel. Man braucht also einen kleineren Anstellwinkel, um den gleichen Auftrieb zu erzeugen. In der bis zur Grenzschicht hin laminaren Umströmung liegt auch eine Gefahr verborgen, die darin besteht, daß in bestimmten Phasen des gesteuerten Fluges

die laminare Strömung unter dem Flügel abreißt. Der Körper, ob Flugzeug, Vogel oder Insekt, würde regelrecht in das entstehende Loch fallen, was zum Absturz führen kann. Wir werden darauf noch ausführlicher zurückkommen.

Selbstverständlich sind die Probleme der Flugtechnik, vor allem die der Flugsteuerung und der Stabilität, weit umfangreicher und in einer strengen physikalisch-technischen Behandlung komplizierter als hier vereinfacht dargestellt.

Motorflugzeuge erzeugen ihre relative Bewegung zur stehenden Luft durch die Luftschaube, Düsenflugzeuge durch den Schub der Strahldüsen. Vögel und Insekten dagegen führen rudernde, kreisende Bewegungen ihrer Flügel aus. Zumindest für den Flug der langsam flügelschlagenden Vögel bleiben die dargestellten aerodynamischen Gesetze der Luftkrafterzeugung und Strömung anwendbar. Inwieweit das auch für den Schwirrflug bestimmter kleiner Vögel wie Kolibris und für den Insektenflug gilt, ist noch nicht restlos erforscht.

Moderne Flugtechnik und das Vorbild Natur

Der Schwingenflug der Vögel ist längst nicht mehr Vorbild der Technik. Es gibt aber eine ganze Anzahl von Problemen, die beim Tierflug und in der Technik sehr ähnlich auftreten und wo die Technik auch heute noch von der belebten Natur lernen kann. Hierzu sind Probleme der Start- und Landetechnik zu rechnen, auch solche der Flugsicherheit und der erhöhten Wendigkeit von Flugzeugen.

Die Start- und Landephase eines Fluges stellen sowohl für die Technik als auch für die Tiere, vor allem für große Vögel, besondere Probleme dar. Sie werden nicht immer ohne weiteres beherrscht. Flugzeugunglücke ereignen sich meist gerade in diesen Phasen. Wer schon – zumindest im Film – den Startbemühungen der Albatrosse oder der Landung eines Storchs auf seinem Nest zugesehen hat, der weiß, wie schwierig diese Flugphasen auch für große Vögel sein können.

Die relativ geringe Anströmungsgeschwindigkeit kurz nach dem Start und kurz vor der Landung erfordert eine besondere Art der Auftriebserzeugung, um den Auftriebsverlust infolge herabgesetzter Geschwindigkeit auszugleichen. Man spricht in diesen Flugphasen vom Erzeugen eines Hochauftriebs, der hauptsächlich durch steilere Anstellwinkel der Flügel erreicht wird. Das technische Analogon sind die Start- und Landeklappen am hinteren Teil der Tragflächen von Flugzeugen.

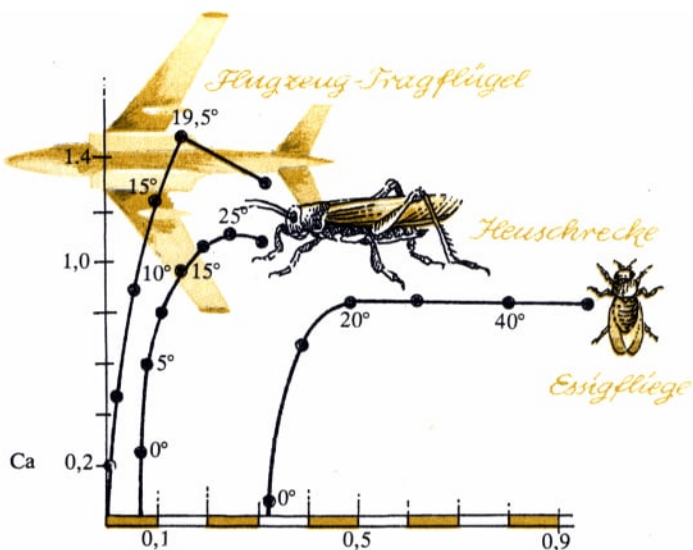
Das steilere Anstellen der Flügel gegen die Strömung bringt die Gefahr



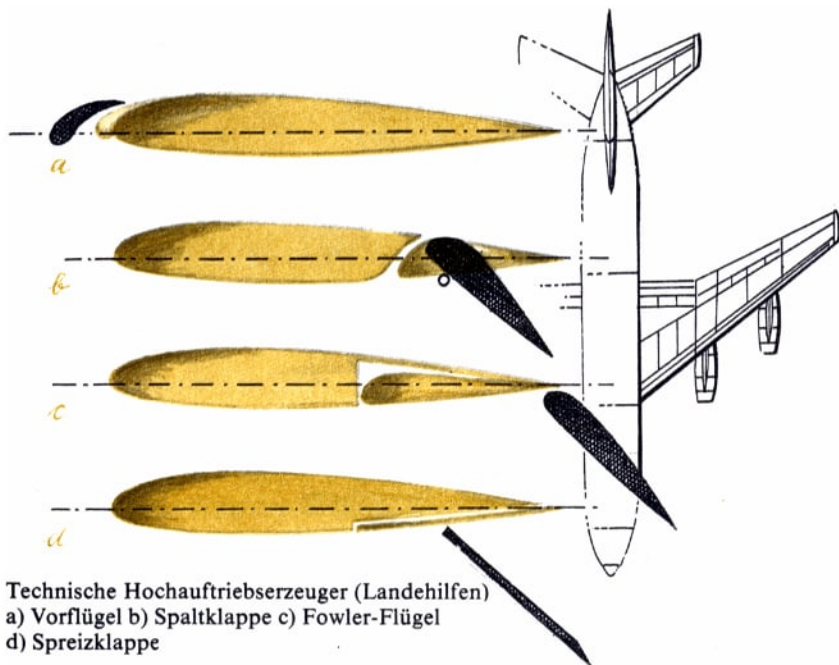
Graugans im Flug

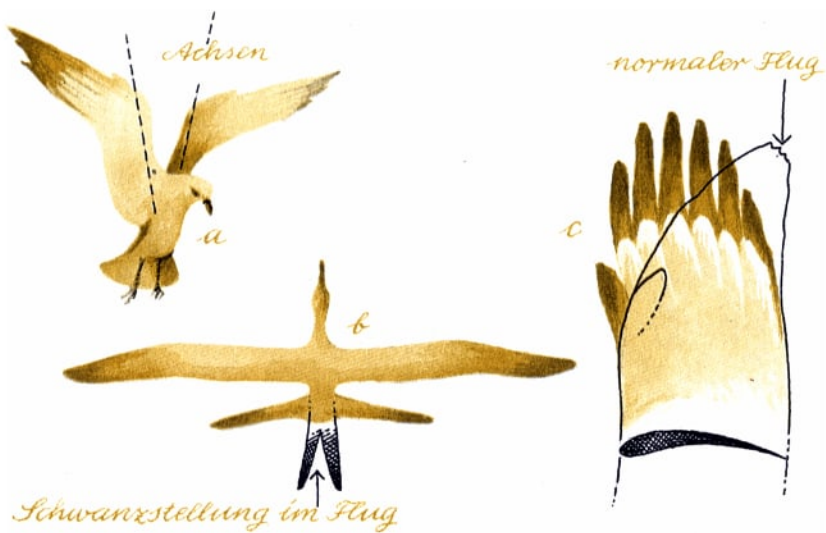
mit sich, daß die laminare Umströmung abreißt und damit ihre Tragfähigkeit verliert. Dieser Gefahr wirken bei Tieren Vortexgeneratoren entgegen. Unter diesem Begriff sind verschiedene Gebilde, wie Sonderbildungen der Federn bei Vögeln, Flügelgeäder, Flügelbehaarung und gröbere Körperhaare bei Insekten, zusammengefaßt, die alle den Zweck haben, die Strömung der an Körper und Flügel grenzenden Luftschichten turbulent zu machen. Damit ist zwar ein Energieverlust verbunden, die Gefahr des Ablösens der Grenzschicht wird aber stark herabgesetzt, die Flugsicherheit in den langsamen Flugphasen erhöht.

Die durch Vortexgeneratoren erzeugte turbulente Umströmung des Flugkörpers unterdrückt auch Wirbelbildungen. Jedes Abreißen der laminaren Strömung hat an der Abrißstelle einen Strömungswirbel zur Folge. Wirbel sind ringförmige Strömungsformen, die Energie aus der Strömung verbrauchen. Sie dürfen nicht mit Turbulenz verwechselt werden. Nun treffen die einen Körper umströmenden Luftschichten zwangsläufig hinter ihm wieder zusammen. Laminare Strömungsschichten ergeben dabei Wirbelstra-



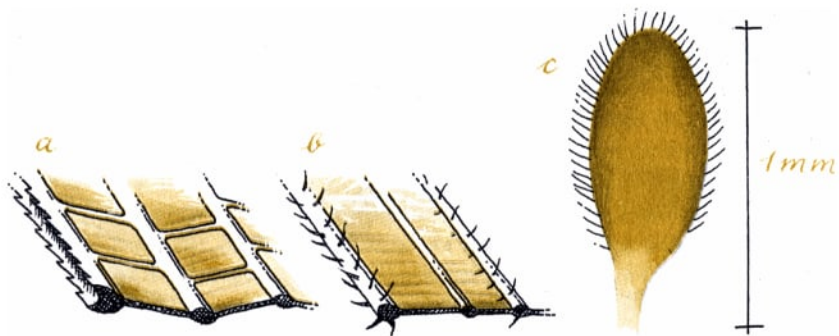
Zum Flugverhalten technischer und biologischer Systeme: Abhängigkeit des Auftriebsbeiwertes C_a vom Widerstandsbeiwert C_w (Anstellwinkel als Parameter eingezeichnet, nach W. Nachtigall, Gläserne Schwingen, H. Moos-Verlag, München 1968)





Hochauftriebsmittel bei Vögeln

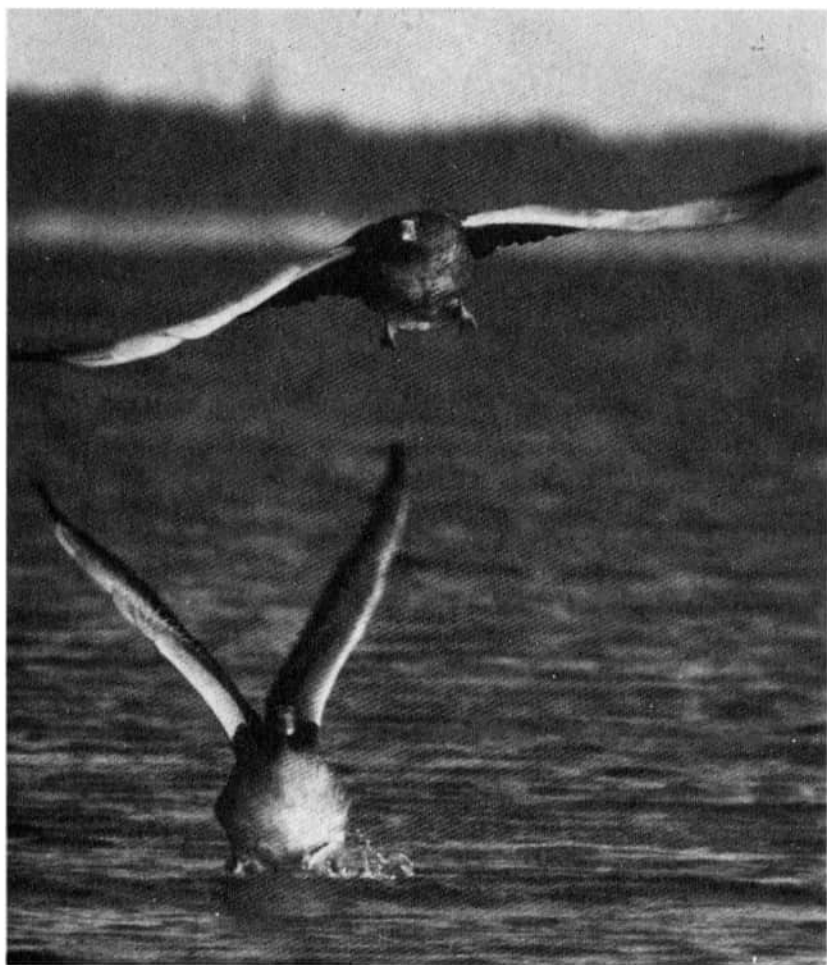
- a) Möwe in Rüttelstellung (Flügelbewegung um die durch Punktlinien angedeuteten Drehachsen)
- b) Fregattvogel, Schwanz gespreizt (schwarz: Schwanzstellung im Flug)
- c) Flügel eines Bussards bei gebeugter und gestreckter Hand
darunter: Profil



Vortexgeneratoren an Insektenflügeln

- a) Schnitt durch die Vorderkante eines Libellenflügels
- b) Schnitt durch die Vorderkante eines Mückenflügels
- c) Flügel der Grallmücke mit behaartem Rand

ßen oder Wirbelschleppen. Das ist z. B. bei der Bewegung der Fische im Wasser der Fall und dort sogar sehr wichtig. Man nimmt an, daß sich der Fisch mit jedem Schwanzflossenschlag regelrecht von den Wirbeln abstößt.



Schwierigkeiten bei der Wasserung

Beim Fliegen dagegen tritt die bremsende Wirkung der Wirbelschleppen in den Vordergrund. Ist die Wirbelbildung stark, so kann sie sich durch laute, knatternde Geräusche bemerkbar machen und zu spürbaren Rückstößen auf den Flugkörper führen. Dem wirken die Vortexgeneratoren entgegen. Sie machen, wie gesagt, die Strömung turbulent, verhindern dadurch Wirbelbildungen und erhöhen die Tragfähigkeit der umströmenden Luft.

Man hat durch Versuche und Messungen festgestellt, daß bei Schmetterlingen wie Kohlweißlingen, Schwalbenschwanz und Segelfaltern eine



Fliegende Kraniche

Schuppenstruktur der Flügeloberflächen den Auftrieb um 15 bis 35% erhöht. Der sehr geräuscharme Flügelschlag der Eulen entsteht ebenfalls durch besondere Flügelform und Federbildungen, die als Vortexgeneratoren wirken.

Große Vögel spreizen, vor allem in der Landephase, den für sich befiederten Daumenfittich der Vogelhand ab und verstärken mit dem so entstehenden Schlitzflügel die Turbulenz in der umströmenden Luft. Bei Greifvögeln beobachten wir in bestimmten Flugphasen gespreizte Mehrfachschlitzflügel, die aerodynamisch noch wenig untersucht worden sind.

Vögel vollbringen verblüffende Leistungen bei der Steuerung ihres Fluges. Man denke an Meisen oder Finken, die durch Geäst fliegen, an Schwalben bei der Jagd nach Insekten oder an Greifvögel, die ihren Sturzflug erst kurz über dem Boden abfangen.

Durch asymmetrische Steuerung von linkem und rechtem Flügel können Vögel schnelle Drehungen um die Längsachse (Rollen) und um die Vertikalachse (Gieren) vollbringen. In normaler Fluglage stehen die Schwingen während des größten Teils ihrer Bewegung höher als der Körperschwerpunkt, denn die Schwingengelenke befinden sich nahe der Rückenfläche des Tieres. Das ergibt ein sehr stabiles Flugverhalten, in dem so schnelle Höhen- und Richtungsänderungen ohne Risiko möglich sind.

Bei Flugmanövern bezieht der Vogel meist alle Teile seines die Luftkräfte erzeugenden Systems ein. Der Ablauf der Bewegungen zur Verstellung der Flügel, des Kopfes und des Schwanzes und einzelner Teile des Gefieders ist durch das Zentralnervensystem gesteuert. Die Leistungsfähigkeit dieses steuernden und regelnden Systems ist, verglichen mit entsprechenden technischen Systemen, außerordentlich hoch. Das drückt sich in seiner Schnelligkeit, in seiner sehr hohen Zuverlässigkeit und Betriebssicherheit aus.



Flugsamen des Löwenzahns

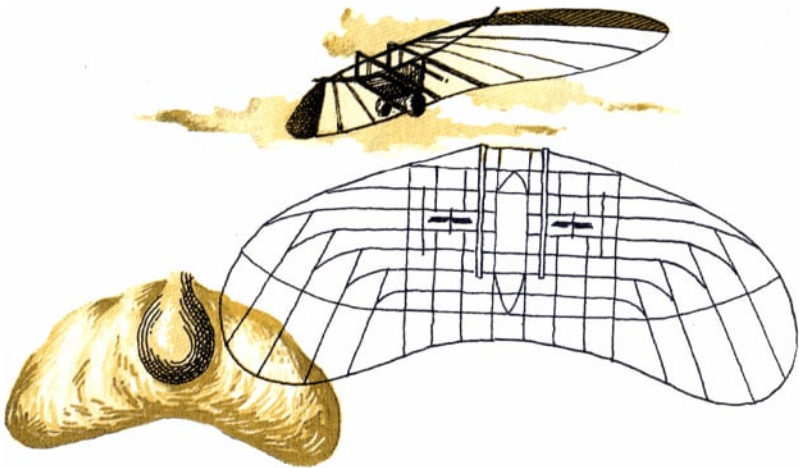
Interessante Vorbilder können fliegende Insekten liefern, z. B. für technische Probleme des Langsamfluges und für das Stehen in der Luft. Auch Flugsamen von Pflanzen zeigen »Konstruktionen« der Natur, die vielleicht noch nicht für technische Zwecke ganz ausgebeutet sind.

Die weißen Schirmchen des Löwenzahns lösen sich, nachdem sie ausgereift sind, erst bei Lufttrockenheit und gutem Wind und fliegen dann große Strecken. Die Blasenkirschen (*Physalis alkekengi*) sind ideale Leichtbaukonstruktionen, Flugballons der Natur. Die Drehflügelsamen des Spitzahorns (*Acer platanoides*) verlangsamen die Fallgeschwindigkeit, so daß der Wind sie während ihres Fluges mehr als 100 m weit tragen kann. Die Flügelblätter des Eschensamens (*Fraxinus excelsior*) sind in sich verwunden – natürliche Modelle für Luftschrauben. Viele tropische Lianenarten besitzen geflügelte Samen. Einer davon wurde zum Vorbild einer bekannten Flugzeugkonstruktion aus der frühen Geschichte der Flugtechnik.

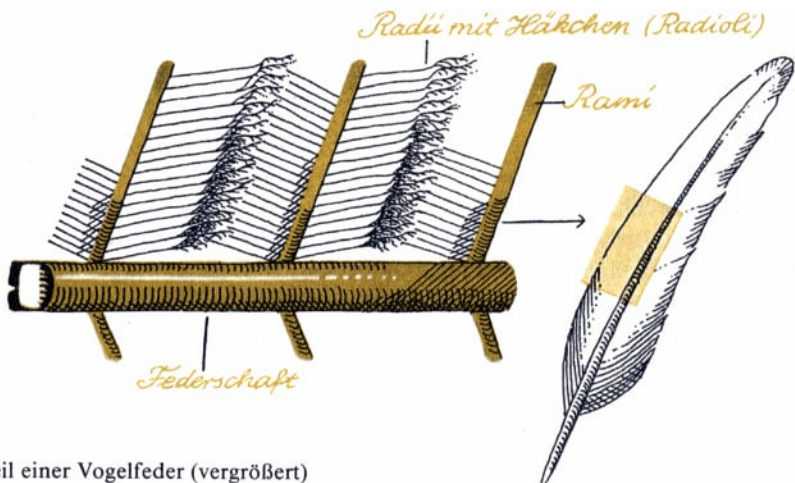
Um 1904 fiel den deutschen Flugzeugbauern Igo Etrich und Franz Wels eine Beschreibung des Hamburger Biologen Friedrich Ahlborn über die Flugsamen der *Zanonia macrocarpa* in die Hände. In den Wäldern auf Java hängen die großen, kürbisähnlichen Früchte dieser Lianenart hoch im Geäst ihrer Stützbäume. Reif geworden, springen sie an ihrer Spitze auf und geben die aus zwei symmetrischen Flügeln bestehenden Flugsamen frei. Die Flügel sind etwa 5 cm breit und haben eine Spannweite von 14 bis 16 cm. Das Gewebe der Flügel ist durchscheinend, seidig glänzend.

Nach diesem Vorbild baute Etrich einen Nurflügelgleiter mit 6 m Spannweite, der eine Nutzlast von 25 kg tragen konnte. Später baute er größere Modelle, im Jahre 1909 eines, das mit einem 40-PS-Motor ausgerüstet war. Schließlich fügte er einen Stabilisierungsschwanz hinzu und schuf so eines der ersten Motorflugzeuge.

In all den flugfähigen Gebilden der Natur sind Materialien und Struktu-



Flugsamen der *Zanonion macrocarpa* und danach konstruierter Nurflügelgleiter von Etrich und Wels



Teil einer Vogelfeder (vergrößert)

ren enthalten, die bei extremer Leichtigkeit, also äußerster Einsparung von Gewicht, hervorragende Stabilität und Festigkeit, Elastizität und Bruch-sicherheit garantieren und dadurch wesentliche Elemente der ausgezeichneten Flugeigenschaften darstellen.

Man hat z. B. gefunden, daß die Flügelaufhängung (Flügelbasis) der Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria*) aus einem Protein besteht – Resilin genannt –, dessen Plastizität alle synthetischen Gummiarten übertrifft.

Die Resilinmoleküle sind bis zu 1 mm lang, regelmäßig durch Querverbindungen untereinander vernetzt und zwischen 0,2 μm dicke Chitinlamellen gepackt. Sie speichern 96% der Bewegungsenergie. Das Resilin wurde auch bei Libellen gefunden und wird bei den meisten Insekten vermutet.

Beispiele für hervorragend optimierte Strukturen stellen die Vogelfedern dar. Die Konturfedern der Vögel, also die großen Federn, die die Umrisse der Flügelspitzen, der Flügelhinterkanten und des Schwanzes bestimmen, bestehen aus Hohlschäften, deren Wandstärken nur 3 bis 14% des Schaftquerschnittes ausmachen. Das Keratin, aus dem sie aufgebaut sind, hat eine spezifische Masse von 1,15 g/cm³. Der Schaft ist aber nicht einfach eine glatte Röhre, sondern er besitzt eine Längsstruktur aus verdickten Bändern mit zwischengelagerten dünnen Stegen, die sandwichartig übereinander geschichtet sind. Die Dachzone des Schaftes, an der zu beiden Seiten die Federfahnen ansetzen, besteht aus mehreren, nach innen spitzkantig vortretenden Rippen. Diese versteifen gegen Verbiegungen um die Quer- und die Hochachse, lassen aber ein Verbiegen um die Längsachse zu. Die Federfahnen (Rami) sind mit Hilfe von Seitenstrahlen (Radii) und daran befindlichen Häkchen (Radioli) untereinander verhakt. Diese Verhakung kann – z. B. beim Spreizen des Gefieders – gelöst werden und schließt sich danach ähnlich dem Klettverschluß wieder.

Die Zahl interessanter biologischer Strukturen ist so groß wie die Zahl der Arten fliegender Tiere. Nicht nur die Flügel, deren Struktur und Bewegung enthalten wertvolle Konstruktionsprinzipien. Das Studium der Funktionen aller Teile eines Tieres sind einzubeziehen. Die biologische Forschung hat in den letzten Jahren zahlreiche neue Details ans Licht gebracht, so z. B. über die Sauerstoffversorgung der Flugmuskulatur bei Fliegen und Libellen. An diese werden sehr hohe Anforderungen gestellt, um Kühlung und Energieversorgung der Flugmuskulatur sicherzustellen. Der Gastransport erfolgt bei den Insekten durch winzige Röhren, die Tracheen, die Luft zu jedem Muskelbündel hinleiten. Sie sind mit Chitinringen und -spiralen ausgekleidet, so daß sie nicht zusammengequetscht werden können. Die Tracheen verzweigen sich zu immer dünneren Röhrchen (Tracheolen) bis zu den Endröhrchen, die oft nur eine einzige Muskelzelle versorgen. Die an der Körperoberfläche endenden Tracheen saugen mittels rhythmischer Kontraktionen der Flug- und einer besonderen Atemmuskulatur Luft an und pumpen sie weiter. Die Öffnungen (Stigmen) der Tracheen besitzen meist Schließmuskeln. Das Ganze hat im Prinzip viel Ähnlichkeit mit einem aufs äußerste optimierten kleinen Flugmotor.

Es ist schwer, die Brauchbarkeit all der vielen biologischen Vorbilder für technische Lösungen einzuschätzen. Jedenfalls ist große Vorsicht geboten. Sicher können im Bereiche der belebten Natur für sehr kleine Lebewesen und deren Lebensweise entwickelte Strukturen nicht beliebig vergrößert

und in die Technik übertragen werden. Technische Apparate sollen oft ganz andere Aufgaben erfüllen. Mit den viel größeren Dimensionen ändern sich physikalische Eigenschaften oft grundlegend, so daß manche überhaupt nicht übertragbar sind. Trotzdem bleibt die ungeheure Vielfalt der Natur. Daraus Ideen zu schöpfen muß den Fachleuten vorbehalten bleiben.

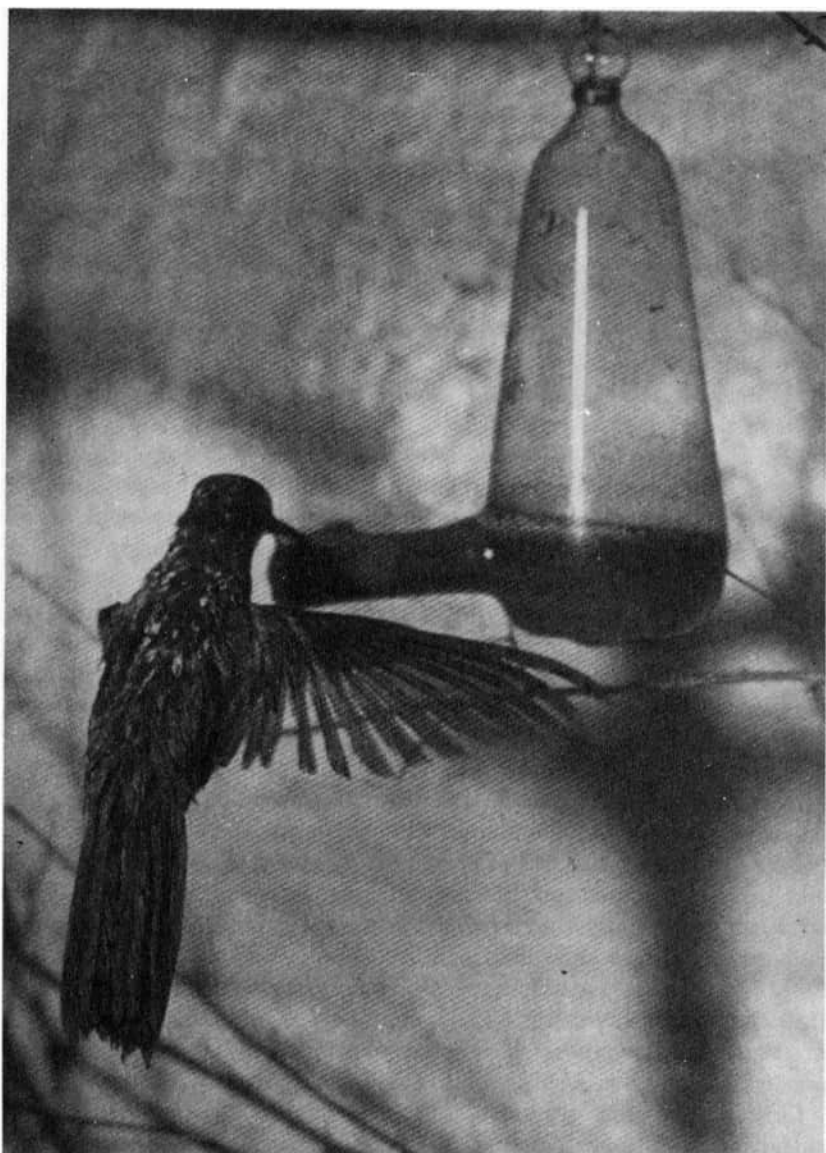
Flugleistungen der Tiere

Die Flugleistungen von Vögeln und Insekten sind auch im Zeitalter der Düsenflugzeuge noch bemerkenswert. Viele sind noch nicht einmal genau bekannt oder umstritten. Messungen von tierischen Fluggeschwindigkeiten sind sehr schwierig auszuführen, da die Tiere — insbesondere Insekten — selten eine längere Strecke mit höchster Kraft geradeaus fliegen.

Von Hirschbremsen ging das Gerücht um, sie könnten mit Überschallgeschwindigkeit fliegen. Diese Meldung hielt aber genauen Nachprüfungen bei weitem nicht stand. Die höchsten Fluggeschwindigkeiten von Hirschbremsen und großen Libellen liegen über 60 km/h, die von Honigbienen bei 30 km/h. Schwalben und Mauersegler schaffen 120 bis 140 km/h, etwa ebensoviel Wildenten und Kolibris. Die normalen beobachtbaren Fluggeschwindigkeiten liegen niedriger. Vergleicht man die Geschwindigkeiten von Tieren und Maschinen nach Körperlängen pro Sekunde, so liegen die Werte für die meisten Vögel und Insekten über denen eines Düsenjägers, der mit einfacher Schallgeschwindigkeit (330 m/s) fliegt.

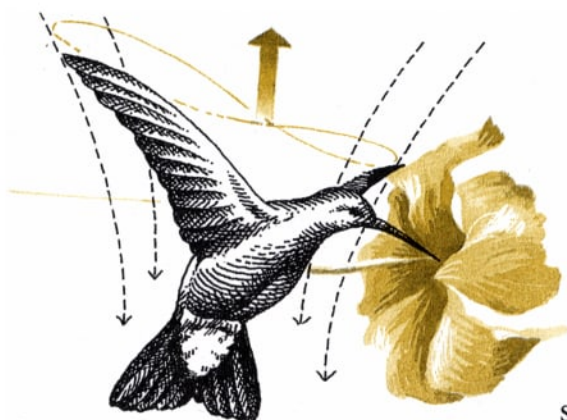
Bei diesen und folgenden Vergleichen ist allerdings zu beachten, daß die unterschiedlichen Größen der Tiere und der Flugmaschinen nicht dazu verleiten dürfen, alle tierischen Leistungsgrößen ohne weiteres auch als technisch mögliche Ziele anzusehen. Zwischen Körpergrößen und Flugleistungen existieren verschiedene physikalisch bedingte Relationen, die kein Erfinder außer Kraft setzen kann. So steigt mit zunehmender Größe des Flugkörpers die Flächenbelastung der Tragflächen, ebenso die aufzubringende Hubleistung pro Kilogramm. Zum Beispiel beträgt die Tragflächenbelastung bei der Libelle Anisoptera 0,4 kg/m², bei einem Kolibri schon 2,5 kg/m² und bei einem Hubschrauber etwa 200 kg/m².

Die enorme Leistungsfähigkeit tierischer Flieger offenbart sich besonders deutlich im Vogelzug. Die Flugstrecken, die die Vögel insgesamt und pro Tag zurücklegen, sind recht unterschiedlich. Bei Flügen über Land suchen sie oft nebenbei noch Futter, was natürlich die Tagesstreckenleistungen mindert. So legen Singvögel etwa 60 km pro Tag zurück. Störche schaffen zwischen 150 und 200 km am Tag. Die schnellfliegenden Schnepfen erreichen 500 km pro Tag. Die Bachstelzen überqueren bei ihrem Zug über



Kolibri

das Mittelmeer 450 km. Kolibris fliegen 800 km über den Golf von Mexiko. Falken überwinden 3000 km offenes Meer. Der sibirische Goldregenpfeifer gar fliegt in 35 bis 45 Stunden 4000 km von Alaska nach Hawaii.



Schwirrflug des Kolibri

Die Flughöhen des Vogelzuges liegen meist bei Werten bis zu 500 m. Es gibt aber auch Vögel, die viel höher fliegen. Mauersegler wurden in Gebirgen in Höhen bis zu 4700 m beobachtet. Sie fliegen dabei manchmal 1000 km am Tag. Wildgänse sollen sogar in Höhen bis zu 10 000 m ziehen.

Noch erstaunlicher sind die Flugleistungen mancher Insekten. Die Wanderheuschrecke überfliegt in 20 Stunden fast 350 km. Der Monarch, ein Wanderfalter, fliegt bis zu 650 km weit. Er überquert mit Rückenwind sogar den Atlantik auf einer Strecke von rund 6000 km ohne Nahrungsaufnahme.

Die lange Strecken fliegenden Insekten und Vögel wandeln überwiegend Fette in Muskelenergie um. Diese Fette besitzen etwa den gleichen Energieinhalt wie Benzin. Die Wanderheuschrecke *Schistocerca* z. B. verbraucht pro Flugstunde 10 bis 20 mg (0,8%) ihres Körpergewichts, Kolibris rund 0,13 g ihres Körperfettes. Das entspricht einer Energiemenge von 5 kJ. Sie erreichen damit eine Fluggeschwindigkeit von 80 km/h.

Zum Vergleichen kann man den Treibstoffverbrauch von technischen Flugkörpern, bezogen auf deren Gesamtgewicht, gegenüberstellen. Ein Hubschrauber verbraucht pro Flugstunde 2 bis 5% seiner Gesamtmasse an Treibstoff, ein Düsenpassagierflugzeug ungefähr 12%, ein Überschalljäger gar 36%. Er kann nur wenig mehr als eine Stunde in der Luft bleiben.

Größere Vögel bewegen ihre Schwingen relativ langsam, etwa so, wie auch der Mensch seine Arme bewegen könnte. Viele kleinere Vögel haben höhere Flügelschlagfrequenzen. Im Schwirrflug – mit den höchsten bei Vögeln auftretenden Flügelfrequenzen – können Kolibris sicher und mühelos vor Blüten in der Luft stehenbleiben.

Bei Insekten finden wir zwischen den langsamen Flugbewegungen der Falter und Flügelschlagfrequenzen bis zu 2000 Hz ein breites Spektrum.

Das Brummen der Hummeln, das Sirren der Mücken verraten uns ungefähr, wie schnell sich ihre Flügel bewegen. Ein Maikäfer macht z. B. etwa 240 Flügelschläge in der Sekunde.

Bei den relativ langsamen Flugbewegungen wird die Rhythmik der Muskelkontraktionen durch das tierische Nervensystem gesteuert. Die Teile der Flugmuskulatur erhalten die Kontraktionsimpulse aus Programmen, die im Zentralnervensystem gespeichert sind. Diese Programme sind ererbt, bei Vögeln aber durch Lernen und Training stark erweitert und verbessert worden. Kontraktionsfrequenzen über 10 Hz entstehen bei vielen Insekten ohne nervale Steuerung durch eine den Teilen der Flugmuskulatur selbst innewohnende Rhythmik (myogene Rhythmik). Vom Nervensystem geht nur ein Startbefehl aus. Die Flugmuskulatur, durch diesen angeregt, arbeitet dann mit einer ihr eigenen Frequenz vollständig koordiniert so lange, bis ein nervaler Stoppbefehl eintrifft. Nur die Zufuhr chemischer Energie zum Muskelapparat wird dann durch das Nervensystem gesteuert. Fliegen, Mücken, Bienen und andere Insekten können ihren Flug steuern, aber nur in engen Grenzen ihre Flügel schneller oder langsamer bewegen.

Bei der mechanischen Verformung der elastischen Strukturen des Tierkörpers wird vorübergehend Energie gespeichert und bei der Gegenbewegung wieder freigegeben. Bei Insekten ist eine elastische Verformung des gesamten Brustaußenpanzers mit der Flügelbewegung verbunden. Der Tierkörper kann mit einer Spiralfeder verglichen werden, die zwischen Druck- und Zugspannung hin- und herpendelt. Bei der Wüstenheuschrecke pendeln so während des Fluges 86% der Energie hin und her.

Interessante Versuche führte W. Nachtigall zum Studium des Insektenfluges durch. Er untersuchte z. B. den Flug der Stubenfliegen. Zu diesem Zwecke klebte er Fliegen so an ein Waagensystem, daß diese in einem Windkanal »fliegen« konnten und sich dabei ihr Flugverhalten messend verfolgen ließ. Er fand unter anderem, daß eine Stubenfliege mehrere Stunden ohne Ruhepause fliegen kann. Die Versuchsfliegen ließen sich durch einen Tropfen Zuckerlösung regelrecht »auftanken« und setzten danach ihren Flug unvermindert fort.

Die Beispiele ließen sich noch fortsetzen. Die Natur ist voll solcher erstaunlicher Beispiele, die oft erst durch schwierige Forschungsarbeiten sichtbar werden. Besonders faszinierend sind die Orientierungsleistungen vieler Tiere, auf die wir im nächsten Kapitel eingehen werden.

Modelle, Testfahrzeuge und Variationen

Viele Erkenntnisse über Flug- und Schwimmkörper, deren Strömungswiderstände und andere Eigenschaften im strömenden Medium lassen sich

auch auf Landfahrzeuge anwenden. Man kann so für die strömungsge-
rechte Formgebung von Kraftfahrzeugkarossen wertvolle Konstruktions-
prinzipien ableiten, die zu Einsparungen an Antriebsenergie führen, aber
außerdem auch die Fahrsicherheit erhöhen.

Seit vielen Jahren arbeitet die Fahrzeugentwicklung mit Testfahrzeugen
und mit Modellen im Windkanal, um Probleme zu lösen. Je höher die Ge-
schwindigkeiten werden, die Fahrzeuge zu leisten imstande sind, um so
stärker treten Strömungseffekte in Erscheinung, etwa energiezehrende Wir-
belbildungen an vorspringenden Kanten, Instabilitäten bei Seitenwind
oder Stau der Luftströmung mit starker Erhöhung des Luftwiderstandes.
Das gleiche gilt natürlich erst recht für Flugzeuge.

Die Theorie der Strömung gestattet exakte Berechnungen nur für stark
idealisierte Profile und Körper. Selbst wenn große Computer eingesetzt
und sehr umfangreiche Rechenprogramme mit ihrer Hilfe durchgeführt
werden, gelingt es nicht, so komplizierte Aufgaben wie die Strömung um
einen Körper mit besonderen Oberflächenstrukturen (Schuppenflügel vie-
ler Insekten) oder um einen Körper mit nichtstarrer Oberfläche (Delphin-
haut) zu bewältigen. Das Probieren mit Modellkörpern und Testfahrzeugen
bzw. Testflugzeugen, ausgerüstet mit zahlreichen Meßgeräten, ist deshalb
bisher der einzige reale Weg geblieben, der Fahrzeug- und Flugzeugent-
wicklern zur Verfügung steht.



Überschall-Verkehrsflugzeug TU 144 beim Start

Um nicht den Eindruck zu erwecken, die Grundlagenforschung über Strömungen sei überhaupt nutzlos, sei daran erinnert, daß sie immerhin die Grundformen der laminaren und der turbulenten Strömung erkannt, die Wirbelbildung erforscht oder Grundgrößen strömender Medien, wie deren innere Reibung, verständlich gemacht hat. In der praktischen Anwendung geht es allerdings um so spezielle Formen, daß die Theorie überfordert wird.

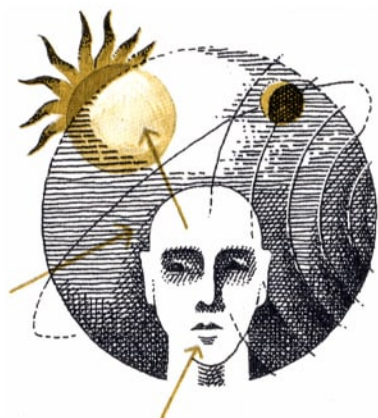
Nun ist, verglichen mit der Zahl der Variationen, die Fahrzeug- und Flugzeugbauer in einigen Jahrzehnten testen konnten, die Zahl der Variationen in der Natur im Laufe der Entwicklung all der vielen Arten ungleich größer, ihre Optimierung viel feiner und länger erprobt. Dies macht die Gebilde der Natur, wie Flugsamen, die Tausende von Insektenarten oder Vögeln, zu einer Fundgrube für den Forscher und Konstrukteur.

Natürlich hat er dabei zu beachten, daß Geschwindigkeiten, Größenverhältnisse bzw. Materialien nicht gleich sind. Das führt zwangsläufig zu einer Reihe von Einschränkungen für die Verwertbarkeit natürlicher Vorbilder, die ja für ihre Lebensverhältnisse optimal entwickelt sind. Zu diesen gehört nicht nur das Schwimmen oder Fliegen, sondern ihre gesamte Existenz und die Erhaltung ihrer Art.

Andererseits wird sich die technische Entwicklung des Verkehrswesens vor immer neue Fragen gestellt sehen, für deren Lösung die ungeheure Vielfalt der Natur als »Nachschlagewerk« zur Verfügung steht.

6. Kapitel

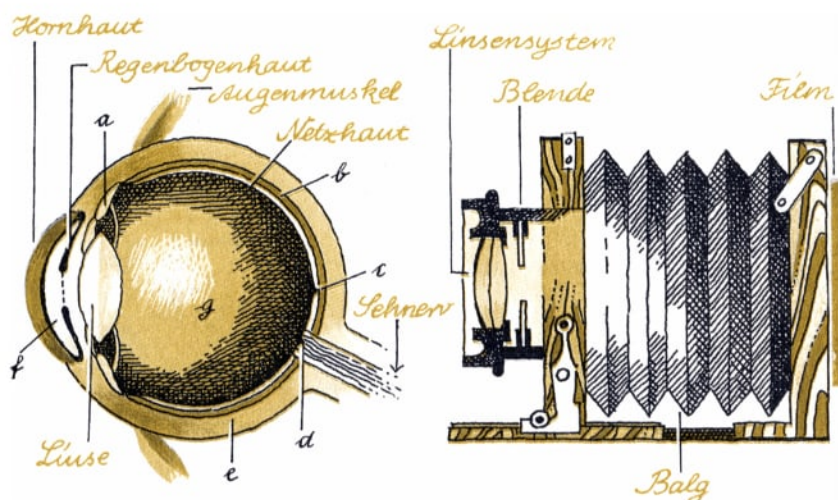
Orientierung im Lebens- raum



Vom inneren Bild der Außenwelt

Menschen und Tiere nehmen Existenz und Veränderungen ihrer Umwelt durch Sinnesorgane wahr. Die Empfangsteile, bei Wirbeltieren z. B. Auge, Ohr und Nase, sind hochleistungsfähige Organe, aufgebaut aus spezialisierten Zellen, die sich im Laufe der Stammesgeschichte so entwickelt haben, daß sie der Lebensweise des betreffenden Wesens optimal angepaßt sind, wie wir das in allen Bereichen der belebten Natur finden. Die Rezeptoren eines Sinnesorgans, z. B. die Stäbchen und Zapfen im menschlichen Auge oder die Tastrezeptoren in der Haut, stellen extrem empfindliche Mikroempfänger für spezifische Reize aus der Umwelt dar. Die spezifischen Reize, z. B. Licht für das Auge oder Schallwellen für das Ohr, werden in den Rezeptoren in elektrische Erregung transformiert. Diese wird über nachgeschaltete Nervenbahnen zum Zentralnervensystem geleitet. Am Zustandekommen der eigentlichen Sinnesempfindungen sind bestimmte Teile des Zentralnervensystems beteiligt, in denen die Informationsgehalte, die in den empfangenen und transformierten Reizen enthalten sind, verarbeitet werden. Ein Sinnesorgan, z. B. das Seh- oder das Hörorgan, umfaßt außer dem Empfangsorgan auch diese speziellen Teile des Zentralnervensystems.

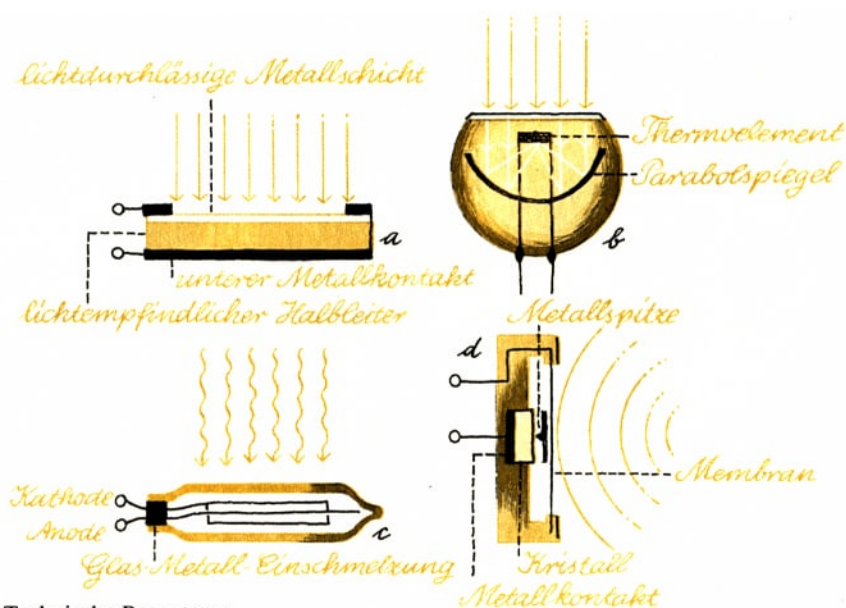
Seit einer Reihe von Jahren beschäftigen sich Forschergruppen in ver-



Menschliches Auge und seine technische Nachbildung: die fotografische Kamera
a Ziliarkörper b Aderhaut c Fovea centralis d Sehnervtritt
e Lederhaut f vordere Augenkammer g Glaskörper

schiedenen Ländern intensiv mit der Frage, wie diese Informationsverarbeitung in einem Sinnesorgan vor sich geht. Ziele solcher Forschungen werden nicht nur um der reinen Erkenntnis willen betrieben, sondern man hat klare technische Anwendungen im Auge, z. B. die Probleme der maschinellen Zeichenerkennung und der automatischen Bildauswertung. Man möchte Maschinen konstruieren, die gesprochenen Text schreiben oder in eine andere Sprache übersetzen können, oder Geräte, die Filmaufnahmen oder Radarschirmbilder bewerten können. Die technische Bedeutung von Maschinen, die solche Leistungen vollbringen würden, ist leicht einzusehen. Wir werden auf Beispiele später noch eingehen. Bisher haben Versuche, derartige Maschinen zu bauen, gezeigt, daß wir mit unseren technischen Möglichkeiten noch weit davon entfernt sind, Apparate zu schaffen, die annähernd dasselbe leisten könnten wie das Seh- oder das Hörorgan des Menschen.

Der Mensch hat sich ein umfangreiches Arsenal von hochempfindlichen Meßgeräten geschaffen, mit denen er – weit über die Empfindungsbereiche seiner Sinnesorgane hinaus – Informationen aus seiner Umwelt gewinnen kann. Mit Radioteleskopen werden Sternsysteme, die Millionen Lichtjahre entfernt sind, erforscht. Die Forschungsapparaturen der Kernphysik lassen uns den inneren Bau der Atomkerne erkunden. Mit Licht-, Röntgen- und Elektronenstrahlen dringen wir bis in den Feinbau der Moleküle vor und erforschen die Funktionen lebender Zellen. Wir haben in der Festkörperphysik mikroskopische Dimensionen so zu beherrschen gelernt, daß wir



Technische Rezeptoren

- a Fotoelement b Thermoelement c Zählrohr für Gammaquanten
d Kristallmikrophon

in der Mikroelektronik beispielsweise in großem Umfang Produkte erzeugen können, deren feine Strukturen mit bloßem Auge nicht mehr zu erkennen sind.

Aber alle unsere Meßgeräte liefern nur Momentaufnahmen aus der materiellen Welt und transformieren sie in eine für unsere Sinnesorgane wahrnehmbare Form. Sie signalisieren, fixieren und registrieren. Das Erkennen all dieser Signale jedoch bleibt dem sachkundigen Menschen überlassen.

Der Prozeß des Erkennens bestimmter wichtiger Informationen aus einer großen Zahl unwichtiger Ballastinformationen, z. B. das Unterscheiden bewegter Objekte auf einem Radarschirm von Reflexionen, die von Wolken stammen, beruht auf der Erfahrung des Beobachters. Dies gilt für jede Art des Erkennens einer Information. Die Informationsverarbeitung im zentralen Teil eines Sinnesorgans besteht darin, die aufgenommenen Signale – Geräusche, Bilder oder Gerüche – mit ähnlichen, früher empfangenen, im Gedächtnis gespeicherten zu vergleichen und dadurch wiederzuerkennen. Wir erinnern uns dann an die früher erfahrene Bedeutung und verknüpfen (assoziiieren) die neue Information mit dieser Bedeutung.

Begegnen wir uns unbekannten Erscheinungsformen in der Außenwelt, so geben wir dem Unbekannten versuchsweise eine Bedeutung, bestimmen danach unser Verhalten und prüfen die Resultate. Je nachdem, wie diese



Das scharfe Auge des Seeadlers . . .

Junger Uhu – seine Augen sehen nachts sich bewegende Kleintiere zwischen Gräsern und Moosen



Prüfung ausfällt, ob sie das Vermutete bestätigt oder widerlegt, behalten oder korrigieren wir die erste Deutung. Auf diese Weise sammeln wir Erfahrungen. Die Gesamtheit aller gespeicherten Erfahrungen ergibt gewissermaßen ein inneres Bild der Außenwelt, das durch Lernen fortgesetzt erweitert und vervollkommen wird, indem jede neu aufgenommene Information dieses innere Bild bestätigt oder korrigiert und damit verbessert.

Auch jedes Tier besitzt ein inneres Bild der äußeren Welt. Nur wird sich dieses von Art zu Art mehr oder weniger stark unterscheiden, bei niederen Arten weniger umfangreich, weniger differenziert und immer der Daseinsform des betreffenden Wesens adäquat sein. Nach dem inneren Bild der Außenwelt erfolgt mit Hilfe der Sinnesorgane die Orientierung im Lebensraum, die schließlich die Verhaltensweisen in den jeweiligen Situationen bestimmt.

Will man nun Maschinen konstruieren, die Informationen bestimmter Art nicht nur als Meßgrößen aufnehmen, sondern die diese nach bestimmten Regeln unterscheiden, erkennen und bewerten sollen, so müssen solche Maschinen auch so etwas wie ein inneres Bild des zu bearbeitenden Teils der Außenwelt gespeichert enthalten, das aus Mustern, Auswahlvorschriften oder Maßstäben besteht, nach denen erkannt und bewertet werden soll. Eine lernfähige Maschine wäre natürlich die am weitesten reichende technische Lösung. Wir werden darauf im 7. Kapitel zurückkommen. Aber Maschinen mit fest vorgegebenem Programm (innerem Bild) sind schon in der Lage, Aufgaben der genannten Art zu bewältigen, vorausgesetzt, dieses innere Programm ist richtig und ausreichend.

Es ist z. B. schon gelungen, Automaten zu bauen, die genormte Blockschrift lesen. Dagegen scheint es noch ein weiter Weg zu sein, Maschinen zu schaffen, die Schreibschrift oder auch nur unterschiedliche Drucktypen verarbeiten können. Ähnlich ist die gegenwärtige Situation bei anderen Problemen der maschinellen Zeichen- und Bilderkennung. Das ist der Grund, weshalb nicht nur Verhaltensforscher und Physiologen, sondern auch Spezialisten der Informationstechnik stark an allen Formen biologischer Kommunikation und Informationsverarbeitung interessiert sind. Die biologischen Vorbilder allein können Auskunft geben, wie die Leistungen der Auswahl bestimmter Informationen aus einem größeren Informationsangebot zustande kommen und zum Erkennen wesentlicher unter vielen unwesentlichen Inhalten führen.

Die biologische Informationsverarbeitung beginnt bereits in den Rezeptoren selbst und setzt sich in nachgeschalteten Schichten von Nervenzellen (Neuronen) fort. Die verschiedenen Rezeptoren der Sinnesorgane stellen auch als Meßsonden für spezifische physikalische Größen interessante Forschungsobjekte dar. Wir werden sehen, daß sie meist extrem hohe Empfindlichkeiten besitzen, z. T. ihre Empfindlichkeitsbereiche verändern kön-

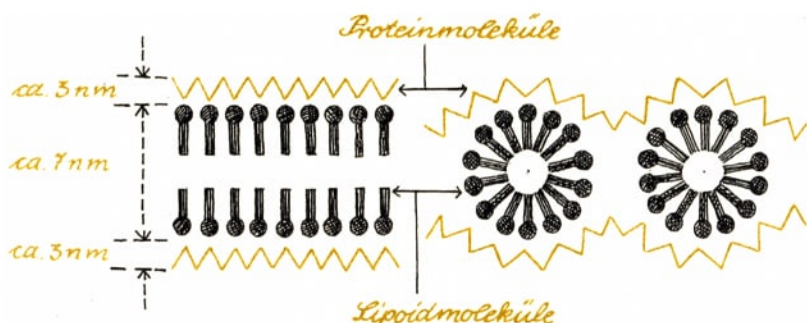
nen und, verglichen mit technischen Elementen, um Größenordnungen kleiner sind, aber auch viel weniger Leistung verbrauchen und dabei mit hoher Zuverlässigkeit arbeiten. Alle diese Eigenschaften werden von der modernen Meßelektronik angestrebt. Natürlich wird man biologische Rezeptoren nicht nachbauen wollen. Einerseits würde dies möglicherweise nicht gelingen, andererseits besitzen sie, vom Standpunkt des Technikers gesehen, auch Nachteile, z. B. das Ermüden. Trotzdem können wir in den biologischen Vorbildern Prinzipien der Struktur, der Funktion sowie der Organisation erkennen, die zu zukünftigen technischen Lösungen führen oder zumindest dazu beitragen können.

So finden wir bei vielen Tieren verblüffende Orientierungsleistungen, teilweise durch Sinnesorgane, die der Mensch nicht besitzt. All das ist Grund genug, um die Bereiche der Sinnesempfindungen und der biologischen Informationsverarbeitung als weites, fruchtbares Feld für die Suche nach neuen technischen Möglichkeiten in Betracht zu ziehen.

Miniaturreißsonden der Lebewesen

Gemessen an den Spitzenerzeugnissen der Mikroelektronik, ja selbst an deren optimistischen Zielsetzungen für Entwicklungen der kommenden Jahre, auf Halbleiterplättchen (Chips) von $5 \times 5 \text{ mm}^2$ bis zu einer Million Bauelemente unterzubringen, sind die biologischen Elemente der Informationsaufnahme und -verarbeitung noch wesentlich kleiner. In der Netzhaut des Sperlingsauges findet man rund 400 000 Lichtrezeptoren pro mm^2 , im Auge einer Krähe sogar 1 000 000 pro mm^2 . Das sind noch nicht einmal alle Elemente, denn dazu kommen weitere Schichten von Nervenzellen in der Netzhaut, die die optischen Informationen in ersten Stufen verarbeiten.

In allen tierischen Sinnesorganen finden wir fast unvorstellbar kleine Licht-, Schall- und Geruchsrezeptoren, ferner Rezeptoren für Druck, Wärme, mechanische Schwingungen, Ultraschall und elektrische Felder, dazu im Körperinnern spezielle Chemorezeptoren zur Überwachung der Körperfunktionen. Insbesondere bei Insekten besitzen die Sinneszellen solch eine Winzigkeit, daß Wissenschaftler bei der Erforschung dieser Strukturen das Äußerste an präparativer Technik aufbieten müssen, um Resultate zu erzielen. Dabei erreichen diese Rezeptoren meist das physikalisch absolut mögliche Minimum der spezifischen Nachweisgrenzen. Die Lichtrezeptoren (Stäbchen) des menschlichen Auges sprechen schon auf ein einziges Lichtquant an. Viele Geruchsrezeptoren – Beispiele werden wir noch kennenlernen – reagieren schon auf ein einzelnes Molekül. Mechanorezeptoren mancher Tiere machen noch Schwingungsamplituden vom Durchmesser eines Atoms empfindbar.



Modelle für den molekularen Aufbau von Zellmembranen

links: Lipiddoppelschicht mit nach außen gerichteten Phosphatgruppen

rechts: Globuläre Anordnung der Lipoidmoleküle

Soweit es nur die Empfindlichkeitsgrenzen betrifft, hat die Meßtechnik derartige Spitzenleistungen wenigstens z. T. ebenfalls erreicht. Es gibt aber auch Bereiche, wo sie noch weit davon entfernt ist. Die Natur hat für die Meßsonden der Lebewesen ein Prinzip entwickelt, das wir in fast allen biologischen Rezeptoren wiederfinden. In sämtlichen Zellen – nicht nur in Rezeptorzellen – treten Membranen auf, etwa 10 nm dicke oder noch dünnere häutenähnliche Gebilde, die innerhalb der Zelle bestimmte Reaktions- oder Funktionsbereiche von anderen abgrenzen.

Es ist gelungen, mit besonderen Präparationsmethoden in hochauflösenden Elektronenmikroskopen Membranstrukturen im Querschnitt sichtbar zu machen. Darauf aufbauend, wurden mehrere Membranstrukturmodelle entwickelt, die sich untereinander hauptsächlich durch die Molekülanordnungen innerhalb einzelner Schichten unterscheiden. Man nimmt an, daß die Membranen aus drei Schichten bestehen. Die mittlere Schicht ist eine orientierte Doppelschicht aus Lipoidmolekülen. (Lipoide sind fettähnliche Stoffe.) Die Lipoidmoleküle enthalten Phosphatgruppen, die nach außen gerichtet sind. Die beiden äußeren Schichten der Membran sind dünner als die mittlere und bestehen aus Proteinmolekülen. Die biologischen Membranen verschiedener Zellen und Zellteile unterscheiden sich sehr wahrscheinlich und sind eben dadurch zu unterschiedlichen Funktionen befähigt.

Die Rezeptorzellen besitzen nun spezielle Membranen, an denen bei Einwirken eines äußeren (spezifischen) Reizes eine elektrische Potentialänderung entsteht. Damit wird der spezifische Reiz in elektrische Erregung umgewandelt.

Die ältesten Rezeptoren im Stammbaum der Lebewesen sind wohl Chemorezeptoren und Mechanorezeptoren. Beide Grundtypen finden wir in

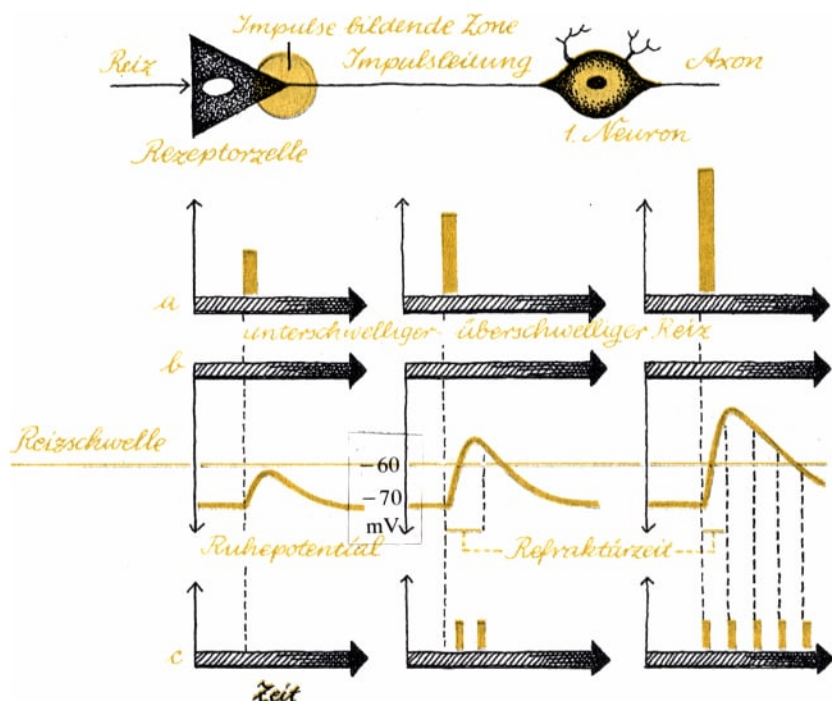
großer Vielfalt. Lichtrezeptoren können als auf besondere Sehstoffe spezialisierte Chemorezeptoren aufgefaßt werden. Die Rezeptoren des Wirbeltierinnenohres und des Gleichgewichtsorgans sind im Grunde Mechanorezeptoren. Es gibt auch Rezeptoren, deren Funktionsweise noch nicht aufgeklärt ist. Man nimmt aber an, daß das Entstehen einer elektrischen Potentialänderung zwischen beiden Seiten der Rezeptormembran eine allgemeine Prinziplösung der Natur zur Transformation äußerer Reize in elektrische Erregung ist. Dasselbe Prinzip des Membranpotentials ist in abgewandelter Form auch in Nervenzellen und Nervenbahnen wirksam.

Vom Standpunkt der gegenwärtigen Kenntnisse läßt sich eine Übertragung dieses Prinzips in die Technik nicht absehen. Man hat beachtliche Parallelen zwischen der biologischen, elektrisch aktiven Membran und dem Halbleiter-pn-Übergang gezogen, ohne indessen daraus wesentliche neue Ideen ableiten zu können. Es ist offensichtlich verfrüht, aus den bekannten Fakten schon Schlußfolgerungen ziehen zu wollen. Vielmehr ist es sehr wohl möglich, daß weitere intensive Erforschung der Rezeptoren neue Perspektiven eröffnet.

Die vorliegenden Resultate über das Entstehen der elektrischen Potentialdifferenzen an biologischen Membranen sind schon recht umfangreich. Wir wollen sie hier kurz zusammenfassen.

Zu beiden Seiten einer biologischen Membran befinden sich bewegliche Ionen verschiedener Art. In Nerven- und Rezeptorzellen spielen Kalium- und Natriumionen eine besondere, wichtige Rolle, die von den englischen Forschern Hodgkin und Huxley 1939 aufgeklärt werden konnte. Es treten aber neben diesen eine Reihe anderer Ionen auf, z. B. Chlorionen und an größere Eiweißkomplexe gebundene Ionen. Die Membran hindert die beweglichen Ionen, sich vollständig zu durchmischen. Über dieses passive Verhindern des Stoffaustausches hinaus besitzt die Membran aber wesentliche weitere Eigenschaften. Sie befördert bestimmte Ionensorten immer wieder auf eine Seite, sie pumpt sie gewissermaßen gegen das Konzentrations- und Potentialgefälle, das zwischen beiden Seiten der Membran herrscht. Auf diese Weise entsteht über der Membran der Rezeptorzelle eine elektrische Potentialdifferenz (Ruhepotential) von einigen 10 mV. Arbeitsspannungen in modernsten Schaltkreisen der Mikroelektronik liegen bei einigen Volt, sind also mindestens 100mal so groß.

Ein spezifischer Reiz, etwa ein Fremdmolekül, das eine Riechzelle erreicht, eine Schallschwingung, die die Sinneshärcchen der Schallrezeptoren verbiegt, oder einige Lichtquanten, die die Sehpurpurmoleküle einer Lichtrezeptorzelle treffen, verändern die Ionendurchlässigkeit der Rezeptormembran. Das Ruhepotential über der Membran bricht zusammen und schwingt in ein entgegengesetztes Aktionspotential um, das um so höher ausfällt, je stärker der erregende Reiz ist. Hört die Reizwirkung auf, so fällt



Rezeptorpotential und Impulsfrequenz in der erregungsleitenden Nervenfasern
a Reizstärke b Rezeptorpotential c fortgeleitete Impulse

das Aktionspotential innerhalb von weniger als 1 ms wieder ab, und die Membran baut das ursprüngliche Ruhepotential wieder auf.

Die Fortleitung des empfangenen und in elektrische Erregung umgewandelten Signals wollen wir später betrachten, denn damit beginnt bereits die Informationsverarbeitung. Eine wichtige Eigenschaft sei aber hier schon genannt: Die Fortleitung erfolgt nur, wenn die elektrische Erregung einen bestimmten Schwellwert überschreitet. Folglich muß auch der spezifische Reiz überschwellig sein, wenn es zu einer Reizfortleitung kommen soll.

Bei Dauerreizung verringert sich die Rezeptoraktivität. Der Rezeptor paßt sich innerhalb weiter Grenzen an verschiedene Reizstärken an. Diese Anpassung (Adaptation), technisch als automatische Meßbereichseinstellung zu sehen, verhindert eine Informationsüberflutung des Zentralnervensystems. Da immer Bewegungen und Veränderungen in der Umwelt für Lebewesen von Interesse sind, gleichbleibende Zustände dagegen weniger Beachtung beanspruchen, finden wir insgesamt bei tierischen und menschlichen Sinnesorganen und deren Rezeptoren höchste Empfindlichkeit und

Spezialisierung auf solche Veränderungen, dagegen geringere Leistungen bei Empfang und Verarbeitung von Dauerreizen. Rezeptoren sind daher im Sinne von Sensoren, die Absolutwerte messen, keine guten Vorbilder der Technik. Ihr meist sehr breiter Meßbereich und ihre große Adaptationsfähigkeit werden in der Natur um diesen Preis erkauft.

Dennoch ist es interessant und lohnend, Vielfalt und Leistungen biologischer Rezeptoren zu studieren, zumal die für die Technik der Zukunft unumgebar vorbildhafte Informationsverarbeitung in Sinnesorganen bereits in den Rezeptoren beginnt.

Lichtrezeptoren

Im menschlichen Auge finden wir zwei Typen von Lichtrezeptoren – Stäbchen und Zapfen. Die schon auf ein bis zwei Lichtquanten ansprechenden Stäbchen vermitteln nur das Hell-Dunkel-Sehen. Sie besitzen einen Durchmesser von etwa 2,5 μm . Mehr als hundert von ihnen zusammengebündelt, ergäben erst die Dicke eines Kopfhaares.

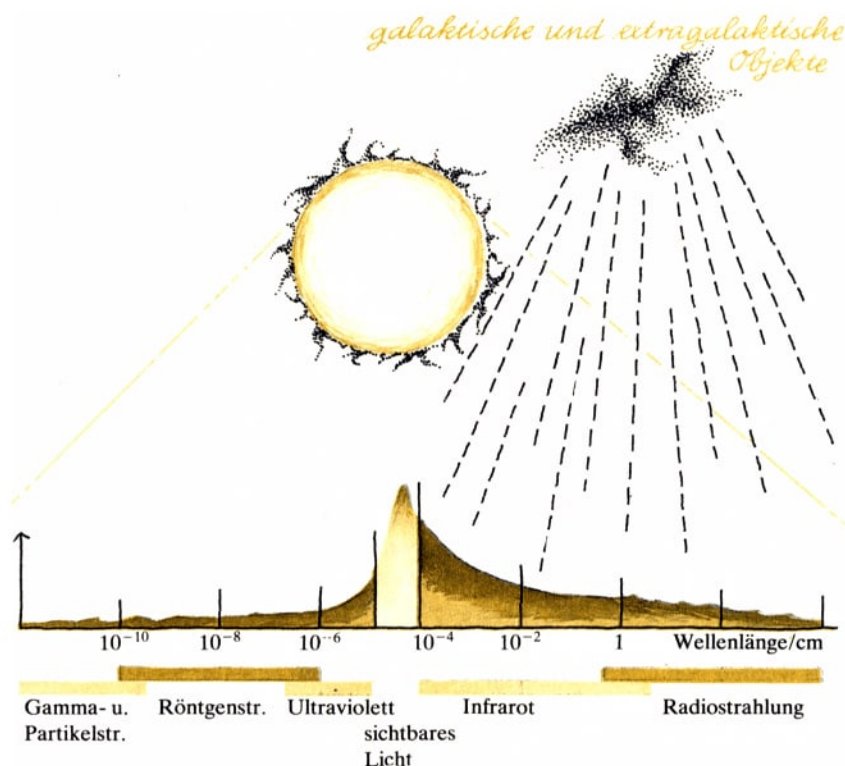
Die aufgefangene Lichtenergie wird in einem Stäbchen bei der Transformation in elektrische Energie um einen Faktor von 10^7 bis 10^8 verstärkt. Das geschieht ungefähr auf die folgende Weise. Eingefangene Lichtquanten werden von den Molekülen eines besonderen Sehstoffes im Rezeptor, Sehpurpur oder Rhodopsin genannt, absorbiert. Die Rhodopsinmoleküle erfahren dadurch eine chemische Veränderung. Dieser Prozeß konnte weitgehend erforscht werden. Als Folge der Lichtabsorption kommt eine zyklische Reaktion (Sehpurpurzyklus) in Gang, in deren Umlauf mit Hilfe des Stoffwechsels der Sehzelle die Rhodopsinmoleküle wiederhergestellt werden.

Weniger gut ist bekannt, in welcher Weise im Verlauf dieser chemischen Prozesse die elektrischen Veränderungen an der Rezeptormembran vor sich gehen, die man als Aktionspotential, wie im vorangegangenen Abschnitt kurz beschrieben, beobachten und messen kann.

Die etwas dickeren Zapfen vermitteln das Farbsehen. Ihre Empfindlichkeit ist etwas geringer. Sie enthalten anstelle des Rhodopsins andere, in speziellen Farbbereichen absorbierende Photopigmente.

Die Fähigkeit, Farben zu unterscheiden, ist nur bei wenigen Tieren vorhanden. Die meisten Säugetiere, z. B. Mäuse, Katzen, Hunde und Rinder, sind farbenblind. Farbempfindliche Lichtrezeptoren besitzen z. B. Menschenaffen, Tintenfische und viele Insekten.

Der Mensch empfindet elektromagnetische Strahlung der Wellenlängen um 670 nm ($1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$) als dunkles Rot, etwa 460 nm als Violett, die dazwischenliegenden Wellenlängen als helleres Rot, Orange, Gelb, Grün



Strahlungsspektrum der Sonne und anderer kosmischer Objekte

und Blau. An diesen relativ engen Bereich schließen sich die weiten Bereiche der nicht mehr sichtbaren Strahlung des Infraroten und des Ultravioletten an. Die Empfindlichkeit der Farbrezeptoren ist im Gelbgrünen am größten und nimmt zum roten und zum violetten Ende des sichtbaren Spektrums hin ab. Das Empfindlichkeitsmaximum im Gelbgrünen entspricht dem Maximum der spektralen Energieverteilung des Sonnenlichts und ist eine Folge der stammesgeschichtlichen Anpassung. Diese Anpassung hat bei farbsehenden Tieren mitunter zu anderen Ergebnissen geführt, die deren Lebensbedingungen besser entsprechen. So ließ sich mit Dressurexperimenten feststellen, daß Bienen Strahlung mit Wellenlängen von etwa 650 bis 300 nm als Licht wahrnehmen. Sie sehen also noch dort, wo für den Menschen schon der ultraviolette Bereich begonnen hat. Dadurch vermögen sie – so nimmt man jedenfalls an – die farbigen Blüten zwischen den Blättern der Bäume und Sträucher und inmitten der Gräser leichter zu unterscheiden.

In der Netzhaut (Retina) des menschlichen Auges sind etwa 7 Mill. Zapfen und 120 Mill. Stäbchen vorhanden. Ihre Dichte beträgt ungefähr 150 000 pro mm^2 . In vielen Vogelaugen ist die Rezeptordichte noch höher, wie wir schon am Beispiel des Sperlings und der Krähe sahen. Der Durchmesser eines Lichtrezeptors im Krähenauge beträgt nur noch 1 μm .

Die hohe Rezeptordichte ergibt eine hohe Sehschärfe. Wenn ein Habicht aus 100 m Höhe eine 3 cm lange Maus erkennt, so besitzt sein Auge das gleiche Auflösungsvermögen wie die Fotoplatte in der Kamera eines Aufklärungsflugzeuges, auf der 3 m große Objekte, die aus 10 000 m Höhe aufgenommen wurden, noch zu unterscheiden sind.

Vergleichen wir die Mikrostrukturen der Netzhaut mit den neuesten Ergebnissen der Entwicklung von Bildaufnahmerröhren (Vidicons), so wird die große Überlegenheit der biologischen Apparate deutlich. Das Target (»die Netzhaut«) einer solchen Vidiconröhre besteht aus $6 \cdot 10^5$ bis $6 \cdot 10^6$ Siliziumfotodioden von je 0,15 bis 0,20 mm Kantenlänge und ist rund 100 cm^2 groß. Es arbeitet bei schwachem Tageslicht in überdachten Räumen und wird bei hellem Sonnenlicht nicht übersteuert. Das ist als großer Fortschritt gegenüber älteren Vidicons zu betrachten, die in Räumen nur mit künstlicher Beleuchtung arbeiten konnten.

Im Auge ist die 100fache Menge von Rezeptoren auf einem Fünfigstel der Fläche untergebracht. Die maximale Lichtempfindlichkeit der Stäbchen und Zapfen ist wesentlich größer als die der Fotodioden und stellt sich außerdem automatisch auf die vorhandene Helligkeit ein.

Etwas anders sind die Komplex- oder Facettenaugen bei Krebsen und Insekten aufgebaut. Sie bestehen aus vielen Sehkeilen (Ommatidien), bei einigen Libellenarten sind es bis zu 12 000, von denen jeder fünf bis acht Lichtrezeptoren enthält. Das räumliche Auflösungsvermögen der Komplexaugen ist wesentlich geringer. Insekten sehen also nicht sehr scharf. Nachgewiesen ist aber, daß sie ein höheres zeitliches Auflösungsvermögen besitzen. Bei Ameisen beträgt die Flimmerfrequenz (Lichtwechsel pro Sekunde, die noch als Flimmern wahrgenommen werden) ungefähr 70 Hz, beim Menschen maximal 35 Hz, bei Bienen und Libellen sogar 200 bis 300 Hz. Auch ihr Sehwinkel ist sehr groß und beträgt horizontal bis zu 200 Grad. Außerdem haben sie die Fähigkeit, Unterschiede im Polarisationsgrad des Lichts festzustellen. Fliegenden Insekten ermöglicht das Facettenauge eine Kontrolle der Flugrichtung. Man hat nach diesem Prinzip ein höchst einfaches Gerät für die Flugorientierung entwickelt, das die Drift eines Flugzeuges bei Seitenwind registriert. Ein solches Gerät besteht aus einer kleinen Gruppe von acht bis zwölf technischen Facettenaugen, die vom Flugzeug senkrecht nach unten gerichtet werden. Bei geradem Flug in Richtung der Längsachse des Flugzeuges müssen die Bilder der Landschaft achsenparallel an den Facettenaugen vorbeiziehen, bei seitli-

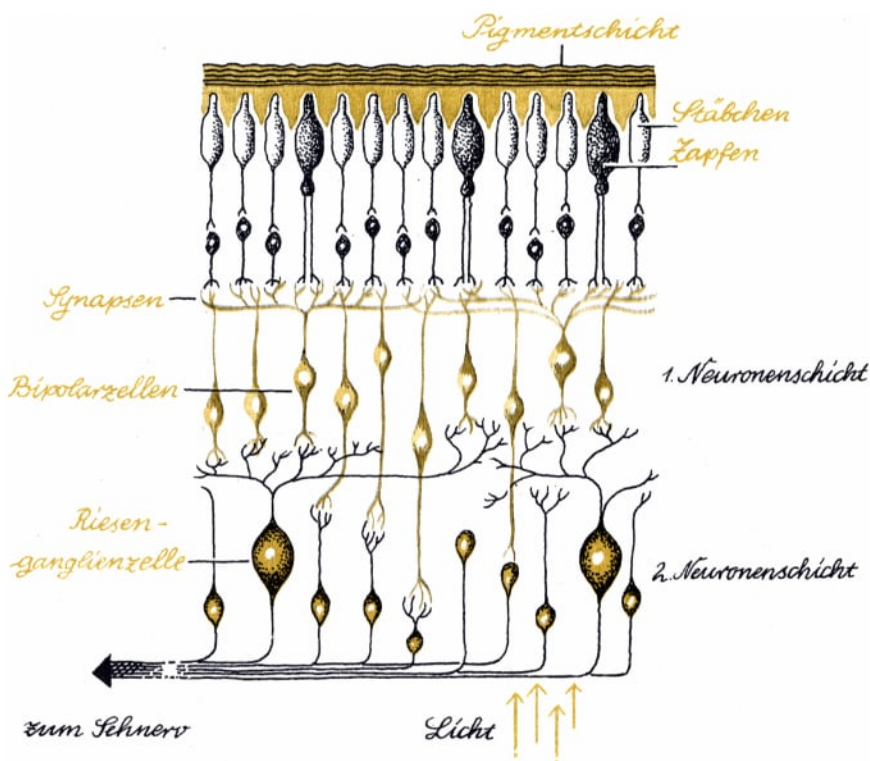
cher Drift dagegen in einem Winkel zur Körperachse. Natürlich kann ein solches Gerät nur bei genügend niedrig fliegenden Flugzeugen funktionieren. Es erspart dann aber Flug- und Windgeschwindigkeitsmessungen und erlaubt eine direkte elektrische Kopplung zur korrigierenden Steuerung.

Auf dem Wege zum Sehen mit elektronischen Augen

Eine Fernsehkamera vermittelt Bilder von einem Aufnahmeort an einen entfernten Empfangsort, wo sie auf einem Bildschirm sichtbar werden. Man könnte sagen: Das ist schon das Sehen mit elektronischen Augen. Dem ist aber nicht so! Die Leistungen eines tierischen oder menschlichen Sehorgans sind viel, viel größer. Die Fernsehbildübertragung vermittelt im Grunde nichts anderes, als ein System von Spiegeln auch leisten könnte — sie vermittelt Bildinformationen. Das Sehorgan dagegen ist ein Systemteil einer hochleistungsfähigen Informationsverarbeitung, in der wichtige Bildinformationen erkannt und von unwichtigen getrennt werden. Die aufgenommenen Bilder werden mit gespeicherten Bildinformationen verglichen, bewertet und ihrerseits gespeichert. Oft werden sie auch mit begleitenden Informationen — Geräuschen, Gerüchen u. a. — gekoppelt. Sie können vor allem Reaktionen des Gesamtsystems auslösen, etwa Befehlsimpulse an das Sinnesorgan zu erhöhter Empfangsbereitschaft oder an Bewegungsorgane zu Angriff oder Flucht. Elektronische Augen, die Ähnliches zu leisten imstande wären, müßten außer einem Bildaufnahmegerät (Fernsehkamera) eine informationsverarbeitende Elektronik mit ähnlichen Fähigkeiten enthalten. Die Forschung muß also damit beginnen, diese Informationsverarbeitung in den nachgeschalteten Neuronenschichten und Nervenzentren zu studieren.

Mit den Rezeptoren direkt verbunden sind relativ kleine Neuronen, sogenannte Bipolarzellen. Ihnen folgen größere Neuronen und Riesenganglienzellen. Außer den Fasern, die vertikal von den Rezeptoren über die Bipolarzellen und weiteren Schaltneuronen in den Sehnerv (Nervus opticus) laufen, existieren in den verschiedenen Neuronenschichten, die noch zur Netzhaut gehören, auch horizontale Verbindungen mit zwischengeschalteten Zellen, denen unter anderem auch eine Rückkopplungswirkung zu den Bipolarzellen zugeschrieben wird.

Diese Neuronenschichten ergeben für die den Lichtrezeptoren nachgeschalteten Neuronen eine Packungsdichte bis zu 10^5 Elementen pro mm^2 . In modernen Schaltkreisen der Mikroelektronik haben wir Bauelementedichten bis zu $5 \cdot 10^3$ pro mm^2 . Erhöhungen dieser Packungsdichten werden angestrebt und durch neue Technologien wahrscheinlich in Zukunft auch



Netzhaut mit Lichtrezeptoren und Neuronenschichten

erreicht. Diese werden dann aber immer noch beträchtlich unter denen der Neuronen liegen.

Untersuchungen an verschiedenen Tieraugen haben erste Hinweise über die Art der Informationsverarbeitung in der Netzhaut gegeben. Dabei wurden isolierte Augen in physiologischen Salzlösungen eine Zeitlang funktionsfähig erhalten. Mit sehr feinen Lichtbündeln wurden engbegrenzte Bezirke der Netzhaut erregt und die dabei auftretenden elektrischen Signale mit Mikroelektroden an verschiedenen Neuronen registriert. Auf diese Mikroelektrodenteknik, mit der man elektrische Potentialschwankungen an einzelnen Nervenzellen und Nervenfasern messen kann, werden wir im 7. Kapitel noch eingehen.

Aus derartigen Untersuchungen ergaben sich erste Anhaltspunkte für informationsverarbeitende Vorgänge in den Neuronenschichten der Netzhaut. Eines dieser Ergebnisse ist, daß an Hell-Dunkel-Grenzen offenbar eine Kontrastverstärkung stattfindet. Wahrscheinlich erfolgt in der Netz-

haut auch eine Informationsauswahl. Das auf den Augenhintergrund projizierte Bild wird nicht vollständig zum Sehzentrum übertragen, sondern nach Auswahlprinzipien, die lebenswichtige von unwichtigen Informationen trennen. So reagierten Frösche bei Versuchen mit künstlichen Fliegen, die sich vor einem fotografierten Hintergrund befanden, nie auf eine ruhende Fliege, jedoch sofort auf jede relative Bewegung, gleichgültig, ob die Fliege oder der Hintergrund bewegt wurde.

Das Froschauge ist in vieler Hinsicht ein relativ einfaches Untersuchungsobjekt. Kopf- und Augenbewegungen sind dem Frosch nicht möglich. Auf der Grundlage intensiver elektrophysiologischer Untersuchungen entwickelte eine Gruppe von Wissenschaftlern am Technologischen Institut von Massachusetts (USA) ein dem Froschauge entsprechendes technisches Funktionsmodell, das insgesamt 32 000 elektronische Bauelemente enthält. Die Rezeptoren wurden durch 1296 Fotowiderstände dargestellt. Die Bauelemente waren in sieben Schichten in Matrixform angeordnet. Jede dieser Schichten realisierte bestimmte logische Funktionen, deren Ergebnisse darin bestanden, die Umrisse eines beobachteten Gegenstandes festzustellen, seine Bewegung relativ zum Zentrum der Rezeptorschicht zu registrieren sowie die Kontraständerungen und die vom Gegenstand verursachten Verdunklungen (Schatten) zu bemerken. Die siebente Schicht enthält Lampen, die das Gesamtergebnis der Informationsverarbeitung anzeigen.

Das Prinzip dieser Konstruktion, die aus einer Rezeptorebene, einer oder mehreren Verknüpfungsebenen und einer Effektorebene besteht, wurde zuerst von P. Rosenblatt angegeben und als Perzeptron bezeichnet.

Mit diesem Funktionsmodell wurden erste Versuche zur automatischen Beobachtung eines Radarschirms unternommen. Das auf dem Bildschirm kreisende Bild des Radarstrahls zeigt immer eine Anzahl leuchtender Punkte und Flecke unterschiedlicher Helligkeit. Nur einige von ihnen besitzen die interessanten Informationsinhalte. Der menschliche Beobachter des Radarschirms erfaßt die wichtigen Informationen auf der Basis früher gespeicherter Informationen (Erfahrungen). Der Automat muß diese Erfahrungen in Form von Vergleichsmustern eingespeichert erhalten, die aufgenommene Bildinformation mit diesen vergleichen und die wichtigen Teile, z. B. nur bewegte Punkte, herauslesen.

Ähnliche Probleme der maschinellen Mustererkennung treten in vielen Bereichen auf. In der experimentellen Kernphysik werden z. B. zur Entdeckung seltener Elementarprozesse (z. B. Zusammenstöße von Kernteilchen) Tausende von Nebelkammeraufnahmen gemacht, die danach auszuwerten sind. Eine »erkennende« Elektronik muß unter all den verschiedenen Teilchenspuren diejenigen herausfinden, die den gesuchten Elementarprozeß darstellen.

Ein Muster erkennender Automat könnte auch in der Kriminalistik bei der Identifizierung von Fingerabdrücken hervorragende Dienste leisten. Die Auswertung von Röntgenaufnahmen aus Reihenuntersuchungen wäre automatisierbar. Satellitenaufnahmen der irdischen Wolkenbildungen könnten von Umlauf zu Umlauf des Satelliten elektronisch zu Wettervorhersagen verarbeitet werden.

Schon aus diesen Beispielen kann man erkennen, wie wünschenswert das Sehen mit elektronischen Augen ist.

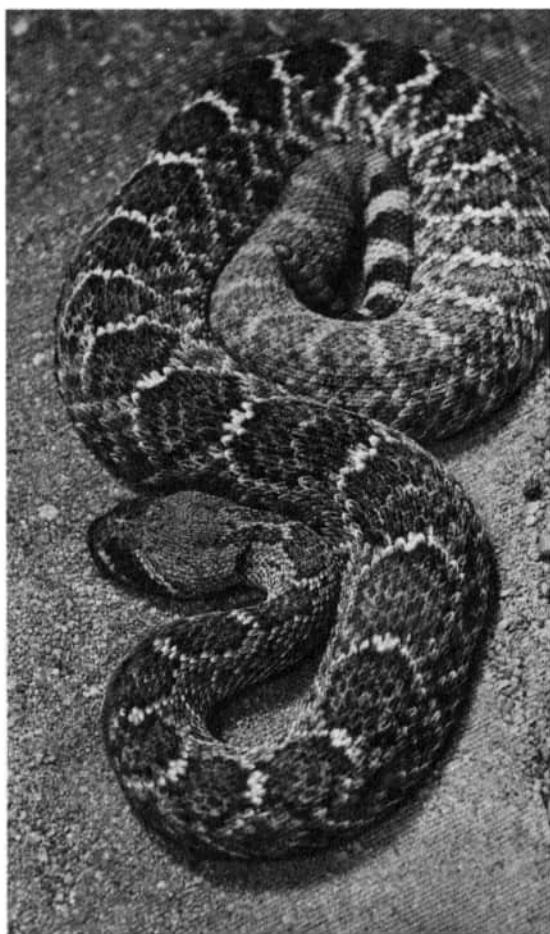
Eine weitere technische Anwendung wäre der Zeichen lesende Automat. Heute bereits existierende maschinelle Zeichenleser für optische und magnetische Zeichenfolgen lesen rund 1000mal schneller als ein Mensch. Sie sind allerdings nur in der Lage, typisierte Musterzeichen zu erkennen.

Der Mensch dagegen identifiziert fast mühelos Zeichen gleicher Bedeutung in den verschiedensten Schrift- und Druckformen. Untersuchungen über das Lesen haben ergeben, daß der Mensch nicht einmal jedes Zeichen erkennen muß. Er kann noch aus teilweise abgedecktem oder anders verstümmeltem Text den Informationsgehalt ganz oder fast vollständig erfassen. Er hat offenbar in vielen Lernvorgängen sehr zahlreiche charakteristische Zeichen- und Wortfolgen, die mehr oder weniger oft wiederkehren, so gut in seinem Gedächtnis gespeichert, daß er sie an Merkmalen erkennt, die gegenüber den vollständigen Wörtern oder Wortgruppen stark reduziert sind. Man nennt solche reduzierten Merkmale von Wortgruppen oder auch von zu erkennenden Mustern optische Invarianten. Die Bildung optischer Invarianten ist sehr wahrscheinlich ein ausschlaggebender Vorgang, der noch viel genauer zu erforschen ist, bevor man darangehen kann, lesende Automaten zu entwickeln, die zumindest mit einer gewissen Flexibilität arbeiten können.

Infrarotortung, Ultraschall und elektrische Orientierung

Das Sehen ist für den Menschen so selbstverständlich und scheinbar umfassend informativ, daß Informationsinhalte in Strahlungen der nicht sichtbaren Bereiche des elektromagnetischen Spektrums erst recht spät in Betracht gezogen wurden.

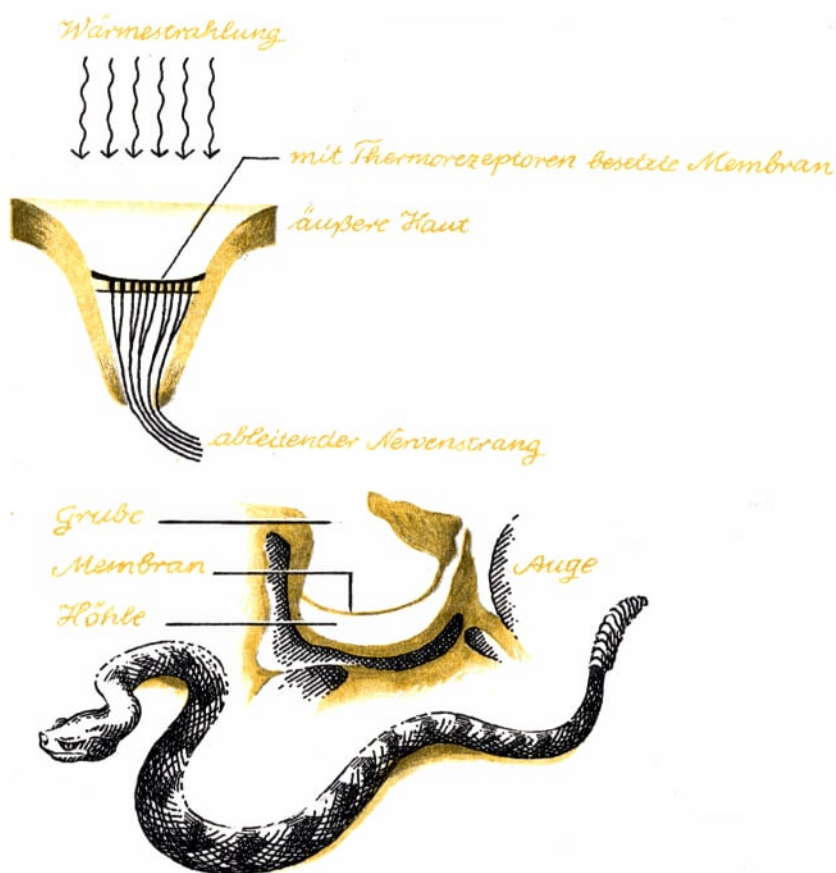
Erst nach dem 2. Weltkrieg wurde mit Hilfe der Radioastronomie der Bau unserer Galaxis ungefähr aufgeklärt. Neuartige kosmische Objekte wie Pulsare und Quasare wurden als Radiostrahlungsquellen entdeckt. Die Grenzen des erforschbaren Weltraums verschoben sich wesentlich tiefer in das All. Auch die Sonne und die Planeten Jupiter und Saturn erwiesen sich als Radioquellen, deren Strahlungen neue Informationen ergaben.



Klapperschlange – eine
Schlange mit Grubenor-
gan

In der modernen Verkehrstechnik werden langwelliges sichtbares Licht und Infrarotstrahlung immer interessanter für die Orientierung bei Nebel und Dunkelheit. Infrarotstrahlung in Überwachungsanlagen, ihre Messung zur kontaktlosen Temperaturbestimmung und andere Anwendungen machen empfindliche Sensoren für diesen Strahlungsbereich sehr interessant. Als technische Sensoren stehen Thermoelemente, spezielle Widerstände und bestimmte Halbleiterdioden zur Verfügung.

Viel empfindlichere Sensoren finden wir in der Natur. Bestimmte Arten von Schlangen, die sogenannten Grubenottern, zu denen z. B. die Klapperschlangen gehören, aber auch Riesenschlangen, besitzen ein paariges Sin-



Grubenorgan von Schlangen (schematisch)

nesorgan, Grubenorgan genannt, mit dem sie Beutetiere durch deren abgestrahlte Körperwärme auf mehrere Meter Entfernung orten können.

Zwischen Auge und Nase dieser Schlangen befindet sich je eine kleine trichterförmige Grube, über deren Grund sich eine sehr dünne Membran spannt. Diese Membran ist dicht mit hochempfindlichen Thermorezeptoren besetzt. Auf 1 mm^2 befinden sich bis zu 1500 dieser Sinneszellen. Messungen mit Mikroelektroden ergaben, daß von einem solchen Grubenorgan Temperaturschwankungen von $0,0003^\circ \text{C}$ und $0,02 \text{ s}$ Dauer noch deutlich registriert werden. Dieses außerordentlich empfindliche biologische Orientierungssystem arbeitet zuverlässig in absoluter Dunkelheit. Die Infrarot-

strahlung durchdringt noch Dunst- und Staubschichten, in denen sichtbares Licht restlos verschluckt wird. Diese Eigenschaft macht sie auch für Orientierungsaufgaben in der Verkehrstechnik interessant. Man benutzt dazu Infrarotstrahler und registriert die Reflexion der Strahlung an Hindernissen. In Seehäfen ist eine solche Infrarotortung mit Erfolg bereits für die Verkehrsüberwachung eingesetzt worden.

Im biologischen Bereich finden wir noch eine Reihe anderer, ebenfalls hochleistungsfähiger Orientierungssysteme, deren Elemente zu Vorbildern für unsere Technik werden könnten.

Erst seit einigen Jahrzehnten weiß man, daß sich verschiedene in tropischen Gewässern lebende Fischarten mit Hilfe sehr schwacher elektrischer Felder orientieren, die sie durch körpereigene elektrische Organe in ihrer Umgebung selbst erzeugen. Diese sogenannten Schwachstromfische haben sich auf eine derartige Orientierungsmethode spezialisiert, weil sie dem vorwiegend trüben Wasser ihres Lebensraumes am besten angepaßt ist.

Die elektrischen Organe dieser Fische bestehen aus umgewandelter Skelettmuskulatur und sind ähnlich denen der schon erwähnten »Starkstromfische« aufgebaut. Meist senden diese Organe ununterbrochen elektrische Navigationsimpulse aus. Rezeptoren am Kopf der Tiere registrieren die durch ihre Umgebung deformierten Impulsreflexionen. Das System hat also große Ähnlichkeit mit einer elektrischen Echolotung. Die Frequenzen der ausgesandten Impulse liegen sehr hoch. Bei der Art *Sternarchus oxyrhynchus*, die zu den Nacktaalähnlichen gehört, hat man 1000 Impulse pro Sekunde von je 0,4 V gemessen.

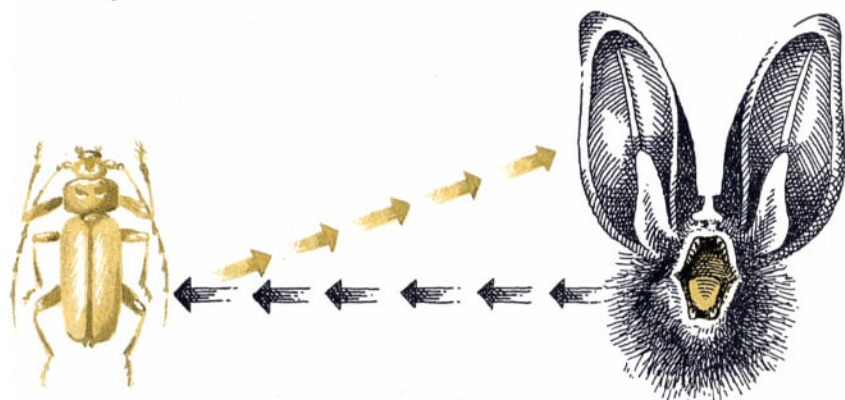
Die Empfindlichkeit der Rezeptoren, die Meßsonden für elektrische Feldstärke darstellen, ist wiederum sehr hoch. Feldstärkeänderungen, wie sie Hindernisse im Wasser, Beutetiere und dergleichen verursachen, können bis zu 10^{-10} V/cm² festgestellt werden. Damit reagieren die Rezeptoren der »Schwachstromfische« noch auf Feldstärkeschwankungen, die an einer Rundfunkantenne beim Empfang eines sehr schwachen Senders auftreten.

Es gibt eine Reihe von Beobachtungen darüber, daß die von verschiedenen Fischarten ausgesandten elektrischen Impulse artspezifische Signale sind, die von Tieren der gleichen Art verstanden werden und bestimmte Bedeutung haben. Beim Zitterwels bedeuten Impulsfrequenzen zwischen 2 und 5 Hz Abwehr oder Flucht. Mit 14 bis 262 Hz sendet er Suchsignale aus. Mit 21 bis 113 Hz kündigt er Angriff an. Man glaubt auch erkannt zu haben, daß Haie, Lungenfische und Knochenfische Informationen über elektrische Impulsfolgen austauschen.

Das Ultraschall-Orientierungssystem der Fledermäuse arbeitet ebenfalls nach dem Echoprinzip. Es besteht aus einem Stimm- und einem Hörapparat. Bei einer europäischen Fledermaus wiegen Ultraschallsender und



Großohrige Fledermaus



Kopf der Ohrenfledermaus mit zum Schrei geöffnetem Maul

-empfänger nur etwa 0,1 g und sind kleiner als 1 cm^3 . Die Fledermäuse stoßen mit geöffnetem Maul zehn bis sechzig, vor Hindernissen bis zu 200 Schreie pro Sekunde aus. Der Einzelschrei hat eine Dauer von etwa 5 ms. Die Schallfrequenzen liegen zwischen 45 und 90 kHz, die Wellenlängen in der Luft also etwa zwischen 3,7 und 7,4 mm. Die Schallenergie ist relativ hoch. Die Echos ihrer Ultraschallpeillaute empfängt die Fledermaus mit ihrem Hörorgan, in dem höchstempfindliche Ultraschallrezeptoren die Schalleistungen der Echos (etwa 10^{-17} W) in elektrische Signale umwandeln und verstärken.

Die Echos liefern den Fledermäusen auch Informationen über Form, Größe, Bewegung und stoffliche Natur der Hindernisse. Das Empfangsorgan kann Echolaute mit einer zeitlichen Differenz von 1 ms noch gut un-

terscheiden. Damit ist eine Entfernungsbestimmung des Hindernisses auf mindestens 30 cm genau gegeben, wahrscheinlich ist sie aber noch präziser.

Fledermäuse orten ein 3 m entferntes Insekt, erkennen 3 mm dicke Drähte auf 2 m Entfernung. Man hat verschiedentlich beobachtet, daß eine Fledermaus in einer Minute mehr als zehn fliegende Insekten fängt. Dabei wird sie nicht durch die Ultraschallsignale ihrer Artgenossen gestört. Bisher ist nicht bekannt, wie dieses biologische System eine so hohe Stabilität gegen Störungen erreicht. Technisch ist eine solche Signalstabilität von höchstem Interesse. Gelänge es, die biologische Systemlösung aufzufinden, so wäre sie möglicherweise auf technische Signalsysteme übertragbar. Zur Zeit nimmt man an, daß die Ultraschallrezeptoren der Fledermäuse kurzzeitig (für 5–10 ms) für Echos mit dem tiereigenen Zeitmuster sensibilisiert sind.

Bei einigen Meerestieren finden wir ebenfalls eine Orientierung mittels Schallecho vor. Tümmler und andere Zahnwale stoßen tiefe Grunztöne und auch Ultraschallpfeife aus. Delphine orientieren sich mit Pfeiftönen im Frequenzbereich von 8 bis 12 kHz und außerdem durch Ticklaute im Ultraschallbereich. Man hat beobachtet, daß diese Tiere damit selbst dünne Fangnetze entdecken und Löcher in diesen Netzen sofort auffinden. Ihre Ultraschallpeilfähigkeit ist so empfindlich, daß sie sogar die stoffliche Beschaffenheit von Hindernissen unterscheiden können. Normalerweise benutzen sie dieses Ortungssystem, um den Verlauf des Meeresgrundes und naher Küsten festzustellen und um Fischschwärme zu verfolgen. Was wir also für moderne Fischfangmethoden halten, nutzen diese Tiere schon seit Millionen von Jahren.

Seit dem Altertum ist das erstaunliche Heimfindervermögen von Brieftauben bekannt. Heute weiß man, daß es viele Tiere mit ähnlichen Fähigkeiten gibt, z. B. Fledermäuse, Schildkröten und alle Zugvögel.

Viele meist langjährige Forschungen lieferten zwar manche Teilergebnisse, aber insgesamt ist noch ziemlich unklar, wie diese Tiere so hervorragende Orientierungsleistungen vollbringen können. Vermutet wird, daß viele Tiere zu einer Sonnenkompaßorientierung in der Lage sind, daß sie also aus dem Stand der Sonne mit Hilfe einer »inneren Uhr« die Himmelsrichtungen unterscheiden können. Bei nachts ziehenden Vögeln vermutet man eine ähnlich funktionierende Sternkompaßorientierung.

In einem Experiment setzten Verhaltensforscher einigen Brieftauben getrübe Kontaktlinsen auf die Augen. Diese Tauben fanden trotzdem auf kürzestem Weg ihren Heimatschlag. Erst der direkte Landeanflug war ihnen erschwert. Als man den Tieren aber kleine Magnete aufband, verminderte sich ihre Orientierungsfähigkeit drastisch. Dieses Experiment kann als Beweis dafür gelten, daß sich Brieftauben hauptsächlich nach dem Magnetfeld der Erde orientieren. Magnetfeldorientierung wird auch für an-

dere Tierarten, z. B. bei Schnecken, einigen Insekten und Vögeln, angenommen.

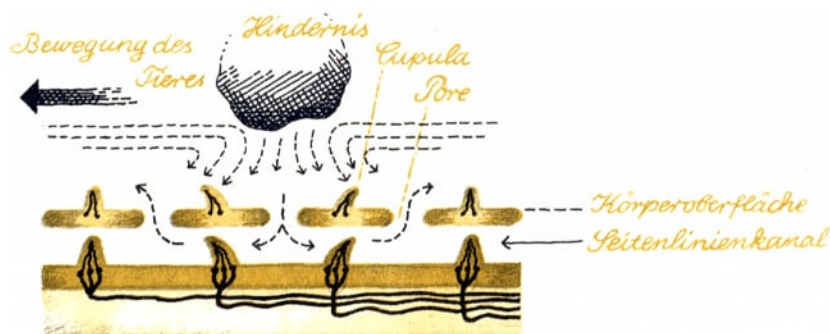
Im Schädel von Tauben, bei Napfschnecken und Bienen hat man winzige Magnetitkristalle gefunden. Ihre Funktion in einer Magnetfeldorientierung ist aber noch nicht geklärt.

Dagegen zeigten elektronenmikroskopische Aufnahmen von Bakterien, die im Moorwasser vorkommen, kettenförmig aufgereichte Magnetitkristalle (Fe_3O_4) von etwa 50 nm Durchmesser. Diese gestatten den Bakterien eine Orientierung im Magnetfeld der Erde. Die Vermutung liegt nahe, daß man hier eine Urform eines biomagnetischen Kompasses vor sich hat.

Mechanorezeptoren

Rezeptoren für Berührungs- und Vibrationsreize finden wir in der Natur von einer fast unglaublichen Empfindlichkeit. Sogar bei einer ganzen Reihe von Pflanzen beobachtet man Reaktionen auf Berührungsreize. Technische Sensoren oder Vorrichtungen zur Messung von mechanischen Größen wie Kraft, Druck und Geschwindigkeit arbeiten zwar für viele Anwendungsfälle ausreichend genau, zuverlässig und mit geringer Trägheit, sind aber doch weit von den Leistungen biologischer Sensoren entfernt. Man kann schlußfolgern, daß auf diesem Gebiet der technischen Entwicklung noch viel Raum offensteht. Das betrifft nicht nur die Sensortechnik schlechthin, sondern – viel weitergehend – deren Anwendungsbereiche.

In China, einem Land, das zu den erdbebengefährdeten Zonen der Erde gehört, gibt es jahrhundertealte Erfahrungen über das Verhalten verschiedener Tiere bei bevorstehenden Erdbeben. Schlangen z. B. verlassen ihre Löcher. Ähnlich verhalten sich andere höhlenbewohnende Tiere. Die Erdbebenforschung ist eines der Anwendungsgebiete für höchstempfindliche



Seitenlinienorgan bei Fischen (reagiert auf Druckreize)

Mechanorezeptoren, für das wir aus der Natur sehr wertvolle Vorbilder gewinnen können.

Tastrezeptoren, oft nur in Form freier Nervenendigungen, in anderen Formen als gekapselte Nervenendigungen, die mit einem oder mehreren Tasthaaren (Haarfollikeln) versehen sind, finden sich bei Wirbeltieren mit unterschiedlicher Dichte in der Haut verteilt. Sie vermitteln Berührungs-, Druck- und Vibrationsempfindungen. Ihre Empfindlichkeitsschwelle liegt etwa bei $3 \cdot 10^{-9}$ Joule. Das entspricht ungefähr einem aufliegenden Gewicht von 0,03 mg.

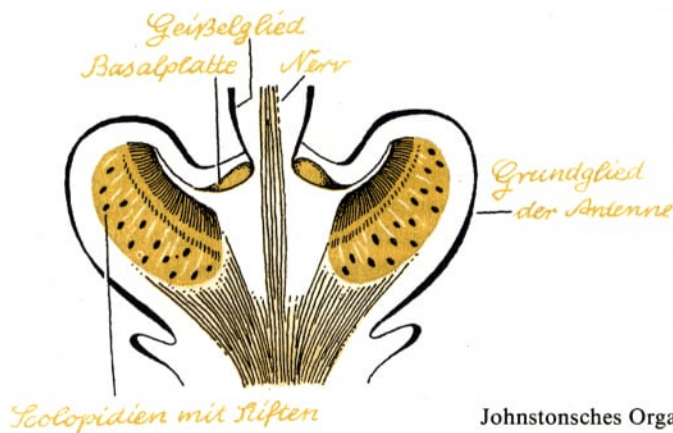
Im Körperinneren signalisieren Muskel- und Sehnenspindeln sowie Dehnungsrezeptoren in den Gelenkhäuten die Stellungen der Arbeitsmuskulatur. Erst dadurch wird koordinierte Bewegung möglich. Die Arbeitsweise dieser Tast- und Dehnungsrezeptoren ist bisher nur wenig untersucht worden.

Einige Gliederfüßer haben spezielle Vibrationsrezeptoren und -organe entwickelt, die Spinnen z. B. das leierförmige Organ, verschiedene Insekten das Subgenualorgan. Empfundene werden damit Vibrationen zwischen etwa 50 Hz und 10 kHz. Die amerikanische Schabe (*Periplaneta americana*) kann noch Schwingungsamplituden von $4 \cdot 10^{-10}$ cm wahrnehmen. Das ist weniger als der Durchmesser eines Wasserstoffatoms.

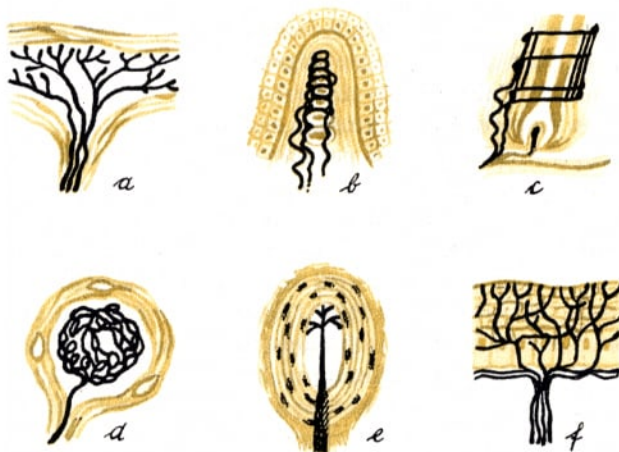
Vielleicht ist interessant, wie man so unvorstellbar kleine Schwingungsamplituden überhaupt messen konnte. Deshalb soll die Methode hier kurz beschrieben werden. Setzt man ein Tier, etwa eine Winkerkrabbe, auf eine große Metallplatte, und zwar so, daß sie nahe dem Plattenrand fixiert ist, und versetzt die Platte in solche Schwingungen, daß man die Auslenkung der Plattenmitte noch messen kann, so ergibt sich die um einige Größenordnungen kleinere Schwingung am randnahen Ort des Tieres rein rechnerisch nach dem mechanischen Gesetz der schwingenden Platte.

Tiere mit so hochempfindlichen Vibrationssensoren benutzen Vibrationssignale, die sie entweder mit den Beinen oder mit anderen Körperteilen erzeugen, zur Kommunikation. Ameisen geben auf diese Weise bei Erdverschüttungen Alarm. Spinnen empfangen mit ihrem leierförmigen Organ die Signale von Bewegungen in ihren Fangnetzen. Die Winkerkrabbe erzeugt durch Aufschlagen ihrer Scheren zwei verschiedene Trommelwirbel, deren Bedeutungen noch nicht geklärt sind.

Fliegende Insekten besitzen zur Bestimmung ihrer relativen Flugeschwindigkeit in ihren Antennen das sogenannte Johnstonsche Organ. Dieses besteht aus hohlzylinderförmig angeordneten Sinneszellen (Skolopidien), die mit stiftartigen Spitzen an der Basalplatte des ersten Geißelgliedes enden. Beim Flug drückt der Fahrtwind die Geißel nach hinten und reizt über die Basalplatte die Skolopidien. Die Reizstärke entspricht der relativen Fluggeschwindigkeit. Da die Antennen paarig sind, ist das Tier



Johnstonsches Organ einer Mücke



Rezeptoren in der menschlichen Haut für verschiedene Empfindungen
a Hitze, b Berührung, c leichtes Berühren, d Kräfte, e Druck, f Schmerz
(es handelt sich immer um Dendriten von Neuronen)

auch in der Lage, aus den beidseitigen Signalen seine Flugrichtungsorientierung zu gewinnen.

Die Forschungen über Mechanorezeptoren und Kommunikation zwischen Tieren mittels dieser Rezeptoren müssen als wichtige Beiträge zur gesamten Problematik der Biokommunikation und Informationsübertragung angesehen werden, denn sie haben wohl das stammesgeschichtlich älteste System zum Gegenstand. Dieses System enthält wahrscheinlich allgemeine

Gesetzmäßigkeiten der biologischen Informationsübertragung in elementaren Formen.

Mechanorezeptoren besitzen in der modernen Technik für die Konstruktion von Manipulatoren, Industrie- und Forschungsrobotern große Bedeutung. Mit ihrer Hilfe können die Kontakte zwischen Greifwerkzeugen und Werkstücken, Bodenberührung sowie Stellungen von Gelenken signalisiert, Greiferkräfte bestimmt und geregelt werden. Man kann sich leicht vorstellen, welche Möglichkeiten dabei für die Automatisierung in der Industrie oder für die Ausrüstung unbemannter Landeapparate von Raumsonden enthalten sind.

Rätsel des Hörens

Eine dem Sehen vergleichbare Problematik finden wir beim Hören vor. Ein Mikrofon nimmt ohne Auswahl nur den Schall auf und transformiert ihn in elektrische Schwingungen. Das Hören umfaßt darüber hinaus die Informationsauswahl und -verarbeitung akustischer Signale. »Warum hörst du nicht?« fragt die Mutter ihr Kind, wenn es ein Verbot übertreten hat – und sie meint damit das von ihr geforderte Verstehen und Begreifen.

Der Mensch nimmt Schwingungen etwa zwischen 15 Hz und 14 kHz als Schall wahr. Darüberliegende Frequenzen werden als Ultraschall bezeichnet. Viele Insekten hören aber noch im Ultraschallbereich. Ihre Hörorgane sind an verschiedenen Körperstellen untergebracht, z. B. am Hinterleib, an den Flügelrändern oder an den Beinen. So weiß man, daß Heuschreckenarten Schwingungen bis zu 200 kHz wahrnehmen können. Viele Nachtinsekten, wie Spinner, Spinner und andere Nachtfalter, hören die Ultraschallpeillaute der Fledermäuse und haben dadurch eine Möglichkeit zur Flucht. Bei der Kleinheit dieser Tiere kann man sich eine Vorstellung von der Winzigkeit ihrer Hörorgane machen.

Das Hörorgan der Säugetiere einschließlich dem des Menschen besteht aus drei Teilen. Das äußere Ohr dient der Schallaufnahme. Das Mittelohr, bestehend aus dem Trommelfell und der Gehörknöchelchenkette, verstärkt die empfangene Schalleistung ungefähr auf das Zwanzigfache. In der Gehörschnecke des Innenohres werden die empfangenen Schallsignale in ihr Frequenzspektrum zerlegt und von den 10 000 bis 20 000 Schallrezeptoren in elektrische Erregung umgewandelt.

Die Sinneszellen des Hörorgans der Wirbeltiere sind ihrem Wesen nach spezialisierte Mechanorezeptoren. Sie sitzen auf der Basilarmembran des Innenohres und bilden in ihrer Gesamtheit das Cortische Organ. Es sind längliche, keulenförmige Zellen, oben mit einer kleinen Platte, der Phalanx, abgeschlossen, auf der Sinneshaare, die Stereozilie, sitzen. Diese Sinnes-

haarbüschel sind mit einer Deckmembran verbunden. Die gesamte Gehörschnecke (Cochlea) mit diesem Cortischen Organ ist blasenfrei mit Flüssigkeit gefüllt. Über das Mittelohr oder direkt über die Schädelknochen eintretende Schallwellen pflanzen sich in den nach innen enger werdenden Kanälen der Gehörschnecke fort. Abhängig von ihrer Wellenlänge, werden sie an einem bestimmten Punkt stark gedämpft. Ihre Restenergie wird dort sozusagen von dem flüssigkeitsgefüllten Röhrensystem verschluckt. Dabei entsteht an dieser Stelle eine stärkere Auslenkung der Basilarmembran. Durch diese mechanische Verschiebung werden die dort befindlichen Schallrezeptoren erregt. Die von ihnen ausgehenden elektrischen Impulse laufen auf isolierten Bahnen zum Hörzentrum des Großhirns, wo das Klang- oder Geräuschbild entsteht.

Die örtliche Auflösung eines Schallwellengemisches, wie sie sich im Innenohr vollzieht, bezeichnet der Physiker als Wanderwellendispersion. Diese dient zur Analyse von Klängen und Geräuschen und ist technisch bemerkenswert. Das menschliche Gehör kann etwa 850 verschiedene Tonhöhen unterscheiden, empfindet jedoch nur das Gesamtklangbild, nicht die Frequenzbestandteile von Klängen und Geräuschen. Es besitzt in dieser Hinsicht eine außerordentlich hohe Empfindlichkeit und Unterscheidungsfähigkeit. Wir erkennen bekannte Stimmen sehr gut wieder, selbst wenn sie durch das Telefon relativ stark verzerrt sind. Unser Gehör unterscheidet sehr genau die Anteile von Oberschwingungen in den verschiedenen Schallquellen — den Gewehrscuß von einem Pistolenschuß, den Trompetenton von einem Klarinetton oder das Brechen eines Zweiges von dem eines Glasstabes.

In unserem Gehirn sind die Klangbilder früher erhaltener akustischer Informationen in großer Menge gespeichert, mit denen neu empfangene sofort verglichen und dadurch erkannt werden. Vor allem ist bemerkenswert, daß in der überwiegenden Zahl von Fällen auch unvollständige oder stark gestörte akustische Informationen erkannt werden. Wir verstehen noch eine recht undeutliche oder durch Dialekt verzerrte Aussprache anderer Menschen, wir erfassen aus Wortfetzen den Sinn ganzer Sätze. Unser Gehörsinn besitzt eine hochentwickelte Fähigkeit, verstümmelte Informationen aus dem Gedächtnis zu ergänzen. Es sieht so aus, als stelle unsere Sprache ein Überangebot von Signalelementen für die zu übermittelnden Informationen dar. Aus diesem Überangebot genügen uns oft gewisse Rumpfsignale — auch als akustische Invarianten bezeichnet —, um die Information zu erfassen.

Diese akustischen Invarianten erinnern an die erwähnten optischen Invarianten beim Lesen und bei der Mustererkennung.

Es ist bisher noch nicht gelungen, die Invariantenbildung zu verstehen, z. B. die unverzichtbaren von den verzichtbaren Bestandteilen einer opti-

schen oder akustischen Information zu trennen. Wäre das der Fall, dann besäßen wir eine ganz neuartige Kurzschrift, dann könnten wir die Sprachen ungeheuer vereinfachen. Wir haben dieses Rätsel des Hörens noch nicht gelöst.

Verhaltensforscher sind zu der Überzeugung gelangt, daß der Austausch von Informationen im Tierreich viel inhaltsreicher, differenzierter und gezielter ist, als früher angenommen wurde. Man spricht z. B. von einer regelrechten Sprache der Delphine. Aber auch bei vielen anderen Arten finden wir zahlreiche Lautäußerungen, die von Artgenossen offenbar eindeutig verstanden werden. Man hat z. B. die Lautfolgen verschiedener Vogelarten analysiert und dabei ganze Informationsgruppen identifizieren können, etwa Defensiv- und Aggressionssignale, Ortungs- und Lockrufe, Laute, die zur Brut- und Nestpflege gehören, Distanzlaute, die den Artgenossen vom eigenen Revier fernhalten sollen und einfache Lautäußerungen des Wohlbehagens. Derartige Untersuchungen führte z. B. Bremond 1966 bis 1968 beim Zaunkönig und beim Rotkehlchen durch. Er kam zu dem Schluß, daß die Lautfolgen und Gesänge arteigene codierte Lautmuster darstellen, die als Ganzes erkannt werden. Das bedeutet nichts anderes, als daß die Bildung akustischer Invarianten schon in tierischen Lautäußerungen bzw. im Hören der Tiere vorhanden ist. Das Studium von »Sprachen« der Tiere kann daher wichtige Erkenntnisse auch für technische Zwecke vermitteln, indem es vielleicht Beiträge zum Problem der Invariantenbildung leisten kann.

Mancher mag die Frage stellen, worin denn nun die Schwierigkeit besteht. Sie besteht darin, daß es eine ungeheuer große Zahl von Möglichkeiten gibt, aus akustischen (ebenso aus optischen) Informationen noch verständliche Rumpfinformationen zu bilden. Unsere Sprache besitzt eine sehr große Redundanz (Informationsüberfluß, Weitschweifigkeit). Nahezu jede Information wird mehrfach ausgedrückt. Verkürzungen können daher auf vielfältige Weise ohne wesentlichen Informationsverlust vorgenommen werden. Bei der Invariantenbildung wird offenbar annähernd die ganze Vielfalt der Möglichkeiten ausgenutzt. Die technische Schwierigkeit besteht also darin, die ungeheure Plastizität und Variabilität in Formen oder Regeln zu erfassen. Erst dann könnte man darangehen, sie einer informationsverarbeitenden Elektronik als Arbeitsprogramm einzugeben.

Vorläufig sind wir noch weit entfernt, elektronische Apparate von solcher Leistungsfähigkeit konstruieren zu können. Die phonetische Schreibmaschine, eine Schreibmaschine also, die gesprochenen Text automatisch gemäß dem Regelwerk unserer Sprache schreibt, ist deshalb noch ein Traumziel. Eine solche Maschine müßte in ihrem Speicher die vollständige Rechtschreibung und Syntax unserer Sprache enthalten. Sie dürfte sich nicht darauf beschränken, Worte zu hören, sondern müßte aus aufgenom-

menen Wortfolgen die Schreibweise gleichklingender Worte wie »wahr« und »war« oder »mal« und »Mahl« selbst bestimmen, müßte auch undeutlich gesprochene Sätze richtig schreiben und dazu noch die richtigen Satzzeichen setzen.

Eine andere, nur wenig einfachere Zielstellung ist ein Computereingabegerät, mit dessen Hilfe Programme eingesprochen werden können. Man könnte auch an einen Computer denken, der über Mikrofone Musik aufnimmt und sofort in Noten ausdrückt.

Nach Aussagen führender Kybernetiker sind solche Aufgaben prinzipiell von technischen Apparaten zu lösen. Voraussetzungen dazu müssen durch Forschungsarbeiten über das Hören bei Menschen und Tieren, über Funktionen und Konstruktion der biologischen Hörorgane und über die Verarbeitung akustischer Informationen im Zentralnervensystem geschaffen werden. Der nächste Schritt führt dann zu technischen Modellen, die außer Mikrofonen informationsverarbeitende Teile enthalten müßten. Zwar wurden derartige künstliche Hörorgane schon gebaut, eine ausreichende Variationsbreite mit Bildung akustischer Invarianten aber bei weitem noch nicht erreicht.

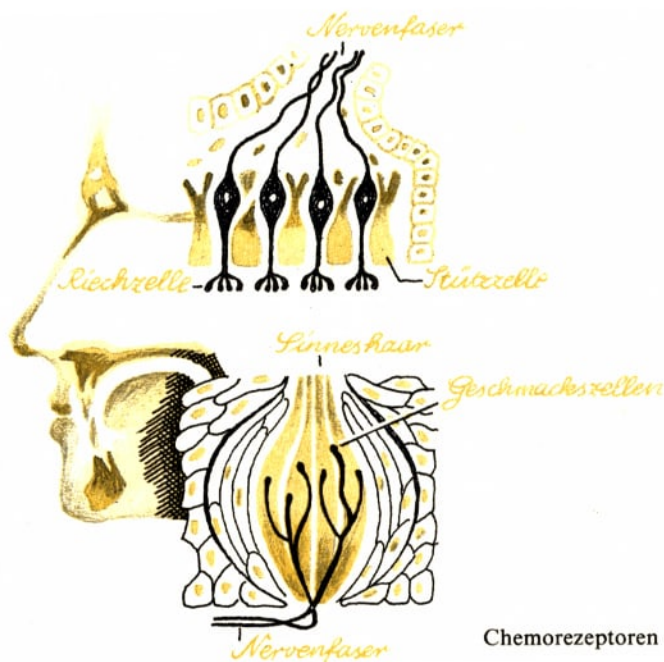
Da hier wie beim künstlichen Sehorgan direkt die Leistung eines biologischen Organs mit technischen Mitteln angestrebt wird, ist das Studium des natürlichen Vorbildes selbstverständlicher Ausgangspunkt und auch Maßstab für alle Bemühungen.

Chemorezeptoren

Die Geruchs- und Geschmacksrezeptoren, von denen der Mensch je etwa 10 Mill. besitzt, gehören zu den biologischen Sensoren, die auf chemische Reize reagieren. Die außerdem im Körperinneren vorhandenen Chemorezeptoren sind möglicherweise noch gar nicht alle bekannt. Sie stellen die Meßsonden der Regelkreise dar, die im Körper zur Aufrechterhaltung des Lebens notwendig sind. Zu ihnen zählen z. B. die Carotiskörperchen im Bereich der Halsschlagader, die auf den Kohlendioxidgehalt des Blutes reagieren. Im Zwischenhirn wurden Osmorezeptoren gefunden, die Wasserverluste anzeigen und das Durstgefühl hervorrufen.

Die Chemorezeptoren der Geruchs- und Geschmacksorgane beim Menschen und im Tierreich reagieren meist schon auf ein bis zwei Moleküle eines Geruchs- oder Geschmacksstoffes.

Bemerkenswert ist, daß die meisten technischen Methoden zur Analyse und Anzeige chemischer Substanzen bei weitem nicht diese hohen Empfindlichkeiten erreichen und in der Mehrzahl einen erheblichen Aufwand an Geräten und Zeit erfordern.



Chemorezeptoren des Menschen

Die Mannigfaltigkeit biologischer Chemorezeptoren ist so ungeheuer groß, daß wir hier darauf verzichten wollen, die zahlreichen Leistungen tierischer Geruchssinne ausführlich darzustellen. Bei Insekten wie Ameisen, Fliegen, Bienen oder Schmetterlingen findet man Geruchsrezeptoren in den Antennen, an Flügelrändern und am Körper von äußerster Empfindlichkeit, die wahrscheinlich auf arteigene Stoffabsonderungen spezialisiert sind; Ameisen markieren damit ihre Wege. Sehr verbreitet sind arteigene Lockstoffe, die vor allem der Partnersuche dienen.

1941 untersuchte K. v. Frisch in Dressurexperimenten Elritzen und wies nach, daß diese Fische differenziert andere Fische, Frösche und Molche am Geruch erkennen, sogar Männchen und Weibchen und Individuen unter den Artgenossen unterscheiden können. Auch andere Fische wie Lachse und Haie besitzen ausgezeichnete Geruchssinne.

Die Geruchsrezeptoren bei Säugetieren und Menschen befinden sich in den Nasenhöhlen, beim Menschen etwa je 10 bis 20 Mill., beim Schäferhund, der wohl – soweit uns bekannt – das leistungsfähigste Geruchsorgan besitzt, ungefähr 250 Mill. Die Rezeptorzellen enden zum Nasenraum hin in einer Anschwellung, die sechs bis zwölf feine, lange Riechhärchen trägt. Jedes dieser Riechhärchen ist etwa 0,001 mm lang und nur 0,1 μ m dick – das ist rund ein Fünfhundertstel der Dicke eines Kopfhaares.

Hunde entdecken mit ihrem Riechorgan noch einzelne Buttersäuremoleküle, die im Schweiß enthalten sind, und unterscheiden dabei mit unwahrscheinlicher Sicherheit die individuellen Abweichungen der Geruchsspuren verschiedener Personen. Soweit beobachtet, irren sie sich höchstens bei einigen Zwillingen.

Wahrscheinlich werden von Tieren mit so hochleistungsfähigen Riechorganen ganze Geruchsbilder erfaßt, und das mit einem Unterscheidungs- oder Auflösungsvermögen, das mit unseren gegenwärtigen chemischen Kenntnissen kaum beschrieben werden kann.

In der Technik sind Rezeptoren mit vergleichbarer Empfindlichkeit zum Feststellen chemischer Stoffe nicht bekannt. Dabei wäre der Bedarf für derartige Meßsonden sehr groß, z. B. für das Überwachen von Räumen, in denen schädliche Gase oder Dämpfe auftreten können, oder als Meßwertgeber für die Steuerung chemischer Prozesse.

Der Weg zu technischen Sensoren für Industrie und Forschung, die Spuren chemischer Substanzen auf so einfache, empfindliche und zuverlässige Weise in Gasen oder in Flüssigkeiten feststellen können, wie es die biologischen Rezeptoren der Lebewesen tun, führt sehr wahrscheinlich nur über die gründliche Erforschung der Biochemie und Biophysik der Membranen. Dies führt auf die Biochemie der organischen Makromoleküle.

Hier sei an die im 4. Kapitel angedeuteten neuen Entwicklungen in der chemischen Forschung von polymeren Werkstoffen zu Wirkstoffen erinnert, die in der gleichen Richtung liegen. Die technischen Möglichkeiten, die sich aus anwendbaren Erkenntnissen über Strukturen und Funktionen biologischer Membranen ergeben könnten, wären nicht nur zur Entwicklung chemischer Sensoren brauchbar, sondern viel allgemeiner für den Einsatz technischer Membranen zur Stofftrennung, z. B. zur Meerwasserentsalzung, zur Gewinnung von Rohstoffen aus dem Meer und für neuartige Filtrierverfahren zur Reinigung von Industrieabwässern.

Biologische Wettervorhersage

Die Wetterfähigkeit mancher Menschen, meist an bestimmte vorwiegend rheumatische Erkrankungen gebunden, kann – besonders bei älteren Leuten – sehr ausgeprägt sein. Sie funktioniert offenbar bei einer Reihe von Tieren noch viel besser. Beobachtungen liegen insbesondere bei Meerestieren vor. Viele Küstenbewohner wissen z. B. seit langem, daß man aus dem Verhalten bestimmter Quallen auf bevorstehendes Schlechtwetter und Sturm schließen kann.

Eine längerfristige Wettervorhersage mit hoher Treffsicherheit hat in vielen Bereichen der Volkswirtschaft große Bedeutung und würde viel Nutzen

bringen bzw. Verluste und Schäden verhüten helfen. Denken wir nur an die Garten- und Landwirtschaft, an das Verkehrswesen oder an den Bergbau über Tage.

Die meteorologischen Beobachtungen umfassen Lufttemperaturen in verschiedenen Höhen, Messungen der Luftfeuchte, des Niederschlags, des Luftdrucks und der Windgeschwindigkeit, ferner Beobachtungen der Wolkenbildung und der Sonneneinstrahlung. Außer einem weltweiten Netz von Beobachtungsstationen, zu dem noch regelmäßige Wettermeldungen von Schiffen und Flugzeugen kommen, tragen Wettersatelliten zur ständigen Beobachtung des Wettergeschehens rund um den Erdball bei. Große Computer verarbeiten von Stunde zu Stunde die meteorologischen Daten zu Wettervorhersagen.

Obwohl diese Prognosen in vielen Fällen außerordentlich wertvoll sind, wissen die Meteorologen selbst am besten, daß deren Treffsicherheit verbessert und auf längere Voraussicht ausgedehnt werden müßte, um noch wirkungsvoller zu sein.

Die Wetterfähigkeit bei Menschen und Tieren beweist, daß es außer den meteorologisch erfaßten Daten noch andere Begleiterscheinungen des Wetters geben muß, die den Wetteränderungen 24 Stunden und mehr vorausgehen und wahrnehmbar sind. Es muß sich um Veränderungen in unserer Umwelt handeln, die wir bisher nicht bemerkt oder noch nicht sorgfältig genug beobachtet haben.

Auf der Suche nach solchen Erscheinungen fand man in jüngster Zeit, daß sich ein bis zwei Tage vor einer Wetterfront bestimmte elektromagnetische Eigenschaften der Atmosphäre verändern. Dazu gehört z. B. die elektrische Leitfähigkeit der Luft, die von sowjetischen Meteorologen nachgewiesen werden konnte. Man vermutet hier Wechselwirkungen zu bestimmten Lebensvorgängen, die ebenfalls elektrischer oder elektromagnetischer Natur sind, etwa zur elektrischen Leitfähigkeit der Haut bei Landbewohnern, vor allem aber zu den Rhythmen der Hirn- und Nervenströme. Störungen dieser Biorhythmen werden wahrscheinlich von Tieren empfunden und aus Erfahrungen des Individuums als Anzeichen für bevorstehende Wetterumschläge erkannt. Diese wenigen Anhaltspunkte und Vermutungen taugen noch nicht für praktische Anwendungen, sondern müssen zunächst durch weitere intensive Forschung zu klaren Ergebnissen entwickelt werden.

Man hat auch andere biologisch wirksame Effekte mit der Wetterfähigkeit in Zusammenhang gebracht, z. B. den absoluten Sauerstoffgehalt der Luft, der sich mit dem Luftdruck ändert, auch die relative Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit der Lufttemperatur. Die bei bestimmten Wetterlagen unvermeidlich starke Transpiration hat einen merklichen Salzverlust des Körpers zur Folge. Dadurch treten Elektrolytverschiebungen an den Zellmem-

branen auf, die deren Funktionsfähigkeit beeinträchtigen, allgemeine Müdigkeit und Unlustgefühle hervorrufen.

Daneben sind noch weitere Einflüsse denkbar, etwa Schwankungen der kosmischen Strahlungen oder Veränderungen der optischen Eigenschaft der oberen Atmosphärenschichten, die die spektralen Anteile der auf die Erdoberfläche gelangenden Sonnenstrahlung verändern.

Wir müssen einmal mehr feststellen, daß wir noch weit davon entfernt sind, unser Wechselverhältnis zur Umwelt vollkommen zu übersehen. Die bisher wenig beachtete Wetterfähigkeit, die offenbar bei bestimmten Tieren noch viel deutlicher entwickelt ist, weist uns auf Beobachtungsmöglichkeiten hin, die in Zukunft zu sicheren Wetterprognosen beitragen könnten.

Mikromeßsonden mit Meßdatenverständnis

Die biologischen Rezeptoren sind winzig kleine Meßsonden, die in die Außenwelt gerichtet, manche auch für Regulationsfunktionen im Körperinneren, mit äußerster Empfindlichkeit und Funktionssicherheit Informationen aufnehmen. Ausnahmen wie Erkrankungen von Sinnesorganen oder angeborene Fehler, etwa Farbenblindheit, sollen uns in diesem Zusammenhang nicht interessieren. Die Rezeptoren normaler Lebewesen funktionieren konstant zuverlässig, bei Wirbeltieren über Jahre und Jahrzehnte.

Die Tatsache, daß alle diese biologischen Mikromeßsonden lebender Organismen ihre Betriebsenergie und Regenerationsfähigkeit aus dem Stoffwechsel beziehen, läßt sie zunächst als wenig geeignet für technische Belange erscheinen. Auch als direkte Vorbilder der Technik sind sie nicht ohne weiteres brauchbar.

Es sind Versuche gemacht worden, verschiedene Biorezeptoren durch spezielle Präparationsmethoden in isoliertem Zustand längere Zeit funktionsfähig zu erhalten. Es gelang sogar, die elektrischen Ausgangsimpulse so präparierter Biorezeptoren in einer nachgestalteten technischen Elektronik weiterzuverarbeiten. Derartige kombinierte biologisch-elektronische Systeme sollen die spezifischen Vorteile der Rezeptoren mit der hohen Arbeitsgeschwindigkeit der Elektronik verbinden und technisch wirksam machen. Solche Versuche sind vielleicht wertvoll für tieferes Verständnis der Rezeptorfunktionen, aber wohl kein Weg zu technischen Anwendungen in größerem Umfang.

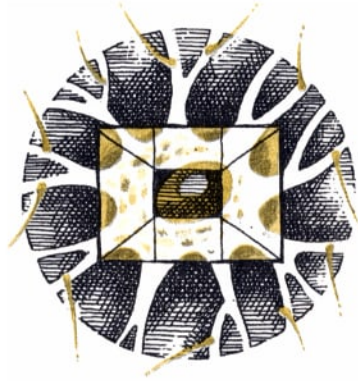
Wie bereits gesagt, besteht Aussicht, das Membranprinzip der biologischen Rezeptoren in bestimmten Richtungen technisch zu entwickeln, z. B. technische Chemosensoren für spezifische Nachweisverfahren von Spurenstoffen zu schaffen, die zwar weniger empfindlich wären als ihre biologischen Vorbilder, aber dennoch für viele Probleme der Industrie, der Luft-

und Wasserüberwachung gegenüber den gegenwärtigen Meßmöglichkeiten erhebliche Fortschritte bringen könnten.

Die Hauptfragen, die wir an die Natur stellen, wenn wir die Leistungen biologischer Rezeptoren und Sinnesorgane betrachten, betreffen indessen die Verarbeitung aufgenommener Informationen, die im Erkennen, Verstehen und Reagieren bestehen. Die Bewältigung der damit verbundenen Probleme wird noch viel Zeit in Anspruch nehmen. Die technischen Möglichkeiten, die sich durch entsprechende Maschinen ergeben, z. B. durch die phonetische Schreibmaschine, durch den elektronischen Sprachenübersetzer oder durch die automatische Luftraumüberwachung auf Flughäfen, sind heute noch schwer übersehbar. Vielleicht führen sie eines Tages in vielen gesellschaftlichen Bereichen zu großen technischen und sozialen Umwälzungen.

7. Kapitel

Von Nervenzellen und Schaltkreisen zu lernfähigen Automaten



Information – was ist das?

Im vorangegangenen Kapitel haben wir die Begriffe »Information« und »Informationsverarbeitung« im Zusammenhang mit Rezeptoren und Sinnesorganen gebraucht und so getan, als sei völlig klar, was darunter zu verstehen ist. Wir mußten dann aber doch eingestehen, daß die Prozesse des Erkennens und Verstehens im Sinne von zweckmäßigem Reagieren eben gerade noch nicht richtig verstanden werden und noch zu erforschen sind.

In der Technik hat man den Begriff der Information auf seinen quantitativen Inhalt reduziert. Man braucht – so ist die Grundüberlegung – zum Übermitteln von Informationen eine bestimmte Menge von Zeichen, ein Alphabet – und dazu Regeln zur Auswahl bestimmter Zeichen aus diesem Alphabet. Beispiele sind das Morsealphabet, Flaggenzeichen und ähnliche vereinbarte Signale. Auch die Sprachen selbst sind so aufzufassen.

In den fünfziger Jahren dieses Jahrhunderts fand der Mathematiker und Nachrichteningenieur Claude Shannon ein Maß für die Information – das »bit« (binary digit – Dualziffer). 1 bit ist eine binäre Entscheidung zur Zeichenauswahl. Man kann nun jedes beliebige Zeichen eines Alphabets in ein Dualsystem, das nur aus den beiden Zeichen 0 und 1 besteht, übersetzen. Für 32 Zeichen, was etwa dem Alphabet unserer Schriftsprache entspricht,

braucht man 5 bit pro Zeichen. Berücksichtigt man unterschiedliche Häufigkeiten der einzelnen Zeichen und läßt in den Auswahlregeln gekürzte Dualzeichenfolgen zu, so kommt man im Durchschnitt mit weniger als 5 bit pro Zeichen aus.

Man kann nun jede beliebige Zeichenfolge und -menge in bit messen. Das ist für alle Arten technischer Informationsspeicher, für die Bemessung der Kapazitäten von Nachrichtenübertragungskanälen und viele andere Fragen der technischen Informationsverarbeitung äußerst wichtig. Die gesamte technische Informationsverarbeitung basiert nur auf dieser quantitativen Seite der Information. Wir setzen dabei voraus, daß wir nur sinnvolle Zeichenfolgen (Wörter) speichern oder übertragen. Sinnlose Zeichenfolgen, etwa »XTRUABL« sind möglich, werden aber ausgeschlossen.

Zeichen sind für uns sinnvoll, wenn sie eine Bedeutung für uns haben. Mit dieser Feststellung stoßen wir auf neue Dimensionen des Informationsbegriffes. Man kann Information im Grunde nur als etwas verstehen, in das Absender und Empfänger einbezogen sind. Eine Signalarakete ist zunächst nur ein technischer Gegenstand. Wenn sie jemand abschießt, kann sie zu einer Information werden (genauer: eine Information tragen). Dies ist die Absicht des Absenders. Wirklich zur Information wird sie erst, wenn sie von anderen gesehen wird, wenn ein Empfänger auftritt.

Mit dem Beispiel der Signalarakete stoßen wir auch auf die Tatsache, daß Informationsumfang und Informationsbedeutung in vielen Fällen wenig miteinander zu tun haben. Für die Soldaten eines Spähtrupps hat ein Schuß eine ungleich höhere Bedeutung als die Zeitung in der Rocktasche. Die Bedeutung einer Information hängt oft mehr oder weniger stark von der Situation ab, in der sich Sender und Empfänger gerade befinden, auch von deren Kenntnissen, Erfahrungen und wechselseitigen Beziehungen.

Nimmt man alles in allem, so ist der technische, quantisierte Informationsbegriff nur eine äußerst unvollkommene Abstraktion aus dem Informationsaustausch zwischen Lebewesen. Unsere Computertechnik muß zur Zeit mit diesem Informationsverständnis auskommen. Sie bringt damit immerhin erstaunliche Leistungen zustande. Alle Bestrebungen, die biologischen Kommunikationssysteme vom Reviergesang der Vögel bis zur menschlichen Sprache als Vorbilder für technische Systeme zu erschließen, laufen nun darauf hinaus, Informationsbedeutungen, die ungeheure Mannigfaltigkeit ihrer Qualitäten, in überschaubare Ordnungen und Regeln zu bringen, meßbar zu machen, also in Quantitäten zu überführen. Erst dann könnten sie technisch verwertet werden. Ob dies überhaupt möglich ist, bleibt zur Zeit noch eine umstrittene Frage.

Bei aller Unvollkommenheit unserer gegenwärtigen Kenntnisse über Kommunikationen zwischen biologischen Systemen wäre der Schluß falsch, es würde sich bei der Informationsverarbeitung in technischen und

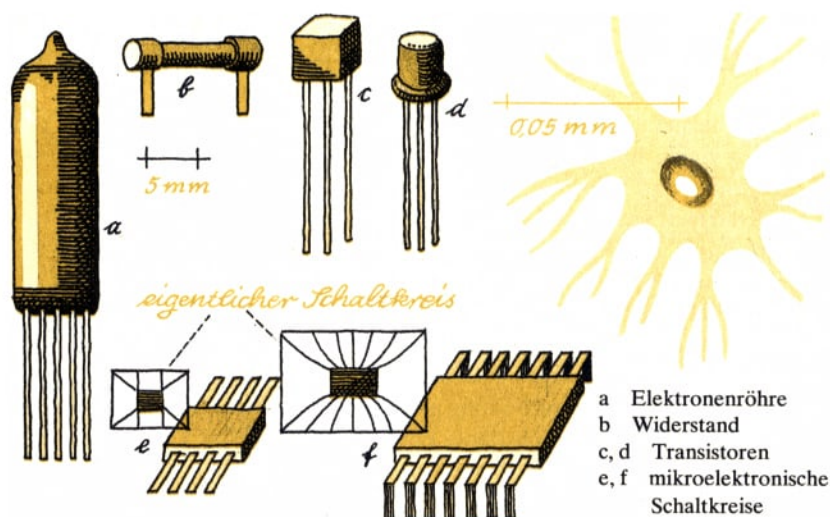
in biologischen Systemen um so verschiedene Dinge handeln, daß man zwischen ihnen überhaupt keine Beziehungen herstellen könne. Wäre das der Fall, dann könnten wir dieses Kapitel hier abschließen.

Die Kybernetik, 1948 von Norbert Wiener als Methode entwickelt und seither in vielen Bereichen bewährt, geht gerade davon aus, daß Prozesse der Regelung und Informationsverarbeitung in technischen und in biologischen Systemen unabhängig von stofflichen Besonderheiten prinzipiell vergleichbar sind. Die Kybernetik hat sich sowohl in vielen Bereichen der Regelungs- und Informationstechnik bewährt als auch in der Biologie als außerordentlich fruchtbar erwiesen. Für viele Zwecke der Charakterisierung biologischer Informationssysteme reichen die technischen Begriffe aus. Eine Reihe von biologischen Problemen kann mit technischen Vorstellungen über Informationsverarbeitung als Arbeitshypothese in Angriff genommen werden. Man muß sich dabei eben nur darüber im klaren sein, daß man so immer nur Teilaspekte der biologischen Objekte erfaßt.

Gehirn und Computer

Mit den Computern hat sich der Mensch Werkzeuge geschaffen, mit denen er in sehr vielen Bereichen arbeiten kann, die noch vor wenigen Jahrzehnten einzig und allein dem menschlichen Gehirn vorbehalten zu sein schienen. Der Begriff »Computer« ist zu allgemein, um die vielen technischen Ausführungsformen vom Taschenrechner bis zu großen Datenverarbeitungsanlagen oder Prozeßsteuerungen für ganze Fertigungslinien wirklich zu umfassen. Wir wollen hier dennoch diese allgemeine Bezeichnung weiter benutzen. Über technische Details von Computern der verschiedenen Bau- und Funktionsarten gibt es genügend andere Bücher.

Die Elektronik eines Computers besteht heute aus mikroelektronischen Schaltkreisen, von denen die größten bis zu 100 000 Transistoren auf einem Siliziumplättchen von etwa $6,5 \times 6,5 \text{ mm}^2$ enthalten. Ein Taschenrechner besitzt nur einen einzigen Schaltkreis (Rechnerschaltkreis). Große Computer haben viele davon, darunter Mikroprozessorschaltkreise als zentrale Verarbeitungseinheiten, Programm- und Datenspeicherschaltkreise, von denen die größten heute 64 000 bit aufnehmen. 128 000 bit hofft man bald zu erreichen, ohne die Fläche wesentlich zu vergrößern. Diese schnellen internen Speicher eines Computers ergeben — mehrere zusammengefaßt — Speicherkapazitäten zwischen 10^5 und 10^8 bit. Sie werden ergänzt durch externe Speicher, die meist aus Magnetband-, Magnettrommel- oder Magnetkartenspeichern bestehen und noch größere Speicherkapazitäten, aber wesentlich längere Speicherzugriffszeiten besitzen. Abgesehen von sogenannten Analogrechnern, arbeiten alle Computer mit dem Dualcode. Ziffern



Bauelemente der Elektronik

und Buchstaben müssen also in Folgen der Zeichen O und L ausgedrückt (codiert) werden. Codierung und Decodierung werden in den Eingabe- bzw. Ausgabeeinheiten automatisch ausgeführt. Informationseingaben können verschiedenartig gestaltet sein, z. B. über Tasten (beim Taschenrechner), über Lochstreifenleser, bei Robotern über Sensoren oder andere Signalgeber erfolgen. Resultatsausgaben werden z. B. als Ziffern- bzw. Zeichenanzeigen, angeschlossen an Schnelldrucker, oder auf Bildschirmen mittels Elektronenstrahl realisiert. Bei Prozeßsteuerungen laufen vom Computer Steuerbefehle direkt an elektromagnetische Stellglieder (z. B. Motoren, Ventile).

Die Entwicklung der Mikroelektronik und der damit aufgebauten Computer, deren Leistungsfähigkeit und Vielfalt befinden sich in einer so stürmischen Phase, daß das heute Aktuelle schon in wenigen Jahren überholt sein wird. Dieses Entwicklungstempo ist vor allem durch die Produktivitätssteigerungen bedingt, die durch den Einsatz der Computer in der Industrie möglich werden, außerdem durch viele Anwendungen im Verkehrswesen, in der Medizin, im Nachrichtenwesen, in der Konsumgüterelektronik, vor allem aber auch in der Raumfahrt- und Rüstungsindustrie.

Es gibt heute schon Industrieroboter verschiedenster Art, Computer, die ganze industrielle Prozesse steuern, solche, die automatisch die Arbeit einer Sparkassenfiliale oder eines Postamtes einschließlich der Arbeit der Angestellten verrichten, schachspielende Computer, Flugzeug- und Panzerabwehrraketen, die selbständig ihre Ziele suchen. Ein Heer von Compu-

terfachleuten arbeitet ständig an neuen Automaten. Führende Kybernetiker vertreten die Ansicht, daß keine Grenze der Leistungsfähigkeit zukünftiger Computer abzusehen sei. Bei aller Phantasie können wir uns die Möglichkeiten elektronischer Maschinen heute noch kaum vorstellen.

Für diese Entwicklung werden mit Sicherheit biologische Vorbilder eine wichtige Rolle spielen. Wir sahen schon, daß z. B. für die Probleme der automatischen Zeichenerkennung die angestrebten Ziele nur mit Hilfe des biologischen Vorbildes Sehorgan erreicht werden können. Auch in vielen anderen Problemstellungen geht es darum, Leistungen des Menschen, die er mit Hilfe seiner Sinnesorgane, seiner Erfahrungen, seines Gedächtnisses und seines logischen Denkens vollbringen konnte, durch Automaten zu ersetzen, die mittels technischer Sensoren wie Fotodioden, Mikrofone oder Fernsehkameras Informationen aus der Umwelt aufnehmen, gespeicherte »Erfahrungen« in elektronischen Gedächtnissen besitzen und in elektronischen Schaltkreisen logische Operationen ausführen können.

Die Automaten arbeiten genauer, gleichmäßiger und schneller, als es der Mensch könnte. Sie ermüden nicht, irren sich nicht, vergessen nichts. — Ausnahmen sollen vorgekommen sein. So soll in Toronto, Kanada, ein kontenführender Bankcomputer einem Kunden Zinsen von mehreren Milliarden Dollar gutgeschrieben haben, weil er sich beim Lesen der Jahreszahl einer Gutschrift um 500 Jahre geirrt hatte. Aber solche Fehler von Automaten kommen äußerst selten vor.

Die heute schon für viele Menschen ungeheure Leistungsfähigkeit von Computern, Automaten und Industrierobotern hat viele Fragen aufgeworfen. Wie weit werden Automaten die Menschen aus den Arbeitsprozessen verdrängen? — Wird es im 21. Jahrhundert so sein, daß nur noch wenige Spezialisten mit einem Heer von elektronischen Maschinen die industrielle Produktion beherrschen, die meisten Dienstleistungen erledigen oder hypermoderne Waffensysteme dirigieren, während die übrige Menschheit gelangweilt an den Knöpfen ihrer Haushaltelektronik dreht. Oder werden dann Computer die Menschen beherrschen?

Alle diese und ähnliche Fragen sind nicht von der Technik her zu beantworten. Es sind Fragen der Gesellschaftsordnung und der Ziele, die sich die menschliche Gesellschaft steckt.

Automaten werden erfunden, konstruiert und gebaut, um menschliche Arbeit zu ersetzen. Ob aber die Menschen, die durch Maschinen und Computer ihre Arbeitsplätze verlieren, ihrem Schicksal überlassen bleiben oder ob sie mit Voraussicht, mit Hilfe der übrigen Gesellschaft sinnvolle Aufgaben an anderen Stellen erhalten, das wird durch die gesellschaftlichen Verhältnisse bestimmt, in erster Linie durch die Besitzverhältnisse. Die Entwicklung der Produktivkräfte durch Computer führt in Dimensionen, die den Privatbesitz an diesen Produktionsmitteln völlig paradox machen.

Die technische Entwicklung wird unaufhaltbar zu Automaten ungeheurer Leistungsfähigkeit führen. Dennoch liegt es einzig und allein in der Hand der Menschen, diese von ihm geschaffenen Werkzeuge das bleiben zu lassen, was sie sein sollten – Werkzeuge, die dem Wohl der ganzen Menschengesellschaft dienen.

Sicherlich bleiben so immer noch viele Fragen der technischen und gesellschaftlichen Zukunft im Zusammenhang mit der Entwicklung der Computer offen, aber der größte Teil dieser Ungewißheit geht zu Lasten der gesellschaftlichen Entwicklung, die in vielen Ländern der Welt zu immer krasserem Widersprüchen zu den technischen Möglichkeiten führt.

Es ist eine umstrittene Frage, ob Computer Leistungen menschlicher Gehirne erreichen können. Sie vollbringen zwar heute schon Dinge, die man allgemein zum schöpferischen Bereich menschlicher Tätigkeit rechnet, aber in diesem Bereich des Kreativen gibt es doch große Unterschiede, ohne daß man immer klare Grenzen definieren könnte.

Die Perspektiven der Computer haben in vielen Kreisen zu neuen, intensiven Überlegungen zu diesen Problemen geführt. Fest steht bisher, daß Computer schöpferische Leistungen jedenfalls auf andere Weise zustande bringen als das menschliche Gehirn.

Wenn wir in den folgenden Abschnitten über Parallelen zwischen Computer und Gehirn berichten, wenn wir viele interessante Einzelheiten über die Neuronen, deren Schaltverbindungen mit anderen Neuronen, ihren inneren Bau und ihre Funktionsweise wissen, wenn wir bestimmte Schaltzentren in Zentralnervensystem kennen, wenn wir sogar vieles über Organisation und Arbeitsweise des Gehirns berichten können, so darf dennoch aus alledem bei weitem nicht der Schluß gezogen werden, man würde das menschliche Gehirn und seine Funktionen heute schon gut durchschauen und in seiner ganzen Dynamik verstehen. Das Gegenteil ist der Fall. Unser Wissen besteht auf diesem wohl schwierigsten Gebiet der gesamten Biologie aus einer Reihe von teilweise stark vereinfachten Vorstellungen, die, für sich genommen, zwar richtig sind, aber eben nur bestimmte Seiten der Neuronenschaltungen und -komplexe betreffen, aber nicht deren ganze funktionale Existenz. Es dürfte noch ein weiter Weg sein, bis es dem menschlichen Gehirn durch die Leistungen vieler Hirne möglich sein wird, sich selbst einigermaßen klar zu erkennen. Die Richtigkeit dieser Feststellung ist unter anderem davon abzulesen, daß immer wieder neue Experimente und neue Hypothesen über Informationsspeicherung und andere Funktionen des Gehirns veröffentlicht werden.

Um so bemerkenswerter ist die Tatsache, daß es trotz vieler Ungewißheiten und Hypothesen gelungen ist, aus den wenigen, sicher erkannten Fakten für den Bereich der technischen Informationsverarbeitung Erkenntnisse zu erlangen und dort mit Gewinn anzuwenden.

Leistungen des Zentralnervensystems in technischen Maßstäben

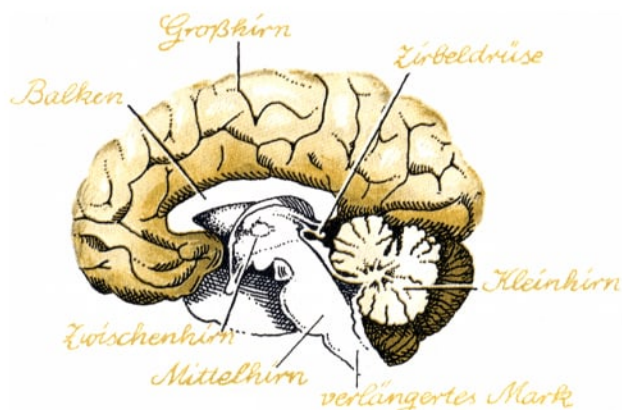
Die technischen Maßstäbe für informationsverarbeitende Systeme haben immerhin zu Vorstellungen über Leistungen und Kapazitäten des Zentralnervensystems geführt, die Ähnlichkeiten und Unterschiede zu technischen Systemen erkennen lassen.

Im hochentwickelten Zentralnervensystem der Säugetiere arbeitet das Gehirn als oberstes Zentrum. Beim Menschen ist das Großhirn der imposanteste und weitaus größte Teil des gesamten Gehirns. Seine Oberfläche, die Großhirnrinde, ist in Furchen und Windungen gefaltet und hat etwa eine Größe von $0,25 \text{ m}^2$. Das gesamte menschliche Gehirn hat eine Masse von ungefähr 1,2 bis 1,5 kg und ein Volumen von rund 1,5 l. Es verbraucht ständig (auch im Schlaf) eine Leistung von etwa 25 W. In der Großhirnrinde allein befinden sich 15 bis 20 Mrd. Nervenzellen (Neuronen). Jedes einzelne Neuron ist über seine Faserfortsätze mit mehreren hundert, teilweise mit mehr als zehntausend anderen verbunden, empfängt von diesen elektrische Impulse und gibt Impulse an andere weiter. Wir wissen bisher nur sehr wenig über die Vorgänge und Schaltverbindungen in den Nervenzentren. Lediglich gewisse Absätze in Form von kybernetischen Modellen konnten bisher entwickelt werden.

Unterhalb des Großhirns liegt das Zwischenhirn mit Thalamus und Hypothalamus. Im unteren Hinterkopf befindet sich das Kleinhirn. Unterhalb des Zwischenhirns folgen das Mittelhirn und das verlängerte Mark.

Das Rückenmark gehört ebenfalls zum Zentralnervensystem und schließt sich unmittelbar dem verlängerten Mark an. Es liegt im Inneren

Mittelschnitt durch das menschliche Gehirn



des Wirbelkanals. Auf der Höhe eines jeden Wirbels treten jeweils Nervenstränge ein und aus — insgesamt 31 Paare. Nahe der Peripherie verzweigen sich diese Stränge und führen zu den verschiedenen Organen, Rezeptoren und Effektoren.

In diesem, in seinem äußeren Aufbau hier nur grob beschriebenen Zentralnervensystem des Menschen findet die Verarbeitung einer ungeheuer großen Menge von Informationen statt. Dessen ist man sich erst richtig bewußt geworden, seitdem man sich mit informationsverarbeitenden Maschinen beschäftigt.

Man kann Computer charakterisieren durch ihre Dateneingabe- und -ausgabesysteme, ihre Organisationsform und ihre Arbeitsgeschwindigkeit. Zu den wichtigsten typischen Größen eines Computers gehören Zahl, Art und Kapazitäten seiner Datenspeicher. Außerdem ist die Speicherzugriffzeit wesentlich, das ist die Zeit, die notwendig ist, um eine gespeicherte Information wieder abzurufen. Ferner kann man Computer klassifizieren durch die Packungsdichte elektronischer Bauelemente, durch die Zuverlässigkeit, etwa gemessen an den Betriebsstunden bis zu ihrem ersten Ausfall, und durch ihre Leistungsaufnahme.

In der Mehrzahl dieser Werte erweist sich das menschliche Zentralnervensystem den modernsten Computern weit überlegen. Ein großer Computer enthält 10^7 bis einige 10^8 Transistoren und Dioden, integriert in Schaltkreisen. Das menschliche Zentralnervensystem besteht aus mindestens 10^{11} Neuronen. Die internen Speicherkapazitäten der größten Computer betragen 10^7 bis 10^8 bit. In nächster Zeit hofft man, noch ein bis zwei Zehnerpotenzen höher zu kommen. Die Zugriffszeiten liegen zwischen 10^{-8} und 10^2 s, je nachdem, ob von internen oder von externen Speichern abgerufen wird. Die Speicherkapazität des Zentralnervensystems liegt wahrscheinlich über 10^{13} bit. Seine Zugriffszeiten schwanken zwischen 10^{-2} und 10 s, können unter Umständen allerdings auch wesentlich länger sein.

Computereingabe- und -ausgabegeräte bewältigen Informationsmengen von 10^2 bis 10^6 bit/s. Die Informationsmengen, die das Zentralnervensystem zu bewältigen hat, werden auf 10^9 bit/s geschätzt. Allein der Gesichtssinn vermittelt ungefähr $3 \cdot 10^6$ bit/s an optischen Informationen, der Gehörsinn etwa $2 \cdot 10^4$ bit/s an akustischen Signalen. Riesige Informationsmengen sind von den körpereigenen Rezeptoren zu verarbeiten, von den körpereigenen Regelkreisen und den bewegungskoordinierenden Systemen.

Dem Zentralnervensystem werden auf 2 bis 3 Mill. Nervenbahnen von rund 650 Mill. inneren und äußeren Rezeptoren Informationen zugeleitet. Auf einer ähnlich großen Zahl von Nervenbahnen werden Steuerbefehle zur Peripherie gesandt. Der weitaus größte Teil dieser Informationsmengen wird in unterbewußten Zentren — im Rückenmark, im verlängerten Mark,



Informationsreduktion bei der Verarbeitung sensorischer Impulse im menschlichen Gehirn

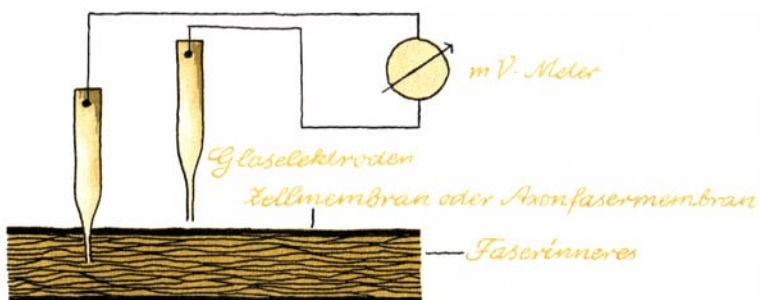
im Mittelhirn und Kleinhirn sowie im Zwischenhirn – vollständig verarbeitet. Langjährige Forschungen haben zu dem Ergebnis geführt, daß man die Thalamusregion im Zwischenhirn als Tor zum Bewußtsein ansehen muß. Durch dieses Tor gelangen nur noch etwa 16 bit/s. Vorher hat also eine ungeheure Informationsverdichtung stattgefunden.

Zu den Angaben über die biologischen Systeme ist zu bemerken, daß sie z. T. nur aus mehr oder weniger groben Schätzungen stammen. So ist die Speicherkapazität des Zentralnervensystems sehr schwierig zu erfassen, zumal noch sehr ungewiß ist, wie diese Speicherung erfolgt.

Die gegebenen Vergleiche werden natürlich den wirklich vorhandenen Unterschieden zwischen technischen und biologischen Systemen wenig gerecht. Die anhand dieser Vergleiche sichtbare Überlegenheit der biologischen Systeme weist aber deutlich darauf hin, daß die Suche nach Vorbildern für Probleme der technischen Informationsverarbeitung im Bereich der Sinnesorgane und des Zentralnervensystems sinnvoll und begründet erscheint.

Bausteine, Strukturen und Funktionen des Zentralnervensystems

Die Erforschung des Gehirns und der übrigen Teile des Zentralnervensystems geht auf sezierende und operative Untersuchungen mutiger Mediziner des späten Mittelalters zurück. In einem 1655 in Ulm erschienenen Buch von Scultetus werden schon Operationen am menschlichen Kopf beschrieben. Es würde hier zu weit führen, die Entwicklung der Erkenntnisse über das Zentralnervensystem in den seitdem vergangenen mehr als 300 Jahren darzustellen. Zahllose anatomisch-präparative Arbeiten an Teilen



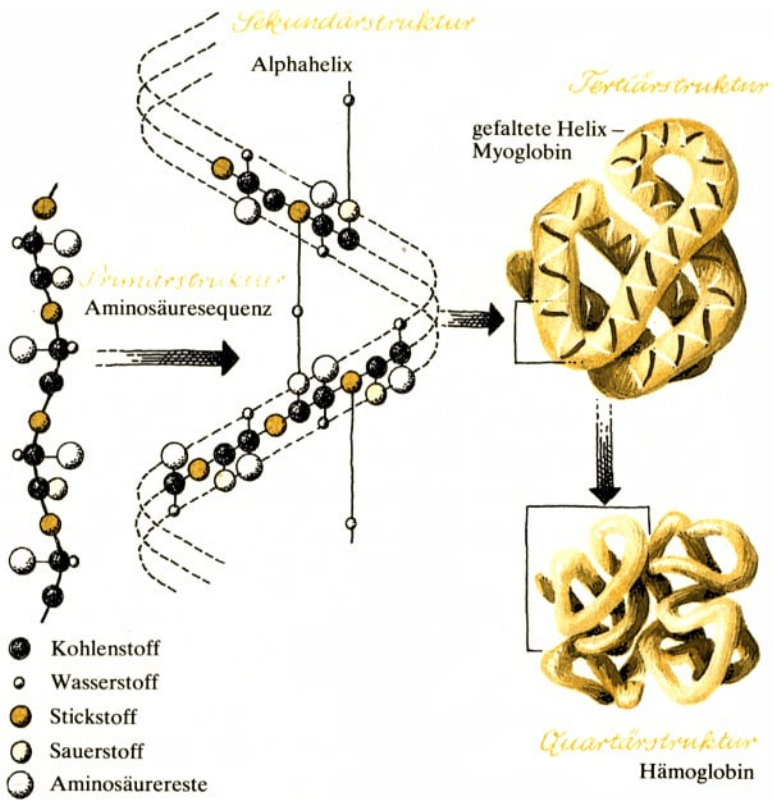
Mikroelektrodenteknik zur Messung von elektrischen Potentialdifferenzen an Zellen und Nervenfasern

des Gehirns, des Rückenmarks und des peripheren Nervensystems, Tierexperimente, die sowohl operative Eingriffe als auch Beobachtungen des Verhaltens zum Inhalt hatten, Beobachtungen an Hirnverletzten, medizinisch-operative Resultate und andere klinische Befunde ergaben Bilder und Zusammenhänge, die sich allmählich zu immer deutlicheren und fester begründeten wissenschaftlichen Erkenntnissen verdichtet haben.

In jüngerer Zeit werden mehr und mehr Methoden und Geräte der physikalischen und chemischen Forschung zur Erkundung der Strukturen und Funktionen innerhalb des Zentralnervensystems mit Erfolg eingesetzt. Zu ihnen gehören die Elektronenmikroskopie, insbesondere deren neuer Zweig, die Rasterelektronenmikroskopie, bei der feinste Strukturen, von einem Elektronenstrahl abgetastet, in größeren Bereichen als beim normalen Elektronenmikroskop und mit größerer Tiefenschärfe abgebildet werden.

Untersuchungen über die elektrischen Eigenschaften einzelner Nervenfasern und Nervenzellen werden mit einer schon mehrfach erwähnten Mikroelektrodenteknik durchgeführt, die zu einer außerordentlichen Präzision entwickelt worden ist.

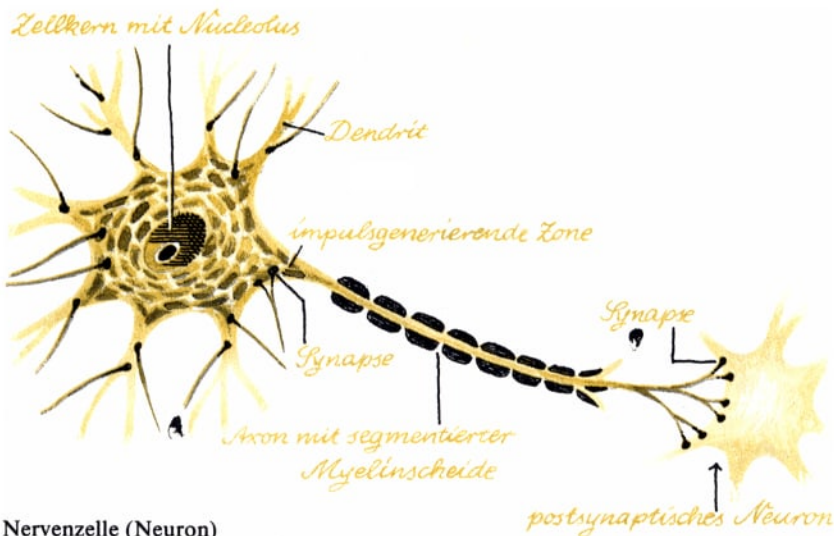
Diese Mikroelektroden bestehen vorzugsweise aus fein ausgezogenen Glaskanülen, die an den Spitzen nur noch 0,5 bis 2 μm dick sind. Sie werden mit einer elektrisch leitenden Salzlösung gefüllt. Die Kanülenschäfte können zusätzlich durch aufgestäubtes Aluminiumoxid isoliert sein. Man sticht nun diese Mikroelektroden unter einem Mikroskop in ein Untersuchungsobjekt, eine Nervenzelle, eine Sinneszelle oder in deren Faserfortsätze, und kann dann das elektrische Potential und dessen Veränderungen am Ort der Elektrodenspitze messen. Auf diese Weise wurde z. B. die Impulsleitung in Nervenfasern erforscht. Man konnte die Impulsübertragung zwischen einzelnen Neuronen messend verfolgen und das Verhalten kleinerer, noch zu übersehender Neuronennetzwerke studieren.



Strukturen von Eiweißmolekülen

Setzt man auf den unverletzten Schädel mehrere verteilte Elektroden auf, so können von diesen elektrische Potentialschwankungen abgenommen und registriert werden. Man bezeichnet das Ergebnis als Elektroenzephalogramm (EEG). Das EEG stellt gewissermaßen die an die Hirnschale projizierte elektrische Aktivität des Gehirns dar. Man kann nach Amplitude und Frequenz verschiedene Typen von Potentialschwankungen im EEG unterscheiden, an diesen z. B. den Übergang von Wach- und Schlafzustand erkennen und die Traumphasen direkt beobachten. Obwohl das EEG aus der Summe der Aktivitäten einer ungeheuer großen Zahl von Neuronen resultiert, hat man versucht, aufgezeichnete Potentialschwankungen nach Methoden zur Erforschung einer unbekannten Sprache zu entschlüsseln. Aufsehenerregende Erfolge sind dabei bisher nicht erreicht worden und wahrscheinlich auch nicht zu erwarten.

Sehr bedeutende Beiträge zur Erforschung der Vorgänge im funktionie-

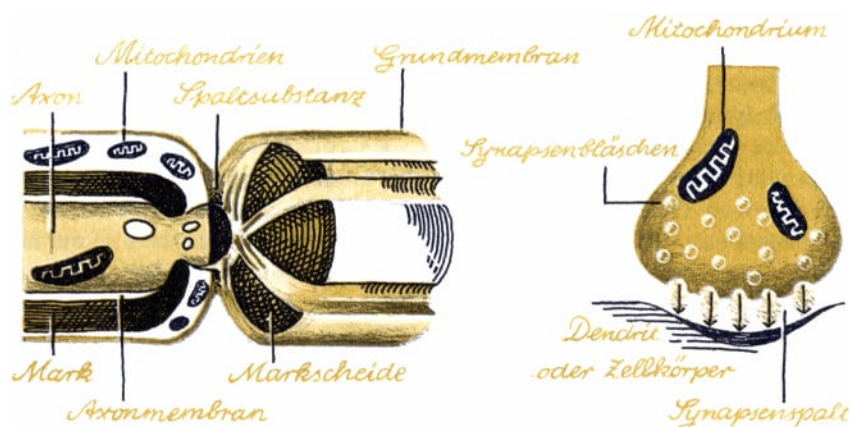


Nervenzelle (Neuron)

renden Gehirn stammen aus der Biochemie und der Molekularbiologie. Mit speziellen Analysemethoden gelang es, wichtige Proteine und Nukleinsäuren, Strukturen dieser Moleküle und Reaktionsketten zwischen ihnen innerhalb der Neuronen aufzuklären. Man setzt zur Lösung solcher Aufgaben chemische Methoden der Mikroanalyse und physikalische Verfahren ein, vor allem lichtoptische Spektroskopieverfahren, die Massenspektroskopie und die Röntgenstrukturanalyse. Um letztere anwenden zu können, müssen die Proteine oder andere zu untersuchende Substanzen zuerst in einkristalline Form gebracht werden. Die Beugung von Röntgenstrahlen am Gitter dieser Einkristalle erzeugt einige tausend Schwärzungsflecke auf einer Fotoplatte. Aus genauen Koordinaten- und Intensitätsmessungen der Schwärzungsflecke ergibt sich dann die räumliche Struktur der Moleküle. Man hat so z. B. die Helixform der Ribonukleinsäure (RNS), Besonderheiten verschiedener Arten der RNS, komplizierte Faltblattstrukturen und andere in sich gefaltete Helixformen nachweisen können.

Diese wenigen Einblicke in einige wichtige Forschungsmethoden und derer. Möglichkeiten zur Aufklärung jeweils bestimmter Teilprobleme lassen vielleicht die großen Aufwände und Schwierigkeiten ahnen, die zu überwinden waren, um den gegenwärtigen Stand unserer Erkenntnisse über das Zentralnervensystem zu erreichen.

Zentrales und peripheres Nervensystem bestehen aus spezialisierten Zellen, den Neuronen, von denen es sehr viele Formen gibt. Sie besitzen aber, soweit wir wissen, alle einen prinzipiell gleichen Aufbau. Wie wir aus den funktionellen Leistungen eines Neurons noch sehen werden, könnte man



Teile des Nervensystems

links: markhaltige Nervenfasern, z. T. aufgeschnitten rechts: Synapse (schematisch)

jedes einzelne von ihnen in seiner Wirkung mit einem hochintegrierten mikroelektronischen Schaltkreis vergleichen, obwohl derartige Vergleiche immer problematisch und nur mit vielen Vorbehalten zu betrachten sind.

Jedes Neuron besteht aus einem zentralen Zellkörper, einer mehr oder weniger großen Zahl von kurzen, verzweigten Fortsätzen (Dendriten) und einem längeren Fortsatz, dem Axon. Die Axone der Neuronen stellen die Nervenfasern dar. Ihre Länge kann bei größeren Tieren bis zu 1 m und mehr betragen. Das trifft z. B. auf die Axone der Neuronen im Rückenmark zu, die zur Gliedmaßenmuskulatur führen. Axone anderer Neuronen sind häufig nur Zentimeter oder Millimeter, in Zentren des Nervensystems auch nur Bruchteile eines Millimeters lang.

Die sogenannten marklosen Nervenfasern sind dünne Röhren, deren Wandung eine Membran darstellt. Die Impulsleitung über die Nervenfasern soll hier nicht näher behandelt werden. Nur soviel sei gesagt: Sie erfolgt verlustlos und mit konstanter Geschwindigkeit (von 2 bis 25 m/s) über die gesamte Faserlänge. Neben den marklosen gibt es noch markhaltige Nervenfasern. In diesen beträgt die Leitungsgeschwindigkeit bis zu 120 m/s.

Das Axon kann als Informationsausgang des Neurons angesehen werden. Es endet wieder an einem Neuron oder an einem Effektor, z. B. an einer Muskelfaser. Das Axon kann ein oder einige seitliche Ästchen (Kollaterale) besitzen. In seinem Endbereich spaltet es sich in Hunderte oder gar Tausende feinsten Ästchen auf. In den Enden der Axonverzweigungen befinden sich kleine, meist knopfartige Verdickungen, die Synapsen. Hier erfolgt die Impulsübertragung zum nächsten Neuron.

Die synaptischen Kontaktflächen liegen meist zwischen 2 und 20 μm^2 . Es kommen aber auch Riesensynapsen mit 500 bis 1000 μm^2 Kontaktfläche vor. Elektronenmikroskopische Untersuchungen zeigten, daß die Axonendigung und der benachbarte Membranbereich der nachgeschalteten Zelle durch einen winzigen Spalt von etwa $2 \cdot 10^{-5}$ mm Breite getrennt sind. Über diesen Synapsenspalt erfolgt die Übertragung der Axonimpulse durch einen Transportstoff oder Transmitter. Die chemische Zusammensetzung dieser Transmitter ist nicht bei allen Synapsen dieselbe und nur in einigen Fällen bekannt. An motorischen Endplatten, den Endigungen von Axonen an Muskelfasern, besteht der Überträgerstoff aus Azetylcholin. Im Zentralnervensystem von Wirbeltieren sind mehr als zehn verschiedene Transmittertypen nachgewiesen worden. In einzelnen Fällen wurden auch Synapsen mit direktem elektrischem Kontakt zur Nachbarzelle gefunden.

Die Erregungsübertragung ist an den Synapsen nur in einer Richtung möglich. Durch die relative Trägheit des Übertragungsprozesses entsteht an den Synapsen eine kleine zeitliche Verzögerung, die möglicherweise zu einem taktartigen Arbeiten innerhalb von Neuronennetzen führt.

Neuere Forschungen lassen vermuten, daß die Zahl der Transmitter möglicherweise wesentlich größer ist. Es wurden auch Synapsen gefunden, die Stromimpulsübergänge in beiden Richtungen zulassen.

Die Informationseingänge eines Neurons sind in den meisten Fällen seine Dendriten, an denen die Axonendigungen vorgeschalteter Neuronen oder Rezeptoren über Synapsen elektrische Impulse übertragen. Außerdem sind synaptische Informationseingänge auch direkt am Zellkörper zu beobachten.

Die Neuronen selbst bilden wie andere erregbare Strukturen ein elektrisches Ruhepotential aus, und sie zeigen Schwellenverhalten. Durch Impulse, die an den synaptischen Eingängen eintreffen, wird das elektrische Potential eines Neurons verändert. Wird dabei die Reizschwelle überschritten, so sendet das betreffende Neuron seinerseits über sein Axon Impulse aus, die nachgeschaltete Neuronen erreichen und dort weiterverarbeitet werden. Impulse, die ein Neuron erreichen, können entweder erregend (membranpotentialsenkend) oder hemmend (membranpotentialerhöhend) wirken. Neuerdings wird von Fachleuten bezweifelt, ob diese Vorstellung allgemein für alle Neuronenverbindungen richtig und ausreichend ist. Möglicherweise erfaßt man mit der Hypothese von der nur entweder hemmenden oder erregenden Wirkung zwischen Neuronen lediglich in einer ersten Näherung das wirkliche Verhalten. Dennoch kann man aus dieser Vorstellung recht instruktive Folgerungen ableiten, was wir mit dem Vorbehalt tun wollen, daß es sich um Modellvorstellungen handelt, die Vorgänge in Neuronennetzen beschreiben, ohne indessen deren Gesamtfunktionen zu umfassen.

Man stellt sich in diesem Sinne vor, daß sich in einem Neuron alle an den verschiedenen synaptischen Eingängen gleichzeitig eintreffenden Impulse zu einer Gesamtänderung seines elektrischen Potentials summieren. Das Ergebnis dieser räumlichen Summation entscheidet darüber, ob die Reizschwelle überschritten wird, ob also das Neuron selbst Impulse ausbildet und weiterleitet und – wenn ja – wieviel Impulse zu den nachgeschalteten Neuronen übertragen werden.

Die räumliche Summation der Erregungen von den verschiedenen synaptischen Eingängen des Neurons und das Schwellenverhalten ermöglichen dem Neuron logische Operationen, die wir von integrierten Schaltkreisen der Mikroelektronik her kennen. Dort spricht man von Logikbausteinen, die die drei logischen Grundoperationen UND, ODER und NICHT realisieren. Aus diesen werden kompliziertere Logikschaltungen bis hin zu ganzen Rechenwerken elektronischer Datenverarbeitungsanlagen zusammengesetzt.

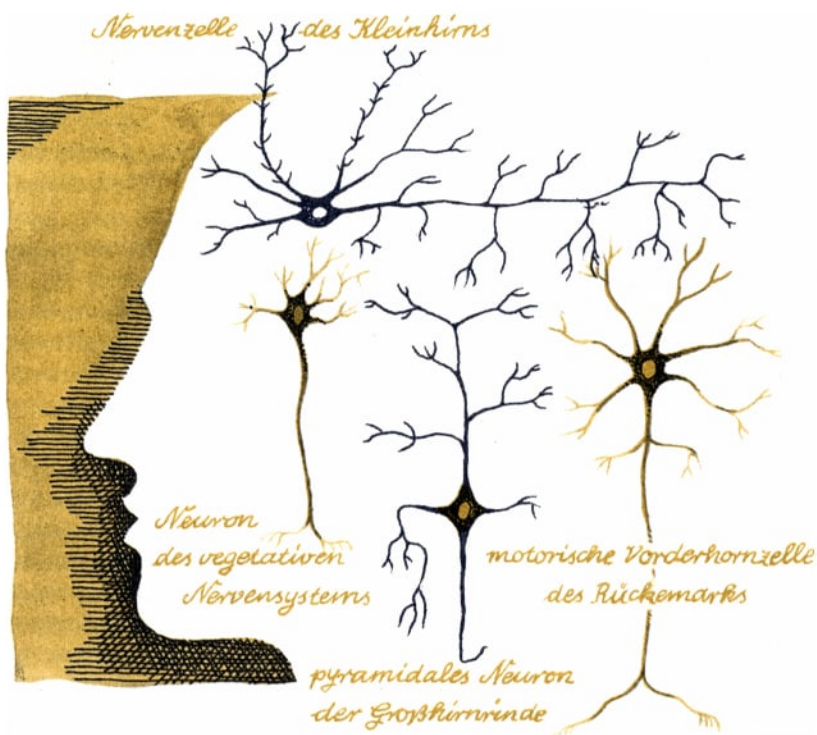
Ein Neuron, zu dessen überschwelliger Erregung ein einziger Impuls an einem seiner Eingänge ausreicht, würde wie ein ODER-Baustein funktionieren. Ergibt erst die Summation mehrerer Impulse von verschiedenen Eingängen ein Überschreiten des Potentialschwellwertes, so wirkt das Neuron ähnlich einem UND-Baustein. Im Falle von hemmenden Impulsen an den Eingängen realisieren diese das Verhalten eines NICHT-Bausteins.

Wir haben damit bestenfalls erste Anhaltspunkte zum Verständnis für die Arbeitsweise von Nervenzellen in der Informationsverarbeitung des Zentralnervensystems erhalten. Durch die meist sehr große Zahl synaptischer Eingänge und ihre wahrscheinlich verschiedene Wertigkeit werden schon kleinere Teile von Neuronennetzen kaum überschaubar. Das Logikverhalten ist auch sicher nur eine der Funktionsweisen der Nervenzellen. Einige Ansätze zu weiteren Erkenntnissen über die Vorgänge in Neuronen sind bereits vorhanden.

Neben der räumlichen Summation von Eingangsimpulsen tritt im Neuron auch eine zeitliche Summation von Impulsen auf, die wichtige Konsequenzen für das elektrische Verhalten der Neuronen hat. Außerdem besitzen Neuronen auch, wie wir das schon bei Rezeptoren kennengelernt haben, die Fähigkeit zur Anpassung an Dauerreizung. Bei ununterbrochenem Eintreffen von Impulsen an den Eingängen erhöht sich die Reizschwelle. Infolgedessen erniedrigt sich bei fortdauernder Erregung nach und nach die Ausgangsimpulsfrequenz. Diese Adaptation der Neuronen sichert das Gesamtsystem gegen Informationsüberflutung.

Offenbar adaptieren aber nicht alle Neuronen in der eben beschriebenen Weise. Man hat auch Neuronen gefunden, die nach dem Durchgang von einem oder mehreren Impulsen ihre Impulsfrequenz erhöhen.

Das elektrische Verhalten der Neuronen haben wir mit unserer Darstel-



Verschiedene Formen von Zellen des Nervensystems

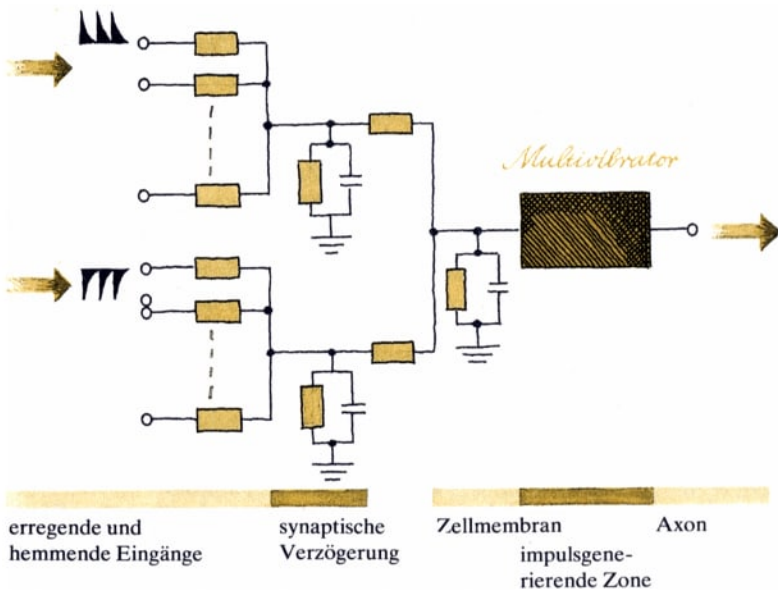
lung sicher nur sehr unvollkommen erfaßt. Die Methode, Modellvorstellungen zu entwickeln und an experimentellen Resultaten zu prüfen, erweist sich aber als sehr gangbarer Weg zur fortgesetzten Annäherung an die wirklichen strukturellen und funktionellen Verhältnisse im Zentralnervensystem.

Neuronen besitzen außer ihrer Fähigkeit, als Elemente im System der Informationsverarbeitung zu wirken, noch andere Funktionen, wahrscheinlich auch solche, die wir noch nicht erkannt haben. Eine wesentliche Leistung von Neuronen und ihren Netzwerken ist die Informationsspeicherung. Diese geht über die bisher dargestellten Mechanismen weit hinaus, ermöglicht in den unterbewußten Zentren die Speicherung der lebenswichtigen Verhaltensprogramme und die Leistungen des Gedächtnisses.

Technische Neuronenmodelle

Parallel zu den direkten experimentellen Untersuchungen an Neuronen und deren Verhaltensweisen in Netzwerken hat man immer wieder mit den jeweils zur Verfügung stehenden elektronischen Bauelementen technische Neuronenmodelle entwickelt, um Eigenschaften und Verhaltensweisen des biologischen Vorbilds besser verstehen und unter verschiedenen Bedingungen untersuchen zu können. Neuere technische Neuronenmodelle enthalten auch Ansätze zur Übertragung biologischer Prinziplösungen der Informationsverarbeitung auf technische Elemente und Schaltungen.

Ein Neuronenmodell, aufgebaut aus Transistoren, Dioden, Kondensatoren und Widerständen, wurde 1961 von K. Küpfmüller und F. Jenik beschrieben. Um eine Nervenzelle mit zwanzig Eingängen und hundert Ausgängen zu simulieren, werden mehr als sechzig dieser Bauelemente benötigt. Die impulsgenerierende Zone der Nervenzelle wird durch einen elektrischen Impulserzeuger (Multivibrator) ersetzt. Dieser erfordert eine Schwellenspannung. Er gibt Impulse konstanter Amplitude ab, sobald diese überschritten wird. Die Zellmembran wird durch ein RC-Glied repräsentiert, das vor den Multivibrator geschaltet ist. Die elektrischen Eingänge sind parallelgeschaltet und über Widerstände direkt mit dem Multivibrator



Neuronenmodell nach Küpfmüller

gekoppelt. Sie sind aber jeweils durch ein RC-Glied überbrückt. Diese RC-Glieder der Eingänge simulieren die synaptische Verzögerung und schaffen die Möglichkeit der zeitlichen Summation von Eingangsimpulsen. Die räumliche Summation ist durch das Vorhandensein mehrerer paralleler Eingänge gegeben. Schafft man Eingänge, die zu einem Teil positive, zum anderen Teil negative Impulse empfangen, dann hat man damit erregende und hemmende Eingänge nachgebildet.

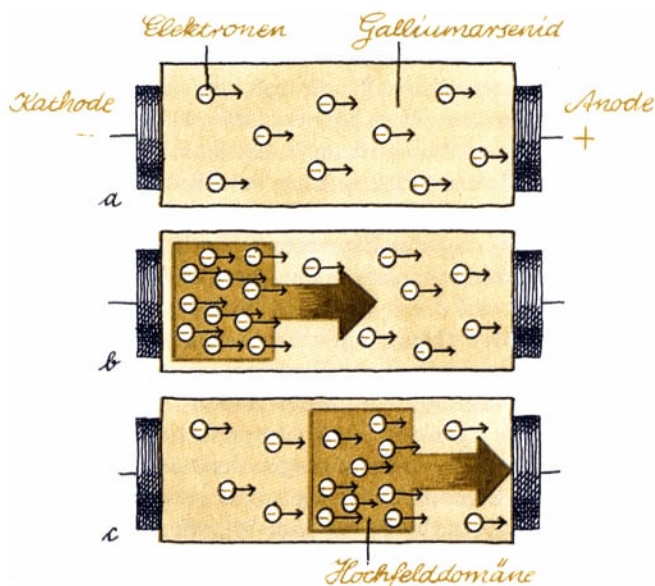
Die Technik integrierter Mikroschaltungen ist heute so weit fortgeschritten, daß es ohne weiteres möglich wäre, die eben beschriebene Schaltung in einem einzigen Siliziumblock von wenigen Quadratmillimetern Grundfläche herzustellen, so daß sie auch rein äußerlich einem einzigen Bauelement entspricht. Dieses Bauelement wäre allerdings einige hundertmal größer als eine Nervenzelle. Man kann nun eine Anzahl solcher Modellneuronen zu komplizierteren Schaltungen zusammensetzen und versuchen, daran Verhalten und Eigenschaften von Neuronennetzwerken zu studieren.

Für den Bau elektronischer Geräte bieten allerdings Modellneuronen von der beschriebenen Art nicht viel Neues, da sie mit den gleichen Bauelementen arbeiten, die auch in üblichen Schaltungen verwendet werden. Sie führen weder zu Vereinfachungen und Verkleinerungen noch zur Erhöhung der Zuverlässigkeit elektronischer Geräte.

Es ist auch möglich, die gefundenen Eigenschaften eines Neurons in mathematischen Gleichungen zu formulieren, das Neuron also durch einen Satz solcher Gleichungen zu beschreiben. Dieser rein theoretische Weg eröffnet die Möglichkeit, das Verhalten größerer Neuronennetze mit den Hilfsmitteln der Computertechnik zu simulieren. Man hat so gefunden, daß vieles für eine statistische Arbeitsweise innerhalb größerer Nervenzentren spricht, daß also für die Vorausberechnung von Arbeitsergebnissen in solchen großen Neuronennetzen Gesetze der Wahrscheinlichkeitslehre angewandt werden können. Manche Forscher vermuten, daß diese statistische Arbeitsweise größerer Neuronennetze tatsächlich ein Grundprinzip in der Natur darstellt.

Zu sehr interessanten Erkenntnissen über neue technische Möglichkeiten durch Übertragung der Grundeigenschaften des Neurons auf geeignete technische Gebilde führte der folgende Weg. Dieser geht von einem Effekt aus, der 1964 von I. B. Gunn entdeckt wurde. Gunn beobachtete an homogenen Plättchen aus Galliumarsenid, die mit zwei Metallkontakten versehen waren, das Auftreten elektromagnetischer Schwingungen, wenn die an den Kontakten anliegende elektrische Spannung einen bestimmten Wert überschritten hatte. Der Gunn-Effekt wurde sofort nach seiner Entdeckung von vielen Forschergruppen untersucht und auch bei einer Reihe anderer Halbleiter gefunden.

Eine ausführliche physikalische Erklärung würde hier zu weit führen.



Entstehen und Driften einer Hochfelddomäne
 a Stromleitung unterhalb der Schwellfeldstärke
 b Hochfelddomäne bildet sich an der Kathode
 c Hochfelddomäne driftet zur Anode

Sein Auftreten hängt von gewissen Zusammenhängen zwischen der elektrischen Feldstärke und der Beweglichkeit der Elektronen im Halbleiter ab. Erfüllen diese Größen bestimmte Bedingungen, treten Stromschwingungen auf. Die Elektronen bewegen sich nicht mehr in einem gleichförmigen Strom von der negativen zur positiven Elektrode, sondern pulsierend. Sie driften in Ladungswolken durch die Halbleiterprobe. Man nennt diese Ladungswolken auch Domänen, und da die Feldstärken für ihr Auftreten sehr hoch sein müssen, spricht man von Hochfelddomänen.

Wir vermerken zunächst die Existenz einer Schwellenfeldstärke, die überschritten werden muß, wenn die Stromschwingungen – die Hochfelddomänen – auftreten sollen. Eine zweite beachtliche Übereinstimmung mit der Impulsleitung in Nervenfasern ist das Auftreten einer Refraktärzeit. Eine zweite Domäne kann sich nämlich erst dann an der Quellelektrode bilden, wenn die erste die Saugelektrode erreicht hat. Die Refraktärzeit hängt also von der Driftgeschwindigkeit und dem Elektrodenabstand ab.

Später hat man festgestellt, daß es verschiedene Mechanismen gibt, die zur Domänenbildung führen. Der von Gunn entdeckte Effekt beruht auf einem dieser Mechanismen. Die Domänen bilden sich im Halbleiter durch

verschiedene Wechselwirkungen zwischen dem Kristallgitter und den in ihm teilweise gebundenen, teilweise frei beweglichen Elektronen. Entsprechend dem jeweiligen physikalischen Prozeß, nach dem gebundene in frei bewegliche Elektronen übergehen können, treten Domänenendriftgeschwindigkeiten von etwa 1 cm/s bis zu 10^7 cm/s auf. Sind die beiden Elektroden etwa 1 mm voneinander entfernt, so kann man Refraktärzeiten zwischen $0,1$ und 10^{-8} s erhalten.

Wir haben gesehen, daß die Eigenschaft des Schwellenverhaltens zu räumlicher und zeitlicher Summation von Impulsen führen kann. Obwohl die Domänenbildung und die elektrischen Prozesse in einer Nervenfasern oder -zelle auf ganz verschiedenen physikalischen Vorgängen beruhen — erstere auf Elektronenbewegungen in Festkörpern, letztere auf Ionenbewegungen durch aktive Membranen —, lassen sich beide Vorgänge nach gleichen Prinzipien für die Verarbeitung von Informationen ausnutzen.

Das ist ein Beispiel dafür, Systemlösungen der Natur auf die Technik zu übertragen, ohne die Besonderheiten biologischer Substanzen und physikochemischer Vorgänge, die an die lebende Materie gebunden sind, nachbilden zu müssen. Allein die Ähnlichkeit in zwei charakteristischen Eigenschaften, dem Schwellenverhalten und dem Auftreten einer Refraktärzeit, gestattet es, Bauelemente zu konstruieren, die bis zu einem gewissen Grade wie ein Neuron funktionieren. Im Unterschied zu dem vorher beschriebenen Neuronenmodell können wir erwarten, daß mit wenigen Bauelementen eine Art Neuron realisierbar wird.

Im Jahre 1968 entwickelten japanische Wissenschaftler ein derartiges elektronisches Bauelement — Neuristor genannt — und stellten es der Öffentlichkeit vor. Es besteht aus Galliumarsenid. Der Domänenendriftkanal zwischen zwei Elektroden ist mit einer dünnen Isolatorschicht überzogen, auf der mehrere Steuerelektroden angebracht sind. Diese Steuerelektroden fungieren als Eingänge. Werden Impulse auf einen oder mehrere dieser Eingänge gegeben, die zum Überschreiten der Schwellenfeldstärke in der elektronenleitenden Galliumarsenidschicht führen, so wird in dieser eine Domäne ausgelöst. Die Saugelektrode stellt den elektrischen Ausgang dar. Durch besondere Gestaltung und Bemessung der Halbleiterschicht und der Steuerelektroden gelingt es, ein dem Neuron ähnliches Logik-Verhalten zu realisieren.

Für die elektronische Informationsverarbeitung bietet sich in den driftenden Hochfelddomänen ein neuer Effekt an, der gegenüber dem Transistoreffekt eine Vereinfachung der Schaltungsintegration bringt, die zu ganz neuen Dimensionen führen könnte. Ein Grund, warum nicht schon längst weitere Ergebnisse auf diesem Wege bekannt geworden sind, liegt darin, daß es äußerst schwierig ist, solche Neuristoren präzise und genügend reproduzierbar für eine Serienfertigung herzustellen.

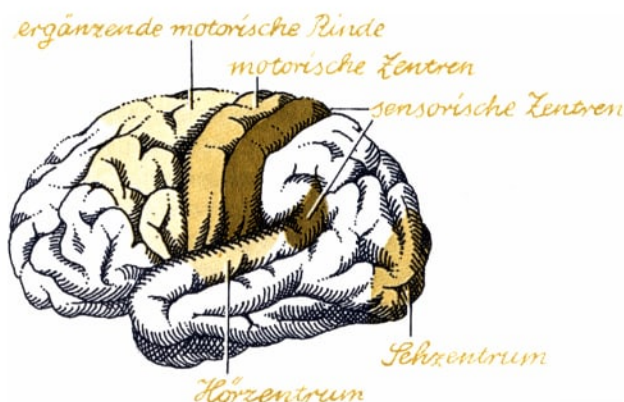
Reflexbögen und Verhaltensprogramme

Vergleicht man Impulsleitungs- und Signalverarbeitungsgeschwindigkeiten in elektronischen Schaltungen und in Neuronennetzen, so findet man, daß die technische Elektronik um mehrere Größenordnungen schneller arbeitet. Die Tatsache, daß das gesamte Zentralnervensystem dennoch pro Zeiteinheit wesentlich mehr Informationen verarbeitet, kann also nicht durch höhere Leitungs- und Schaltgeschwindigkeiten seiner Elemente erklärt werden. Es vollbringt diese Leistungen offenbar durch seine besondere Arbeitsorganisation.

Im Zentralnervensystem von Tieren und Menschen existieren – soweit wir wissen – genetisch programmierte (angeborene) Verbindungen zwischen sensorischen und effektorischen Nervenbahnen, die über unterbewußte Zentren laufen. Beispiele beim Menschen sind der Schluckreflex (koordinierter Ablauf des Schluckens) und der Pupillenreflex (Weitung und Verengung der Pupille entsprechend der einfallenden Lichtmenge). Die Reflexbögen der Rumpf- und Gliedmaßenregion schließen sich z. T. schon im Rückenmark. Die Leitungswege für sensorische und motorische Impulse sind dann besonders kurz und erlauben dementsprechend einen extrem kurzen Reaktionsablauf.

Zu diesen unbedingten Reflexen erwirbt der Mensch durch Lernen und Training von der ersten Stunde seines Lebens an sehr viele bedingte Reflexe und Verhaltensprogramme – koordiniertes Greifen, Gehen, Springen, Schreiben, Sprechen, handwerkliche Fähigkeiten, Autofahren und vieles andere –, die er in der Lernphase über die Großhirnrinde ständig kontrolliert, die aber später, nur durch wenige Befehlsimpulse gesteuert, größtenteils ohne Mitwirken des Bewußtseins ablaufen. Sie sind dann als feste Programme, in unterbewußten Zentren gespeichert, vorhanden, und zwar oft mit sehr großen Variationsbreiten. Der Flugzeugführer muß nicht alle seine späteren Flüge und Flugsituationen im Lernprogramm schon einmal durchexerziert haben. Der Tennisspieler muß nicht alle möglichen Flugbahnen des Balls erlernen. Die Programme werden laufend verbessert und vervollkommenet.

Besonders bemerkenswert ist die Art und Weise, in der die Programme abgerufen werden. Es geschieht gewissermaßen durch Schlüsselinformationen, die diesen Schlüsselcharakter beim Einprägen des betreffenden Programms erhalten haben. Meist genügen als Schlüssel schon Bruchstücke ganzer Informationen. Zum Abrufen der fest eingespeicherten Programme müssen also nicht erst Befehlsimpulse gebildet werden, sondern eintreffende Informationen selbst sorgen für das Aufrufen der dazugehörigen, passenden oder zweckmäßigen Verhaltensprogramme. Informationsteile sind mit Verhaltensprogrammen verknüpft oder assoziiert. Man spricht



Lokalisierte Zentren im menschlichen Gehirn

deshalb von assoziativer Arbeitsweise des Zentralnervensystems. Diese unterscheidet sich grundsätzlich von der Art, nach der in gegenwärtigen Computern gespeicherte Informationen abgerufen werden.

Die hohe Arbeitsgeschwindigkeit des Zentralnervensystems entsteht also in erster Linie durch seine assoziative Organisation, die das gleichzeitige Verarbeiten vieler Informationen gestattet. Wie wir noch sehen werden, setzt sich dieses Prinzip in der Großhirnrinde fort.

Vom Rechenbrett zum assoziativen Computer

Die Entwicklung von Rechenmaschinen ist ein Kapitel in der Geschichte der Technik, das mit einfachen Rechenbrettern und anderen Hilfsvorrichtungen schon recht früh begonnen hat. Mechanische Rechenmaschinen für die vier Grundrechenarten und spezielle Abarten wie Registrierkassen sind schon sehr lange bekannt. Die ersten großen elektronischen Rechenmaschinen wurden in den fünfziger Jahren dieses Jahrhunderts entwickelt und mit Elektronenröhren aufgebaut. Mit ihnen begann die stürmische Entwicklung der elektronischen Datenverarbeitung.

Bald traten Halbleiterdioden und Transistoren an die Stelle der Elektronenröhren. Äußere Abmessungen der Computer und ihr Energiebedarf konnten drastisch verringert werden. Gleichzeitig erhöhte sich ihre Betriebssicherheit.

Ein neuer Qualitätssprung in der Computerentwicklung vollzog sich mit der Einführung integrierter Festkörperschaltkreise. Abermals schrumpften

die Abmessungen der Computer und ihr Energieverbrauch. Ihre Zuverlässigkeit stieg. Man konnte immer größere interne Speicher einsetzen und erreichte immer höhere Rechengeschwindigkeiten.

Diese Entwicklung lief von der Entdeckung des Transistoreffekts (Bardeen und Brattain, 1948) über die Silizium-Planartechnologie bis zu den hochintegrierten Mikroprozessoren der Gegenwart mit einer der Sache innewohnenden Folgerichtigkeit ab, indem alle technischen Möglichkeiten ausgeschöpft wurden und weiterhin ausgeschöpft werden. Erst nachdem ein relativ hoher Leistungsstand der Computer erreicht war, rückten Vorbilder der Natur für neue, höhere technische Zielsetzungen ins Blickfeld. Beispiele dafür trafen wir schon in der Problematik der automatischen Bildauswertung und der maschinellen Zeichenerkennung. Ein anderes Beispiel ist die Entwicklung von Computern, die nach dem Vorbild des Zentralnervensystems in einer assoziativen Arbeitsweise organisiert sind und dadurch Arbeitsgeschwindigkeiten erreichen, die bis dahin übliche Rechner um das 100fache bis 1000fache übertreffen.

Herkömmliche Computer besitzen interne Programm- (Befehls-) und Datenspeicher, außerdem externe Datenspeicher. Haben die internen Speicher Matrixform, so bestehen die Speicheradressen in den Matrixkoordinaten. Für externe (z. B. Magnetband-) Speicher bestehen die Speicheradressen in Ziffern, die Bandnummer und Bandstellung bezeichnen. In abzuarbeitenden Programmen müssen alle Speicheradressen von benötigten Unterprogrammen aus den Programmspeichern und von den dauernd oder vorübergehend gespeicherten Daten enthalten sein. Sie werden vom zentralen Rechenwerk nacheinander abgerufen und verarbeitet.

Im Gehirn dagegen laufen vergleichbare Prozesse nach einem völlig anderen Prinzip ab. In ihm werden Informationen nicht nach Adressen, sondern assoziativ gespeichert und auch wieder abgerufen. Wir suchen und finden Erinnerungen, indem wir an Ähnliches denken oder an gleichzeitig Gelerntes oder Erfahrenes, also an etwas, was mit dem Gesuchten verknüpft – assoziiert – ist.

Im Laufe unserer schulischen und beruflichen Ausbildung erwerben wir sehr viele solcher Verknüpfungen (Assoziationen), meist ganze Assoziationsketten, und brauchen nur geringe Anstöße, um diese sofort reproduzieren zu können. Oft genügt einfach der Wille, die Aufgabenstellung – und wir erinnern uns sofort der Worte einer Fremdsprache, mathematischer Formalismen, Namen und Bilder.

Ein Computer, der nach diesem assoziativen Prinzip arbeiten soll, muß anders als die bisher üblichen aufgebaut sein. Er besitzt keinen großen, zentralen (Adressen-)Speicher und kein zentrales Rechenwerk, sondern er ist in viele kleine Speicher geteilt, denen jeweils kleinere Rechenwerke zugeordnet sind. Operationsprogramme und eingehende Informationen werden

nach charakteristischen Impulsen oder Impulsgruppen, die in ihnen enthalten sind — also nach Merkmalen der Information selbst, nicht nach angehängten Adressen —, auf die verschiedenen Speicher und Rechenwerke der Anlage verteilt, dort meist im wesentlichen gleichzeitig verarbeitet und schließlich zu Ergebnissen zusammengefaßt.

Die Aufgabe, Informationen auf verschiedene Speicherplätze und Rechenwerke zu verteilen, ähnelt einem stufenweise verfeinerten Sortieren der Informationen nach Stichworten. Man könnte auch von automatischer Klassifizierung sprechen. In einem assoziativ organisierten Computer ist diese automatische Klassifizierung durch den Aufbau der Schaltung fest eingebaut. Die Daten gelangen dann automatisch in die richtigen Rechenwerke und finden in den angeschlossenen Speichern die zugehörigen oder passenden und an dieser Stelle verwertbaren Informationen vor.

Prozeßrechner, die nach diesem assoziativen Prinzip arbeiten, sind schon entwickelt und in einzelnen Exemplaren aufgebaut worden. Ihre Arbeitsgeschwindigkeit ist wesentlich höher als die herkömmlicher Datenverarbeitungsanlagen mit Adressenspeichern und linearer Operationsfolge. Eine moderne Anlage führt die Addition von 1000 Datenpaaren in ungefähr 3 ms aus, ein vergleichbarer assoziativer Computer leistet dieselben Additionen in 10 μ s, also 300mal so schnell.

Computer mit so hohen Arbeitsgeschwindigkeiten werden in Forschung und Technik überall dort gebraucht, wo es darauf ankommt, sehr große Informationsmengen in sehr kurzen Zeiten zu verarbeiten, z. B. bei komplizierten Operationen mit Hilfe von Herz-Lungen-Maschinen, wo viele Daten des Patienten ständig kontrolliert werden müssen. Da sind Sauerstoff-, Narkosemittel- und Blutdosierungen zu regulieren sowie Blutdruck, Herz-tätigkeit und Atmung sorgfältig zu überwachen. Ein Computer, der alle diese Funktionen kontrolliert und steuert, muß sämtliche Daten so schnell verarbeiten, daß er mit der Operation Schritt halten kann. Er kann dann die Narkose an der Minimalschwelle halten, die Versorgung des Kreislaufs optimieren und so die Belastung des Patienten während der Operation wesentlich verringern. Fehlbehandlungen des Hilfspersonals werden ausgeschlossen und insgesamt die Erfolgsaussichten für eine derartige Operation erhöht.

Weitere Beispiele für den Einsatz extrem schneller Computer bieten sich bei der automatischen Flugsicherung auf großen Flughäfen, bei der elektronischen Prozeßsteuerung automatisierter Produktionen, in denen laufend große Meßdatenmengen anfallen, oder bei der elektronischen Steuerung von Flugkörpern.

Die Zahl der Fälle, wo die Lösung technischer Probleme direkt die mit ablaufenden Vorgängen Schritt haltende Arbeitsgeschwindigkeit eines Computers (»real life processing«) erfordert, wird in Zukunft noch viel grö-

ßer werden. Automatische Bildauswertung und Zeichenerkennung oder mit zahlreichen Sensoren ausgerüstete Industrieroboter wären z. B. sinnlos, wenn dahinter nicht eine ausreichend schnelle Informationsverarbeitung stünde. Die Anwendung des assoziativen Prinzips in der Organisation eines Computers ist ein wesentlicher Schritt, möglicherweise sogar der entscheidende zur Lösung dieses Problems.

Rätsel um das Gedächtnis

Das Zentralnervensystem ist in der Lage, neue, von den Sinnesorganen aufgenommene Informationen zu verarbeiten, diese mit bereits gespeicherten zu verknüpfen und auf diese Weise richtig in seine Speicher einzuordnen. Es kann also immer wieder neue Informationen aus der Außenwelt aufnehmen und neue Assoziationen herstellen. Diese Fähigkeit macht es zum lern- und anpassungsfähigen (adaptiven) System, das sich von dem vorher beschriebenen assoziativen Computer eben durch diese Fähigkeit wesentlich unterscheidet.

Von frühester Kindheit an nimmt das menschliche Gehirn Reize auf, lernt ihre Bedeutung kennen, speichert sie als Informationen und verknüpft diese mit bereits vorhandenen. Auf diese Weise entsteht das sich ständig erweiternde, verfeinernde, durch immer neue Korrekturen verbesserte innere Modell der Außenwelt. Dabei werden nicht nur Informationen in den Speichern gesammelt und neue mit schon vorhandenen assoziiert. Durch Lernen wird die Abrufbarkeit der gespeicherten Informationen verbessert, die Zahl der Verknüpfungen zwischen verschiedenen Informationen wird erhöht, und neue Verarbeitungsprogramme für Informationskomplexe werden gebildet. Auf diese Weise paßt sich das Zentralnervensystem immer wieder neuen Erfahrungen an und verleibt sie sich ein. Dies ist die Grundlage für die enorme Leistungsfähigkeit des Menschen.

Aufbau und Wirkungsweisen biologischer Informationsspeicher, insbesondere das menschliche Gedächtnis, sind seit langem Gegenstände intensiver Forschungen, die zunächst wenig mit einer Vorbildsuche für die Technik zu tun haben. Sie stellen vielmehr in erster Linie reine Grundlagenforschung in den biologischen Wissenschaften dar, haben aber überdies hohe praktische Bedeutung für Pädagogen, Psychologen und Mediziner sowie für deren Aufgaben.

Man kann umgekehrt fragen, ob unsere Kenntnisse über technische Informationsspeicher für die Aufklärung des biologischen Gedächtnisses nützlich sein können, so wie in zahlreichen anderen Fällen technisches Wissen viel zum Verständnis biologischer Strukturen und Funktionen beigetragen hat. Aber auch in dieser Hinsicht besteht nicht viel Hoffnung.

Technische Informationsspeicher sind auf der Basis elektrischer oder magnetischer Effekte in Festkörpern entwickelt worden. Bekannte und vielfach angewendete Formen sind Ferritkernspeicher, Magnetdrahtspeicher, Halbleiterspeicher (deren Elemente aus Transistoren bestehen) und – noch in Entwicklung befindlich – magnetische Blasenspeicher. Als Langzeitspeicher seien auch Magnetbänder und Schallplatten erwähnt. Man kann kaum erwarten, die festkörperphysikalischen Effekte in den völlig anders aufgebauten biologischen Strukturen wiederzufinden.

Gewisse Beziehungen zur biologischen Informationsspeicherung könnte man in der holographischen Daten- und Bildspeicherung sehen. In dieser wird ein mit Informationen modulierter Laserstrahl über einen lichtempfindlichen Film geführt, auf dem entsprechend der Strahlmodulation ein Schwärzungsbild, das Hologramm, entsteht. Letzteres kann zu irgendeinem späteren Zeitpunkt wiederum mit einem gleichen Laser durchstrahlt und abgelesen werden. Die erwähnten Beziehungen betreffen z. B. die Vielfachspeicherung im Hologramm, die man auch im Gehirn vermutet. Speicherstrukturen, Einschreib- und Lesevorgänge dagegen sind in biologischen Speichern sicher von grundsätzlich anderer Art.

Früher nahm man an, daß die Informationsspeicherung im Gehirn auf der Basis kreisender Erregungen in Neuronennetzen erfolgt. Dieses Prinzip ist auch aus der Speichertechnik in der Form der sogenannten Umlaufspeicher bekannt. Bei Untersuchungen an Tiergehirnen fand man tatsächlich ringförmige Schaltstrukturen, die diese Hypothese zu bestätigen schienen. Die Speicherung einer Information muß dann in der Verstärkung und Befestigung ganz bestimmter neuronaler Schaltverbindungen bestehen. Das müßte sich an der Verdickung bestimmter Synapsen beobachten lassen. Es gibt auch gewisse Hinweise in dieser Richtung, aber noch keine gesicherten Erkenntnisse.

Möglicherweise gründet sich die kurzzeitige Konservierung von Informationen – der biologische Kurzzeitspeicher – auf umlaufende elektrische Erregung in Neuronennetzen, die sich bei mehrfachem Durchgang bestimmter Impulsfolgen ausbilden.

Eine Langzeitspeicherung von Informationen nach diesem Prinzip wird jedoch durch eine Reihe von Experimenten sehr in Frage gestellt. Tiefe Narkose und Unterkühlung des Hirns, die zum Verschwinden der Gehirnströme führen, beeinträchtigen das Langzeitgedächtnis nicht. Auch Elektrokrampfschocks lassen es unbeeinflußt.

Wesentlich neue Ergebnisse zum Problem der biologischen Informationsspeicherung haben neurochemische und molekularbiologische Forschungen erbracht. Sie weisen darauf hin, daß die Informationsspeicherung im Zentralnervensystem ähnlich der Speicherung von Erbinformationen in den DNS-Molekülen auch an makromolekulare Strukturen gebun-

den ist, daß also die biologischen Langzeitspeicher auf einer Fixierung von Informationen in Molekülstrukturen innerhalb der Neuronen beruhen.

Um diese Hypothese zu stützen, wurden verschiedene interessante Tierversuche durchgeführt (z. B. Rattendressurversuche von Ungar), die eine Informationsfixierung in Proteinen nachweisen sollten. Im Grunde beweisen diese Versuche aber nur, daß bei verstärkter Gehirntätigkeit auch verstärkt RNS-Produktion und Proteinsynthese an den RNS-Molekülen innerhalb der Neuronen stattfinden.

Die Informationsspeicherung in makromolekularen Strukturen kann also zur Zeit nicht als bewiesen gelten, soweit es das Langzeitgedächtnis betrifft. Dagegen wird die Speicherung von Erbinformationen im Molekül der Desoxiribonukleinsäure (DNS) allgemein als Tatsache anerkannt. Dabei ist die ungeheure Speicherkapazität bemerkenswert. Sie wird auf $3 \cdot 10^6$ bit/mm eines DNS-Moleküls geschätzt. Auf einem Magnetband haben wir zum Vergleich 128 bit/mm. Dieser Zahlenvergleich zeigt schon, wie interessant biologische Informationsspeicher für die Technik sein könnten. Vorläufig bleibt aber abzuwarten, was die weitere Erforschung des biologischen Gedächtnisses, seiner Strukturen und Funktionsweisen ergeben wird.

Lernfähige Automaten

Der vorher erläuterte assoziative Computer, der Arbeits- und Speicherorganisation nach dem Vorbild des Zentralnervensystems besitzt und damit eine superschnelle Arbeitsweise erreicht, ist dennoch von der Gesamtleistung eines menschlichen Gehirns weit entfernt. Er mag bestimmte Operationen zuverlässiger und wesentlich schneller ausführen, erhält aber sein gesamtes Arbeitsprogramm von außen. Auch als Industrieroboter, ausgerüstet mit einer mehr oder weniger großen Anzahl von Sensoren, kann er nur die in einem oder mehreren Programmen eingegebenen Sollwerte von Meßdaten einhalten oder programmierte Abläufe vollziehen.

Lernfähige Automaten dagegen müßten in der Lage sein, ihnen zugängliche neue Informationen so zu verarbeiten, daß sie zu verbesserten internen Arbeitsprogrammen führen. Sie würden sich damit an äußere Bedingungen, auch an solche, die sich mit der Zeit ändern, immer wieder anpassen können. Sie würden anpassungsfähige Systeme darstellen. Ein lernfähiger Automat könnte, ausgehend von relativ einfachen Arbeitsprogrammen, diese selbst verfeinern, optimieren und variieren. Dazu ist notwendig, daß dem Automaten alle erforderlichen Informationen aus seiner Außenwelt, z. B. aus dem zu steuernden Prozeß, über geeignete Sensoren zufließen. Das Entwickeln von optimalen, den äußeren Bedingungen angepaßten Arbeitsprogrammen im Computer entspricht dem Entstehen und ständigen

Vervollkommen des inneren Bildes der Außenwelt, das sich der Mensch durch fortgesetzte Lernprozesse schafft.

Einfache, in beschränktem Maße lernfähige Automaten sind bereits seit einer Reihe von Jahren als sogenannte kybernetische Spielzeuge bekannt, so z. B. die Maschine von C. Shannon, die das Verhalten einer Maus in einem Labyrinth imitiert. Die »Maus« besteht aus einem mit Rädern versehenen, magnetischen Eisenstück, das sich auf einer Metallplatte bewegen kann, auf der die Wände eines Labyrinths befestigt sind. Unterhalb der (nichtmagnetischen) Platte befindet sich ein Führungsmechanismus, der mit Hilfe eines Magneten die Maus in Bewegung setzt. Anfangs fährt die Maus ganz zufällig in irgendeine Richtung. Stößt sie an eine Wand, so führt sie eine Drehung um 90 Grad aus und bewegt sich in die neue Richtung bis zum nächsten Anstoß und so fort. Jeder Anstoß wird einem Computer gemeldet und dort als Erfahrung der Maus gespeichert. Auf diese Weise wird in den Speicher des Computers für die von der Maus erforschten Felder des Labyrinths ein Steuerprogramm eingeschrieben. Beim zweiten Durchlaufen gelangt die Maus mit wesentlich weniger Anstößen ans Ziel. Auf einem bestimmten Feld angekommen, meldet sie die Feldkoordinaten an den Steuercomputer. Die der quadratischen Form jedes Feldes entsprechenden vier Drehmöglichkeiten werden abgefragt und das Ergebnis als Steuerbefehl an den Führungsmechanismus der Maus geleitet. Nach wenigen Durchläufen ist das Steuerprogramm so vervollständigt, daß sie das Labyrinth ohne Fehler passiert. Die Maus hat »gelernt«, sich durch den Irrgarten zu bewegen.

Der Umfang dessen, was ein lernfähiges System zu lernen imstande ist, hängt wesentlich von der Kapazität seiner Informationsspeicher ab, aber auch von Art und Zahl der Informationen über die Außenwelt.

Schließlich ist für das Erlernbare auch der Leistungsumfang des effektiven Teiles eines Automaten ausschlaggebend. Die Maus von Shannon kann nur durch das Labyrinth laufen. Ein lernfähiger Automat (Roboter) mit den Sensoren und Effektoren des sowjetischen Mondmobils Lunochod (dieses war nicht lernfähig, sondern ferngesteuert) könnte wesentlich mehr leisten. Führende Kybernetiker haben wiederholt festgestellt, daß gegenwärtig keine theoretischen Grenzen für das Leistungsvermögen lernfähiger Automaten zu erkennen seien, daß dieses eben nur von ihrer technischen Ausstattung bestimmt wird.

Der Elementarprozeß des Lernens ist die Herstellung einer Verknüpfung, einer Assoziation zwischen einem zunächst unbekannten Reiz (bei Mensch und Tier) bzw. einer unbekannten Impulsfolge (für den Automaten) und einer im Speicher bereits vorhandenen Information. Letztere kann man auch als Bedeutung verstehen, obwohl meist erst aus mehreren Assoziationen die wirkliche Bedeutung hervorgeht.

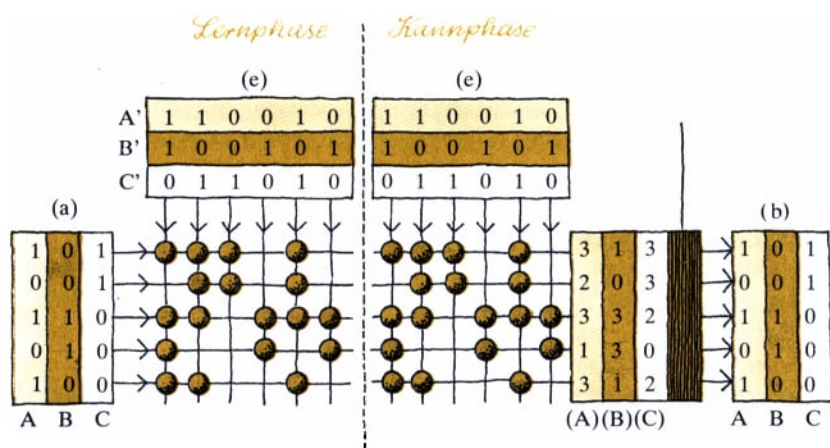
Solche Verknüpfungen entstehen innerhalb des Zentralnervensystems in großen Mengen und ergeben all die Verhaltensprogramme und Assoziationsketten, die Wissen und Können des Menschen ausmachen. Wir wissen noch nicht, wie solche Verknüpfungen im Zentralnervensystem entstehen und wie sie materiell oder strukturell manifestiert sind. Wir wissen, daß sie sich auch wieder lösen können, nämlich dann, wenn bestimmte Fertigkeiten lange nicht ausgeübt werden, bestimmte Assoziationen lange nicht abgerufen worden sind. Wir können verlernen und vergessen.

Unabhängig davon, ob wir die Art der materiellen Fixierung von Assoziationen in biologischen Strukturen kennen oder nicht, können wir schon aus der Erkenntnis, daß es solche materiellen Verknüpfungen geben muß, die Elementarbausteine lernfähiger Computer ableiten. Sie müssen aus Elementen mit jeweils zwei Eingängen und einem Ausgang bestehen und so beschaffen sein, daß zwischen dem ersten Eingang und dem Ausgang eine dauernde Verbindung besteht, zwischen dem zweiten Eingang und dem Ausgang aber erst eine Schaltverbindung ausgebildet wird, nachdem einmal oder mehrmals an beiden Eingängen gleichzeitig elektrische Impulse eintreffen. Das Herstellen der Schaltverbindung ist als Lernphase zu verstehen. In der Kannphase genügt ein Impuls am zweiten Eingang des Elements, um einen Ausgangsimpuls zu erhalten.

Aus solchen Verknüpfungselementen können dann integrierte Bauelemente in Matrixform (Lernmatrix) aufgebaut werden. An die beiden Eingänge einer solchen Lernmatrix würden dann z. B. ein Zeichen oder Begriff und seine Bedeutung oder ein Wort und seine Übersetzung gegeben. Die Matrix würde beide verknüpfen, also die Bedeutung »lernen«.

Die Lernmatrix wurde als theoretisches Modell von Steinbuch entwickelt. Sie stellt eine Möglichkeit zur Realisierung lernfähiger Computer dar. Dazu müßten dann viele solcher Lernmatrix-Bausteine in Gruppen und diese wieder in übergeordnete Gruppen zusammengefaßt werden. Ein lernfähiger Computer würde aus 10 000 oder noch viel mehr — je nach beabsichtigter Leistungsfähigkeit — solcher Matrixbausteine bestehen.

Zur Realisierung von technischen Verknüpfungselementen sind verschiedene physikalische Effekte geeignet. Als relativ aussichtsreich wird gegenwärtig die Leitwertänderung einer elektrolytischen Zelle angesehen. Eine andere Realisierungsmöglichkeit bietet ein Dünnschichttransistor auf ferroelektrischem Substrat (Triglycinsulfat), der 1967 in der Fachliteratur vorgestellt wurde. Dieser Transistor kann durch Spannungsimpulse reversibel seine Steilheit (Ausgangsstromänderung pro Steuerspannungsänderung) im Verhältnis 1000 : 1 ändern. Seine Schaltzeiten liegen im Bereich von Mikrosekunden. Die geringe Steilheit würde dem Anfangszustand am Beginn der Lernphase entsprechen. Hohe Steilheit, also hoher Verstärkungsgrad, würde die Kannphase repräsentieren.



Lernmatrix

Am Eingang (e) gehen verschiedene Informationen A', B', C' ein. Ihre Bedeutungen A, B, C werden in der Lernphase von (a) gleichzeitig eingegeben. In der Kannphase erscheinen sie automatisch am Ausgang (b).

1 = Impuls, 0 = kein Impuls

Verknüpfungen entstehen dort, wo Impulse von (e) und (a) gleichzeitig eintreffen.

Außer diesen gibt es noch eine Reihe anderer Wege. Auch die Lernmatrix ist nur ein Weg unter anderen. Sie zeigen, daß es prinzipiell möglich ist, lernfähige Schaltungen in den Dimensionen der Mikroelektronik zu entwickeln. Dabei sollten wir uns daran erinnern, daß es für den Anfang dieses Weges nur nötig war, die Prinzipiellösung der Natur – die Verknüpfung – zu erkennen.

Zur Zeit stehen der technischen Realisierung derartiger Verknüpfungselemente große Schwierigkeiten im Wege. Es ist noch nicht gelungen, geeignete Technologien zu entwickeln, nach denen sie ausreichend stabil, reproduzierbar und kostengünstig hergestellt werden könnten. Wir wissen aber aus der Geschichte der Technik, daß ähnliche Probleme an den Anfängen vieler Entwicklungen standen, die heute gemeistert sind. Wir dürfen also erwarten, daß auch in diesem Falle die Entwicklung zu lernfähigen Computern ihren Fortgang finden wird.

Es ist heute schwer zu übersehen, wie unsere Technik, wie das gesamte menschliche Leben einmal aussehen wird, wenn wir in der Lage sein werden, lernfähige Computer in vielen Formen zu bauen und einzusetzen. Am ehesten ist noch der Einsatz derartiger Geräte als Prozeßrechner vorauszu- sehen. Betrachten wir z. B. einen lernfähigen (adaptiven) Computer, der einen großchemischen Prozeß steuert. Im Unterschied zu einem nichtlern-

fähigen Prozeßrechner kann der lernfähige Automat seine Arbeit mit relativ wenigen Startinformationen beginnen. Diese bestehen aus Ziel- und Randwertdaten für den zu optimierenden Prozeß. Informationen über den zu steuernden Prozeß selbst erhält der Automat von Meßsonden, etwa Temperatursensoren, Manometern, Durchflußmengenmessern und Analysatoren für die Qualität des Endprodukts. Mit Hilfe dieser Informationen und der eingegebenen Zielwerte erlernt er nun selbständig das optimale Steuerprogramm für den Prozeß und korrigiert dieses so lange, bis Soll- und Ist-Werte übereinstimmen.

Für den nichtlernfähigen Prozeßrechner muß das optimale Steuerprogramm vorher bestimmt und ihm eingegeben werden. Er vermag nur, kontrollierte Meßgrößen, wie Temperatur, Druck und Durchflußmenge, zwischen vorgegebenen Grenzwerten zu halten. Der lernfähige Prozeßrechner dagegen »erkennt« aus Informationen über die Endprodukte das Ergebnis seiner Arbeit und verbessert es ständig.

Hat der Prozeßrechner die Lernphase hinter sich, so kennt er die Zusammenhänge zwischen den Zielgrößen des Prozesses und den Prozeßparametern. Würde sich nun z. B. nach einiger Zeit die Qualität eines oder mehrerer Ausgangsstoffe ändern, so würde der adaptive Rechner – immer vorausgesetzt, daß er Sensoren besitzt, die ihm diese Änderungen melden – sein Steuerprogramm sofort an diese neuen Bedingungen anpassen. Ebenso würde er bei veränderten Zielbedingungen das diesen entsprechende optimale Programm wieder selbständig auffinden. All das geschähe mit der Sicherheit und Zuverlässigkeit des Automaten, der nichts vergißt, nichts übersieht und nie ermüdet.

Lernfähige Automaten würden sich weite Bereiche für hocheffektive Anwendungen erobern. Lernfähige Prozeßrechner der eben besprochenen Art wären nur eine erste Stufe dieser Entwicklung. Der menschlichen Technik würden sich völlig neue Perspektiven eröffnen. Ganze automatisch gesteuerte und an wechselnde Betriebsbedingungen anpassungsfähige Produktionsstätten sind denkbar.

Menschen hätten in solchen automatischen Betrieben nur Aufgaben der Aufsicht und Wartung. Wenige spezialisierte Fachleute würden genügen.

Diese technische Entwicklung muß zu starken Verschiebungen der Schwerpunkte menschlicher Arbeit führen. Für wechselseitige Dienstleistungen stünden mehr Kräfte zur Verfügung. Allgemeine und Fachausbildungen könnten mehr Aufwand und Zeit beanspruchen. In sozialen Bereichen des gesellschaftlichen Lebens könnten mehr Menschen tätig sein.

Aber auch in all diese Bezirke menschlichen Lebens werden lernfähige Computer einziehen als automatische Konstrukteure, als Sprachenübersetzer, Auskunftautomaten und Spielcomputer. In Schul- und Fachausbildung werden ganz neue Formen und Methoden zu entwickeln sein, die sich

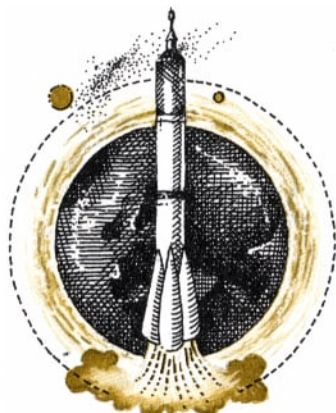
der vielen Möglichkeiten lernfähiger Computer als Lernhilfen bedienen. Denken wir diese Gedanken weiter, so gelangen wir leicht ins Phantastische und Spekulative, z. B. zu der Frage, ob wir einer Welt der Computer entgegensehen, in der der Mensch nur noch eine untergeordnete Rolle spielt, vielleicht sogar überflüssig wird.

Es hat aus mehreren Gründen wenig Sinn, Prognosen der technischen Entwicklung in solche Richtungen zu entwickeln. Der Mensch, der alle diese Automaten konstruieren und bauen wird, bestimmt selbst deren Einsatzbereiche und Grenzen. Er entscheidet damit in voller Verantwortung über seine Zukunft. In erster Linie sind es also nicht technische Möglichkeiten, sondern grundsätzliche Entscheidungen in der Gesellschaftspolitik, die die menschliche Zukunft mitsamt ihren technischen Perspektiven beeinflussen. Diese fundamentale Tatsache muß besonders im Zusammenhang mit den hier diskutierten technischen Fragen immer wieder betont werden.

Überdies wird die Entwicklung der Automaten, werden ihre zukünftigen Einsatzbereiche – und man wird doch nur entwickeln, was dann auch zu mehr oder weniger breiter Wirkung zu bringen ist – von anderen, wahrscheinlich einschneidenden Randbedingungen der Technik bestimmt werden, über die wir in vorangegangenen Kapiteln berichtet haben. Denken wir an Rohstoffprobleme, an Energieversorgung oder auch an die Erhaltung einer menschenwürdigen Umwelt. Automaten sind Werkzeuge des Menschen und sollen bei aller Vollkommenheit, die sie erreichen können, Werkzeuge bleiben. Mit ihrer Hilfe wird sich die Gesellschaft auf der Erde ein menschenwürdiges Dasein gestalten.

8. Kapitel

Menschliche Ziele - menschliche Verantwortung



Rückblick und Ausblick

Unser Streifzug hat uns von der Bautechnik über die Chemie bis zur Computertechnik geführt. Viele Beispiele haben gezeigt, daß für die Lösung von Problemen aus vielen Bereichen der Technik bemerkenswerte, manchmal verblüffende Vorbilder in der Natur zu finden sind. Es sind zwar nicht solche, die einfach kopiert werden können, sie zeigen aber – und darin liegt ihr Wert – prinzipielle Möglichkeiten und Lösungen, die einzubeziehen sind, wenn neue technische Projekte in Angriff genommen werden sollen.

Andererseits ist das Vorbild Natur längst noch nicht erschlossen. Vielmehr werden immer leistungsfähigere Geräte und Forschungsmethoden entwickelt, um Objekte der belebten Natur auf höherer Stufe zu erkunden, z. B. die Strukturen organischer Makromoleküle, die Sensoren der Insekten und Wirbeltiere oder die Funktionen der Nervenzellen. Zwischen Technik und biologischer Forschung werden die wechselseitigen Beziehungen immer enger.

Trotz gewisser negativer Aspekte der Vorbilder der Natur bietet sich für die Techniker fast aller Spezialgebiete in den Resultaten biologischer Forschung eine ungeheuer reiche Fundgrube dar, in der optimierte Lösungen für zahllose Probleme unserer Technik enthalten sind.

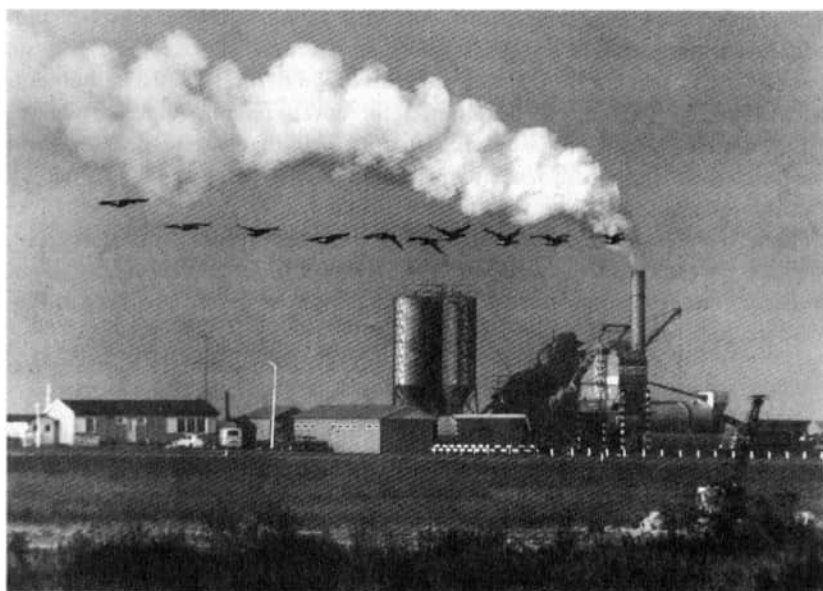
Betrachten wir den Stand der Technik, so könnte man sich bei einer ganzen Reihe von Problemen fragen, warum sie heute auf der Tagesordnung stehen und nicht schon vor fünfzig oder hundert Jahren erkannt wurden. Verfolgen wir bestimmte Entwicklungswege in der Geschichte der Technik zurück, so finden wir zwar Hauptlinien, die kaum wesentlich anders hätten verlaufen können – etwa die Entwicklung der Elektrotechnik oder die Erforschung der Strukturen der festen Stoffe bis zum Bau der Atome mit all ihren Anwendungen in Metallurgie, Chemie und Werkstoffforschung. Es gibt aber auch Beispiele dafür, daß aktuelle Probleme ebenso gut schon vor mehreren Jahrzehnten hätten verfolgt werden können. Zu ihnen gehört die technische Nutzung der Sonnenenergie. Technische Voraussetzungen und auch Bedarf dafür gab es schon vor hundert Jahren. Sogar an Erfindern, die sich einschlägiger Aufgaben angenommen hatten, mangelte es nicht. Der genannte Freiherr von Tschirnhaus war nur einer von ihnen. Sie erfuhren aber keine Unterstützung; ihre Ideen wurden nicht gefördert und blieben so lange Zeit ungenutzt. Wir wissen nicht, wieviel wertvolle Ideen auf diese Weise verlorengegangen sind.

Ein weiteres Beispiel ist die Schädlingsbekämpfung mit biologischen Mitteln. Viele erst heute angewandte Methoden hätten ebenso gut schon vor mehreren Jahrzehnten praktiziert werden können. Ebenso waren schon vor fünfzig Jahren technische Möglichkeiten zur Reinigung von Industrieabwässern und zu einer zumindest teilweisen Filterung von Abgasen vorhanden.

Diese und ähnliche Beispiele zeigen deutlich, wie in der Vergangenheit, und in den Staaten des kapitalistischen Wirtschaftsbereiches heute noch, das kapitalistische Grundgesetz die Entwicklung der Technik bestimmt. Nach diesem Gesetz wird Geld nur dort ausgegeben, wo maximaler Profit zu erzielen ist. Ziele des Allgemeinwohls der menschlichen Gesellschaft bleiben dabei vollkommen außer Betracht. Dasselbe gilt für die Ausbeutung der irdischen Rohstoffquellen. Für den Privatunternehmer ist der billigste Rohstoff auch der beste, gleichgültig, aus welcher Quelle er stammt. Gesellschaftliche Maßstäbe oberhalb von Angebot und Nachfrage existieren im Kapitalismus nicht. Der Kapitalist sieht auch dem Anwachsen der Müllhalden gleichgültig zu. Sie stören seine Profitinteressen nicht. Er fördert mit Werbemethoden eher noch Wegwerfideologie und übertriebenen Konsum und muß das tun, um im Konkurrenzkampf bestehen zu können.

Technische Entwicklung vollzieht sich also nicht einfach durch Entdeckungen und Erfindungen genialer Forscher und Ingenieure. Diese liefern nur die Möglichkeiten der Entwicklung. Zwischen diesen Möglichkeiten erfolgt die Wahl, die Entscheidung durch die Interessen der herrschenden Gesellschaftsschicht.

Wir müssen heute erhebliche technische Fehlentwicklungen feststellen,



Ziehende Graugänse im Industriegebiet

die durch diese historischen Bedingungen entstanden sind. Auch die sozialistischen Staaten müssen sich auf ihren Territorien mit diesem kapitalistischen Erbe auseinandersetzen und oft feststellen, daß seine Überwindung nicht leicht ist und viele Jahre braucht. Die sozialistische Gesellschaftsordnung bietet aber die Gewähr, daß diese Fehlentwicklungen überwunden werden und neue Mängel der Technik solchen Ausmaßes nicht entstehen. Sie bietet die Gewähr, weil ihr Grundgesetz verlangt, daß das Wohl der großen Mehrheit der Menschen Maßstab aller ihrer Entscheidungen ist.

Die Verantwortung des Menschen besteht dann nicht nur darin, Mißbrauch von naturwissenschaftlichen Ergebnissen zu verhindern, eine Technik der friedlichen Entwicklung der Menschheit zu gestalten und egoistischen Interessen Einhalt zu gebieten, die nicht dem Allgemeinwohl dienen, sondern darüber hinaus muß der Mensch möglichst weit vorausschauen, wohin ihn bestimmte Entwicklungstendenzen führen werden.

Unsere Technik hat Dimensionen erreicht, in denen sie auf vielfältige Weise in ökologische Gleichgewichte der Natur und des ganzen irdischen Lebensraumes eingreifen kann. Es wird eine der wichtigsten Aufgaben zukünftiger technischer Projekte sein, solche Eingriffe möglichst vollkommen zu übersehen und im voraus so zu berücksichtigen, daß Schäden in der natürlichen Umwelt vermieden werden.

Wir haben gesehen, daß schon heute eine ganze Reihe technischer Entwicklungslinien mit derartigen Problemen beladen ist. Die sozialistische Gesellschaftsordnung bietet zwar die Grundlage dafür, technische Fehlentwicklungen zu vermeiden, sie schafft alle Voraussetzungen dazu, aber es bleibt die Aufgabe für Wissenschaftler und Techniker, richtige, genügend weitreichende Prognosen zu entwickeln, Einseitigkeiten durch kollektive Zusammenarbeit zu verhindern und wirklich alle Konsequenzen einzubeziehen. Wir können nicht erwarten, daß das alles automatisch geschieht, vor allem deshalb nicht, weil wir uns nie mit Erreichtem zufriedengeben werden, sondern immer neue Ziele abstecken, neue große Projekte in Angriff nehmen werden.

Abenteuer Technik

Nur der Kurzsichtige kann meinen, daß wir mit unserer modernen Technik, ihren automatisierten Fertigungslinien, ihren Computern und Industrierobotern — immer vorausgesetzt, daß es gelingt, den Frieden zu bewahren und Mißbrauch technischer Errungenschaften zu verhindern — einem Zustand des Überflusses an technischen Gütern, an Leistungen einer überdimensionalen Technik und an unausgefüllter Freizeit entgegengehen. Daß es nicht so sein wird, sagen uns die vielen Probleme und Aufgaben der Technik, vor die wir uns in den kommenden Jahrzehnten gestellt sehen.

In vielen Bereichen sind die Schritte zu Neuem und Unbekanntem schon im Gange. Sie versprechen weite Felder für das immer wieder junge Abenteuer Technik.

Die Erforschung der Meere, ihrer Strömungen und Lebewesen, der Meeresböden und Festlandsockel steckt, gemessen an den Weiten und Tiefen des mit Wasser bedeckten Teils der Erde, trotz vieler Bemühungen und Erfolge, erst in den Anfängen. Die Gründe der Ozeane bergen viele Bodenschätze, eine geheimnisvolle Tierwelt, versunkene Zeugen vergangener Jahrhunderte und Nahrungsquellen für uns. Der Zugang zu diesen Arbeitsfeldern und Abenteuerbereichen ist nicht leicht, und es werden gewaltige technische Leistungen erforderlich sein, um sie zu erschließen.

Die Erdrinde — Festland und Meeresböden — besteht aus einer Kruste erstarrten Gesteins, die den glühend heißen, weichen Erdkern umschließt. In dieser Kruste finden ständig Verschiebungen statt, die durch Erd- und Seebeben angezeigt werden. Tätige Vulkane werfen von Zeit zu Zeit heiße Asche und flüssiges Gestein aus als Zeugen für die Beschaffenheit des Erdinneren. Erdteile und Meeresböden schwimmen als riesige Schollen auf der Masse geschmolzenen Erzes des Erdkerns. Wir leben seit Jahrtausenden auf diesen Schollen, wissen aber noch recht wenig über sie. Bohrungen ha-

ben nur an wenigen Stellen Tiefen über 10 km erreicht. Vorstößen zu tiefer liegenden Rohstoffen stehen Schwierigkeiten entgegen.

In der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts begann die aktive Erforschung des erdnahen Weltraumes. Erste Gesteinsproben vom Erdmond brachten neue Aufschlüsse über unser Sonnensystem. Raumsonden zu einigen Planeten sandten physikalische Meßdaten über deren Atmosphären und Oberflächen zur Erde. Die direkte technische Nutzung der Raumfahrt ist schon im Gange. Nachrichten- und Wettersatelliten umkreisen die Erde. In Raumstationen wurden interessante Versuche für neue Technologien im schwerelosen Zustand durchgeführt. Raumstationen bieten Basen für astronomische Beobachtungen außerhalb der Erdatmosphäre. Die Möglichkeiten, die sich daraus für die weitere Erforschung des nahen und fernen Weltraums ergeben, lassen sich hier in Kürze gar nicht aufzählen. Wir werden mehr über die kosmische Materie, über das Rätsel der Sternentstehung und über ferne Welten erfahren.

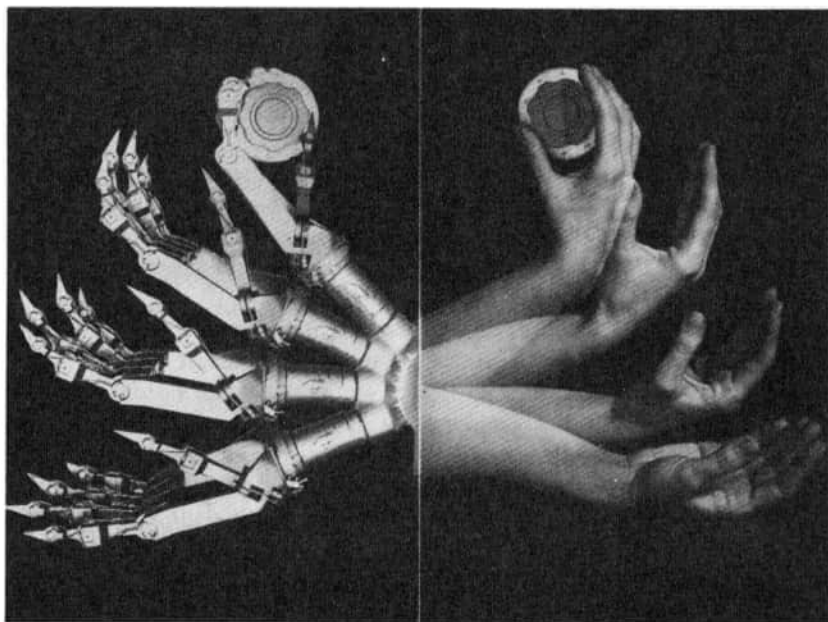
Aber auch Rätsel der irdischen Materie sind noch zu lösen. Insbesondere die organischen Makromoleküle mit ihren vielen erstaunlichen Eigenschaften so zu erschließen, daß sie als Wirkstoffe in neuen chemischen Technologien, etwa als hochleistungsfähige Katalysatoren oder in Form von aktiven Membranfiltern, eingesetzt werden können, stellt eine Aufgabe für mehrere Generationen von Chemikern dar.

Die ungeheure Anpassungsfähigkeit vieler Bakterien eröffnet technologische Möglichkeiten, deren Nutzung eben erst begonnen hat. In Verbindung mit großen technischen Projekten treten neuartige Forderungen an viele andere Forschungsgebiete heran — an die Werkstoffforschung, an die Gerätetechnik und an die Elektronik, um nur einige zu nennen.

An all diesen Entwicklungen, die zum großen Teil heute schon begonnen haben, arbeitet jeder von uns in irgendeiner Weise mit, denn alle die vielen schon vollbrachten oder erst projektierten oder vielleicht nur in Aussicht genommenen wissenschaftlich-technischen Leistungen können in unserem Zeitalter hoch differenzierter Arbeitsteilung nur durch das Zusammenwirken aller Menschen entstehen, wobei die Kindergärtnerin, der Busfahrer, der Verkehrspolizist, der Bäcker und viele andere genauso ihren Anteil haben wie der Weltraumpilot, der Bohringenieur und der Astrophysiker. Sie alle haben deshalb auch ein gut begründetes Recht zu erfahren, was in der modernen Technik vor sich geht.

Dieses Buch wollte einen kleinen Beitrag zu dieser Information leisten. Es gibt Eingriffsmöglichkeiten an vielen Stellen, wo jeder dazu beitragen kann, daß unsere Technik eine sinnvolle, friedliche, menschenwürdige Technik bleibt, eine Technik des sparsamen Umgangs mit Ressourcen, eine Technik innerhalb der natürlichen Gleichgewichte, eine Technik des friedlichen Wettstreits der Völker unserer Erde.

Vorbilder der Natur für eine solche Technik können uns dabei viele Richtlinien weisen, viele Anregungen geben. Sie sinnvoll zu nutzen ist manchmal nur eine Rückbesinnung auf längst Bekanntes, in der Hauptsache aber ein wesentlicher Teil in vielen neuen Forschungskonzeptionen. Sie werden eingehen in neue Baukonstruktionen, in kleine und große Projekte der Energieversorgung, in Chemie und Werkstoffforschung, sie werden Geräte- und Meßtechnik bereichern und Umwälzungen in der Informationsverarbeitung mit sich bringen. Und alle diese Erfolge werden nötig sein, damit wir und unsere Kinder und Enkelkinder als Bewohner des Planeten Erde das Abenteuer Technik in der Zukunft bestehen können.



Menschliche Hand und technische Nachbildung

Begriffserklärung

Alpha-Teilchen, Kern des Heliumatoms, besteht aus der sehr kompakten Verbindung von 2 Protonen und 2 Neutronen

Aminosäuren, organische Säuren, die neben der Carboxylgruppe —COOH noch die Aminogruppe —NH_2 im Molekül enthalten; eine Untergruppe, die sog. 2-Aminosäuren, bei denen die Aminogruppe an das C-Atom gebunden ist, sind Bausteine der Eiweiße. Bei der Verdauung werden die Eiweißstoffe wieder in Aminosäuren zerlegt und anschließend daraus körpereigene Eiweiße aufgebaut

Ethen, ältere Bezeichnung: Äthylen, Kohlenwasserstoff, C_2H_4

Ethin, ältere Bezeichnung: Azetylen, Kohlenwasserstoff, C_2H_2 , entsteht z. B. aus Kalziumkarbid und Wasser

atomarer Sauerstoff, zum Unterschied vom normalen Sauerstoff der Atmosphäre, der aus Sauerstoffmolekülen der Zusammensetzung O_2 besteht

Azetylcholin, physiologisch sehr wirksame Substanz, wirkt blutdrucksenkend und muskelkontrahierend, chemische Formel: $\text{/(CH}_3\text{)}_3\text{N—CH}_2\text{—O—CO—CH}_3\text{/OH}$

Beta-Teilchen, Elektronen und Positronen aus Kernreaktionen, z. B. aus dem radioaktiven Zerfall

Blasenammer, Gerät zum Nachweis von hochenergetischen Kernteilchen, in dem man deren Flugbahnen als Blasen Spuren sichtbar macht (in einer überhitzten Flüssigkeit)

Butadien, ungesättigter Kohlenwasserstoff der Zusammensetzung $\text{CH}_2=\text{CH—CH}=\text{CH}_2$

CO₂—Laser, Gaslaser (siehe Laser)

DNS (Desoxyribonukleinsäure); DNS-Moleküle sind Riesenmoleküle, die in Zellkernen als Träger der Erbinformationen auftreten

Elastizitätsmodul, Dehnungsmaß, z. B. 1 Tausendstel der Kraft, die einen Draht von 1 mm² Querschnitt um 1 Tausendstel seiner Länge verlängert

elektrostatische Filter, Filter, deren Wirkung auf der elektrostatischen Anziehung kleiner Teilchen beruht

Enzyme, Biokatalysatoren (siehe Katalyse), eiweißartige Moleküle in lebenden Zellen, die die Stoffwechselreaktionen vermitteln

Epidermis, Oberhaut

Feldstärke, elektrische, Potentialdifferenz pro Längeneinheit, physikalische Maßeinheit V/cm; folglich wird eine Feldstärkeänderung pro cm in V/cm² gemessen

Fibrillen, Faserbündel

Gammaquanten, die sehr energiereichen Strahlungsquanten der (radioaktiven) Gammastrahlung

Ganglienzelle oder Ganglion, große Nervenzelle

Gleichgewichtsorgan, bei Mensch und Wirbeltier Teil des Ohres, besteht aus dem Säckchen und den drei Bogengängen

Humus, mit Verwesungsstoffen angereicherte Erde

integrierte Schaltkreise, auf der Basis von Halbleiterplättchen (meist Silizium) mit Technologien der Mikroelektronik hergestellte elektronische Schaltungen von Dioden und Transistoren, verbunden durch aufgedampfte metallische Leiterbahnen (z. B. Schaltkreis eines Taschenrechners, der aus ca. 6000 Dioden und Transistoren auf ca. 20 mm² Fläche besteht)

Ionen, elektrisch geladene Teilchen, die aus neutralen Atomen oder Molekülen durch Abspaltung (positive Ionen) oder Aufnahme (negative Ionen) von Elektronen entstehen

Ionisationskammer, Meßgerät zum Nachweis von atomaren Teilchen

Karbon, Erdzeitalter, etwa 350–270 Millionen Jahre v. u. Z. Zeit der Sporenpflanzen, der ersten Kriechtiere und Insekten

Katalyse, die Wirkung eines Katalysators, der eine bestimmte chemische Reaktion beschleunigt, ohne selbst an dieser teilzunehmen

Kutis, Unterhaut

Kybernetik, Wissenschaft von den Steuer- und Regelvorgängen in Lebewesen und Maschinen, begründet 1948 durch Norbert Wiener

Lanthan, chemisches Element, gehört zu den Seltenen Erden

Laser, (zusammengezogene Abk. von „Light amplification by stimulated emission of radiation“, d. h. Lichtverstärkung durch stimulierte Strahlungsemission); in einem stabförmigen Kristall (Feststofflaser) oder in einer gasgefüllten Röhre (Gaslaser) wird ein nahezu paralleler Lichtstrahl sehr hoher Energiedichte erzeugt

Lipoide, den Fetten nahestehende chemische Verbindungen, zu denen auch das Lezithin gehört, das z. B. im Eigelb und in Pflanzensamen enthalten ist

*Lymph*e, gelbliche bis farblose Körperflüssigkeit, die beim Menschen und bei Tieren mit Blutkreislauf in einem besonderen Lymphgefäßsystem fließt

Massenspektroskopische Analyse, Analyse von Stoffen mit Hilfe von Massenspektroskopen, in denen Atome oder Moleküle eines Stoffes zuerst in Ionen umgewandelt, danach elektrisch beschleunigt und in magnetischen und (oder) elektrischen Feldern nach ihren Atommassen getrennt werden

Matrix, (Mz. Matrizen), gitterartige Flächenanordnung von Elementen, z. B. von Zahlen oder auch von elektronischen Bauelementen

Membran, mehr oder weniger dünne Schicht, die für verschiedene Arten von Atomen und Molekülen unterschiedliche Durchlässigkeit besitzt; künstliche Membranen können aus Kunststoffen, Keramik, Papier oder auch aus natürlichen Häuten oder Faserstoffen und anderem Material bestehen

Nebelkammer, Gerät zum Nachweis von Kernteilchen, in dem man die Flugbahnen dieser Teilchen als Nebelspuren sehen, fotografieren und ausmessen kann

Nukleinsäuren, an Proteine gebundene Stoffe in Zellkernen; sie sind verschieden von den Aminosäuren und nicht etwa mit diesen zu verwechseln

Oberschwingungen, mit der Schwingung einer Saite oder eines anderen schwingungsfähigen Gebildes (z. B. Platte, Luftsäule) gleichzeitig mit auftretende Schwingungen höherer Frequenz

Osmorezeptor, Rezeptor zur Messung des osmotischen Drucks (Druck, der durch partielle Diffusion verschiedener Stoffe durch eine Membran an dieser entsteht)

Phenole, nach ihrer Struktur die Alkohole der aromatischen Kohlenwasserstoffe (Benzol und Abkömmlinge); das einfachste Phenol ist die Karbolsäure, chemische Formel C_6H_5OH

Polymerisation, Verkettung von kleineren, meist gleichartigen Molekülen zu Riesemolekülen (Makromolekülen)

Proteide, Eiweißstoffe im weiteren Sinne, enthalten neben den Aminosäuren noch andere Bausteine wie Kohlenhydrate, Lipide, Phosphorsäuren, Farbstoffe und Nukleinsäuren

Proteine, Eiweißstoffe im engeren Sinne; Proteinmoleküle enthalten zwischen zehntausend und einigen Millionen Atome; sie bestehen aus Aminosäuren; die Artspezifität der Proteine entsteht durch unterschiedliche Reihenfolgen der Aminosäuren in den Proteinmolekülen

Radar, (zusammengezogene Abk. aus radio detection and ranging), Funkpeil- und Meßtechnik mit Hilfe von elektromagnetischen Mikrowellenimpulsen

Refraktärzeit, Erholungszeit

resistent, *Resistenz*, widerstehend, Widerstandsfähigkeit

RNS, (Ribonukleinsäure), es existieren verschiedene Arten von RNS; RNS-Moleküle spielen eine wichtige Rolle beim Aufbau von Enzymen und anderen Eiweißstoffen in allen Körperzellen

Röntgenstrukturanalyse, Analyse von Stoffen mittels Röntgenstrahlen; diese müssen dazu in fester Form vorliegen; die Wellenlängen der Röntgenstrahlen liegen in der gleichen Größenordnung wie die Atomabstände. Als Folge davon entstehen auf Röntgenfilm Beugungsbilder der Atome, die dann ausgemessen werden

Sandwich-Bauweise, Bauweise, bei der mehrere Schichten aus verschiedenen Baustoffen übereinandergelagert werden

Schwingquarz, Quarzkristall, der durch eine elektrische Wechselspannung bestimmter Frequenz zu mechanischen Resonanzschwingungen angeregt wird (z. B. in elektrischen Uhren)

Statik, Lehre von den Kräften, die in ruhenden Körpern auftreten, in der Bautechnik: Berechnungen der Belastbarkeit von Fundamenten, Trage- und Stützelementen und ähnliches

Stickoxide, Sammelname für Oxide des Stickstoffs (Verbindungen zwischen Stickstoff und Sauerstoff)

Target, eine Strahlung auffangender Körper (z. B. in Teilchenbeschleunigern); die Anode einer Elektronenröhre ist in diesem Sinne ebenfalls ein Target

Zählrohr, Meßgerät zum Nachweis radioaktiver Strahlung, in dem hindurchfliegende Kernteilchen oder Gammaquanten in elektrische Impulse umgewandelt werden

Literaturhinweise

- K. Fuchs-Kittowski, Probleme des Determinismus in der modernen Biologie, Jena 1969
- M. Schellhorn, Probleme der Struktur, Organisation und Evolution biologischer Systeme, VEB Gustav-Fischer-V., Jena 1969
- W. Beier, K. Glaß, Bionik, Urania-V., Leipzig 1968
- H Aurich, Laboratorium des Lebens, Urania-V., Leipzig 1971
- H. Heynert, Grundlagen der Bionik, Deutscher V. d. Wissenschaften, Berlin 1976
- C. J. Gray, Mechanismen der Enzymkatalyse, Akademie-V., Berlin 1976
- G. Tembrock, Biokommunikation I, II, Berlin 1971
- A. P. Bykow, A. V. Voje, Vom Neuron zum künstlichen Gehirn, Verlag Nauka, Moskau 1971
- E. Forth, E. Schewitzer, Bionik (Meyers Taschenlexikon Bionik), VEB Bibliograph. Inst. Leipzig 1976
- U. Körner, Die Entstehung des Lebens, Urania-V., Leipzig 1978

Bildquellenverzeichnis

URANIA-VERLAG: 6; ADN/ZB: 9; E. Günther, Leipzig: 5; Deutsche Fotothek Dresden: 4; I. Pötsch, Radeberg: 2; T. Wetzel, Halle: 1; Inst. für Landesforschung, Halle: 3; N. Schröter, Markkleeberg: 2; Nowosti: 1; G. Müller, Leipzig: 2; Müller/Straube, Berlin: 1; Staatlicher Math. Phys. Salon, Dresden: 1; R. Quaas, Leipzig: 1; R. Ziegler, Berlin: 1; L. Willmann, Berlin: 1; G. Rinnhofer, Eberswalde: 1; G. Hübner, Rathenow: 1.



1. Auflage 1982.

Alle Rechte vorbehalten.

© Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig 1982

VLN 212-475/41/82 · LSV 3009

Lektor: Konrad Haase

Einband und Illustration: Wolfgang Parschau

Typographie: Julia Strube

Printed in the German Democratic Republic

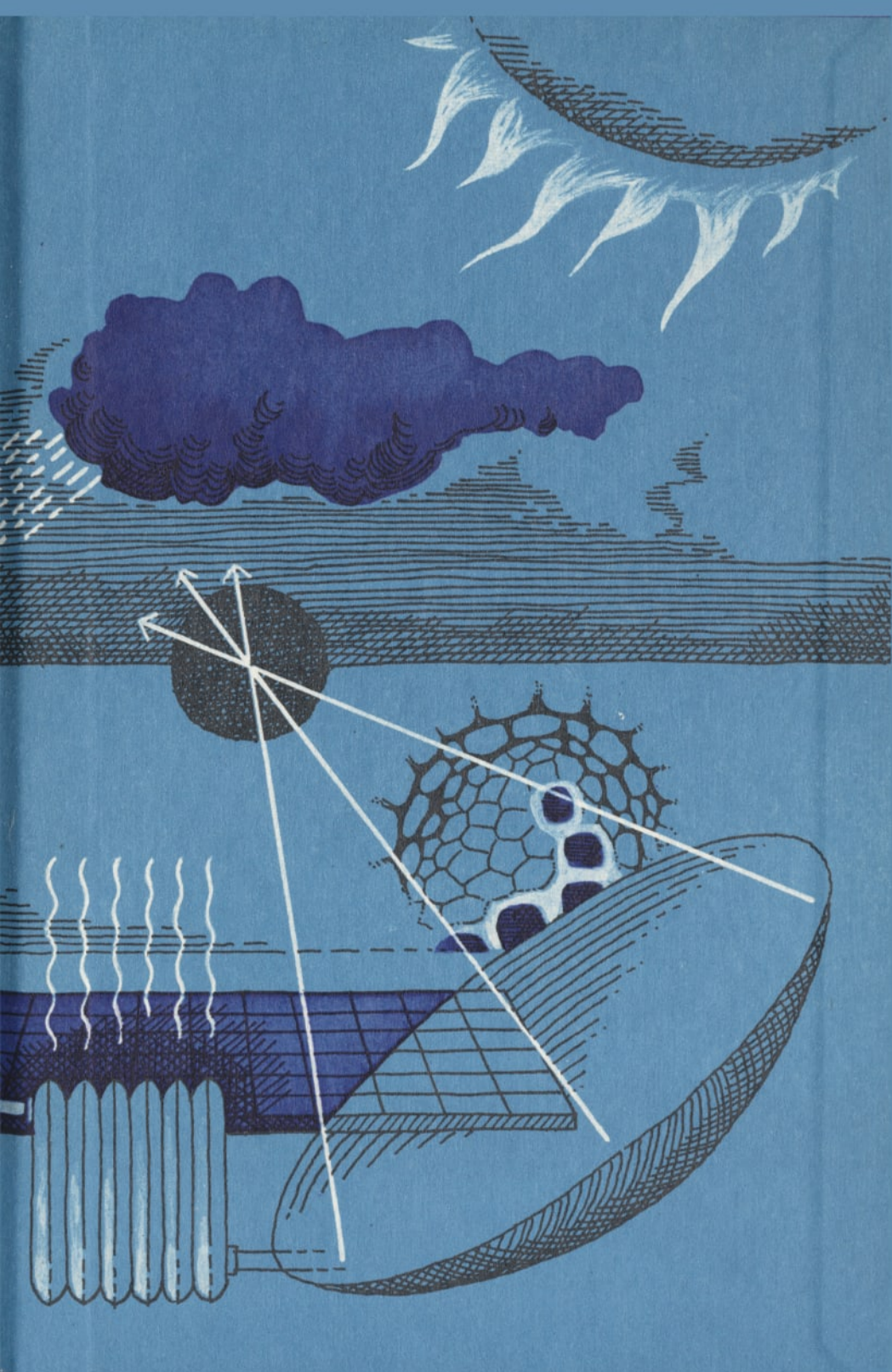
Reproduktion: Sachsen Druck Plauen

Satz, Druck und Buchbinderei: Karl-Marx-Werk Pößneck V 15/30

Best.-Nr.: 653 634 5

DDR 10,— M





DDR 10,— M

