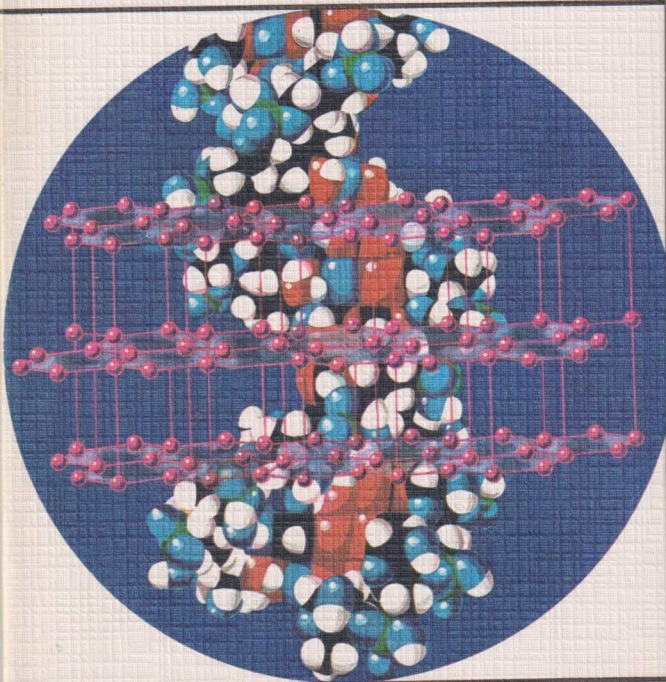


akzent

Heinz Raubach

Rätsel um das Molekül



Heinz Raubach

Rätsel um das Molekül

Urania-Verlag Leipzig Jena Berlin

Autor: Dr. Heinz Raubach
Akademie der Wissenschaften der DDR, Berlin

Illustrationen: Hans-Dieter Nemitz, Cottbus

1. Auflage 1976

1.–20. Tausend. Alle Rechte vorbehalten.

© Urania-Verlag Leipzig · Jena · Berlin,

Verlag für populärwissenschaftliche Literatur, Leipzig, 1976

VNL 212–475/13/76

LSV 1279

Lektor: Inge Kornnagel

Umschlagreihenentwurf: Helmut Selle

Typografie: Hans-Jörg Sittauer

Printed in the German Democratic Republic

Gesamtherstellung: GG Interdruck Leipzig

Best.-Nr.: 653 383 0

EVP: 4,50 Mark

Inhalt

Erforschbare Welt 7

Erdöl ist kostbar 9

Zwei nützliche Verfahren – Destillation und Spaltung 14

Molekülarchitekten 17

Bakterien unterscheiden Isomere 24

Isooktan und die Oktanzahl 31

Siebe für Moleküle? 35

Über Repellents und Attraktiva 41

Rosenoxid und Fliederalkohol 48

Kaviar vom INEOS 58

Le Mistral 63

Diamant – Graphit 71

Indigo und Purpur 78

Von Ketten, Netzen und Spiralen 85

Zelle und Eiweiß 101

DNS – die Doppelhelix 109

Verantwortung in neuen Dimensionen 122

Erforschbare Welt

Der Mensch paßt sich aktiv der Natur an, er verändert sie, seinen Zwecken entsprechend, und schafft sich die Existenzbedingungen, die er unmittelbar in der Natur nicht findet. Er hat es gelernt, die Stoffe der Natur nicht nur so zu nutzen, wie sie sich ihm darbieten, sondern sie auch von Grund auf in ihrem stofflichen Aufbau zu verändern.

Auf der Suche nach dem Wesen der Dinge hat er früher viele Erscheinungen mit dem Wirken übernatürlicher Kräfte zu deuten versucht. Heute wissen wir, daß allen Prozessen und Erscheinungen auf der Erde wie im ganzen Weltall materielle Ursachen zugrunde liegen. Je tiefer wir in die Materie eindringen, je besser wir ihren Aufbau und ihre Bewegungsformen verstehen lernen, um so mehr fällt der Schleier des Geheimnisvollen. Das gilt für alle Organisationsformen der Materie, für die allereinfachste — beispielsweise in Gestalt einer chemischen Verbindung — ebenso wie für die höchstorganisierte Form, den Menschen und die menschliche Gesellschaft.

Entscheidende Beiträge zum Verständnis der den Naturprozessen zugrunde liegenden materiellen Einheit der Welt kommen von den chemischen Wissenschaften, die die Frage nach dem Zusammenhang zwischen der Struktur der Stoffe, ihren Eigenschaften und Wirkprinzipien sowie nach den Gesetzen ihrer Wandelbarkeit sozusagen von Berufs wegen stellen.

Es zeigt sich, daß das Leben aller Organismen an bestimmte Strukturen gebunden ist, die zwar kompliziert aufgebaut, letztlich aber als chemische Verbindungen erklärbar sind. Die Bildung der wichtigsten »Bausteine des Lebens« aus einfachen anorganischen Verbindungen ist

inzwischen durch Experimente bewiesen. Die Entstehung des Lebens auf der Erde läßt sich ohne Inanspruchnahme eines »Schöpfungsaktes« deuten. Der »Bauplan«, nach dem sich dies alles vollzieht, liegt in den Gesetzmäßigkeiten der Materie begründet.

In etwa vier Milliarden Jahren hat sich auf unserer Erde das entwickelt, was wir heute als Leben vorfinden. Noch nicht einmal 200 Jahre hat die Menschheit gebraucht, um die wichtigsten Entwicklungsstadien der Evolution zu erforschen. In den letzten zwanzig Jahren sind dabei viele bedeutende Erkenntnisse gewonnen worden, so daß wir ein Bild von der Entstehung des Lebens auf der Basis molekularen Geschehens zu entwerfen vermögen. Wie die historischen Bauwerke die Entwicklung der menschlichen Kultur erkennen lassen, widerspiegelt der Weg vom einfachen Molekül zu immer komplizierteren Strukturen den Übergang vom Unbelebten zur belebten Materie.

Ein Teil dieser Fragen berührt das Gebiet der organischen Chemie, die nach dem sowjetischen Forscher Professor Nesmejanow »die Architektur des Aufbaus der Moleküle« darstellt. Einer der Grundbausteine des Lebens ist das Kohlenstoffgerüst. Sein Aufbau und Umbau führen zu den verschiedenartigsten Stoffen mit unterschiedlichen Strukturen und Eigenschaften.

Das vorliegende Taschenbuch will, ausgehend von aller-einfachsten organischen Verbindungen, den Leser mit Hilfe von Molekülmodellen bis zu einer ersten Vorstellung von der komplizierten Architektur der gewendelten und doppelt gewendelten Kettenmoleküle führen.

Es gibt eine Reihe aktueller Probleme der Menschheit, zu deren Lösung das Wissen vom chemischen Bauplan der Materie beitragen kann. So ist z. B. angesichts der Tatsache, daß sich die Menschheit jährlich um siebzig Millionen vermehrt, wiederholt die Frage aufgeworfen worden, ob der Erdball in Zukunft noch genügend Nahrung hergeben wird. Mit Hilfe der chemischen Wissenschaften werden beispielsweise – neben der weiteren Erschließung heute noch unfruchtbarer Gebiete – verbesserte Methoden der Pflanzenzüchtung, der Düngung, der Ernte und der Schädlingsbekämpfung möglich, die dem Menschen höhere landwirtschaftliche Erträge sichern. Unter den neuen Formen

der Schädlingsbekämpfung könnten in Zukunft insektenvertreibende und insektenanziehende Mittel eine interessante Rolle spielen.

Die Synthese von schmackhaften, eiweißhaltigen Nahrungsmitteln aus nichttierischen Ausgangsstoffen unter Ausnutzung der in den Weltmeeren in reicher Menge vorkommenden pflanzlichen Produkte oder durch mikrobielle Prozesse auf der Basis von Rohstoffen, die heute noch als Energieträger »verschwendet« werden, stellt für die Menschheit eine Reserve dar, die für Jahrhunderte zusätzliche Nahrung gewährleisten kann.

Hand in Hand mit den steigenden materiellen und kulturellen Bedürfnissen des Menschen wächst der Bedarf an Elektroenergie – jener Form von Energie, die am leichtesten transportiert und in andere Energieformen umgewandelt werden kann. Heute noch wird der Hauptteil an Elektroenergie durch Verbrennung von organischen Verbindungen – Kohle, Erdöl, Erdgas – gewonnen, im Grunde genommen also aus chemischer Energie. Gelänge es, eine technische Lösung der nuklearen Thermofusion zu finden, jener Art von Energieerzeugung aus Atomenergie, die sich in unserer Sonne vollzieht, die am wenigsten Stoffe verbraucht und – technisch gesehen – am saubersten arbeitet, dann könnten die heutigen Energieträger nur noch für den Stoffwechsel eingesetzt werden. Das wäre für die Rohstoffbilanz der kommenden Jahrhunderte ein unschätzbarer Gewinn.

Erdöl ist kostbar

Für die Stoffwandlung werden seit eh und je Rohstoffe eingesetzt. In den letzten Jahrzehnten traten Stoffe in den Vordergrund, die in besonders hohem Maße dank des wissenschaftlich-technischen Fortschritts die Lebensverhältnisse mit prägen halfen. Von besonderer Bedeutung für die Entwicklung der Chemie wurden dabei Erdöl und Erdgas. Der Verbrauch stieg in so hohem Maße, daß mancherorts die bange Frage gestellt wird, wie lange der Menschheit noch genügend Rohstoffe zur Verfügung stehen.

Es ist dies übrigens auch im Falle des Erdöls nicht das erste Mal, daß von einer drohenden Erschöpfung der Weltvorräte die Rede ist. Schon in den sechziger Jahren des vorigen Jahrhunderts waren solche düsteren Prognosen gestellt worden. Dienten sie vielleicht schon damals Preismanipulationen der kapitalistischen Beherrscher des Ölgeschäfts? Entgegen allen »objektiven« Voraussagen sind nämlich von 1859 bis 1945 in der Welt Erdölreserven in der Größenordnung von 14,8 Mrd. t neu erschlossen worden. Nur 6,75 Mrd. t Öl sind aber erst in diesem Zeitraum der Erde entnommen worden. Auch in den Jahren 1945 bis 1955 standen 5,15 Mrd. t gefördertes Rohöl einer Menge von 18,2 Mrd. t neuerschlossenen Vorkommen gegenüber.

Ende 1959 waren die geschätzten sicheren Erdölvorräte der Welt, d. h. die durch Bohrungen oder geologische Untersuchungen erwiesenen Erdölvorräte, auf mehr als 40 Mrd. t gestiegen. Im gleichen Jahre wurde die Rekordhöhe von 946 Mill. t gefördert.

In den letzten zehn Jahren kamen aus allen Teilen der Welt immer wieder Berichte von neuen ergiebigen Bohrungen auf Erdöl und Erdgas: Erdgas vor der holländischen, Erdöl vor der schottischen Küste. Von den Vorräten in der Sahara und in Libyen wird behauptet, daß sie größer seien als die im Nahen Osten.

1973 betrugen die Erdölreserven der Welt etwa 90 Mrd. t bei einer jährlichen Förderung von etwa 2,8 Mrd. t. In der Sowjetunion haben Geologen erst vor wenigen Jahren riesige Erdölvorkommen in Westsibirien entdeckt. Zu den größten zählen die bei Samotlar, mit deren Ausbeutung 1972 begonnen worden ist. Insgesamt gehen in Westsibirien die Vorräte in die Milliarden Tonnen.

Die Erschließung der sibirischen Vorkommen ist um Größenordnungen schwieriger als etwa der in Kuwait, wo man mit jeder Sonde eine neue Quelle erreicht, weil die Vorräte auf einem ganz engen Raum konzentriert sind. Die kuwaitischen Ölquellen liegen nur 900 bis 1200 m tief und stehen unter Gasdruck. Versiegt eine Quelle, so werden die auf Raupen gelagerten Bohrtürme zu ihrem neuen Standort gezogen – Demontage und Wiederaufbau entfallen. Auf dem Ölfeld von Burgan kommen auf nur 770 km² 298 pro-

duzierende Quellen. Der Transport bereitet keine Schwierigkeiten, da die Ölfelder nahe an der Küste des Persischen Golfes liegen und Pipelines das Öl auf kurze Entfernung in den größten Tankerhafen der Welt – Mina-al-Ahmadi – bringen.

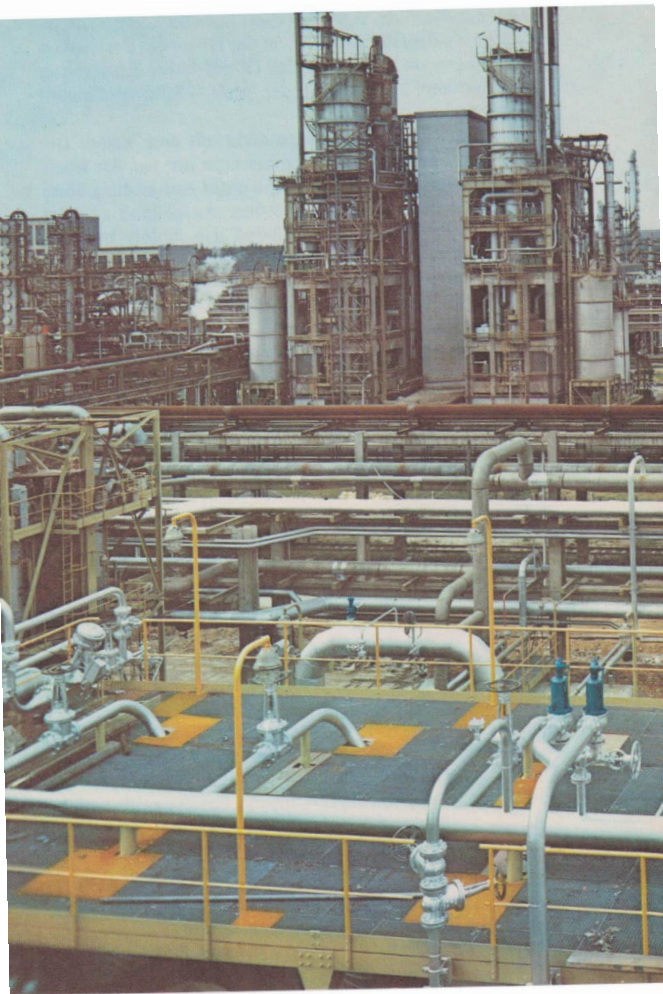
So einfach ist es in Sibirien nicht mit dem Erdöl. Die Erdöl- und Erdgasvorkommen konnten nur auf der Basis wissenschaftlicher Prognosen und unter Anwendung einer neuen Technik erschlossen werden. Ausgehend von der modernen Theorie der Entstehung des Erdöls und des Erdgases, wurde zunächst erst einmal die Verteilung der Hauptzonen dieser Bodenschätze prognostiziert und danach für das Riesengebiet ein Arbeitsplan erstellt. Bereits zehn Jahre lang waren die Sonden mit Erfolg in Betrieb.

Schon heute haben sibirisches Erdöl und Erdgas das Tempo der allgemeinen Entwicklung Sibiriens verändert und das Entwicklungstempo der Energiewirtschaft und der chemischen Industrie in der UdSSR beeinflusst. Die Erschließung wird planmäßig fortgesetzt. Nördlich von Samotlar hat die Ausbeutung der größten Erdgasvorkommen der Welt begonnen. Es sind die Urengoi-Vorkommen; sie betragen über $5 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$.

In der Welt gibt es insgesamt etwa dreißig solcher Vorkommen wie bei Samotlar und Urengoi. Sechs davon liegen in Westsibirien. Am Unterlauf des Wiljui, einem Nebenfluß der Lena, sind Erdgasvorkommen von 700 Mrd. m^3 entdeckt worden. Auch im Gebiet von Irkutsk und Bratsk ist man auf große Erdöl- und Erdgasvorkommen gestoßen.

Die Geologen nehmen an, daß auch in den Schelfgebieten der Karasee und der Leptewsee, in der Ostsibirischen See und der Tschuktschensee Erdöl und Erdgas gefunden werden, ja – daß sich die Erdöl- und Erdgasschichten am Boden des Eismeeres bis fast zum 85. Breitengrad ausdehnen.

Gesamtansicht des petrochemischen Kombines Leuna II. Dieser Betrieb und auch die Erdölverarbeitungswerke in Zeitz und Lützenkendorf erhalten ihren wertvollen Rohstoff über eine Mineralölverbundleitung aus dem Erdölverarbeitungswerk Schwedt.





Bis zum Jahre 1980 wird ganz Sibirien bis 260 Mill. t Erdöl jährlich liefern. Vor kurzem wurde der Bau der 800 km langen Erdölleitung Alexandrowskoje-Anschero-Sudschensk abgeschlossen.

Die großen Erfahrungen der UdSSR sind auch der DDR zugute gekommen. Von sowjetischen Geologen sind bei Such- und Erkundungsarbeiten im Gebiet Salzwedel–Peckensen und in Mellin große Vorhaben von Naturgas entdeckt worden. Mit Hilfe sowjetischer Lieferungen decken die RGW-Länder fast völlig ihren Importbedarf an Erdöl. Die UdSSR hat entscheidende Unterstützung beim Aufbau des Erdölverarbeitungswerks Schwedt geleistet, das an dem einen Ende der 4000 km langen Erdölleitung »Freundschaft« liegt. 1964 hat in Schwedt die 1. Anfahrstufe ihren Betrieb aufgenommen; sie verarbeitet mit einer Kapazität von 2 Mill. t in Destillations- und Veredlungsanlagen Erdöl zu Rohbenzin und dieses zu hochoktanigem Vergaserkraftstoff und hochwertigem Dieseltreibstoff. 1965 folgten eine ebensogroße 2. Anfahrstufe sowie Anlagen zur Gewinnung von aromatischen und olefinischen Kohlenwasserstoffen. Über eine Mineralölverbundleitung versorgt das EVW Schwedt den Chemiebezirk Halle.

Zwei nützliche Verfahren — Destillation und Spaltung

Wie eine Fontäne schießt die grünblauschillernde, vom Schlamm oft braungefärbte Flüssigkeit aus der Erde, wenn das Erdöl unter Gasdruck steht und richtig erbohrt worden ist. Erdöl ist ein kompliziertes Gemisch aus einigen hundert organischen Verbindungen. Seine Zusammensetzung kann je nach der Fundstätte erheblich variieren. Manchmal läßt sich dies sogar durch den Geruch feststellen. Pennsylvanisches Erdöl führt z.B. in seiner Zusammensetzung nur wenig Naphthene (Zykloalkane — einfache Ringverbindungen der Alkane), während sowjetisches Erdöl davon bis zu 80 % enthält.

Erdöl hat man lange, bevor seine chemische Zusammensetzung erforscht war, genutzt. Petroleum — diese pene-

trant riechende Flüssigkeit — brennt, heizt, gibt Licht. Wieviel einfacher ist seine Handhabung im Vergleich zu der Kohle! Man dreht den Hahn auf — es fließt. Kohle dagegen muß man schippen.

In den Erdölraffinerien, die in den letzten Jahren wie Pilze aus der Erde geschossen sind, nimmt man das Flüssigkeitsgemisch auseinander — man destilliert und extrahiert.

Bei der fraktionierten Destillation des Rohöls werden zunächst vier Fraktionen aufgefangen:

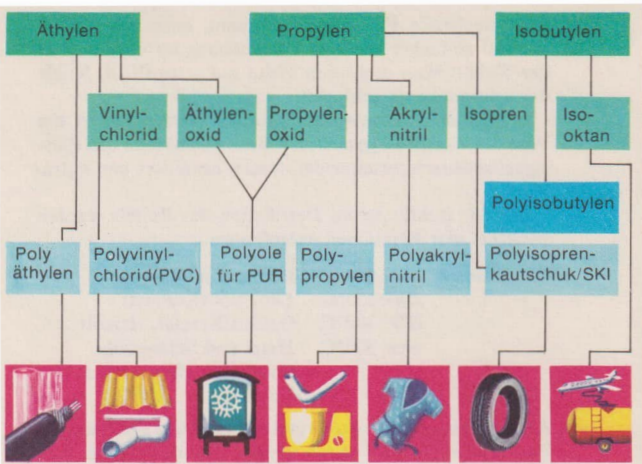
Siedebereich:	40–200 °C	Rohbenzin (Gasolin)
	200–250 °C	Leuchtöl (Kerosin)
	250–300 °C	Gasöl (Dieselöl, Heizöl)
	über 300 °C	Heiz- und Schmieröle, Paraffinöl, Hartparaffin, Vaselin.

Als Rückstand fallen pech- und asphaltartige Produkte an. Das Rohbenzin wird durch weitere Feindestillation über hohe Kolonnen meist in folgende vier Fraktionen getrennt:

Siedebereich:	40– 70 °C	Petroläther
	70– 90 °C	Leichtbenzin
	90–120 °C	Ligroin (Lackbenzin)
	120–200 °C	Schwerbenzin.

Alle diese Fraktionen stellen immer noch Gemische aus einer größeren Zahl von Verbindungen dar. Mit der zunehmenden Entwicklung des Verbrennungsmotors stieg das Interesse an der Benzinfraktion. Man trachtete in den Raffinerien danach, so viel wie möglich an Benzin zu gewinnen.

Beinahe zufällig fand man eine Möglichkeit zur Erhöhung der Benzinausbeute. Bei einem Destillerversuch war die Heizung defekt, und das Gemisch wurde überhitzt. Dabei gelang die bedeutsame Feststellung, daß aus diesem überhitzten Ansatz mehr Benzin herauskommt als aus dem normal destillierten. Das ist die Geburtsstunde des Cracking gewesen — eines der wichtigsten petrolchemischen Verfahren war erfunden. Bald wurde dieses Verfahren in verschiedenartigen Spielarten praktiziert — als rein



Verwertung von Krackgasen

Ausgehend von den Hauptbestandteilen der Krackgase ist eine Fülle von Zwischenprodukten zugänglich, deren Weiterverarbeitung wertvolle Werkstoffe und andere Materialien liefert: Verpackungsfolie, Kabelisolationstoffe, Hart- und Weichschäume, Küchenmaschinenteile, synthetische Fasern (Wolle), Elaste (Gummi) und Treibstoffe.

thermisches Kracken, als katalytisches, mit und ohne Druck. In allen Fällen wirkt das gleiche Prinzip: eine Spaltung (Cracking) der höhersiedenden Bestandteile des Erdöls in leichtersiedende Verbindungen.

Für höhere Benzinausbeuten nimmt man sogar in Kauf, daß beim Kracken beachtliche Mengen gasförmiger Spaltprodukte entstehen – die sogenannten Krackgase.

Zunächst wußte man mit ihnen nichts anzufangen, man »fackelte« sie einfach ab. Bis man eines Tages dahinterkam, daß in diesen »Abfallprodukten« wertvolle Rohstoffe enthalten sind: Äthylen (Äthen), Propylen (Propen), Isobutylen (Isobuten) – reaktionsfähige Verbindungen, die sich durch chemische Umsetzungen in unzählige wertvollste Produkte verwandeln lassen, in Waschmittel,

Treibstoffe, Verpackungsfolie, Plastwerkstoffe, Synthefasern, Lacke, Isolierstoffe und Schädlingsbekämpfungsmittel.

Molekülarchitekten

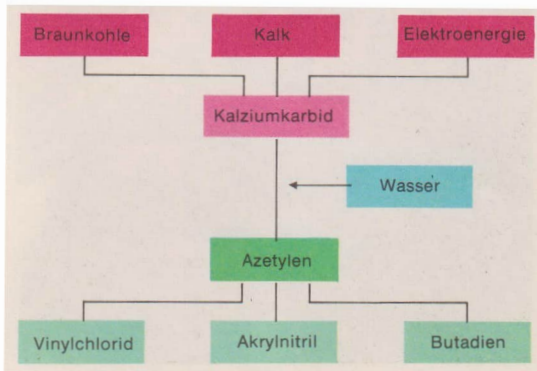
Die organische Chemie ist die Chemie der Kohlenstoffverbindungen. Verbindungen von Kohlenstoff mit Wasserstoff heißen Kohlenwasserstoffe. Es gibt Tausende von Kohlenwasserstoffen. Viele davon kommen im Erdgas und im Erdöl vor.

Der einfachste Kohlenwasserstoff ist das Methan, das den Hauptbestandteil des Erdgases ausmacht. Das Methanmolekül setzt sich aus einem Kohlenstoffatom und vier Wasserstoffatomen zusammen.

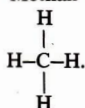
Weil der Chemiker Anschaulichkeit liebt, hat er sich in Gestalt von Strukturformeln und verschiedenartigen Modellen Denkhilfen geschaffen. Eine besonders günstige

Kohle als Rohstoff

Unter Ausnutzung der heimischen Rohstoffe ist in der DDR die Azetylenchemie nach wie vor eine wichtige Quelle für Kohlenstoffverbindungen. Neben Vinylchlorid und Akrylnitril wird auch Butadien, der Ausgangsstoff für Buna-Elaste, aus Azetylen gewonnen.



Form für die Veranschaulichung des räumlichen Aufbaus von Molekülen stellen die Kalottenmodelle (Kalotte – frz. – Kugelkappe) nach Stuart und Briegleb dar, bei denen der Wirkungsradius der einzelnen Atome berücksichtigt wird. In der Formelsprache der Chemie schreibt man für das Methan die Bruttoformel CH_4 und die Strukturformel



Dederonherstellung im Chemiefaserwerk Schwarza.

Riesenlange Kettenmoleküle, zu deren naturgetreuer Nachbildung Tausende von Atomkalotten nötig wären (neben C- und H- auch N- und O-Atome) bilden die innere Struktur der Dederonfaser (Polyamidfaser).



Zum Aufbau des Methanmoleküls entnimmt man deshalb dem Modellbaukasten ein Kohlenstoffatom sowie vier Wasserstoffatome und steckt diese so zusammen, daß das Kohlenstoffatom tetraedrisch von den vier Wasserstoffatomen umgeben ist.

Die ungeheure Vielfalt der organischen Verbindungen, die bis heute bereits in die Millionen geht, beruht darauf, daß sich die Kohlenstoffatome auch miteinander verbinden können. Verbinden wir z. B. zwei C-Atome miteinander und stecken wir auf die sechs verbleibenden Bindungen je ein Wasserstoffatom, so erhalten wir das Äthanmolekül.

In ähnlicher Weise können wir weitere Moleküle aufbauen, wobei uns die Strukturformel als Grundlage dient.

Zunächst verbinden wir drei C-Atome miteinander, das nächste Mal vier, dann fünf oder sechs und mehr C-Atome – und das so, daß eine gestreckte Kette entsteht. Sättigen wir jetzt die an den Kohlenstoffatomen verbleibenden unbesetzten Bindungen mit Wasserstoff ab, so erhalten wir die Kohlenwasserstoffe Propan, Butan und Pentan.

Damit haben wir – ausgehend vom Methan – eine ganze Reihe von Kohlenwasserstoffen aufgebaut, bei der sich jede einzelne Verbindung von der vorhergehenden jeweils um eine CH_2 -Gruppe unterscheidet. Es handelt sich hier um die Reihe der *n-Paraffine* (Normalparaffine) oder Alkane mit der allgemeinen Bruttoformel $\text{C}_n\text{H}_{2n+2}$. Unsere Abbildung zeigt von den ersten fünf Gliedern dieser Reihe jeweils die Summenformel, die Strukturformel, das Stäbchen- und das Kalottenmodell.

Mit zunehmender Kettenlänge der Alkane beobachten wir einen Übergang vom Gas zur Flüssigkeit bis hin zum wachsartigen Festkörper. Wie aus Tabelle 1 hervorgeht, sind die ersten Glieder (C_1 bis C_4) bei Normaldruck und Raumtemperatur Gase, Pentan und Hexan sind leicht bewegliche Flüssigkeiten, bei C_{15} bis C_{17} liegen ölige Produkte vor und ab C_{18} feste Paraffine.

Es zeigt sich bereits hier bei den einfachsten organischen Verbindungen, daß zwischen der Struktur und den Eigenschaften gesetzmäßige Zusammenhänge bestehen. Der erfahrene Chemiker kann oft schon aus dem »Bauplan«

Tabelle 1: Änderungen der Eigenschaften der Paraffine mit der Kettenlänge

Formel	Name	Aggregatzustand
CH ₄	Methan	gasförmig
C ₂ H ₆	Äthan	
C ₃ H ₈	Propan	
C ₄ H ₁₀	n-Butan	
C ₅ H ₁₂	n-Pentan	} leicht beweglich
C ₆ H ₁₄	n-Hexan	
⋮		
C ₁₅ H ₃₂	n-Pentadekan	flüssig
C ₁₆ H ₃₄	n-Hexadekan	
C ₁₇ H ₃₆	n-Heptadekan	} ölig
C ₁₈ H ₃₈	n-Oktadekan	fest
⋮		
C ₁₉ H ₄₀	n-Nonadekan	
C ₂₀ H ₄₂	n-Eikosan	
C ₃₀ H ₆₂	n-Triakontan	
C ₄₀ H ₈₂	n-Tetrakontan	
⋮		

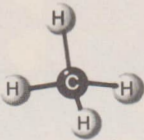
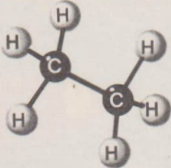
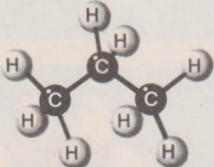
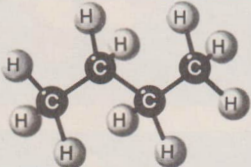
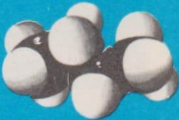
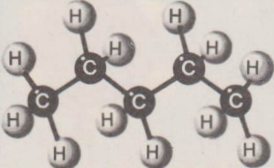
einer Verbindung auf ihre Eigenschaften und Wirkungsweisen schließen.

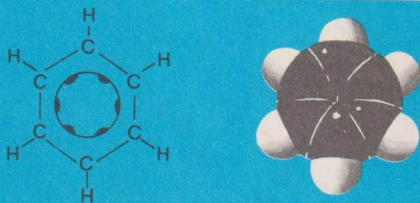
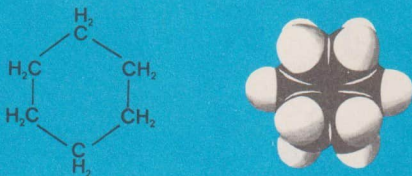
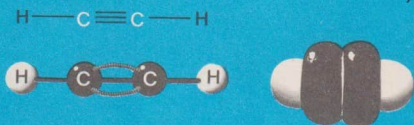
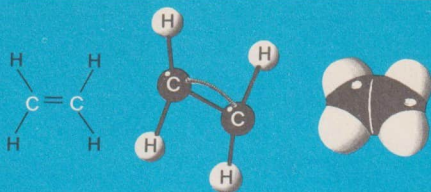
Kohlenstoff kann auch mit Wasserstoff Verbindungen bilden, die weniger Wasserstoff als die Paraffine enthalten. Beispielsweise weist das Äthylen (Äthen) die Zusammensetzung C₂H₄ auf, hat also 2 H-Atome weniger als das Äthan. Hier bildet sich zwischen den beiden C-Atomen eine Doppelbindung aus, und die beiden C-Atome erfahren eine Umwandlung in ihrer Gestalt; die Bindungswinkel sind jetzt nicht mehr Tetraederwinkel (109°), sondern betragen 120°.

Zum Aufbau des Äthylenmoleküls müssen wir deshalb dem Baukasten C-Atome mit Doppelbindung entnehmen (vgl. S. 22).

Im Azetylen (Äthin, C₂H₂) liegt der Kohlenstoff in Dreifachbindung vor; der Bindungswinkel beträgt 180°.

Bruttoformel, Stäbchen- und Kalottenmodell von einigen Normalparaffinen (Methan bis n-Pentan).

Bruttoformel	Stäbchenmodell	Klotzenmodell
Methan CH_4		
Äthan C_2H_6		
Propan C_3H_8		
Butan C_4H_{10}		
Pentan C_5H_{12}		



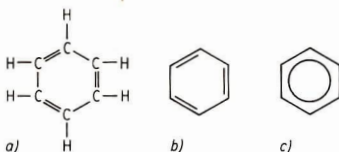
Unter Verwendung der richtigen C-Atomkalotten kommen wir zu dem Modell des Azetylenmoleküls.

Von großer Bedeutung sind auch Ringverbindungen, z. B. Zykloparaffine – wie Zyklopentan und Zyklohexan.

Die wichtigste »aromatische« Ringverbindung ist das Benzol. Lange hatten die Chemiker des vorigen Jahrhunderts gerätselt, welche Gestalt wohl einer Verbindung zuzuschreiben ist, die der Bruttozusammensetzung C_6H_6 entspricht – einer offensichtlich ungesättigten Verbindung –, sich aber ganz anders als Äthylen, Propylen oder Azetylen verhält.

Kekulé war es, dem schließlich im Traum die Erleuchtung vom »Bauplan« des Benzols gekommen ist – in Gestalt einer Schlange, die sich in den Schwanz beißt.

Heute schreiben wir die Struktur des Benzols wie folgt:



Die Formel c wird den besonderen Bindungsverhältnissen im Benzol am besten gerecht, sie bringt durch den Kreis im Sechseck zum Ausdruck, daß sich drei Elektronenpaare zu einem »Sextett« vereinigt haben. Zur Veranschaulichung sei das Kalottenmodell des Benzols gezeigt.

Von oben nach unten:

Strukturformel, Stäbchen- und Kalottenmodell von Äthylen (Äthen). Die unterschiedlichen Linien im Stäbchenmodell sollen die Unterschiede in den C-C-Bindungen zum Ausdruck bringen.

Strukturformel, Stäbchen- und Kalottenmodell von Azetylen (Äthin)

Strukturformel und Kalottenmodell von Zyklohexan

Strukturformel und Kalottenmodell des Benzols

Bakterien unterscheiden Isomere

Neben den geradkettigen n-Paraffinen finden wir im Erdöl auch Paraffine mit verzweigter Kette – die Isoparaffine. Sie werden so genannt, weil sie Isomere (isos – gleich; mer – Teilchen) der n-Paraffine sind, d. h., sie setzen sich aus der gleichen Anzahl von C- und H-Atomen zusammen, besitzen also die gleiche Bruttoformel, unterscheiden sich aber im Molekülaufbau, in der Strukturformel.

Vom Butanmolekül lassen sich z. B. aus den Atomkalotten zwei verschiedene Strukturen aufbauen.

Allgemein gilt: Je höher der Kohlenstoffgehalt, um so größer ist die mögliche Zahl von Isomeren (vgl. Tabelle 2).

Bei der Raffination des Erdöls können die n-Paraffine von den Isoparaffinen nicht durch einfache Destillation getrennt werden. In den Erdölfraktionen liegen deshalb

*Isomere Strukturen: n- und i-Butan
(Stäbchen- und Kalottenmodell)*

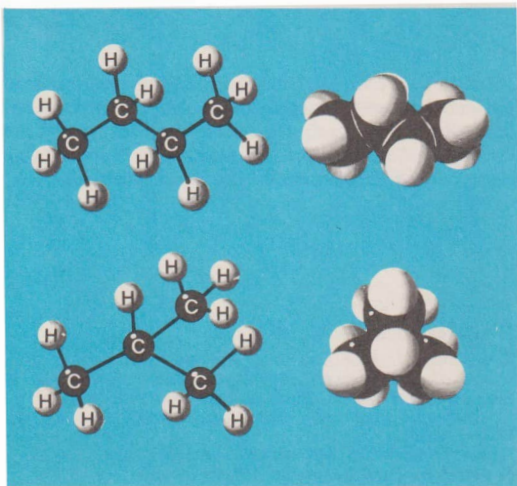


Tabelle 2: Zusammenhang zwischen Kohlenstoffgehalt und Zahl der Isomere

Kohlenstoffgehalt	Isomere
C ₅	3
C ₆	5
C ₇	9
C ₈	18
C ₉	35

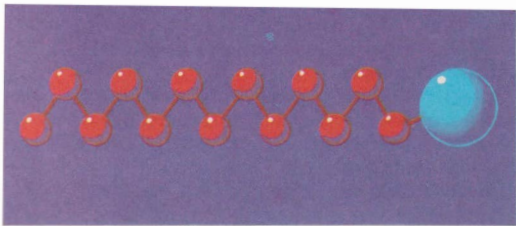
stets Gemische aus geradkettigen und verzweigt-kettigen Paraffinen vor. Dieser Umstand hat folgeschwere Bedeutung bei der Weiterverarbeitung des Erdöls auf Waschmittel und Treibstoffe.

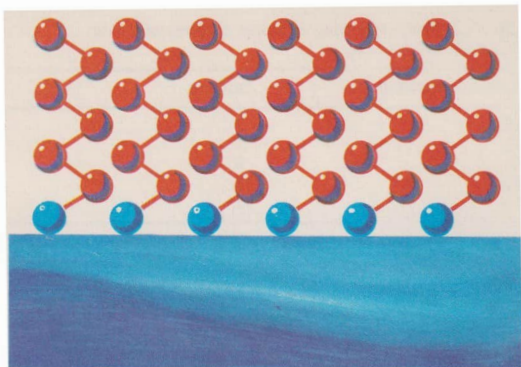
Die ältesten Waschmittel sind die Seifen, die sich schon im vorigen Jahrhundert beim Kochen von Fetten mit Pottasche oder Soda industriell herstellen ließen. Chemisch gesehen, sind es wasserlösliche Salze von langkettigen Fettsäuren. Zwei Strukturelemente bestimmen die Wasch- und Schäumwirkung der Seifen, eine lange, wasserabweisende (hydrophobe), öllösende Kette und ein wasserlösliches hydrophiles Strukturelement am Ende dieser Kette.

Moleküle mit einem derartigen Bauplan können sich auf der Wasseroberfläche ausrichten (s. S. 26).

Schema eines Tensid-Moleküls (Seifenmoleküls)

Für die Wasch- und Schäumwirkung verantwortliche Strukturelemente sind: eine hydrophobe Kette und ein hydrophiles Kettenende.





Oberflächenaktivität von Tensid-Molekülen

Bei Tensid-Molekülen taucht nur der hydrophile Teil in die Wasseroberfläche ein, die hydrophobe Kette ist nach außen gerichtet. Auf diese Weise wird die Oberflächenspannung des Wassers herabgesetzt (Schäumeffekt).

Sie setzen die Oberflächenspannung des Wassers herab – deshalb heißen sie auch oberflächenaktive Stoffe – und ermöglichen dadurch die Schaumbildung. Beim Waschvorgang umhüllen die hydrophoben Strukturelemente die Schmutzteile, Öl oder in Öl suspendierte feste Teilchen, und trennen sie von den Textilfasern ab. Es entstehen große, kugelförmige Gebilde, die durch Reiben beim Waschprozeß vollständig abgetrennt werden und sich schließlich in der wäßrigen Lösung verteilen. Auf diese Weise bildet sich eine Emulsion, die aus feinen Flüssigkeitströpfchen des Öls im Wasser besteht, ohne sich zu entmischen. Der Schutzfilm des Emulgators (Seifenmoleküle) verhindert, daß sich die Ölteilchen wieder miteinander vereinigen.

Längst reicht die natürliche Fettbasis nicht mehr aus, um den Bedarf an Waschmitteln, Emulgatoren und anderen oberflächenaktiven Stoffen (neuerdings auch Tenside genannt) zu decken.

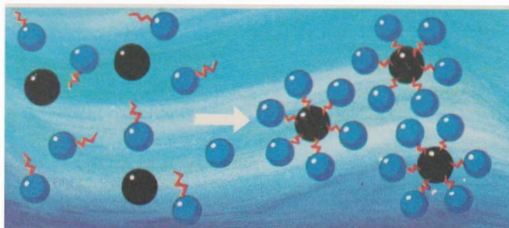
In den letzten Jahren ist eine Fülle von synthetischen Waschmitteln hergestellt worden, die in ihrem Preis mit

den herkömmlichen Seifen in Konkurrenz treten konnten und darüber hinaus noch bessere Eigenschaften besaßen. Sie reagierten neutral, waren in kaltem Wasser löslich und bildeten auch mit den Kalziumsalzen des harten Wassers keine schwerlöslichen Verbindungen. Ausgangsstoff für die Herstellung waren Fraktionen des Erdöls, z. B. die Leichtölfraction, in der Paraffine mit genügend langen Ketten (C_{13} bis C_{18}) vorkommen. Man mußte also »nur noch« an das Ende der Kette eine hydrophile Gruppe plazieren. Dafür gibt es prinzipiell eine ganze Reihe von Möglichkeiten (Tabelle 3).

Tabelle 3: Herstellungsmöglichkeiten von Waschmittelrohstoffen aus Paraffinen

Fettalkoholsulfate (FEWA)	Paraffinsulfonate
Paraffin ↓ Oxydation (O_2) Karbonsäure ↓ Hydrierung (H_2) Fettalkohol ↓ Sulfonierung (H_2SO_4) Fettalkoholsulfonat	Paraffin ↓ UV-Licht ($SO_2 + Cl_2$) Alkylsulfochlorid (Mersol) ↓ NaOH Alkylsulfonat (Mersolat)
Alkylbenzolsulfonate (s. Abb. S. 29)	

Schematische Darstellung des Waschprozesses
 Schmutz- und Ölpartikel, die selbst hydrophob sind und vom Wasser nicht benetzt werden, werden vom hydrophoben Teil der Tensid-Moleküle umhüllt und in der Waschlauge zu einer Emulsion fein verteilt (Netz-, Dispergier- und Emulgiereffekt).

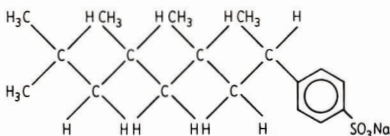


So sind, ausgehend von Paraffinen, Alkylarylsulfonate, Alkylsulfate oder Fettalkoholsulfonate hergestellt worden, die ganz hervorragende Wascheigenschaften besaßen. Sie schäumten so gut, daß sie gar nicht damit aufhören wollten – in den Abwasserkanälen, in den Flüssen. Und der Schaum wurde langsam zu einer Gefahr für das Leben in den Flüssen.

Warum war das früher anders, als man mit Seifen gearbeitet hat?

Die aus Fetten gewonnenen Seifen bestehen aus geraden Paraffinketten, die von den Bakterien abgebaut werden. Verarbeitet man aber Paraffine aus dem Erdöl, so geraten zwangsläufig auch die verzweigten Isoparaffine mit zur Umsetzung und werden in Form von Alkylarylsulfonaten oder Alkylsulfaten Bestandteil von Waschmitteln. Nun zeigt es sich, daß die Bakterien nicht mehr »mitspielen«; sie können keine verzweigten Ketten »verdauen«. So hat man heute neben den bisherigen Kriterien für Waschmittel ein weiteres – und für den Umweltschutz besonders bedeutsames – zu beachten, die Frage der biologischen Abbaufähigkeit. Man unterscheidet deshalb »biologisch weiche«, die von Bakterien abgebaut werden, von »biologisch harten« Waschmitteln. Die gesamte Waschmittelindustrie ist gegenwärtig darauf orientiert, »biologisch weiche« Waschmittel herzustellen.

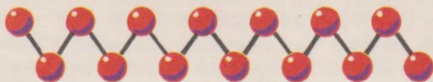
Ganz besonderen Ärger verursachte das Tetrapropylenbenzolsulfonat:



Waschmittelsynthese – Schema der Herstellung von Alkylbenzolsulfonaten.

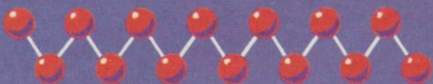
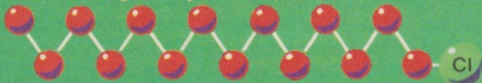
Wegen des statistischen Einbaus des Chloratoms entlang der Kette enthalten diese Waschmittel nicht nur Moleküle mit hydrophilem Rest am Kettenende (Idealfall), sondern auch über die Kette verteilt.

C₁₄ n-Paraffin



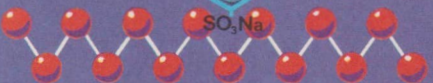
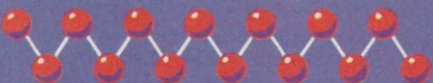
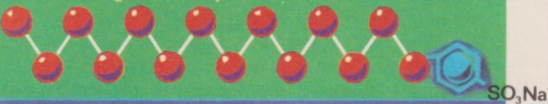
Chlorierung

unverzweigtes Alkylchlorid



Umsetzung mit Benzol und Sulfonierung

unverzweigtes C₁₄-Alkylbenzolsulfonat

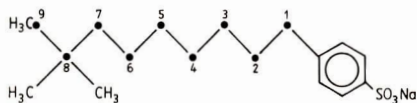


Bis 1964 war das billig herzustellende Alkylarylsulfonat Hauptteil der Waschmittelrohstoffe in der BRD. Wie Prüfungen ergaben, wird diese stark verzweigte Verbindung nur zu 20 bis 30 % biologisch abgebaut. Die Folgen waren verheerend: massenhaftes Fischsterben, Schaumberge auf den Flüssen. Man sah sich gezwungen, eine Rechtsverordnung zu erlassen, die fordert, daß unter vergleichbaren Bedingungen in Wasch- und Reinigungsmitteln anionaktive Waschmittel mindestens zu 80 % abgebaut werden. In der DDR sind diese Probleme nicht aufgetreten, da aufgrund einer anderen Rohstoffbasis und anderer Herstellungsverfahren eine solche dichte Aufeinanderfolge von kurzen Verzweigungen (CH_3 -Gruppen) wie im Tetrapropylenbenzolsulfonat bei unseren Waschmitteln nicht vorkommt. So liefern beispielsweise die Chlorierung von n-Paraffinen und deren Umsetzung zu Alkylbenzolsulfonaten neben dem unverzweigten Produkt zwar auch verzweigte Alkylbenzolsulfonate, aber mit längerer Kette.

Versuche haben bestätigt, daß die C_{10} - C_{13} -Alkylbenzolsulfonate mit unverzweigter Alkylkette unter den Prüfbedingungen zu 90 bis 95 % abgebaut werden.

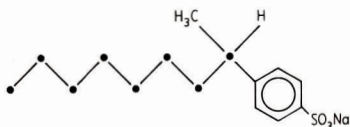
Der biologische Abbau findet teilweise schon in der Kanalisation statt, so daß vor Eintritt des Abwassers in die Kläranlage das Schäumen nachgelassen hat. Eine weitere Zersetzung erfolgt dann in den Flüssen.

Bevorzugt beginnt der biologische Abbau am Ende der Alkylkette. Aus diesem Grunde ist auch die Lage der Verzweigung innerhalb der Kette von Bedeutung. Sitzt beispielsweise am Kettenende eine doppelte Verzweigung wie im Falle der Verbindung 8.8-Dimethylnonylbenzolsulfonat, so finden die Bakterien keine Angriffsmöglichkeit:



Dementsprechend wird diese Verbindung noch schwerer abgebaut als Tetrapropylenbenzolsulfonat. Je näher die

Verzweigung am Benzolring steht, desto leichter wird sie biologisch abgebaut, was man z.B. von der folgenden Verbindung sagen kann:



Bei den Alkylsulfonaten und Alkoholsulfonaten gelten hinsichtlich der Verzweigung ähnliche Bedingungen.

Die Waschmittelindustrie hat bei der Herstellung ihrer Produkte eine Reihe von Faktoren zu beachten – neben der Waschwirkung also die biologische Abbaubarkeit, dazu aber auch die Fischverträglichkeit. Fragt man nun, wie diese Faktoren optimal unter einen Hut zu bringen sind, so erhält man folgende Antwort: Da mit zunehmender Alkylkettenlänge die Fischgiftigkeit zunimmt, die Waschwirkung ab C_{10} nur noch schwach zunimmt, der biologische Abbau aber von C_{12} ab wieder schlechter wird, liegt der optimale Bereich für Alkylbenzolsulfonate bei einer Alkylkettenlänge von zehn bis vierzehn C-Atomen.

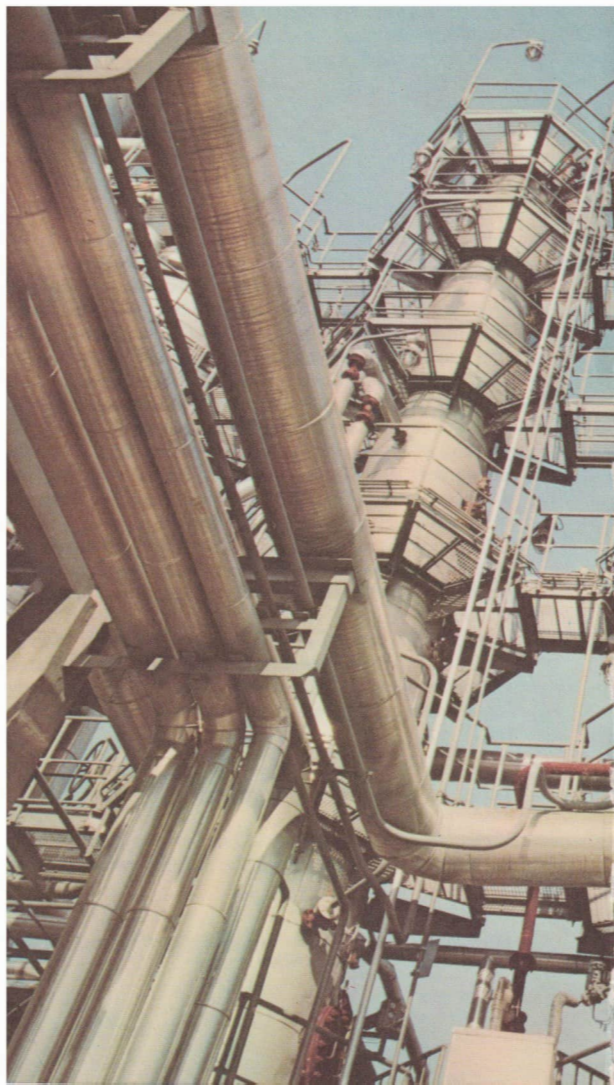
Einen großen Vorteil für die Waschmittelindustrie müßte ein Produktionsverfahren bringen, mit dem man die geradkettigen von den verzweigten Paraffinen abtrennen könnte!

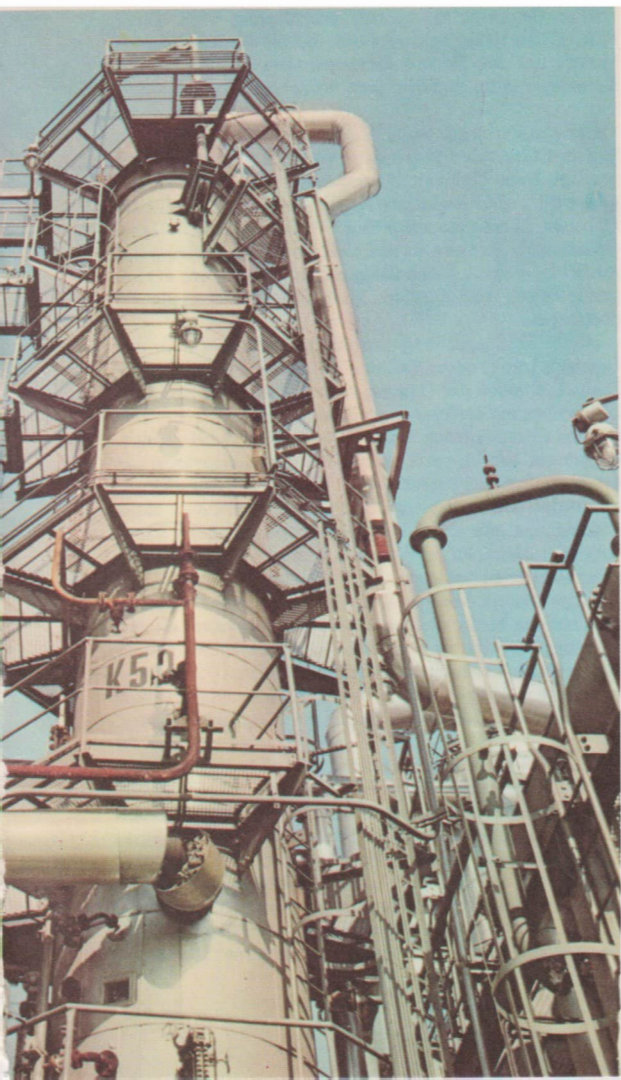
Doch nicht nur auf diesem Gebiet wäre das Verfahren von Nutzen. Eine Trennung der Paraffine in verzweigte und unverzweigte (n-Paraffine) hat auch große Bedeutung für die Gewinnung von hochwertigen Vergaserkraftstoffen.

Isooktan und die Oktanzahl

Vielen wird das sogenannte Klingeln oder Klopfen eines Benzinmotors bekannt sein, das auftritt, wenn er unter

Nächste Seiten: Destillationsbereich der Parex^(R)-Anlage im VEB Leuna-Werke »Walter Ulbricht«



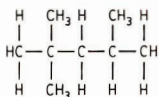


starker Belastung zu schnell beschleunigt wird. Diese Erscheinung ist ein Zeichen dafür, daß die Abstimmung des Motors auf das Benzin nicht gelungen ist und bei der Kompression im Zylinder eine vorzeitige Explosion auftritt.

Bekanntlich wird beim Niedergang des Kolbens ein Benzin-Luft-Gemisch aus dem Vergaser in den Zylinder gesaugt. Beim Kolbenhub komprimiert sich das Gemisch und wird gegen Ende des Kolbenhubs in unmittelbarer Nähe der Zündkerze durch einen Funken gezündet. Dabei dehnen sich die Gase so aus, daß eine Flammenfront das restliche Gemisch gleichmäßig durchwandert. Der entstehende Druck wird über den Kolben auf die Kurbelwelle übertragen.

Ist die Beanspruchung zu stark, so verbrennt zwar das Gemisch zum größten Teil normal – aber das sogenannte Endgas, nämlich der Gasrest, der am weitesten vom Entzündungspunkt entfernt ist, zersetzt sich noch vor Eintreffen der Flammenfront. Dadurch wird seine Entzündungstemperatur herabgesetzt, und es verbrennt unregelmäßig vor der eigentlichen Flammenfront. So entsteht das »Klopfgeräusch«. Die Leistung des Motors wird durch diese Erscheinung sehr gemindert. Hinzu kommt, daß das Klopfen um so stärker ist, je größer das Kompressionsverhältnis (Verhältnis vom Anfangs- zum Endvolumen beim Kolbenhub) des Motors. Mit dem Kompressionsverhältnis wächst aber nun die Motorleistung. So ist beispielsweise seit den zwanziger Jahren bis heute das Kompressionsverhältnis und damit die Leistung der Benzinmotoren von 4 : 1 auf 9 : 1 gesteigert worden. Diese Entwicklung war abhängig von einer zunehmenden Verbesserung der Klopfestigkeit der Benzine.

Schon früh hatte man erkannt, daß sich die einzelnen Benzinsorten in der Klopfestigkeit stark unterscheiden. Man strebte deshalb 1927 eine Standardisierung an. Bei der Suche nach geeigneten Standardmustern stellte man fest, daß die Isoparaffine den n-Paraffinen in der Klopfestigkeit überlegen sind. Zum Vergleich wählte man daher das besonders klopfeste Isooktan (genaue Bezeichnung 2.2.4-Trimethylpentan) und schrieb ihm die Oktanzahl 100 zu (Formel vgl. S. 35 oben). Als Nullpunkt der Skala



wurde das n-Heptan festgelegt, das besonders leicht zum Klopfen neigt.

Die Prüfung und Eichung eines Benzins erfolgt in einem Einzylindertestmotor, der unter ganz bestimmten Bedingungen arbeitet. Es gilt festzustellen, welches Gemisch aus n-Heptan und 2.2.4-Trimethylpentan (Oktan) die gleichen Klopf Eigenschaften aufweist wie das zu untersuchende Benzin. Muß man also beispielsweise dem n-Heptan so viel Oktan zusetzen, daß das Gemisch dann 80 % Oktan enthält, so ist die Oktanzahl des untersuchten Benzins 80. Ein Benzin mit geringerer Klopf festigkeit wird in seinen Klopf Eigenschaften unter den Prüfbedingungen vielleicht schon Übereinstimmung mit einem Prüfgemisch zeigen, in dem nur 74 % 2.2.4-Trimethylpentan enthalten sind. Seine Oktanzahl wäre dann also 74. Wie der Leser sicher schon festgestellt hat, wäre es nach alledem eigentlich richtiger, nicht von der Oktanzahl, sondern von der Isooktanzahl zu sprechen.

Wenn man einmal von den Zusätzen absieht, so ist die Klopf festigkeit eines Benzins um so besser, je weniger n-Paraffine es enthält. Eine Trennung der Paraffine in geradkettige und verzweigt-kettige ist eine schwierige Aufgabe. Man müßte so etwas wie ein Sieb haben, durch das die geradkettigen Paraffine hindurchschlüpfen können, in dem aber die verzweigten Ketten festgehalten werden!

Siebe für Moleküle?

Der Chemie kommt hier eine zufällige Beobachtung zu Hilfe, die Bengen 1930 gelang. Er bemerkte, daß n-Oktylalkohol (eine Verbindung mit einer Kette aus acht C-Atomen) mit Harnstoff Kristalle bildet, die aus Methanol auskristallisieren. Später setzte er anstelle des n-Oktylalkohols flüssige Paraffine mit Harnstoff um und stellte

fest, daß nur die n-Paraffine in die Zusammensetzung der kristallinen Addukte (Additionsprodukte) eingegangen waren. Die Isoparaffine waren in Lösung geblieben!

Gegen 1950 untersuchte W. Schlenk diese Addukte näher, die sich als Einschlußverbindungen von ganz besonderer Architektur erwiesen. Die Röntgenstrukturanalyse ergab, daß sich die Harnstoffmoleküle im Kristall in den Längskanten regulärer Prismen anordnen. Dadurch entsteht ein wabenförmiges Gebilde mit durchgehenden kanalartigen Hohlräumen, in die sich die Paraffinmoleküle in gestreckter Form einlagern. Stark verzweigte i-Paraffine finden in den Hohlräumen keinen Platz und werden deshalb auch nicht aufgenommen.

Mit zunehmender Kettenlänge der n-Paraffine wächst die Stabilität der Einschlußverbindungen. Während Paraffine bis C_6 nur unter Druck und bei tieferen Temperaturen Einschlußverbindungen bilden, entstehen solche höherer Paraffine ohne Anwendung von Druck. Interessant ist auch, daß sich die n-Paraffine durch Harnstoff nach ihrer Kettenlänge trennen lassen. Verwendet man weniger Harnstoff als zum vollständigen Einschluß der Paraffinketten benötigt wird (Harnstoffe im Unterschuß), so werden die längeren Ketten bevorzugt vor den kürzeren eingebaut.

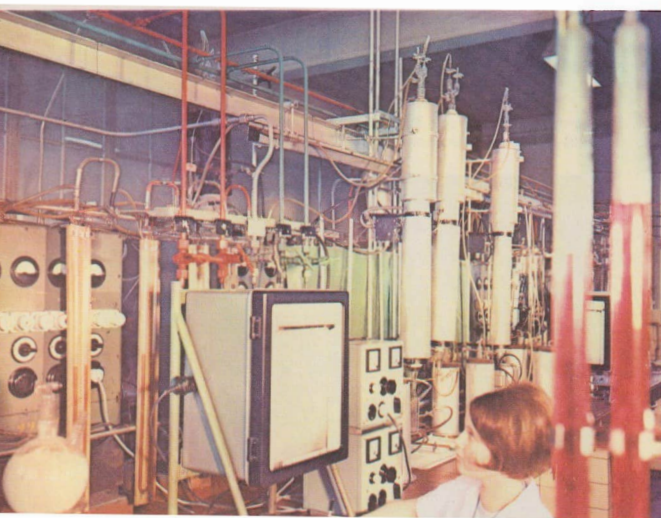
In den letzten Jahren ist die Paraffintrennung mittels Harnstoff in zunehmendem Maße durch Verfahren verdrängt worden, die mit Molekularsieben arbeiten. Auch das vom VEB Leuna-Werke »Walter Ulbricht« entwickelte Parex-Verfahren verwendet Molekularsiebe. Es nutzt die besonders gute selektive Adsorptionswirkung der zeolithischen Molekularsiebe »Zeosorb 5 AM«, die vom VEB Chemiekombinat Bitterfeld, Betriebsteil Wolfen, speziell für dieses Verfahren entwickelt worden sind. An diesen Molekularsieben werden nur die n-Paraffine adsorbiert, während alle anderen Komponenten des Erdölmitteldestillats des Bereiches C_{10} bis C_{22} (iso-Paraffine, Aromaten, Naphthene) unverändert hindurchgehen. Die adsorbierten n-Paraffine werden dann mit Hilfe eines hochwirksamen Verdrängungsmittels desorbiert.

Wie entsteht nun die »Siebwirkung« (Selektivität) der Molekularsiebe? Molekularsiebe sind kristalline Alumosil-

likate mit Raumnetzstruktur. Das Raumnetz wird von SiO_4 -Tetraedern und AlO_4 -Tetraedern gebildet – und zwar in der Weise, daß gleichmäßige sphärische Hohlräume durch gemeinsame Öffnungen (»Fenster«) miteinander in Verbindung stehen. Der freie Durchmesser des »Fensters« bei der vorliegenden Molekularsiebtype beträgt 0,5 Nanometer ($1\text{nm} = 10^{-6}\text{ mm}$). Der Siebeffekt besteht nun darin, daß Moleküle mit kleinerem Querschnitt als 0,5 nm leicht in das Innere der Hohlräume gelangen können, wo sie adsorbiert werden. Das trifft für n-Paraffine zu. Molekülen mit größerem Querschnitt ist der Zugang verwehrt.

Zum besseren Verständnis der Struktur der Molekularsiebe soll kurz erklärt werden, wie sich der Chemiker die Bildung einer Alumosilikat-Raumnetz-Struktur vorstellt.

Prüfstand zur Molekularsiebausprüfung



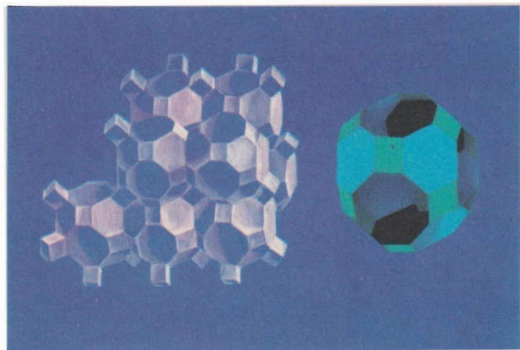
Das Element Silizium ist wie der Kohlenstoff vierwertig. So ist nicht erstaunlich, daß wir auch bei den Verbindungen des Siliziums Bausteinen von der Gestalt des Tetraeders begegnen. Während sich aber Kohlenstoffatome direkt miteinander – und mit Wasserstoff – zu Molekülen verbinden, strebt das Silizium danach, sich mit Sauerstoff zu umgeben.

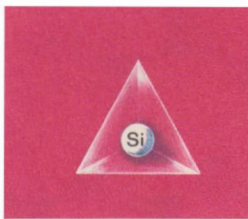
So entsteht beispielsweise Orthokieselsäure, die sehr leicht unter Bildung höherer Kieselsäuren kondensiert.

Die Salze der Kieselsäuren heißen Silikate (anstelle von H steht bei ihnen Na oder K). Die Kondensation der Kieselsäuren führt zu einer Fülle verschiedenartiger Strukturen, ihr verdanken wir die Entstehung des Riesenreiches der Silikate, das unsere Erdkruste bildet.

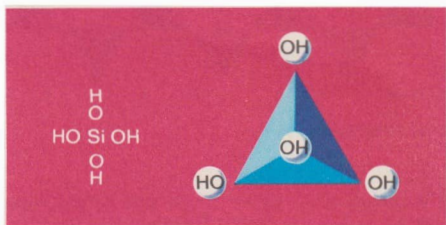
Silizium (silex – lat. – Kiesel) ist neben Sauerstoff das zweithäufigste Element auf der Erde. Der »Kiesel« am Strand ist ein mehr oder weniger reines Siliziumdioxid (SiO_2), das auch den Hauptbestandteil von Achat, Onyx, Jaspis oder Feuerstein bildet. In kristalliner Form finden wir Siliziumdioxid im Quarz und seinen Abarten wie Bergkristall (wasserklar), Amethyst (violett), Rosenquarz (rosa) usw.

Raumnetzstruktur der Molekularsiebe, daneben einzelner Hohlraum mit »Fenster« (Achteck)



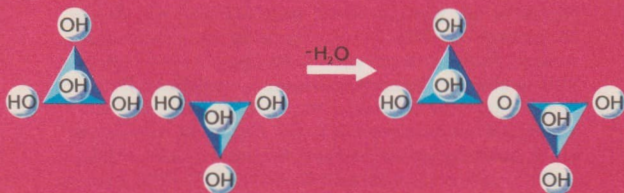


Siliziumatom (Tetraeder)

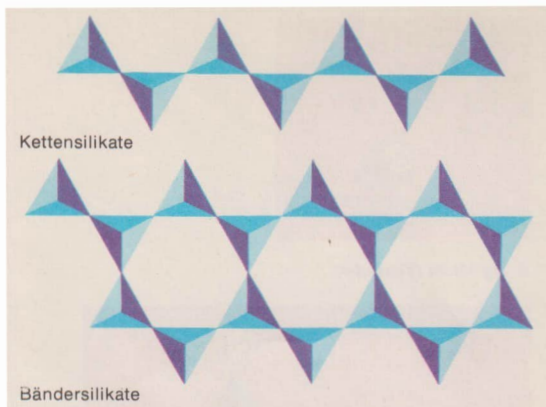


Orthokieselsäure

Das Siliziumatom ist über seine Ecken mit vier OH-Gruppen verbunden.



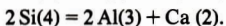
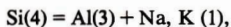
Schematische Darstellung der Bildung von höheren Kieselsäuren
Über die Tetraederecken verbinden sich zwei oder mehrere Kieselsäuremoleküle unter Wasserabspaltung (Kondensation) zu höheren Molekülen. Auf diese Weise können Ketten-, Bänder- und Raumnetzstrukturen entstehen.



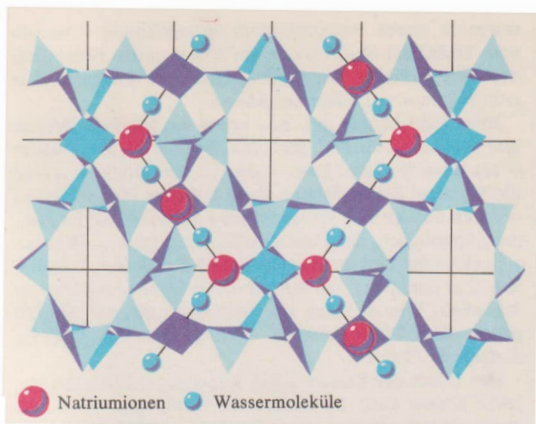
Verschiedene Silikatstrukturen

Der Übersichtlichkeit halber ist in den Abbildungen darauf verzichtet worden, in das Tetraeder das Si einzuzichnen; auch sind die O zwischen den Tetraedern und die OH an den freistehenden Ecken der Tetraeder weglassen worden.

Geht die Kondensation so weit, daß alle Si-OH miteinander zu Si-O-Si reagieren, so entsteht ein räumliches Netzwerk mit Kanälen. Stellt man sich nun vor, daß in bestimmten Abständen in den Tetraedern jeweils ein vierwertiges Si-Atom durch ein dreiwertiges Al-Atom ersetzt wird (wobei die Tetraederarchitektur erhalten bleibt), so gelangt man zum Raumnetz der Aluminosilikate. Der notwendige Wertigkeitsausgleich, der durch den Austausch des Si-Atoms gegen ein Al-Atom erforderlich wird, erfolgt durch Einbau von Na-, K- oder Ca-Ionen in die Hohlräume, wo diese Ionen leicht beweglich untergebracht sind:



Die Metallionen lassen sich durch Wasserstoffionen austauschen (Ionenaustauscher). Wenn man das ebenfalls



Zeolith-Silikat-Raumnetzstruktur

Die blauen Kugeln sollen Wassermoleküle, die roten Kugeln Natrium- bzw. Aluminiumionen darstellen, die in den Hohlräumen »vagabundieren«.

in den Hohlräumen eingelagerte Wasser verdrängt hat, steht ein Alumosilikatraumnetz zur Verfügung, dessen »Maschenweite« durch den Hohlraumdurchmesser (»Fenster«) gegeben ist.

Bei der selektiven Adsorption der Erdöldestillatfraktionen »verdrücken sich« die Moleküle der n-Paraffine in die Hohlräume des Alumosilikats, während sie bei der Desorption (wie vorher das Wasser) wieder vertrieben werden.

Über Repellents und Attraktiva

Ein ungewöhnlich heißer Sommer, dieser Sommer 1972. Die Sonne stand über dem ganzen Land. Herrliches Badewetter. Das empfanden auch die Wissenschaftler, die auf Einladung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR an einer Sommerschule für Polymere teilnahmen. Sie

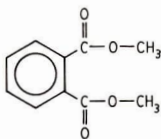
waren in einem Erholungsheim untergebracht – weitab vom Trubel der Stadt – nahe am Sosch, einem Nebenfluß des Dnjepr. Neben den Vorlesungen blieb genügend Zeit zum Baden – vor allem am Abend.

Zwei Tage konnte man nun schon das herrliche Wetter und das Baden im Fluß genießen. Es ging bis Mitternacht – am Ufer ein Lagerfeuer – und Lieder. Doch da waren die Mücken! Sie verfolgten einen auf dem Weg ins Heim – durch den kleinen Waldstreifen – sie summten im Zimmer. Unmöglich, das Fenster offen zu lassen, wollte man sich nicht den Blutsaugern »zum Fraß« ausliefern. Unmöglich aber auch, das Fenster bei dieser brütenden Hitze zu schließen. Wie machten das bloß die anderen? Abhilfe gegen diese Plage schaffte eine Sprayflasche mit der Aufschrift »Taiga«.

Der Inhalt der Flasche? Ein Repellent – ein Vertreter jener Klasse von chemischen Verbindungen, die durch ihren Geruch die Insekten verjagen (repellere -lat.- zurückstoßen).

Die Wirkung von »Taiga« war überwältigend. Die bisher von den Mücken Geplagten sprühten vor dem Schlafengehen das Zimmer aus, umsprühten das Fensterkreuz und die Scheiben und konnten dann die Nacht über bei offenem Fenster schlafen, ohne von Mücken belästigt zu werden.

Ein altbekanntes Insektenrepellent ist das Bremsenöl. Für die Bremsen ist der Geruch dieses Öls unerträglich – leider aber auch für den Menschen. Man hat nun in den letzten Jahren nach Stoffen gesucht, die zwar die Insekten verjagen, aber für den Menschen nur schwach oder angenehm riechen. Dabei ist man auf einige komplizierte Verbindungen gestoßen, die diese Bedingungen erfüllen. Auch eine relativ einfach gebaute Verbindung, wie Dimethylphthalat (Formel), schützt gegen Fliegenbefall.



Im Zuge dieser Forschungen gelangen weitere interessante Entdeckungen.

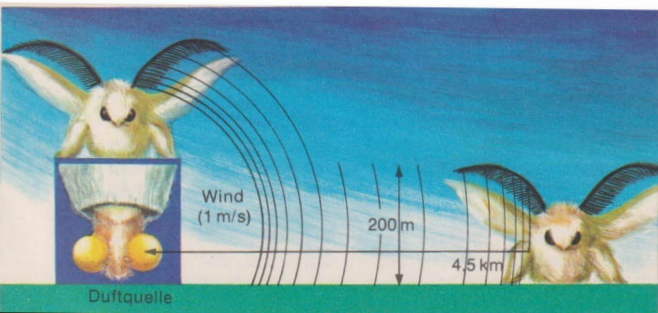
So gibt es organische Verbindungen, die durch ihren Geruch für längere Zeit Flöhe und Zecken vertreiben und etwa 150 bis 200 Tage wirksam sind.

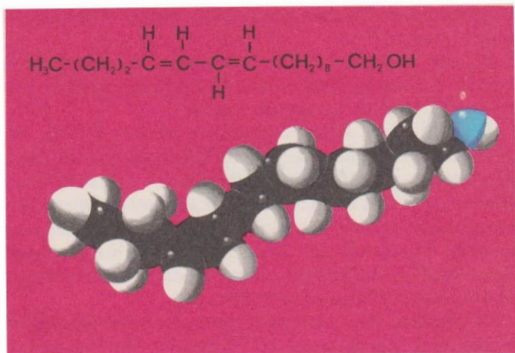
Bekannt sind auch insektenanziehende Stoffe, sogenannte Attraktants (Attraktiva). Dazu gehören vor allem die Sexuallockstoffe. Das Weibchen des Seidenspinners *Bombyx* scheidet einen Sexualstoff aus, der die Männchen aus einem Umkreis von einigen Kilometern Entfernung anlockt. Butenandt und seine Mitarbeiter haben diesen Sexualstoff in mühseliger Extraktionsarbeit angereichert und schließlich in reiner Form isoliert.

Es handelt sich um eine relativ einfache organische Verbindung, nämlich um das Hexadeka-10-trans, 12-cis-dien-1-ol (Bombikol), das die Seidenspinnermännchen so stark in Erregung versetzt. Sie reagieren ganz spezifisch nur auf genau diese Struktur. Bombikol hat zwei Doppelbindungen, von denen die eine cis- und die andere trans-Konfiguration aufweist. Bei cis stehen die H-Atome auf der gleichen Seite der Kette, bei trans befinden sie sich gegenüber. Schon eine geringfügige Änderung in der

*Der Seidenspinner (*Bombyx mori*)*

Bei einer Windgeschwindigkeit von 1 m/sec wird von den Männchen auf eine Entfernung von 4,5 km der Sexuallockstoff »Bombikol« aus der Duftdrüse der Weibchen wahrgenommen.

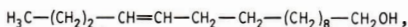




Strukturformel und Kalottenmodell der chemischen Verbindung »Bombikol«

Molekülstruktur bewirkt einen Rückgang in der Wirksamkeit. Beispielsweise zeigt das 10-cis-12-trans-Isomere eine um den Faktor 100 verminderte Wirksamkeit, und die beiden übrigen cis-trans-Isomere sind tausendmal weniger empfindlich.

Setzt man nun in die Versuche eine Verbindung ein, bei der eine der beiden Doppelbindungen aufgehoben ist, also z. B.



so führt diese doch scheinbar so geringfügige Änderung im Molekülaufbau zu einer Verminderung der Wirksamkeit um den Faktor 100 000.

Für die Schädlingsbekämpfung eröffnen sich völlig neue Möglichkeiten. Anstatt wie bisher Insektizide mehr oder weniger ungezielt auf Flora und Fauna zu versprühen, ohne Rücksicht darauf, daß auch nützliche Tiere gefährdet werden, wird man die jeweilige Insektenart in zunehmendem Maße selektiv bekämpfen. Man wird also insektenanziehende Lockstoffe aufstellen und dann die angeschwärmten Männchen mit Insektiziden töten. Möglich ist auch, die Männchen bei ihrem Flug zu den Weib-

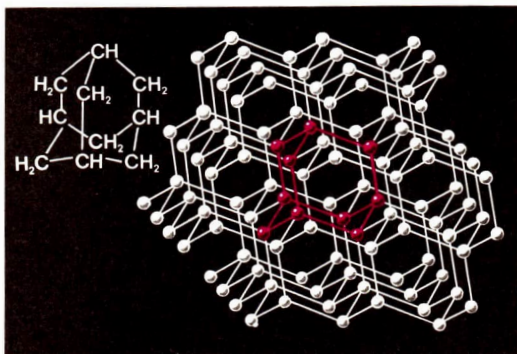
chen durch die Aufstellung von Attraktiva zu irritieren und auf diese Weise die Fortpflanzung zu stören.

Es kommt nun darauf an, die chemischen Verbindungen ausfindig zu machen, die für die eine oder andere Art von Insekten anziehend wirken. Der Kreis der Verbindungen ist durchaus nicht auf natürliche Sexuallockstoffe begrenzt.

Adamantan, eine aus dem Erdöl isolierte Verbindung, die den Chemiker zunächst nur wegen ihrer besonderen Struktur interessiert hat, entpuppte sich als ein wirksames Attraktant für den Borkenkäfer – den größten Schädling der Fichtenwälder. Adamantan hat seinen Namen nach dem Wort *adamas* (unbezwingbar) erhalten, weil es erstaunlich beständig gegen Oxydationsmittel wie KMnO_4 , CrO_3 und konzentrierte HNO_3 ist. Sein Gitter ähnelt dem des Diamanten, es bildet farblose, flüchtige, kampferartig riechende Kristalle.

Wie die Insekten auf die einzelnen chemischen Verbindungen reagieren, läßt sich z. B. durch elektrophysiologische Messungen ermitteln. Bei diesen Untersuchungen wird eine direkte Aussage über die Reaktion einer Riechzelle – eines Rezeptors – von Insekten auf die Einwirkung eines Riechstoffes erhalten. In winzigen Sinneshaaren oder

Strukturformel und vereinfachte Darstellung von Adamantan, im Vergleich dazu ein Ausschnitt aus dem Diamantgitter



kleinen Grübchen sind die Sinneszellen der Insekten bis zu vielen Tausenden einzeln oder zu mehreren auf den Antennen oder auch am Kopf der Tiere untergebracht und dadurch besonders gut zugänglich. Die dünnen Ausläufer der Riechzellen (Dendriten), die beim Menschen die sogenannte Riechschleimhaut bedecken, sind beim Insekt durch Poren in der Außenwand der Härchen und durch ultrafeine Kanäle in noch nicht völlig geklärter Weise mit der das Tier umgebenden Luft verbunden. Dadurch können die Riechstoffe in Bruchteilen von Sekunden bis zu den Dendriten vordringen und dort in Wechselwirkung treten.

An der Zellwand oder Zellmembran ist zwischen Innen- und Außenseite ein elektrisches Potential nachweisbar, das sogenannte Ruhepotential, das sich bei Erregung ändert. Die dabei eintretende Potentialschwankung nennt man Rezeptorpotential. Diese Potentialänderung löst unweit vom Rezeptorort Nervenimpulse aus, die entlang der Nervenfasern zentralwärts zum Gehirn laufen. Die Impulszahl ist der Höhe des Rezeptorpotentials und damit dem Grad der Erregung der Zelle proportional. Man kann die bei der Reizung durch einen Riechstoff entstehenden Impulse auffangen, verstärken und registrieren, so daß sich damit die Antwort einer einzigen Riechzelle quantitativ erfassen läßt.

Anhand eines Versuches ließ sich ermitteln, wie empfindlich die Riechzellen vom Seidenspinnermännchen *Bombyx* sind. In die Antenne des Männchens, die viele Tausend Riechzellen aufweist, wurde in die Nähe einer Riechzelle eine Mikroelektrode mit einem Spitzendurchmesser von etwa $5\text{ }\mu\text{m}$ eingestochen und eine Gegenelektrode in die Blutbahn des unter dem Mikroskop festgeklebten Tieres eingeführt.

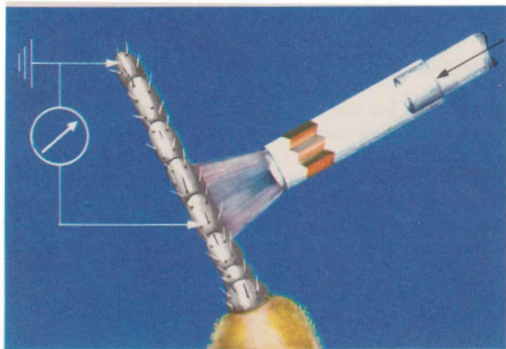
Nun wurde durch eine Kartusche, die ein mit Riechstoff getränktes Filterpapier enthielt, so lange Luft geblasen, bis eine Antwort der in der Nähe der Meßelektrode gelegenen Riechzelle zu registrieren war. Man wollte feststellen, bei welcher Konzentration keine Reaktion mehr auftritt. Es zeigte sich, daß die Empfindlichkeit der Riechzelle von *Bombyx*-Männchen auf den Sexuallockstoff Bombikol des Weibchens so groß ist, daß man für die außerordentlich

geringen Konzentrationen radioaktiv markiertes Bombikol einsetzen mußte. Damit ist aber dann ein hochinteressantes Ergebnis erzielt worden. Von den 10^{10} Molekülen (also 10 000 Millionen) Bombikol auf dem Filterpapier der Kartusche verdampften bei einer bestimmten Strömungsgeschwindigkeit der Luft 10^5 Moleküle (100 000) in der Sekunde. Davon wurden 900 Moleküle auf der Antenne adsorbiert, von denen 100 Moleküle zur Reaktion mit 25 000 Rezeptorzellen zur Verfügung standen. Man hat nun ausgerechnet, daß ein einziges Molekül ausreicht, um einen elektrischen Impuls auszulösen.

Es gibt Insekten, z. B. die Bienen oder auch manche Fliegen, die viele verschiedene Blütendüfte wahrnehmen und unterscheiden können und die ein ähnlich leistungsfähiges Geruchssystem aufweisen wie die Menschen. Untersuchungen an Bienen und Nachtfaltern mit Riechstoffen der verschiedensten Geruchsrichtungen haben ergeben, daß jede Zelle über ein nur ihr eigenes, charakteristisches und festgelegtes Riechspektrum verfügt.

Bei einer Arbeitsbiene ermittelte man das elektrophysio-

Schemadarstellung zur elektrophysiologischen Untersuchung von Insektenriechzellen (nach Schneider). Ein hochempfindliches Potentiometer zeigt die Potentialänderung an, die beim Überblasen von Riechstoffen auftritt.



Zelle Nummer	28	31	32	33	34	35	39	45	47
Ruhefrequenz(Impuls/s)	1	1	15	8	1	10	25	20	5
Eugenol									
Benzylazetat									
Aldehyd C 10									
sog. Aldehyd C 14									
sog. Aldehyd C 16									
Geraniol									
Geranylazetat									
Propionsäure									
Buttersäure									
Kapronsäure									

Schemadarstellung des elektrophysiologischen Verhaltens von 9 Zellen der Arbeitsbiene (nach Schneider) beim Überblasen von Riechstoffen (hellblau – Indifferenz, dunkelblau – Hemmung, rot – Erregung)

logische Verhalten von neun Zellen beim Überblasen verschiedener Riechstoffe. Dabei ergab sich ein charakteristisches Raster, das dadurch zustande kam, daß die einen Zellen stark, andere schwach oder nicht erregt worden sind.

Rosenoxid und Fliederalkohol

Der Mensch hat sich schon recht früh für Stoffe interessiert, die als wohlriechend und wohlschmeckend in Naturprodukten vorkommen. Der Name Parfüm hat seinen Ursprung im lateinischen pro fumo (für den Rauch), was darauf hindeutet, daß solche Stoffe bei Kulthandlungen als Zusatz zum Opferfeuer verwendet worden sind.

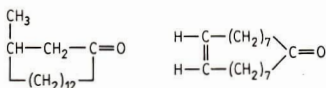
Mitte des vorigen Jahrhunderts hat man damit begonnen, ätherische Öle, Blüten- und Gewürzextrakte sowie einige tierische Absonderungen, wie Moschus, Ambra und Zibet, auf ihre eigentlichen Geruchsträger hin zu untersuchen.

Einer der begehrtesten und teuersten Riechstoffe ist der

Moschus. Er wird aus einer eigroßen Drüse des männlichen Moschustieres extrahiert und liegt nach dem Trocknen als eine dunkle, pulverförmige Substanz von starkem Geruch vor. Das Moschusmännchen lockt mit diesem Duft das weibliche Tier an. In den Gebirgen Zentralasiens, vor allem im Himalaja, hat man jährlich bis zu 60 000 dieser Tiere getötet, um aus ihren Drüsen etwa 2000 kg wertvollen Moschus zu gewinnen. Der eigentliche Geruchsträger, das Muskön, ist darin nur zu etwa einem Prozent enthalten.

Ähnlich liegen die Verhältnisse beim Zibet, das von Männchen und Weibchen der afrikanischen Zibetkatze gewonnen wird. Der eigentliche Geruchsträger ist das Zibeton.

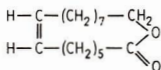
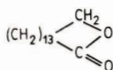
Von Ruzicka wurde in Zusammenarbeit mit der Schweizer Firma NAEF die Struktur dieser begehrten Riechstoffe aufgeklärt und ein Weg zur Synthese derselben gefunden. Die Untersuchungen zeigten, daß es sich hier um Verbindungen mit großer Ringgliederzahl handelt, denen eine damals gültige Theorie Instabilität zuschrieb. Muskön (links) wie Zibeton (rechts) erwiesen sich als 15- bis 17-gliedrige Kohlenwasserstoffe mit einer Ketongruppe:



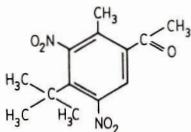
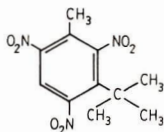
Bei den Synthesearbeiten hat Ruzicka eine interessante Beziehung zwischen Ringgliederzahl und Geruch beobachtet. Gesättigte Ringketone zeigen in Abhängigkeit von der C-Zahl folgende Geruchsnote:

C₅ – Bittermandel, C₆ – Pfefferminz, C₆ bis C₉ – Übergang zu Kampfer, C₉ bis C₁₃ – Übergang zu Zedern, C₁₄ – moschusartig, jedoch gemischt, C₁₅ – rein moschusartig, C₁₆ – moschus- bis zibetartig, C₁₇ – rein zibetartig, C₁₈ bis C₂₉ – Abnehmen und Verschwinden des Geruches.

Moschusartigen Geruch zeigen auch synthetisches Zyklopentadekanon (Exalton) sowie zwei natürliche Stoffe pflanzlichen Ursprungs, das Lakton der 15-Hydroxypentadezylsäure (links) und Ambrettolid (rechts):



Handelt es sich hier noch um strukturverwandte Verbindungen, so sind bei den nachfolgenden, ebenfalls moschusartig riechenden Stoffen auf den ersten Blick überhaupt keine Verwandtschaftsbeziehungen mehr zu erkennen (links Baur-Moschus, rechts Moschus-Keton):



Bei den Blütenriechstoffen gelang 1893 Tiemann und Krüger die Synthese der Ionone, die als Veilchenblütenriechstoffe sofort eine vielseitige Verwendung fanden. Im Laufe der Zeit sind die Hauptbestandteile der meisten ätherischen Öle isoliert und ihre Strukturen aufgeklärt worden. Das erfolgte oft in mühseliger Kleinarbeit. Aber mit jeder neuentdeckten Verbindung war auch ein Anreiz zum synthetischen Aufbau dieser oder ähnlich gebauter Verbindungen gegeben, die in ihrer Geruchsnote mehr oder weniger an ihr Vorbild herankamen.

Jahrelang war die Chemie der Geruchs- und Aromastoffe ein sehr schwieriges Arbeitsgebiet, da fast immer Gemische relativ flüchtiger, kompliziert gebauter Substanzen zu untersuchen sind.

Mit der Gaschromatographie ist hier ein echter Durchbruch erzielt worden. Durch deren Anwendung setzte auf dem Gebiet der Riech- und Aromastoffforschung eine stürmische Entwicklung ein. Man erkannte, daß bei jedem ätherischen Öl und bei jedem Aromakonzentrat bis zu hundert und mehr Verbindungen an der Zusammensetzung beteiligt sind. Beispielsweise sind im Tabakrauch, dessen Zusammensetzung mit Hilfe der Kombination Gaschromatographie/Massenspektroskopie untersucht wor-

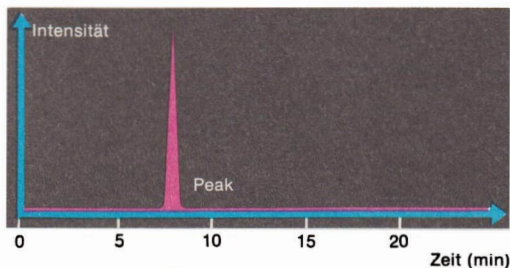
den ist, mehr als 2600 Inhaltsstoffe festgestellt worden. Im Teearoma hat man 194 Verbindungen nachgewiesen.

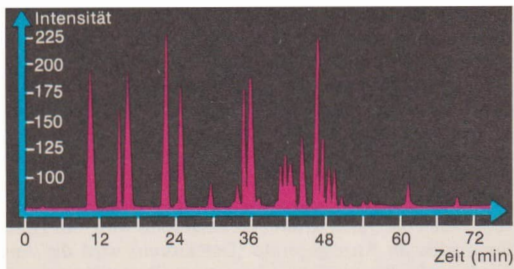
Das Prinzip der Gaschromatographie besteht darin, daß die Untersuchungsprobe verdampft und als Gas durch eine Säule geschickt wird, die einen bestimmten Füllkörper enthält. In dieser Säule wird die gasförmige Probe je nach ihrer Struktur mehr oder weniger lange zurückgehalten (Retentionszeit = Rückhaltezeit), bis sie von dem Strom des »Schleppgases«, das dauernd und gleichmäßig ebenfalls durch die Säule strömt, herausgespült wird. Mit Hilfe empfindlicher Anzeigergeräte (Detektoren) wird die Ankunft der Probe ermittelt und von einem Registriergerät als Peak niedergeschrieben.

Besteht die Untersuchungsprobe aus einer einzigen Verbindung, so erhält man nur einen Peak, handelt es sich aber um ein Gemisch aus mehreren Verbindungen, so entstehen bei guter Trennleistung der Säule so viele Peaks, wie Verbindungen in dem Gemisch vorliegen. Unsere Abbildung zeigt das Gaschromatogramm von Orangenöl. Man erkennt neun intensive Peaks und eine größere Zahl schwächerer (vgl. S. 52).

Mit Hilfe von Vergleichssubstanzen kann eine Untersuchungsprobe analysiert werden. Fehlen Vergleichssubstanzen – das ist oft der Fall bei der Untersuchung bisher völlig unbekannter Gemische –, kann man mit Hilfe eines

»Peak« (Ausschlag eines Meßinstrumentes), von einem Registriergerät aufgezeichnet

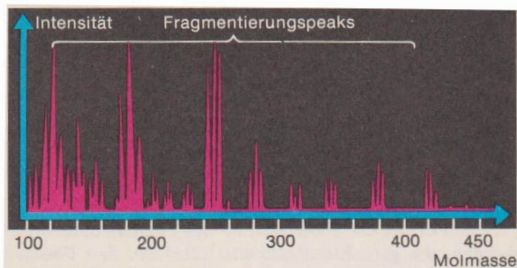




*Gaschromatogramm (»Aromatogramm«) von Orangenöl
Jeder Peak stellt eine bestimmte chemische Verbindung dar. Die
Höhe der Peaks gibt Auskunft, in welcher Menge die einzelnen
Verbindungen im Stoffgemisch vorkommen.*

Massenspektrographen feststellen, welche Molmasse dem einen oder anderen Peak zuzuordnen ist. Dazu muß die dem jeweiligen Peak entsprechende gasförmige Verbindung für sich getrennt in den Massenspektrographen geleitet werden, wo sie ionisiert wird und die Ionen durch ein Magnetfeld nach ihrer Masse »getrennt« werden. Bei der Ionisation kommt es in den meisten Fällen zur Spaltung (Fragmentierung) der Ausgangsverbindung, so daß neben dem eigentlichen Molpeak eine ganze Schar von Fragmentierungspeaks (bis zu fünfzig und mehr) registriert wird. Aus der Art der Fragmentierung ergeben sich bisweilen wertvolle Hinweise für die Identifizierung der Ausgangsverbindung.

Ein Gemisch aus zwanzig Verbindungen liefert demnach ein Gaschromatogramm mit zwanzig Peaks. Aus der Höhe bzw. Fläche der Peaks läßt sich die Menge der jeweiligen Verbindung ermitteln. Jeder einzelne Gaschromatogrammpeak zieht im Massenspektrographen durchschnittlich etwa dreißig Peaks nach sich, die auszuwerten sind. Für zwanzig Verbindungen fallen also etwa 600 Peaks an. Unser Beispiel zeigt das Massenspektrogramm einer Verbindung mit der Molmasse 400. Es ist leicht einzusehen, daß diese Aufgaben nur noch mit Hilfe von Computern rationell bewältigt werden können. Heute verfügt jedes größere Forschungsinstitut, das sich mit derartigen

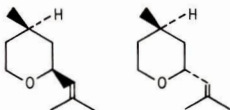


Massenspektrogramm einer Verbindung der Molmasse 400
 Der »Molpeak« bei 400 ist in diesem Beispiel nur schwach ausgeprägt. Deutlicher erscheinen die »Fragmentierungspeaks« bei 260, 180 und 120, die Spaltstücken des Moleküls zuzuordnen sind. Daß es sich hier um eine Verbindung der Molmasse 400 handelt, kann daraus geschlossen werden, daß oberhalb 400 keine Peaks zu sehen sind.

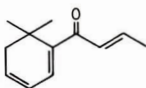
Untersuchungen befaßt, über entsprechende Geräteeinheiten, bestehend aus Gaschromatograph, Massenspektrometer und Elektronenrechner.

Für den typischen Geruch oder Geschmack eines Naturstoffs ist meist nur eine geringe Zahl von Substanzen verantwortlich, wobei diese durchaus nicht immer die Hauptkomponente des Gesamtgemisches darstellen muß. Es hat sich in den letzten Jahren gezeigt, daß Substanzen, die zu weniger als 0,1 % – ja, teilweise nur in der Größenordnung Promille – vorkommen, ausschlaggebend sind.

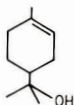
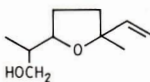
Etwa 95 % der Bestandteile des wertvollen Rosenöls waren bereits bekannt, trotzdem war ein zufriedenstellender »Nachbau« bisher nicht möglich. Einen ganz erheblichen Fortschritt brachte hier in jüngster Zeit die Entdeckung des Rosenoxids (Formel, links in trans- und rechts in cis-Stellung) und des Damaszenons.



Damaszenon ist im Rosenöl nur zu etwa 0,05 % enthalten, verleiht ihm aber eine natürliche Geruchsfülle und harmonische Abrundung:



Schon oft ist der Blütenextrakt des Flieders untersucht worden, die geruchbestimmende Substanz, den Fliederalkohol (links), fand man jedoch erst relativ spät.



Zur Rekonstruktion des Fliederduftes in der Parfümerie diente von alters her α -Terpineol (oben rechts) als Hauptgeruchsträger, dessen Geruchsnote dem Fliederalkohol recht ähnlich ist. Fliederalkohol besitzt aber eine natürlichere und haftendere Blütennote.

Bei den vielen Ergebnissen, die bis heute auf dem Riechstoffsektor gesammelt worden sind, tritt die Frage auf: Gibt es einen Zusammenhang zwischen dem chemischen Aufbau und dem Geruch eines Stoffes? Stellt man die Frage an die Riechstoffexperten, so erhält man widersprüchliche Antworten. Einige meinen, es bestehe kein direkter Zusammenhang. Andere stellen an einer großen Zahl von Beispielen heraus, daß man durchaus zwischen dem Geruch einer Verbindung und ihrem sterischen Profil einen Zusammenhang erkennen könne, wenn man es richtig anstellt.

Bittermandelgeruch zeigen z. B. mehrere aromatische Verbindungen — Nitrobenzol, Benzaldehyd, Benzonitril. Nitrobenzol wurde früher als billiges Parfüm für Seifen verwendet. Wegen seiner Giftwirkung bei offenen Wunden wird es heute nicht mehr eingesetzt. Benzonitril ist als Gift deklariert, während Benzaldehyd völlig harmlos ist und

auch heute noch den Hauptbestandteil des Bittermandel-
aromas ausmacht.



Nitrobenzol



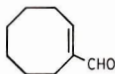
Benzaldehyd



Benzonitril

Hier könnte man aus der ähnlichen Struktur auf Ähnlich-
keit im Geruch schließen.

Inzwischen sind fast fünfzehn weitere Verbindungen mit
Bittermandelgeruch festgestellt worden, von denen nur
einige noch entfernt das gleiche sterische Profil aufweisen,
z. B. folgende drei:



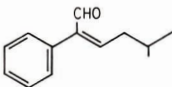
Es hat damit fast den Anschein, als ob für den Bit-
termandelgeruch praktisch nur das in allen obengezeigten
Verbindungen stets wiederkehrende sterische Profil



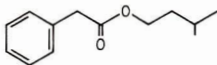
$X = \text{NO}_2, \text{CHO}, \text{CN}$

verantwortlich sei. Derartige Erkenntnisse könnten, wenn
sie sich bewahrheiten, dem Synthetiker als »Bauplan« für
völlig neue Riechstoffe dienen.

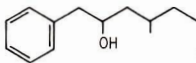
Kakaogeruch zeigen wieder folgende Verbindungen:



5-Methyl-2-phenyl-hex-2-enal



Isoamylphenylazetat

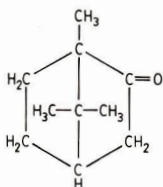


Benzylisobutylkarbinol

Diese Verbindungen lassen ebenfalls gewisse Ähnlichkeiten in der Struktur erkennen. Alle drei kommen auch unter den etwa 300 bisher bekannten isolierten Geschmackskomponenten des Kakaos vor.

Wenn man sich einigermaßen geschickt die Strukturformel zurechtlegt, so erhält man schon für viele Gerüche eine Art Strukturschattenbild. Es ist aber mehr ein Schattenbild als ein klares Spiegelbild der Struktur.

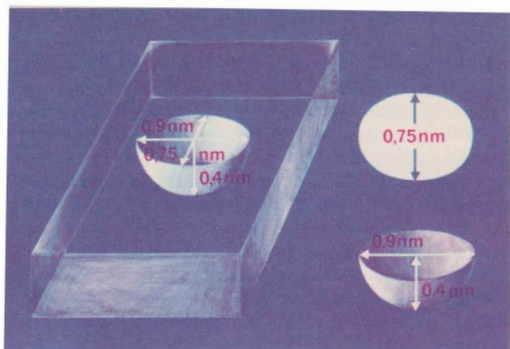
Die Frage: Warum riecht das eine so und das andere so? wird heute nicht zum ersten Mal gestellt. Schon im Altertum hat man darauf eine Antwort gesucht. Interessant ist die Auffassung des römischen Dichters und Philosophen Lucretius, der in seinem Werk »De rerum naturae« meint, daß von den riechenden Gegenständen die runden angenehm und die eckigen, kantigen unangenehm riechen. Von heutiger Sicht könnte man das nur insofern bestätigen, daß uns der Geruch einiger Moleküle von Kohlenwasserstoffen mit kugliger Gestalt, z. B. Kampfer,



tatsächlich frisch und meist angenehm erscheint.

Anfang der sechziger Jahre hat J. E. Amoore sehr viel Mühe darauf verwandt, zwischen der Gestalt der Moleküle einer Verbindung und ihrem Geruch Zusammenhänge aufzudecken.

Seine Theorie geht davon aus, daß es Rezeptoren im Geruchssystem des Menschen gibt, die ansprechen, wenn das Molekül des Riechstoffs aufgrund seiner Molekülgestalt in den Rezeptor paßt. Moleküle mit Kugelgestalt – wie Kampfer – haben einen frischen, kampfrigen Geruch, während der blumige Geruch eher von stäbchenförmigen Molekülen herrühren soll. Für die Rezeptorstelle bei den nach Kampfer riechenden Molekülen hat Amoore eine



*Rezeptorform für den Grundgeruch »kampfrig«
(nach Amoore)*

Wannenform ganz bestimmter Maße abgeleitet. Nur wenn das Molekül in diese Wanne paßt, kann eine kampferartige Empfindung ausgelöst werden. Auch für die Grundgerüche blumig, ätherisch, moschusartig und minzig hat Amoore ganz konkrete, durch Meßzahlen definierte und voneinander verschiedene Formen für die Rezeptoren vorgeschlagen. Er hat von 600 Riechstoffen nach verschiedenen Methoden die Form der Moleküle bestimmt und die Verbindungen geruchlich eingestuft. Für die ersten der sieben wahrscheinlichen Grundgerüche hat er je einen repräsentativen Riechstoff ausgewählt. Eine größere Gruppe von Testpersonen hatte dann zu entscheiden, mit welchem Grundgeruch der zu prüfende Riechstoff am besten übereinstimmte. Ergebnis dieser Versuche von Amoore war die Einteilung der Vielfalt der Geruchseindrücke in vierzehn Gruppen, in die »wahrscheinlichen Grundgerüche« kampfrig, stechend, blumig, ätherisch, pfefferminzartig, moschusartig und faulig, weiter in die »Grund- oder Komplexgerüche« mandelartig, aromatisch und anisartig und schließlich in die »wahrscheinlichen Komplexgerüche« zitronenartig, zedernartig, knoblauchartig und ranzig.

Kaviar vom INEOS

Neulich hatte ich einen seltsamen Traum. Mir war, als wäre ich mitten im Meere – unter Wasser. Hinter dicken Scheiben beobachtete ich Schwärme von Fischen. Ich befinde mich in einer Bar. Es gibt Sekt mit Kaviar. Schwarzbefrackte Kellner holen den Kaviar von einem Grill – nein, es ist gar kein Grill, denn hinter den Scheiben dieses Apparates bewegen sich Gefäße – auf und ab –, durchsichtige Rohre leiten Flüssigkeiten – siebartige Vorrichtungen schöpfen etwas ab. Ich bemühe mich angestrengt, zu begreifen, was hier geschieht, wie das alles funktioniert. Es muß das eine Art Automat sein. Aus einem Rohr tropft in kurzen Abständen eine Flüssigkeit auf eine andere schwach gelbliche. Die Tropfen erstarren zu lauter kleinen Kügelchen, die durchsichtig aussehen – wie Glasperlen oder besser wie Sago –, denn sie scheinen weicher zu sein. Eine Lampe leuchtet auf – die Gefäße geraten wieder in Bewegung – die einen hinauf, die anderen hinunter, ein Schub Kügelchen rutscht über eine Schräge in eine dunkle Flüssigkeit – wird mit einer siebartigen Vorrichtung herausgeschöpft und ist nun nicht mehr wasserklar, sondern schwarz wie Kohle. Für Bruchteile von Sekunden sind sie meinem Blick durch einen Dunstschleier entzogen ...

Bei der Durchsicht von Fachliteratur war ich eingeschlafen – es war auch schon fast Mitternacht. Zuletzt hatte ich einen Artikel im *Žurnal Prikladnoj Chimii* gelesen, der einen ganz nüchternen Anstrich hatte: »Untersuchungen über den Einfluß von Zusammensetzung und Herstellungsbedingungen auf die physikalisch-chemischen Eigenschaften von granulierten Gelen«. Die Autoren sind Mitarbeiter des berühmten Instituts für elementorganische Verbindungen (INEOS) der Akademie der Wissenschaften in Moskau. Zunächst hatte ich also eher mit der Untersuchung eines technischen Polymers gerechnet, bis ich schließlich in der Einleitung auf das Wort Kaviar gestoßen bin. Da fiel mir auch wieder die hochinteressante Reportage ein, die Sonderkorrespondenten der »Freien Welt« zur Frage »Künstliche Nahrungsmittel« aus dem INEOS gebracht haben. Und hier war beiläufig der Kaviarautomat erwähnt.

Schon vor Jahren hat sich der Direktor dieses Instituts, der frühere langjährige Präsident der Akademie der Wissenschaften der UdSSR, Professor Nesmejanow, mit dem Gedanken getragen, Nahrungsmittel zu synthetisieren. Ausgangspunkt seines Vorhabens war die Überlegung, daß das Nahrungsproblem der Menschheit letzten Endes eine Frage der Eiweißbilanz ist. Dort, wo heute gehungert wird, fehlt vor allem Eiweiß. Von Experten wird das jährliche Eiweißdefizit auf etwa fünfzehn Millionen Tonnen geschätzt. Eiweiß braucht der Mensch, um verbrauchte Gewebezellen zu erneuern, um Gerüstsubstanz aufzubauen. Eiweiß selbst in seinen unterschiedlichen Erscheinungsformen, ob im Fleisch, in der Milch oder im Ei, setzt sich wiederum aus Aminosäuren zusammen. Diese Aminosäuren sind relativ einfache organische Verbindungen. Alles Leben – die ganze Vielfalt der belebten Natur – wird von zwanzig Aminosäuren aufgebaut. Das Geheimnis liegt in der Struktur.

Der Mensch gewinnt die Aminosäuren von tierischem Eiweiß (Nahrungsaufnahme in Form von Fleisch). Dazu muß er den Tieren zunächst jahrelang pflanzliches Eiweiß füttern. Hinsichtlich der Aminosäureausbeute ist das ein recht wenig ergiebiges Unterfangen. Ein 10-Zentner-Mastochse produziert bei gutem Futter täglich 500 g Eiweiß. Ähnlich liegen die Verhältnisse bei anderen Tieren – bei Schweinen, Schafen, Enten, Hühnern –, die sich der Mensch im Laufe seiner geschichtlichen Entwicklung als Aminosäurelieferanten auserkoren und gezüchtet hat. Es gibt aber nach heutigem Wissen »Tiere«, die in der Eiweißproduktion viel ergiebiger sind; es sind dies Mikroorganismen, Mikroben, kleinste tierische oder pflanzliche Lebewesen wie Bakterien, Algen oder Pilze, die sich mit großer Geschwindigkeit vermehren. Sie benötigen als »Futter« nur Melasse (ein Nebenprodukt der Zuckergewinnung) oder Produkte der Holzverzuckerung und manche sogar nur die n-Paraffine des Erdöls. Im Vergleich zu unserem Mastochsen liefert eine 10-Zentner-Kultur einzelliger Mikroorganismen täglich nahezu 1000 kg Eiweiß, das in seinem Aminosäuregehalt dem üblichen tierischen Eiweiß stark ähnelt. Der Eiweißgehalt von Algen schwankt zwischen 40 und 60% der getrockneten Biomasse, von der

250 g genügen, um den täglichen Bedarf eines Menschen an Eiweiß und Vitaminen zu decken.

Schon lange verfüttert man in vielen Industriestaaten das so gewonnene Eiweiß als Beifutter an die Haustiere – mit gutem Erfolg. Kein Mensch aber wird daran denken, derartige Produkte als Nahrung anzuerkennen, und zwar deshalb nicht, weil es ihm einfach nicht schmeckt. Will man also für die Menschheit neue Nahrungsreserven nutzen, dann muß man Mittel und Wege finden, diese wertvollen Produkte in schmackhafte Speisen zu verwandeln. »Wenn es nicht gelingt, die spezifische, faserige Struktur des Fleisches, die feinfaserige des Fisches, die halbflüssige, mit einem feinen Häutchen versehene Struktur des Kaviars zu schaffen, wird es keine synthetischen Lebensmittel geben«, hat Nesmejanow einmal gesagt. Wer aber sollte diese Aufgabe lösen, wenn nicht die Chemiker und Physiker, die wissen, wie man faserige und gelartige Strukturen aufbaut? Erfahrungen sind in den letzten Jahren durchaus gesammelt worden – oft unter einem ganz anderen Aspekt, nämlich dem der Gewinnung von Polymerwerkstoffen oder Synthesefasern für textile Zwecke.

Diese Kenntnisse kann man jetzt bei der Imitation von Schweineschnitzeln, Fischfilet, Makkaroni oder Kaviar nutzen. Mit Hilfe von Vernetztpolymeren, die selbst keinen Nährwert besitzen und für den Menschen auch unschädlich sind, schafft man die Strukturen, »an denen der Mensch zu kauen hat«. Sie verleihen z. B. einem Grießkorn die gewohnte Festigkeit, Konsistenz und Quellfähigkeit.

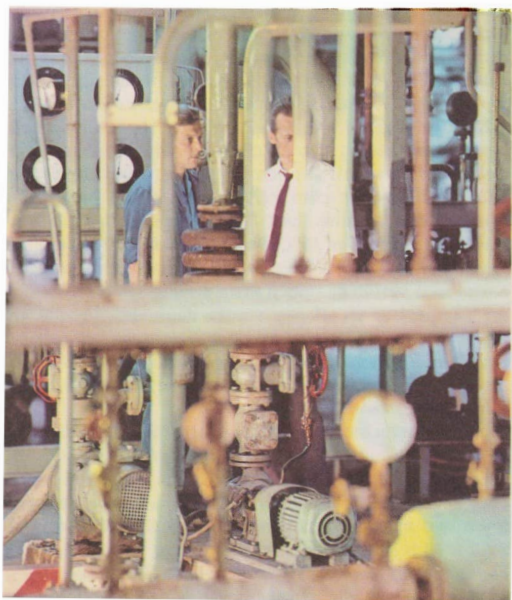
Die Kunst der »Lebensmittelsynthetiker« besteht darin, daß ihre Produkte im rohen Zustand ihren natürlichen Vorbildern ähnlich sehen müssen und daß sie sich entsprechend verhalten, wenn sie gekocht, gebraten oder geschmort werden. Schließlich sollen sie auch noch in Geschmack und Geruch den natürlichen Lebensmitteln gleichen. Hier kommen nun die wissenschaftlichen Erkenntnisse zum Tragen, die gerade in den allerletzten Jahren auf dem Gebiet der Riech- und Aromastoffe zahlreich gewonnen worden sind. Man ist heute in der Lage, mit Hilfe der verschiedenen Chromatographiemethoden die Geruchs- und Geschmacksträger zu analysieren.

Vergleicht man beispielsweise ein mittels Gaschromato-

graphie gewonnenes »Aromatogramm« von schwarzem Kaviar mit dem von rotem Kaviar, so erkennt man deutliche Unterschiede. Analog einer Temperaturanzeige durch Geräte, die viel genauer ist, als es das Gefühl des Menschen erlaubt, werden durch das »Aromatogramm« eines Gaschromatographen die Geschmacks- und Geruchsnote präziser ermittelt. Das haben auch die hohen Gäste erfahren, die vom INEOS zum Verkosten des synthetischen Kaviars erstmals geladen waren. Es wird erzählt, daß die gespannten Prüfer, nachdem sie einige Löffelchen Kaviar auf Zunge und Gaumen hatten zergehen lassen, nach und nach

Gelatinewerk Calbe

Gelatine ist ein künstliches Nahrungsmittel, das wir uns heute nicht mehr von unserem Speiseplan wegdenken können.



ihre Anerkennung zu äußern begannen. Nur einer der Gäste wiegte bedächtig den Kopf, ließ seine Zunge wieder und wieder über Gaumen und Lippen streichen und äußerte schließlich, als alle Blicke erwartungsvoll auf ihn gerichtet waren, zögernd: »Nun ja — sehr gut, aber die Chemie schmeckt doch noch ein bißchen durch.« Da brachen der Direktor des INEOS und seine Mitarbeiter in ein lautes und befreiendes Lachen aus. Man hatte nämlich die Voreingenommenheit einkalkuliert und den Gästen zunächst erst einmal echten Kaviar serviert. Als man nachher nun doch den synthetischen Kaviar zur Prüfung anbot, waren sich alle einig, daß eine Unterscheidung durch Verkosten praktisch nicht möglich ist.

Sehr leicht läßt sich aber der Unterschied mit Hilfe einer Säure, also beispielsweise schon mit Essig oder Zitrone, feststellen: Natürlicher schwarzer Kaviar bleibt schwarz, synthetischer schwarzer Kaviar entfärbt sich, so wie sich auch der schwarze Tee aufhellt, wenn man Zitrone dazutropft. Tee ist nämlich auch im Spiel, wenn man Kaviar synthetisiert. Aus den publizierten Angaben des Instituts geht etwa folgende Rezeptur hervor: Als Hauptkomponente dient Casein, also Milcheiweiß, als Gelbildner wird Gelatine verwendet. Zu den gelartigen, karviarähnlichen Kügelchen kommt man dadurch, daß man eine heiße Lösung, die Gelatine und Casein enthält, auf reinstes Vaselineöl auftropfen läßt. Das Vaselineöl muß vorher auf 5 bis 7°C abgekühlt werden. Die frisch entstandenen Kügelchen verbleiben noch etwa dreißig Minuten bei dieser Temperatur im Öl. Sie werden dann abgeschöpft, gewaschen und mit einem Extrakt aus grünem Tee gefärbt, mit einer Eisenchloridlösung gegerbt und schließlich mit einer Kombination von Aromastoffen in den kulinarischen Endzustand überführt.

Über künstlichen Kaviar und echte Feinschmecker gibt es noch eine hübsche Geschichte zu erzählen. Man hat Kaviar mit Lebensmittelfarben in den verschiedensten Farben eingefärbt. Unter anderem hat man knallig blauen, roten und auch grünen Kaviar hergestellt und ihn Feinschmeckern zum Verkosten angeboten. Obwohl in allen Fällen sowohl die Konsistenz als auch die Geschmacksnote vollständig die gleichen waren, stellten sich beim

Verkosten wesentliche Unterschiede heraus. Die meisten der Verkoster brachten es einfach nicht fertig, den knallgrüngefärbten Kaviar zu schlucken. Hier zeigt sich die Komplexität der Probleme bei der Herstellung künstlicher Nahrungsmittel in einem extremen Falle.

Doch die Herstellung von künstlichem Kaviar ist nicht der Hauptzweck der Arbeiten auf diesem Gebiet. Man hat ihn lediglich als Paradebeispiel ausgewählt. Wirtschaftlich viel bedeutender sind beispielsweise Fragen, die die Grundnahrungsmittel betreffen, z. B. die Kartoffel. Wenn man bedenkt, wieviel Wasser eine Kartoffel enthält, so wird klar, daß beim Kartoffeltransport sehr viel Energie und Ladevolumen für den Wassertransport verschwendet werden. Hinzu kommt die hohe Empfindlichkeit der Kartoffel gegenüber Kälte. Wieviel Verluste treten allein durch das Faulen der Kartoffel in kalten Klimaten auf! Die Gewinnung von Kartoffeltrockensubstanz und die Herstellung von schmackhaften Kartoffelspeisen aus dieser Masse sind von größtem Interesse.

Le Mistral

Nach dem stürmischen Nordwind des Rhône-tals hat er seinen Namen – der Expreß Paris–Lyon–Marseille. Mit 200 km/h durchquert er Frankreich in der Nordsüdrichtung, gezogen von einer Lokomotive, die mit Polyimidfolie isolierte Leiter in den zwei Paar 4000-PS-Zwillingsmotoren aufzuweisen hat.

Le Mistral (Expreß Paris–Lyon–Marseille)



Bei Probefahrten hat die »CC 6500«, so heißt diese Lok, Geschwindigkeiten bis zu 280 km/h erreicht.

Lange Beratungen zwischen der französischen Eisenbahn »SNCF« und der Firma Alsthom, einem der größten Hersteller von Antriebsmotoren in Frankreich, sind dem Entschluß vorausgegangen, die teure Polyimidfolie »Kapton« der Firma Du Pont als Leiterisolation einzusetzen.

Man hatte eine Studie anfertigen lassen. Für die Motorkonstruktion waren dabei zwei Varianten in Betracht zu ziehen:

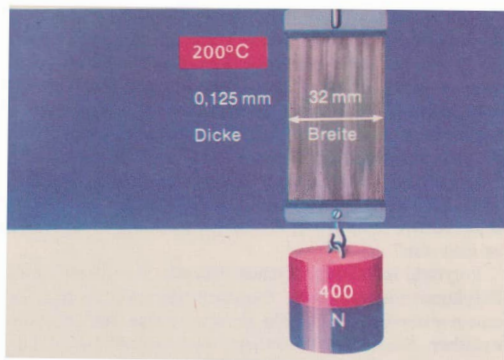
Variante 1: Steigerung der Leistung bei unveränderten Dimensionen,

Variante 2: Verminderung von Größe und Gewicht des Motors bei unveränderter Leistung. Das Ergebnis der Studie lautete wie folgt: Einsparung der Herstellungskosten je Kilowatt Antriebsmotorleistung für Variante 1 um 3 %, für Variante 2 um 9 %.

Läßt man den Kupferquerschnitt unverändert, d. h., bleibt man bei der bisherigen Motorleistung, dann bringt die teure Polyimidisolierung in den Herstellungskosten des Motors immer noch eine Einsparung um 3 %, weil mit der dünneren Isolierfolie eine Verminderung der Wicklungslänge um 7 % und eine Gewichtseinsparung von 5 % möglich werden.

Auch in der Technologie der Isolierung ist eine Verbesserung erzielt worden. Man wickelt eine Polyimidverbundfolie – FEP – mit 50 % Überlappung um den Leiter und erhitzt das Ganze kurzzeitig bis auf 300 °C, bis der FEP-Anteil der Folie gerade zu schmelzen beginnt. Auf diese Weise wird die Isolierung »versiegelt«, d. h. dicht verschweißt. Da das Polyimid selbst nicht schmilzt, wird die »Versiegelbarkeit« mit Hilfe einer dünnen Schicht eines thermoplastischen Fluorpolymers (FEP = Polytetrafluorco-hexafluorpropylen) erreicht, die einseitig oder beidseitig auf der Polyimidfolie aufgebracht ist.

Bisher hat man für die Leiterisolierung eine Asbestumwicklung mit Silikonlack eingesetzt, die nicht so einfach zu handhaben ist und mehr Platz in Anspruch nimmt. Obwohl die Polyimidfolie um ein Mehrfaches dünner ist als die Asbest-Silikon-Wicklung, braucht man nicht zu



Schema zur Demonstration der Zugfestigkeit einer Polyimidfolie bei erhöhter Temperatur

fürchten, daß sie reißt. Die Zugfestigkeit liegt nämlich bei über 150 N/mm^2 und beträgt selbst bei 200°C noch mehr als 100 N/mm^2 , d. h., man könnte ein Gewicht von 400 N bei 200°C an einem dünnen Folienstreifen von $0,125 \text{ mm}$ Dicke und 32 mm Breite aufhängen, ohne daß er zerreißt.

Besondere Bedeutung kommt der Tatsache zu, daß Polyimid kein thermoplastisches Fließen zeigt. Die inzwischen über einen Zeitraum von elf Jahren durchgeführten Tests beweisen, daß Polyimidfolie bei 200°C und einem Druck von 85 N/mm^2 $100\,000$ Stunden ohne Veränderung geblieben ist. Das ist schon eine beachtliche Lebensdauer unter diesen Bedingungen!

Weitere Testwerte bescheinigen der Polyimidfolie acht Jahre Gebrauchsfähigkeit bei 250°C ohne Versprödung. Kurzzeitig kann sie sogar Temperaturspitzen von 400°C ohne Zerstörung verkraften. Solche Überbelastungen sind es, die den Konstrukteuren von Bahnmotoren immer Kopfzerbrechen bereitet haben. Auch die Leistungsfähigkeit von Werkzeugmotoren hängt stark von der Überbelastbarkeit der Isolierung ab. Kleine, handliche Bohrmaschinen mit Polyimidisolierung »schmoren« eben nicht mehr so leicht durch!

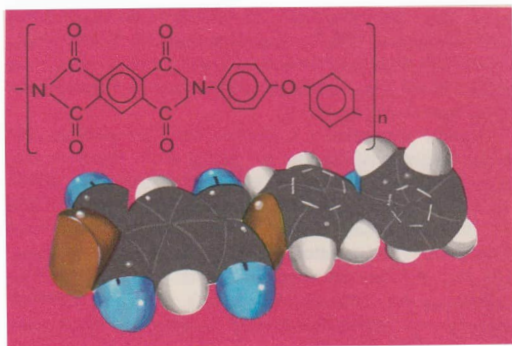
Was ist das nun eigentlich – dieses Polyimid? Wie ist sein Aufbau, wenn es bis zu hohen Temperaturen derartig gute mechanische und elektrische Festigkeiten aufweist? Es scheint anorganischen Charakter zu besitzen. Versucht man einmal, solch einen gelbbraunen Folienstreifen zu verbrennen, so verlöscht alsbald die Flamme. Das Material ist also selbstverlöschend und schwer brennbar – eine Eigenschaft, die von jedem Konstrukteur hoch geschätzt wird. Gegen den anorganischen Charakter spricht also seine relativ hohe Bruchdehnung von 70 bis 90 %. Was ist es also nun?

Polyimid ist ein organisches Polymer. Es entsteht durch Polykondensation von Pyromellitsäuredianhydrid mit einem aromatischen Diamin, beispielsweise Diaminodiphenyläther. Nach einer besonderen thermischen Behandlung zeigt es die untenstehende Struktur.

Polyimide sind Vertreter einer Reihe von Polymeren, die in den letzten zehn bis fünfzehn Jahren im Zusammenhang mit der Entwicklung der Weltraumfahrt, der Raketentechnik, mit dem Bau von Überschallflugzeugen oder Tiefseekapseln entstanden sind.

In allen Staaten, die auf diesen Gebieten den technischen Fortschritt bestimmen, steht die Forderung nach derarti-

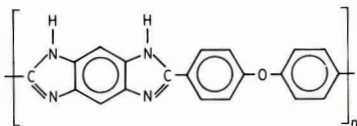
Strukturformel und Kalotte von Poly-pyromellitimid



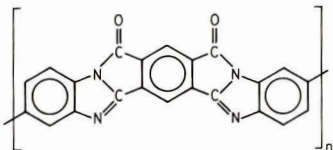
gen Werkstoffen. Kollektive von Chemikern, Physikern und Konstrukteuren befassen sich mit der Herstellung, Eigenschaftsuntersuchung und Verarbeitbarkeit von solchen Polymeren, die in ihrer Struktur große Ähnlichkeit mit dem Polyimid aufweisen.

Das Aufbauprinzip besteht ganz allgemein in einer Verkettung von aromatischen mit heterozyklischen Ringen. Heterozyklen sind Ringe, die neben Kohlenstoff auch noch andere chemische Elemente enthalten, beispielsweise Stickstoff oder Sauerstoff.

Die Synthetiker kombinierten in allen Variationen. Liefert die Polykondensation von Tetrakarbonsäuren mit aromatischem Diamin Polyimide, was bringt dann die Umkehrung – also Dikarbonsäuren mit Tetraaminen? Man kommt zu Polybenzimidazolen:

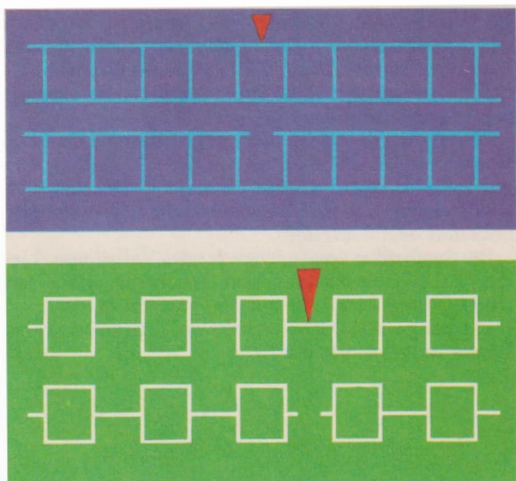


Schließlich bringt die Umsetzung von Tetrakarbonsäuren mit Tetraaminen Gebilde hervor, bei denen nur noch Ringe aneinandergereiht sind. Es sind dies die sogenannten Polypyrrone, die thermisch noch stabiler sind, weil hier die Spaltung einer Bindung nicht die Kette als solche abbaut:



Darin scheint überhaupt das Geheimnis der Festigkeit dieser Strukturen zu liegen! Die Beobachtung bestätigt sich: ladder-Polymere (Leiterstrukturen) sind stabiler als stepladder-Polymere (Halbleiterstrukturen).

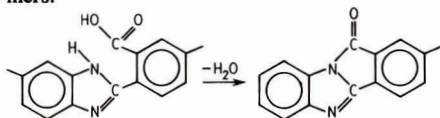
In der Praxis ist es allerdings nicht einfach, solche ideali-



Vereinfachte Darstellung (Prinzip) von »ladder« (Leiter)- und »stepladder« (Halbleiter)-Polymeren

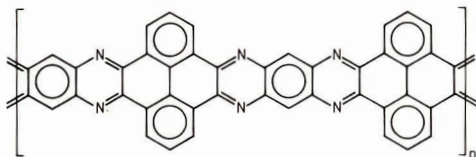
Der rote Pfeil zeigt den Angriff auf eine Bindung des Makromoleküls, der beim ladder-Polymeren zwar einen Defekt, aber keine Spaltung des Polymeren in kürzere Stücke bewirkt.

sierten »Polymerleitern« zu bauen (rechte Formel unten). Wenn auf fünfzig bis hundert notwendiger Ringschlüsse zwei oder drei nicht zustande kommen, so ist das schlimmer, als wenn bei einer Leiter zwei oder drei Sprossen fehlen. An diesen Stellen fehlt dann im Kettenmolekül nicht nur etwas, sondern die nicht zur Umsetzung gelangten funktionellen Gruppen sind wie eine Einstiegs Luke für den Sauerstoff der Luft (linke Formel). Von hier aus beginnt bevorzugt der thermisch-oxydative Abbau des Polymeren.



Bei Abwesenheit von Luftsauerstoff – also beispielsweise in Stickstoff – beginnt der Abbau trotz der Fehlstellen mitunter erst 100 bis 200 °C höher. Für den Sauerstoff aber bieten die vor dem Ringschluß vorliegenden funktionellen Gruppen der Tetrakarbonsäure oder des Tetraamins, die Karboxyl- bzw. Aminogruppen, ideale Reaktionsmöglichkeiten. Das Problem ist eben, daß mit zunehmender Ringaneinanderreihung die Starrheit des Reaktionssystems wächst und dazu führen kann, daß die den Ringschluß herbeiführenden Gruppen infolge der stark eingeschränkten Molekülbeweglichkeit gar nicht mehr zueinanderfinden, um den Ringschluß vollziehen zu können. Hierin zeigen sich also die Grenzen für den Aufbau thermostabiler Strukturen.

Die Struktur



ist bei Kurzzeitmessungen bis 900 °C, dagegen in Luft nur bis 400 °C beständig.

Alle diese aromatischen Polyheterozyklen werden aus Verbindungen aufgebaut, die über mehrere Stufen aus technisch schwer zugänglichen Ausgangsstoffen hergestellt werden müssen und sehr teuer sind. Aus diesem Grunde bezeichnet man sie als exotische Polymere und setzt sie nur dort ein, wo man keine andere Wahl hat. Bisher war das der Fall in der Weltraumfahrt. Dort werden Polymere gefordert, die bei 330 °C 400 Stunden und bei 540 °C 80 Stunden lang belastet werden können und gleichzeitig auch noch über eine gute Strahlenfestigkeit verfügen. Weiter sind elektrisch transparente Antennenschutzkappen (Radome) für schnellfliegende Flugzeuge aus glasfaserverstärktem Polyimid hergestellt worden. Schließlich haben die Konstrukteure von Überschallflugzeugen für die Herstellung von Tragflächen und verschiedenen Steuerorganen sowie im Kabinenbau Polyimid-Glasgewebe-Honig-

wabenstrukturen mit Decklagen aus Titan verwendet, da an der Außenhaut von Überschallflugzeugen Betriebstemperaturen von 225 bis 250 °C auftreten.

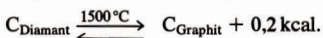
Tabelle 4: Dauerwärmebeständigkeit thermostabiler Polymerer

Chemische Bezeichnung	Dauerwärmebeständigkeit (25 000 Stunden in °C)	
Silikone	180–200	
Polytetrafluoräthylen (PTFE)	260	
Polytetrafluor-co-hexafluorpropylen (FEP)	205	(Thermoplast)
Polyimid	250	
Polyesterimid	180–190	
Polybenzimidazol	240–250	(unter Stickstoff)
Poly-karboransiloxan	250	(Elast)
Poly-karboran-benzimidazol	300	
	600	(kurzzeitig in Luft)
	700	(kurzzeitig in Stickstoff)
Pyrolysiertes PAN	2000	(25 Sekunden)

Die Zeit scheint gekommen, wo die »exotischen Polymere« auf der Erde Fuß fassen – in der Elektronik der Großrechner, im Elektromaschinenbau, überall, wo sich der Trend zur Miniaturisierung bemerkbar macht, wo die Forderung nach mehr Sicherheit der Funktionselemente, nach mehr Leistung auf engem Raum steht. Man wird vielerorts in der Technik umdenken – Kalkulationen unter neuen Aspekten erstellen müssen. Le Mistral ist ein Beispiel dafür.

Diamant – Graphit

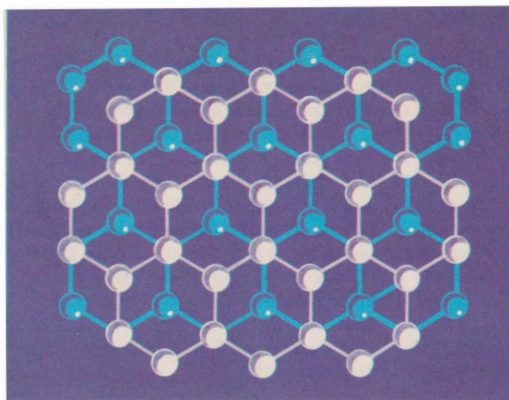
Welch ein Unterschied zwischen den harten, farblosen, wasserklaren, stark lichtbrechenden Kristallen mit der hohen Dichte von $3,51 \text{ g/cm}^3$ des Diamants und der grauen, undurchsichtigen, schuppigen, sich fettig anführenden Masse des Graphits! Kaum vorstellbar, daß diese beiden etwas miteinander gemeinsam haben. Und fast unglaublich mutet es an, daß sich der wegen seiner Härte von den alten Griechen als unbezwingbar (adamas) bezeichnete Diamant unter gewissen Bedingungen freiwillig in weichen Graphit verwandelt. Ein Glück für die Juweliere und Schmuckhändler der ganzen Welt, daß diese Bedingungen nicht alltäglich sind! Man braucht schon 1500°C . Dann aber wandelt sich der Diamant unter Luftabschluß in Graphit um, wobei Wärme freigesetzt wird:



In Gegenwart von Luft verbrennt der Diamant allerdings schon bei 800°C zu Kohlenoxid.

Diamant und Graphit sind nichts anderes als reiner Kohlenstoff. Der Unterschied in den Eigenschaften liegt im Kristallgitter begründet. Im Graphit sind die Kohlenstoffatome in Sechsecken angeordnet, die wie bei einem Parkett zu einer Schicht zusammengesetzt sind. Oberhalb und unterhalb dieser Schicht liegt im Abstand von $0,335 \text{ nm}$ wieder eine Sechseckschicht – und zwar so, daß über der Mitte eines jeden Sechsecks der Ausgangsebene ein Kohlenstoffatom der benachbarten Ebene angeordnet ist. Jedes Kohlenstoffatom ist innerhalb einer Sechseckebene nur mit drei anderen Kohlenstoffatomen verbunden. Dafür betätigt es drei seiner Valenzelektronen. Das vierte Valenzelektron eines jeden C-Atoms ist aber vom Atomrumpf losgelöst und bildet mit Dutzenden seinesgleichen zwischen den Kohlenstoffebenen ein freibewegliches Elektronengas, das die positiv geladenen Sechseckschichten zusammenhält.

Dieser Aufbau im Kristallgitter erklärt sowohl die elektrische Leitfähigkeit als auch die leichte Spaltbarkeit des Graphits parallel zur Schichtebene sowie die Schmierwirkung in dieser Richtung. Senkrecht zur Schichtebene treten



Anordnung der Sechseckebenen im Graphitgitter

entgegengesetzte Eigenschaften auf (schwere Spaltbarkeit, keine Schmierwirkung). Bei einer solchen Richtungsabhängigkeit der Eigenschaften eines Festkörpers spricht man von Anisotropie.

Im Unterschied zu Graphit betätigt der Kohlenstoff im Diamant alle vier Valenzelektronen in gleicher Weise, so daß dadurch ein völlig isotroper Körper entsteht (gleiche Eigenschaften in unterschiedlichen Richtungen), bei dem jedes C-Atom tetraedrisch von vier Nachbar-C-Atomen umgeben ist.

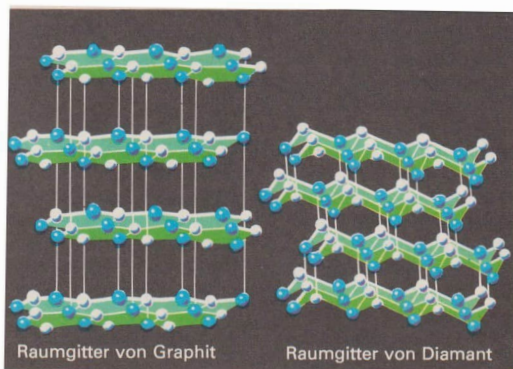
Im Gedankenexperiment kann man die Umwandlung des Graphitgitters in das Diamantgitter dadurch vollziehen, daß man die Schichten sich einander nähern läßt, bis sich je zwei der vierten Valenzelektronen abwechselnd nach oben und unten zu einer Elektronenpaarbindung vereinigen. Der Abstand der einzelnen Ebenen im Diamantgitter beträgt nur noch 0,205 nm. Das Fehlen freibeweglicher Elektronen hat zur Folge, daß sich Diamant als ausgesprochener Nichtleiter – als elektrischer Isolierstoff – verhält.

Nachdem man erst einmal erkannt hatte, daß Diamant

hochverdichteter Kohlenstoff ist, fehlte es nicht an Versuchen, ihn aus Kohlenstoffverbindungen unter Anwendung von Druck und Hitze zu synthetisieren.

Im Jahre 1880 hat der Engländer Hannay ein Gemisch aus Paraffinen und Knochenöl mit feinst verteiltem metallischem Lithium in einen Flintenlauf getan, diesen zugeschmolzen und anschließend das Flintenrohr bis auf Rotglut erhitzt. Aus der kohligen Reaktionsmasse will Hannay dann winzige Diamantkriställchen isoliert haben. Mehrfach hat man probiert, diesen Versuch zu wiederholen – aber stets ohne Erfolg. Ganz besondere Mühe hat sich der Engländer Parson gegeben. 1907 gelangte er bei sorgfältiger Nacharbeit zu dem Ergebnis, daß die Angaben von Hannay nicht reproduzierbar sind. Aber dann kam der berühmte Lonsdale und untersuchte mittels Röntgenstrukturanalyse zwölf der winzigen Kriställchen, die im Britischen Museum als Hannay-Diamanten ausgestellt waren, und fand, daß elf von ihnen tatsächlich Diamantstruktur aufweisen. Allerdings konnte er keine Garantie dafür übernehmen, daß die von ihm untersuchten Kriställchen mit den angeblich von Hannay hergestellten

Graphitgitter und Diamantgitter



wirklich identisch waren. Parson ließen diese Versuche keine Ruhe. Hatte er vielleicht etwas übersehen? Nach Beendigung des ersten Weltkrieges begann er noch einmal mit der Nacharbeit der von Hannay beschriebenen Versuche – aber stets ohne Erfolg.

Synthetischer Diamant – das wäre etwas! Es brauchten gar keine großen Stücke zu sein, Splitterchen würden genügen. Werden doch ohnehin nur etwa 3 % der gefundenen Diamanten in der Schmuckindustrie verwendet. Für hartes Material, insbesondere für Diamant selbst, benötigt man dagegen fast 70 % als Schleifmittel und etwa 30 % als geschnittene Bortsteine, beispielsweise für Bohrer als Spitze zum Bohren sehr harter Gesteine, zum Schneiden von Glas, als Achsenlager für Präzisionsgeräte oder als Ösen zum Ziehen feinsten Drähte harter Metalle.

1947 meldete die BELL TELEFON GES, daß es gelungen sei, durch Erhitzen von Polydivinylbenzol auf sehr hohe Temperaturen reinen Kohlenstoff in Form kleiner, schwarzer Kügelchen von diamantartiger Härte zu erhalten. Man sprach von »synthetischem Diamantpulver in Karbonadoform«. Bekanntlich findet man Diamant – z. B. in Ghana oder Zaire – bei Anwesenheit geringer Verunreinigungen auch als farbige Steine, als gelbe, rote, grüne, braune, blaue oder violette Stücke. Die tiefschwarzen werden Karbonados genannt.

So etwas Ähnliches also glaubte man bei der BELL TELEFON GES in den Händen zu haben. Die nähere Untersuchung ergab dann allerdings, daß die harten, schwarzen Splitterchen keine Diamantstruktur aufwiesen; sie erhielten den Namen Polymerkarbon.

Es sind in der Folgezeit von verschiedenen Seiten Vorstöße zur künstlichen Herstellung von Diamant unternommen worden – mit immer stärkerer wissenschaftlicher Durchdringung. Aufgrund des Zustandsdiagramms des Kohlenstoffs verdichtete sich die Erkenntnis, daß echte Chancen für die Bildung von Diamant bei Temperaturen von etwa 3000 °C und mehr als 100 000 at Druck gegeben sind. Wie aber sollte man solche Bedingungen technisch realisieren?

1955 war es dann so weit. Unabhängig voneinander sind bei ASEA in Schweden und bei GENERAL ELEK-

TRIC in den USA Konstruktionen von Hochdruck-Hochtemperatur-Apparaten zur Synthese von Diamant eingesetzt worden – mit Erfolg.

Dem Amerikaner Hall ist es mit der sogenannten Belt- oder Gürtelapparatur bei 100 000 at und 2800 °C geglückt, 0,5 mm große, oktaederförmige Kriställchen herzustellen, die sich durch Röntgenstrukturanalyse, Härte und Lichtbrechung als Diamant erwiesen. Die Elementaranalyse zeigte aber nur einen C-Gehalt von 85 %. Der Rest von 15 % waren anorganische Bestandteile. Demnach war der Ausgangsstoff nicht reiner Graphit, sondern enthielt offenbar Metalle als katalytische Zusätze. Man weiß heute, daß die Umwandlung von Graphit in Diamant in Gegenwart von Übergangsmetallen als Katalysatoren schon bei 1500 bis 2500 °C und Drücken von 50 000 bis 80 000 at erfolgt.

Das Wesentliche an der Konstruktion von Hall ist der Belt, ein von den Seiten her die Druckkammer umschließender Stützring. Ganz entscheidend für den Erfolg dieser Apparatur war die Auswahl der richtigen Werkstoffe. Stempel und Belt sind zum Ausgleich der mechanischen Spannungen aus mehreren Lagen verschiedener Werkstoffe aufgebaut, innen Wolframkarbid und außen Stähle. Die eigentliche Druckkammer, in der sich die Umwandlung von Graphit in Diamant vollzieht, ist mit Pyrophyllit, einem Alumosilikat, ausgekleidet, das als Druckübertragungsmedium sowie zur elektrischen und thermischen Isolation dient. Die Beheizung erfolgt im direkten Stromdurchgang durch ein Heizelement aus Graphit, das in den Pyrophyllitkörper eingesetzt ist.

Bei der Synthese muß zuerst der Druck voll aufgebracht, dann das Reaktionsgemisch hochgeheizt und etwa dreißig Minuten »gepreßt« werden. Anschließend wird die Heizung abgestellt und erst nach Abkühlung der Druck entlastet. Die entstehenden Diamantkriställchen sind nur einige zehntel Millimeter groß. Sie sind in der Technik sehr gefragt und werden vielseitig eingesetzt (vgl. oben). Fast 50 % des industriellen Bedarfs werden heute durch synthetische Diamanten gedeckt.

Mit den winzigen Kriställchen gab man sich jedoch nicht zufrieden und versuchte, auch einmal Diamanten in der Größe echter Schmucksteine herzustellen. Man hat auf das



Schematische Darstellung der Belt-Apparatur

1 – Oberstempel, 2 – Probenkammer mit Pyrophyllit-Auskleidung, 3 – Belt (lateraler Stützring, der die Probekammer umgibt), 4 – Unterstempel, 5 – Wolframkarbid, 6 – verschiedene Stähle.

»Pressen« viel Zeit und Mühe verwandt – und 1970 schließlich hat man es geschafft: wasserklare, gerstenkorngroße Diamanten! Es war dies ein echtes Erfolgserlebnis – allerdings erkaufte zu einem Preis, der weit über dem der natürlichen Diamanten liegt. Aber darauf kam es zunächst nicht an. Wichtig ist, daß heute prinzipiell die technischen Voraussetzungen gegeben sind, auch größere Stücke von Diamanten synthetisch herzustellen.

Daß Diamanten teuer sind, weiß eigentlich jeder. Wer aber weiß schon, daß für eine bestimmte Form des Graphits Kilopreise bis zu 10 000 M erzielt werden? Und das nicht etwa als Sammlerpreis, sondern für technische Einsatzzwecke.

Es handelt sich um die sogenannten Whisker – kurzfasrige, hauchdünne Einkristalle von etwa 1 cm Länge und 1 μ m Durchmesser, die aufgrund ihres fast ungestörten Kristallaufbaus nahezu die theoretischen, aus den Anziehungskräften der einzelnen Atome resultierenden Festigkeitswerte erreichen. Solche Whisker sind zur Verbesserung der mechanischen Festigkeit von metallischen

Werkstoffen verwendet worden. Aber auch im Verbund mit organischen Polymeren als Bindemitteln — z.B. Epoxidharzen — kommen die ungewöhnlich hohen Festigkeiten dieser Faserstoffe zum Ausdruck. Graphitwhisker erhält man im Verlaufe eines langwierigen Kristallwachstumsprozesses aus der Dampfphase, eine derartige Bildung stellt für eine Produktion kein geeignetes Verfahren dar.

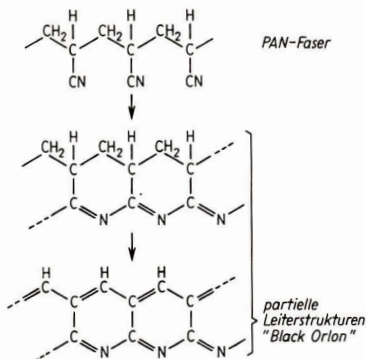
Technologisch vertretbare Verfahren gibt es dagegen für die Kohlenstoff- oder Graphitfasern, die ebenfalls im Verbund außerordentliche Festigkeiten aufweisen. Mit Graphitfasern verstärkte Epoxidharze sind als Baumaterial für ganze Tragflächen von Düsenflugzeugen erfolgreich getestet worden. Gegenüber herkömmlichen Materialien resultieren dabei Gewichtseinsparungen bis zu 50 %.

Die Graphitfaser hat eine interessante Vorgeschichte. Sie beginnt bei der Synthesefaser aus Polyakrylnitril (PAN). Um das Jahr 1960 waren Bestrebungen im Gange, aus PAN-Fasern ein flammfestes Gewebe zu entwickeln. Dabei stellte man fest, daß die textilen Eigenschaften der PAN-Faser selbst bis zu 300 °C erhalten bleiben, wenn man verhindert, daß die Faser in diesem Temperaturbereich schrumpft, und im übrigen die thermische Behandlung an der Luft genügend vorsichtig durchführt.

Im Temperaturbereich von 200 bis 300 °C erfährt die PAN-Faser eine Verfärbung von Gelb über Braun nach Schwarz. Eine solche Faser wurde als Black Orlon bekannt. Schon Anfang der sechziger Jahre war man der Auffassung, daß hierbei Leiterstrukturen gebildet werden (vgl. S. 78).

Wird die Faser nun weiter auf 600 °C erhitzt, so weist sie in ihrer Zusammensetzung immer noch 80 % des ursprünglichen Stickstoffgehaltes der PAN-Originalfaser auf. Man braucht Temperaturen von 1600 °C, um den in den Ringen gebundenen Stickstoff zu entfernen und zu reinen Kohlenstoffasern zu gelangen. Bei Temperaturen um 2800 °C erfährt das Kohlenstoffgerüst eine Annäherung an das Graphitgitter, aus der Kohlefaser wird die Graphitfaser gebildet.

Die intensivierten Forschungen der letzten Jahre haben gezeigt, daß man auch andere Ausgangsstoffe als PAN zur



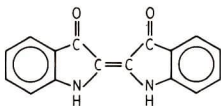
Gewinnung von Kohlenstoffasern einsetzen kann, beispielsweise regenerierte Zellulose, aber auch Pech.

Indigo und Purpur

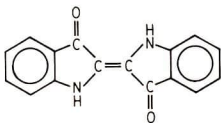
1883 war es so weit. Indigo – der König der Farbstoffe – war endlich erkannt. Achtzehn Jahre hatte sich A. Bayer um die Aufklärung des Indigoblau bemüht. Jetzt konnte er der Fachwelt mitteilen, »daß der Platz eines jeden Atoms im Molekül dieses Farbstoffes auf experimentellem Wege festgestellt war«.

Bayer arbeitete schon lange nach einem bestimmten Aufbauprinzip. »Man muß in das Benzol eine zweigliedrige Kohlenstoffkette und ein Stickstoffatom einfügen – und dann beide miteinander verbinden«, hatte er 1869 in einer Abhandlung geschrieben. Seitdem probierte er alle ihm zugänglichen Stoffe, die diesem Prinzip gehorchen; er reduzierte und oxydierte – setzte mit dieser und jener Verbindung um – er erhielt Indigoblau – das eine Mal ausgehend von Isatin, ein andermal von o-Nitrozimtsäure, ein drittes Mal von o-Nitrobenzaldehyd. Damit stand für Bayer und seine Zeitgenossen die Molekülstruktur fest. Die Chemie besaß nun den »Bauplan«, nach dem sie den

Farbstoff synthetisieren konnte. Viele Jahre später erst zeigte sich, daß die von Bayer angenommene Struktur verbessert werden konnte. Die Röntgenstrukturanalyse brachte den Beweis, daß keine *cis*-Form, sondern eine symmetrische *trans*-Form vorliegt.



cis-Form (Bayer 1883)



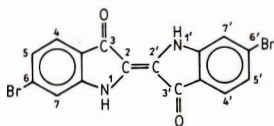
symmetrische *trans*-Form nach
Röntgenstrukturanalyse, 1925

Noch beherrschte der Plantagenindigo aus Bengalen den Markt, der synthetische war zu teuer. Doch dann entwickelten Heumann (1890) und Pfleger (1901) technische Verfahren, die ein preisgünstiges Indigoblau lieferten. Jetzt trat der synthetische Indigo in Konkurrenz mit dem natürlichen. Zwei Jahrzehnte später war der Plantagenindigo vom Markt verdrängt.

Die Geschichte vom Indigo steht als Beispiel für eine Reihe anderer Farbstoffe. Jahrtausende alte Naturfarbstoffe wurden durch synthetische Farbstoffe verdrängt. Die Beschäftigung mit den im Steinkohlenteer enthaltenen Stoffen Phenol, Anilin, Anthrazen, z. B. deren Umsetzung mit Salpetersäure, Schwefelsäure, mit Oxydationsmitteln und Reduktionsmitteln lieferte den Chemikern des 19. Jahrhunderts einen farbigen Stoff nach dem anderen an die Hand. Aber nicht jeder farbige Stoff ist ein Farbstoff. Was man braucht, sind Stoffe, die Wolle, Seide und Baumwolle waschecht und lichtecht anfärben. Diese Forderungen reduzieren ganz erheblich die Zahl der brauchbaren Farbstoffe. Die übrigbleibenden haben die Konkurrenz mit den althergebrachten zu bestehen.

Die Kunst des Färbens wurde von den Völkern unterschiedlich praktiziert. Im alten China färbte man die Mandaringewänder mit Gelbbeeren, in Indien Wollstoffe mit Baumwollblütenextrakten. Das antike Griechenland kennt die Färbung mit Safran, dem Farbstoff aus den Blütennarben des *Crocus sativus*. Aus der Schildlaus *Coccus ilicis* gewannen die Römer das rote Kermes, die Germanen das gelbe Wau von den blühenden Ästen der *Reseda luteola*.

In altägyptischen Königsgräbern sind mit Indigo, Alizarin und Purpur gefärbte Gewänder gefunden worden. Während Indigo und Alizarin bis in das 20. Jahrhundert die führenden Farbstoffe blieben, war die Kunst des Purpurfärbens im »finsternen Mittelalter« verlorengegangen. Erst 1684 entdeckte man von neuem die Schneckenart, die den seltenen Farbstoff enthält. Aus den Drüsen der Purpurschnecke *Murex brandaris* erhält man eine farblose Flüssigkeit, die an der Luft durch den Sauerstoff zum eigentlichen Purpurrot oxydiert wird. In den Jahren 1909 bis 1911 hat Friedländer aus 12 000 Purpurschnecken 1,4 g Farbstoff gewonnen und dessen Molekülstruktur aufgeklärt. Zur Überraschung aller erwies sich der »antike Purpur« als ein naher Verwandter des Indigo, nämlich als Dibromindigo-(6,6'):



Interessant ist, daß Indigo indirekt mit einem anderen Purpurfarbstoff, dem ersten synthetischen Farbstoff, in Beziehung steht.

1840 erhielt der Chemiker Fritzsche durch Erhitzen von Indigo mit konzentrierter Kalilauge eine farblose Flüssigkeit, der er den Namen Anilin gab — spanisch heißt Indigo anil.

Perkin oxydierte 1856 Anilin mit Kaliumbichromat zu einem schwarzen Produkt, aus dem sich zu 5% ein pur-

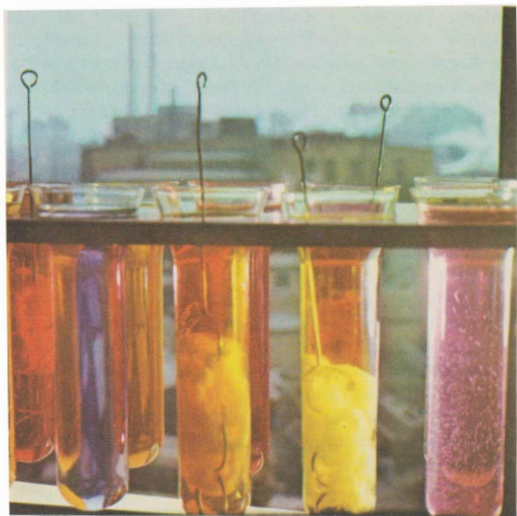
purroter Farbstoff — Anilinpurpur — isolieren ließ. Als Mauvein wurde er von französischen Färbern gekauft, die ihn wegen seiner Leuchtkraft schätzten. Der erste synthetische Farbstoff war teuer, sehr teuer — er wurde nicht nur mit Gold, sondern mit Platin aufgewogen. Aber Purpur ist seit eh und je teuer gewesen. Jahrhunderte hindurch war er die Farbe der Könige und Kardinäle.

Die Entwicklung der Chemie in den letzten hundert Jahren hat eine Reihe von Purpurfarben hervorgebracht, die nur ein Bruchteil dessen kosten, was man einst für Purpur bezahlt hat. Generationen von Chemikern haben an der Aufklärung der für das Leben so wichtigen Farbstoffe — des grünen Blattfarbstoffs (Chlorophyll) und des roten Blutfarbstoffs (Hämin des Hämoglobins) gearbeitet. Die Aufklärung dieser für färberische Zwecke ungeeigneten Farbstoffe hat zur Auffindung hochgeschätzter Farbpigmente beigetragen. Man kennt heute den Molekulaufbau der früher zum Färben verwendeten Naturfarbstoffe ebenso wie den vieler Blüten- und Pilzfarbstoffe, die nicht zum Färben geeignet sind.

Die Kunst des Färbens wurde zur Wissenschaft. Seit langem hat die Synthese von Farbstoffen den Charakter der Zufälligkeit verloren. Man synthetisiert zielgerichtet mit Kenntnissen und Erfahrungen, die man aus der Fülle der bekannten Farbstoffe gewonnen hat.

In dem Riesenreich der synthetischen Farbstoffe nehmen einige Farbstoffklassen einen besonderen Platz ein. Hierzu zählen die Azofarbstoffe, die Anthrachinon- und Phthalozyaninfarbstoffe. Da gibt es spezielle Farbstoffe für Wolle, Baumwolle und wieder andere für Azetat- und Polyesterfasern und die vielen Arten von Plasten. So farbenprächtig wie die Verbindungen sind oft auch ihre Namen.

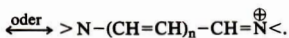
Ein Name aber erinnert noch einmal an den Indigo. Gegen Ende der zwanziger Jahre kommen die sogenannten Indanthrenfarben auf, die sich durch besondere Echtheit auszeichnen. Dieser Handelsname wurde dem lichtechten Indanthrenblau entlehnt, das von dem Farbstoffchemiker Bohn um die Jahrhundertwende gewonnen und von ihm so benannt worden war, weil er ein Anthrachinonderivat des Indigos (*Indigo* von *Anthrazen*) synthetisieren wollte. Der



Färben von Polyakrylnitrilfasern im VEB Chemiekombinat Bitterfeld, Betriebsteil Wolfen

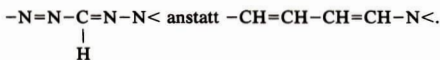
Struktur nach sind diese Indanthrenfarben, wie Indanthrenrotviolett oder Indanthrenbraun, Indanthrenbrillantrosa oder Indanthrenbrillantgrün, mit ihrem alten Namensvetter nicht verwandt.

Neben den obenerwähnten haben sich weiter die Zyaninfarbstoffe (auch Polymethine genannt) einen breiten Anwendungsbereich erschlossen. Die Klasse der Zyaninfarbstoffe umfaßt nahezu 100 000 Verbindungen, ihr gemeinsames Kennzeichen ist das Vorhandensein folgender Atomgruppierung:



Hierbei bedeutet n eine beliebige ganze Zahl (z. B. 1, 2, 3...)

Die Vielfalt der Möglichkeiten ergibt sich daraus, daß einerseits das n variierbar ist, andererseits das endständige Stickstoffatom Bestandteil eines Ringes (Heterozyklus) sein kann. Darüber hinaus lassen sich Methingruppen (= CH) durch Stickstoffatome ersetzen, beispielsweise



Die Möglichkeit der systematischen Strukturvariation bei diesen Farbstoffen hat sehr zum Verständnis der Zusammenhänge zwischen chemischer Struktur und Farbe des Farbstoffmoleküls beigetragen. So wissen wir heute, daß die Farbe eines Stoffes davon abhängt, welche Wellen des sichtbaren Lichtes von dem Stoff absorbiert werden. Und diese Lichtabsorption wieder hängt mit der Anzahl anregbarer Elektronen im Molekül zusammen. Anregbare Elektronen finden wir bei den konjugierten Doppelbindungen ($-\text{CH}=\text{CH}-\text{CH}=\text{CH}-$).

Von der Physik her ist bekannt, daß sich Licht aus elektromagnetischen Wellen unterschiedlicher Wellenlänge (Violett bis Rot) und unterschiedlicher Frequenz (und damit unterschiedlicher Energie) zusammensetzt. Violette (kurzwellige) Licht ist energiereicher als rotes (langwelliges) Licht.

Zur Anregung der Elektronen braucht nun eine Verbindung um so weniger Energie, je mehr konjugierte Doppelbindungen ihr Molekül enthält. Das heißt, daß mit zunehmender Konjugationskette (z. B. zunehmendem n bei den Polymethinfarbstoffen) die Anregungsenergie immer kleiner wird, also für die Anregung der Elektronen energieärmeres Licht (langwelliges) ausreichend ist.

Verbindungen mit kurzer Konjugationskette benötigen zur Anregung der Elektronen ultraviolette Licht, sie absorbieren ultraviolette Licht. Derartige Verbindungen erscheinen farblos. Erst wenn die Energie der Wellen des sichtbaren Lichtes (Wellenlänge 400 bis 730 nm) für die Anregung der Elektronen ausreicht, entsteht ein Farbeindruck. Wird beispielsweise nun violettes Licht (400 nm)

absorbiert, so erscheint der Stoff grünlichgelb. Ein Stoff erscheint blaugrün, wenn er die Wellenlänge 640 nm (rot) absorbiert.

Zwischen absorbiertem Licht und Farbe eines Stoffs besteht der folgende Zusammenhang:

Tabelle 5: Absorption des sichtbaren Lichtes

Absorbiertes Licht		Beobachtete Farbe
Wellenlänge [nm]	Entsprechende Farbe	
400	violett	grünlichgelb
425	indigoblau	gelb
450	blau	orange
490	blaugrün	rot
510	grün	purpur
530	gelbgrün	violett
550	gelb	indigoblau
590	orange	blau
640	rot	blaugrün
730	purpur	grün

Von Kuhn ist 1928 der Zusammenhang zwischen der Anzahl der konjugierten Doppelbindungen (Länge der Konjugationskette) und der Farbe einer Verbindung am Beispiel der Diphenylpolyene in anschaulicher Weise verdeutlicht worden.

Tabelle 6: Zusammenhang zwischen Farbe und Konjugationskette bei Diphenylpolyenen $C_6H_5-(CH=CH)_n-C_6H_5$

n	Farbe
1	keine
2	keine
3	bläßgelb
4	grüngelb
5	orange
6	braunorange
7	kupferfarben
11	violettschwarz
15	grünlichschwarz

Von Ketten, Netzen und Spiralen

Das große Rennen hatte begonnen. 1878 konstruierte Benz seinen ersten Zweitaktmotor, 1882 bauten Daimler und Maybach den ersten schnellaufenden Fahrzeugmotor. Benz war 1885 mit dem ersten Fahrzeug auf der Straße — es war ein von einem liegenden Einzylinder-Viertaktmotor mit elektrischer Zündung betriebenes Dreirad. Dunlop erfand 1888 den Luftreifen für das Fahrrad. 1893 rollte Benz auf einem ratternden Vierradwagen durch die Gegend. Weitere zwei Jahre später fand der Luftreifen seine Anwendung beim Automobil.

Kautschuk wurde nun auf einmal in großen Mengen benötigt. Waren 1850 aus dem brasilianischen Urwald unter Anwendung brutalster Ausbeutermethoden gerade noch 1500 t Wildkautschuk gewonnen worden, so kamen die um die Jahrhundertwende im Weltmaßstab benötigten 50 000 t bereits als Plantagenkautschuk aus Britisch-Malaya und Niederländisch-Indien. Der Weltverbrauch an Kautschuk stieg rasant weiter an. 1961 betrug er etwa vier Millionen Tonnen. Längst ist der Wildkautschuk ins Hintertreffen geraten. Selbst mit Plantagenkautschuk kann man den Bedarf nicht mehr decken. Auch Brasilien importiert Kautschuk. In Spanholzkisten verpackt, verstaut in den Riesenleibern der Ozeandampfer, kommt er aus Übersee.

Ein Teufelszeug — dieser Kautschuk. Er dehnt sich und zieht sich wieder zusammen. Er verliert seine Klebrigkeit und wird noch elastischer, wenn man ihn mit Schwefel erhitzt — vulkanisiert. Nimmt man wenig Schwefel, so erhält man Weichgummi, der nach Verformung besonders schnell wieder in den Ausgangszustand zurückkehrt. Wird mit mehr Schwefel vulkanisiert, so entsteht Hartgummi (Ebonit).

Diese Gummielastizität ist eine rätselhafte Erscheinung, die so manchem Kopfzerbrechen bereitet. Wie kommt es, daß das gedehnte Gummiband sofort wieder zurück-schnellt, wenn man es losläßt? Eine solche Eigenschaft besitzt eben nur Gummi, und den wieder erhält man nur aus Kautschuk — und was ist das?

1860 hatte Williams Kautschuk in einer Retorte erhitzt

und aus den Zersetzungsprodukten eine Flüssigkeit gewonnen, die so leicht siedete wie Äther; er gab ihr den Namen Isopren. Neunzehn Jahre später erhielt Bouchardat in Frankreich bei der Destillation dieser Flüssigkeit eine kautschukartige Masse, weitere drei Jahre später auch der Engländer Tilden.

Man ahnte, daß der Kautschuk aus Isopren aufgebaut ist. Viele Moleküle Isopren müssen irgendwie zusammengesetzt sein. In welcher Weise aber die Isoprenmoleküle miteinander verknüpft sind, das blieb noch lange Zeit rätselhaft, selbst als Harries 1905 den Kautschuk an seinen Doppelbindungen mit Ozon (Trisauerstoff, O_3) spaltete. Zwar ließ sich mit Hilfe der Spaltstücke die Verknüpfung der Isoprenbausteine im Kautschuk rekonstruieren – aber es blieb nach wie vor die Frage: Große Ketten oder große Ringe?

Die Chemie war zu damaliger Zeit in Ringe vernarrt, je komplizierter, desto besser. Man wollte es daher nicht wahrhaben, was schon in den sechziger Jahren des vergangenen Jahrhunderts als Bauprinzip für Kautschuk vermutet worden war – lange Ketten aus vielen Kettengliedern. Diesen Gedanken hat man sehr lange – bis Ende der zwanziger Jahre – hartnäckig abgelehnt. Man war davon überzeugt, daß Kautschuk aus drei- bis zwölfgliedrigen Ringen aufgebaut ist. Staudinger hat lange Zeit gegen diese Voreingenommenheit ankämpfen müssen, bis schließlich die Fachwelt unter der Last der experimentellen Befunde die Struktur des Kautschuks akzeptierte: kettenförmige Makromoleküle aus hundert und mehr Monomereinheiten, verknüpft durch echte kovalente C-C-Bindungen.

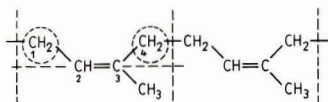
Die Leitidee der makromolekularen Architektur war zum Leben erweckt. Im Hinblick auf die daraus resultierende Entwicklung der technischen Polymerenchemie und der Molekularbiologie ist es nicht übertrieben, diese fundamentale Erkenntnis an die Seite der Erkenntnis von der Planetenbewegung zu stellen. Jetzt fiel es den Chemikern wie Schuppen von den Augen: Naturkautschuk – ein Polyisopren, Zellulose – ein Polyglukosid.

Man brauchte nur Isopren zu polymerisieren, um Kettenmoleküle von Polyisopren zu erhalten. Und dem Isopren ähnliche Verbindungen würden wahrscheinlich auch

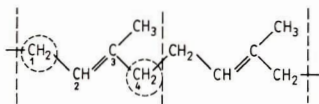
kautschukartige Polymere bilden. Also polymerisierte man von nun an alles, was C-C-Doppelbindungen besaß: Dimethylbutadien, Vinylchlorid, Styrol, Akrylsäure, Methakrylsäuremethylester und viele andere ungesättigte Verbindungen.

Das ging alles recht gut. Nur mit Äthylen gab es Schwierigkeiten. Da mußte man schon ordentliche Drücke anwenden, um eine Polymerisation zu erzielen: 2000 at und 200 °C.

Wer immer auch um 1930 die Polymerisation von Isopren durchgeführt hat, in der Hoffnung, ein in seinen Eigenschaften dem Naturkautschuk entsprechendes Produkt zu erzielen, ist enttäuscht worden. Man beherrschte nämlich zu damaliger Zeit noch nicht die kleine Feinheit, auf die es ankommt: die stereospezifische Polymerisation. Es ist dies die Kunst, die Moleküle so aneinanderzureihen, daß sie im Makromolekül eine ganz bestimmte räumliche Anordnung (stereo-griech.-Raum) einnehmen. Was das für die Eigenschaften bedeutet, zeigt das folgende Beispiel. Der elastische Naturkautschuk besitzt die Struktur eines Poly-*cis*-1,4-isoprens, bei der die C-Atome C₁ und C₄ in bezug auf die Doppelbindung C₂=C₃ auf der gleichen Seite stehen:

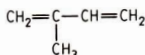


Die harte Guttapercha hat haargenau die gleiche chemische Zusammensetzung, ist aber ein Poly-*trans*-1,4-isopren; hier stehen sich C₁ und C₄ in bezug auf die Doppelbindung C₂=C₃ gegenüber:

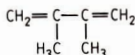


Die Synthesekautschukrichtung ist zunächst am Isopren vorbeigezogen. Während des ersten Weltkrieges hat man

in Deutschland wegen der Unterbrechung der Kautschuklieferungen durch die englische Blockade damit begonnen, den technisch leichter zugänglichen Verwandten des Isoprens, das Dimethylbutadien, zu polymerisieren.



2-Methylbutadien- (1.3)
(Isopren)



2.3-Dimethylbutadien- (1.3)

Die ersten großtechnischen Versuche wurden mit Dimethylbutadien durchgeführt und lieferten Methylkautschuk, der die Kautschukexperten nicht gerade begeisterte. Bis 1918 stellte man für Hartgummibereifung der Artillerie 2500 t Methylkautschuk her. Man war nach Kriegsende heilfroh, daß man mit der wiedereinsetzenden Zufuhr von Naturkautschuk nicht mehr auf den »Kriegskautschuk« angewiesen war.

Erst 1925 wurde die Synthese von Kautschuk in das Forschungsprogramm der IG Farben aufgenommen, diesmal auf der Basis von Butadien. Die technische Lösung wurde im Buna S gefunden – einem Kopolymer aus Butadien und Styrol. Ölfesten Kautschuk erhielt man aus Butadien und Akrylnitril.

Beim Aufbau der Synthesekautschuke hat man sich also ziemlich weit vom Naturkautschuk entfernt. Das brachte in einigen Punkten Vorteile – z. B. sind die Abriebfestigkeit und Ölbeständigkeit der jeweiligen Butadienkopolymerisate besser. Aber hinsichtlich der mechanischen Eigenschaften, insbesondere der Wärmeaufnahme bei hohen Belastungen beispielsweise bei Bereifung von Schwerlastern oder Flugzeugen, war der Naturkautschuk besser. Das änderte sich mit dem Jahre 1954.

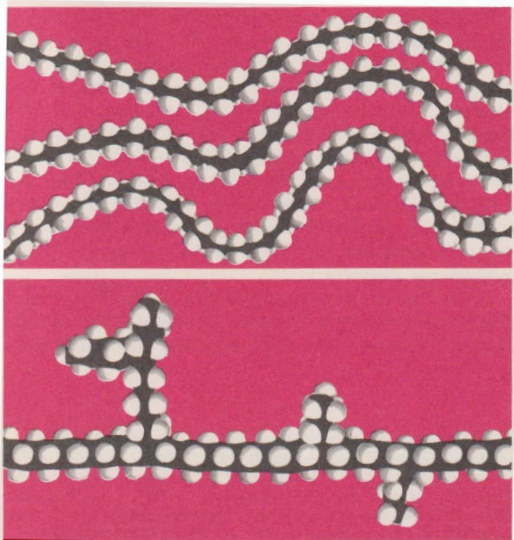
Wie so oft in der Geschichte der Chemie kam der Anstoß aus einer ganz anderen Richtung.

In Mühlheim-Ruhr gelang Ziegler die sensationelle Beobachtung, daß sich Äthylen schon bei Zimmertemperatur und ohne Anwendung von Druck polymerisieren läßt, wenn man als Katalysator Verbindungen vom Typ $\text{AlR}_3 \cdot \text{TiCl}_4$ verwendet. Das dabei entstehende Poly-

äthylen besitzt eine höhere Dichte als das bei hohen Drücken und höheren Temperaturen gewonnene Produkt. Beim Hochdruckpolyäthylen tragen die Makromolekülketten Verzweigungen, die als Abstandhalter wirken und verhindern, daß sich die Ketten dicht zusammenpacken.

Das ist beim Niederdruckpolyäthylen anders. Deshalb können sich die Makromolekülketten hier viel dichter aneinanderlagern (höhere Dichte!), es bilden sich kristalline Bereiche aus. Die Unterschiede in der Struktur wirken sich deutlich auf die Eigenschaften aus. Niederdruckpolyäthylen zeigt höhere Zugfestigkeit und höhere Wär-

*Kalotte von Hochdruck-PE (oben) und Niederdruck-PE (unten)
Im ersten Fall erkennt man die Verzweigung im Makromolekül, die eine dichte Packung der Makromoleküle verhindert (Dichte 0,92).
Niederdruck-PE (unverzweigt) zeigt deshalb eine höhere Dichte (0,94 bis 0,96).*



mebeständigkeit als Hochdruckpolyäthylen. Es ist im Gegensatz zum amorphen und durchsichtigen Hochdruckpolyäthylen milchig trübe.

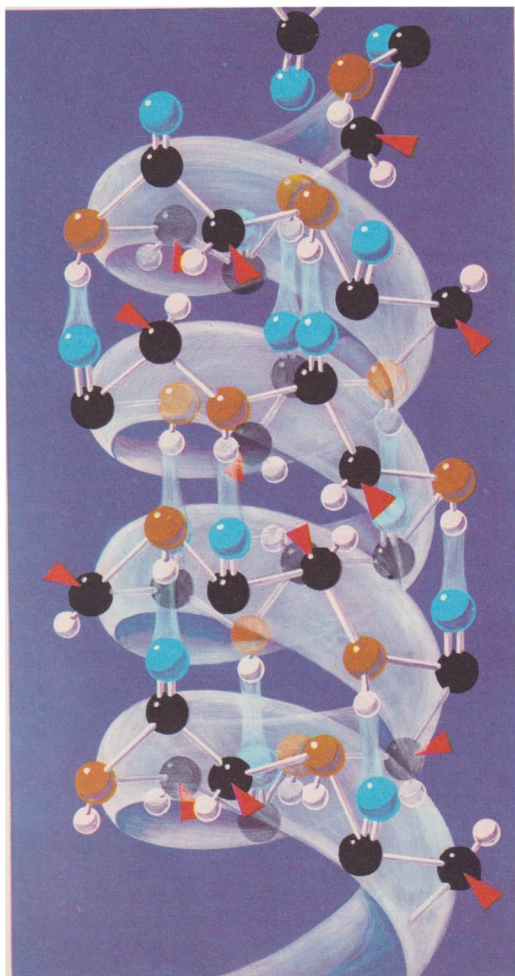
Natta aus Milano hat sich in Mühlheim von Ziegler die zauberhafte Wirkung der Katalysatoren bei der Äthylenpolymerisation vorführen lassen. Nun probierte er die Katalyse am Propylen aus. Und erneut eine Sensation! Während alle bisherigen Polymerisationskatalysatoren Propylen nur in ölige bis wachsartige Produkte verwandeln konnten, liefern die ZIEGLER-Katalysatoren feste Plastwerkstoffe, die man bis zu 130 °C thermisch belasten kann.

Die röntgenographischen Untersuchungen des Propylens erbrachten den Befund, daß die Polymerketten eine ganz besonders hohe räumliche Ordnung, eine Stereoregularität, aufweisen. Die Methylgruppen entlang der Kette sind völlig gleichmäßig – isotaktisch – angeordnet (im Unterschied zur ataktischen Form).

In seinem Nobelvortrag im Dezember 1963 sagte Natta: »Durch eine genaue Prüfung der Struktur isotaktischer Polymere an Faserdiagrammen konnten wir zeigen, daß alle kristallinen isotaktischen Polymere eine Helixstruktur besitzen, wie sie analog von Pauling und Corey schon 1951 für α -Keratin gefunden worden war. Tatsächlich erlaubt nur die Helix eine regelmäßige Wiederholung von Monomereinheiten mit gleich konfigurierten asymmetrischen Kohlenstoffatomen. Schon bald, nachdem die ersten α -Olefinpolymerisationen gelungen waren, erkannten wir die Bedeutung und die Weite des für die Forschung erschlossenen Gebietes.«

In der Tat hatte man Zugang zu einer neuen Welt erlangt. Die bisherigen Polymerisationen führten stets nur zu ataktischen Polymeren. Mit Hilfe der ZIEGLER-Katalysato-

α – Helix eines Polypeptids (α – Keratin) als Stäbchenmodell (braun – Stickstoff; blau – Sauerstoff; schwarz – Kohlenstoff (im Vordergrund); grau – Kohlenstoff (im Hintergrund); weiß – Wasserstoffatome (im Vordergrund); violett – Wasserstoffbrückenbindungen; grauweiß – Wasserstoffatome (im Hintergrund); rote Pfeile – Reste der verschiedenen Aminosäuren)



ren war man jetzt in der Lage, aus den gleichen Ausgangsstoffen stereospezifische Polymere aufzubauen und erzielte Produkte mit völlig neuen Eigenschaften.

Die Entdeckung der stereospezifischen Polymerisation war gleichzeitig die große Stunde für die Kautschuksynthese.

Natta und Mitarbeitern gelang es, die meisten der theoretisch denkbaren sterischen Isomere von Polyisopren und Polybutadien herzustellen. Im Laufe dieser Untersuchungen synthetisierten sie auch Naturkautschuk. Das cis-1,4-Polyisopren aus Milano zeigte die gleiche Stereospezifität wie der Naturkautschuk und glich ihm auch in den übrigen Eigenschaften.

1956 fand diese Synthese Eingang in die Industrie. Verdienste erwarben sich hierbei das Forschungskollektiv um Korotkow in der UdSSR (»SKI-Kautschuk«), Stavely und Mitarbeiter (»Coral Rubber«) sowie das Team um Horne (»Ameripol SN«) in den USA.

Das technisch synthetisierte cis-1,4-Polyisopren steht weder in seinen technologischen Eigenschaften bei der industriellen Fertigung noch in seiner Klebrigkeit, Festigkeit und anderen mechanischen Eigenschaften des Gummis dem Naturkautschuk nach.

Interessant ist nun, daß mit Hilfe der ZIEGLER-Katalysatoren das Butadien zu einem cis-Polybutadien polymerisiert werden kann, das dem Naturkautschuk in seinen elastischen Eigenschaften (niedrige mechanische Verluste bei starker Belastung) entspricht und ihn bezüglich Abriebfestigkeit, Kältebeständigkeit und Wärmealterung noch übertrifft. In der UdSSR wird dieser Kautschuk unter der Bezeichnung SKD-Kautschuk produziert. SKD heißt *Synthesekautschuk* auf der Basis von *Divinyl* (Divinyl = Butadien). Die hohe Elastizität in Kombination mit der Abriebfestigkeit macht den SKD-Kautschuk besonders für die Herstellung von Reifenprotektoren für Schwerlastkraftwagen und Transportbänder geeignet. Da er aber technologisch schwerer zu handhaben ist, wird er meist im Gemisch mit SKI-Kautschuk eingesetzt.

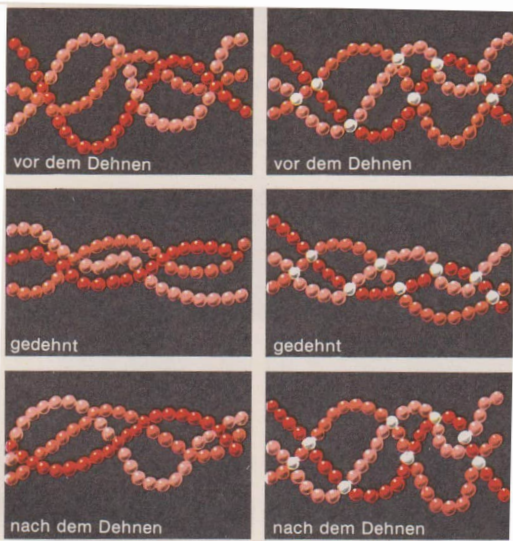
Bisher ist eigentlich immer noch die Frage offengeblieben: Worin besteht denn nun das Wesen der Gummielastizität?

Wir können uns den Kautschuk als ein Knäuel von kettenförmigen Makromolekülen vorstellen, deren einzelne Molekülabschnitte (Segmente) bei Raumtemperatur starke Schwingungen und Platzwechsel um eine thermodynamisch begünstigte Mittellage vollführen. Dehnen wir den Kautschuk, so zwingen wir den Molekülsegmenten eine neue Mittellage auf.

Lassen wir dann los, d. h., wird die deformierende Kraft beseitigt, so treibt die Wärmebewegung die Segmente in ihre ursprüngliche Mittellage zurück. Darin liegt das Geheimnis der Kautschuk- oder Gummielastizität!

Wichtig ist, daß die Ketten nicht aneinander vorbeifließen, sonst kommt es zu einer bleibenden Deformation. Das Auseinanderfließen der Ketten wird bei genügend langer

Verhalten von Kautschuk (unvernetzt, links) und von Gummi (vernetzt, rechts)

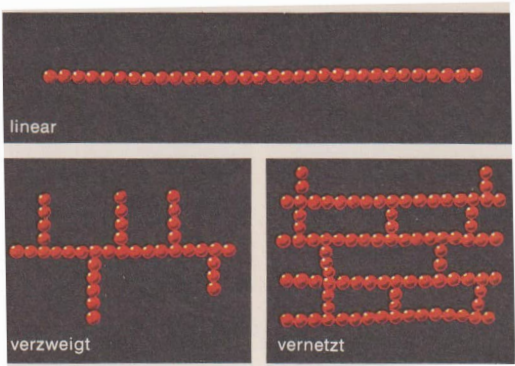


Kettenlänge durch die statistisch verteilten Verschlaufungen zwar behindert, aber nicht völlig aufgehoben. Man denke hier zum Vergleich einmal an das Auseinanderfitzen eines verhedderten Seiles!

Deshalb kehrt nichtvulkanisierter Naturkautschuk nach dem Dehnen auch nicht vollständig in seinen Ausgangszustand zurück.

Wirksamer als die physikalischen Verschlaufungen sind chemische Bindungen, die zwei Makromolekülketten miteinander vernetzen. Derartige Vernetzungen hat zum ersten Mal, ohne die Bedeutung seiner Entdeckung zu ahnen, Goodyear 1839 bewerkstelligt. Angeblich soll Goodyear bei der Suche nach einem Konservierungsmittel für Kautschuk eine Mischung aus Latex und Schwefel auf eine heiße Herdplatte verschüttet haben. Mit großer Überraschung und Freude stellte er fest, daß der in der Hitze gebildete Stoff nach dem Abkühlen viel bessere Elastizität als der Naturkautschuk aufwies. Der neue Stoff war nicht mehr klebrig, blieb bei hohen Temperaturen fest und widerstand Chemikalien, in denen sich der Kautschuk löste. Man konnte ihn dehnen oder drehen – er kehrte immer in seine ursprüngliche Form zurück. Da dieser Stoff in der

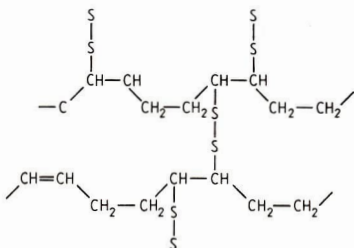
Schematische Darstellung von linearen, verzweigten und vernetzten Polymeren



Hitze gebildet worden war, nannte Goodyear den Vorgang nach Vulkanus, dem römischen Gott des Feuers, Vulkanisation.

Bei der Schwefelvulkanisation des Kautschuks werden die Makromolekülketten durch Anlagerung von Schwefel an die Doppelbindungen über Disulfidbrücken miteinander vernetzt.

Auf diese Weise entsteht ein räumliches Netzwerk:



Je weiter die Maschen in diesem Netzwerk sind, um so leichter läßt sich der Gummi dehnen. Eine Vulkanisation mit 2 % Schwefel, also eine schwache Vernetzung, liefert Weichgummi, und mit 30 % Schwefel erhält man Hartgummi.

Mit der Vernetzung sind große Veränderungen in den Eigenschaften des Polymers verbunden. So geht z. B. die Löslichkeit verloren. Naturkautschuk ist in Benzol löslich, vulkanisierter Kautschuk, also Gummi, nur noch quellbar. Das beruht darauf, daß sich die Ketten zwar mit Lösungsmittelmolekülen umhüllen können, aber dadurch nicht mehr in losgelöste Einzelketten getrennt werden, weil sie ja nun durch echte chemische Bindungen an den Vernetzungsstellen daran gehindert werden.

Aus dem Quellungsgrad kann man ebenso wie aus den Dehnungswerten Rückschlüsse auf den Vernetzungsgrad ziehen. Je größer die Quellung und je höher die Dehnung, desto geringer ist die Vernetzungsdichte.

Beim Dehnen von Gummi aus stereoregulären Kautschuken tritt eine Verfestigung ein, die auf einen Kristallisationseffekt zurückzuführen ist. Man muß sich

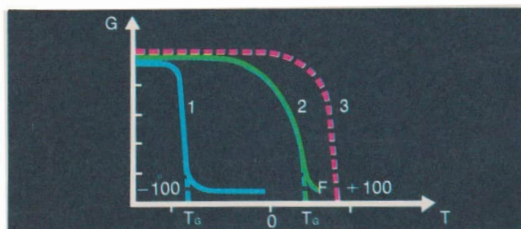
vorstellen, daß bei der Vulkanisation des Kautschuks zunächst erst einmal der Ordnungsgrad oder Kristallisationsgrad des Kautschuks herabgesetzt wird, weil die Vernetzungsstellen gleichzeitig als Abstandhalter für die Ketten oder Spiralen wirken und deren Dichterpackung verhindern. Erst beim Dehnen werden größere Kettenabschnitte näher zusammengeführt und in die Lage versetzt, zwischenmolekulare Wechselwirkungen einzugehen.

Die Erscheinung der Kautschukelastizität oder Gummielastizität ist nicht auf das Polyisopren und seine Verwandten sowie deren Vulkanisate beschränkt. Gummielastizität zeigen alle amorphen Hochpolymere oberhalb ihrer Glastemperatur T_G (vgl. unten). Man spricht deshalb direkt von einem gummielastischen oder weichelastischen Zustand der Polymere. Gerade die Fähigkeit, einen gummielastischen Zustand annehmen zu können, unterscheidet die Polymere von allen anderen niedermolekularen Stoffen.

Niedermolekulare Stoffe – z. B. Wasser – kommen in den Aggregatzuständen fest, flüssig und gasförmig vor. Wasser kann im festen Zustand kristallin oder amorph auftreten. In beiden Fällen ist es hart. Beim Erwärmen gelangt man dann sofort vom harten elastischen Zustand in den flüssigen.

Das ist bei den Polymeren anders. Bei tiefen Temperatu-

Änderung des dynamischen Torsionsmoduls G mit der Temperatur T von unterschiedlichen Polymeren. Die zur Charakterisierung von Polymeren wichtige Glastemperatur T_G ist dort abzulesen, wo der Torsionsmodul seine stärkste Änderung aufweist.



ren sind sie hartelastisch. Werden sie erwärmt, erfolgt ein Übergang von hartelastisch nach weichelastisch – sie erweichen, schmelzen aber noch nicht. Den Übergang von dem weichelastischen Zustand in den flüssigen (und zwar meist zähflüssigen) erfahren sie erst viel später. Der gasförmige Zustand fehlt bei den Polymeren vollständig, weil die zwischenmolekularen Kräfte auch in der Schmelze noch so groß sind, daß die Makromoleküle eine Zersetzung erfahren, bevor sie in die Gasphase übergehen. Wer also Polymere destillieren will, befindet sich in ähnlicher Situation wie die Erfinder eines Perpetuum mobile!

Das Übergangsgebiet hochelastisch/weichelastisch ist durch die Glasstemperatur T_G gekennzeichnet, die für jedes Polymer eine charakteristische und wichtige Kenngröße darstellt. Beim Übergang vom glasigen, harten Zustand in den weichelastischen setzt die Segmentbeweglichkeit der Makromoleküle ein, die sogenannte Mikrobrownsche Beweglichkeit, die Segmente rucken und zucken, vollführen Platzwechsel und Schwingungen. Damit ändern sich nun auch viele physikalische Eigenschaften des Polymers – der Brechungsindex, die Zugfestigkeit und Dehnung, der thermische Ausdehnungskoeffizient, die dielektrischen Parameter.

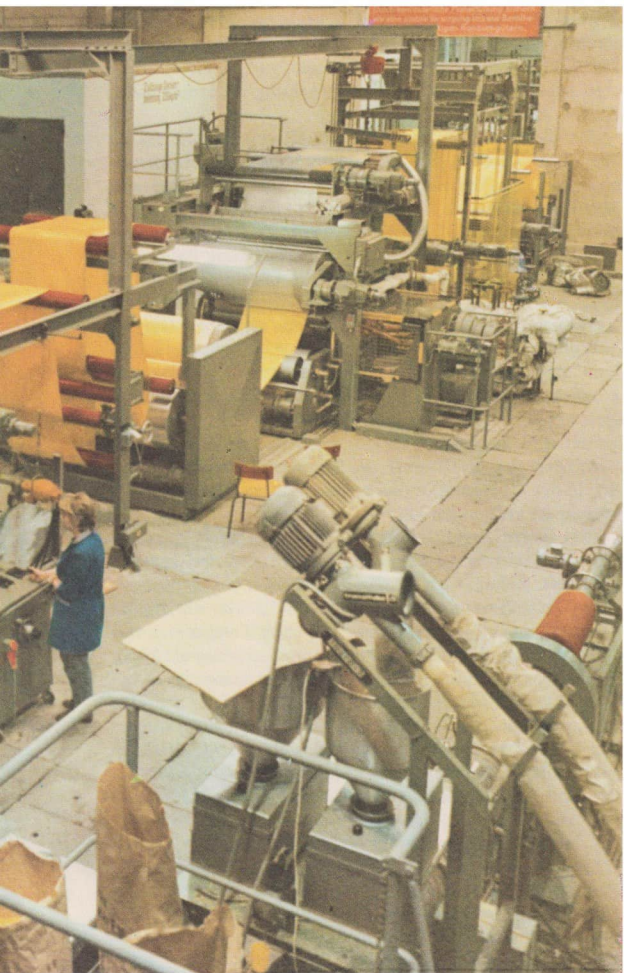
Besonders anschaulich läßt sich dies mit dem dynamischen Torsionsmodul G darstellen (vgl. Abb. S. 96). Unser Bild zeigt die Änderung von G über der Temperatur bei einem nichtvernetzten amorphen Polymeren (Thermoplast, 2) und bei einem nichtvernetzten Kautschuk (1). Kristalline Bereiche in Polymeren lassen die Beweglichkeit der Segmente erst bei höheren Temperaturen aufkommen (gestrichelte Kurve), weil durch die zugeführte Wärme erst die Stellen mit den eng zusammenhängenden

Nächste Seiten:

*Prägelinie für Polyolefinschaumfolie im VEB Leuna-Werke
»Walter Ulbricht«*

Polyolefinschaumfolie, ebenfalls ein organisches Polymer, findet als strapazierfähiges, pflegeleichtes, kunstlederartiges Material in der Täschnereiindustrie Verwendung.



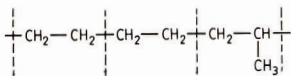


Ketten (Kristallite) gelockert werden müssen. Bei dem Punkt F tritt viskoses Fließen (viskos = zähflüssig) ein. Die Ketten schieben sich aneinander vorbei, die zähflüssige Masse wird durch die Einwirkung deformierender Kräfte bleibend verformt.

Für die Synthese und Anwendung von Polymeren als Werkstoff ergeben sich hieraus wichtige Schlußfolgerungen. Soll das Polymer in seinem hartelastischen Zustand genutzt werden, z. B. als Konstruktionswerkstoff mit hoher Dimensionsstabilität (in Form von glasfaserverstärktem Epoxidharz, Polyurethanhartschaum, Polyformaldehydformteilen), dann muß die Glastemperatur so hoch wie möglich liegen. Hohe Kristallisation bzw. hohe Vernetzungsdichte sind in diesem Falle erstrebenswert.

Will man aber das Polymer als Elast nutzen, dann muß man bestrebt sein, die Glastemperatur so niedrig wie möglich zu halten, um Kristallisation im nichtgedehnten Zustand auszuschließen. Nur so hält man das Polymer bis zu tiefen Temperaturen im gummielastischen Zustand und verhindert das »Einfrieren« der Segmentbeweglichkeit, mit der ja der Übergang in den hartelastischen Zustand (Versprödung) verbunden ist.

Eine interessante Nutzung dieser Erkenntnis finden wir bei Kautschuken auf der Basis von Äthylen und anderen Olefinen. Bekanntlich ist das Polyäthylen ein nichtelastisches kristallines Material, das schmilzt und die Eigenschaften eines Kautschuks erst bei einer Temperatur von 130 °C erlangt. Polyäthylen müßte normalerweise ein hochelastisches Material sein, da seine Glastemperatur bei -90 °C liegt. Aber die hohe Gleichmäßigkeit der Struktur begünstigt die zwischenmolekularen Wechselwirkungen der Ketten untereinander, so daß sich das Material bei gewöhnlichen Temperaturen im kristallinen Zustand befindet. Soll Polyäthylen in einen hochelastischen Kautschuk verwandelt werden, dann muß man die Gleichmäßigkeit der Kettenstruktur stören. Das läßt sich durch Einbau einiger weniger Störstellen oder Abstandshalter in die Kette erreichen, z. B. durch Kopolymerisation von Äthylen mit wenig Propylen, das als stereospezifisches Produkt ebenfalls kristallin ist und erst bei 170 °C schmilzt:



Ein Kopolymerisat, das in der Kette auf durchschnittlich je zwei Äthylenglieder ein Propylenglied enthält, zeigt kautschukartiges Verhalten. Um die Vulkanisation zu erleichtern, führt man zwei bis drei Prozent Butadien mit ein.

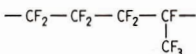
Vulkanisate aus diesem Kautschuk sind wegen der nur in geringer Menge vorhandenen Doppelbindungen sehr beständig gegenüber thermisch-oxydativem Abbau bei höheren Temperaturen und übertreffen in dieser Hinsicht alle anderen Standardkautschuke.

Den gleichen Kristallisationsstöreffekt nutzt man aus, um hochtemperaturbeständige Fluorelastomere zu gewinnen.

Polytetrafluoräthylen $-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-\text{CF}_2-$

ist ein hartes, kristallines Material mit sehr hoher Schmelztemperatur; im amorphen Zustand ist es aber ein Kautschuk, weil seine Glas­temperatur unter 0°C liegt.

Durch Kopolymerisation von Tetrafluoräthylen mit Hexafluorpropylen (Formel, unten) erhält man einen Elast, der im Temperaturbereich von 250 bis 300°C eingesetzt werden kann. Seine Glas­temperatur liegt bei -30°C , was seine Anwendung bei tiefen Temperaturen einschränkt.



Zelle und Eiweiß

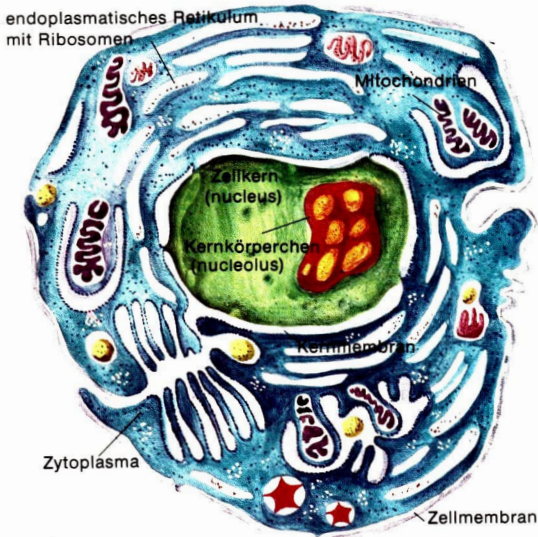
Der Körper des Menschen oder der Stengel einer Pflanze – jeder lebende Organismus besteht aus winzigen lebenden Zellen. Jede Zelle wiederum wird aus dem Zelleib und dem Zellkern gebildet. Alle Zellbestandteile, die den Zellkern umgeben, bezeichnet man in ihrer Gesamtheit als Zytoplasma. Sowohl Zellkern wie auch Zytoplasma lassen

sich noch in eine Reihe weiterer Untereinheiten bzw. Feinstrukturen gliedern, von denen jede im Leben der Zelle eine bestimmte Aufgabe übernimmt. Die Zelle ist die kleinste Einheit des Lebens. Trotz der teilweise recht unterschiedlichen biologischen Funktion der einzelnen Zelltypen und ihrer abweichenden Form (bei Vielzellern) besitzen alle die gleiche Struktur.

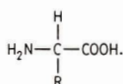
Die Tätigkeit der Zellen ist außerordentlich kompliziert. Eine ihrer wichtigsten Funktionen besteht in ihrem Wachstum und ihrer Vermehrung, die auf der Eiweißsynthese beruhen.

Alle Eiweiße sind nach einem gemeinsamen »Bauplan« zusammengesetzt. Diese Erkenntnis gewann E. Fischer in Berlin schon zu Beginn unseres Jahrhunderts, als er die

Schematischer Aufbau einer tierischen Zelle



verschiedensten Eiweiße spaltete. Die Spaltstücke waren einfache niedermolekulare organische Verbindungen – sogenannte Aminosäuren. Sie heißen so, weil sie eine Aminogruppe ($-\text{NH}_2$) und eine Säuregruppe ($-\text{COOH}$) enthalten. Ihre allgemeine Formel lautet:



Dabei kann R ein Rest sein, z. B. H im Falle der einfachsten Aminosäure Glycin oder CH_3 bei Alanin bzw. $-\text{CH}_2\text{-SH}$ im Falle von Cystein.

Sowohl lösliche wie unlösliche – Hühnereiweiß oder Muskelfaser –, schleimige oder knorpelige Eiweiße lieferten bei der Spaltung Aminosäuren, von denen im Laufe der Zeit zwanzig isoliert werden konnten. Anscheinend stehen wir hier vor einer fundamentalen Erkenntnis – wieviel Eiweiß man bis heute auch immer untersucht hat, man findet nicht mehr als zwanzig Aminosäuren. Die ganze belebte Welt wird von nur zwanzig Aminosäuren aufgebaut!

In der nachfolgenden Tabelle sind die Namen dieser Aminosäuren mit ihren Symbolen zusammengestellt.

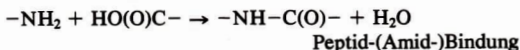
Tabelle 7: Namen und internationale Symbole der Eiweiß-aminosäuren

Glycin	Gly	Lysin	Lys
Alanin	Ala	Arginin	Arg
Valin	Val	Asparagin	Asp- NH_2
Isoleucin	Ileu	Asparaginsäure	Asp
Leucin	Leu	Glutaminsäure	Glu
Serin	Ser	Glutamin	Glu- NH_2
Threonin	Thre	Phenylalanin	Phe
Prolin	Pro	Tyrosin	Tyr
Cystein	Cys	Tryptophan	Try
Methionin	Met	Histidin	His

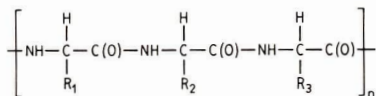
Es gibt auf der Erde kein Lebewesen, das keine Eiweißstoffe enthält. Deshalb wurden diese Verbindungen auch

von Berzelius Proteine genannt, was nach dem griechischen protos (der Erste) und einai (sein) besagen will, daß sie die Grundlage für alle Organismen darstellen. Friedrich Engels prägte den Ausdruck vom »Leben als Daseinsform der Eiweiße«. Daran hat sich bis heute nichts geändert.

Im Eiweiß liegen die Aminosäuren als Polypeptide vor. Diese Bezeichnung rührt daher, daß die ständig wiederkehrende Bindung in dem Riesenmolekül eine Peptidbindung ist. Sie entsteht, wenn eine NH_2 -Gruppe mit einer COOH -Gruppe unter Wasserabspaltung reagiert (kondensiert):

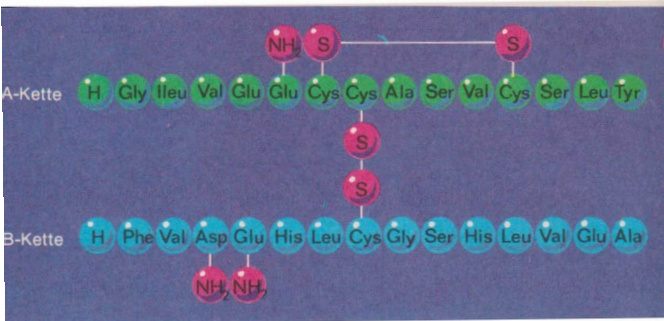


Ein Polypeptid (Protein) kann demnach folgendes Aussehen haben:



Dabei sind R_1 , R_2 und R_3 die oben schon erwähnten Reste der unterschiedlichen Aminosäuren, n ist eine beliebig große Zahl, z. B. 100 bis 1000.

In einer Polypeptidkette können bis zu hundert und mehr Aminosäureeinheiten miteinander verknüpft sein. Heute



kennt man von einigen biologisch wichtigen Eiweißen bereits die Zahl, Art und Aufeinanderfolge (Sequenz) der Aminosäuren in den Eiweißen, ihre Primärstruktur.

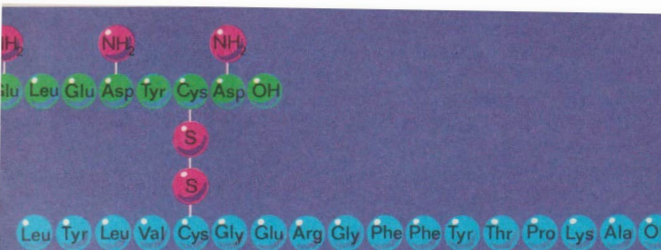
Das Hormon der Bauchspeicheldrüse, das Insulin, ist in seiner Struktur von Sanger aufgeklärt worden (Nobelpreis 1958). Die Struktur wurde neuerdings durch Synthese aus den Aminosäuren bestätigt. Insulin ist ein aus Einzelmolekülen aufgebautes Molekülaggregat. Seine kleinste Einheit besitzt ein Molekulargewicht von 6000. Mehrere derartige Einheiten lagern sich (teilweise über Zn^{++} -Ionen verbunden) zu Molekülaggregaten von 3600 oder 48 000 zusammen. Die 6000-Einheit des Insulins besteht aus 51 Aminosäureresten, die auf zwei über -S-S-Brücken zusammengehaltene Ketten (A- und B-Kette) verteilt sind. Die A-Kette enthält 21 Aminosäuren, die B-Kette 30.

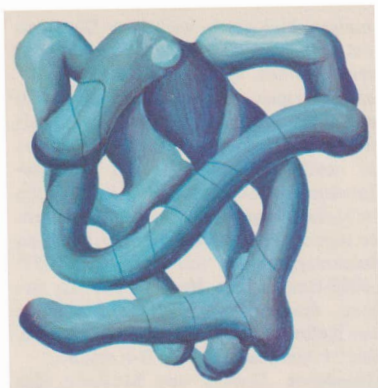
Das sauerstoffbindende Eiweiß des Muskels, das Myoglobin, besteht aus einer einzelnen Polypeptidkette, die von 153 Aminosäureresten gebildet wird.

Zur Beschreibung des kompletten Bauplanes der biologisch aktiven Eiweiße reicht die Primärstruktur nicht aus. In Abhängigkeit von der Primärstruktur nehmen die Polypeptidketten meist eine ganz bestimmte räumliche Lage

Bauplan des Insulin-Moleküls

Das Schema zeigt die Verknüpfung der verschiedenen Aminosäuren im Polypeptid.





Struktur des Myoglobins

ein, die als Sekundär-, Tertiär- oder Quartärstruktur bezeichnet wird. Man hat gefunden, daß die Eiweiße ihre biologische Aktivität einbüßen (denaturieren), wenn ihre höheren Strukturen zerstört werden.

L. Pauling (Nobelpreisträger für Chemie 1954) hat 1951 beim α -Keratin, einem faserigen Protein, festgestellt, daß die Polypeptidketten in Form von Spiralen (α -Helix) vorliegen.

Die α -Helix (vgl. Abb. S.91) hat man sich als eine Schraube mit Linksgewinde vorzustellen, bei der auf eine Windung 3,6 Aminosäuren entfallen. Dabei hat die spiralförmige Anordnung ihre Ursache in den sogenannten H-Bindungen (Wasserstoffbrückenbindungen), die sich innerhalb einer Polypeptidkette zwischen NH- und CO-Gruppen ausbilden.

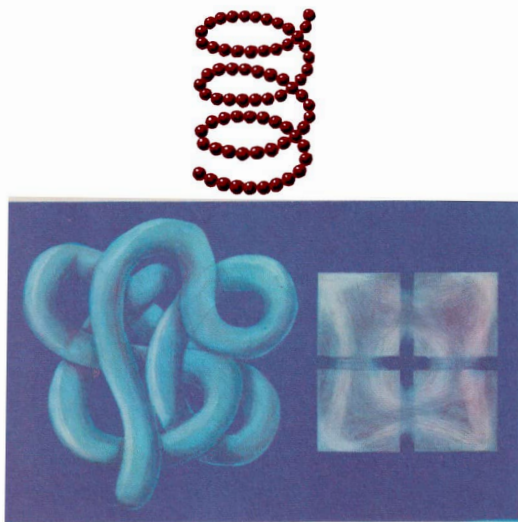
Inzwischen ist die Existenz von spiralförmigen Strukturen in vielen nativen Eiweißen nachgewiesen worden. Die Spiralstruktur kann unter dem Einfluß von Lösungsmitteln, die selbst starke Wasserstoffbrückenbindungen ausbilden, zerstört werden; es entstehen dann ungeordnete Knäuel (Helix-Knäuel-Übergang).

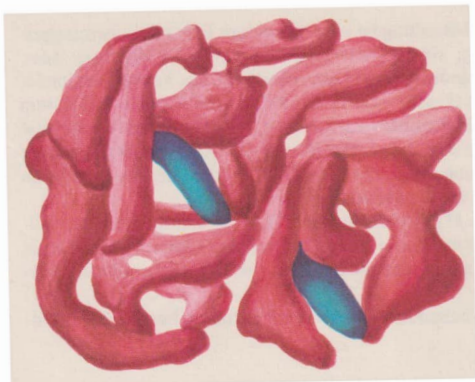
Die H-Bindung ist eine besondere Form der chemischen Bindung; sie ist schwächer als eine C–C-Bindung oder C–H-Bindung (kovalente Bindung). Sie kommt zustande, wenn NH oder OH in die Nähe von Atomen mit einem freien Elektronenpaar geraten, beispielsweise ergibt eine Annäherung von –N–H und $\text{||}\overline{\text{O}}=\text{C–}$ die Wasserstoffbrückenbindung $\text{–N–H}\leftarrow\overline{\text{O}}=\text{C–}$, bei der das H teils an N, teils an O gebunden ist.

Beim Myoglobin wendet sich die Polypeptidkette teilweise ebenfalls in eine α -Helix (Sekundärstruktur), die als solche eine ganz bestimmte räumliche Anordnung eingeht.

Eine besonders interessante Struktur besitzt das biolo-

*Schematische Darstellung von biologisch aktiven Eiweißen
(oben – Helix (Sekundärstruktur); links – Tertiärstruktur; rechts – Quartärstruktur)*





Bau des Hämoglobins als Beispiel einer Quartärstruktur (blau – Sauerstoffatome)

gisch so wichtige Hämoglobin. Es wird aus vier Polypeptidketten mit je einer Häm-Gruppe¹ aufgebaut. Immer zwei der Ketten (α -, β -Ketten) sind gleich.

Das Altern des Menschen läßt sich anhand der Struktur des Hämoglobins verfolgen. Beim erwachsenen Menschen hat das Hämoglobin (HbA) die allgemeine Formel $\alpha_1\beta_2$. Im Embryonalstadium findet man ein Hämoglobin mit ϵ -Ketten. Vor der Geburt enthält das Blut des Menschen das sogenannte fötale Hämoglobin (HbF) der allgemeinen Formel $\alpha_2\gamma_2$, das nach der Geburt durch HbA ersetzt wird.

Eine krankhafte Form stellt das Sichelzellenhämoglobin dar; es ist schwerer löslich als HbA und kristallisiert aus (Sichelzellen). Die Sequenzanalyse hat ergeben, daß lediglich in der β -Kette ein »Baufehler« auftritt – anstelle von Glu steht Val. Dieser winzige Fehler wirkt sich in Form einer Erbkrankheit aus (vgl. dazu auch S. 120).

¹Häm-Gruppe: die für die Sauerstoffbindung des Hämoglobins entscheidende Farbstoffkomponente

DNS – die Doppelhelix

»Wir wollen eine Struktur für das Salz der Desoxyribonukleinsäure (DNS) vorschlagen. Diese Struktur hat eine neue Form, die von beträchtlichem biologischem Interesse ist.«

So beginnen der Amerikaner James D. Watson und der Engländer Francis Crick im März 1953 ihre berühmte Veröffentlichung für die Zeitschrift »Nature«. Sie ist das Ergebnis einer zweijährigen, dramatischen Forschungsarbeit im Cavendish-Laboratorium der Cambridge-Universität – das Ergebnis von mühseligen Objektpräparationen, Röntgenstrukturaufnahmen, unzähligen Rechnungen, der Konstruktion von Molekülmodellen, deren Überprüfung hinsichtlich Übereinstimmung mit dem experimentellen Befund und fortschreitender Annäherung an die Wirklichkeit.

Der Direktor des Cavendish-Laboratoriums ist kein anderer als der berühmte Sir Lawrence Bragg, der 1915 als Fünfundzwanzigjähriger für seine grundlegenden Arbeiten zur Röntgenstrukturanalyse mit dem Nobelpreis für Physik ausgezeichnet worden ist. Sir Lawrence erfüllte es mit ganz besonderem Stolz, daß seine Untersuchungsmethode nun auch noch in seinem Labor zur Aufklärung einer der interessantesten und bedeutendsten Strukturen der Biochemie geführt hat. Seit Darwins Lehre von der natürlichen Auslese und der Entwicklung der Arten hat es in der Biologie kein größeres Ereignis mehr gegeben. Darüber waren sich alle Beteiligten im Cavendish-Labor schon bei der Abfassung der Veröffentlichung im klaren – und wenig später die gesamte Fachwelt.

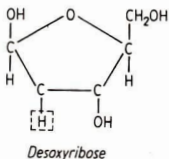
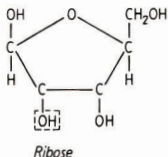
Für ihre bahnbrechende Arbeit erhielten Watson und Crick sowie Wilkins, der am Kings College in London für dieses Ereignis wesentliche Vorarbeit geleistet hatte, im Jahre 1962 den Nobelpreis.

Worin liegt nun die besondere Bedeutung dieser DNS-Struktur? Das Faszinierende an ihr ist, daß sie uns Einblick in die wichtigsten Prozesse des Lebens gewährt. Wachstum, Vermehrung und Entwicklung der Zellen sind zwar außerordentlich komplizierte Vorgänge, lassen sich aber letzten Endes doch als chemische Reaktionen erklären.

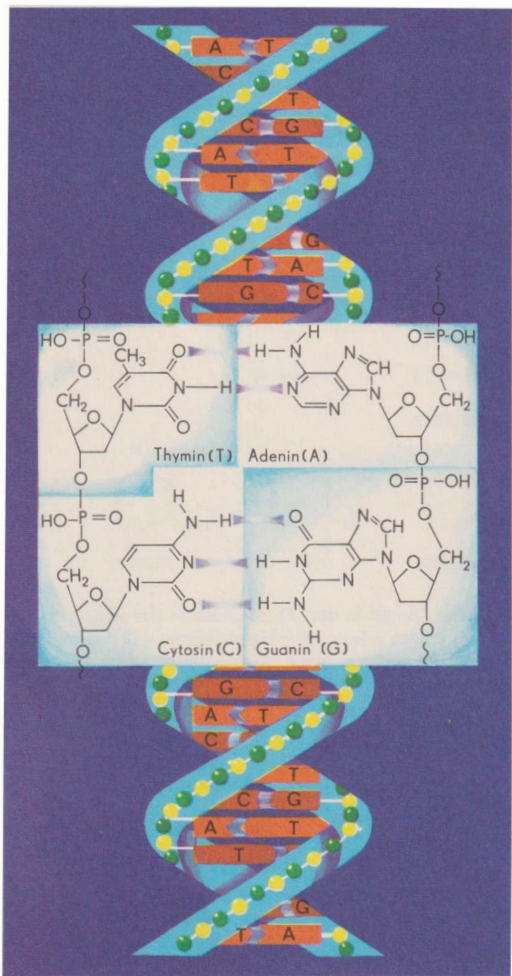
Geradezu sensationell ist die Erkenntnis, daß in der Struktur der DNS der Bauplan verborgen ist, der bestimmt, wie die Eigenschaften der Eltern auf die Nachkommen übertragen werden. Hier, in der besonderen Struktur eines Makromoleküls, ist der geheimnisvolle Schlüssel der Vererbung (der Genetische Code) enthalten, der das entstehende neue Lebewesen programmiert – ihm blaue oder braune Augen, Musikalität, Jähzorn oder Sanftmut verleiht.

Nachdem erst einmal die DNS-Struktur bekannt war, hat die intensive Arbeit mehrerer Forschergruppen in außerordentlich kurzer Zeit auch zur Entschlüsselung des Genetischen Codes geführt. Heute wissen wir im wesentlichen, wie und in welcher Reihenfolge der Aufbau von Eiweiß durch die DNS bestimmt wird. Und diese Gesetzmäßigkeit ist universell, d. h., sie gilt in der gesamten belebten Natur.

Ebenso wie es kein Lebewesen ohne Eiweiß gibt, findet man in jeder lebenden Zelle die sogenannten Nukleinsäuren. Ihr Name geht zurück auf J. F. Miescher, der zum ersten Mal 1869 eine solche Substanz aus weißen Blutzellen isoliert hat. Miescher glaubte, die Zellkerne gefunden zu haben, und nannte diese Substanz Nuklein (nucleus – lat. – Kern). Spätere Untersuchungen zeigten dann, daß die Nukleinsäuren Makromoleküle sind, die den Eiweißen an Kompliziertheit kaum nachstehen. Die Spaltstücke dieser Nukleinsäuren aber sind einfache niedermolekulare Verbindungen: Phosphorsäure, ein fünfgliedriger Zucker (Ribose oder Desoxyribose) und Stickstoffbasen (Purin- oder Pyrimidinbasen).

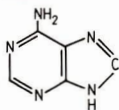


Struktur der DNS-Doppelhelix (S. 111)

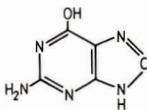


Es zeigt sich nun, daß es zwei große Gruppen von Nukleinsäuren gibt. Die Desoxyribonukleinsäure (DNS), die bevorzugt im Zellkern gefunden wird, enthält als Zucker Desoxyribose und als Basen Adenin (A), Guanin (G), Cytosin (C) und Thymin (T). Die Ribonukleinsäure (RNS), die sowohl im Zellkern als auch im Zytoplasma angetroffen wird, enthält als Zucker Ribose und als Basen Adenin, Guanin, Cytosin und Uracil (U).

Purine

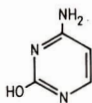


Adenin (A)

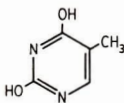


Guanin (G)

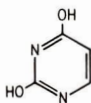
Pyrimidine



Cytosin (C)



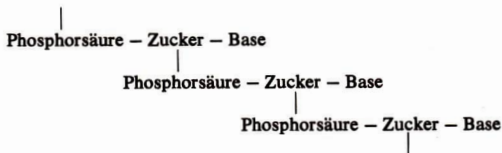
Thymin (T)



Uracil (U)

(Thymin kommt in der DNS, Uracil in der RNS vor.)

Man wußte schon seit einigen Jahren, daß das Nukleinsäuremakromolekül nach folgendem Schema aufgebaut ist:

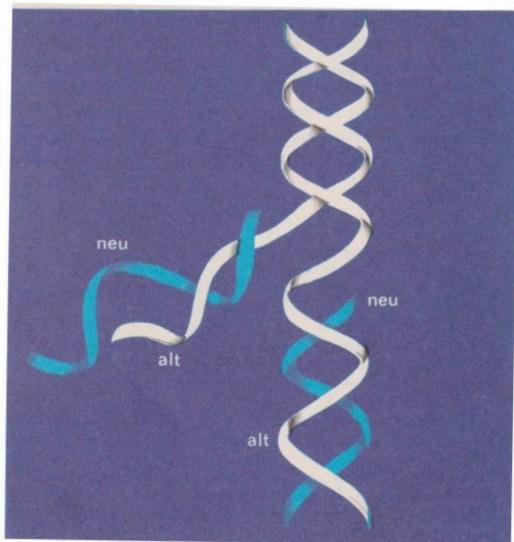


Zu Beginn seiner Arbeit in Cambrigde glaubte Watson, daß die DNS vielleicht eine ähnliche Spirale (Helix) ausbildet wie das α Keratin, für das von Pauling ein spiralförmiger Aufbau (α - Helix) nachgewiesen worden war.

So einfach sollte es ihm und Crick aber nicht gemacht werden! Als sie ihre Untersuchungen an der DNS beendeten, war das Ergebnis eine Doppelspirale (Doppelhelix).

Diese Doppelspirale kann man sich als eine verdrehte Leiter vorstellen, in der jeweils ein Basenpaar eine Sprosse bildet. Die Basen werden über Wasserstoffbrücken zusammengehalten. Erstaunlich ist nun, daß jeweils nur ein bestimmtes Basenpaar zusammenpaßt – also Thymin/Adenin oder Cytosin/Guanin. Hier hat die Natur in Gestalt der H-Brückenbindung einen ganz bestimmten Paßmechanismus gebaut, der sich für die Vermehrung als außerordentlich bedeutsam erweisen soll. Die Reihenfolge der Basen in dem einen Strang bestimmt eindeutig die Reihenfolge der Basen in dem anderen Strang, weil eben nur Cytosin auf Guanin und Adenin auf Thymin paßt.

Schema der DNS-Replikation



In der Ribonukleinsäure taucht statt Thymin Uracil auf und bildet das Basenpaar Uracil/Adenin.

Aufgrund dieser Bauweise besitzen die DNS-Moleküle die in der Natur einzigartige Fähigkeit, sich selbst zu reproduzieren. Man nennt diesen Vorgang identische Replikation.

Vor der Teilung einer Mutterzelle in zwei Tochterzellen wird die DNS-Doppelspirale unter dem Einfluß eines Enzyms an einem Ende geöffnet. Die in der Zellflüssigkeit zur Verfügung stehenden freien Nukleotide (Phosphorsäure – Zucker – Base – Bausteine) werden dann an die beiden freien Enden so angebaut, daß zwei identische Nukleinsäuren entstehen. Von den beiden Tochterdoppelsträngen ist also jeweils der eine neu, der andere alt.

Ein wunderbarer Mechanismus offenbart sich uns in der Eiweißsynthese, bei der nun der in der DNS niedergeschriebene Genetische Code zum Zuge kommt.

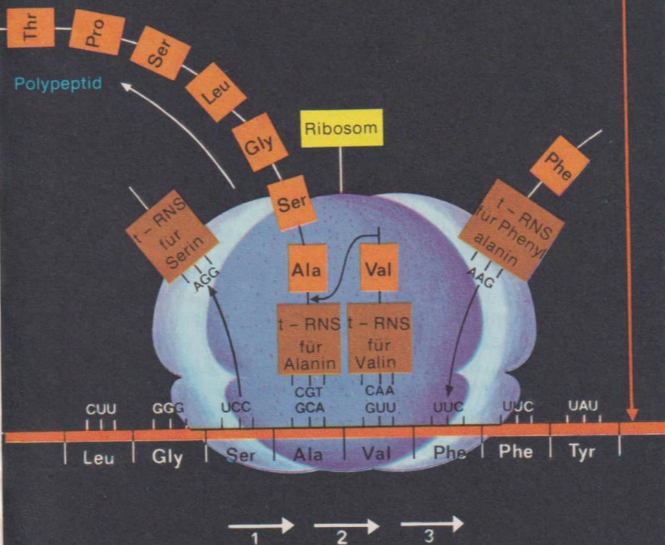
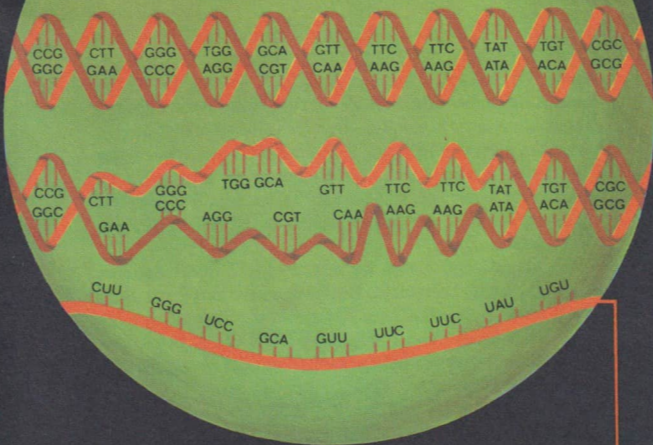
Zunächst wird im Zellkern von aktivierten Abschnitten der DNS, die wir uns bildlich als aufgedrillte Stränge vorstellen können, eine Art Negativ kopiert. Was hierbei entsteht, ist die sogenannte Boten-RNS (engl. messenger-RNS, abgekürzt m-RNS). Sie heißt so, weil sie die in der Reihenfolge ihrer Basen festgelegte genetische Information aus dem Zellkern heraus an den Ort der Eiweißsynthese (Ribosomen) überbringt. An den Ribosomen, die

Schema der Eiweißsynthese in der Zelle

Im Zellkern (grün) erfolgt die Entzwindung der Kern-DNS durch ein Enzym. Von dem einen Strang wird eine Kopie, die Boten-RNS, angefertigt. Dieser Vorgang heißt »Transkription«.

Die Boten-RNS wandert aus dem Zellkern heraus in das Zytoplasma zu den Ribosomen. Dort erfolgt die Polypeptidsynthese. Dabei wird gewissermaßen die Triplet-Reihenfolge der Boten-RNS-Basen in die Aminosäure-Reihenfolge des Polypeptids übersetzt (»Translation«).

Die Abbildung zeigt den Moment, in dem die Aminosäure »Ala« gerade an die Polypeptidkette angekettet worden ist; ihr folgt die Aminosäure »Val«. Während sich links im Bild die t-RNS entfernt, die schon den Transport der Aminosäure Serin (»Ser«) besorgt hat (diese ist vor Ala in die Kette eingebaut worden), wird rechts im Bild gerade von der zuständigen t-RNS die Aminosäure Phenylalanin (»Phe«) herantransportiert.



selbst zur Hälfte aus Eiweiß und zur anderen Hälfte aus Ribonukleinsäure bestehen, vollzieht sich die Proteinsynthese. Wir wissen, daß man zum Aufbau von Proteinen Aminosäuren benötigt. Diese werden von einer anderen Ribonukleinsäure, nämlich der Transfer-RNS (t-RNS), herantransportiert und am Syntheseort – so wie es der Genetische Code durch die Reihenfolge seiner Basen vorschreibt – an die im Aufbau befindliche Polypeptidkette angekoppelt. Für jede Aminosäure ist eine besondere t-RNS zuständig.¹

Der Genetische Code ist durch eine Dreierfolge der Basen (Triplett) festgelegt. Beispielsweise lautet die Botschaft einer Boten-RNS (m-RNS) mit der Basenfolge AUG-CCA-CCA-CGA-AAA-GCA-UCA-GUA-UAA:

Es ist eine Polypeptidkette mit folgender Aminosäuresequenz aufzubauen:

Met-Pro-Pro-Arg-Lys-Al-Ser-Val-Ende.

AUG ist das Startsignal der Boten-RNS; die t-RNS liefert an den Syntheseort die Aminosäure Methionin (Met). Das Triplett CCA verlangt dann, daß Prolin (Pro) angeliefert und angekoppelt wird, bei CGA dann Arginin (Arg) und bei AAA Lysin (Lys). So wächst die Polypeptidkette nach dem in der DNS festgelegten »Bauplan« zu einem Riesenmolekül heran, das sich je nach der Aminosäuresequenz (Primärstruktur) zu diesem oder jenem Protein verknäuelte. Jedes Protein zeichnet sich durch eine meist typische Gestalt und Struktur (Sekundär-, Tertiär- und Quartärstruktur) aus. Das Ende des Aufbaus der Polypeptidkette wird durch das Triplett UAA angezeigt. Auch die Triplets UAG und UGA signalisieren, daß die Kette abgeschlossen wird.

Bei allen diesen Reaktionen, die schließlich zum Aufbau des Eiweißes führen, wirkt ein Heer von Enzymen mit. Anfängen von der Entdrillung der Doppelhelix und der Anfertigung der Negativkopie (Bildung der m-RNS = Transkription), deren Transport aus dem Zellkern heraus in das Zytoplasma hin zu den Ribosomen, deren Aktivie-

¹Genaugenommen sind für 20 Aminosäuren 61 t-RNS zuständig, so daß einer Aminosäure jeweils mehrere t-RNS zugeordnet sind. Es scheint, als habe die Natur für »Ersatz« gesorgt.

rung, das Ankoppeln der Aminosäuren an die wachsende Polypeptidkette entsprechend dem Code (Übersetzung der 4-Buchstaben-Schrift in die 20-Buchstaben-Schrift = Translation) —, stets ist ein für den jeweiligen Schritt spezifisch als Katalysator wirkendes Protein (Enzym) tätig. Ein Enzym sorgt auch dafür, daß nach der Entdrillung der DNS-Doppelhelix nur der eine der beiden freigelegten Stränge zur m-RNS kopiert wird.

In der nachfolgenden Tabelle (Codetabelle) wird für alle Eiweißamino-säuren das zugehörige Basentriplett in der m-RNS gezeigt. Man kann dieser Tabelle entnehmen, daß in vielen Fällen mehrere Triplets ein und dieselbe

Tabelle 8: Der Genetische Code
(RNS-Triplett/Aminosäure-Beziehung)

AAA		CAA		GAA		UAA	
	Lys		Glu-NH ₂		Glu		Ende
AAG		CAG		GAG		UAG	
AAC		CAC		GAC		UAC	
	Asp-NH ₂		His		Asp		Tyr
AAU		CAU		GAU		UAU	
ACA		CCA		GCA		UCA	
ACG		CCG		GCG		UCG	
	Thre		Pro		Ala		Ser
ACC		CCC		GCC		UCC	
ACU		CCU		GCU		UCU	
AGA		CGA		GGA		UGA	
	Arg						Ende
AGG		CGG		GGG		UGG	
			Arg		Gly		Try
AGC		CGC		GGC		UGC	
	Ser						Cys
AGU		CGU		GGU		UGU	
AUA	Ileu	CUA		GUA		UUA	
							Leu
AUG	Met	CUG		GUG		UUG	
			Leu		Val		
AUC		CUC		GUC		UUC	
	Ileu						Phe
AUU		CUU		GUU		UUU	

Aminosäure dirigieren. Beispielsweise sind für Lys sowohl AAA wie AAG zuständig, für Thre sind es vier Triplets (ACA, ACG, ACC, ACU).

Fragt man nach dem tieferen Sinn dieser Zusammenhänge, etwa mit dem Hintergedanken, daß »die Natur sich dabei etwas gedacht haben könne«, so hat man ernüchtert zur Kenntnis zu nehmen, daß hinter alledem eine ganz einfache mathematische Beziehung steckt:

Die Zahl der mathematisch möglichen Dreierkombinationen von 4 Basen ist $4^3 = 4 \cdot 4 \cdot 4 = 64$. Soviele Triplets lassen sich durch Kombination der 4 Basen gewinnen. Ihnen gegenüber stehen 20 Aminosäuren, denen sie zuzuordnen sind. Zieht man die 3 den Schluß der Polypeptidkette bestimmenden Triplets (UAA, UAG und UGA) von den 64 Triplets ab, dann kommen noch 61 Triplets auf 20 Aminosäuren. Die Aufteilung erfolgt nun recht ungleichmäßig. Auf einige Aminosäuren entfallen 2, auf andere (z. B. Ileu) 3, bei Val und Ala sind es 4 und bei Leu sogar 6 Triplets. Aus unserer Tabelle (S. 117) können wir ersehen, daß lediglich eine Aminosäure, die Startamino-säure (Met), von einem einzigen Triplet (AUG) dirigiert wird.

Womit könnte man wohl die Wirkungsweise des Genetischen Codes vergleichen? Versuchen wir es einmal mit folgendem Beispiel! Das Polypeptid sei dargestellt durch die Kette eines riesenlangen Güterzuges und die Bildung der Polypeptidkette mit der Zusammenstellung dieses Güterzuges verglichen!

In der Zentrale (Zellkern) ist die Liste mit der Wagenfolge (DNS-Einzelstrang) fertiggestellt worden. Nun muß diese Information dem Rangierbahnhof (Ribosom im Zytoplasma) übermittelt werden. Das geschieht mit einem Fernschreiber besonderer Art. Für ihn muß die Originalliste in eine Komplementärliste (m-RNS) umgeschrieben werden (Transkription). Dabei wird C in G, G in C, T in A umgewandelt. Der Fernschreiber hat noch eine besondere Eigenart: Jedesmal, wenn durch Umwandlung von A das Zeichen T erscheinen sollte, schreibt er U. Ihm fehlt das Zeichen T. Somit erscheint in der Komplementärliste, die in Form eines Lochstreifens den Fernschreiber auf dem Rangierbahnhof verläßt, anstelle von T immer ein U.

Originalliste (DNS-Einzelstrang)

TAC GAT CCC AGG CGT CAA AAG AAG
ATA usw.

↓ Transkription

Komplementärliste (m-RNS)

AUG CUA GGG UCC GCA GUU UUC UUC
UAU usw.

Die vorstehende Information wird nun mit Hilfe der Codetabelle übersetzt (Translation). Die fertige Übersetzung zeigt dem Rangiermeister an, in welcher Reihenfolge die Wagen aneinanderzukoppeln sind. Es handelt sich in diesem Falle außer der Lok ausschließlich um Containerwagen, die durch Aufschriften wie Val oder Ala gekennzeichnet sind. Bis zu zwanzig verschiedene Typen findet man hier auf diesem riesigen Rangiergelände. Tausende von Wagen warten auf ihren Abtransport. Kleine Zugmaschinen (t-RNS) schleppen die einzelnen Containerwagen zum Rangierhügel.

Der Rangiermeister stellt nun entsprechend der Übersetzung den Zug zusammen. Dabei ergibt sich folgende Wagenfolge (Reihenfolge der Aminosäuren):

Met- Leu- Gly- Ser- Ala- Val- Phe- Phe- Tyr- usw.

Met – das ist die Lokomotive. Damit beginnt jeweils die Zusammenstellung des Zuges. Der Rangiermeister hat schon wahre Giganten von Zügen zusammengestellt. Nicht selten werden 100 bis 200 Containerwagen aneinandergekoppelt, manchmal sogar 5000 bis 6000! Dann hat er auch immer lange Lochstreifen zu lesen. Das Ende des Zuges wird ihm in der Komplementärliste durch die Buchstabenfolge UAA, UAG oder UCA angezeigt.

Interessant ist die Frage, ob es bei diesem ja nicht gerade einfachen Ablauf auch einmal zu einem Fehler kommen kann und wie sich dieser auswirken würde.

Nehmen wir einmal an, bei der Aufstellung der Originalliste in der Zentrale (DNS) hätte sich ein Schreibfehler eingeschlichen. Auf der langen Liste mit den vielen Positionen sei an einer einzigen Stelle statt CTT die Folge CAT geschrieben worden. Praktisch ist damit nur an einem einzigen Punkt, nämlich bei T ein A, verändert worden (Punktmutation, mutation – lat. – Veränderung). Dies hat

aber bereits schwerwiegende Konsequenzen. In der Komplementärliste (m-RNS) erscheint nun anstelle von GAA die Folge GUA. Diese Information erhält der Rangierbahnhof, übersetzt sie und erteilt den Auftrag, den Containerwagen Val anzukoppeln, der beispielsweise mit Zuckersäcken gefüllt ist. Dringend erwartet aber wird auf dem Zielbahnhof eine Lieferung mit Betonsäcken, die sich im Containerwagen Glu befinden. Es leuchtet ein, daß ein solcher Fehler großen Schaden anrichten kann.

Ein ähnlicher Fehler ist auch in der Medizin bekannt. Bei der Proteinsynthese führt der Einbau einer falschen Aminosäure infolge eines angeborenen Defekts zu der als Sichelzellenanämie bekannten Erkrankung. In diesem Falle wird bei der Synthese des Proteins Hämoglobin für die Aminosäure Glutamin (Glu) die Aminosäure Valin (Val) eingebaut. Anstelle des normalen Hämoglobins HbA entsteht das abnormale HbS:

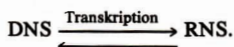
	normal	<i>abnormal</i>
DNS	C T T	C A T
m-RNS	G A A	G U A
Aminosäure	Glu	Val
Hämoglobin	HbA	HbS

Seit der Entdeckung der DNS-Doppelhelix durch Watson und Crick ist die Zeit nicht stehengeblieben. Die Vielzahl der inzwischen angefallenen Experimentalarbeiten hat die von den Entdeckern entwickelten Vorstellungen untermauert und weiter ausbauen können. So ist es mit Hilfe des Elektronenmikroskops und einer raffinierten Präpariertechnik geglückt, Fotos von der DNS aufzunehmen, auf denen selbst ein Laie die Doppelspirale der DNS erkennen kann.

Der Genetische Code ist entschlüsselt, seine Universalität in der belebten Natur nachgewiesen und damit eine weitere Bestätigung für die materielle Einheit der Welt erbracht worden.

In einem wichtigen Punkte mußte aber eine Korrektur der Vorstellungen von Crick vorgenommen werden, der die einseitige Information von der DNS in Richtung RNS zum »Dogma der Molekularbiologie« erhoben hatte. Neuere

Untersuchungen von Spiegelmann haben ergeben, daß die Transkription auch in umgekehrter Richtung, von der RNS zur DNS, verlaufen kann:



Auf diese Weise ergibt sich die Möglichkeit einer Rückkopplung. Die Umkehrbarkeit macht auch den in einigen Fällen beobachteten Einfluß von RNS-enhaltenden Viren auf die DNS-Produktion von Zellen verständlich.

Verantwortung in neuen Dimensionen

Seit etwa hundert Jahren dient die klassische Vorstellung vom Molekül als kleinstem Baustein einer chemischen Verbindung den »Molekülarchitekten« als Leitidee. Hunderte und Tausende verschiedenartiger Bausteine sind seitdem aus Naturstoffen isoliert, Hunderttausende bis Millionen von Molekültypen völlig neu synthetisiert und in ihren Eigenschaften und Wirkungsweisen mehr oder weniger genau untersucht worden. Insgesamt sind bis heute mehr als vier Millionen chemischer Verbindungen registriert. Darunter befinden sich solche, die als Treibstoffe, Waschmittel, Riechstoffe oder Schädlingsbekämpfungsmittel Verwendung finden. Knapp fünfzig Jahre alt ist die Vorstellung vom Makromolekül. Sie hat uns eine Fülle von technischen Polymeren beschert, die als Verpackungsfolie, Polyesterschaumstoff, Autoreifen, Isolierkabel oder als Synthesefaser und -gewebe dienen. Noch nicht abzusehen sind die Konsequenzen, die sich aus der Kenntnis der Struktur der Nukleinsäuren und ihrer Funktion als Vererbungssubstanz und Informationsträger bei der Biosynthese der Eiweiße ergeben.

Was dürfen wir von den Experimenten erwarten, die von der Molekularbiologie durchgeführt werden? Was bringt uns diese neue Grenzwissenschaft zwischen Biochemie und Biologie, die im Vorfeld des Lebens experimentiert, biologisches Geschehen gewissermaßen durch die »Molekülbrille« verfolgt? Wird man etwa eines Tages die Vererbungssubstanz, die DNS, vollsynthetisch herstellen können – mit einem Bauplan, der ganz bestimmte Eigenschaften bei den Nachkommen erzeugt? Wird man etwa

gar den vielzitierten »Homunculus in der Retorte« synthetisieren können — in einer neuzeitlichen und viel bescheideneren Fassung —, beispielsweise in Gestalt eines einfachen Bakteriums? Und wird dieses allereinfachste synthetische Lebewesen, das nur die wichtigsten Merkmale des Lebens — Energiestoffwechsel, Wachstum und Vermehrung — zeigt, für die Menschheit nützlich oder schädlich sein? Was wird die Wissenschaft, die Gesellschaft damit anfangen? Wird dieses »Lebewesen« ein besonders gefährlicher Krankheitserreger sein oder ein harmloses Bakterium vom Typ der »Escherichia coli«, des »Haustiers« der Molekularbiologie, das in den letzten Jahren die für die Experimente benötigten Enzyme geliefert und den vermehrungswütigen Viren und Bakteriophagen als Futter gedient hat?

Werden die Forschungsarbeiten auf diesem Gebiet vielleicht Mittel und Wege finden, um der »Geißel der Menschheit«, dem Krebs, Einhalt zu gebieten, jener lebenvernichtenden Erscheinung einer rücksichtslosen und ungehemmten DNS- und Proteinproduktion gereizter Zellen?

Intensität und Tempo der Forschung auf dem Gebiet der Molekularbiologie berechtigen zu optimistischen Prognosen. Heute schon gibt es einige erfolgversprechende Ansätze.

Da sind die Versuche mit den Viren, diesen »Halb-Wesen-halb-Chemikalie-Gebilden«, die sich in parasitärer Weise auf Kosten lebender Zellen vermehren. Man kann sie in kristalliner Form isolieren und aufbewahren — so etwa wie Zucker oder Phenol. Geraten sie aber in eine lebende Zelle, so verhalten sie sich wie ein Lebewesen — sie vermehren sich. Eine besondere Art von Viren sind die Bakteriophagen (Bakterienfresser), auch nur kurz Phagen genannt, die ausschließlich Bakterien befallen. Sie bestehen aus Nukleinsäure (DNS oder RNS) und einer Hülle aus Eiweiß.

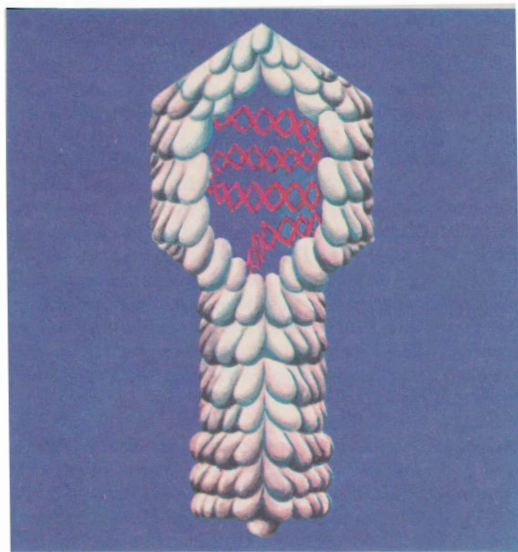
Die T₂- und T₄-Phagen von Escherichia coli enthalten eine DNS-Doppelhelix von erstaunlicher Länge, die wie eine zusammengedrückte Spiralfeder in dem aus Eiweiß bestehenden Kopf des Phagen untergebracht ist. Die DNS-Doppelhelix besteht aus 160 000 Nukleotidpaaren und erreicht die erstaunliche Länge von 50 µm (das sind

0,05 mm). Der Phage besitzt außerdem ein Schwanzstück, mit dem er sich an die Zellwand einer Bakterienzelle anheftet. An der Haftstelle wird die Zellwand durch ein Enzym aufgelöst und die DNS durch die entstehende Öffnung in das Innere des Bakteriums geschossen. Die Eiweißhülle bleibt außerhalb zurück.

Innerhalb der Bakterienzelle wirkt die Phagen-DNS nun als Matrize für die Synthese einer ihr entsprechenden m-RNS, und zwar unter Ausnutzung sowohl des Enzymapparates als auch des Baumaterials (Phosphorsäure-Zucker-Stickstoffbasis) des Bakteriums. Die m-RNS legt sich auf die Ribosomen des Bakteriums und wirkt hier als Matrize

Bau eines Phagen

Er besteht aus einem Kopfteil, in dem deutlich die DNS-Spirale zu erkennen ist, sowie aus einem Schwanzteil und ist außen von einer Eiweißhülle umgeben.



für die Synthese von Phageneiweiß. Wenige Minuten nach der Infektion setzt die Produktion von Hüllenproteinen ein, und nach etwa zwanzig Minuten platzt die infizierte Zelle und setzt 100 bis 200 neugebildete Phagen frei.

Es gibt Viren, die anstelle von DNS nur RNS enthalten. Diese übt dann eine Doppelfunktion aus; sie ist sowohl Träger der Information als auch gleichzeitig Matrize für die Proteinsynthese.

Im Tierexperiment ist es gelungen, virusbedingte Gewächse nachzuweisen. Ob auch beim Menschen Viren eine mögliche Ursache für die Entstehung von Krebs (lat. cancer) sind, ist bis jetzt noch umstritten. In den letzten Jahren sind mehrere Theorien entwickelt worden, die die Krebsentstehung auf der DNS-Enzym-RNS-Protein-Ebene zu erklären versuchen. Beispielsweise soll nach der Mutationstheorie durch einen kanzerogenen (krebserregenden) Reiz eine Änderung (Mutation) der DNS-Struktur an der Stelle hervorgerufen werden, die für die Wachstumsregulation verantwortlich ist. Diese Mutation soll dadurch eine Enthemmung der Zellvermehrung bewirken.

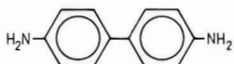
Eine andere Theorie (Deletionstheorie) nimmt an, daß der kanzerogene Reiz an den Ribosomen angreift. Durch Abbau bzw. Blockierung zellspezifischer Bausteine soll dann die Hemmwirkung auf die DNS-Synthese beseitigt werden. Es erfolgt eine Umwandlung der spezifischen Zell-DNS in die unspezifische DNS des Gewächses.

Wieder eine andere Theorie (Derepressionstheorie) geht davon aus, daß durch das Kanzerogen ein sogenanntes Repressorgen in der zellulären RNS blockiert wird, das normalerweise eine ungehemmte Eiweißsynthese verhindert.

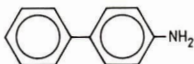
Entsprechend diesen Vorstellungen setzt man für die Chemotherapie bösartiger Gewächse, die neben dem chirurgischen Eingriff und der Strahlenbehandlung zunehmend an Bedeutung gewinnt, entweder sogenannte Antimetabolite (Substanzen, die letztlich die Nukleinsäuresynthese hemmen) oder Hemmer der DNS-Aktivität ein. Beispielsweise gibt es Stoffe, die zu Kettenbrüchen und Vernetzungen der DNS führen und damit eine Reduplikation der DNS verhindern. Es ist leicht verständlich, daß bei einer Chemotherapie mehr oder weniger auch die

normalen Körperzellen in Mitleidenschaft gezogen werden. Im Prinzip ist das aber bei jeder medikamentösen Behandlung der Fall. Entscheidend ist schließlich das Mehr oder Weniger.

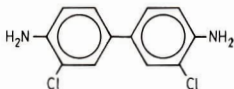
Die Ursachen für die Gewächsbildung sind außerordentlich vielseitig. Neben mechanischen Reizen oder Strahleneinwirkung, neben Parasiten, Viren, Dispositions- und Vererbungsfaktoren können auch chemische Verbindungen krebserregend sein. Bis heute kennt man 700 kanzerogene Verbindungen, von denen einige wichtige Zwischenprodukte der chemischen Industrie waren oder noch sind. Wo mit Sicherheit die Kanzerogenität nachgewiesen werden kann, werden für die Herstellung und Handhabung derartiger Verbindungen in zunehmendem Maße scharfe gesetzliche Auflagen erlassen. In einigen Fällen wird man sogar zu Produktionsverboten schreiten. In der UdSSR ist beispielsweise die industrielle Herstellung und Handhabung von Benzidin seit längerer Zeit nicht mehr erlaubt. Vor kurzem sind auch von der US-Gesundheitsbehörde (OSHA) für vierzehn kanzerogene Verbindungen, darunter Benzidin und einige Benzidinabkömmlinge, scharfe Auflagen erteilt worden. Warum gerade diese Verbindungen eine so ausgeprägte Kanzerogenität aufweisen, weiß man bis heute noch nicht genau. Aufschlußreich ist aber vielleicht, daß sich unter den zuletzt genannten Verbindungen einige in ihrem chemischen Bau ziemlich ähneln. Man könnte in diesem Falle vielleicht die Ursache in der Blockade eines wachstumshemmenden Enzyms (Protein) sehen, bei dem durch das Molekül der kanzerogenen Verbindung die



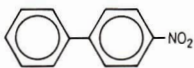
Benzidin (4,4'-Diamino-diphenyl)



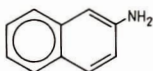
4-Amino-diphenyl



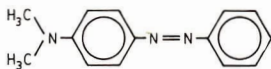
3,3'-Dichlor-benzidin



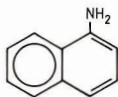
4-Nitro-diphenyl



β-Naphthylamin



4-Dimethyl-amino-azobenzol



α-Naphthylamin

eigentliche Wirkstelle in der tertiären oder quartären Struktur »verbaut« wird.

Die Verfolgung des Makromoleküls in den Bereich der Biopolymere läßt uns ahnen, welche ungeheure Bedeutung die Erforschung dieses Gebietes für die Menschheit hat.

Man beherrscht heute die Methode der Sequenzanalyse von Polypeptiden und praktiziert sie sogar schon mit Automaten. Immer klarer wird das Bild der Proteine hinsichtlich ihrer räumlichen Kontur der höheren Strukturen. Es ist nur eine Frage der Zeit, bis man auch für Nukleinsäuren geeignete Methoden entwickelt haben wird. Die »Biomolekülarchitekten« erhalten damit dann genauere »Baupläne« für die Synthese von Eiweißen und Nukleinsäuren an die Hand.

Der Startschuß für diese Entwicklung ist längst gefallen. Dem Japaner Khorana ist es gelungen, die Sequenz einer DNS-Kette mit 77 Nukleotidpaaren aufzubauen, von der die Synthese einer Transfer-RNS, der t-RNS^{Ala}_{Hefe}, ihren Ausgang nimmt. Es handelt sich dabei um die Transfer-RNS einer Hefe, die für das Herantransportieren der Aminosäure Alanin an den Ort der Polypeptidsynthese im Zytoplasma (Ribosom) zuständig ist.

Der erste halbsynthetische Aufbau eines Virus, nämlich des Phagen Phi X 174, ist Kornberg und Mitarbeitern 1967 mit Hilfe einer DNS-Polymerase geglückt, jenes Enzyms, das für die Synthese des neuen DNS-Stranges bei der Replikation der DNS verantwortlich ist. Sie haben 600 mg dieses Enzyms aus 90 kg Bakterien vom Stamme *Escherichia coli* extrahiert.

Zahlreiche Versuche sind bekannt, in denen durch Injektion von DNS oder Phagen die Erbmerkmale von Bakterien verändert worden sind. Setzt man beispielsweise die DNS von kapseltragenden Bakterien (Pneumokokken) einem Medium zu, in dem sich kapsellose Bakterien befinden, so nimmt ein Teil von ihnen die Eigenschaft kapselhaltig an. Nach mehreren Generationen läßt sich aus den weitergezüchteten transformierten (umgeformten) Bakterien die DNS der kapseltragenden Form, also die Transformations-DNS, isolieren.

Es ist damit zu rechnen, daß eines Tages die Möglichkeit bestehen wird, auch bei höheren Organismen, selbst beim Menschen, gezielte Veränderungen in der Vererbungssubstanz vorzunehmen. Dies könnte dazu dienen, angeborene Stoffwechseldefekte zu beseitigen. Ein Mißbrauch könnte verheerende Folgen haben.

So sehen wir zum wiederholten Male, welch hohe Verantwortung aus der Kenntnis der Molekülstrukturen erwächst. Für die richtige Nutzung dieses Wissens zum Wohle der Menschheit trägt jeder Forscher, jeder Wissenschaftler und Ingenieur eine hohe Verantwortung. Sie drückt sich letztlich darin aus, mit welchem persönlichen Einsatz er zur Errichtung und Gestaltung einer Gesellschaftsordnung beiträgt, die — nach der Beseitigung der auf Höchstprofite orientierten Herrschaft des Kapitals — eine dauerhafte Grundlage für die humanistische Mission der Wissenschaft bildet.

»akzent« – die neue Taschenbuchreihe
mit vielseitiger Thematik:
**Mensch und Gesellschaft,
Leben und Umwelt, Naturwissenschaft
und Technik. – Lebendiges Wissen
für jedermann, anregend und aktuell,
konkret und bildhaft.**

Weitere Bände:

Rast, Aus dem Tagebuch der Erde

Lindner, Kraftquell Kernenergie

Raths, Tiere im Winterschlaf

Lehmann, Mathe mit Pfiff

Peters, Mensch und Tierwelt

Brentjes, Die Erfindung des Haustieres

Mothes, Tiere am Fließband

Schönknecht, Schneller - aber wie?

Thomas/Thomas, Milliarden Jahre Leben

Eyermann, Sojus - Apollo 1975

Freytag, Vom Wasser- zum Landleben

EVP 4,50 Mark
