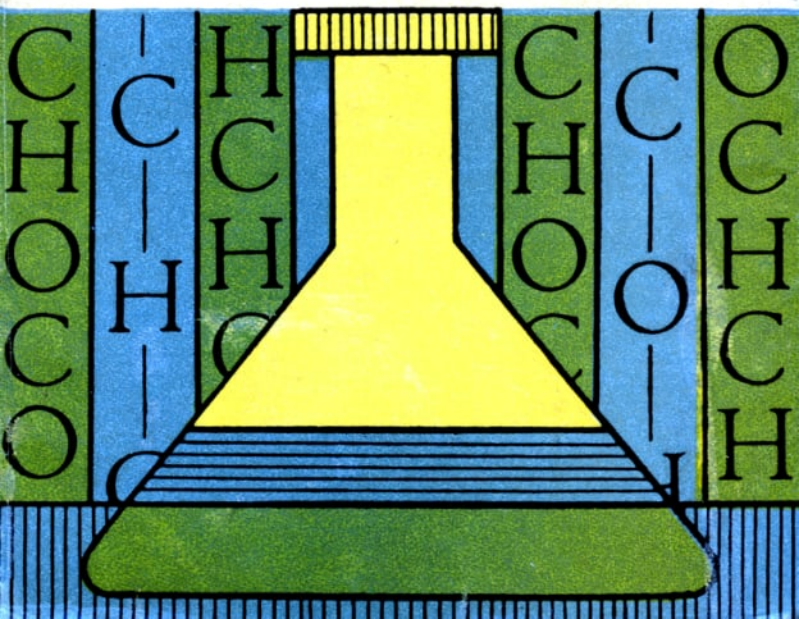


L.Wlassow  
D.Trifonow  
Abenteuerliche  
Chemie



Verlag Mir  
Moskau





VERLAG „MIR“

MOSKAU



L. WLASSOW

D. TRIFONOW

# Abenteuerliche Chemie

Übersetzt  
von Maria Werner

VERLAG „MIR“ MOSKAU

1971



UDK 54(023)-30

Л. ВЛАСОВ, Д. ТРИФОНОВ

**ЗАНИМАТЕЛЬНО**

**О ХИМИИ**

Издательство ЦК ВЛКСМ  
«Молодая гвардия»  
Москва



**На немецком языке**

*...HUNDERT JAHRE ist es her, vielleicht noch mehr, da kam einem Gelehrten der Einfall, alle chemischen Erfindungen und Entdeckungen, alle chemischen Verbindungen und ihre Eigenschaften zu beschreiben. Doch schon damals schritt die Entwicklung der Chemie mit Meilenstiefeln voran, und der gute Mann wollte im Scherz seine Kollegen anflehen, die Forschungen doch zumindest ein Jahr lang einzustellen. Sonst wäre er nicht imstande, die zahlreichen neuen Theorien zu überblicken und das allerneueste Tatsachenmaterial zu erfassen...*

*Heute würde er sich gar nicht erst mit dem Gedanken tragen, eine derartige Sisiphusarbeit zu beginnen. Der Bereich der Chemie vergrößert sich in fast atemberaubendem Tempo. Sie gehört mit zu den Wissenschaften, die die Revolution in Wissenschaft und Technik am meisten beeinflussen. Jährlich werden in der Welt etwa 75 000 neue chemische Verbindungen hergestellt. Wie könnte er auch nur einen Bruchteil davon überblicken? Und jedes Jahr werden etwa 250 000 wissenschaftliche Entdeckungen und Patente veröffentlicht. Fast lawinenartig entwickelt sich das menschliche Wissen. Es verdoppelt sich gegenwärtig innerhalb von 8 bis 10 Jahren.*

*Die Verfasser des vorliegenden Büchleins waren deshalb bemüht, nur über sehr wichtige, fesselnde Probleme der Chemie zu berichten.*

*Der Leser soll erfahren, wie das Periodensystem der Elemente aufgebaut ist, weshalb gerade auf diese und nicht auf eine andere Weise, auf welchem Wege es die Chemiker gelernt haben, kompli-*

zierte Substanzen zu gewinnen und mit einzelnen Atomen umzugehen.

Wir wollen dem Leser von der bunten Vielfalt der Gebiete erzählen, die heute Betätigungsfeld des Chemikers sind, denn die Chemie greift in alle Sphären menschlicher Tätigkeit ein.

Wir wollen unseren Leser auch in ein eigenartiges Museum gelangen lassen und ihm dort kuriose chemische Exponate vorführen.

Möge die Lektüre unserer kurzen Berichte über spannende und zugleich lehrreiche chemische Entdeckungen den Wunsch aufkommen lassen, tiefer in diese zukunftsreiche Disziplin der Wissenschaft einzudringen und sie gründlich zu studieren.

**Anstelle eines Vorworts** Aus grauer Vorzeit erreichte uns folgende Sage: Ein Herrscher fern im Orient, der weise und aufgeklärt war, wollte alles über die Völker der Erde wissen.

Er rief seine Ratgeber herbei und sprach zu ihnen:

„Ich befehle euch, eine Geschichte aller Völker niederschreiben zu lassen. Berichtet, wie die Völker früher gelebt haben, wie sie in unseren Tagen leben, womit sie sich beschäftigen, in welche Kriege sie verstrickt waren und welcher Art die Kriege sind, die sie heute führen. Und vergeßt auch nicht, mir zu sagen, welche Gewerbe und Künste in den verschiedenen Ländern in voller Blüte stehen.“

Er legte für die Lösung dieser Aufgabe eine Zeit von fünf Jahren fest.

In stummer Ehrfurcht verbeugten sich des Herrschers Vertraute. Von überall her ließen sie die Weisesten der Weisen kommen, und sie verkündeten ihnen den Wunsch des Mächtigen.

Es geht die Mär, die Pergamentherstellung soll damals einen ungeahnten Aufschwung erlebt haben...

Die Zeit verstrich, und als fünf Jahre vorüber waren, traten die Männer vor den Herrscher: „Dein Wunsch, o großer Gebieter, ist erfüllt. Wirf einen Blick durch das Fenster, und Du siehst, was Dein Wille war.“

Vor dem Schloßtor hatte eine Kamelkarawane haltgemacht. Es war ein langer Zug. Erst am Horizont entschwand er den Blicken. Ein jedes

Tier trug auf dem Rücken zwei ungeheure Ballen, und in jedem Ballen waren zehn dicke, in Saffianleder gebundene Bücher verstaut.

„Was soll das bedeuten?“ fragte der Herrscher erstaunt.

„Das ist eine Weltgeschichte“, antworteten die Vertrauten. „Auf Dein Geheiß hin haben die Weisesten aller Weisen in rastloser fünfjähriger Arbeit sie niedergeschrieben.“

„Ihr macht Euch wohl über mich lustig?“ zürnte der Herrscher. „Bis zu meinem Lebensende werde ich ja nicht einmal den zehnten Teil dessen gelesen haben, was da niedergeschrieben ist! Das geht nicht. Gebt mir eine kurzgefaßte Geschichte. Doch darin sollen alle wichtigen Geschehnisse genannt sein.“

Und er legte dafür eine Frist von zwölf Monaten fest.

Die Zeit verging. Bald war es wieder soweit. Vor den Schloßmauern erschien eine Karawane: zehn Kamele mit je zwei Ladungen, in jeder Ladung je zehn Folianten.

Der Zorn des Herrschers wurde noch unbändiger.

„Nur das Allerwesentlichste aus der Geschichte aller Völker und Zeiten soll festgehalten werden. Wieviel Zeit braucht man dazu?“

Da trat der Weiseste aller Weisen vor den Herrscher und sagte:

„Sobald der Morgen graut, o großer Gebieter, soll Dein Wunsch erfüllt sein.“

„So rasch?“ staunte der Herrscher. „Wehe Dir, betrügst Du mich. Es würde Dich den Kopf kosten.“

...Kaum hatte die Sonne am blauseidenen Himmel ihr Antlitz gezeigt, kaum hatten die Blumen ihre Köpfe aus nächtlichem Schlummer erhoben, da rief der Herrscher den Weisen zu sich.

Der Alte betrat das Gemach, behutsam ein Kästchen aus Sandelholz tragend.

„Du findest darin, o großer Gebieter, das Allerbedeutendste aus der Geschichte aller Völker und Zeiten“, sprach der Weise, und er verbeugte sich ehrfurchtsvoll.

Der Herrscher öffnete das Kästchen. Auf einem Samtkissen lag ein Stückchen Pergament. Darauf stand: „Sie wurden geboren, sie lebten, sie starben.“

Soweit die Legende. Sie kam uns in den Sinn, als man uns vorschlug, ein spannendes Buch über die Chemie zu schreiben. Selbstverständlich wurden uns in puncto Papier (was den Umfang des Buches anbelangt) Grenzen gesetzt. Wir sollten uns auf das Wesentlichste beschränken. Was aber ist in der Chemie das Allerwesentlichste?

„Chemie ist die Wissenschaft von den Stoffen und den stofflichen Umwandlungen.“

Das Stückchen Pergament aus dem Schrein des Weisen stieg in unserer Erinnerung auf.

Wir überlegten lange, überlegten hin und her, und kamen schließlich zu dem Schluß: In der Chemie ist alles wesentlich, das eine mehr, das andere weniger. Je nachdem, für wen. Der Fachmann, der sich mit anorganischer Chemie befaßt, mag der Meinung sein, diese sei das A und O der Wissenschaft. Ein anderer, in dessen Blickfeld die organische Chemie steht, wird ent-

gegengesetzter Ansicht sein. Es ist einfach nicht möglich, dem einen oder anderen Gebiet einen Vorrang einzuräumen.

Die Chemie und die von ihr hergestellten Produkte beeinflussen heute alle Zweige der Industrie, die gesamte Land- und Forstwirtschaft, ja sogar unser geistig-kulturelles Leben.

Sie hilft dem Menschen, aus Erzen und Mineralen Metalle zu gewinnen. Ohne die Chemie gäbe es heute keine moderne Metallurgie.

Sie gewinnt aus mineralischen, tierischen und pflanzlichen Ausgangsstoffen Substanzen, eine herrlicher und bewundernswerter als die andere. Sie bildet die Natur nach und ist bereits dabei, von Jahr zu Jahr in steigendem Maße sie zu übertreffen. Sie erzeugt Tausende und Abertausende in der Natur unbekannte Stoffe. Sie verleiht ihnen Eigenschaften, die für die praktische Nutzung von großer Bedeutung sind.

Endlos ist das Verzeichnis der guten Taten, die die Chemie vollbringt.

Denn alle Erscheinungen des Lebens sind ständig von einer ungeheuer großen Anzahl chemischer Vorgänge begleitet.

In der Evolution des Menschen z. B. spielen chemische Prozesse eine entscheidende Rolle. Es wäre unmöglich, das Wesen des Lebensvorgangs zu erfassen, wenn uns nicht die Gesetzmäßigkeiten chemischer Reaktionen bekannt wären. Die Aufgabe der Biochemie ist es beispielsweise, in die molekularen Zusammenhänge und Gesetzmäßigkeiten der elementaren Lebensprozesse einzudringen, die Natur und die Wirkungsweise der Regulatoren biologischer Prozesse und den

Mechanismus des Stoffwechsels zu untersuchen.

Der Chemie verdanken wir Nahrung und Kleidung. Sie versieht uns mit Gütern, ohne die die zivilisierte Gesellschaft von heute nicht denkbar wäre.

Wenn Raketen ins Weltall vorstoßen, hat die Chemie dazu einen entscheidenden Beitrag geleistet. Sie liefert den Kraftstoff für die Antriebsaggregate und zuverlässige, hitzebeständige Werkstoffe für die Konstruktionen.

Fiele jemandem ein, die großartige Vielfalt der Chemie zum Gegenstand schriftlicher Darlegungen zu machen, so kämen die Papiervorräte selbst eines höchstentwickelten Landes in Gefahr. Zum Glück ist bislang niemand auf einen derartigen Einfall gekommen. Vor uns aber stand eine Aufgabe ähnlicher Art.

Es blieb uns nur ein Ausweg: Wir beschlossen, einen Streifzug durch die Chemie zu unternehmen und über alles zu berichten, was uns als wichtig erschien. Andere Autoren würden vermutlich über andere Dinge schreiben. Wer also in diesem Buche etwas vermißt, was ihn gerade am meisten interessiert, möge mit den Autoren nicht allzu streng ins Gericht gehen. Sie hatten es schwer, aus dem ohnehin interessanten Gebiet der Chemie nun auch noch jene Probleme auszuwählen, die vor allem junge Leser in das große Reich der Chemie einzuführen vermögen.



**DIE BEWOHNER  
DES GROSSEN HAUSES**



**Das Periodensystem der Elemente aus der Vogelschau** Auf die erste Bekanntschaft ist kein richtiger Verlaß. Bisweilen läßt sie den Menschen kalt, bisweilen kommt er aus dem Staunen nicht heraus. Manchmal entlockt sie ihm Ausrufe grenzenloser Verwunderung, wie das einem Besucher eines zoologischen Gartens erging, als er beim Anblick einer Giraffe ausrief: „Unmöglich!“

Doch manchmal kann auch eine flüchtige Bekanntschaft mit einem Gegenstand oder einer Erscheinung, sozusagen aus der Vogelschau betrachtet, recht nützlich sein.

Das von Dmitri Iwanowitsch Mendelejew aufgestellte Periodensystem der Elemente ist gewissermaßen ein Spiegel, der den Inhalt eines der großartigsten Gesetze der Natur zusammenfaßt — des Gesetzes der Periodizität. Es ist eine Zusammenfassung von Regeln, die das Verhalten von mehr als einhundert Elementen kennzeichnen, die auf der Erde vorkommen oder von Menschenhand künstlich erzeugt werden. Für jedes dieser Elemente stellt es eine Art Hausordnung dar, die im großen Gebäude der chemischen Grundstoffe oder Elemente gilt.

Es war 1869, als Dmitri Iwanowitsch Mendelejew die chemischen Elemente nach dem Atomgewicht (genauer der relativen Atommasse) hintereinander anordnete. Dabei stellte er überraschenderweise fest, daß in bestimmten Abständen Elemente mit ähnlichen Eigenschaften auftreten, so daß sich mehrere Abschnitte, die Perioden, ergaben. Ordnet man diese untereinander an, bilden sie ein eigenartiges Gebäude. Zur gleichen Zeit war

auch Lothar Meyer an die Entdeckung des Gesetzes der Periodizität dicht herangekommen. Schon der erste Blick aufs Gebäude kann uns



in Staunen versetzen. Es ist, als ob man unter Typenbauten der Großblockbauweise plötzlich ein besonderes Gebilde von anmutiger Schönheit gesichtet hätte.

Seine „Stockwerke“, die Perioden, sind sehr ungleichmäßig aufgebaut.

In der ersten Periode, also im „Erdgeschoß“, sind insgesamt zwei Zellen angeordnet, in der ersten und der zweiten „Etagé“ je acht. Die dritte und die vierte Etagé sind nach dem Hotelprinzip angelegt: Auf jedem Stockwerk befinden sich achtzehn Zimmer. Auf der fünften und der sechsten Etagé stößt man auf eine noch größere Anzahl von Räumen (allerdings kleineren Umfangs): Ein jedes Stockwerk hat zwei- unddreißig eingebaute Zimmerchen. Haben Sie je ein derartiges Gebäude gesehen?

So aber sieht das Zuhause der chemischen Elemente aus, ihr Periodensystem.

Baumeisterlaune? Mitnichten! Ein Gebäude errichtet man ja im Einklang mit Gesetzen der Physik. Sonst fiel es beim ersten Windstoß in sich zusammen, einem Kartenhaus gleich.

Auch das baukünstlerische „Prinzip“ des Periodensystems fußt auf strengen physikalischen Gesetzen. Diese Gesetze besagen: Eine jede Periode in der Tabelle muß eine ganz bestimmte Anzahl von Elementen enthalten, die erste z. B. zwei — nicht weniger und nicht mehr.

Physiker und Chemiker sind sich in dieser Hinsicht heutzutage völlig einig.

Doch das war nicht immer so. Als das Gesetz der Periodizität noch nicht die Gemüter bewegte, gab es manchen Streit darüber, ob sich die chemischen Elemente überhaupt in ein System einordnen lassen. Sehr besorgt darum waren die Chemiker, die Jahr für Jahr neue Elemente entdeckten: „Wohin mit den Neulingen?“ Bisweilen

kam es zu peinlichen Zwischenfällen: Vor ein und derselben Zelle in der Tabelle standen eine Reihe von Anwärtern Schlange.

Es traten Skeptiker auf, die allen Ernstes erklärten: Die Mendelejewsche Tabelle ist auf Sand gebaut. Man vernahm derartiges auch aus dem Munde des deutschen Chemikers Robert Wilhelm Bunsen, des berühmten Mannes, der gemeinsam mit seinem Freund Robert Kirchhoff 1859 die Spektralanalyse entdeckt hatte. Dieser bedeutende Forscher legte bei der Betrachtung des Gesetzes der Periodizität eine erstaunliche wissenschaftliche Kurzsichtigkeit an den Tag, die ihm sogar den Ausruf entlockte, man könnte mit dem gleichen Erfolg in der Zahlenanordnung eines Börsenberichts eine Gesetzmäßigkeit wahrnehmen.

Schon vor Mendelejew waren Versuche unternommen worden, im Wirrwarr der chemischen Elemente Ordnung zu schaffen. Im Jahre 1817 stellte Johann Wolfgang Döbereiner, ein Freund Goethes, 21 Elemente auf Grund der Ähnlichkeit ihrer Eigenschaften in Dreiergruppen zusammen. Damit war jedoch nur in einen Teil der Elemente eine gewisse Ordnung gebracht. Der Engländer Newlands war mit seinem „Okta- vengesetz“ der Wahrheit wohl am nächsten gekommen. Wie in der Musik eine jede achte Tonstufe eine Wiederholung des Grundtons ist, ähnelten nach Newlands, der die Elemente nach ihrem Atomgewicht angeordnet hatte, die Eigenschaften eines jeden achten Elementes denen des ersten. Doch auch Newlands' Entdeckung stieß zunächst auf Ablehnung. Bei einer Diskussion

in der Royal Society wurde er von einem seiner Gegner spöttisch gefragt: „Ja, und wenn man die Elemente in alphabetischer Reihenfolge ordnete, würden Sie da nicht auch eine Gesetzmäßigkeit herausfinden?“

Was konnte Newlands darauf schon antworten? Nichts. Er gehörte zwar zu jenen, die der Entdeckung des Naturgesetzes nahegekommen waren, doch die eigenartige, nach jedem siebenten Element wahrzunehmende Wiederholung der Eigenschaften ließ in Newlands' Kopf noch nicht den Begriff Periodizität aufkommen.

Auch die Mendelejew-Tabelle erweckte zu Anfang manche Skepsis. Ihr „architektonischer“ Aufbau wurde zur Zielscheibe heftiger Angriffe. Denn so manches war darin unklar geblieben, bedurfte also einer Aufklärung. Mendelejew war ja vom Atomgewicht ausgegangen und hatte auf dieser Grundlage eine Reihenfolge der Elemente festgelegt. Dabei bemerkte er, daß sich bestimmte Eigenschaften der Elemente nach einer bestimmten Zahl von Elementen wiederholen. Dennoch mußte er dieses Prinzip mehrmals durchbrechen. Zum Beispiel stellte er das Jod trotz der niedrigeren Atommasse hinter das Tellur, da es Eigenschaften aufwies, die ihm eine Stellung unter dem Brom, also in der Gruppe der Halogene, zuwiesen. Mendelejew sah nicht nur, daß die Eigenschaften der Elemente sozusagen eine Funktion der „Atomgewichte“ sind, sondern er erkannte dank einer dialektischen Betrachtungsweise, daß sich ein System dialektischer Beziehungen zwischen den wichtigsten qualitativen und quantitativen Merkmalen der che-

mischen Elemente darstellen ließ. Erst diese komplexe dialektische Betrachtung — wie Engels sagte, die Anwendung des Gesetzes vom Umschlagen der Quantität in Qualität — ermöglichte Mendelejew, das Gesetz der Periodizität zu entdecken und konsequent anzuwenden. Diese Konsequenz bewies Mendelejew vor allem dadurch, daß er bei einigen Elementen eine Korrektur der Angaben ihrer Atomgewichte für erforderlich hielt und daß er aus Lücken in seinem System auf bisher noch unbekannte Elemente schloß, eine prognostische Einschätzung, die sich schon wenige Jahre später durch die Entdeckung der Elemente Gallium (1875), Scandium (1879) und Germanium (1885) glänzend bestätigte. Schließlich konnte Anfang des 20. Jahrhunderts die Struktur der Atome durch neue Erkenntnisse noch präziser dargestellt werden. Nunmehr wurde auch klar, warum auf das Element Wasserstoff das Element Helium folgte.

Hier, im Erdgeschoß des großen Gebäudes der Elemente, schienen die Dinge nun unkompliziert zu sein: Man hatte keinen Andrang neuer Bewohner zu befürchten. Die Kernladung des Wasserstoffatoms, durch die Zahl der Protonen bestimmt, beträgt 1, die des Heliums 2. Diese Zahl heißt Ordnungszahl. Sie ist sozusagen die „Platznummer“ des Elements im Periodensystem. Zwischen den beiden Elementen Wasserstoff und Helium kann es keine anderen Elemente geben, denn es gibt keine Atomkerne oder Elementarteilchen mit gebrochener elektrischer Ladung. Die Ladungen eines beliebigen Teilchens sind

stets ganze Vielfache der Elektronen- oder Protonenladung.

(In den letzten Jahren allerdings streiten die Theoretiker der Physik heftig über die Existenz von Quarks. Das Wort „Quarks“ entstammt einem phantastischen Roman. Wahrhaft phantastische Eigenschaften werden ja auch von diesen bisher nur angenommenen, also rein hypothetischen primären Elementarteilchen erwartet. Sie sollen zum Aufbau aller anderen Elementarteilchen bis zu den Protonen und Neutronen dienen. Man muß dabei voraussetzen, daß die Quarks eine gebrochene elektrische Ladung haben, die ein Drittel oder zwei Drittel der Elektronenladung beträgt. Sollten Quarks tatsächlich existieren, so könnte die materielle Anordnung der Welt ein anderes Bild ergeben.)

**Wie die Astronomen den Chemikern einen Bären dienst erwiesen** „Niemals war mir der Gedanke durch den Kopf gegangen, daß das Periodensystem der Elemente ausgerechnet beim Wasserstoff beginnen sollte.“

Mit diesen Worten deutete Dmitri Iwanowitsch Mendelejew in seinem Standardwerk „Grundlagen der Chemie“ an, daß es genügend Veranlassung dazu gab, die von ihm getroffene Anordnung der Elemente in Zweifel zu ziehen. Tatsächlich geschah das damals sehr oft. Die Anordnung der Elemente in der Tabelle entsprach ja dem ansteigenden atomaren Gewicht, also der relativen Atommasse. Die relative Atommasse des Wasserstoffs beträgt 1,008, die des

benachbarten Heliums — 4,003. Warum sollte es nicht auch Elemente mit der Ordnungszahl 1,5 oder 2 oder 3 geben? Konnten nicht auch leichtere Elemente als Wasserstoff vorhanden sein, Elemente mit der Atommasse kleiner als 1? Mendelejew ließ eine solche Vermutung zu. Auch andere Chemiker wandten sich nicht gegen derartige Vorstellungen. Gestützt wurden sie in ihrer Annahme von Astronomen, also von Vertretern einer Wissenschaft, die zu jener Zeit von der Chemie weit entfernt war. Die Astronomen hatten erstmalig den Beweis dafür erbracht, daß man neue Elemente nicht nur in Laboratorien bei der Analyse von irdischen Mineralien entdecken konnte.

Der Engländer Norman Lockyer und der Franzose Jules Janssen beobachteten 1868 unabhängig voneinander eine totale Sonnenfinsternis. Das blendend grelle Licht der Korona ließen sie auf das Prisma eines Spektroskops fallen. Unter den Linien des Spektrums nahmen sie eine solche wahr, die keinem der auf der Erde bekannten chemischen Elemente zugeordnet werden konnte. Sie schrieben sie einem Element zu, das nur auf der Sonne vorhanden zu sein schien, einem „Sonnenstoff“. Lockyer schlug vor, ihn Helium (griechisches Wort für „Sonne“) zu nennen. Erst 27 Jahre später stieß der englische Physiker und Chemiker Sir William Ramsay bei der Untersuchung eines irdischen Minerals auf dieses Edelgas. Der Forscher William Crookes, von Ramsay um eine exakte Analyse gebeten, bestätigte die Entdeckung.

Das Beispiel machte Schule. Astronomen rich-

teten nun ihre Fernrohre auf weitentfernte Sterne und Sternsysteme.

Unkritisch veröffentlichte man die Ergebnisse der angestellten Forschungen in Jahrbüchern der Astronomie, ja manchen Bericht druckten sogar Zeitschriften für Chemie nach, insbesondere dann, wenn von neuen chemischen Grundstoffen die Rede war, die angeblich in den grenzenlosen Weiten des Weltalls entdeckt worden waren. Man erfand für sie wohlklingende Namen: Coronium und Nebulium, Arconium und Protofluor. Den Chemikern war bloß ihr Name bekannt, sonst nichts. Doch das Happyend der Heliumgeschichte ließ sie nicht müßig bleiben: Schleunigst räumten sie den himmlischen Fremdlingen einen Platz im Periodensystem der Elemente ein, und zwar vor dem Wasserstoff oder zwischen dem Wasserstoff und dem Helium. Man wiegte sich in der Hoffnung, daß ein Forscher doch einmal den Beweis dafür erbringen würde, daß es auf der Erde ein Coronium und seine nicht minder geheimnisvollen himmlischen Brüder gebe.

Doch als sich die Physiker an das Periodensystem heranmachten, waren die Luftschlösser im Nu zerstört. Das Atomgewicht, die relative Atommasse, wie man heute exakter sagt, erwies sich als nicht immer zuverlässige Stütze für das Gesetz der Periodizität. Bereits 1891 hatte Mendelejew auf diesen Mangel hingewiesen: „Bis jetzt fehlen uns aber noch die Mittel, um die Natur und desto mehr die Ursachen dieses Gesetzes zu erfassen. Aller Wahrscheinlichkeit nach liegt die Ursache in der inneren Mechanik der

Atome und Moleküle.“ So hatte Mendelejew ja bereits erkannt, daß das Jod unbedingt in die Gruppe der Halogene, also unter das Brom, gestellt werden mußte, obwohl es seiner Atommasse nach eigentlich einen Platz weiter nach vorn hatte gerückt werden müssen.

Zu Beginn des 20. Jahrhunderts konnte nun die sich rasch entwickelnde Atomphysik den Beweis dafür erbringen, daß die Eigenschaften der Elemente letztlich durch die Kernladungszahl bestimmt werden, die der Zahl der Protonen im Atomkern und der Anzahl der Elektronen in der Hülle des neutralen Atoms entspricht. Die Kernladungszahl ist zugleich die Ordnungszahl der Elemente und bestimmt somit deren Platz im Periodensystem. In ihm erhöht sich der „Wert“ der Ladung von Element zu Element um eine Einheit, also von 1 bis gegenwärtig 104.

Was die von den Astronomen damals vermuteten weiteren neuen Elemente anbelangt, so verstrich zunächst eine geraume Zeit, ehe präzisere astronomische Geräte dafür den Beweis erbrachten, daß die mysteriösen Entdeckungen bloß Hirngespinnste waren. In Wirklichkeit handelte es sich um Atome längst bekannter Elemente, um Atome, die einen Teil ihrer Elektronen abgegeben hatten, daher ungewöhnliche Spektren ergaben. Die himmlischen Fremdlinge waren also mit falschen Visitenkarten versehen gewesen.

**Das Doppelgesicht eines Elements** Es mag sein, daß sich im Chemieunterricht in der Schule folgendes Gespräch ergibt:

Lehrer: „In welcher Gruppe des Periodensystems der Elemente befindet sich der Wasserstoff?“

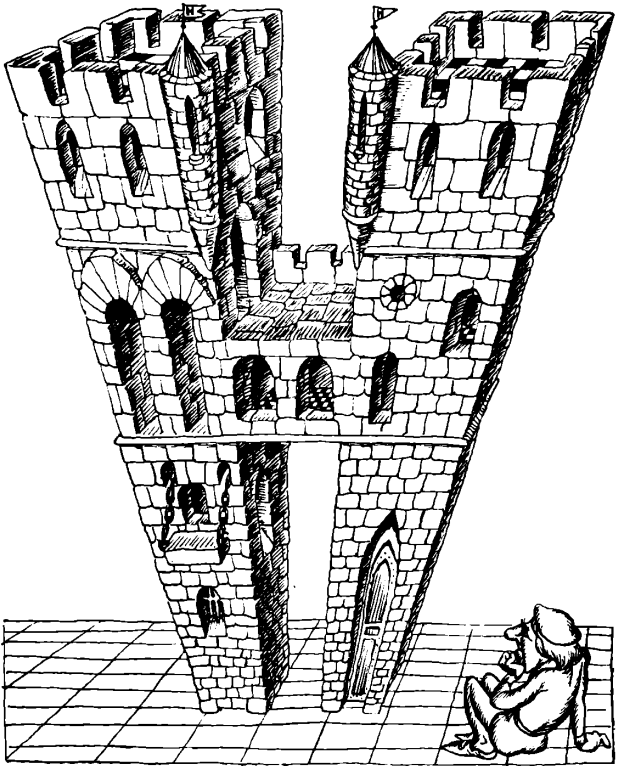
Schüler: „Das Element Wasserstoff gehört zur ersten Hauptgruppe, und zwar aus folgendem Grunde: Das Wasserstoffatom, dessen Kern aus einem einzigen Proton besteht, hat auf seiner einzigen Elektronenschale ein Elektron. Die anderen Elemente der ersten Hauptgruppe, die Alkalimetalle Lithium, Natrium, Kalium, Rubidium, Zäsium und Franzium, besitzen eine ähnliche Elektronenanordnung: Die äußere Elektronenschale ist stets von nur einem Elektron besetzt. Deshalb unterscheidet sich ihr chemisches Verhalten voneinander nur unwesentlich. Wie der Wasserstoff weisen sie in chemischen Verbindungen eine positive Wertigkeit auf, die gleich 1 ist. Schließlich ist der Wasserstoff imstande, einige Metalle aus ihren Salzen zu verdrängen.“

Aber diese Aussage über den Wasserstoff stimmt nur zur Hälfte.

Die Chemie ist eine exakte Wissenschaft. Deshalb konnte sie sich nicht mit diesen Feststellungen zufrieden geben. Ungeklärtes ist ihr wesensfremd. Das Beispiel des Wasserstoffs bestätigt es.

Was hat Wasserstoff mit Alkalimetallen gemein? Lediglich die positive Wertigkeit, die gleich 1 ist. Lediglich den gleichen Aufbau der äußeren Elektronenschale. Im übrigen ist jedoch keine Spur von Ähnlichkeit zu finden. Wasserstoff ist ein Gas und kein Metall. Alle anderen Elemente der ersten Gruppe stellen klassische Metalle dar, sind bei chemischen Reaktionen äußerst ener-

gische Bindungspartner. Mit seinem einzigen Elektron unternimmt der Wasserstoff klägliche



Versuche, sich als Alkalimetall auszugeben. Er ist ihnen wesensfremd, läßt sich also dieser Hauptgruppe nicht eindeutig zuordnen.

Das große Gebäude des Periodensystems ist so eingerichtet, daß verwandte Elemente übereinander wohnen. Auf diese Art entstehen die Gruppen und Untergruppen des Periodensystems der Elemente. Diese Ordnung ist oberstes Gesetz für die Bewohner des großen Hauses. Als sich der Wasserstoff in die erste Gruppe drängte, verletzte er unwillkürlich dieses Gebot.

Doch wohin mit dem armen Teufel? Im Periodensystem gibt es ja ganze acht Hauptgruppen. Nur in der neunten, der sogenannten Null-Gruppe, findet sich für den Wasserstoff ein direkter Etagnachbar. Dort befindet sich das Helium. In den anderen Gruppen sind die Plätze im Erdgeschoß unbesetzt. Welche Möglichkeit für einen Umbau des Erdgeschosses, um für den Wasserstoff einen geeigneteren Platz zu finden!

Sollte man ihn vielleicht in die zweite Gruppe verweisen? Zu den Erdalkalimetallen, die vom Beryllium angeführt werden? Auch sie hegen für den Wasserstoff keinerlei verwandtschaftliche Gefühle. Aber auch die dritte und die vierte, die fünfte und die sechste Gruppe wollen nichts von ihm wissen. Wie wäre es mit der siebten? Die hier hausenden Halogene („Salzbildner“) — Fluor, Chlor, Jod und Astatium — sind bereit, dem Wasserstoff die Freundeshand zu reichen.

„Du bist ein Nichtmetall?“ fragt das Fluor den Wasserstoff.

„Ein Nichtmetall.“

„Bist du ein Gas?“

„Erraten!“

„Geradeso wie wir“, sagt das Fluor, aufs Chlor hinweisend.

„Bei mir setzt sich das Molekül bei normaler Temperatur aus zwei Atomen zusammen“, teilt der Wasserstoff mit.

„Siehe da!“ staunt das Fluor. „Ganz so wie bei uns.“

„Kannst du auch eine negative Wertigkeit an den Tag legen, Elektronen zusätzlich in die Außenschale aufnehmen? Wir tun das sehr gern.“

„Selbstverständlich kann ich das. Mit den Alkalimetallen zum Beispiel, die mich nicht ausstehen können, bilde ich Wasserstoffverbindungen, sogenannte Hydride. Meine Wertigkeit beträgt dann minus 1.“

„Wohlan! Setz' dich zu uns! Wir wollen Freundschaft schließen!“

Der Wasserstoff ließ sich in der siebenten Gruppe nieder. Doch nach eingehender Bekanntschaft mit dem neuen Verwandten sagte eines der Halogene enttäuscht:

„Ach, weißt du, Brüderchen Wasserstoff, bei dir ist nicht alles in Ordnung. Du hast in deiner Außenschale im allgemeinen doch nur ein einziges Elektron ... wie die Kollegen aus der ersten Gruppe. Wäre es nicht besser, du gingest wieder zu den Alkalimetallen zurück?“

Unser Wasserstoff ist also ein Pechvogel: Plätze im Periodensystem gibt es genug, doch keinen, auf dem er sich mit voller Berechtigung niederlassen könnte.

Woher kommt das? Wie ist dieses erstaunliche Doppelgesicht des Wasserstoffs zu erklären? Wes-

halb gebärdet sich der Wasserstoff so eigenartig?

Die charakteristischen Eigenschaften eines jeden Elementes treten zutage, sobald es sich mit anderen Elementen verbindet. Dabei gibt das Element Elektronen ab, oder es nimmt Elektronen auf. Sobald ein chemisches Element alle Elektronen der Außenschale abgegeben hat, bleiben in der Regel die kernnäheren stabil. Das ist bei allen Elementen so. Nur der Wasserstoff macht eine Ausnahme. Hat er sich von seinem einzigen Elektron getrennt, bleibt ja das Proton, der Kern, übrig. Das bedeutet, daß die Chemie des Wasserstoffs gewissermaßen als die in ihrer Art einmalige Chemie des Elementarteilchens Proton gelten kann. Sobald der Wasserstoff mit anderen Elementen reagiert, wird der Ablauf der Reaktion durch das Proton in aktiver Weise bestimmt.

Das Geheimnis des inkonsequenten Gebarens des Wasserstoffs ist hiermit gelüftet.

**Der Allererste und der Allererstauulichste** Den Wasserstoff entdeckte der berühmte englische Physiker Sir Henry Cavendish, der reichste Mann unter den Wissenschaftlern und der gelehrteste Mann unter den Reichen, wie sich ein Zeitgenosse äußerte. Wir würden hinzufügen: der größte Pedant unter den Forschern. Es wird berichtet, daß Cavendish selbst dann nicht darauf verzichtete, ein Ausleihformular auszufüllen, wenn er der eigenen Bibliothek ein Buch entnahm. Wie dem auch sei, zweifellos zählte er zu einem der hartnäckig-

sten Vertreter der Wissenschaft. Die Wissenschaft hatte ihn völlig in Beschlag genommen, weshalb er als menschenscheu galt. Doch gerade diesen Eigenschaften hatte er seine Entdeckung zu verdanken, die Entdeckung des neuen Gases Wasserstoff. Es war wahrhaftig keine leichte Sache gewesen.

1766 gilt als das Jahr der Entdeckung, denn zu dieser Zeit stellte er die Ergebnisse seiner Arbeit der Öffentlichkeit vor. Bereits 17 Jahre später ließ der französische Professor J. A. C. Charles den ersten wasserstoffgefüllten Luftballon hochsteigen.

Auch für die Chemiker war der Wasserstoff ein wertvoller Fund. Er half ihnen, endlich den Aufbau von Säuren und Basen, diesen wichtigsten Klassen chemischer Verbindungen, zu erklären. Er wurde unersetzlicher chemischer Reagenzstoff im Labor: fällte die Metalle aus den Salzlösungen und regenerierte die Metalloxide. Versuchen wir, uns nur einmal vorzustellen, was geschehen wäre, hätte man den Wasserstoff nicht 1766 entdeckt, sondern, sagen wir, ein halbes Jahrhundert später. Dann wäre die ganze Entwicklung der Chemie, sowohl der theoretischen als auch der praktischen, auf lange Zeit hinaus aufgehalten worden.

Nachdem sich die Chemiker mit dem Neuentdeckten schon vertraut gemacht hatten, die Praktiker ihn für die Gewinnung wichtiger Substanzen auszuwerten begannen, lenkte das Gas Wasserstoff auch die Aufmerksamkeit der Physiker auf sich. Die Wissenschaft wurde durch neue Informationen ungemein bereichert.

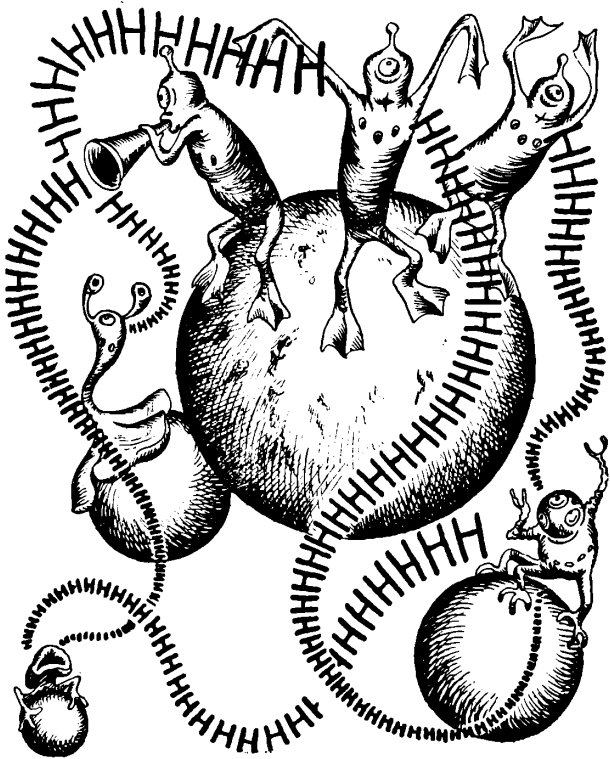
Wasserstoff schmilzt bei einer Temperatur von  $-259,1^{\circ}\text{C}$ , also bei einer niedrigeren Temperatur als die übrigen Flüssigkeiten oder Gase. Dank des Wasserstoffatoms vermochte der dänische Physiker Niels Bohr seine Theorie der Anordnung der Elektronen um den Atomkern zu entwickeln; eine Voraussetzung für das Verständnis



der physikalischen Bedeutung des Gesetzes der Periodizität. Die beiden Gegebenheiten bereiteten den Boden für weitere bedeutende Entdeckungen.

In der Folge überreichten die Physiker den Stafelstab ihren nächsten Berufsverwandten — den Astrophysikern. Diese unternahmen es, Zusammensetzung und Aufbau von Sternen zu erforschen. Sie gelangten zu der Schlußfolgerung, daß der Wasserstoff im Weltall das Element Nr. 1 sei. Er ist Hauptbestandteil der Sonne,

der Sterne, der Galaxien. Er ist wichtigster „Füllstoff“ des interstellaren Raumes. Im Weltall übertreffen die Vorräte an Wasserstoff die



Gesamtmenge aller anderen chemischen Elemente. Das ist ein wesentlicher Unterschied gegenüber irdischen Verhältnissen, wo seine Vorräte nicht einmal 1 Prozent ausmachen.

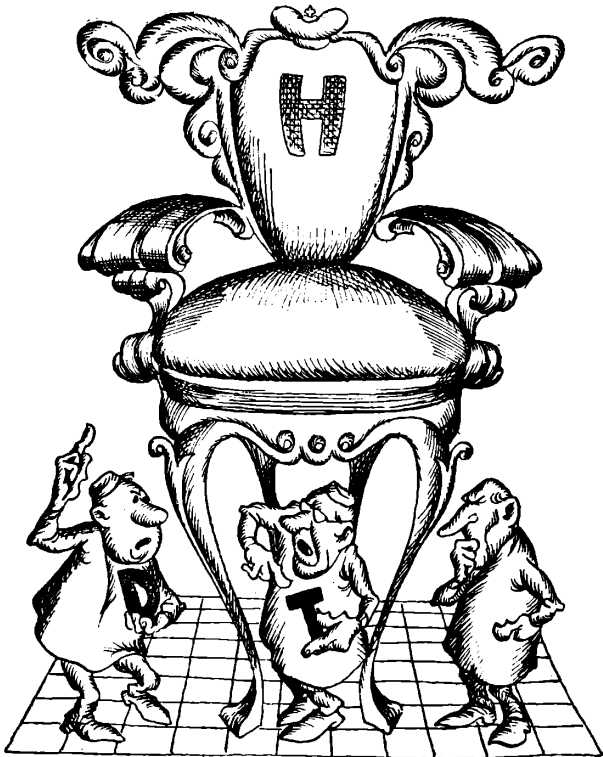
Der Wasserstoff wurde für die Forscher zum Ausgangspunkt für die Untersuchung des inneren Baus der Atome, da die „Atomgewichte“ aller Elemente — von kleinen Abweichungen abgesehen — als ganzzahlige Vielfache der Relativmasse des Wasserstoffatoms erschienen und somit in Vermuten war, daß allen chemischen Elementen die gleichen Bildungsgesetze zugrundeliegen. Die Forscher erkannten schließlich, daß unsere Sonne, ja alle Sterne leuchten, weil sich in ihrem Innern thermonukleare Reaktionen der Umwandlung von Wasserstoff in Helium vollziehen, wobei ungeheure Energiemengen freigesetzt werden.

Noch eine weitere erstaunliche Eigenschaft verdient Erwähnung. Die Wellenlänge der Radiostrahlung des interstellaren Wasserstoffs beträgt 21 cm. Diese 21-cm-Linie wird beispielsweise von den kalten interstellaren Wasserstoffwolken ausgestrahlt. Die Wissenschaftler zerbrechen sich nun den Kopf darüber, ob es nicht möglich wäre, auf dieser 21-cm-Strahlung eine Radioverbindung mit Bewohnern anderer Welten herzustellen. Sollte es dort mit Vernunft ausgestattete Lebewesen geben, dürfte ihnen der Kennwert 21 cm nicht unbekannt sein...

Aber es gibt nicht nur eine Wasserstoffart. Durch Spektralanalyse entdeckte im Jahre 1932 Harold Clayton Urey den sogenannten schweren Wasserstoff. Das war, wie sich bald zeigen sollte, eine der bedeutendsten Entdeckungen unseres Jahrhunderts.

Ehedem war man der Ansicht, auf der Erde gäbe es nur Wasserstoff mit der Massenzahl 1.

Urey fand aber einen doppelt so schweren Zwill-  
ling: das Wasserstoffisotop mit der Massen-  
zahl 2.



Isotope sind Atomarten, deren Kerne **gleich** viel  
Protonen, jedoch **unterschiedlich** viele Neutro-

nen aufweisen. Mit anderen Worten: Isotope haben gleiche Kernladungszahlen, also gleiche Ordnungszahlen. Sie unterscheiden sich als gleiche Elemente durch ihre relative Atommasse (Atomgewicht). Alle chemischen Elemente besitzen Isotope. Verschiedene kommen in der Natur vor, andere wurden auf dem Wege von Kernreaktionen künstlich erzeugt. Fast alle in der Natur vorkommenden Elemente sind eine Mischung ihrer verschiedenen Isotope.

Das Wasserstoffisotop, dessen Atombaustein das nackte Elementarteilchen Proton ist, heißt Protium und trägt das Symbol  ${}^1_1\text{H}$ . Es ist das leichteste Wasserstoffisotop, im gewöhnlichen Wasserstoff zu 99,98 Prozent enthalten (in Form von Molekülen). Protium geht durch Abgabe des Elektrons in das positiv geladene Proton über. Es ist dies das einzige Beispiel eines neutronenlosen Atomkerns — eine weitere einmalige Besonderheit des Wasserstoffs! Wird diesem Einsiedler-Proton ein Neutron hinzugefügt, haben wir es mit dem Kern des schweren Wasserstoffisotops zu tun, dem Deuterium ( ${}^2_1\text{H}$  oder D), das in der Natur in 99fach geringeren Mengen vorkommt als das Protium. Nun gibt es noch eine dritte Wasserstoffart: mit zwei Neutronen im Kern. Sie heißt Tritium ( ${}^3_1\text{H}$  oder T). Es wird in der Atmosphäre dank der kosmischen Strahlung, nämlich durch das Einwirken von Neutronen auf Stickstoffkerne, unaufhörlich neu geboren, aber es zerfällt verhältnismäßig rasch unter Aussendung schwacher Betastrahlen. Es ist also radioaktiv und wandelt

sich bei einer Halbwertszeit von 12,26 Jahren in das Heliumisotop  ${}^3_2\text{He}$  um. Der Vorrat an Tritium ist minimal: In der gesamten Lufthülle der Erde sind höchstens 6 g enthalten! Auf je  $10\text{ cm}^3$  Luft entfällt ein einziges Tritiumatom. Ende 1962 gelang es, noch schwerere Wasserstoffisotope künstlich zu gewinnen. Ihre chemische Bezeichnung ist  ${}^4_1\text{H}$  bzw.  ${}^5_1\text{H}$ . Es sind völlig instabile Isotope, die nur eine zehnmilliardstel Sekunde existieren.

Die Tatsache, daß der Wasserstoff Isotope besitzt, verleiht ihm keine Sonderstellung unter den chemischen Elementen. Etwas anderes zeichnet ihn aus. Seine Isotope unterscheiden sich untereinander in merklicher Weise nach ihren Eigenschaften, vor allem nach den physikalischen. So ist zum Beispiel die Masse des Deuteriumatoms doppelt so groß wie die des gewöhnlichen Wasserstoffatoms. Bei anderen Elementen ist dies nicht in dem Maße der Fall, sie gleichen einander fast völlig.

Eine jede Wasserstoffart legt bei chemischen Reaktionen ein unterschiedliches Verhalten an den Tag. So ist z. B. Protium reaktionsfreudiger als Deuterium. Die Erforschung der Wasserstoffisotope brachte die Wissenschaftler zur Entdeckung eines völlig neuen Gebiets in der Chemie, der Isotopenchemie. Die uns geläufige Chemie hat es mit Elementen als Ganzes zu tun, d. h. mit der Gesamtheit ihrer Isotope. Die Isotopenchemie beschäftigt sich mit Einzelisotopen. Sie ist ein zuverlässiger Helfer bei der Aufhellung kompliziertester Vorgänge.

**Chemie = Physik + Mathematik!** Was würde man über Baumeister sagen, die den Bau errichten und erst danach einen Projektanten bitten, doch einmal nachzurechnen, ob auch alles stimme. Ein solches Vorgehen findet man wohl nur bei den Schildbürgern. Doch ist man nicht nach der Aufstellung des Periodensystems der Elemente in ähnlicher Weise vorgegangen? Das große Gebäude war errichtet, ein jedes Element war in der ihm zustehenden Wohnung angesiedelt. Das Periodensystem war bereits seit langem Gebrauchsgegenstand der Chemiker, ehe man exakt erklären konnte, weshalb die Eigenschaften der Elemente periodisch wiederkehren.

Es waren die Physiker, die eine Berechnungsunterlage für die Konstruktionsfestigkeit des großen Gebäudes der chemischen Elemente lieferten. Erstaunliches kam zutage: Der Aufbau des Periodensystems war einwandfrei, er stand im Einklang mit den Gesetzen der „chemischen Mechanik“. Höchste Anerkennung verdiente Mendelejew für seine geniale Intuition, für seine tiefgründigen Kenntnisse chemischer Gesetze. Die Physiker machten sich also daran, den Aufbau des Atoms gründlich zu erforschen.

Das Herz des Atoms ist der Kern. Um den Kern bewegen sich in Kreis- oder Ellipsenbahnen die Elektronen. Ihre Zahl ist gleich der Anzahl positiver Elementarladungen im Kern. Beim Wasserstoff zum Beispiel beträgt sie 1, beim Kalium 19, beim Uran 92... Wie aber kreisen die Elektronen um den Kern? Verlaufen ihre Bahnen in einem unregelmäßigen, wirren Durcheinander wie bei einem Schwarm von Nachtfaltern, die

um das grelle Lampenlicht schwirren? Oder herrscht eine bestimmte Ordnung?

Um dies zu ergründen, mußten die Wissenschaftler zu neuen physikalischen Theorien Zuflucht nehmen und neuartige mathematische Verfahren ausarbeiten. Es ergab sich folgendes: Die Elektronen kreisen um den Kern in ausgezeichneten Bahnen, sogenannten Elektronenschalen, wie die Planeten um die Sonne.

„Wieviel Elektronen enthält eine jede ausgezeichnete Bahn oder Elektronenschale? Treten sie in beliebigen Mengen oder in streng begrenzter Anzahl auf?“ fragten die Chemiker.

„In streng begrenzter Anzahl“, antworteten die Physiker, „denn jede Elektronenschale besitzt eine begrenzte Kapazität, nimmt also nur eine bestimmte Anzahl Elektronen auf.“

Die Physiker haben eigene Symbole für die Elektronenschalen erdacht. Die Schalen werden mit den Buchstaben K, L, M, N, O, P, Q bezeichnet, je nach der Entfernung der Schale vom Kern.

In enger Gemeinschaftsarbeit mit Mathematikern ermittelten die Physiker, wieviel Elektronen sich in einer jeden Schale befinden können.

In der K-Schale kann es nur zwei Elektronen geben. Ein einziges Elektron finden wir in der Elektronenhülle des Wasserstoffatoms, zwei Elektronen besitzt das Heliumatom. Daher enthält die erste Periode in der Mendelejewischen Tabelle auch nur zwei Elemente.

Bedeutend mehr, nämlich 8 Elektronen, vermag die L-Schale aufzunehmen. Ein erstes, dieser Schale zugeordnetes Elektron ist im Lithium-

atom nachweisbar. Im Atom des Neons ist diese Schale dann mit 8 Elektronen vollbesetzt. Die Elemente von Lithium bis Neon (Li, Be, B, C, N, O, F, Ne) bilden die zweite Periode im Periodensystem.

Wieviel Elektronen sind in den weiteren Schalen zu finden? In der M-Schale können bis zu 18 Elektronen enthalten sein, in der N-Schale 32. Für die O-Schale wären 50, für die P-Schale 72 Elektronen die Maximalbesetzung. Weisen zwei verschiedene Elemente eine gleiche Besetzung der äußeren Elektronenschalen auf, dann besitzen sie auch gleichartige Eigenschaften. Das Lithium- und das Natriumatom zum Beispiel enthalten je 1 Elektron in der Außenschale. Daher gehören sie im Periodensystem der gleichen Gruppe an.

Ein Hinweis auf diese Zugehörigkeit zur gleichen Gruppe ist die Besetzung der äußeren Elektronenschale. Die sich auf den äußersten Bahnen befindlichen Elektronen, die Valenzelektronen, bestimmen weitgehend die chemischen Eigenschaften der Elemente. Da sich der gleiche Bau der äußeren Elektronenschale periodisch wiederholt, ergibt sich eine periodisch wiederkehrende Gleichheit in den Eigenschaften der chemischen Elemente, die einer bestimmten Gruppe angehören.

**Noch ein wenig Mathematik** Logik ist allen Dingen immanent. Sogar den unverständlichsten Geschehnissen wohnt zwingende Logik inne. Nicht immer ist sie sofort wahrnehmbar.

Das veranlaßt uns, tiefer in eine Sache einzudringen, zu ihrem Kern vorzustoßen. Auch bei der Betrachtung des Periodensystems stoßen wir auf eine merkwürdige „Unstimmigkeit“. Lediglich in den ersten beiden Perioden der Mendelejewischen Tabelle ist eine Gleichheit festzustellen: Jede Periode enthält hier genau so viel Elemente, wie Elektronen als Höchstzahl in der entsprechenden Außenelektronenschale nachzuweisen sind. Innerhalb der ersten Periode ist in den Atomen des Wasserstoffs und Heliums nur die K-Schale besetzt. Sie kann höchstens zwei Elektronen aufnehmen. Daher enthält die erste Periode lediglich zwei Elemente. In den Atomen der Elemente, die zur zweiten Periode gehören, also von Lithium bis Neon, kommt es zum völligen Ausbau von Achter-Elektronenschalen, oder kurz Achterschalen. Daher haben wir es in der zweiten Periode mit acht Elementen zu tun.

Doch von nun an gestaltet sich das Bild komplizierter.

Wieviel chemische Elemente sind in den folgenden Perioden untergebracht? Die dritte Periode beherbergt 8, die vierte 18, die fünfte 18, die sechste 32, die siebente (sie ist noch nicht abgeschlossen) muß gleichfalls 32 in sich einschließen. Und wieviel Elektronen können bzw. müssen die entsprechenden Schalen enthalten? Hier stößt man auf ganz andere Werte: 18, 32, 50, 72... War es nicht voreilig gewesen zu erklären, die Physiker hätten bei ihren Ermittlungen keinerlei „Defekte“ im Aufbau des großen Gebäudes des Periodensystems entdeckt?

Vortrefflich wäre es, käme es bei den Bewohnern des großen Hauses in einem jeden Stockwerk zum vollständigen Ausbau einer bestimmten Elektronenschale — vom Alkalimetall bis zum Edelgas. Das Fassungsvermögen der Periode wäre dann gleich der Kapazität der Elektronenschale. Wir sind genötigt, in unserem Satz den Konjunktiv anzuwenden... In Wirklichkeit stimmt die Rechnung nicht. Die Dinge sehen anders aus. In der dritten Periode gibt es weniger Elemente, als die dritte Schale, die M-Schale, Elektronen aufzunehmen vermag. Und so weiter.

Wird uns diese Unstimmigkeit verwirren? Doch gerade dank dieser zunächst unerklärbaren „Nichtübereinstimmung“ vermochte man das Wesen des Periodensystems zu erkennen.

Argon beschließt die dritte Periode. Doch die dritte, die M-Schale, ist in seinem Atom noch nicht ausgebaut. Sie könnte 18 Elektronen aufnehmen, doch zunächst sind nur 8 nachzuweisen. Dem Argon folgt das Kalium. Es ist bereits ein Element der vierten Periode, also der erste Bewohner des dritten Stockwerks in unserem großen Gebäude. Doch anstatt das dazugekommene Elektron in der dritten Schale unterzubringen, zieht es das Kalium vor, es in die vierte, in die N-Schale, zu überführen. Spiel des Zufalls? Nein. Dieser Erscheinung liegt eine strenge, von den Physikern längst erkannte Gesetzmäßigkeit zugrunde. Atome mit einer über 8 hinausgehenden Anzahl von Elektronen in der Außenschale sind ein Ding der Unmöglichkeit. Die Achter-Elektronenbesetzung stellt einen äußerst festen Aufbau dar.

Beim Kalzium, dem unmittelbaren Nachbarn des Kaliums, scheint es dem Elektron gleichfalls „vorteilhafter“ zu sein, sich in der Außenschale niederzulassen. Dabei ist das Energiepotential des Kalziumatoms niedriger als bei irgendeiner anderen Elektronenverteilung. Doch schon beim Skandium, das dem Kalzium folgt, verschwindet dieses Bestreben, den Ausbau der Außenschale fortzusetzen. Ein Elektron geht in die angrenzende, kernnähere, nicht bis zur vollen Besetzung ausgebaute M-Schale ein. Da es ja insgesamt 18 Plätze gibt, bauen in der Skandium-Zink-Reihe die Atome allmählich die M-Schale aus. Bei Kupfer und Zink ist diese schließlich voll besetzt. Nun erfolgt die Aufnahme weiterer Elektronen durch die N-Schale, die beim Edelgas Krypton zunächst mit 8 Elektronen als äußere Schale voll besetzt ist. Beim Rubidium beginnt deshalb der Aufbau der fünften Schale, und zwar ehe die vierte bis zur vollen Besetzung ausgebaut ist.

Eine solche stufenweise Besetzung der Elektroschalen seitens der Bewohner dieses großen Gebäudes, von der vierten Periode an, ist eine strenge Regel für ihr Verhalten. Sie ist oberstes Gesetz in der ehernen Hausordnung, die im großen Gebäude der chemischen Elemente herrscht. Auf diese Weise kommt es auch zu Haupt- und Nebengruppen im Periodensystem der Elemente. Chemische Elemente, die sich innerhalb einer Periode bei unveränderten inneren Schalen nur durch die Elektronenzahl in der äußeren Schale unterscheiden, gehören zu den Hauptgruppen, andere, die sich innerhalb einer Periode

in der Elektronenanordnung der zweitäußeren Schale unterscheiden, gehören Nebengruppen an.

Wir können auch feststellen, daß die vierte, die N-Schale, nicht sofort aufgebaut wird. Ganz im Gegenteil. Ihre Besetzung erstreckt sich über drei Stockwerke hinweg. Das erste ihr zugeordnete Elektron ist beim Kalium nachzuweisen, das die „Wohnung Nummer 19“ einnimmt. Das 32. Elektron besetzt die N-Schale erst beim Ytterbium, das in der Tabelle Vertreter der sechsten Periode ist. 70 ist seine Ordnungszahl.

Wir sehen also: Die Unstimmigkeit hat zu etwas Positivem geführt. Um ihre Aufklärung bemüht, gelang es Chemikern und Physikern, den Aufbau des Periodensystems der Elemente zu erforschen.

### **Wie etwas Unerwartetes auf die Chemiker zukam**

Das Buch „Der Krieg der Welten“ ist ein Produkt der dichterischen Phantasie von Herbert Wells. Sein Inhalt: Invasion der Erde durch Marsbewohner. Nachdem der letzte Marsbewohner auf der Erde sein Leben verloren hat, kann das irdische Leben seinen gewohnten Verlauf nehmen. Die nach den schrecklichen Erlebnissen wieder zur Besinnung gekommenen Wissenschaftler stürzen sich Hals über Kopf auf die kläglichen Überreste, die nach dem Eindringen der unerwarteten Gäste vorzufinden waren. Zum Objekt der Untersuchungen wurde vor allem jener geheimnisvolle schwarze Staub gemacht, der den Marsbewohnern zur Ausrottung irdischen Lebens gedient hatte.

Nach einigen mißlungenen Versuchen, die in schrecklichen Explosionen endeten, gelang es schließlich festzustellen: Die unheilbringende Substanz war eine Verbindung des Edelgases Argon mit einem auf der Erde noch unbekanntem Element.

Doch zu jener Stunde, als der große Utopist dabei war, die letzten Zeilen seines Buches zu Papier zu bringen, waren sich die Chemiker bereits dessen völlig sicher, daß Argon unter keinen Umständen imstande ist, eine Verbindung mit irgendeinem anderen chemischen Element einzugehen. Diese Überzeugung beruhte auf Ergebnissen zahlreicher Experimente.

Man erfand für Argon — das griechische Wort „argos“ bedeutet „tatenlos“ oder „träge“ — und für die anderen zu der gleichen Gruppe chemischer Faulenzer gehörenden Elemente, zu denen auch Helium, Neon, Krypton, Xenon und Radon zählen, die Bezeichnung „Edelgase“, weil sie sich, gleich den Edelmetallen, nur sehr selten chemisch verändern. Sie werden auch inerte Gase genannt, weil sie außerordentlich reaktionsträge sind.

Im Periodensystem der Elemente bilden sie die sogenannte Nullgruppe, weil die Wertigkeit dieser Elemente gleich Null ist. Die Atome von Edelgasen vermögen Elektronen weder freizugeben noch aufzunehmen.

Wieviel Versuche hatten die Chemiker unternommen, um auf sie einzuwirken! Sie erhitzten sie auf Temperaturen, bei denen sich selbst die widerstandsfähigsten Metalle in brodelnde feurige Flüssigkeiten verwandeln. Sie kühlten die

Edelgase so weit ab, daß sie zu Eis wurden. Man unterwarf sie stärksten elektrischen Entladungen und den aggressivsten chemischen Reagenzien. Alles vergebens!

Selbst dort, wo andere Elemente längst klein beigegeben, längst sich bereit gefunden hätten, Bindungspartner zu werden, blieben die Edelgase teilnahmslos.

Auch Sir William Crookes, der das Helium in Mineralien nachgewiesen hatte, hätte viel darum gegeben, wenn er das Helium hätte veranlassen können, sich gleich den anderen Elementen des Periodensystems zu gebärden: mit Wasserstoff, Sauerstoff oder Schwefel zu reagieren.

Doch Helium, der Anführer der Gruppe Edelgase, machte die Hoffnungen zunichte. Kurz vor der Jahrhundertwende wurden die Elemente Neon und Argon, Krypton und Xenon entdeckt. Radon beschloß im Jahre 1900 die Gruppe der chemischen Nichtstuer. Natürlich waren es Elemente, von denen jedes eine eigene atomare Struktur aufwies. Doch die Feder sträubt sich, den Worten „Element Argon“ das Adjektiv „chemisches“ hinzuzufügen. Sie reagierte chemisch überhaupt nicht.

Im Jahre 1900 schlugen D. I. Mendelejew und W. Ramsay vor, die Edelgase ins Randgebiet des Periodensystems aufzunehmen, und zwar als Null-Gruppe. In den Lehrbüchern der Chemie stand fortan zu lesen, unter den chemischen Grundstoffen gebe es welche, die unter keinen Umständen Bindungspartner sein könnten. Sechs Elemente schienen sich also dem Wirkungsbereich der Chemie zu entziehen.

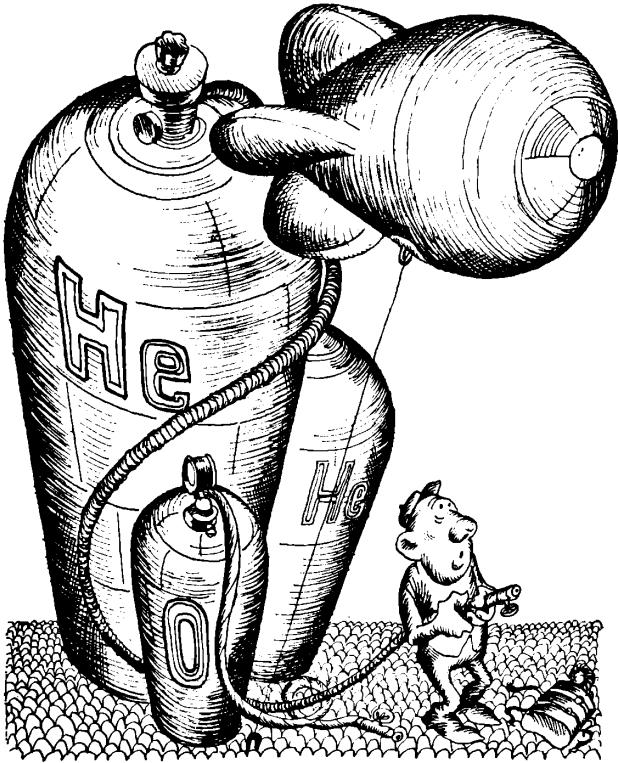
**Enträtselung, die ein schwacher Trost war** Selbst Dmitri Iwanowitsch Mendelejew wußte mit den Edelgasen nichts rechtes anzufangen. Zunächst war ihm ein rettender Einfall gekommen: Argon sei kein neues Element, da es ja im Periodensystem keinen Platz finde, sondern eine eigenartige Verbindung des Stickstoffs, deren Molekül sich aus drei Atomen zusammensetze, also  $N_3$ . Neben dem Sauerstoffmolekül  $O_2$  gebe es ja auch das Ozonmolekül  $O_3$ .

Doch schließlich ließen Tatsachen den Gelehrten seinen Irrtum einsehen und Ramsay recht geben. Heute wird in allen Lehrbüchern der Welt der englische Forscher als der Erstentdecker der Edelgase bezeichnet, und niemandem fällt es ein, ihm diesen Titel streitig zu machen.

...Zwei Jahrzehnte lang schmachtete Nikolai Morosow (1854—1946), Mitglied der Gruppe „Narodnaja Wolja“, in den Kasematten der Schlüsselburger Festung. Die Mauern des steinernen Grabes hatten seinen Drang nach wissenschaftlicher Betätigung nicht zermalmen können. (Unter der Sowjetmacht wurde Morosow ein Gelehrter von Weltruf.) In hartnäckiger Arbeit gebar er neue Ideen. Er stellte viele Hypothesen auf, eine kühner und origineller als die andere. In der Festung beendete er eine Arbeit über das Periodensystem der Elemente. Er sagte das Bestehen von Elementen voraus, die chemisch inaktiv sein müßten.

Als Morosow freikam, waren die Edelgase bereits entdeckt. Sie hatten den ihnen gebührenden Platz im Periodensystem in Beschlag genommen...

Es wird berichtet, kurz vor Mendelejews Tod sei Morosow zu einem Meinungsaustausch zu Dmitri Iwanowitsch gekommen. Der genaue Inhalt des



langen Gesprächs ist uns leider nicht bekannt, und es wird wohl auch in Zukunft ein Geheimnis bleiben. Vielleicht sprachen sie auch über

das seltsame Verhalten der Edelgase, über die Rätsel, die sie den Forschern zu lösen aufgaben. Mendelejew war es nicht mehr vergönnt, den Tag zu erleben, an dem die Reaktionsträgheit der Edelgase enträtselt wurde. Dieses Rätsel bestand in folgendem:

Physiker, die schon so oft den Chemikern zur Hilfe gekommen waren, ja auch heute deren treue Helfer sind, stellten fest: eine Achter-Außenelektronenschale ist äußerst stabil. Sie verkörpert gewissermaßen das Festigkeitsideal einer Elektronenschale. Daher fühlt sie sich keineswegs veranlaßt, Elektronen abzugeben oder welche aufzunehmen.

Acht Elektronen in der Außenschale — das ist des Rätsels Lösung! Das ist die Ursache für das „edle“ Benehmen der reaktionsträgen Gase. Beim Heliumatom sind es nur zwei Elektronen in der Außenschale. Diese Zweier-Elektronenschale steht in bezug auf ihre „Festigkeit“ der Achter-Elektronenschale der anderen chemischen Faulenzer nicht nach.

Noch eines wurde den Chemikern klar: Der Anbau der Null-Gruppe an das Periodensystem der Elemente erfolgte nicht willkürlich. Ohne diesen Anbau wäre das Gebäude des Periodensystems unvollendet geblieben. Denn ein Edelgas beschließt eine jede Periode. Es kommt nach ihnen, also beim folgenden Element, zur Besetzung der nächsten Elektronenschale. Im großen Gebäude des Periodensystems wird also ein neues Stockwerk errichtet.

Diese Erklärung war ziemlich einfach. Es zeigte sich außerdem, daß Edelgase, ungeachtet ihres

vornehmen Titels, eine Befähigung zur praktischen Tätigkeit bekunden. Helium füllte bald Luftballons und Luftschiffe, es half Tauchern, den Kampf gegen die Caissonkrankheit aufzunehmen. Argon- und Neon-Leuchtreklamen lieferten ein buntes Gewand für die nächtlichen Straßen der Großstädte.

Würde es den Chemikern nicht doch noch gelingen, auch Verbindungen des Xenons oder des Heliums mit anderen Elementen herzustellen? Sollten die Chemiker vielleicht nicht alle Hebel in Bewegung gesetzt haben, um den Edelgasen die Rolle von Bindungspartnern aufzuzwingen?

**Auf der Suche nach einer „tollen“ Idee oder wie die Edelgase ihre Reaktionsträgheit aufgaben**  
Zwei Parallele kreuzen sich nie!“ behauptete die Geometrie, Euklid, den größten Mathematiker des Altertums, zitierend.

„Sie müssen sich kreuzen!“ erklärte Mitte des vorigen Jahrhunderts der russische Mathematiker Nikolai Lobatschewski, der der Mathematik ein neues Gebiet erschloß, das große Bedeutung erlangte: die nichteuklidische Geometrie. Viele Vertreter der Wissenschaft lehnten damals Lobatschewskis Lehre ab. Doch ohne sie gäbe es heute weder die Relativitätstheorie noch die kühnen Vorstellungen über Gesetze, die den Bau des Weltalls regieren...

Aus der Feder Alexei Tolstois stammt der Roman „Geheimnisvolle Strahlen“.

„Großartige Phantastik“, sagten dazu die Literaturkritiker der Welt.

„Phantastik, die nie Wirklichkeit werden kann“, meinten viele Wissenschaftler.

Seit dem Tode Tolstojs waren kaum fünfzehn Jahre verstrichen, da erfuhr die Welt, daß es Wissenschaftlern gelungen war, mit Hilfe des Rubinkristalls einen Lichtstrahl von bislang



ungekannter Intensität und Stärke zu erzeugen. Der Ausdruck „Laser“ gehört seitdem zum Wortschatz nicht nur von Fachkundigen.

Enthusiasten der Chemie glaubten fest an die Möglichkeit, der unerhörten Sprödigkeit der Edelgase Herr zu werden. So findet man in wissenschaftlichen Zeitschriften aus den zwanziger, dreißiger und vierziger Jahren eine ganze Reihe interessanter Beiträge und Mitteilungen, aus denen hervorgeht, daß die Chemiker den Wunsch

nicht aufgegeben hatten, die Edelgase in den Bereich ihrer Tätigkeit einzubeziehen. Darin sind ungewöhnliche Formeln enthalten. Es handelt sich um erstaunliche Stoffe: um Verbindungen des Heliums mit Quecksilber, Palladium und Platin, um Verbindungen mit anderen Metallen. Allerdings waren das nicht jene chemischen Verbindungen, die man gewinnen wollte. Die Zweier-Elektronenschale des Heliums blieb nach wie vor eine Barriere. Die Verbindungen selber konnten nur bei äußerst niedrigen Temperaturen existieren: im Bereich des absoluten Nullpunkts.

Doch blättern wir in jenen alten Chemiezeitschriften weiter. Wir stoßen auf eine andere bemerkenswerte Mitteilung: Der sowjetische Chemiker Nikitin stellte weit weniger märchenhafte Verbindungen des Xenons und des Radons mit Wasser, Phenol und einigen anderen organischen Flüssigkeiten her (chemische Formel:  $\text{Xe} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ;  $\text{Rn} \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). Unter normalen Verhältnissen sind sie stabil, die Herstellung ist nicht besonders schwierig, doch...

Doch nach wie vor spielt die chemische Bindung darin keine Rolle. Die Atome des Xenons und Radons wahren die Abgeschlossenheit ihrer äußeren Elektronenschale. Das Elektronenoktett blieb unangetastet. Seit der Entdeckung der Edelgase war über ein halbes Jahrhundert verstrichen, doch es blieb alles beim alten...

Das zwanzigste Jahrhundert, in der Geschichte der Menschheit wohl das stürmischste und das denkwürdigste, nähert sich seinem Ende. Gelehrte werden zweifellos eine Bilanz über die in

dieser Zeitspanne erklimmenen Höhen wissenschaftlichen Forschens aufstellen. Es wird eine endlose Liste sein, in der in großen Lettern, weithin wahrnehmbar, die Eintragung prangen wird: „Gewinnung chemischer Verbindungen mit Edelgasen“. Und ein Kommentator wird wohl begeistert feststellen: „Eine der sensationellsten Entdeckungen.“

Sensationell? Sagen wir lieber — eine romantische Geschichte, oder richtiger, eine Geschichte darüber, auf welcher einfachen Art bisweilen ein Problem zu lösen ist, dessen „Unlösbarkeit“ so manchem Forscher nicht wenig Kopfzerbrechen verursacht hatte...

In unseren Tagen gleicht die Chemie einem gewaltigen Baum mit mächtiger, in steter Entfaltung begriffener Krone. Daß ein Einzelner einen ganzen Zweig dieses Baumes erforschte, ist ein Ding der Unmöglichkeit. Häufig ist der Wissenschaftler gezwungen, jahrelange Studien zu betreiben, um auch nur eine winzige Abzweigung, eine winzige Knospe, einen kaum wahrnehmbaren Sproß zu erforschen. Erst Tausende solcher Forschungen vermögen einige Kenntnisse über diesen oder jenen Zweig des Baumes zu sichern.

Den winzigen Zweig dieses Baumes, den der kanadische Chemiker Neill Bartlett zum Gegenstand seiner Forschungen machte, stellte eine Verbindung dar, der die Chemie die Bezeichnung Platinhexafluorid gab, kurz  $PtF_6$ . Das Interesse des Forschers an diesem Stoff war nicht von ungefähr. Die Verbindungen des Fluors mit Schwermetallen ergeben äußerst interessante, für Wissenschaft und Praxis sehr nützliche Substan-

zen, zum Beispiel zur Gewinnung der Uranisotope Uran-235 und Uran-238 für die Bedürfnisse der Kernenergetik. Ein Uranisotop vom andern abzusondern, ist ein recht kompliziertes Vorhaben. Jedoch mit Hilfe des Uranhexafluorids  $\text{UF}_6$  ist es zu bewerkstelligen. Außerdem sind Fluorverbindungen mit Schwermetallen äußerst aktive chemische Stoffe.

Bartlett ließ  $\text{PtF}_6$  auf Sauerstoff einwirken und gewann eine merkwürdige Verbindung. Der Sauerstoff figurierte darin als positiv geladenes Molekül  $\text{O}_2^+$ , als ein Molekül, das ein Elektron eingebüßt hatte. Das war erstaunlich, denn aus dem Sauerstoffmolekül ein Elektron abzutrennen, ist äußerst schwierig. Es erfordert einen außerordentlich großen Energieaufwand. Das Hexafluorplatin erwies sich dazu imstande.

Bartlett beschloß, das Platinhexafluorid zu zwingen, aus dem Xenonatom ein Elektron zu entwenden, um auf diese Weise eine echte Xenonverbindung herzustellen. Die Abtrennung eines Elektrons aus der Außenschale der Atome reaktionsträger Gase erfordert ja ebenfalls große Energiemengen. Hier tritt jedoch folgende Gesetzmäßigkeit zutage: Je schwerer das Edelgas ist, um so geringer ist der Energieaufwand. Dennoch erwies es sich als leichter, das Xenonatom zum Verzicht auf ein Elektron zu bewegen, als ein Elektron aus dem Sauerstoffmolekül abzutrennen.

Bartlett hatte Erfolg. 1962 wurde zum Geburtsjahr der ersten chemischen Verbindung eines reaktionsträgen Gases. Ihr chemisches Zeichen:  $\text{XePtF}_6$ . Es ist eine in befriedigendem Maße

stabile Verbindung in Form roter Kristalle, die ähnlich wie Salze eine Ionengitterstruktur haben.

Aus dem Keim sproß ein mächtiger Trieb hervor: Kaum anderthalb Jahre später waren bereits über 20 Edelgasverbindungen bekannt. Es entstand eine neue Richtung in der Chemie — die Chemie der Edelgase. Gestern noch beurteilte mancher seriöse Wissenschaftler die Sache voll Skepsis. Heute verfügen wir bereits über 50 chemische Verbindungen mit Edelgasen. Vorwiegend sind es Verbindungen der Xenon-, Krypton- und Radonfluoride. Erstaunlich groß ist der chemische Reichtum des Xenons. Es gibt allein vier Fluoride:  $\text{XeF}_2$ ;  $\text{XeF}_4$ ;  $\text{XeF}_6$  und  $\text{XeF}_8$ . Nicht jedes „gewöhnliche“ Element kann sich so zahlreicher Wertigkeitsstufen rühmen.

Die Unantastbarkeit der Außenelektronenschale bei Edelgasen war eben nur ein Märchen.

Wie die Moleküle in den verschiedenen Verbindungen der Edelgase aufgebaut sind, ist noch nicht restlos geklärt. Doch eines ist sicher: Die Atome können über eine weit größere Vielfalt an Wertigkeiten verfügen, als man bislang der Ansicht war.

Die Vorstellungen von der Wertigkeit stützten sich bisher auf die Anerkennung besonderer Standhaftigkeit des Elektronenoktetts. Jetzt sind die Wissenschaftler mit folgender Fragestellung beschäftigt: Herrscht in diesen Theorien restlose Klarheit? Werden wir nicht bald von der Erkenntnis neuer Gesetzmäßigkeiten auf diesem Gebiet überrascht?

## **Wieder eine Unstimmigkeit! Wo ist der Ausweg!**

...Es kam einmal in ein Forschungsinstitut ein in Gedanken versunkener Mann, eine dicke Mappe in der Hand. Er breitete vor den Fachkundigen seine Aufzeichnungen aus und sagte dann in entschiedenem Ton, der keinerlei Widerrede zu dulden schien:

„Die Mendelejewsche Tabelle kann nur sieben Elementengruppen enthalten, nicht weniger und nicht mehr!“

„Warum denn?“ staunten die Wissenschaftler, obzwar sie bereits manch Erfahrung mit solchen „Entdeckungen“ hatten.

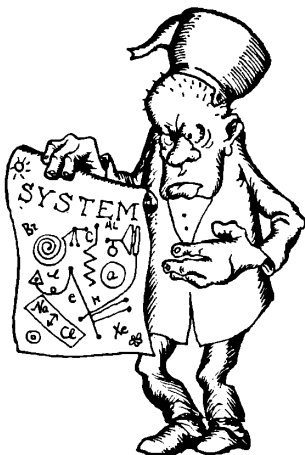
„Die Sache ist ganz einfach: In der Zahl ‚sieben‘ ist ein tiefer Sinn verborgen. Sieben Farben des Regenbogens, sieben Noten in der Tonleiter...“ Die Fachleute waren nun der Ansicht, daß sie es mit einem Menschen zu tun hatten, der nicht ganz bei Sinnen war, und taten so, als ob sie die Mitteilung des Reformisten für einen Scherz hielten.

„Vergessen Sie nicht, daß der Kopf des Menschen sieben Öffnungen hat“, fügte der eine lachend hinzu.

„Und das Buch sieben Siegel“, meinte ein anderer.

Die Geschichte des Periodensystems der Elemente kennt unzählige Vorschläge, es umzubauen. Im Jahre 1969 feierte die Mendelejewsche Entdeckung ihren hundertsten Geburtstag. Der Zufall wollte es, daß am Vorabend des bedeutenden Datums sogar seriösen Chemikern der Gedanke kam, im Periodensystem der Elemente müßte manches geändert werden...

Es gab Zeiten, da sich die Wissenschaftler davor hüteten, die Elemente der Nullgruppe als chemische Elemente zu betrachten. Heute hat sich das geändert. Heute scheint es unangebracht zu sein, die Elemente der Nullgruppe als reaktions-träger zu bezeichnen. Allmonatlich erscheinen



in den Zeitschriften für Chemie verschiedene Artikel zur Chemie der Elemente der nullten Gruppe. Aus verschiedenen Ländern kommen Meldungen über die gelungene Synthese neuartiger chemischer Verbindungen des Kryptons, Xenons, Radons... Zwei-, vier-, sechswertiges Xenon, vierwertiges Krypton — noch vor einem Jahrzehnt wäre der als „verrückt“ bezeichnet worden, der diese Begriffe ernsthaft verwendet

hätte. Heute sind sie zu Alltäglichkeiten im Reich der Chemie geworden.

„Wie ein Alp lasten die Xenonfluoride auf der Mendelejewischen Tabelle“, meinte ein bekannter Forscher.

War das nicht übertrieben? Zugegeben. Doch der „Alp“ mußte verschwinden. Doch wie? Chemiker schlugen vor, den Begriff „nullte Gruppe“ aufzugeben, die einst reaktionsträgen Gase in die achte Gruppe zu versetzen, denn ihre Außenschale ist ja mit 8 Elektronen besetzt. Doch die achte Gruppe war bereits bestimmt. Kein Geringerer als Mendelejew selbst hatte sie in die Tabelle einmontiert. Ihr gehörten neun Elemente an: Eisen, Kobalt, Nickel, Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium, Iridium und Platin. Sie bildeten Triaden von Übergangselementen.

Was sollte nun mit dieser Gruppe geschehen? Kurz und gut, die Chemiker standen wieder einmal vor einem Rätsel. Es schien tatsächlich so, als ob die festgelegten Umriss des Periodensystems der Elemente eine Änderung erfahren müßten.

Doch einer Ummodellierung ihrer Umriss stand die „alte“ achte Gruppe im Wege. Wohin mit ihr? Darüber soll noch die Rede sein, nur ein wenig Geduld.

**Das „Alleszerfressende“** Diesen Namen gab ihm der bekannte sowjetische Forscher Alexander Fersman. Denn auf Erden gibt es wohl keinen sich wilder gebärenden, in der Natur keinen chemisch aktiveren, reaktionsfähigeren che-

mischen Grundstoff als das Objekt, über das nun zu sprechen sein wird. Er kommt in der Natur nicht in freier, sondern nur in chemisch gebundener Form vor.

Sein Name ist Fluor. Das griechische Wort „phtorios“ bedeutet „der Zerstörende“. Es kennzeichnet treffend die Haupteigenschaft dieses Vertreters der siebten Gruppe in der Mendelejewischen Tabelle.

Einst ließ jemand die Bemerkung fallen: „Der Weg zum freien Fluor führte über menschliche Tragödien hinweg...“ Das ist keine leere Phrase. Einhundertundvier chemische Elemente haben die Menschen in der Natur entdeckt bzw. künstlich gewonnen. Auf der Suche nach neuen Elementen hatten die Forscher ungeheure Schwierigkeiten zu überwinden. Sie erlebten zahlreiche Enttäuschungen. Bisweilen wurden sie das Opfer kurioser Irrtümer. Die Verfolgung der Spuren unbekannter Elemente raubte ihnen viel Kraft. Fluor, chemisch ungebundenes Fluor, beraubte manchen seines Lebens.

Lang ist die Liste mit den Namen jener, denen der Versuch, chemisch ungebundenes Fluor zu gewinnen, das Leben oder die Gesundheit kostete. Opfer des „Alleszerfressenden“ waren der französische Chemiker Jerome Nicklés, das Mitglied der Irischen Akademie der Wissenschaften Thomas Knox, der belgische Forscher P. Louyet. An Fluorvergiftungen litten der berühmte französische Forscher Gay-Lussac, der französische Chemiker Thénard, der englische Chemiker Sir Humphrey Davy und zweifellos auch viele andere, an denen sich das Fluor erbarmungslos

für den dreisten Versuch rächte, es aus seinen Verbindungen zu lösen.

Als der Forscher Henri Moissan am 26. Juni 1886 vor der Pariser Akademie der Wissenschaften darüber Bericht erstattete, daß es ihm gelungen war, chemisch ungebundenes Fluor zu gewinnen, bedeckte eine schwarze Binde sein Auge...

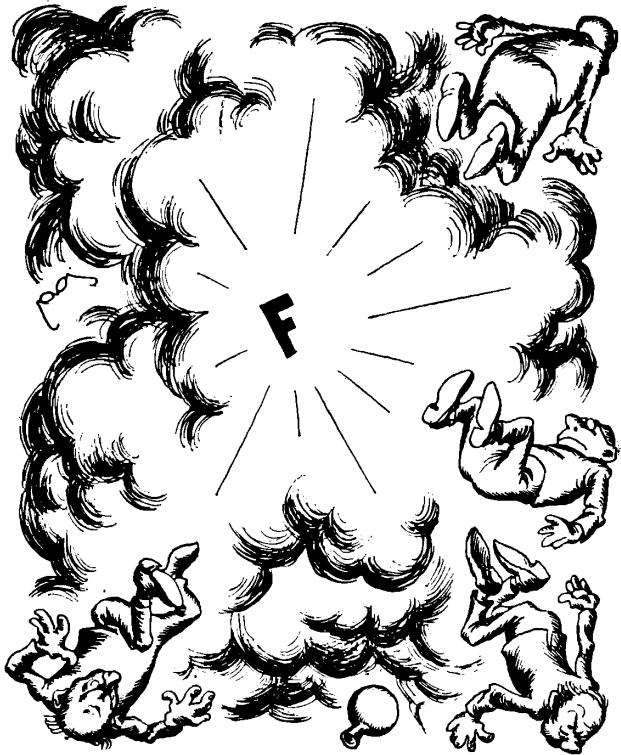
Moissan mußte es als erster am eigenen Leibe spüren, welch ungestümer Bursche Fluor in freiem Zustand ist. Mancher Chemiker hatte einfach Angst, mit freiem Fluor umzugehen. Denn Fluor verbrennt die Haut. Selbst Gummi kann sich unter Einwirkung von Fluor entzünden. Eingeatmetes Fluor führt zu schweren Entzündungen, ja zum Tode. Zwar ist Fluor in sehr geringen Mengen für Mensch und Tier lebensnotwendig, aber in größerer Dosis und in chemisch freiem Zustand ist es äußerst gefährlich.

Die Wissenschaftler des zwanzigsten Jahrhunderts fanden schließlich Mittel und Wege, den wilden Gesellen zu zähmen, ihn in den Dienst des Menschen zu zwingen. Die Chemie dieses chemischen Elementes wurde zu einem großen selbständigen Gebiet der anorganischen Chemie.

Der schreckenerregende „Riese aus der Flasche“ war also gezähmt. Und die Bemühungen der Forscher machten sich hundertfach bezahlt.

In vielen Kühlschrantypen ist „Freon 12“ oder „Frigen 12“ das Kühlmittel (die Chemiker bezeichnen es mit einem verwickelteren Namen: Difluordichlormethan). Als fluorhaltiges Kühlmittel-

tel wirkt es, indem es im Oberteil des Kühl-  
schrankes verdunstet und dabei dem Innenraum  
Wärme entzieht.



Es erwies sich, daß der „Alleszerfressende“ zur  
Bildung von Verbindungen befähigt ist, gegen  
die niemand und nichts ankommen kann. Sie

brennen nicht und unterliegen nicht der Fäulnis. Sie sind weder in Basen noch in Säuren löslich. Selbst chemisch ungebundenes Fluor ist nicht imstande, diese Verbindungen zu zerstören. Sie schrecken nicht antarktische Kälte. Nur in geringem Maße reagieren sie auf jähen Temperaturwechsel. Die einen Verbindungen sind Flüssigkeiten oder zähe Öle, die anderen Festkörper. Es sind Fluorkohlenstoffe, Verbindungen, die die Natur nicht zu erschaffen vermochte. Sie sind das Werk des Menschen. Dieses Kohlenstoff-Fluor-Bündnis ist äußerst nutzbringend. Fluorkohlenstoffe verwendet man beispielsweise als Kühlflüssigkeiten in Motoren, zum Imprägnieren besonderer Gewebe, als „ewige“ Schmiermittel, als Isolierstoffe, als Werkstoffe für verschiedene Apparaturen in der chemischen Industrie. Die Fluorverbindung Polytetrafluoräthylen ist zum Beispiel unter der Bezeichnung Teflon, Fluon oder Heydeflon bekannt geworden. Man nennt sie wegen ihrer Beständigkeit „organisches Platin“. In Backformen und Töpfen, die mit dieser wachsartigen Masse überzogen sind, setzt sich nichts an. Wegen ihrer chemischen Widerstandsfähigkeit wird sie als Belag für schmierungsfreie Maschinenlager, für Schlitten- und Flugzeugkufen, zum Beschichten von Walzen und Trommeln, zur Herstellung von hitze- und säurefesten Geweben und für viele ähnliche Zwecke verwendet. Flüssiges Fluor wird in Raketentriebwerken eingesetzt.

Auf der Suche nach Wegen zur Bändigung und Nutzung der Kernenergie stand vor den Forschern die Aufgabe, die Uranisotope U-235 und

U-238 zu trennen. Es gelang dies, wie bereits gesagt, mit Hilfe einer äußerst interessanten Verbindung: mit Uranhexafluorid.

Fluor half den Chemikern, den Beweis dafür zu erbringen, daß die Edelgase nicht so unverbesserliche chemische Faulenzer sind, wie man das jahrzehntelang geglaubt hatte. Die erstmalig zustandegekommene Verbindung eines Edelgases, die des Xenons, war eine Fluorverbindung.

**Wie Hennig Brand den „Stein der Weisen“ entdeckte** Es geschah im siebzehnten Jahrhundert in der Stadt Hamburg. Hier lebte ein Kaufmann namens Hennig Brand. Ob er ein gewiefter Geschäftemacher war, wissen wir nicht. Auch ist uns unbekannt, wieweit seine Vorstellungen von der Chemie reichten. In seinen Mußestunden beschäftigte er sich mit alchimistischen Experimenten, bis er schließlich sich immer mehr der Suche nach dem Zauberkraut der ewigen Jugend und der Goldherstellung verschrieb.

Der gute Mann konnte den Verlockungen nicht widerstehen, im Handumdrehen auf „chemischem Wege“ steinreich zu werden. Nur eine Kleinigkeit mußte ihm gelingen: Er mußte den vielgepriesenen „Stein der Weisen“ finden, der nach der Glaubenslehre der Alchimisten selbst Straßenpflaster in pures Gold zu verwandeln vermochte.

...Es vergingen Jahre. In der Kaufmannsgilde wurde der Name Brand immer seltener erwähnt. Geschah es, schüttelte man mitleidvoll die Köpfe. Brand hatte es nur noch mit Mineralien

und vielen seltsamen Stoffen zu tun. Er brachte sie zur Auflösung, er rührte und mischte sie, siebte sie durch und erhitzte sie bis zur Rotglut. Säuren verursachten an seinen Händen Brandwunden, die nie mehr heilten.

Eines schönen Abends im Jahre 1669 schien das Glück ins Haus des ehemaligen Kaufmanns gekommen zu sein. Er bemerkte einen schneeweißen Niederschlag auf dem Boden des Kolbens. Die Substanz brannte schnell ab, stickigen Qualm erzeugend. Das Erstaunlichste war: Sie leuchtete in der Finsternis. Das kalte Licht war so grell, daß Brand bei diesem Licht sogar die vergilbten Traktate der Alchimisten zu entziffern vermochte, die seine Lektüre waren.

...Dem Zufall war die Entdeckung eines neuen chemischen Elementes, des Phosphors, zu verdanken. Der griechische Name bedeutet „der Lichtträger“.

Phosphor ist Hauptbestandteil in verschiedenen leuchtenden Mischungen. Vielleicht erinnern Sie sich daran, daß Conan Doyles Hund von Baskerville, nach dem Sherlock Holmes so lange fahndete, eine so schreckliche Erscheinung war. Seine Schnauze leuchtete bläulich. Aus den Augen traten Funken heraus, und der Kopf schien von flimmerndem Licht überzogen zu sein. Er war mit Phosphor imprägniert. Diese phantastische Erscheinung ist jedoch sehr zweifelhaft. Phosphorteilchen, in einer Flüssigkeit gelöst, würden als feinstes Pulver ausgeschieden sein, wenn die Flüssigkeit verdunstet. Aber der feine, weiße Phosphor würde sich an der Luft sofort entzünden.

Phosphor zeichnet sich neben seiner Leuchteigenschaft durch eine Anzahl anderer Eigenschaften aus. Der niederländische Arzt Jakob Moleschott (19. Jh.) meinte einst, ohne Phosphor gäbe es keine Gedanken. Er hatte damit recht, denn im Gehirngewebe sind eine ganze Menge komplizierter Phosphorverbindungen enthalten.

Ohne Phosphor gäbe es auch kein Leben. Ohne dieses chemische Element könnten keine Atmungsprozesse vor sich gehen, die Muskeln wären außerstande, Energievorräte anzusammeln. Phosphor ist auch einer der wichtigsten Bausteine im Organismus eines Lebewesens. In der Tat: Die Hauptkomponente im Knochensystem ist phosphorsaures Kalzium. Dieser „Lichtträger“ erweist sich in der Tat als ein wahrer „Stein der Weisen“.

**Die Luft atmet sich leicht oder ein Beispiel dafür, wie Quantität in Qualität umschlägt** Nach einem Gewitter läßt es sich leicht atmen. Frische scheint die Luft durchtränkt zu haben.

Das ist keine poetische Redensart, denn bei elektrischen Entladungen kommt es in der Atmosphäre zur Bildung von Ozon, das einen eigenartigen Geruch besitzt („ozein“ heißt griechisch riechen).

Ozon ist nichts anderes als Sauerstoff. Das übliche Sauerstoffmolekül enthält zwei Atome, das des Ozons drei.  $O_2$  oder  $O_3$  — ein Sauerstoffatom mehr oder weniger, was ist schon dabei?

Aber der Unterschied ist sehr beträchtlich: Ozon und gewöhnlicher Sauerstoff unterscheiden sich

nicht nur durch ihren molekularen Aufbau, sondern vor allem durch ihre verschiedene Reaktionsfähigkeit.

Ohne reichlich vorhandenen Sauerstoff kann es kein Leben geben. Ozon hingegen ist in großen Konzentrationen lebenszerstörend. Nach Fluor stellt es das stärkste Oxydationsmittel dar. Es



bleicht Farben aus. Bei Reaktionen mit organischen Stoffen zerstört es diese im Nu. Alle Metalle, mit Ausnahme von Gold und Platin, werden unter Einwirkung von Ozon schnell in Oxide umgewandelt.

Ozon — ein Mörder alles Lebendigen — dient jedoch zugleich der Aufrechterhaltung des Lebens auf der Erde.

Dieses scheinbare Paradoxon läßt sich leicht

erklären. Die Sonnenstrahlung setzt sich aus verschiedenen Komponenten zusammen, aus Strahlung verschiedener Wellenlängen. Zu ihr gehört auch die sogenannte ultraviolette Strahlung. Würde die Gesamtheit der ultravioletten Strahlen die Erdoberfläche erreichen, wäre irdisches Leben ein Ding der Unmöglichkeit. Denn diese energiereichen Strahlen töten die Lebewesen.

Zum Glück gelangt jedoch nur ein geringer Teil der ultravioletten Strahlung bis auf die Erdoberfläche, da der größte Teil dieser gefährlichen Strahlung seine Kraft in etwa 20 bis 30 km Höhe einbüßt, wo die Luftdecke der Erde bedeutende Ozonmengen enthält. Ozon verschluckt nun fast vollständig die längerwelligen ultravioletten Strahlen, die in größeren Mengen für den Menschen und das gesamte Leben auf der Erde gefährlich wären. Dadurch gelangt nur ein kleiner Teil der UV-Strahlung auf die Erde, und gerade dieser Teil ist lebenswichtig, denn er ermöglicht z. B. die Bildung des Vitamins D. Außerdem tragen diese ultravioletten Strahlen zur Vernichtung von Bakterien bei. Der Ozongehalt der Atmosphäre bleibt trotz der ständigen Neubildung des Ozons relativ gleich, da Ozon in der Nähe der Erdoberfläche von Staub, Ruß und Bakterien zersetzt wird.

Ozon ist für den Menschen jedoch nicht nur eine Art atmosphärischer Filter, sondern auch ein sehr wichtiger Stoff für die praktische Verwendung.

Tausende und Abertausende von Tonnen Ozon werden von den Chemikern benötigt. Die chemi-

sche Industrie versucht, die erstaunliche Oxydationsfähigkeit des Ozons in ihren Dienst zu stellen. Ozon vermag abgenutzte Autoreifen zu regenerieren, Gewebe, Zellulose und Garn zu bleichen, Fette und Öle von unangenehmen Gerüchen zu befreien.

Auch die Erdölarbeiter könnten für Ozon eine gute Verwendung finden. Das Erdöl vieler Vorkommen ist schwefelhaltig. Diese schwefelhaltigen Erdöle geben uns viel zu schaffen auf, sei es auch nur aus dem Grunde, daß sie Apparaturen schnell zerstören (z. B. die Kesselfeuerung in den Kraftwerken). Mit Hilfe von Ozon wäre es ein leichtes, solche Erdölarten zu entschweffeln. Die Ausbeute an Schwefelsäure könnte durch die freigesetzten Schwefelmengen verdoppelt, ja verdreifacht werden.

Wir trinken heute meistens chloriertes Leitungswasser. Es ist harmlos, doch schmeckt es wahrhaftig nicht wie Quellwasser. In ozonbehandeltem Trinkwasser gehen alle Krankheitserreger zugrunde. Diese Flüssigkeit hat danach keinen so unangenehmen Beigeschmack wie chlorhaltiges Wasser.

Ozon könnte zu vielen Zwecken Verwendung finden. Deshalb sind Forscher und Ingenieure eifrig bemüht, leistungsfähige großtechnische Ozonisatoren zu schaffen.

An Bedeutung steht also Ozon  $O_3$  dem  $O_2$  um nichts nach.

Das Gebaren des Sauerstoffs und Ozons ist vor allem aber auch ein glänzendes Beispiel für eine Erscheinungsform der Dialektik in der Chemie. Eine ganz bestimmte Quantität — drei Sauer-

stoffatome — stellen sich in einer ganz bestimmten neuen Qualität dar.

Die Chemiker kennen auch ein Sauerstoffmolekül, das sich aus vier Atomen zusammensetzt, also  $O_4$ . Allerdings ist dieses Quartett äußerst instabil, und man weiß vorderhand noch recht wenig von seinen Eigenschaften.

**Einfacher als das Einfache, erstaunlicher als das Erstaunliche...** Wasser ist für das Leben Substanz Nummer 1. Seine chemische Formel ist einfach:  $H_2O$ . Ein Atom Sauerstoff und zwei Wasserstoffatome ergeben ein Wassermolekül.

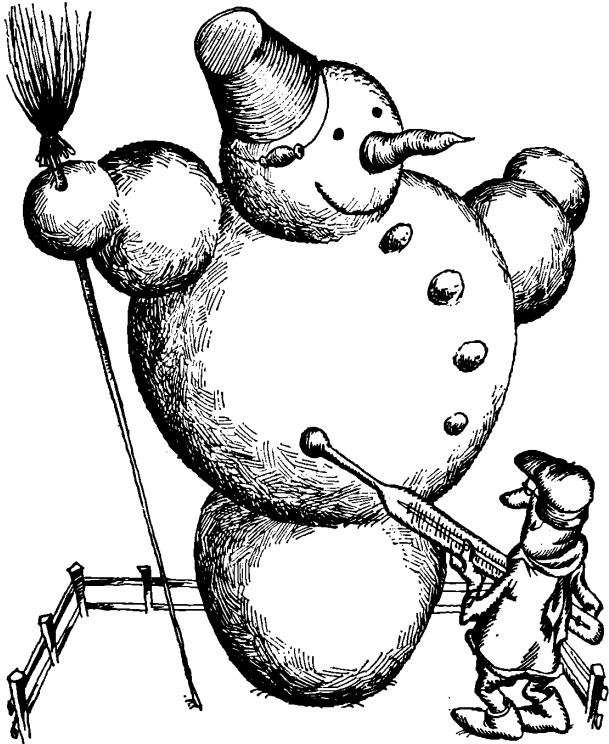
Versuchen wir, uns einmal vorzustellen, wie die Welt aussähe, verschwände plötzlich das Wasser.

...Finsteren Augenhöhlen gleich umschlossen die mit einer dicken Salzschrift überzogenen riesigen Gräben einstiger Meere und Ozeane den kleineren Teil des einst bewohnten hochgelegenen Landmassivs. Ausgetrocknet wären die Flüsse. Lautlose Stille herrschte dort, wo einst Bäche dahinplätscherten. Zu Staub gewordenes Gestein bedeckte die Einöde, denn bedeutende Wassermengen waren einst seine Bestandteile. Weit und breit kein Baum und kein Strauch, keine Blume und kein Lebewesen.

Ohne diese allereinfachste chemische Verbindung Wasser gäbe es kein Leben auf Erden.

Als Celsius das Thermometer erfand, machte er zwei Größen zu Fixpunkten seiner Konstruktion, zwei Konstanten: den Siedepunkt und den Gefrierpunkt des Wassers. Den ersten bezeich-

nete er mit  $100^{\circ}$ , den zweiten mit  $0^{\circ}$ . Das Intervall zwischen beiden Punkten unterteilte er in 100 gleiche Teile. So entstand der erste Temperaturmesser.



Doch was hätte Celsius gedacht, hätte er gewußt, daß Wasser eigentlich die regelwidrigste Verbindung auf Erden ist. Es durfte weder bei  $0^{\circ}$

gefrieren noch bei  $100^{\circ}$  sieden. Wissenschaftler haben errechnet, daß Wasser bei einer um  $180^{\circ}$  niedrigeren Temperatur sieden müßte, das heißt bei  $-80^{\circ}$ . Dieser Siedepunkt bei wahrhaft antarktischer Temperatur müßte ihm eigentlich durch die im Periodensystem der Elemente herrschende Hausordnung aufgezwungen worden sein.

Die Eigenschaften der Elemente des Periodensystems, die dieser oder jener Gruppe angehören, unterliegen beinah gesetzmäßigen Änderungen beim Übergang von leichten zu schweren Elementen. Beispielsweise gilt das für ihren Siedepunkt. Auch die Eigenschaften der Verbindungen ändern sich nicht auf willkürliche Weise. Bestimmend dafür ist die Stellung ihrer Komponenten im Periodensystem der Elemente. Dies bezieht sich natürlich auch auf die Wasserstoffverbindungen, auf die Eigenschaften verschiedener Hydride.

Wasser kann als Sauerstoffhydrid betrachtet werden. Sauerstoff ist Mitglied der sechsten Gruppe. In ihr sind Schwefel, Selen, Tellur und Polonium untergebracht. Ihre Hydridmoleküle sind in gleicher Weise aufgebaut wie die Moleküle des Wassers:  $H_2S$ ,  $H_2Se$ ,  $H_2Te$ ,  $H_2Po$ . Ihr Siedepunkt ist bekannt. Es zeigt sich, daß sich beim Übergang vom Schwefelwasserstoff zu den schwereren Mitbrüdern Selenwasserstoff und Tellurwasserstoff eine ziemlich regelmäßige Änderung vollzieht. Nur eines fällt auf: Der Siedepunkt des Wassers macht eine Ausnahme. Der entsprechende Temperaturwert liegt bedeutend höher, als es ihm eigentlich gebührt. Hält sich

das Wasser nicht an die Anstandsregeln, die für das große Gebäude des Periodensystems der Elemente festgelegt sind? Um ganze  $180^\circ$  verlegt es seine Umwandlung in den Dampfzustand. Laut „Kaderakte“ — als auf Grund der strengen Vorschriften des Periodensystems der Elemente — dürfte es demnach auf Erden nur als Dampf vorkommen. Dies ist die erste erstaunliche Unregelmäßigkeit des Wassers.

Die zweite äußert sich im Gefrierpunkt. Laut „Statut“ des Periodensystems der Elemente hätte das Wasser bei einer Temperatur von  $-100^\circ\text{C}$  zu erstarren. Das Wasser weist diese Forderung aufs energischste zurück und erstarrt zu Eis bei  $0^\circ\text{C}$ .

Nach dieser Eigenwilligkeit des Wassers müßten sein flüssiger und sein fester Aggregatzustand auf Erden eigentlich als abnorme Erscheinungen gelten. Vom Standpunkt der Wissenschaft aus betrachtet, ist dieses Gebaren des Wassers eine zusätzliche Bestätigung dessen, daß das Periodensystem der Elemente einen weitaus komplizierteren Bau darstellt, als dies auf den ersten Blick erscheinen mag. Der Charakter seiner Bewohner läßt sich nicht in vorgeformte Rahmen zwängen. Warum aber besitzt das Wasser einen so eigenwilligen Charakter?

Das hängt mit dem Aufbau des Wassermoleküls zusammen. Es weist eine eigenartige Struktur auf, bei der die Wasserstoff- und Sauerstoffbindungen immer einen bestimmten Winkel einschließen, wodurch auf Grund der elektrischen Ladungen der Sauerstoff- und Wasserstoffatome eine Art Dipol mit unterschiedlich stark aufge-

ladenen Seiten entsteht. Dank dieser Eigenart besitzen die Wassermoleküle ein sehr ausgeprägtes Anziehungsvermögen. In einem Glas Wasser würden wir vergebens nach vereinzelteten Molekülen fahnden. Sie bilden Gruppen, Assoziationen, wie die wissenschaftliche Bezeichnung lautet. Es wäre richtiger, die chemische Formel für Wasser durch  $(\text{H}_2\text{O})_n$  darzustellen, wobei  $n$  die Anzahl der in der Assoziation befindlichen Moleküle anzeigt.

Es ist äußerst schwierig, diese assoziativen Bindungen zwischen den Molekülen des Wassers zu lösen. Daher liegt der Erstarrungs- bzw. Siedepunkt des Wassers bei weitaus höheren Temperaturwerten, als dies zu erwarten wäre.

**Vom Eis ist die Rede** Im Jahre 1913 verbreitete sich wie ein Lauffeuer die schaurige Nachricht: Die „Titanic“, ein riesiges Passagierschiff, stieß mit einem Eisberg zusammen und sank. Auf verschiedene Weise erklärten Experten die Ursache der Katastrophe. Schließlich einigte man sich auf folgende Erklärung: Dichter Nebel habe es der Schiffsführung unmöglich gemacht, einen mächtigen, treibenden Eisberg zu sichten; das Schiff prallte dagegen und wurde dabei so schwer beschädigt, daß es untergehen mußte.

Betrachten wir das bedauerliche Ereignis mit den Augen eines Naturwissenschaftlers, dann gelangen wir zu einer überraschenden Schlußfolgerung: Die „Titanic“ war einer weiteren,

dem Wasser eigenen „Anomalie“ zum Opfer gefallen.

Eisberge, mächtige, unheimliche Eismassen, schwimmen auf der Wasseroberfläche. Allerdings ragt nur ein kleiner Teil aus dem Wasser heraus, der größte Teil der Eisberge liegt unter dem Wasserspiegel. Ihre Massen betragen oft Zehntausende von Tonnen. Sie schwimmen, weil Eis leichter als Wasser ist.

Versuchen Sie einmal, ein beliebiges Metall zum Schmelzen zu bringen und dann in die brodelnde Masse ein Stückchen des gleichen Metalls zu werfen: Es wird darin im Nu untergehen. Denn in festem Zustand weist jede Materie eine größere Dichte als in flüssigem auf. Eis und Wasser sind eine erstaunliche Ausnahme von dieser Regel. Gäbe es diese Ausnahme nicht, würden auf mittlerer geographischer Breite alle Gewässer im Winter schnell bis auf den Grund einfrieren und alle Lebewesen darin zugrundegehen.

Bei strengem Frost wird die Eisdecke sehr fest. Selbst über einen Fluß hinweg führt dann ein winterlicher Weg. Doch unter der Eisschicht fließt nach wie vor Wasser. Der Fluß friert nicht bis auf den Grund ein.

Eis, die feste Zustandsform des Wassers, ist eine äußerst eigenartige Masse. Es gibt verschiedene Eisarten. In der Natur kommt eine einzige vor — jene, die bei  $0^{\circ}\text{C}$  entsteht. Unter extremen Laborbedingungen gelang es, mittels Hochdruck zusätzliche sechs Eisarten herzustellen. Die phantastischste ist wohl das Eis VII. Man gewann es bei einem Druck von 21 700 atm. Mit

Recht könnte es glühendes Eis heißen. Es schmilzt bei  $192^{\circ}\text{C}$  über Null, und zwar bei 32 000 atm. Beobachten wir gewöhnliches Eis, scheint es nichts Alltäglicheres zu geben als die Eisschmelze. Doch welche erstaunliche Dinge vollziehen sich da!

Jede Materie beginnt sich auszudehnen, wenn sie von festem in flüssigen Zustand übergeht. Das bei der Eisschmelze entstandene Wasser verhält sich anders: Es verdichtet sich. Erst nach weiterem Temperaturanstieg dehnt es sich aus. Die Ursache für dieses Verhalten ist die Befähigung der Wassermoleküle zu der bereits erwähnten assoziativen Bindung. Das tritt besonders deutlich bei  $+4^{\circ}\text{C}$  in Erscheinung. Daher besitzt das Wasser bei dieser Temperatur seine größten Dichte. Und aus diesem Grunde erstarren selbst bei der größten Kälte Flüsse, Teiche und Seen nicht bis auf den Grund zu Eis.

Um Eis zum Schmelzen zu bringen, sind bedeutende Wärmemengen nötig und zwar unvergleichlich größere als beim Schmelzen gleicher Mengen eines anderen Stoffes.

Gefriert Wasser zu Eis, werden Wärmemengen freigegeben. Sie erwärmen Erde und Luft. Der Übergang zum strengen Winter vollzieht sich auch aus diesem Grunde nicht urplötzlich. Dem Herbst wird das Recht eingeräumt, seine Herrschaft auf ein paar Wochen zu verlängern. Im Frühjahr hingegen wird der Anbruch der Hitzeperiode durch die Eisschmelze aufgehalten.

**Wieviel Wassersorten gibt es auf Erden!** Drei Wasserstoffisotope haben die Forscher in der Natur entdeckt. Ein jedes ist imstande, sich mit Sauerstoff zu verbinden. Folgerichtig könnte man von drei Wassersorten sprechen, vom Wasser des Protiums, des Deuteriums und des Tritiums:  $H_2O$ ,  $D_2O$  und  $T_2O$ . Auch „gemischtes“ Wasser ist denkbar: Beispielsweise könnte sich das Molekül, sagen wir, aus einem Protium- und einem Deuteriumatom oder aus einem Deuterium- und einem Tritiumatom zusammensetzen. Die Wasserliste wird auf diese Weise also länger: Auf die Liste kommen HDO, HTO und DTO.

Nun stellt auch Sauerstoff, des Wassers Komponente, eine Mischung aus drei stabilen Isotopen dar: Sauerstoff-16, Sauerstoff-17 und Sauerstoff-18. Das erstgenannte Sauerstoffisotop ist das meistverbreitete.

Zieht man in die Rechnung auch die Sauerstoffabarten ein, erhöht sich die Zahl der möglichen Wassersorten auf weitere 12.

Aus welchem Quell wir auch immer das Wasser geschöpft haben, es stellt stets eine Mischung unterschiedlicher Moleküle dar. Der Bogen ist weit gespannt: vom leichtesten  $H_2O$  (mit dem Sauerstoffisotop  $O^{16}$ ) bis zum schwersten (mit Tritium und dem Sauerstoffisotop  $O^{18}$ ). Die Chemiker sind imstande, ein jedes Wasser in reiner Form zu gewinnen. Die Wasserstoffisotope unterscheiden sich voneinander in merklicher Weise nach ihren Eigenschaften. Und wie ist das Verhalten der verschiedenen Wassersorten? Auch hier stößt man auf manche Un-

gleichheit, beispielsweise im Hinblick auf die Dichte, den Siede- und Gefrierpunkt.

Die Zusammensetzung des Wassers ändert sich mit jeder Sorte. So enthält eine Tonne Leitungswasser 150 g schweres Wasser (Deuteriumoxid), also 0,02 Prozent der Gesamtmasse. Eine Tonne Wasser aus den Fluten des Stillen Ozeans weist rund 165 g Deuteriumoxid auf. Eine Tonne kaukasisches Gletschereis enthält 7 g mehr schweres Wasser als ein Kubikmeter Flußwasser. Mit einem Wort: Nach seiner isotopen Zusammensetzung unterscheidet sich das Wasser von Ort zu Ort. Die Ursache dafür ist der sich in der Natur ständig vollziehende Prozeß des Isotopenaustausches. Die verschiedenen Wasserstoff- bzw. Sauerstoffisotope ersetzen einander unaufhörlich entsprechend den Verhältnissen.

Gibt es in der Natur noch eine zweite Verbindung mit einer derart hohen Anzahl von Abarten? Nein, keine einzige.

Verständlicherweise haben wir es in der Natur vorwiegend mit Protium-Wasser zu tun. Doch können auch die anderen Isotope nicht aus der Rechnung ausgeschaltet werden. Einige Wassersorten werden in beträchtlichem Maße in der Praxis verwendet. Dazu gehört insbesondere das schwere Wasser  $D_2O$ . Es dient im Uranreaktor als Verlangsamter — Moderator — der die Uranspaltung auslösenden Neutronen. Genutzt wird es auch im Labor bei chemischen Untersuchungen mit Hilfe von Isotopen.

Es kann jedoch noch mehr Wasserabarten geben, als wir bisher dargestellt haben. Denn außer den natürlichen Sauerstoffisotopen gibt es die

künstlich gewonnenen, die radioaktiven: Sauerstoff-14, Sauerstoff-15, Sauerstoff-19 und Sauerstoff-20. Unlängst, wir sprachen ja bereits davon, wurden neue Wasserstoffisotope ( $^4\text{H}$  und  $^5\text{H}$ ) entdeckt.

Würden die synthetisch erzeugten Wasserstoff- und Sauerstoffisotope in die Rechnung mit einbezogen, könnten wir auf über 100 verschiedene Wassersorten kommen.

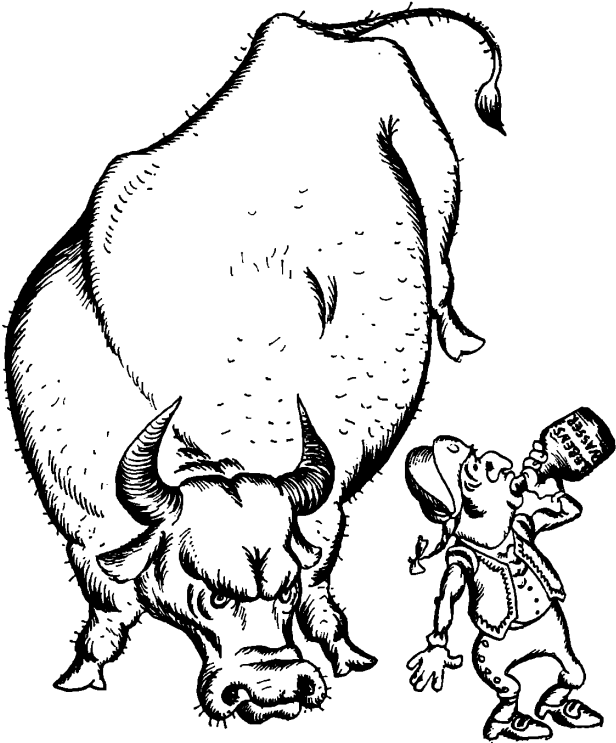
### **Lebenspendendes, allgegenwärtiges Wasser...**

Wasser, Wunderwasser — in zahllosen Märchen der Völker greift es ins Geschehen ein: Es heilt Wunden und läßt Tote auferstehen, es verleiht dem Schwachen Mut und verhundertfacht die Kraft des Starken.

Warum schrieb der Mensch dem Wasser solche magischen Fähigkeiten zu? Daß wir leben, uns an der Natur erfreuen, in Flüssen und Seen baden oder auch, von einem Regenguß überrascht, über Pfützen springen, daß wir auf Skiern die verschneite Landschaft durchmessen können — all das haben wir dem Wasser zu verdanken, genauer gesagt, der Fähigkeit seiner Moleküle, sich zusammenzulagern, Assoziationen zu bilden. Dies gehört zu den Bedingungen, die die Entstehung und Entwicklung des Lebens auf der Erde ermöglicht haben.

Die Geschichte unserer Erde, das geologische Geschehen, wird seit Milliarden Jahren in erster Linie von der die Erde umgebenden Wasserhülle mitbestimmt. Das Wasser hat also von jeher die Gestalt unseres Planeten entscheidend beeinflußt.

Sie erfährt durch seine Wirkungen auch heute noch ständige Veränderungen. Wasser ist der größte Chemiker der Welt. Kein einziger Naturvorgang vollzieht sich ohne sein



Mitwirken, weder die Bildung eines neuartigen Gesteins oder Minerals noch die äußerst komplizierte biochemische Reaktion im pflanzlichen

oder tierischen Organismus. Ja, im Meer entstanden die ersten Lebewesen, die zu ihrer Entwicklung zum Beispiel die im Meerwasser gelösten Stoffe Kalzium, Magnesium und Kieselsäure benötigten.

Die Chemiker stünden heute in ihren Labors tatenlos da, gäbe es kein Wasser. Denn bei der Erforschung der Eigenschaften und Umwandlungen von Substanzen, bei der Gewinnung von neuen Verbindungen kommen sie nur selten ohne Wasser aus. Wasser ist eines der besten Lösungsmittel, das die Menschen kennen. Soll eine Substanz zu gesteigerter Reaktionsfähigkeit veranlaßt werden, muß sie vorher in den Zustand der Lösung gebracht worden sein.

Was geschieht mit der Substanz bei ihrer Auflösung? Die auf der Oberfläche wirkenden zwischenmolekularen und interatomaren Kräfte werden hundertfach geschwächt. Die Moleküle und Atome beginnen sich von der Oberfläche abzuspalten, sie gehen ins Wasser über. Ein Stück Zucker in einem Glas Tee zerfällt in einzelne Moleküle. Kochsalz zerfällt in geladene Partikel: in Natrium- und Chlorionen. Das Wassermolekül ist also so aufgebaut, daß ihm in hohem Maße die Fähigkeit eigen ist, Atome und Moleküle der sich auflösenden Substanz anzuziehen, und zwar in bedeutend höherem Maße als zahlreiche andere Lösungsmittel.

Es gibt auf Erden kein so hartes Gestein, das der zerstörenden Kraft des Wassers standhalten könnte. Selbst die Granite unterliegen seiner Wirkung — langsam, doch unabwendbar. Wasser löst die meisten Minerale. Die Lösungen

werden in Meere und Ozeane geschwemmt und als Sedimente dort abgelagert. Auf diese Weise mögen zum Beispiel auch eine Reihe bedeutender Eisenerzanreicherungen zustande gekommen sein, selbstverständlich unter dem Einwirken verschiedener anderer Bedingungen.

**Der kleine Eiszapfen und seine Geheimnisse** Ein Kind greift nach einem Eiszapfen. Er ist ja von unwiderstehlicher Schönheit, eiskalt und glänzend. Im Nu wird er in den Mund gesteckt. Schmeckt er auch? Das Kind genießt das Eis. Es weint, wenn man es ihm wegnimmt. Kindliche Laune? Nein, es geht um Ernsteres.

Bei einem Versuch wurden Kücken getränkt. Der einen Gruppe verabreichte man gewöhnliches Wasser, der anderen Tauwasser, in dem noch winzige Eisstückchen schwammen.

Ein Test, wie er einfacher gar nicht ausdenken wäre. Doch er führte zu erstaunlichen Ergebnissen. Das gewöhnliche Wasser tranken die Kücken in gemessener Ruhe. Um das Gefäß mit Eiswasser entspann sich ein richtiger Kampf, ein Streit. Das Tauwasser verschlangen die Kücken so gierig, als ob man ihnen einen Leckerbissen vorgesetzt hätte.

Nach eineinhalb Monaten kamen die Testkücken auf die Waage. Was stellte sich heraus? Die tauwassergetränkten Exemplare waren bedeutend schwerer, hatten an Gewicht viel mehr zugenommen als jene Kücken, die gewöhnliches Wasser zu trinken bekommen hatten. Tauwasser besitzt offensichtlich besondere Eigenschaften.

Es ist für Lebewesen gesundheitsfördernd. Doch warum?

Anfänglich war der Gedankengang folgender: Tauwasser enthalte größere Mengen Deuterium. Und dieses schwere Wasser, in kleinen Konzentrationen verabreicht, fördere die Entwicklung der Lebewesen. Doch mit dieser Erklärung war nur ein Teil der Wahrheit erfaßt. Liegt des Rätsels Lösung vielleicht im Tauvorgang selbst?

Eis ist ein Kristall. Auch Wasser ist, allgemein gesprochen, ein flüssiger Kristall. Seine Moleküle sind nicht etwa chaotisch angeordnet, sondern bilden eine eigenartige kristalline Schicht, allerdings anders aufgebaut als die Eiskristalle.

Beim Tauvorgang behalten die Wassermoleküle noch relativ lange eine dem Eis eigentümliche kristalline Struktur. Sie sind periodisch regelmäßig in allen drei Richtungen des Raumes angeordnet, wie das bei Festkörpern der Fall ist. Dem Aussehen nach ist Tauwasser eine Flüssigkeit, doch seine Moleküle sind noch „eisartig“ angeordnet. Daher legt Tauwasser eine größere chemische Aktivität an den Tag. Es nimmt mit größerer Bereitschaft als das übliche Wasser an zahlreichen biochemischen Vorgängen teil. Im Organismus verbindet es sich mit verschiedenen Substanzen schneller als gewöhnliches Wasser. Die Wissenschaftler sind der Ansicht, daß im Organismus der Lebewesen die Struktur des Wassers der Struktur des Eises ähnlich sei. Gelangt gewöhnliches Wasser in den Organismus, so muß es erst einmal „umgelagert“ wer-

den. Bei Tauwasser entfällt diese Notwendigkeit. Dem Organismus bleibt der dafür erforderliche Energieaufwand erspart. Allem Anschein nach spielt Tauwasser in unserem Leben eine erstrangige Rolle.

**Ein himmelweiter Unterschied** Ohne Worte gibt es keine Sprache, ohne Buchstaben keine Worte. Das Studium einer jeden Sprache beginnt beim Alphabet. Ein jedes Alphabet hat zweierlei Laute: Selbstlaute und Mitlaute. Gäbe es nicht die einen oder die anderen, würde die wohlklingende Sprache der Menschen auseinanderfallen... In einem utopischen Roman allerdings verständigen sich die Bewohner eines unbekanntes Himmelskörpers in Lauten, die sich ausschließlich aus Mitlauten zusammensetzen. Doch das entstammt der Phantasie des Schriftstellers. Die Natur spricht zu uns in der Sprache chemischer Verbindungen. Eine jede stellt eine eigenartige Zusammensetzung chemischer „Buchstaben“ dar, und zwar jener chemischen Elemente, die auf der Erde vorkommen. Die Anzahl solcher „Worte“ übersteigt drei Millionen. „Buchstaben“ gibt es im chemischen „Alphabet“ insgesamt an die hundert.

In diesem Buchstabenverzeichnis sind sozusagen auch Selbstlaute und Mitlaute enthalten, nämlich Nichtmetalle und Metalle, zwei Gruppen der chemischen Elemente, die seit jeher existieren.

Nichtmetalle gibt es bedeutend weniger als Metalle. Die Verhältniszahl gleicht dem Ergebnis eines Basketballspiels, 21 : 83... In der

menschlichen Sprache ist das Verhältnis ähnlich: Selbstlaute sind in bedeutend geringer Anzahl vorhanden als Mitlaute.



Eine ausschließliche Aneinanderreihung von Selbstlauten ergibt in der Sprache der Menschen selten etwas Vernünftiges — meist nur ein sinnloses Gestammel oder Geheule.

In der Sprache der Chemie jedoch stößt man allorts auf eine ausschließliche Verbindung von „Selbstlauten“, also Nichtmetallen. Alles Lebende auf Erden verdankt sein Dasein gerade diesen Verbindungen.

Nicht von ungefähr bezeichnen die Wissenschaftler die vier hauptsächlichsten Nichtmetalle — Kohlenstoff, Stickstoff, Sauerstoff und Wasserstoff — als Organogene, denn sie sind die Grundlage organischen Lebens. Fügt man noch Phosphor und Schwefel hinzu, so stellen diese sechs Bausteine praktisch den ganzen Vorrat an Baustoffen dar, den die Natur zum Aufbau von Eiweißen und Kohlenhydraten, Fetten und Vitaminen nutzt, als zum Aufbau aller chemischen Verbindungen des Lebens benötigt.

Zwei Nichtmetalle — Sauerstoff und Silizium — ergeben durch ihre Verbindung eine Substanz, die in der Sprache der Chemie  $\text{SiO}_2$ , Siliziumdioxid, heißt. Dieser Stoff bildet als Quarz oder Kiesel (lateinisch *silex*) einen der wichtigsten Bestandteile der meisten Gesteinsarten. Er stellt gewissermaßen einen eigenartigen Zement dar, der die Minerale zusammenbäckt. Siliziumverbindungen sind in Sand, in Sandsteinen und Schiefen, Graniten und Gneisen zu finden. Ja, etwa 30 Prozent der Masse der Erdkruste bestehen aus Silizium.

Es ist nicht schwer, das Verzeichnis der „Selbstlaute“ im chemischen „Alphabet“ abzuschließen. Hinzu kommen noch die Halogene, die seltenen Gase der nullten Gruppe, also Helium und seine Brüder, sowie drei nicht sehr populäre Elemente: Bor, Selen und Tellur.

Würden wir jedoch behaupten, alles Lebende in der Natur sei ausschließlich aus Nichtmetallen aufgebaut, begingen wir einen schweren Fehler.

Im Organismus des Menschen konnten über 70 verschiedene chemische Elemente nachgewiesen werden: alle Nichtmetalle und eine beachtliche Zahl von Metallen — vom Eisen bis zu radioaktiven Elementen, zu denen auch Uran zählt. Die Chemiker sind nun bestrebt, zu ergründen, worauf der „himmelweite Unterschied“ zwischen Nichtmetallen und Metallen beruht. Zu der einen bzw. anderen Gruppe gehören bisweilen Elemente, die einander völlig fremd sind. Doch in einer Hinsicht gleichen sie einander.

**Weshalb der himmelweite Unterschied!** Ein Spaßvogel bemerkte einst: Zwei Eigenschaften seien es, die den Menschen vom Tier unterscheiden — der Sinn für Humor und die historische Erfahrung. Der Mensch besitze die Fähigkeit, sich über eigenes Mißlingen lustig zu machen. Auch werde er nicht so leicht wieder in eine Patsche geraten, aus der er sich mit Mühe einmal „herausgestrampelt“ hat. Wir möchten eine dritte Eigenschaft hinzufügen: des Menschen Gewohnheit, nach dem „Warum“ zu fragen, und sein Bestreben, die Antwort darauf selber zu finden.

Warum wohnen z. B. die Nichtmetalle nicht weit voneinander entfernt, wahllos verstreut, in verschiedenen Stockwerken und Sektionen des großen Gebäudes? Warum scharen sie sich an einem Ort zusammen? Hier sind die Metalle,

dort die Nichtmetalle, streng voneinander gesondert. Warum gibt es einen himmelweiten Unterschied zwischen ihnen, und worin besteht er eigentlich?

Werden zwei Elemente, gleichgültig welche, zu Bindungspartnern, kommt es zu einer Umgruppierung der äußeren Elektronenschalen. Das Atom des einen Elements gibt Elektronen ab, das Atom des anderen nimmt sie auf. Dieses wichtige Gesetz der Chemie ist auch die Erklärung für den himmelweiten Unterschied zwischen Metallen und Nichtmetallen.

Nichtmetalle sind konträrer Handlungsweisen fähig. In der Regel können sie Elektronen aufnehmen, doch vermögen sie auch welche abzugeben. Sie sind ziemlich anpassungsfähig und können, falls es erforderlich ist, auch ihre Gestalt ändern. Ist es für sie vorteilhaft, nehmen sie Elektronen auf. Sie treten dann als negative Ionen in Erscheinung. Im entgegengesetzten Falle übernehmen sie die Rolle von positiven Ionen. Nur Fluor und Sauerstoff gehen keine Kompromisse ein. Sie nehmen immer Elektronen auf. Nie geben sie welche ab.

Die Metalle sind nicht solche Diplomaten. Sie sind in ihren Bestrebungen beständiger. Der Leitspruch, dem sie stets die Treue halten, lautet: Elektronen abgeben, immer nur abgeben, zu positiv geladenen Ionen werden. Zusätzliche Elektronen aufzunehmen, ist ihnen zuwider. Darin also besteht der grundlegende Unterschied zwischen Metallen und Nichtmetallen.

Übrigens haben die Chemiker auch für diese Regel Ausnahmen entdeckt. In der Gesellschaft

der Metalle gibt es demnach unbeständige Charaktere. Zwei Metalle haben ein „nichtmetallisches“ Gemüt offenbart. Astat und Rhenium (sie bewohnen im Periodensystem die 85. bzw. 75. Zelle) treten als negativ einwertige Ionen auf. Immerhin ein kleiner Schatten auf dem sonst so reinen Bild der zielstrebigen Familie der Metalle.

Welche Atome geben im allgemeinen Elektronen ab? Welche Atome nehmen lieber Elektronen auf? Atome, deren Außenschale nur spärlich mit Elektronen besetzt ist, sind abgabebereit; für jene, die reich an Schalenelektronen sind, ist es vorteilhafter, zusätzliche aufzunehmen, damit die Zahl, die einen stabilen Zustand kennzeichnet, möglichst schnell erreicht sei. Alkalimetalle besitzen ein einziges Valenzelektron. Es ist für sie sehr leicht, es abzugeben. Ist dies geschehen, dann vermögen sie sogar, die stabile Elektronenhülle des benachbarten Edelgases zu entblößen. Deshalb sind Alkalimetalle die chemisch aktivsten unter allen bekannten Metallen. Und das aktivste unter ihnen ist Frankium (Ordnungszahl 87). Je schwerer das Element der ersten Gruppe ist, desto größer ist der Radius seines Atoms und desto schwächer ist die Bindung des einzigen Valenzelektrons an den Atomkern.

Im Reiche der Nichtmetalle gebärdet sich Fluor am wildesten. Sieben Elektronen hausen in seiner „Außensphäre“. Das fehlende achte entreißt es gierig jedem anderen Element. Seinen wilden Angriffen kann keines standhalten.

Die anderen Nichtmetalle nehmen die Elektro-

nen in verschiedener Weise auf: die einen leichter, die anderen schwerer. Damit wird auch klar, weshalb die Nichtmetalle vorwiegend die obere rechte Ecke in der Tabelle einnehmen. Ihre Außenschale ist reich an Elektronen, und das kann nur bei Elementen vorkommen, die dem Ende der Perioden nahe sind.

**Noch zweimal „warum“** Warum gibt es auf der Erde so viele Metalle und so wenige Nichtmetalle? Warum ähnelt ein Metall einem anderen unvergleichlich mehr, als dies unter Nichtmetallen der Fall ist? In der Tat: Schon dem Aussehen nach ist Schwefel mit Phosphor oder Jod mit Kohlenstoff kaum zu verwechseln. Doch selbst das Auge des Fachmannes ist nicht imstande, sofort zu erkennen, welches Metall er vor sich hat: Niob oder Tantal, Kalium oder Natrium, Molybdän oder Wolfram.

Wechseln Summanden ihren Platz, dann bleibt die Summe unveränderlich. Dies ist eine goldene Regel der Arithmetik. In der Chemie gilt diese Regel sehr oft nicht. Bei der Erforschung des Aufbaus der Elektronenschalen beispielsweise kann die Chemie dieses Prinzip nicht übernehmen...

Alles verläuft „normal“, solange wir es mit Elementen der zweiten und der dritten Periode zu tun haben. Hier werden bei jedem chemischen Element zusätzliche Elektronen in die äußere Schale eingeordnet. Kommt ein neues Elektron hinzu, dann weist das Element sofort neuartige Eigenschaften auf, durch die es sich von dem Vorgänger unterscheidet. Silizium ähnelt nicht

dem Aluminium, Schwefel gleicht nicht dem Phosphor. Metallische Eigenschaften werden bald von nichtmetallischen verdrängt, denn je größer die Elektronenzahl in der Außenschale ist, desto weniger ist das Atom gewillt, Elektronen zu verabschieden.

Bald sind wir bei der vierten Periode angelangt. Kalium und Kalzium sind vorzügliche Metalle, eigentlich „vollendete“. Müssen nun aber nicht bald, so meinen wir, die Nichtmetalle folgen?

Uns wird eine kleine Überraschung bereitet: Vom Skandium an treten zusätzliche Elektronen nicht in die Außenschale des Atoms ein, sondern in die kernnähere. Nun haben die „Summanden“ also die Plätze tatsächlich gewechselt. Im Gegensatz zur Arithmetik bleibt die „Summe“ jedoch nicht die gleiche: Die Summe der Eigenschaften der Elemente ändert sich.

Woran liegt das? Die zweite Schale von außen ist konservativ veranlagt. Sie beeinflußt in geringerem Maße als die Außenschale die chemischen Eigenschaften des Elementes. Der Unterschied in den Eigenschaften ist demnach von nun an nicht mehr so groß wie bei den vorangegangenen Elementen.

Es hat den Anschein, Skandium würde sich dessen entsinnen, daß seine dritte Elektronenschale nicht voll gefüllt ist. Sie könnte 18 Elektronen besitzen, doch es sind bloß 9 vorhanden. Kalium und Kalzium hatten offensichtlich nicht daran gedacht, diese Schale zu füllen. Von nun an werden zusätzliche Elektronen in die dritte, kernnähere Schale aufgenommen. Vom Skandium an

wird also die Gerechtigkeit allmählich wiederhergestellt, bis auch die dritte Schale die ihr zustehenden 18 Elektronen besitzt.

In der ganzen Zehnelementenreihe wird die kernnähere Schale auf diese Weise ausgebaut. Die Außenschale bleibt unverändert. Sie ist lediglich mit zwei Elektronen besetzt (bei Kalium und Chrom sogar mit nur einem). Eine derart geringe Anzahl von Elektronen in der Außenschale des Atoms ist für Metalle charakteristisch. Daher begegnen wir auf der Strecke Skandium — Zink ausschließlich Metallen. Was für einen Sinn hätte es auch, weitere Elektronen in die Außenschale einzuordnen, wenn man eine Verbindung einzugehen beabsichtigt? Man besitzt ja alles in allem nur zwei Valenzelektronen. Mit anderen Elementen reagierend, gibt man auch diese leichten Herzens ab. Ja, man ist nicht abgeneigt, der im Ausbau begriffenen Nachbarschale Elektronen zu entziehen. Auf dieser Tatsache beruht die Fähigkeit dieser Elemente, positive Metallionen zu bilden. So kann z. B. Mangan zwei-, drei-, vier-, sechs-, ja sogar siebenwertig sein, und zwar bei positiver Ladung der Ionen.

Das gleiche Bild ist auch in den folgenden Perioden des Periodensystems der Elemente zu beobachten. Es verdeutlicht uns, weshalb es so viele Metalle gibt und weshalb sie einander mehr ähneln als die Nichtmetalle.

**Etwas reimt sich nicht** Hat man je von sechswertigem Sauerstoff oder von siebenwertigem Fluor gehört? Wir wollen keineswegs als Pessi-

misten gelten, doch sind wir der Überzeugung, die Chemie wird es mit derartigen Sauerstoff- oder Fluorionen niemals zu tun haben.

Für Sauerstoff und Fluor ist es nicht vorteilhaft, sofort eine so große Zahl von Elektronen abzugeben. Es fällt ihnen leichter, sich zwei Elektronen bzw. eines anzueignen und auf diese Weise ein stabiles Elektronenoktett zu bilden. Daher kennen wir sehr wenige Verbindungen, in denen Sauerstoff eine positive Wertigkeit aufweist. Es gelang zwar, das Oxid  $F_2O$  herzustellen. Hier ist Sauerstoff positiv zweiwertig. Jedoch fällt dieses Ereignis schon in den Bereich der chemischen Exotik. Eine Seltenheit sind auch Verbindungen des positivwertigen Fluors.

In der Hausordnung des großen Gebäudes ist ein wichtiger Punkt vorgesehen: Die positive Höchstwertigkeit des Elements hat mit der Nummer der Gruppe identisch zu sein, in der es angesiedelt ist.

Sauerstoff und Fluor verstoßen gegen diese Ordnung. Dennoch haben sie eine ständige Aufenthaltsgenehmigung für die sechste bzw. siebente Gruppe. Niemand hatte bisher daran gedacht, sie dort anzusiedeln. Denn ihr chemisches Verhalten entspricht in allem anderen dem Gebaren ihrer schwereren Nachbarn aus den anderen Stockwerken dieser Gruppen.

Selbstverständlich stimmt etwas nicht. Die Chemiker sind sich dessen wohl bewußt, doch sie erachten es als nicht wesentlich. Denn der Aufbau des Periodensystems wird durch die jetzige Einordnung des Sauerstoffs und des Fluors nicht beeinträchtigt.

Leider ergab sich eine Schwierigkeit ganz anderer Art, etwas, was sich nicht reimte. Es war von ausschlaggebender Bedeutung, mit diesem Problem fertigzuwerden.

Im Mittelalter wurden in Bergwerken bisweilen recht eigenartige Erze entdeckt. Auf's Haar gleichen sie Eisenerzen. Jedoch niemandem gelang es, daraus Eisen zu gewinnen. Die Bergleute waren der Überzeugung, an dem Mißlingen ihrer



Bemühungen seien geheimnisvolle Kräfte schuld, neckische Kobolde oder der böse Geist „Nikkel“, der sich über sie lustig machen wollte. In der Folge gelangte man zu einer Erklärung für diese Erscheinung: Kein überirdisches Wesen hatte die Hand im Spiel — die Erze waren nicht eisenhaltig. Sie enthielten zwei andere, eisenähnliche Metalle, die man, in Erinnerung

an den alten Aberglauben, auf die Namen Kobalt und Nickel taufte.

In den gleichen grauen Zeiten des ausgehenden Mittelalters hatten spanische Eroberer in Südamerika, am Ufer des Flusses Platino del Pino eine eigenartige metallische Substanz entdeckt. Sie glänzte, war schwer und in keiner Säure löslich. Sie nannten sie Platin („Silberchen“). Drei Jahrhunderte später stellte es sich heraus, daß Platin in der Natur stets fünf Begleiter hat: Ruthenium, Rhodium, Palladium, Osmium und Iridium. Es war schwer, diese sechs seltenen Metalle voneinander zu unterscheiden. Dieser Umstand verschaffte ihnen einen gemeinsamen Beinamen: Platinmetalle.

Es war an der Zeit, sie im großen Gebäude des Periodensystems unterzubringen.

Wer nun etwa eine besonders spannende Lektüre über die großen und kleinen Schwierigkeiten erwartet, die sich den Chemikern bei dem Versuch entgegenstellten, wird nicht auf seine Kosten kommen. Alles verlief wie am Schnürchen. Denn alles erwies sich als sehr einfach.

**Über Eigenartigkeit in der Baukunst** Wir stellen uns ein großes, modernes Bauwerk vor, das aus typisierten Sektionen besteht, die einander wie ein Ei dem anderen gleichen. Bloß eine einzige Sektion sieht anders aus, als ob sie ein anderer Baumeister entworfen hätte, mit eigenwilliger Phantasie.

Wahrscheinlich werden wir in Wirklichkeit nie ein solches Gebäude zu Gesicht bekommen.

Das Periodensystem der Elemente jedoch stellt einen solchen eigenartigen Bau dar. Eine seiner Sektionen wurde von Mendelejew auf recht originelle Weise entworfen. Es soll gleich hinzugefügt sein: Er war dazu genötigt.

Diese Sektion ist die achte Gruppe. Jeweils drei Elemente wohnen hier übereinander. Aber wir treffen sie nicht auf jedem Stockwerk, sondern nur in den großen Perioden der Tabelle. Zwischen den bewohnten Räumen der Etagen befinden sich also leere Kammern. In der einen Etage sind Eisen, Kobalt und Nickel untergebracht, in den zwei anderen Perioden die Platinmetalle.

Mendelejew bemühte sich sehr, für sie eine geeignetere Unterkunft zu finden. Doch es gab keine bessere, und so sah er sich gezwungen, eine zusätzliche Gruppe, die achte, an das Periodensystem der Elemente anzubauen, weil bis dahin die siebte, in der die Halogene ihr Domizil haben, die letzte war.

Doch die Ordnungszahl ist in diesem Falle nur Formsache. Eine positive Achtwertigkeit ist in der achten Gruppe Ausnahme und keine Regel. Sogar eine sehr seltene Ausnahme. Nur Ruthenium und Osmium bemühen sich, im Sinne der Vorschrift zu handeln, allerdings ohne großen Erfolg: Man kennt nur die wenig stabilen Oxide —  $\text{RuO}_4$  und  $\text{OsO}_4$ .

Alle anderen Metalle erwiesen sich als unfähig, solche Höhen zu erklimmen, obwohl die Forscher ihnen dabei behilflich sein wollten. Versuchen wir nun gemeinsam, den Schlüssel zur Lösung des Rätsels zu finden.

Vor allem sei folgendes in unser Beobachtungsfeld einbezogen: Platinmetalle legen keine Bereitschaft zu chemischen Reaktionen an den Tag (deshalb verwenden die Chemiker gern Platingefäße für ihre Experimente). Platin und seine Mitbrüder gebärden sich also unter den Metallen ähnlich wie die Edelgase. Seit geraumer Zeit tragen sie deshalb den Titel „die Edlen“. In der Natur kommen sie nur in gediegener, ungebundener Form vor. Ihre Eigenschaften sind offensichtlich ein Ausdruck ihrer besonderen „Reinheit“.

Nehmen wir zum Vergleich das Eisen. Gewöhnliches Eisen hat das Gebaren eines Elements von mittelmäßiger chemischer Aktivität. In reinem Zustand ist es recht stabil.

(Gibt das übrigens keinen Anlaß zu Überlegungen? Vielleicht zeichnen sich nicht nur Metalle, sondern auch manche anderen Elemente in hochreinem Zustand durch große Resistenz gegenüber chemischen Einwirkungen aus?)

Ihre „edle“ Natur haben die Platinmetalle nicht der äußersten Elektronenschale ihrer Atome zu verdanken, sondern der nächsten, vom Atomkern aus gesehen, also der vorletzten.

Dieser fehlt nur ein Geringes zum kompletten Ausbau, zur vollen Achtzehner-Elektronenbesetzung. Die Achtzehner-Elektronenschale stellt eine genügend stabile Konstruktion dar. Daher sind Platinmetalle nicht gewillt, Elektronen abzugeben. Zur Aufnahme zusätzlicher sind sie nicht befähigt: Sie sind ja Metalle. Die „Unentschlossenheit“ der Platinmetalle läßt sich also aus diesem Sachverhalt erklären.

Dennoch gibt es keine restlose Übereinstimmung zwischen dieser achten Gruppe und der dem Periodensystem der Elemente eigenen inneren Logik. Um der Sache Herr zu werden, schlugen einige Chemiker schließlich vor, die achte und die nullte Gruppe zu vereinigen. Die Edelgase würden auf diese Weise die hauptsächlichste Nebengruppe bilden, die zum Dreierbund zusammengeschlossenen Elemente ergäben eine zusätzliche Nebengruppe. Tatsächlich wurden bereits Tabellen mit einer solchen rechtsseitigen strukturellen Anordnung der Elemente aufgestellt. Inwieweit dieses Unterfangen berechtigt ist, wird die Zukunft zeigen.

Der Begriff Nullgruppe hat im Hinblick auf Krypton, Xenon, Neon und Radon seine Berechtigung verloren. Während bereits in den zwanziger Jahren mit Krypton und Xenon und 1938 mit Neon und Radon sogenannte Einschlußverbindungen (mit Wasser unter hohem Druck) zustandekamen, gelang es inzwischen, auch echte Valenzverbindungen der Edelgase herzustellen. Was Helium anbelangt, so sind bisher noch keinerlei chemische Verbindungen erzielt worden, die das Resultat klassischer chemischer Reaktionen wären. Dafür gelang es aber, Heliumverbindungen (Heliumfluorid) durch Kernumwandlungen zu erzeugen. Von einer Reaktionsfähigkeit der „Edelgase“ kann man deshalb nur bedingt sprechen.

**Die sehr zahlreichen Geschwister** Man nennt sie Lanthaniden oder Seltenerdmetalle. Sie erhiel-

ten diesen Sammelnamen, weil sie — insgesamt sind es 14 an der Zahl — „lanthanartig“, d. h. dem Lanthan ähnlich sind und einander wie ein Ei dem anderen gleichen. Infolge dieser erstaunlichen chemischen Ähnlichkeit wurden sie in einer gemeinsamen Zelle untergebracht, in der Lanthanzelle mit der Ordnungszahl 57.

Liegt hier kein Verstoß gegen die Hausordnung vor? Nach der Ansicht Mendelejews und zahlreicher anderer Forscher kommt ja im Periodensystem der Elemente einem jeden Grundstoff ein ganz bestimmter Platz zu.

Im gegebenen Falle jedoch haben sich ganze fünfzehn Bewohner mit einem Gemeinschaftsraum zu begnügen, alle sind Elemente der dritten Gruppe und der sechsten Periode.

Könnte man sie nicht voneinander besser unterscheiden und dann in andere Gruppen umziehen lassen?

Der Versuch wurde von zahlreichen Chemikern, ja von Dmitri Iwanowitsch Mendelejew selber unternommen. Man siedelte Zr in die vierte Gruppe um, Praseodym in die fünfte, Neodym in die sechste und so weiter. Jedoch entbehrte eine solche Umsiedlung jeglicher Logik. Im Periodensystem sind in den Haupt- und Nebengruppen stets sich einander ähnelnde Elemente untergebracht. Zr hatte kaum etwas mit Zirkonium gemein, Praseodym und Neodym waren für Niob und Molybdän Fremdlinge. Auch die anderen seltenen Erden oder Seltenerdmetalle (mit diesem Sammelnamen werden Lanthan und die Lanthaniden bezeichnet) fanden in den ihnen zugeteilten Gruppen keine Verwandten. Sie

selber jedoch ähneln sich untereinander wie Zwillinge.

Als man den Chemikern die Frage stellte, welcher Platz den Lanthaniden in der Tabelle gebühre, setzten sie eine verdutzte Miene auf. Was hätten sie auch sagen können — sie konnten ja noch nicht den Grund für die frappante Ähnlichkeit dieser Elemente.

Die Erklärung erwies sich als ziemlich einfach. Es scheint im Periodensystem der Elemente Gruppen von Elementen zu geben, die einen recht eigenartigen Aufbau der Atome besitzen. Die aufgenommenen Elektronen werden nicht in die äußerste Schale der Atomhülle eingeordnet, auch nicht in die vorletzte, obwohl in beiden Schalen noch genügend Platz wäre. In Übereinstimmung mit strengen physikalischen Gesetzen dringen sie in die kernnähere nächste Schale ein (die drittletzte, von außen gezählt). Hier fühlen sie sich heimisch. Unter keinen Umständen wollen sie diesen Ort wieder aufgeben, und nur in äußerst seltenen Fällen nehmen sie an chemischen Reaktionen teil.

Entsprechend ihrer Stellung im Periodensystem sind die Lanthaniden (in ihren Verbindungen) in der Regel dreiwertig.

Daß es ausgerechnet vierzehn Lanthaniden sind, ist auch nicht von ungefähr. In der drittletzten Außenschale, die ausgebaut wird, gibt es beim Lanthan 14 „freie“, bislang noch unbesetzte Plätze.

Das ist auch der Grund dafür, daß die Chemiker alle Lanthaniden neben Lanthan in einer Sammelzelle unterzubringen vermochten.

**Das Reich der Metalle und seine Paradoxa** Über 80 Elemente im Periodensystem sind Metalle. Im großen und ganzen ähneln sie einander mehr als die Nichtmetalle. Und dennoch: Auch hier gibt es manche Überraschung.

Beispielsweise kann allein schon die Frage nach der Farbe der verschiedenen Metalle zu langen Diskussionen führen.

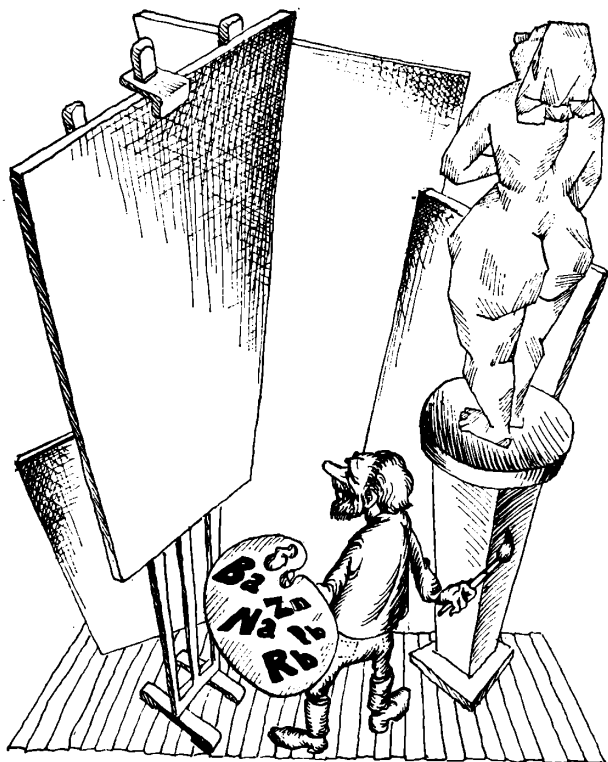
Das Wissen der Metallurgen reicht nur zu der Feststellung: Es gibt Eisenmetalle, also Schwarzmehalle, und es gibt Buntmetalle. Zu den Schwarzmehallen gehört Eisen und seine Legierungen, zu den Buntmetallen zählen alle anderen, mit Ausnahme der Edelmetalle Silber, Gold, Platin und der anderen Platinmetalle.

Diese Einteilung ist grob. Die Metalle selber lehnen sich gegen eine solche Gleichmacherei aufs entschiedenste auf.

Jedes Metall hat einen besonderen Farbton. Die schwarze, matte oder silberne Grundfärbung weist stets einen besonderen Unterton auf. Davon konnten sich die Wissenschaftler bei der Untersuchung von Reinstmetallen überzeugen. Manches Metall, das der Luft längere Zeit ausgesetzt ist, bedeckt sich früher oder später mit einer feinen Oxidschicht, so daß die Grundfarbtönung nicht mehr wahrnehmbar ist. Reine Metalle weisen eine reiche Farbskala auf. Das geübte Auge unterscheidet Metalle mit einem Stich ins satte Blau, ins Himmelblau, ins Grün; Metalle mit einem rötlichen oder gelblichen Schimmer oder solche, deren Farbton von einem düsteren Grau bestimmt wird, oder auch Metalle, deren Oberfläche silbern gleißt und die Strah-

len der Sonne, einem Spiegel gleich, zurückwirft.

Die Farbtonung des Metalls hängt von vielen Faktoren ab, unter anderem auch von der Art



seiner Verarbeitung. Ein und dasselbe Metall sieht anders aus, wurde es durch Sintern ein-

zelner Metallkörner gewonnen oder aber zu Stangenform verarbeitet.

Nach ihrem Gewicht unterscheidet man Leichtmetalle, Schwermetalle und mittelschwere Metalle.

Unter diesen Gewichtskategorien gibt es beachtliche Spitzenleistungen. Nennen wir nur einige Beispiele: Lithium, Natrium und Kalium gehen im Wasser nicht unter. Sie sind leichter als Wasser. Lithium z. B. ist fast halb so dicht wie Wasser, dessen Dichte 1 beträgt. Wäre Lithium nicht so reaktionsfreudig, ergäbe es einen herrlichen Werkstoff für verschiedenartige Konstruktionen. Stellen wir uns einmal ein aus Lithium gefertigtes Wasserfahrzeug oder einen Kraftwagen aus Lithium vor. Sie würden sogar von einem einzigen Menschen gehoben und getragen werden können. Leider legt die Chemie gegen die verlockende Möglichkeit ein Veto ein. Lithium verbindet sich sehr rasch mit Luft und Wasser. Dabei bildet sich ein Stoff, der keinerlei mechanische Festigkeit mehr besitzt.

Allerdings ist Lithium in den letzten Jahren zu einem sehr gesuchten Element geworden. Die Produktion dieses Metalls ist in zwanzig Jahren um das Fünfzigfache gestiegen. Das liegt wohl daran, daß schon geringe Zuschläge des sehr verbindungsfreudigen Lithiums zu anderen Metallen deren Festigkeit, Säure- und Laugenbeständigkeit beträchtlich erhöhen. Außerdem gibt es eine ganze Reihe spezieller Anwendungen, die geradezu erstaunlich sind. Eine Lithium-Wasserstoff-Tablette (Lithiumhydrid) in den Futter-

stoff einer Schwimmweste eingenäht, entwickelt bei der Berührung mit Wasser automatisch Wasserstoff, der die Schwimmweste aufbläst. Weitere Lithiumverbindungen reinigen die Luft in U-Booten oder Weltraumschiffen, sie werden bei der Produktion von Spezialgläsern verwendet oder auch in der Medizin eingesetzt.

Osmium ist unter den Metallen der Rekordhalter im Schwergewicht. Ein Kubikzentimeter dieses Edelmetalls wiegt 22,6 g. Setzt man einen Osmiumwürfel auf eine Waage, müßte man, um Gleichgewicht zu schaffen, in den anderen Teller drei Messingwürfel oder zwei Würfel Blei oder vier Würfel Yttrium von gleicher Größe legen. Durch hohe Dichten zeichnen sich auch die nächsten Nachbarn des Osmiums aus: Iridium ( $22,4 \text{ g/cm}^3$ ) und Platin ( $21,5 \text{ g/cm}^3$ ). Die Edelmetalle sind auch die schwersten Metalle.

Von der Härte des Metalls hört man in vielen Redewendungen. Ein willensstarker, prinzipienfester Mensch besitzt beispielsweise einen „eisernen“ Willen. Doch im Reiche der Metalle liegen die Dinge etwas anders.

Eisen wird hier keineswegs als Muster der Härte betrachtet. Die Siegespalme gebührt dem Chrom. Mit dieser Eigenschaft kommt es nämlich dem Diamanten nahe. Übrigens stößt man hier auf ein Paradoxon: Unter den chemischen Elementen haben nicht etwa die Metalle den Rekord für Härtewerte inne. Auf der relativen Härteskala gebührt Kohlenstoff (als Diamant) und dem kristallisierten Bor der erste Platz. Eisen — so seltsam es auch klingen mag — ist

eher ein Weichmetall, es ist halb so weich wie Chrom. Und unsere Leichtgewichtler, die Alkalimetalle, sind fast so weich wie Wachs.

**Metalle können Flüssigkeiten sein** Alle Metalle treten in festem Aggregatzustand auf. Das ist eine allgemeingültige Regel, obzwar der Festigkeitswert verschieden ist. Doch keine Regel bleibt ohne Ausnahme.

Einige Metalle stellen Flüssigkeiten dar oder geraten leicht in flüssigen Zustand. Gallium- oder Zäsiumkörnchen, die ja sehr weich sind, würden beispielsweise in der Hand schmelzen, denn ihr Schmelzpunkt liegt etwas unterhalb  $30^{\circ}\text{C}$ . Frankium, das bislang als Reinmetall noch nicht gewonnen werden konnte, würde bereits bei Zimmertemperatur flüssig werden. Das allorts bekannte Quecksilber ist das klassische Beispiel eines flüssigen Metalls. Sein Gefrierpunkt liegt bei  $-39^{\circ}\text{C}$ , weshalb es für verschiedenartigste Thermometer zum Einsatz gelangt.

In dieser Hinsicht hat das Quecksilber allerdings einen respektablen Konkurrenten: das Gallium. Der Siedepunkt des Quecksilbers liegt bei  $357^{\circ}\text{C}$ . Quecksilber-Thermometer eignen sich deshalb nicht zur Messung sehr hoher Temperaturen. Um Gallium in Dampf zu verwandeln, ist aber immerhin eine Temperatur von  $2300^{\circ}\text{C}$  nötig. Kein anderes Metall vermag so lange in flüssigem Zustand zu verharren, kann eine so breite Spanne zwischen dem Schmelz- und dem Siedepunkt aufweisen. Gallium spielt deshalb

den „rettenden Engel“ bei der Herstellung von Thermometern für hohe Temperaturen.

Kann ein Metall unter normalen irdischen Bedingungen auch gasförmig sein? Die Wissenschaftler haben folgende Annahme theoretisch begründet: Bestünde ein Analogon des Quecksilbers (also ein Element der Ordnungszahl



112, ein auf Erden noch unbekannter Bewohner des obersten Stockwerks im großen Gebäude des Periodensystems), würde unter normalen Bedingungen sein natürlicher Aggregatzustand gasförmig sein. Es wäre ein Gas, dem die chemischen Eigenschaften des Metalls eigen sind. Wird es jemals möglich sein, dieses einmalige Element nachzuweisen oder künstlich zu erzeugen?

Bleidraht schmilzt in der Flamme eines Streichholzes. Ins Feuer geworfene Bleifolie verwandelt sich im Nu in einen Tropfen flüssigen Bleis. Um jedoch Wolfram, Tantal oder Rhenium in flüssigen Zustand zu versetzen, muß man die Temperatur auf über  $3000^{\circ}\text{C}$  erhöhen. Die meisten Metalle würden bei dieser Temperatur längst sieden oder schon verdampft sein. Wolfram besitzt jedoch einen Schmelzpunkt von  $3410^{\circ}\text{C}$ . Daher wird der Faden einer Glühlampe aus Wolfram oder auch aus Rhenium (Schmelzpunkt  $3200^{\circ}\text{C}$ ) gefertigt.

Der Siedepunkt einiger Metalle (Nitride) erreicht enorm hohe Temperaturwerte. So kommen Hafniumverbindungen erst bei  $5400^{\circ}\text{C}$  zum Sieden. Sie erreichen damit beinahe die an der Sonnenoberfläche, der sogenannten Photosphäre, herrschende Temperatur.

**Ungewöhnliche Verbindungen** Welches war die erste chemische Verbindung, die der Mensch zielbewußt herstellte?

Wir wollen es wagen, eine Vermutung auszusprechen: Die erste Substanz, die vom Menschen künstlich erzeugt wurde, kann die Verbindung zweier Metalle gewesen sein, von Kupfer und Zinn oder auch von Kupfer und Blei. Das Beiwort „chemische“ haben wir absichtlich nicht vorangestellt, denn die Verbindung von Kupfer und Zinn, die allgemein bekannte Bronze, wird durch Zusammenschmelzen der einzelnen Komponenten erzeugt. Eine solche „Verbindung“ nennt man Legierung.

Das Gefüge der Verbindungen von Metallen mit

Nichtmetallen wird normalerweise durch die Wertigkeit der Elemente, die zu den Komponenten zählen, bestimmt. So enthält z. B. ein Molekül Kochsalz positiv einwertiges Natrium und negativ einwertiges Chlor. Im Ammoniakmolekül  $\text{NH}_3$  ist ein dreifach negatives Stickstoffatom an drei positiv einwertige Wasserstoffatome gebunden.

Verbindungen eines Metalls mit einem anderen (man nennt sie intermetallische) sind üblicherweise dem Wertigkeitsgesetz nicht unterworfen, da es sich hier meist um ein Zusammenschmelzen handelt. Ihre Zusammensetzung wird deshalb nicht von der Wertigkeit der mitwirkenden Elemente beherrscht. Aus diesem Grunde sehen auch die stöchiometrischen Formeln von Intermetallverbindungen ziemlich merkwürdig aus. Beispiele dafür sind:  $\text{MgZn}_5$  oder  $\text{KCd}_7$  oder  $\text{NaZn}_{12}$ . Ein und dasselbe Metallpaar kann unter Umständen mehrere intermetallische Produkte erzeugen. So ergibt das Natrium-Blei-Paar neun recht erstaunliche Gebilde.

In der Regel kommt es zu einer Wechselwirkung zwischen geschmolzenen Metallen. Doch nicht immer ergeben die Schmelzen chemische Verbindungen. Bisweilen wird ein Metall im anderen aufgelöst. Es entsteht eine homogene Mischung unbestimmter Zusammensetzung, die durch eine chemische Formel nicht wiedergegeben werden kann. Eine solche Mischung nennt man eine feste Lösung.

Wieviel Legierungen mag es geben? Niemand hat sich bislang die Mühe gemacht, zumindest orientierungshalber zu errechnen, wie viele bereits

bekannt sind oder wie viele überhaupt gewonnen werden können. Vermutlich kann man auch hier, wie im Reiche der organischen Verbindungen, mit Millionen rechnen.

Es gibt Legierungen, an denen zumindest ein Dutzend Metalle teilnehmen, wobei jedes dieser Elemente auf eigene Art die Eigenschaften der Legierung beeinflußt. Man kennt auch Bimetall-Legierungen. Je nach dem Mengenverhältnis der Komponenten kann man unterschiedliche Eigenschaften der Mischmetalle erzielen.

Die einen Metalle sind äußerst legierungswillig, und sie lassen sich in jedem beliebigen Mengenverhältnis miteinander verbinden. Beispiele dafür sind Bronzen als Kupferlegierungen mit einem hohen Kupfergehalt sowie Messing als Kupfer-Zink-Legierung. Andere Metalle sind demgegenüber legierungsscheu, sie wollen unter keinen Umständen ein „Bündnis“ eingehen. Das trifft z. B. auf Kupfer und Wolfram zu. Wissenschaftlern gelang es zwar, mit diesen Metallen eine Legierung herzustellen, jedoch geschah dies auf etwas ungewöhnlichem Wege, nämlich im Verfahren der sogenannten Pulvermetallurgie, d. h. durch thermisches Verpressen von Kupfer- und Wolframpulver.

Es gibt Legierungen, die bei Zimmertemperatur flüssig sind. Andere wiederum zeigen sich außerordentlich hitzebeständig. Sie werden deshalb vor allem in der Weltraumtechnik verwendet. Es gibt Mischmetalle, die nicht einmal von den stärksten chemischen Agenzien zerstört werden können und schließlich auch solche, die einen

Härtegrad besitzen, der beinahe dem des Diamanten gleichkommt.

**Der erste Kybernetiker in der Chemie** Zahllos sind die Fähigkeiten kybernetischer Anlagen. Sie können Schach spielen, das Wetter vorausagen, sogar erkunden, was im Schoße ferner Sterne vor sich geht, oder auch mathematische Berechnungen von kaum vorstellbarer Schwierigkeit ausführen. Man muß es „nur“ verstehen, ein richtiges Programm für ihre Tätigkeit aufzustellen. Immer enger wird auch das Freundschaftsbündnis der Kybernetik mit der Chemie. Es gibt beispielsweise vollautomatisierte Produktionssysteme, deren Produktionsablauf von Rechenanlagen gesteuert wird. Mit Hilfe kybernetischer Maschinen modelliert der Wissenschaftler heute bereits eine ganze Reihe chemischer Vorgänge, so daß deren Verlauf dem Forscher genau bekannt ist, noch ehe er zu experimentieren beginnt.

Jedoch verfügen die Chemiker darüber hinaus über eine besondere „kybernetische Anlage“. Erfunden wurde sie vor etwa einhundert Jahren, also zu einer Zeit, als der Begriff Kybernetik noch nicht im Sprachgebrauch der Menschen üblich war.

Diese erstaunliche Anlage ist das Periodensystem der Elemente. Dank diesem System war es den Forschern möglich, das zu vollbringen, wozu sich selbst die Mutigsten bis dahin nicht erküht hatten — das Bestehen von chemischen Elementen vorauszusagen, von Elementen, die bis dahin weder in der Natur nachgewiesen noch

im Labor gewonnen worden waren. Mit der Voraussage war die Sache jedoch nicht abgetan. Das Periodensystem lieferte obendrein Angaben über den Charakter der Unbekannten. Es war möglich, sie als Metalle oder als Nichtmetalle zu bezeichnen. Waren sie schwer wie Blei oder leicht wie Natrium? In welchen Erzen und Mineralen der Erdkruste muß nach den Unbekannten gefahndet werden? Auf diese und andere Fragen gab diese „kybernetische“ Anlage, das von Mendelejew aufgestellte System, eine Antwort.

Im Jahre 1875 machte der französische Forscher Paul Lecoq de Boisbaudran seinen Kollegen eine wichtige Mitteilung: Es sei ihm gelungen, in einer Zinkblende die Beimischung eines neuen Elements spektroskopisch nachzuweisen. Er fand ein glänzend weißes, weiches und dehnbares Körnchen eines neuen Elements. De Boisbaudran war ein erfahrener Wissenschaftler. Er unternahm es, die Eigenschaften des Galliums (er nannte das Element nach seinem Vaterland Gallia) allseitig zu erforschen. Wie es in derartigen Fällen schon üblich war, veröffentlichte er einen Artikel über seine Ergebnisse.

Nach einiger Zeit erhielt de Boisbaudran einen Brief aus Sankt Petersburg. Das Schreibstück war kurzgefaßt. Der Briefschreiber erklärte sich mit den veröffentlichten Ergebnissen des französischen Chemikers einverstanden, mit einer scheinbar unbedeutenden Einschränkung: Das spezifische Gewicht des Galliums müsse nicht 4,7, sondern etwa 6 sein. *D. Mendelejew* lautete die Unterschrift.

Unruhe bemächtigte sich des Forschers. War ihm der russische Titan der Chemie bei der Entdeckung des neuen Elements zugekommen?

Mendelejew hatte das Element nicht in den Händen gehalten, er hatte das Periodengesetz der Elemente zu Rate gezogen. Er wußte seit langem, daß ein noch unbekanntes Element den freigebliebenen, nun vom Gallium eingenommenen Platz früher oder später besetzen würde. Mendelejew hatte schon 1871 dem Element den Namen Eka-Aluminium gegeben und dessen Eigenschaften aufs Haar genau vorausgesagt. Er hatte schon damals in einer Zeitschrift mitgeteilt, dieses Metall müsse eine Dichte von etwa  $6 \text{ g/cm}^3$  haben. Bereits in der Hand eines Menschen werde es schmelzen. Und zu entdecken sei es vermutlich mit Hilfe der Spektroskopie.

So wurde Mendelejew zum ersten „Programmierer“ in der Chemie. Er sagte die Entdeckung noch unbekannter Elemente voraus, und er beschrieb mehr oder weniger erschöpfend deren Eigenschaften. Es waren die Elemente Skandium, Germanium, Polonium, Astat, Hafnium, Rhenium, Technetium, Frankium, Radium, Aktinium und Protaktinium.

**Wie Rhenium entdeckt wurde** Bereits 1871 hatte Mendelejew die Eigenschaften des Rheniums vorausgesagt. Er bezeichnete es als schweres Analogon des Mangans, als Dwimangan. Es sollte im Periodensystem der Elemente einen

Platz zwischen Tantal und Osmium einnehmen.

In der Natur fahndete man lange nach ihm. Wiederholt stieß man in Fachblättern auf die Mitteilung, man habe den Unbekannten aufgestöbert. Doch stets folgte ein Dementi. Wer weiß, vielleicht war das von Mendelejew beschriebene Element zu Ende des vorigen Jahrhunderts bereits einmal entdeckt worden. Der russische Forscher S. Kern bestand mit Hartnäckigkeit auf seiner Behauptung, es sei ihm 1887 gelungen, das mysteriöse Mangan-Analogon nachzuweisen. Er nannte es zu Ehren des großen englischen Chemikers Sir Humphrey Davy „Davium“, und er beschrieb sogar eine Reihe analytischer Reaktionen, die für das Element bezeichnend sein sollten. Trotz alledem: Davium, das neue Element, geriet bald in Vergessenheit. Doch als das Element 75 tatsächlich im Jahre 1925 nachgewiesen werden konnte, trat etwas Erstaunliches zutage: Die analytischen Reaktionen waren die gleichen, wie sie seinerzeit Kern beschrieben hatte.

Die Entdeckung des 75. Elements war ein glänzendes Zeugnis für den „prognostischen Charakter“ des Periodensystems der Elemente. Sie gelang den berühmten deutschen Chemikern Ida und Walter Noddack, denen der Physiker Otto Berg, ein Fachmann auf dem Gebiete der Röntgenspektren, tatkräftig zur Seite gestanden hatte. Anhand des Periodensystems der Elemente stellten die Forscher eine bis in kleinste Einzelheiten genaue Prognose auf. Sie erkannten sowohl die zu erwartenden Eigenschaften des 75.

Elements als auch seine hauptsächlichsten Verbindungen. Danach benannten sie jene Minerale, in denen man nach dem Element zu suchen hatte (ein Ehrenplatz in der Geschichte der Wissenschaft gebührt dem Ehepaar Noddack auch als Geochemikern). Bei ihrer Suche nach dem neuen Element mußten sie auch eine geeignete Nachweismethode wählen. Sie entschieden sich für die Röntgenspektralanalyse.

Der Umfang ihrer jahrelangen Forschungsarbeiten war beispielhaft. Er erforderte eine restlose Hingabe an die Wissenschaft. Etwa 1000 verschiedene Minerale und rund 60 Meteorite wurden einer sorgfältigen Analyse unterzogen. Im Jahre 1925 stellte sich der Erfolg ein. Die Wissenschaftler waren imstande, das Röntgenspektrum des neuen Elements nachzuweisen. Sie nannten das neuentdeckte Element Rhenium. Das Wort ist von Rhein (lateinisch „Rhenus“) abgeleitet. Erst 1928 gelang es dann, das Element rein darzustellen.

Weshalb war Rhenium so lange Zeit nicht zu fassen?

Nach der geochemischen Klassifikation gehört Rhenium zu den sogenannten verstreuten Elementen. Es ist nur in geringen Beimischungen in Mineralen vorzufinden, vor allem im Molybdänglanz und im Kolumbit. Dazu kommt, daß Rhenium ein sehr seltenes Element ist: In der Erdkruste sind je Tonne durchschnittlich 10 Milligramm des 75. Elements enthalten.

Aus einer Tonne rheniumhaltigen Erzes gewinnt man höchstens einige Gramm dieses Metalls.

Dennoch hat sich Rhenium inzwischen ein sehr

weites Einsatzgebiet erobert. Es wird in der Elektrotechnik verwendet, für die Gewinnung von säure- und hitzebeständigen Legierungen, sowie als Katalysator in der chemischen Industrie benötigt. Es findet in der Farbenphotographie Verwendung und hat sich neuerdings dank seiner besonderen Eigenschaften auch in der Raketentechnik bewährt.

### **Die „kybernetische Maschine“ stoppte plötzlich**

In den zwanziger Jahren unseres Jahrhunderts konnten sich Physik und Chemie grandioser Erfolge rühmen. Bereits in den ersten beiden Jahrzehnten unseres Jahrhunderts hatten diese wissenschaftlichen Disziplinen mehr erreicht, als im Laufe der ganzen bisherigen Menschheitsgeschichte.

Doch mit der Entdeckung von neuen chemischen Elementen ging es plötzlich nicht mehr weiter, obwohl es im Periodensystem noch Plätze gab, die zu besetzen waren: die Zellen mit den Ordnungszahlen 43, 61, 85 und 87.

Was waren das für eigenartige Unbekannte, für Fremdlinge, die sich gegen die Ansiedlung im großen Gebäude des Periodensystems offensichtlich sträubten?

Fremdling Nr. 1: Element der siebten Gruppe. Ordnungszahl 43. Sein Platz befindet sich zwischen Mangan und Rhenium. Es müßte also auch ähnliche Eigenschaften besitzen. War es demnach unter den Manganerzen zu suchen?

Fremdling Nr. 2: Dieses Element mit der Ordnungszahl 61 müßte ein allernächster Verwand-

ter der Seltenerden sein und demnach ihnen ähneln, ja zu ihnen gehören.

Fremdling Nr. 3: Als der ältere Bruder des Jods müßte dieses Element das schwerste unter den Halogenen sein. Für die Chemiker konnte es eine große Überraschung in sich bergen. Schwach metallische Eigenschaften waren nicht ausgeschlossen. War es Halogen und Metall zugleich, also ein Element mit Doppelgesicht? Im großen Gebäude des Periodensystems war für es die Wohnung Nummer 85 reserviert.

Der vierte Unbekannte war ein höchstinteressantes Element. Es müßte das sich am wildesten gebärdende, das tatendurstigste Metall sein, bereit, in der Hand zu schmelzen. Unter den Alkalimetallen wäre es das schwerste. Ihm gebührte der Platz 87 im Periodensystem der Elemente.

Für jeden der geheimnisvollen Fremdlinge wurde ein Steckbrief geschrieben. Doch ein Sherlock Holmes hatte es leichter als die Chemiker. Nach dem Missetäter fahndend, untersuchte der berühmte Kriminalist Zigarrenasche oder winzige Erdklümpchen von der Schuhsohle eines Verdächtigen. Doch was sind Sherlock Holmes' Methoden im Vergleich zu den exakten Verfahren der Chemiker. Es bereitet ihnen kaum noch Schwierigkeit, die allergeringsten Spuren noch unbekannter Substanzen nachzuweisen.

Aus Conan Doyles Darstellung wissen wir, daß jedes Unterfangen des gewitzten Geheimpolizisten von Erfolg begleitet war. Die Chemiker hatten Pech, obwohl sie die geheimnisvollen Unbekannten, die sich offensichtlich gegen ihren Einzug in die bereitgestellten Wohnungen wehr-

ten, mit allen Mitteln aufzuspüren suchten. Es nützte ihnen nichts. Überall gab es Enttäuschungen.

Man fahndete nach ihnen allerorts: In der Asche von Zigarren und in Ascheresten von Pflanzen, in den seltensten Mineralen, die der Stolz mineralogischer Sammlungen waren, in den Gewässern der Meere und Ozeane. Aber alles war vergebens.

Immer wieder kamen ins Schubfach „Ungelöste Probleme“ neue Berichte über mißlungene Fahnungen. Die chemischen Elemente 43, 61, 85 und 87 schienen auf geheimnisvolle Weise verschwunden zu sein. „Hoffnungsloser Fall!“ würde mancher Untersuchungsrichter dazu sagen.

Sollte die Natur uns einen Schabernack gespielt haben? Sollte sie diese Elemente einfach von der Liste der auf unserer Erde vorkommenden Substanzen gestrichen haben? Vielleicht aus reinem Übermut, den sich die Natur bisweilen zu erlauben scheint?

Schienen übernatürliche Kräfte die Hand im Spiele zu haben? Doch in der Welt gibt es keine Wunder! Dennoch blieben vier Wohnungen im großen Gebäude des Periodensystems nach wie vor leer.

Sie wurden erst besetzt, nachdem es die Wissenschaftler gelernt hatten, chemische Elemente synthetisch zu erzeugen.

**Wie ein chemisches Element in ein anderes umzusetzen ist** In unserer Umwelt verlaufen unzählige chemische Reaktionen. Alle werden von der Chemie der Elektronenschalen beherrscht.

Es kann zu einer Abspaltung oder zu einer Anlagerung von Elektronen kommen — das Atom wird zu einem negativ oder zu einem positiv geladenen Ion. Atome können sich zu Hunderten und Tausenden zu einem gigantischen Molekül zusammenfügen — stets bleiben sie Träger der dem jeweiligen Element innewohnenden Eigenschaften. Über zwei Millionen Verbindungen sind dem Kohlenstoff zu verdanken — in einer jeden, sei es das kohlen saure Gas  $\text{CO}_2$  oder ein kompliziert gebautes Antibiotikum, bleibt Kohlenstoff nach wie vor Kohlenstoff.

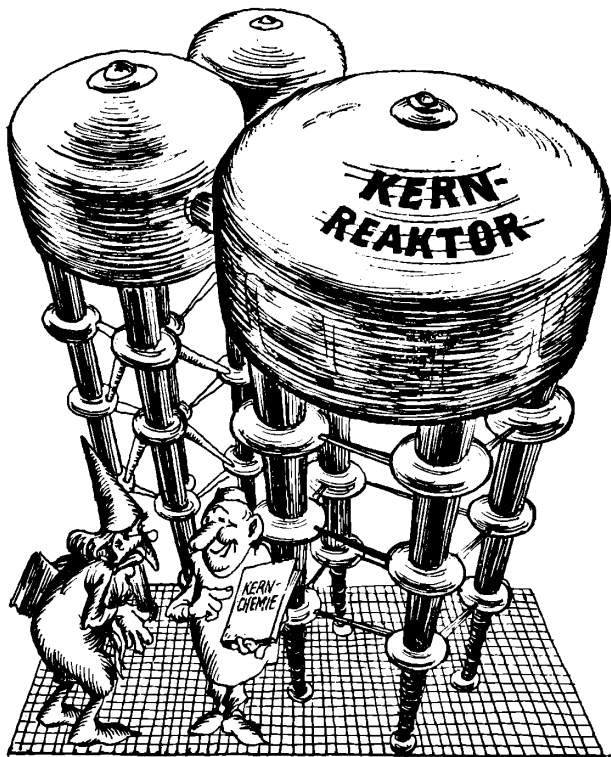
Um ein Element in ein anderes umzuwandeln, muß man den Aufbau des Atomkerns ändern, die Kernladung.

Zur Einleitung und zur Steuerung chemischer Vorgänge nutzen die Chemiker hohe Temperaturen und hohe Drücke; sie verwenden außerdem Katalysatoren, d. h. geringfügige Mengen von Zusatzstoffen, die den Vorgang beschleunigen.

Temperaturen von 1000 und mehr Grad Celsius sowie Drücke von hunderttausend Atmosphären sind jedoch nicht imstande, den Atomkern in seinem Aufbau zu ändern. Es ist auf diesem Wege unmöglich, ein Element in ein anderes umzuwandeln.

Zu einer solchen Leistung ist eine neue Disziplin der Wissenschaft befähigt — die Kernchemie. Dieses Teilgebiet der Atomwissenschaft wird im Hinblick auf die Erforschung des Aufbaus der Atomkerne, ihrer Eigenschaften und der Elementarteilchen im allgemeinen Kernphy-

sik genannt. Jedoch im Hinblick auf die Umwandlungen der Atomkerne mag auch die Bezeichnung Kernchemie zutreffen. Die Kernchemie wendet eigene Verfahren an.



Ihre „Temperatur- und Druckwerte“ sind Protonen und Neutronen, Kerne des schweren Wasserstoffisotops (Deuteronen) und Kerne der He-

liumatome (Alphateilchen), schließlich Ionen leichter Elemente, von Bor und Sauerstoff, von Neon und Argon. Zu den Apparaturen der Kernchemie gehören Kernreaktoren, die u. a. als Neutronenquelle dienen, sowie Beschleuniger — komplizierte physikalische Einrichtungen —, in denen die Teilchen auf hohe Geschwindigkeiten gebracht werden. Soll ein Teilchen, insbesondere das positiv geladene, wie ein Geschöß in einen Atomkern einfallen, so muß es über sehr hohe Energien verfügen. Es fällt ihm dann leichter, die abstoßende Wirkung der Kernladung zu überwinden. Die Kernchemie hat eigene Symbole. Jedoch kann die formelmäßige Darstellung ihrer Reaktionsgleichungen auch in der gleichen Art vorgenommen werden wie für „gewöhnliche“ chemische Gleichungen.

Dieser neuen Disziplin der Wissenschaft — der Kernphysik bzw. Kernchemie — ist die Besetzung der „freien“ Plätze im Periodensystem der Elemente zu verdanken.

Das Element 43 war bei der Aufstellung des Periodensystems und noch lange Jahre danach unbekannt. Dmitri Iwanowitsch Mendelejew nannte es Eka-Mangan, weil es sich nach seiner Meinung wie Mangan verhalten müsse. Alle Versuche, dieses Element rein darzustellen, blieben jahrzehntelang erfolglos, so daß bereits die Meinung aufkam, dieses Element existiere überhaupt nicht. Tatsächlich konnte die Atomphysik den Nachweis erbringen, daß das Element 43 nicht als stabiles Element vorkommt. Es ist deshalb auf Erden „ausgestorben“. Es müßte erst wieder künstlich hergestellt werden. Das

gelang im Jahre 1937 dem amerikanischen Physiker Ernest O. Lawrence mit Hilfe eines Zyklotrons, eines Gerätes, das schnelle geladene Elementarteilchen für Atomumwandlungen erzeugt. Der schnelle Strom der im Zyklotron beschleunigten Deuteronen stürzte auf ein Molybdänplättchen, das als sogenanntes Target (Zielscheibe) diente. Unbehindert, wie das Messer durch die weiche Butter, stießen die zielstrebigen Deuteronen durch die Elektronenhülle bis zum Kern vor. Dieser „Beschuß“ dauerte monatelang. Das aus einem Proton und einem Neutron aufgebaute Deuteron zerfiel, auf den Kern prallend, das Neutron flog heraus, das Proton blieb im Kern stecken. Auf diese Weise erhöhte sich die Kernladung um 1. Mit anderen Worten: Das Element 42 setzte sich in das Element mit der Ordnungszahl 43 um. Da dieses Element der Technik zu verdanken und das erste von Menschenhand, also künstlich, hergestellte Element war, erhielt es die Bezeichnung Technetium, von dem griechischen Wort „techné“ (Kunst) abgeleitet.

Ähnlich wie in der „gewöhnlichen“ Chemie ein und dieselbe Verbindung in verschiedenen Verfahren gewonnen werden kann, gelingt es in der Kernchemie, ein und dasselbe Element auf dem Wege verschiedenartigster Kernreaktionen künstlich zu erzeugen.

Im Jahre 1937 konnte Technetium nur in ganz winzigen Mengen gewonnen werden. Die Menschen haben es inzwischen erlernt, Technetium, das auf der Erde in der Natur nicht mehr vorhandene Element, kiloweise herzustellen. Das geschieht in der erstaunlichsten Fabrik der Welt.

im Kernreaktor. Hier wird die Energie der Uran-kernspaltung dank der Wirkung langsamer Neutronen erzeugt. Aus Kernspaltungsprodukten des Urans kann man beliebig viel Technetium gewinnen.

Die radioaktiven Isotope des Technetiums, deren Halbwertszeit einige Minuten bis mehrere hunderttausend Jahre beträgt, werden in der Technik vor allem als Inhibitoren (Hemmstoffe) zur Bekämpfung der Korrosion eingesetzt.

Urankerne zerfallen beim Beschuß mit Elementarteilchen in verschiedenartige Bruchstücke, ein jeder jeweils in zwei. (Nur selten ergibt die Spaltung drei Bruchstücke.) Die Trümmer stellen Atomkerne von Elementen aus der Mitte des Periodensystems dar.

Bei der Urankernspaltung fallen immerhin 30 chemische Elemente, von der Ordnungszahl 30 bis zur Ordnungszahl 64, als Spaltprodukte an. Darunter befindet sich auch Technetium sowie ein anderes recht eigenartiges Element, nach dem man die Erdrinde jahrzehntelang vergebens durchforscht hatte: Promethium, Bewohner der 61. Zelle im Periodensystem der Elemente.

Die Kernchemie stellte den Forschern aber auch zahlreiche Elemente zur Verfügung, die schwerer als Uran sind. Bei der Spaltung der Urankerne fliegen außer Bruchstücken auch zahlreiche Neutronen heraus, die von den ungespaltenen Kernen eingefangen werden können. Auf diese Weise kann es zu einer Synthese von Elementen mit der Ordnungszahl 93, 94 und so weiter kommen, also zur Synthese von „Transuranen“.

Die Kernchemie kennt bereits verschiedene Verfahren für die Erzeugung von chemischen Elementen. Es sind inzwischen 13 Transurane bekannt, 12 davon haben bereits ihren Namen. Es sind dies: Neptunium, Plutonium, Amerizium, Kurium, Berkelium, Kalifornium, Einsteinium, Fermium, Mendelewium, Nobelium, Lawrenzium und Kurtschatowium. Das Letztgenannte wurde von einer Gruppe sowjetischer Physiker unter Leitung von G. N. Fljorow im Jahre 1964 in Dubna synthetisch gewonnen. Demselben Forscherkollektiv scheint es auch gelungen zu sein, Einzelatome des Elements 105 künstlich zu erzeugen.

Es ist sehr schwierig, mit Transuranen zu experimentieren, denn viele Isotope dieser Elemente sind, kaum daß sie erzeugt worden sind, schon wieder zerfallen. In dieser Hinsicht kann man den Beruf des Chemikers mit kaum einem anderen vergleichen. Wie verduzt wäre wohl ein Maurer, wenn die am Vortag errichteten Mauern eines neuen Stockwerks plötzlich verschwunden wären? Doch so geht es heutzutage den Forschern, die sich mit dem Studium der chemischen Eigenschaften der Transurane befassen. Die meisten Isotope dieser Elemente sind äußerst instabil, ihre Lebenszeit ist durch Minuten, ja durch Sekunden und Sekundenbruchteile begrenzt. Hat es der Chemiker mit „gewöhnlichen“ Elementen zu tun, fühlt er sich nicht in den engen Rahmen der Zeit eingezwängt. Sind aber in seine Hände kurzlebige Vertreter des Periodensystems der Elemente geraten, namentlich schwere Transurane, müßte jede Minute For-

schungsarbeit eigentlich mit Gold aufgewogen werden. Nicht genug damit, daß das Forschungsobjekt im Nu verschwinden kann, stehen dem Forscher davon bloß klägliche Mengen zur Verfügung, bisweilen nur ein paar Atome.

Dieser Umstand erfordert besondere Forschungsmethoden. Dafür zuständig ist eine sehr junge Disziplin der Chemie, die Radiochemie oder die Chemie radioaktiver Elemente.

### **Tod und Unsterblichkeit im Reiche der Elemente**

Wie ein Archäologe festzustellen vermag, vor wieviel Jahrhunderten eine bronzene Verzierung oder ein irdenes Gefäß hergestellt worden sind, so versteht sich heutzutage ein Physiker bzw. Chemiker darauf, das Alter verschiedener Minerale und Gesteine in der Erdrinde zu bestimmen.

Es stellt sich dabei heraus, daß einige Minerale über viereinhalb Milliarden Jahre alt sind, also so alt wie die Erde selber.

Minerale setzen sich aus chemischen Elementen zusammen. Kann man daraus schlußfolgern, daß die chemischen Elemente unsterblich sind? Kann denn ein Element überhaupt sterben? Ist die Fragestellung nicht sinnlos? Der Tod ist ja das traurige Los der Lebewesen...

Doch nein, die Frage ist nicht sinnlos, wie es auf den ersten Blick vielleicht scheinen mag.

Es gibt eine interessante physikalische Erscheinung, die „Radioaktivität“ bezeichnet wird. Sie äußert sich darin, daß chemische Elemente (oder richtiger, die Kerne ihrer Atome) von selbst

„zerfallen“, indem sie unter Energieabgabe durch Strahlung von instabilen Atomen in stabilere Atome übergehen. Die einen Kerne senden Elek-



tronen (Betastrahlen) aus (es geschieht dies bei der Umwandlung von Kernneutronen in Protonen), die anderen sogenannte Alphateilchen (Heliumkerne), die dritten zerfallen in zwei unge-

fähr gleiche Teile unter Aussendung von Gammastrahlen. Man nennt diesen Vorgang „natürliche Radioaktivität“.

Sind alle Elemente radioaktiv? Nein, nicht alle, sondern vorwiegend jene, die am Ende des Periodensystems der Elemente zu finden sind. Zu den Radioelementen gehören, außer den leichteren Elementen Technetium und Promethium, alle Elemente von Polonium (Ordnungszahl 84) an. Von der Ordnungszahl 81 an besitzen alle Elemente eine natürliche Radioaktivität. Durch den radioaktiven Zerfall wandelt sich das Element in ein anderes um. Die radioaktiven Zerfallsreihen (es gibt drei für die natürlichen radioaktiven Elemente) können sehr lang sein.

Thorium und Uran ergeben am Ende der Zerfallsreihe stabiles Blei, wobei unterwegs ein gutes Dutzend radioaktiver Elemente entstehen und wieder zugrunde gehen.

Die radioaktiven Elemente sind von unterschiedlicher Lebensdauer. Das Leben der einen währt Dutzende Milliarden Jahre, ehe sie spurlos verschwunden sind, bei anderen ist die Lebensdauer durch Jahre, Tage oder Minuten, ja bisweilen durch Sekunden oder Sekundenbruchteile begrenzt. Die Lebensdauer der radioaktiven Elemente wird durch eine besondere Größe angegeben, die sogenannte Halbwertszeit. Innerhalb dieser Zeitspanne zerfällt die Hälfte der Atomkerne eines Elements.

Die Halbwertszeit für Uran und Thorium beträgt z. B. mehrere Milliarden Jahre.

Ganz anders aber ist es mit ihren Vorgängern

im Periodensystem der Elemente besteht, dem Protaktinium, Aktinium, Radium und Frankium, dem Radon, Astat und Polonium. Ihr Leben ist bedeutend kürzer. Polonium-210 hat eine Halbwertszeit von 138 Tagen, Astat-219 von 54 Sekunden, Aktinium-221 von nur 0,1 Sekunden.

Wie kommt es aber, daß es diese kurzlebigen Elemente überhaupt noch auf Erden gibt? Unser Planet ist etwa fünf Milliarden Jahre alt. In diesem kaum vorstellbaren Zeitraum hätten Radium, Aktinium und die anderen „strahlenden“ Gesellen längst verschwunden sein müssen. Doch sie existieren noch. In Mineralen der Erdkruste sind sie noch immer vorhanden, als halte die Natur unter ihren Schätzen einen Born des Lebens verborgen, der auch die chemischen Elemente „unsterblich“ macht.

Die radioaktiven Elemente verdanken trotz ihrer Kurzlebigkeit ihr heutiges Vorhandensein in der Erde vorhandenen Uran- und Thoriumvorräten. Solange es Uran und Thorium auf der Erde gibt, werden auch die Radioelemente immer wieder neu „geboren“. Uran und Thorium, die Patriarchen unter den radioaktiven Elementen, sind die Ausgangselemente langer Zerfallsreihen. Es entstehen nacheinander instabile Elemente, die die Zwischenstufen einer langen Zerfallsreihe bilden, bis schließlich stabiles Blei diese Wanderung beschließt. Daraus folgt, daß unter den chemischen Elementen zwei bedeutende Gruppen zu unterscheiden sind: die primären und die sekundären Elemente.

Zu den primären gehören alle nichtradioaktiven Stoffe sowie Uran und Thorium, deren Halbwertszeiten größer sind als die bisherige Lebensdauer der Erde. Sie waren demzufolge Zeugen der Entstehung des Sonnensystems. Die übrigen chemischen Elemente zählen zu den sekundären.

Doch dereinst wird der Zeitpunkt kommen, da auf der Erde einige Elemente „fehlen“ werden. Noch sind Uran und Thorium „ewige“ Quellen der sekundären Elemente, aber diese „Ewigkeit“ ist, wie alles im Weltall, relativ. Zu einem bestimmten Zeitpunkt, vielleicht in hundert Milliarden Jahren, werden auch sie vom Erdboden verschwunden sein. Und dann werden auch die instabilen Produkte ihrer radioaktiven Umwandlungen nicht mehr existieren.

**Eins, zwei, viele...** Mit wenigen Begriffen war das Zählvermögen des Urmenschen erschöpft. Er kannte zunächst alles in allem zwei Größen: „viel“ und „wenig“.

Diese Begriffe dienten noch vor hundert Jahren den Menschen zur Einschätzung der in der Schatzkammer Erde vorrätigen Elemente.

Der Gedankengang war ungefähr folgender: Blei, Zink und Silber haben in der Praxis breite Verwendung gefunden, sind also weitverbreitete Elemente. Es gibt viel Blei, viel Zink und viel Silber. Aber es gibt auch Metalle, die sehr selten auftreten. Was die Seltenerdmetalle (Lanthaniden) anbetrifft, so besagt schon der Name, daß sie in der Natur nur in geringen Mengen

vorhanden sind. So selten, wie ihr Name anzudeuten scheint, sind sie aber eigentlich nicht.

Die Überlegungen, die vor einhundert und mehr Jahren über das Vorhandensein von bestimmten Elementen angestellt worden sind, waren mehr oder weniger von der praktischen Erfahrung, nicht aber von exakten wissenschaftlichen Untersuchungen ausgegangen. Mit Sicherheit kann man behaupten, daß die Seltenerdmetalle in den irdischen Mineralen in nur unbedeutend geringeren Mengen enthalten sind als Blei, Zink und Silber zusammengenommen.

Die exakte Erfassung der „Vorräte“ an chemischen Elementen wurde von einer wissenschaftlichen Großtat eingeleitet: Der amerikanische Forscher Frank W. Clarke führte fünfeinhalbtausend chemische Analysen durch. Er untersuchte die verschiedensten Minerale. Sie entstammten tropischen und arktischen Gebieten. Sie hatten die unterschiedlichsten Wassergehalte. Viele von ihnen waren aus kleinen Seen im Urwald oder aus den Fluten des Stillen Ozeans emporgeholt worden. Clarke untersuchte Proben der verschiedensten Böden aus allen Weltteilen.

Zwei Jahrzehnte nahm diese gewaltige Arbeit in Anspruch. Frank W. Clarke und einigen anderen Forschern schuldet die Menschheit Dank für das Wissen über die Größe der irdischen Vorräte an chemischen Elementen, über die Verteilung der Stoffe in der Erdkruste.

Eine neue Disziplin der Wissenschaft, die Geochemie, entstand in unserem Jahrhundert. Die sowjetischen Forscher W. I. Wernadski und

A. J. Fersman gehörten zu ihren Begründern.

Folgendes stellte sich heraus: Die ersten 26 Vertreter des Periodensystems der Elemente vom Wasserstoff bis zum Eisen bilden praktisch die ganze Erdkruste, nämlich 99,7 % ihrer Masse. Nur mit kläglichen 0,3 % haben die übrigen 67 in der Natur vorkommenden Elemente daran Anteil.

Welches chemische Element ist nun das meistverbreitete auf Erden?

Eisen, Kupfer und Blei zum Beispiel werden seit Jahrtausenden vom Menschen genutzt. Ihre Vorkommen scheinen schier unerschöpflich zu sein. Dennoch sind sie nicht die Elemente, die am häufigsten vorkommen. Das meistverbreitete chemische Element ist der Sauerstoff. Legte man in die eine Schale einer imaginären Waage den irdischen Vorrat an Sauerstoff, in die andere alle anderen Elemente, so würde beinahe Gleichgewicht herrschen. Fast die Hälfte der die Erdkruste und die Erdoberfläche bildenden Elemente ist Sauerstoff. Er ist allgegenwärtig: im Wasser, in der Lufthülle, in zahlreichen Gesteinen, in jedem Tier und in jeder Pflanze. Und überall spielt er eine erstrangige Rolle.

Den vierten Teil des Festlands bildet Silizium, erster Grundbaustein der anorganischen Natur. Silizium ist nach Sauerstoff das verbreitetste Element.

Das Mengenverhältnis der Vorkommen anderer irdischer Elemente, bezogen auf die Gesamtmasse der Erdkruste, ergibt folgendes Bild: Aluminium 7,4%; Eisen 4,2%; Kalzium 3,3%; Na-

trium 2,4%; Kalium und Magnesium je 2,35%; Wasserstoff 1,0%; Titan 0,6%. Es gibt nur 15 Elemente, denen man fast in jedem Gestein begegnen kann. Alle anderen Elemente sind seltener.



Welches chemische Element ist nun in den geringsten Mengen vorhanden?

Selten sind die Vorkommen von Gold sowie von Platin und seinen Begleitern. Daher werden sie so sehr geschätzt. So selten das Gold auch ist, so war es doch das erste dem Menschen bekannte Metall. Und was das Platin anbelangt, so wurde es zu einem Zeitpunkt entdeckt, als von

Sauerstoff, Silizium oder Aluminium noch keine Rede war.

Diese Edelmetalle zeichnen sich durch eine einmalige Besonderheit aus: Sie kommen in der Natur nicht in Verbindungen vor, sondern nur in gediegener Form. (Zu ihrer Gewinnung ist also keinerlei Aufwand für ein Erschmelzen erforderlich.) Deshalb wurden sie auch schon in grauer Vorzeit oder wie Platin schon vor Jahrhunderten gefunden.

Dennoch kann man den Edelmetallen nicht einen so großen Seltenheitswert zusprechen, daß man sie zu den Elementen rechnen müßte, die am seltensten vorkommen. Die wenig ruhmvolle Auszeichnung, äußerst selten zu sein, erhielten sekundäre radioaktive Elemente. Mit voller Berechtigung könnte man sie „Element-Phantome“ nennen.

Die Geochemiker haben ihre Mengenwerte errechnet: die Poloniumvorkommen der Erde belaufen sich insgesamt auf 9600 t; die Radonvorkommen nur auf 260 t. Ganze 26 000 t würden die Aktiniumvorräte wiegen. Unter diesen Element-Phantomen sind Radium und Protaktinium wahre Giganten: Auf rund 100 000 t belaufen sich die Gesamtvorkommen. Und dennoch: Welch geringfügige Mengen im Vergleich zu den Gold- und Platinschätzen der Erde. Und es gibt sogar Elemente, die in so winzigen Spuren vorkommen, daß man darüber staunen muß, wie man sie überhaupt aufspüren konnte. Astat und Frankium als „Phantome“ zu bezeichnen ist nicht angängig — sie stellen fast etwas Unwirkliches dar: Die Gesamtmasse ihrer iridi-

schen Vorkommen ergibt einen Wert, der nur in Milligramm bzw. Gramm auszudrücken ist. Das wohl seltenste chemische Element auf Erden ist Astat: 69 mg sind in der gesamten festen Erdkrinde vorhanden. Diese Menge ließe sich in zwei bis drei Fingerhüten unterbringen.

Es hat sich herausgestellt, daß auch die ersten Transurane — Neptunium und Plutonium — irdische Wesen sind. Plutonium beispielsweise kommt als Produkt sehr seltener Kernreaktionen des Urans mit freien Neutronen zur Welt. Die Gesamtmenge dieses sehr seltenen Elements erreicht in der Erdkruste immerhin Hunderte und Tausende Tonnen. Neptunium allerdings ist erst vor noch nicht allzu langer Zeit in kaum wägbareren Mengen in Uranerzen festgestellt worden. Bei der Plutoniumgewinnung aus Uran in der Kerntechnik fällt Neptunium als Nebenprodukt an.

Über Promethium und Technetium, für deren Geburt gleichfalls das Uran verantwortlich ist, läßt sich kaum etwas sagen: Technetium wurde als künstliches Element in nur sehr winzigen Mengen nachgewiesen. Nach dem Promethium wurde lange Zeit gefahndet. Erst in neuester Zeit gelang es, unter den auf künstlichem Wege gewonnenen Spaltprodukten des Urans Promethium zu finden. Heute ist es möglich, innerhalb eines Monats immerhin einige hundert Gramm dieses Elements sozusagen als „Abfall“ der Kernreaktoren zu gewinnen.

**War die Natur in ihrem Handeln gerecht!** Heutzutage behaupten die Wissenschaftler, in jeder

beliebigen Probe eines Minerals seien alle in der Natur vorkommenden Elemente — allerdings in unterschiedlichem Mengenverhältnis — nachzuweisen. Wie kommt es nun, daß die einen Elemente in großen Mengen vorkommen, die anderen aber in kaum nachweisbaren?

Im Periodensystem der Elemente sind alle Stoffe gleichberechtigt. Ein jeder nimmt den ihm gebührenden Platz ein. Sobald jedoch von den irdischen Vorkommen der jeweiligen Elemente die Rede ist, ist es mit der Gleichberechtigung vorbei.

Die leichten Elemente in der Tabelle, zumindest die ersten dreißig, bilden die Hauptmasse der Erdkrinde. Doch auch unter ihnen herrscht keine Gleichheit. Die einen sind in größeren Mengen vorhanden, die anderen in geringeren. So zählen z. B. Bor, Beryllium und Skandium zu den äußerst seltenen Elementen.

Seitdem die Erde besteht, hat sich die Größe der Vorräte in gewisser Hinsicht geändert. Im Schwinden sind die Uran- und Thoriummengen begriffen — eine Folge der Radioaktivität. Ein Großteil der Gase und des Wasserstoffs hat sich verflüchtigt, ist in den Weltraum verschwunden. Jedoch das Allgemeinbild ist im wesentlichen unverändert geblieben. Die Erdkruste hat in ihrer allgemeinen Zusammensetzung eine relative Konstanz bewahrt.

Die Wissenschaftler stellten folgende Gesetzmäßigkeit fest: Die Verbreitung der chemischen Elemente in der Erdkrinde steht im umgekehrten Verhältnis zum Gewicht des Elements; sie nimmt beim Übergang von den leichten zu den mittel-

schweren und von diesen zu den schweren Elementen ab. Doch auch hier gibt es Ausnahmen. So ist das schwere Blei in bedeutend größeren Mengen vorzufinden als mancher Leichtgewichtler.

Warum ist das so? Weshalb sind die Vorkommen so ungleich? Hat die Natur einige chemische Elemente „akkumuliert“, während sie die Speicherung der anderen vereitelte?

Wir brauchen uns keinen spekulativen Betrachtungen hinzugeben. Auch auf diesem Gebiet gibt es Gesetzmäßigkeiten. Sie bestimmen das Mengenverhältnis der Elementenvorkommen auf der Erde. Allerdings müssen wir hinzufügen: Restlos aufgeheilt sind die Zusammenhänge noch nicht. Begnügen wir uns deshalb mit einigen Annahmen, indem wir uns ein wenig mit der Frage der kosmischen Elementenhäufigkeit beschäftigen.

Die chemischen Elemente haben nicht von jeher bestanden. Im Weltall vollzieht sich unaufhörlich an den verschiedensten Punkten ein den Ausmaßen nach mit nichts vergleichbarer Prozeß der Bildung, der Synthese von Elementen aus den Elementarteilchen und der Aufbau schwererer Elemente aus leichten. Die Sterngebilde sind kosmische Kernreaktoren, kosmische Beschleuniger.

Hier herrschen Temperaturen und Drücke ohnegleichen. Hier gebieten kernchemische Gesetze mit ungehemmter Elementargewalt. Hier ist das Reich kernchemischer Reaktionen, bei denen ein Element in ein anderes umgewandelt wird, leichte Elemente zu schwereren aufgebaut

werden. Entsprechend den unter diesen extremen physikalischen Bedingungen geltenden Gesetzmäßigkeiten bilden sich die einen Elemente leichter und demzufolge in größeren Mengen, die anderen schwerer, daher in geringerer Zahl. Es ist festgestellt worden, daß mit wachsender Atommasse die Zahl der aufbauenden Prozesse abnimmt, weil sich die abstoßenden Kräfte des Atomkerns auf geladene Teilchen ebenfalls vergrößern, so daß nur sehr energiereiche Teilchen, die allerdings in geringerer Zahl vorkommen, eine Kernumwandlung herbeiführen können. Neben Aufbauprozessen dieser Art gibt es aber auch Abbauprozesse, und zwar in Abhängigkeit von den bestehenden Temperaturen und Materiedichten.

Ausschlaggebend ist vor allem die Stabilität der Atomkerne. Die Kerne der Isotope leichter Elemente enthalten fast die gleiche Anzahl an Protonen und Neutronen, die deshalb ein recht stabiles Gerüst bilden. Leichte Kerne werden daher leichter aufgebaut als schwerere, für deren Bildung eine ganze Anzahl recht komplizierter Kernprozesse in Frage kommen. Wir konnten deshalb dieses Problem der Elemententstehung und der kosmischen Elementenhäufigkeit hier auch nur sehr vereinfacht darstellen. In der Natur herrscht im allgemeinen die Tendenz zur Bildung von Systemen mit maximaler Stabilität. Ihre Synthese vollzieht sich leichter als die sogenannter offener Systeme. Viel geringer jedoch ist ihre Bereitschaft zur Teilnahme an Kernreaktionen, bei denen Kerne mit hohen Ladungen zustandekommen. Bei diesen ist die

Neutronenzahl wesentlich größer als die Zahl der Protonen. Daher verfügen die Kerne mit mittleren und hohen Massen über keine besondere Stabilität. Sie werden deshalb leichter zum Spiel des „Zufalls“. Sie legen eine größere Bereitschaft zu Umwandlungen an den Tag. Sie können sich demzufolge nicht in allzu großen Mengen ansammeln.

Ein kernchemisches Gesetz besagt: Je höher die Kernladung ist, desto schwieriger ist der Aufbau des Elements.

In gewissem Sinne ist die chemische Zusammensetzung unserer Erde ein stummer Ausdruck jener Gesetzmäßigkeiten, die die Entstehung der Elemente „steuern“. Ehe diese Gesetzmäßigkeiten nicht restlos erkannt sind, kann auch keine völlige Klarheit darüber herrschen, weshalb die chemischen Elemente in der Natur in so unterschiedlichen Mengen vorkommen.

**Ein Weg, der in die Irre führte** In den achtziger Jahren des vorigen Jahrhunderts veröffentlichte eine ausländische Zeitschrift für Chemie eine interessante Nachricht. Ein in der wissenschaftlichen Welt wenig bekannter Mann teilte mit, es sei ihm gelungen, zwei neue Elemente zu entdecken. Er gab ihnen wohlklingende Namen: Kosmium und Neokosmium. Zu jener Zeit war die Entdeckung von Elementen eine Massenerscheinung. Mancher Forscher gab sich nicht einmal die Mühe, für den Neuentdeckten einen Namen zu finden, sondern er markierte ihn mit einem Buchstaben des griechischen Alphabets.

Bald stellte es sich heraus, daß sich der „Entdecker“ des Kosmiums und des Neokosmiums über diese Epidemie von Entdeckungen bloß hatte lustig machen wollen. Er hatte sich einen Aprilscherz erlaubt. Der Spaßvogel hieß Koßmann.

...Im Periodensystem der Elemente sind 104 Elemente verzeichnet, also 104 wahre Entdeckun-



gen. Doch neben dieser Liste gibt es noch eine andere, eine längere, mit mehreren hundert Bezeichnungen, ein Verzeichnis von Tot- und Fehlgeburten, von Scheinelementen, die ihr Auftreten Irrtümern, falschen Versuchen, ja bisweilen sogar der Gewissenlosigkeit eines Forschers zu verdanken hatten.

Es war ein langwieriger, dornenreicher Weg, der zur Entdeckung eines Elements führte. Bisweilen zog sich der Pfad durch wirres Gestrüpp und über steile Felsen hinweg. Es gab daneben aber auch andere, bereits geebnete Wege. Mancher dieser bequemen Pfade führte zu falschen Entdeckungen. Dabei kam es zu manchem kuriosen Zwischenfall.

Der englische Gelehrte William Crookes, der ein sehr erfolgreicher Spezialist auf dem Gebiete der Spektralanalyse war und der das Thallium entdeckt hatte, sonderte aus Yttrium einen ganzen Haufen neuer „Elemente“ ab, denen er die Bezeichnung Meta-Elemente gab. Jedoch stellte es sich bald danach heraus, daß es sich bloß um Mischungen längst bekannter Elemente handelte.

Ein deutscher Forscher war in den zwanziger Jahren eifrig bemüht, in Proben kosmischen Staubes, die der Polarforscher Nordenskjöld von den Gletschern Grönlands mitgebracht hatte, Transurane nachzuweisen. Er beeilte sich, der Welt mitzuteilen, er habe im Staub ein Element der Ordnungszahl 108 entdeckt. Er nahm an, daß am Ende des Periodensystems dem Gebiet der instabilen Elemente ein Gebiet stabiler Elemente folgen müsse, zu denen das 108. gehörte. Diese Annahme wurde seinerzeit als unwissenschaftlich abgelehnt. Wie wir noch sehen werden, fand sie in unseren Tagen erneut Beachtung.

Man kann in diesem Zusammenhang nicht den Engländer J. N. Friend unerwähnt lassen, der an der Spitze einer Expedition nach Palästina

zog, um in den leblosen Gewässern des Toten Meeres nach Spuren des 85. und 87. Elements zu fahnden. Auch der amerikanische Physiker Fred Allison glaubte, eine besondere Untersuchungsmethode entwickelt zu haben. Zur gleichen Zeit, da sich die Forscher die Köpfe darüber zerbrachen, weshalb es auf Erden keine dem Jod und Zäsium ähnlichen schweren Elemente gebe, „entdeckte“ sie Allison auf Schritt und Tritt. In beliebigen Lösungen und in beliebigen Mineralen „wies“ er Eka-Zäsium und Eka-Jod „nach“. Er verwendete dazu ein unreines magnetooptisches Verfahren, das, wie sich in der Folge herausstellte, falsch war.

Selbst den Tüchtigsten blieben Irrtümer nicht erspart. Dem Italiener Enrico Fermi schien es, als habe der Beschuß des Urans mit Neutronen unverzüglich mehrere Transurane ergeben. Tatsächlich aber handelte es sich um Bruchstücke der Urankernspaltung, um Elemente aus der Mitte des Periodensystems.

Auch heute noch geht mancher Forscher einen Irrweg. Im Jahre 1957 gelang es einem Forscherteam in Stockholm, ein neues Element synthetisch zu erzeugen. Es schien mit Sicherheit das Element 102 zu sein, das nun den Namen Nobelium zu Ehren des Erfinders des Dynamits erhielt. Sowjetische und amerikanische Forscher widerlegten jedoch die Ergebnisse der schwedischen „Entdecker“. In der Presse las man daraufhin sogar die scherzhafte Bemerkung, vom Nobelium wäre nichts übrig geblieben als sein Symbol: die zwei Buchstaben „No“, was bekanntlich im Englischen „Nein“ bedeutet.

Nach mehreren Versuchen gelang es, sowohl in der Sowjetunion als auch in den USA, Isotope des 102. Elements künstlich herzustellen, allerdings auf eine Art und Weise, die sich von der der schwedischen Forscher wesentlich unterschied.

**Über das Schicksal eines Elements** Mit dem Begriff Uran verbinden sich zwei der bedeutendsten wissenschaftlichen Entdeckungen unserer Epoche: die der Radioaktivität und der Kernspaltung von schweren Elementen unter der Einwirkung von Neutronen. Das Uran barg für den Menschen den Schlüssel zur Nutzbarmachung der Kernenergie in sich. Es verhalf dem Menschen, in der Natur unbekannte Elemente zu gewinnen: die Transurane, zu denen Technetium und Promethium gehören.

Die Geschichte der Entdeckungen chemischer Elemente ist reich an Ereignissen. Mancher Entdecker blieb namenlos. Andererseits aber gibt es lange Listen von „Erstentdeckern“ ein und desselben Elements. Die „Vaterschaft“ des Urans ist einwandfrei erwiesen. Sein Entdecker war der deutsche Chemiker Martin Heinrich Klaproth, einer der Begründer der analytischen Chemie.

Aus historischen Schriftstücken geht hervor, daß die Uran-Biographie am 24. September 1789 ihren Anfang nahm.

Die Pechblende war dem Menschen von alters her bekannt. Man hielt sie für ein zink- und eisenhaltiges Mineral. Dem scharfen analyti-

schen Auge Klaproths entging es nicht, daß sich darin Einlagerungen eines noch unbekanntes Metalls zu verbergen schienen. Seine Vermutung nahm bald konkrete Gestalt an. Das neue Element zeigte sich als schwarzes Pulver, das metallisch schimmerte. Zu Ehren des im Jahre 1781 von dem österreichischen Astronomen Friedrich Wilhelm Herschel entdeckten sie-



benten Planeten des Sonnensystems erhielt es den Namen Uran.

Ein halbes Jahrhundert lang wagte niemand, die Entdeckung Klaproths in Frage zu stellen. Niemand zweifelte an ihrer Richtigkeit. Man

hatte es ja mit dem bedeutendsten Analytiker Europas zu tun.

Den ersten Schatten auf dieses klare Bild warf im Jahre 1841 der französische Chemiker E. M. Péligot. Klaproth, so bewies er, hatte nicht das Element Uran in den Händen gehalten, sondern lediglich ein Uranoxid. Erst durch Péligots Verfahren war die Reindarstellung des Urans möglich. Die Geschichtsschreiber vermerkten nun, daß Péligot sozusagen als zweiter Taufpate des Urans anzuerkennen war.

Doch die Entdeckerliste war damit noch nicht abgeschlossen. Der Dritte im Bunde war Dmitri Iwanowitsch Mendelejew.

Uran wollte sich anfänglich unter keinen Umständen in das Periodensystem der Elemente einfügen lassen. Ein Platz wurde ihm in der dritten Gruppe zugewiesen. Es stand nun zwischen Kadmium und Blei, dort, wo sich jetzt Indium niedergelassen hat. Dieser Platz schien ihm wegen seines Atomgewichts zuzustehen. Doch seine Eigenschaften sprachen dagegen. Zog man diese in Betracht, schien es, daß der Zufall als Platzanweiser aufgetreten war.

Mendelejew gelangte zu der Schlußfolgerung, das Atomgewicht des Urans sei falsch bestimmt worden. Er erhöhte seinen Wert auf das Anderthalbfache. Auf diese Weise gelangte das Uran in die sechste Gruppe der Tabelle. Nun war es Letzter einer Elementenreihe. Das war gleichsam seine dritte Geburt.

Es dauerte nicht lange, und die Ansicht Mendelejews wurde von verschiedenen Experimentatoren bestätigt.

**Wo ist dein Platz, Uran!** Das große Gebäude des Periodensystems der Elemente läßt keine Obdachlosen zu. Allerdings sind darin Elemente zu finden, die eigentlich ohne festen Wohnsitz sind. Zu ihnen gehört das erste Element — der Wasserstoff. Bis auf den heutigen Tag konnten sich die Wissenschaftler noch nicht endgültig darüber einigen, wohin das Element 1 eigentlich gehört, ob in die erste oder in die siebte Gruppe des Periodensystems der Elemente.

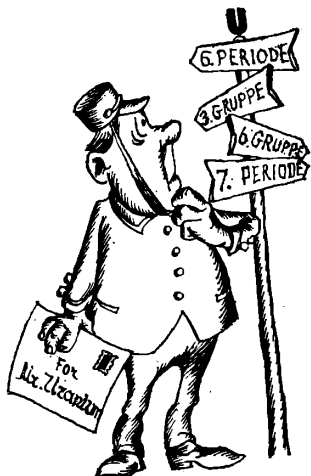
Auf ähnliche Weise gestaltete sich das Schicksal des Urans. Aber warum wohl? Hatte denn nicht Mendelejew bereits die Frage nach seinem Platz endgültig geklärt?

Jahrzehntelang bestritt niemand die Berechtigung der Zugehörigkeit des Urans zur sechsten Gruppe. Sein Platz als schwerster Bruder des Chroms, Molybdäns und Wolframs schien unverrückbar zu sein.

Doch die Zeiten änderten sich. Uran hörte auf, in der Reihe der Allerletzte zu sein. Hinter ihm pflanzte sich eine ganze Kohorte künstlich erzeugter Transurane auf. Wohin aber mit ihnen? In welche Gruppe, in welche Zelle waren die Transuransymbole einzusetzen? Nach langwierigen Auseinandersetzungen wurde Übereinstimmung erzielt: Alle Transurane gehören in die gleiche Gruppe, in ein und dieselbe Zelle.

Dieser Urteilsspruch kam nicht aus heiterem Himmel. Im Periodensystem der Elemente war Ähnliches bereits einmal vorgekommen: in der sechsten Periode. Alle Lanthaniden, insgesamt 14, sind in der dritten Gruppe in ein und derselben Zelle, in der Lanthanzelle, untergebracht.

Eine Periode tiefer müsse sich das Bild wiederholen, so hatten Physiker seit langem vorausgesagt. In der siebten Periode, erklärten sie, müßte es eine lanthanidenähnliche Elementenfamilie geben, die Familie der „Aktiniden“. Denn diese Elemente müßten sich unmittelbar dem Aktinium anschließen, das in der Tabelle



seinen Platz gerade unterhalb von Lanthan hat.

Alle Transurane sind also Mitglieder dieser Familie. Zu ihr gehören aber nicht nur sie, sondern auch Uran und seine unmittelbaren Nachbarn zur Linken — Protaktinium und Thorium. Die ganze Schar mußte also die alten Plätze in der sechsten, fünften und vierten Gruppe, wo sie sich bereits eingenistet hatte, aufgeben und in die dritte Gruppe umziehen.

Dies ist der Sinn der von dem amerikanischen Physiker Glenn T. Seaborg 1945 aufgestellten Hypothese über Aktiniden.

Beinahe ein Jahrhundert ist es her, seit Mendelejew das Uran aus der dritten Gruppe vertrieben hatte. Nun sollte es ins alte Heim zurückkehren. Allerdings besaß es eine neue „Aufenthaltsgenehmigung“!

Während sich die Physiker damit einverstanden erklärten, waren viele Chemiker mit dieser Lösung nicht zufrieden. In der dritten Gruppe blieb das Uran mit seinen Eigenschaften der gleiche Fremdling wie zu Mendelejews Zeiten. Auch Thorium und Protaktinium fügen sich wegen ihrer Eigenschaften nicht ohne Schwierigkeiten in die dritte Gruppe ein.

Im allgemeinen gebärden sich die leichteren Aktiniden anders als die leichteren Lanthaniden. Diese sind in der Regel dreiwertig, die Aktiniden hingegen zeichnet ein Reichtum an Oxidationszuständen aus. Unlängst synthetisierten sowjetische Chemiker Verbindungen mit siebenwertigem Neptunium und siebenwertigem Plutonium. Die Aktiniden haben ähnliche chemische Eigenschaften, weil ihre beiden äußeren Elektronenschalen gleiche Elektronenzahlen aufweisen.

Wo aber ist nun der eigentliche Platz des Urans? Ehe die Forscher die Frage endgültig beantworten können, werden sie noch manchen Streit auszutragen haben.

**Kleine Geschichten aus dem Reich der Archäologie** Wann hat sich der Mensch erstmalig des

Eisens bedient? Die Antwort scheint auf der Hand zu liegen: Nachdem er es gelernt hatte, Eisen aus Erzen zu erschmelzen. Geschichtsschreiber haben sogar das ungefähre Datum des großen Ereignisses angegeben. Es bedeutete ja den Anbruch des „eisernen Zeitalters“ auf Erden.

Bis ins 5. Jahrtausend vor unserer Zeitrechnung weisen die Funde zurück, die über die erste Verarbeitung von Eisen Aufschluß geben. Doch das „Zeitalter des Eisens“ war angebrochen, noch ehe der „Urmetallurg“ in seiner ersten primitiven Schmelzgrube das erste Kilo Eisen gewonnen hatte. Zu diesem Schluß gelangten die Chemiker, ausgerüstet mit der scharfen Waffe der Analyse.

Die ersten Stücke Eisen, die unseren Vorfahren dienten, waren buchstäblich vom Himmel gefallen. Als „Metall des Himmels“ wurde das Eisen im Lande der Pharaonen bezeichnet, und die alten Griechen nannten es „Himmelsgestirn“. Eisenmeteorite enthalten außer Eisen stets auch Nickel und Kobalt. Kobaltspuren und einen relativ hohen Nickelgehalt entdeckten die Chemiker bei der Analyse der stofflichen Zusammensetzung einiger eiserner Geräte aus grauer Vorzeit. Kobalt und Nickel sind im Periodensystem der Elemente die Nachbarn des Eisens. Doch in den irdischen Eisenerzen sind sie nicht immer vorzufinden.

Ist die Schlußfolgerung, das erste genutzte Eisen sei Meteoreisen gewesen, unanfechtbar? Mit absoluter Gewißheit können wir die Frage nicht bejahen. Das Altertum zu erschließen ist keine

einfache Sache. Man stößt dabei auf manches Unvermutete. Interessant ist jedenfalls, daß die Schmelz- und Schmiedekunst eine uralte Geschichte besitzt. So berichtet die Argonautensage der Griechen, daß im Quellgebiet des Euphrat und Tigris Schmiede lebten, die bereits einen vortrefflichen Stahl herzustellen vermochten.

Manche Überraschung bereiteten die Archäologen den Chemiehistorikern. Im Jahre 1912 stieß Professor Günther von der Universität Oxford bei Ausgrabungen altrömischer Ruinen in der Nähe von Neapel auf Glasmosaikarbeiten von erstaunlicher Schönheit. In zweitausend Jahren schien die Glasfärbung nichts an Glanz eingebüßt zu haben!

Professor Günther begann, die Farbenzusammensetzung zu erforschen. Zwei Proben des hellgrünen Glases schickte er auf Reisen. Sie gelangten nach England in die Hände eines Chemikers. Die Analyse brachte nichts Erstaunliches zutage — wäre nicht eine seltsame Beimischung von ungefähr anderthalb Prozent gewesen, deren Natur noch nicht erklärt werden konnte.

Jemand kam auf den Gedanken, man müsse die Beimischung auf Radioaktivität untersuchen. Es war ein glücklicher Gedanke. Radioaktivität wurde in den geringen Beimengungen nachgewiesen. Welches chemische Element aber verursachte diese Strahlung?

Das Wort hatten nun die Chemiker. Sie stellten fest: Die Beimischung war Uranoxid.

War das der Weisheit letzter Schluß? Wohl kaum. Uransalze wurden ja seit langem zur

Glasfärbung genutzt. Aber daß schon im Altertum eine bewußte praktische Anwendung des Urans erfolgte, war sehr zweifelhaft. Auf das römische Glas schien Uran nur durch Zufall gekommen zu sein.

Jahrzehnte verstrichen, und die bereits in Vergessenheit geratene Angelegenheit fiel ins Blickfeld des amerikanischen Archäologen und Chemikers Kelley. Er wiederholte die Analysen, verglich die Angaben. Und er gelangte zu folgender Schlußfolgerung: Nicht der Zufall hatte seine Hand im Spiel gehabt, nicht ihm war das Vorhandensein des Urans auf dem altrömischen Glas zu verdanken. Eher handelte es sich um eine logische Folge. Den Römern waren Uranminerale bekannt, sie verwendeten sie für praktische Zwecke, unter anderem zur Bemalung von Glas. Wahrscheinlich ist diese Tatsache der erste Hinweis auf eine praktische Verwendung des Urans. Mit ihr beginnt die Uran-Biographie.

**Uran und seine Berufe** Das 92. Element des Periodensystems gelangte im zwanzigsten Jahrhundert zur Berühmtheit. Es versetzte den Kernreaktor in Tätigkeit, es gab dem Menschen den Zauberstab in die Hand, mit dem er eine Energie prinzipiell neuen Typs zu zähmen vermochte.

Heute hat die Uranförderung bedeutende Ausmaße angenommen: Die Jahresweltproduktion beträgt über vierzigtausend Tonnen. Für die Bedürfnisse der Kernenergiewirtschaft reicht dies

vorderhand. Es gibt Berechnungen, die den Nachweis erbringen, daß die Uranvorkommen der Welt 40 000 Jahre ausreichen werden.

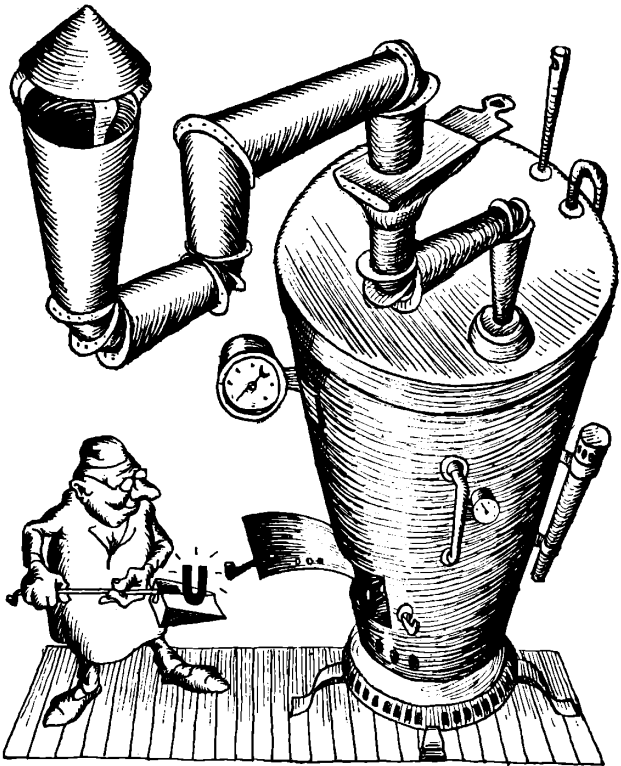
Aber auch auf dem Gebiet der praktischen Verwendung des Urans haben wir es mit einem Paradoxon zu tun: Zweckentsprechend — also als „Kernbrennstoff“ — werden nur 5 Prozent der geförderten Mengen genutzt. Die restlichen 95 Prozent sind nicht unmittelbar einsatzfähig, denn sie enthalten eine zu geringe Menge des Uranisotops U-235, d. h. jenes Urans, das den hauptsächlichsten Kernbrennstoff abgibt.

Wird also die außerordentlich große Mühe der Geologen, Bergarbeiter und Chemiker zu einem beträchtlichen Teil sinnlos vertan?

Eine derartige Annahme wäre unbegründet. Uran wird auch auf nichtkernphysikalischen Gebieten eingesetzt. Mit großem Interesse erforschen beispielsweise Biologen das Element Uran. Sie haben festgestellt, daß Uran für die normale Entwicklung verschiedener Pflanzen notwendig ist. Es erhöht z. B. den Zuckergehalt in Mohr- und Zuckerrüben sowie bei verschiedenen Obstsorten. Außerdem fördert es die Entwicklung nützlicher Bodenmikroorganismen, wenn es in Verbindung mit anderen Elementen in Spuren dem Boden zugeführt wird.

Auch die Tiere benötigen das 92. Element. Hochinteressant sind die Ergebnisse eines kürzlich durchgeführten Experiments. Im Laufe eines Jahres verfütterte man Uransalze in bedeutenden Mengen an Ratten. Im Organismus der Tiere blieb der Urangehalt praktisch unverändert, keinerlei schädigende Wirkung wurde wahrge-

nommen. Doch das Gewicht der Tiere erhöhte sich auf fast das Doppelte. Wissenschaftler vertreten die Ansicht, Uran för-



dere die Phosphor-, Stickstoff- und Kalium-Assimilation, also lebenswichtige Vorgänge. Auf dem Gebiet der Medizin übt das Uran sozusagen seinen ältesten Beruf aus, wenn man

einmal von der Verwendung der Uranverbindungen als Mittel zur Farbenherstellung absieht. Bereits vor langer Zeit unternahm man den Versuch, mit Uransalzen verschiedene Krankheiten zu behandeln: Diabetes, manche Hautkrankheiten und Geschwülste. In neuester Zeit hat eine Uranotherapie — als Radiotherapie bekannt — zu bedeutenden Erfolgen geführt.

Eigenartig ist die Verwendung von Uran in der Hüttenindustrie. Gelegentlich wird es dem Eisen beigegeben, damit Sauerstoff und Stickstoff daraus entfernt werden. Eine Legierung des Eisens mit Uran ergibt Spezialstähle, die sehr tiefen Temperaturen widerstehen können. Uran-Nickel-Stähle sind äußerst resistenz gegenüber stärksten Agenzien. Sie bleiben sogar gegenüber dem „Königswasser“ (einer Mischung aus Salpetersäure und Salzsäure) standhaft.

Uran und seine Verbindungen können auch als Katalysatoren bei zahlreichen chemischen Reaktionen verwendet werden. Ihr Verhalten ist dabei recht eigenartig. Bisweilen synthetisiert man Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff mit Hilfe von Urankarbid. Uranoxide beschleunigen die Methanoxydation, die Gewinnung von Methyl- und Äthylalkohol aus Kohlenwasseroxid, die Herstellung von Essigsäure. Zahlreich sind auch die Produkte der organischen Chemie, die mit Hilfe von Urankatalysatoren gewonnen werden.

Überaus vielfältig ist also die Chemie des Elements Uran. In den Verbindungen tritt Uran in den unterschiedlichsten Wertigkeiten auf: als sechs-, fünf-, vier- und dreiwertiges Element,

wobei sich die verschiedenwertigen Verbindungen voneinander in so hohem Maße unterscheiden, daß man in gewissem Sinne von der Chemie vierer verschiedener Elemente sprechen könnte.

**Ist das Gebäude unvollendet geblieben!** Wir knauserten wahrhaftig nicht mit freundlichen, warmen Worten, als vom Periodensystem der Elemente und seinem großartigen Baumeister die Rede war. Doch plötzlich kam es uns zum Bewußtsein: Das Gebäude ist ja unvollendet geblieben. Das letzte Stockwerk ist nur etwa zur Hälfte ausgebaut. Es müßte 32 Wohnungen besitzen, errichtet sind bislang bloß 17 bzw. 18, wenn man das noch strittige Element 104 dazurechnet. Auch manche seiner Bewohner legen ein merkwürdiges Benehmen an den Tag. Auf den ersten Blick ist kaum zu sagen, ob sie hier auch tatsächlich ansässig sind.

Seit langem ereifern sich Chemiker und Physiker darüber, ob das Periodensystem der Elemente seinen logischen Abschluß gefunden habe. Mit anderen Worten: Welches ist die Ordnungszahl des allerletzten chemischen Elements?

Vor ungefähr vierzig Jahren tauchte in seriösen Artikeln und Büchern die Zahl 137 auf. Ein Wissenschaftler von Ruf veröffentlichte sogar einen Beitrag unter dem Titel „Die magische Zahl 137“.

Aus welchem Grunde schien sie beachtenswert zu sein?

Die kernnächste Elektronenschale ist in den Atomen nicht immer in ein und derselben Entfer-

nung vom Kern angeordnet. Mit zunehmender Kernladung verringert sich der Radius der Hülle. Im Uranatom z. B. ist die Schale kernnäher als im Kaliumatom. Es müßte schließlich der Augenblick eintreten, da Kern und kernnächste Schale die gleichen Ausmaße besitzen. Was geschieht dann mit den Elektronen dieser Schale?

Sie „fallen“ auf den Kern und werden von ihm verschlungen. Doch sobald von außen eine negative Ladung in den Kern eindringt, verringert sich die Summe der positiven Kernladung um Eins. Folgerichtig kommt es zur Bildung eines Elements mit einer um den Wert 1 niedrigeren Ordnungszahl.

Hier läge nun nach der Auffassung derjenigen, die dieser Theorie anhängen, die Grenze für die Anzahl der Elemente. Die allerletzte Wohnung im großen Gebäude des Periodensystems müsse die 137. sein.

Vor etwa zehn Jahren wurden sich die Physiker ihres Irrtums bewußt. Sie unternahmen genauere Ermittlungen. Es gelang ihnen der Nachweis, daß das Elektron bei einer mindestens um 10 bis 15 Einheiten höheren Ladung auf den Kern stürzt.

Welche Perspektiven für den Ausbau des Periodensystems der Elemente! Wieviel neue Elemente, wieviel unerwartete Entdeckungen! Über 40 Anwärter warten sozusagen auf den Einweisungsschein, um in das große Heim, dessen Grundstein Mendelejew gelegt hatte, Einzug zu halten.

Leider haben wir es bloß mit einem reizvollen

Gebilde der Phantasie zu tun, mit einem schönen, wirklichkeitsfernen Märchen.

Bei der Ermittlung der Ordnungszahl des allerletzten chemischen Elements hatten die Wissenschaftler ein wesentliches Moment nicht genügend beachtet. Nicht, daß man es vergessen hätte! Man wollte bloß wissen, was wäre, wenn...

Ja, wenn es keine Erscheinung gäbe, die Radioaktivität heißt. Was wäre denn, wenn energiereiche Kerne die gleiche Stabilität aufwiesen wie die Kerne vieler Elemente, die in der irdischen Natur vorkommen.

Die Strahlungsaktivität ist ein Charakteristikum aller Elemente, die schwerer als Wismut sind. Den einen gewährt sie ein langes Leben, den anderen nur wenige Augenblicke.

Die Halbwertszeit des Kurtschatoviums, des 104. Elements, beträgt bloß drei Zehntelsekunden. Um ein einziges Atom zu gewinnen, müßte der Riesenbeschleuniger von Dubna 5 Stunden in Betrieb sein. (Zum Kurtschatovium muß allerdings gesagt werden, daß sein offizieller Name noch nicht festgelegt wurde. Eine amerikanische Forschergruppe unter Glenn T. Seaborg beantragte, das von ihr mit anderen Mitteln und nach anderen Methoden gefundene 104. Element Eka-Hafnium als Rutherfordium zu bezeichnen.)

Mit der Entdeckung des 104. Elements ist auf jeden Fall innerhalb des Periodensystems die Grenze der Aktiniden überschritten worden. Das Gebiet der Transaktiniden wurde erreicht.

Und das 105. oder das 106. Element? Voraus-

sichtlich sind sie noch kurzlebiger. Sie existieren wahrscheinlich nur für eine ultrakurze Zeit. In ihrer allernächsten Nähe dürfte man auf eine bedauernswerte Schranke stoßen: Der Kern der neuen Elemente geht zugrunde, kaum daß das Element das Licht der Welt erblickt hat. Sollte diese Grenze beim 110. Element erreicht sein? Oder werden alle leeren Stellen der Tabelle gefüllt werden können?

Die strengen physikalischen Gesetzmäßigkeiten der Natur selber scheinen die Grenze zu sein, die das große Gebäude des Periodensystems der Elemente unvollendet bleiben läßt.

Aber gibt es nicht zahllose Fälle, in denen der Mensch die Natur zu besiegen verstand? Mit den heutigen Methoden wird man noch schwerere Kerne, als sie bisher erzeugt werden konnten, wohl nicht darstellen können, es sei denn, es gelänge, die Neutronenstromdichte im Reaktor um mehr als das Zehnfache zu steigern. Wahrscheinlich wird erst die gesteuerte thermonukleare Fusion derartige Bedingungen herzustellen ermöglichen. Vielleicht aber auch gelingt es, Uranatome derart zu beschleunigen, daß Uran mit Uran beschossen werden kann, so daß sich langlebige ultraschwere neue Kerne bilden.

**Hymne an die zeitgenössischen Alchimisten** Manche unglückseligen Alchimisten des Mittelalters wurden nach den erbarmungslosen Regeln der Inquisition gefoltert. Und der Scheiterhaufen beendete in vielen Fällen ihren Lebensweg.

Die heutigen „Alchimisten“, die wir Chemiker nennen, werden geehrt. Manche von ihnen werden mit hohen Auszeichnungen bedacht.

Die Alchimisten von einst glaubten an die Wirkung unerforschlicher, geheimnisvoller Kräfte. Sie hatten nur eine blasse Ahnung von dem, was sie selber taten. Ihre Theorie waren Beschwörungsformeln, inbrünstige Gebete und der blinde Glaube an wundertätige Eigenschaften eines wundertätigen Steins der Weisen.

Die zeitgenössischen „Alchimisten“ vertrauen auf die menschliche Vernunft, auf den unerschöpflichen Erfindergeist des Menschen. Sie erkennen Theorien an, die aus einer tüchtigen Portion Physik, einer ganzen Menge Mathematik und aus kühnen Hypothesen aufgebaut wurden.

Der Wunschtraum der Alchimisten von heute ist es, in den Bereich der überschweren Elemente vorzustoßen.

Gleichen sie nicht Baumeistern, die darauf aus sind, Luftschlösser zu errichten? Die Radioaktivität auferlegt den Elementen mit einer Ordnungszahl in der Nähe von 110 unerbittlich eine Begrenzung ihres Daseins. Aber stimmt das in jedem Falle?

Der große dänische Physiker Niels Bohr sprach einmal vom Nutzen „verrückter“ Ideen. Nach seiner Ansicht sind nur sie in der Lage, konventionelle Vorstellungen aus dem Wege zu räumen.

„Verrückte“ Ideen sind es doch wohl, die in den Köpfen derjenigen spuken, die von überschweren Elementen träumen. Aber die „Verrücktheit“

darin ist wahrlich nicht größer als in Einsteins Relativitätstheorie. Die neuen Ideen sind gut durchdacht, sie stützen sich auf das sichere Fundament der Physik. Sie wurden durch sorgfältige mathematische Berechnungen geprüft.

Ihre Quintessenz ist folgende: Im Bereich der Kerne mit hohen Ladungen gibt es vermutlich eigenartige Inseln der Beständigkeit. Das soll natürlich nicht heißen, daß die dort befindlichen Elemente keinerlei radioaktivem Zerfall ausgesetzt sind. Doch sie werden langlebiger sein als ihre Nachbarn. Ihre Lebenszeit wird wohl nicht nur dazu ausreichen, sie zu synthetisieren, sondern auch dazu, ihre Haupteigenschaften zu erforschen.

Damit werden die Möglichkeiten aber noch nicht erschöpft sein. Die Stabilität einiger Kerne müßte eigentlich so groß sein, daß ihre Atome wahrscheinlich auch in der Natur aufgefunden werden können.

Warum aber sind die Vorstellungen einiger Wissenschaftler, sie könnten überschwere Elemente nachweisen, doch nicht eine Phantasterei?

Nach dem sogenannten Schalenmodell des Atomkerns soll es in den Kernen bestimmte Protonen- und Neutronenschalen geben, und zwar in ähnlicher Weise, wie es in den Atomen Elektronenschalen gibt. Jede Kernschale vermag nur eine bestimmte Anzahl von Protonen oder Neutronen aufzunehmen. Davon ausgehend, kann man leicht zu folgendem Schluß gelangen: Kerne mit vollbesetzten Schalen müssen sich von ihren Nachbarn durch besondere Eigenschaften unterscheiden, zum Beispiel durch größere Stabilität und

häufigeres Vorkommen in der Natur. Diese Annahme findet in der Wirklichkeit ihre Bestätigung.

In der Kernphysik hatte man seit langem wahrgenommen, daß sich Kerne, die aus 2, 8, 20, 50, 82 Protonen bzw. Neutronen bestehen, oder deren Neutronenzahl gleich 126 ist, durch eine Anzahl charakteristischer Besonderheiten auszeichnen, durch die sie sich als „magische Kerne“ darstellten. Offensichtlich hatte man es hier mit Kernen zu tun, die tatsächlich vollbesetzte Schalen aufwiesen.

Diese Auffassung wurde im Hinblick auf sehr energiereiche Kerne bis zu der Annahme weiterentwickelt, in diesem geheimnisvollen Bereich des Periodensystems könne man auf mehrere Inselchen relativer Stabilität stoßen. Auf diesen Stabilitätsinseln würden Elemente mit der Kernladung 110, 114, 126, ja sogar 164 zu finden sein. Eine besonders hohe Stabilität erwartet man auch von Kernen, deren bis zur vollen Besetzung ausgebaute Schale 184 Neutronen enthalten müßte.

Unter diesen Elementen verdient das 114. besondere Interesse, insbesondere das Isotop mit der Massenzahl 298. Sein Kern wird in doppeltem Sinne „magisch“ sein — sowohl nach der Zahl seiner Protonen (114) als auch nach der Anzahl der Neutronen (184). Die Theorie prophezeit dem Kern eine hohe (relative) Stabilität. Dadurch unterscheidet er sich wesentlich von anderen schweren Kernen, für die ja der spontane Zerfall eine wahre Geißel ist. Aus technischen Gründen ist die Gewinnung des superschweren Iso-

tops 298 ungemein schwierig. Einfacher gestaltet sich die Bildung eines leichteren Isotops, eines Kernes mit geringerer Neutronenzahl. Doch dessen Stabilität wird nicht mehr gleich groß sein.

Auf welche Art und Weise, mit welchen Mitteln wird das 114. Element gewonnen werden können?

Mit einem Erfolg ist zu rechnen, wenn z. B. Plutonium mit Kalziumionen beschossen wird oder auf ein Uran-Target Argonionen gelenkt werden.

Und wie könnte man das 126. Element synthetisch erzeugen? Die bisher üblichen Methoden der Kernchemie versagen hier. Weder die Neutronen noch die Deuteronen oder die Alphateilchen, ja nicht einmal die Ionen leichter Elemente könnten etwas ausrichten, weil kein geeignetes Target zur Verfügung steht. Alle zugänglichen Zielscheiben befinden sich vom 126. Element zu weit weg. Man kam allerdings auf den Gedanken, Thorium (Ordnungszahl 90) mit schweren Kryptonionen (Ordnungszahl 36) zu beschießen. Ob das gelingen kann, muß sich erst noch erweisen.

Zunächst wird nach neuen Methoden gesucht. Gegenwärtig erörtert man folgendes originelle Verfahren: Es müßte möglich sein, Uran mit Uran zu beschießen. Dazu muß man aber eine besondere Methode entwickeln, um Uranatomen eine entsprechende Beschleunigung zu verleihen. Die Uranionen müßten in einem speziellen Zyklotron auf hohe Geschwindigkeiten gebracht werden, um sie dann auf eine Uran-Zielscheibe

(Target) aufprallen zu lassen. Möglicherweise würden sich dann zwei Urankerne zu einem sehr komplizierten neuen Kern vereinigen. Die Ladung des Urans ist gleich 92. Der neue Kerngigant würde demzufolge eine Ladung von 184 besitzen. Für diesen Kern wird es jedoch weder eine Daseinsmöglichkeit noch eine Daseinsberechtigung geben. Er zerfällt spontan in zwei Bruchstücke ungleicher Masse und ungleicher Ladung. Es ist durchaus möglich, daß sich eines der Bruchstücke als Kern mit der Ladung 126 erweist.

Soweit die Idee. Es wäre falsch, wollten wir die Möglichkeit ihrer Verwirklichung bezweifeln. Wo liegt denn die Grenze des Periodensystems? Schien nicht die Grenze schon erreicht zu sein, als das 103. Element, das Lawrencium, gefunden worden war? Nach dem Kurtschatovium erwies es sich als technisch unmöglich, neue, schwerere Elemente zu gewinnen. Das 105. Element zerfällt jedenfalls noch einige Male schneller als das 104. Selbst dann, wenn man die beste Kombination zwischen Target und Geschößteilchen im größten Ionenbeschleuniger der Welt herstellt, kann man innerhalb von 24 Stunden nur ein einziges Atom des 105. Elements erzeugen. Aber die Theoretiker erklären heute mit großer Bestimmtheit, daß die Grenze des Periodensystems noch längst nicht erreicht ist. Ihre Berechnungen beweisen sogar, daß es jenseits der Aktiniden unter den Kerngiganten auch Bereiche mit relativer Stabilität geben muß, also auch langlebige Atome, die größte praktische Bedeutung haben könnten. Die Ruheinseln wer-

den sicherlich in den Gebieten zu finden sein, in denen die bereits erwähnten „magischen“ Kerne liegen. Es sind Kerne mit vollkommen abgeschlossenen Kernschalen. Und es steht heute bereits fest, daß das Element 114 mit der Protonenzahl 114 und der Neutronenzahl 184 das nächste magische Element sein kann und sich im Zentrum einer „Insel der Stabilität“ befindet. Seine Halbwertszeit kann  $10^{10}$  Jahre betragen. Es ist deshalb wahrscheinlich, daß superschwere Elemente nicht nur in kosmischen Strahlen, sondern auch auf der Erde gefunden werden können. So könnte das Element 114, das Eka-Blei, durchaus schon bald aufgespürt werden. Voraussetzung dafür sind bessere Analysemethoden, da Berechnungen ergeben haben, daß innerhalb von 24 Stunden nur etwa ein Milligramm Eka-Blei mit dem kosmischen Staub auf die Erde „niederregnet“.

Unter den Kernphysikern ist das Interesse an Bleiglas, an alten Glasuren, in letzter Zeit gewachsen. Sie suchen darin nach Spuren des Eka-Blei-Zerfalls in Form von Teilchenbahnen, die auf geätzten Glasschichten sichtbar werden müßten. So wurden zum Beispiel auf einer Kristallvase aus dem 18. Jahrhundert 31 Spuren von Teilchen entdeckt. Wird auch eines Tages das Eka-Blei auf diese Weise sein Geheimnis enthüllen?

**Am Ende der Welt** Wann es dazu kommen wird, ist unbestimmt. Gewiß ist, es wird sein: Der Mensch wird einen gewaltigen Sieg über

die Natur davontragen, vielleicht den größten, den die Geschichte der Menschheit bislang kennt.

Der Mensch wird imstande sein, instabile Elemente in stabile umzuwandeln und umgekehrt die stabilsten Kerne zum Zerfall zu zwingen.

Autoren utopischer Romane sind an dieser Idee bisher vorbeigegangen. Sie haben die sich daraus ergebenden Möglichkeiten noch nicht zu spannenden Romanen verarbeitet. Was die Forscher anbelangt, so zucken sie mit den Schultern, wenn man sie danach fragt, welche praktischen und theoretischen Wege sie sehen, um die radioaktive Elementargewalt zu zähmen.

Wir sind fest davon überzeugt, daß man eines Tages auf den richtigen Weg gelangen wird.

Nun stellen wir uns einmal vor, unser Wunschtraum sei in Erfüllung gegangen, die Synthese von überschweren Elementen wäre kein Problem mehr. Die Forschung erhielte dann Dutzende neue Bewohner des großen Hauses des Periodensystems, die Chemiker stürzten sich mit Feuereifer auf die neuen Studienobjekte.

Beim Durchdenken dieses Problems stoßen sie auf etwas Unerwartetes.

Aber das Wort „unerwartet“ ist eigentlich hier nicht ganz am Platze. Denn schon heute steht fest, welcher Art die Überraschung sein wird, die den Chemiker erwartet.

Können wir die Eigenschaften des 126. Elements voraussagen?

Im allgemeinen könnte man ja das Periodensy-

stem der Elemente in der Phantasie endlos weiter führen. Das physikalische Prinzip seines Aufbaus ist im großen und ganzen klar. Einer der Verfasser dieser Zeilen hatte vor noch nicht allzulanger Zeit Gelegenheit, eine von einem findigen Kopf aus tausend Elementen aufgebaute Tabelle zu bestaunen. „Weshalb aber bloß tausend?“ fragte er den neugebackenen Messias, sicherlich nicht ganz unberechtigt. „Weshalb bloß tausend und nicht, sagen wir, zwei- oder zehntausend?“ „Dazu reichte das Papier nicht,“ lautete die Antwort.

Über das 126. Element können wir folgendes aussagen: Es wird einer neuen Verwandtschaftsgruppe angehören, einer erstaunlichen Familie. Die Verwandtschaftsgruppe beginnt beim Element 121. Alle 18 Mitglieder dieser Gruppe ähneln einander in größerem Maße als beispielsweise unsere alten Bekannten, die Lanthaniden. Voneinander werden sie sich nicht mehr unterscheiden als die Isotope ein und desselben Elements, weil innerhalb der Verwandtschaftsgruppe bei jedem Atom die vierte Schale von außen im Ausbau begriffen ist, und die drei ersten Außenschalen gleichartig aufgebaut sind. Kann man deshalb mit einem auch nur irgendwie wahrnehmbaren Unterschied in den chemischen Eigenschaften rechnen?

Die Lanthaniden bezeichnen wir als die vierzehn Ähnlichen, als Geschwister. Unternähmen wir es, die Eigenschaften der vermutlichen superschweren Verwandten zu schildern, bereitere uns schon der Titel einiges Kopfzerbrechen. Vielleicht könnten wir schreiben: „Die achtzehn

völlig Gleichen“. Und doch wird es Unterschiede geben, allerdings kaum wahrnehmbare. Ihre chemischen Eigenschaften werden nicht nur durch die Verteilung der Elektronen über die Untergruppen der Elektronenschalen bestimmt, sondern auch durch die Details ihres Energieniveaus. Doch unser Buch ist kein utopischer Roman. Wir verzichten deshalb auf eine Charakteristik. Kommt Zeit, kommt Rat.

Ein anderes Problem soll uns beschäftigen: An welche Stelle des Periodensystems gehören die achtzehn völlig Gleichen? Wir haben darüber noch keine klare Vorstellung. Und bis heute ist es ja eigentlich auch noch nicht gelungen, den Streit zu beenden, auf welchen Platz die Lanthaniden und Aktiniden wirklich gehören. Und das ist doch eine wesentlich einfachere Geschichte als der Versuch, Elemente einzuordnen, die wir noch gar nicht erforscht haben.

Das von uns eingangs entworfene Bild stellt eben den Idealfall dar. Entspräche ihm ein wirklicher Tatbestand, gestaltete sich die Aufgabe der Chemiker, die chemische Natur des 126. Elements zu bestimmen, zwar schwierig, jedoch ausführbar.

Weitaus wahrscheinlicher dürfte es zu folgendem kommen: Man stößt in diesem fernen Bereich des Periodensystems der Elemente auf eine zahlreiche Gemeinschaft von Elementen, die eine große Vielfalt chemischer Eigenschaften aufweisen. Einen derartigen Präzedenzfall kennen wir ja bereits: Die leichteren Aktiniden haben wahrhaftig nur wenig gemein mit ihrem Analogon, mit den Lanthaniden. Allerdings könn-

te sich die Lage „am Ende der Welt“ auch weit-  
aus schwieriger gestalten. Wer aber wird das  
heute schon voraussagen können? Es ist also  
keineswegs leicht, sich vorzustellen, welches Ele-  
ment unter den Vorgängern dem 126. Element  
ähnlich sein könnte. Es liegt ja immerhin sehr  
weit von den Grenzen der existierenden Tabelle  
entfernt.

Mit dem 114. Element sind die Schwierigkeiten  
immerhin geringer. Niemand zweifelt daran,  
daß es seinem jüngeren Bruder in der Gruppe,  
dem Blei, zu ähneln habe. Und das 110. Element  
wird das Analogon zum Platin sein, das 112.  
das Eka-Quecksilber.

**Nachrichten aus dem Weltraum** Die aus dem  
Weltraum in die Atmosphäre der Erde eindrin-  
gende außerordentlich energiereiche Korpusku-  
larstrahlung war bereits zu Beginn des zwan-  
zigsten Jahrhunderts nachgewiesen. Nach nä-  
herer Bekanntschaft mit dieser Erscheinung fan-  
den die Forscher für sie eine besondere Bezeich-  
nung: „Höhenstrahlung“ oder „kosmische Strah-  
lung“.

Spricht man von kosmischer Strahlung, ist üb-  
licherweise eine bestimmte Art Strahlung ge-  
meint. In Wirklichkeit handelt es sich um eine  
Strahlung mit einer recht komplizierten Zu-  
sammensetzung. Man unterscheidet die Primär-  
und die Sekundärstrahlung. Die primäre ist re-  
lativ einfacher Natur. Sie erzeugt in Wechsel-  
wirkung mit den Kernen der in der Atmosphäre  
vorhandenen Moleküle Protonen, Mesonen, Hy-

peronen sowie Elektronen und Positronen. Bei ihrem Durchgang durch die Atmosphäre ändern sich also ihre Zusammensetzung und ihre Eigenschaften wesentlich. Auf diese Weise entsteht die sekundäre Strahlung, die teilweise bis zur Erdoberfläche gelangt.

Wie setzt sich die primäre kosmische Strahlung zusammen? Es wurden zahlreiche Versuche unternommen, diese Frage unter Auswertung verschiedener Verfahren zu beantworten.

Seit 1936 wurden photographische Platten zur Erforschung der Höhenstrahlung verwendet. Platten spezieller Art (Kernemulsionsplatten) werden in ein lichtfestes Kästchen gelegt, in das die kosmischen Strahlen leicht eindringen können. Mit Hilfe von Ballonsonden wird das Kästchen für längere Zeit auf große Höhen gebracht. In den letzten beiden Jahrzehnten wurden Polyäthylenballons verwendet, von denen einige mit fast einer Million Kubikmeter Gas gefüllt waren. Die Photoemulsion besitzt eine bedeutend größere Dichte als die Luft. Durch den Aufprall auf die Emulsionsschicht werden die Teilchen der kosmischen Strahlung abgebremst. Sie hinterlassen in der Emulsion Bahnspuren. Bei ihrer mikroskopischen Untersuchung werden verschiedene Kennwerte ermittelt, so Länge, Breite, Intensität. Die Ergebnisse lassen auf Eigenschaft und Natur der Teilchen schließen.

Es erwies sich, daß in der primären Höhenstrahlung 93 Prozent der Teilchen Kerne des Wasserstoffatoms, d. h. Protonen sind, beinahe 6 Prozent Heliumkerne, also Alphateilchen. Den Rest bilden Kerne von Elementen mit höheren Ordnungszahlen.

Ein derartiges Mengenverhältnis ist überaus bezeichnend. Es ist beinahe das gleiche, das an verschiedensten Stellen des Weltalls für die chemischen Elemente nachzuweisen ist: auf der Sonne, den Sternen, im interstellaren Raum. Bloß der Anteil von schweren Elementen ist in der Höhenstrahlung größer.

Doch welche Elemente gehören dazu? Anfänglich war man der Ansicht, es könnten Beryllium und Bor sein, also mehrere Elemente mit verhältnismäßig niedrigen Ordnungszahlen. Das Jahr 1948 brachte eine sensationelle Erkenntnis: Bei der Erforschung der Bahns Spuren auf Photoemulsionen, die in 30 km Höhe viele Stunden lang der kosmischen Strahlung ausgesetzt waren, konnten schwere Teilchen nachgewiesen werden, und zwar Kerne mit Ladungszahlen von 11 bis 26. In der Folge entdeckte man noch schwerere Elemente; eines der zuletzt wahrgenommenen war Indium mit der Ordnungszahl 49. Heute kann man bereits davon sprechen, daß in der primären Höhenstrahlung praktisch alle auf der Erde bekannten chemischen Elemente vorkommen können.

Groß ist allerdings der Unterschied im Hinblick auf den mengenmäßigen Anteil der Elemente. Eisenatome mit der Ordnungszahl 26 sind z. B. hunderttausendmal mehr vorhanden als Elemente, deren Ordnungszahl im Bereich von 60 bis 90 liegt. Nun, derartige Angaben sind zwar interessant, aber wir können nicht behaupten, daß sie die Gemüter der Forscher sehr bewegten.

Plötzlich kam die Überraschung. In einem Referat im Sommer 1968 vor einer Plenarversamm-

lung der Akademie der Wissenschaften der UdSSR berichtete der berühmte englische Physiker Nobelpreisträger Professor C. F. Powell über Forschungsarbeiten seines ehemaligen Schülers, des jetzigen Professors Fowler. Fowler, ein Enkel des weltberühmten Forschers Ernest Rutherford, habe im Laufe der letzten Jahre Sonden mit Photoemulsionen bis zu 40 km Höhe steigen lassen.

Bei der Erforschung der in den photographischen Platten hinterlassenen Spuren stieß man auf mehrere äußerst starke Spuren. Sie wurden dem Uran zugeschrieben. Die Experimente wurden wiederholt. Sonden stiegen wieder in die Höhe. Dutzende Quadratmeter Emulsionsschichten wurden aufs genaueste unterm Mikroskop untersucht. Unter Tausenden von Spuren wurde eine entdeckt, die sofort die Aufmerksamkeit auf sich zog. Es war eine ungewöhnlich ausgeprägte, lange Spur. Das Teilchen, das diese Spur in der Emulsionsschicht hinterließ, hatte bei seinem Abbremsen eine außerordentlich intensive Ionisation bewirkt. Keiner der vorher entdeckten Kerne hatte ein derartiges Bild offenbart. Selbst die Bahnspur des Thoriums, dessen Ordnungszahl 90 ist, war weitaus weniger imposant.

Was bedeutete das? Fowler schien eine Zeitlang geschwankt zu haben, bis er sich eine endgültige Meinung gebildet hatte. Der Urheber der erstaunlichen Spur mußte ein Teilchen mit sehr energiereichem Kern sein. Nach längeren Überlegungen gelangte Fowler zu folgender Annahme: Die primäre Höhenstrahlung enthält das Element der Ordnungszahl 106, ein Element, das

noch unbekannt ist. Es konnte bisher auch auf künstlichem Wege noch nicht gewonnen werden.

Mit hundertprozentiger Sicherheit kann man verständlicherweise auf diesem Gebiet nicht eine neue Tatsache konstatieren. Doch der von Fowler dargestellte Sachverhalt ist an sich sehr interessant. Er stimmt ja mit Schlußfolgerungen überein, zu denen die theoretischen Physiker gekommen waren. Von zweiter Seite war nunmehr die verheißungsvolle Möglichkeit bestätigt worden, in den Bereich der überschweren Elemente vorzudringen. Es hat den Anschein, daß überschwere Elemente nicht nur künstlich gewonnen, sondern auch in natürlichen Vorkommen nachgewiesen werden können. Denn Kerne, die in der Nähe oder im Zentrum von „Inseln relativer Stabilität“ liegen, haben vermutlich eine so große Lebensdauer, daß sie auch interstellare Wege von Jahrtausenden überdauern.

Die Zeit der Entdeckung neuer chemischer Elemente ist also noch nicht vorbei.

Abschließend eine kurze Mitteilung über Ergebnisse von Experimenten, die Fowler und seine Mitarbeiter vor noch nicht allzulanger Zeit durchführten. Nachgewiesen wurden 15 Bahnspuren von Teilchen mit einer Ladung von mehr als 80, drei Spuren von Teilchen mit einer Ladung über 100 sowie die Spur eines Teilchens mit einer Ladungszahl von über 114.

**Aus dem „Stammbuch“ der Elemente** In Sternkarten, Sterntafeln, Sternkatalogen und Sternkalendern finden wir Hunderttausende von Himmelskörpern verzeichnet. Jedoch hat man bei

weitem nicht für alle so wohlklingende Namen gefunden wie „Betelgeuze“ oder „Sirius“. Bei der Benennung der meisten Sterne bedienen sich die Astronomen einer eigenartigen Chiffre, einer Kombination von Buchstaben und Ziffern, denen der lateinische Name des jeweiligen Sternbildes, zu dessen Bereich der Stern gehört, nachgestellt ist. Anders geht es nicht. Niemand fände sich sonst zurecht. Für den Fachkundigen ist es ein leichtes, nach dieser Chiffre zu erkennen, an welchem Ort des himmlischen Gewölbes sich der angegebene Stern befindet. Darüber hinaus gibt es Buchstaben und Ziffern, die den Spektraltyp oder die Leuchtkraftklasse des Sterns charakterisieren.

Unvergleichlich geringer als die der Sterne ist die Zahl bislang entdeckter chemischer Elemente. Auch hier birgt bisweilen der Name des Elements manche spannende Geschichte seiner Entdeckung. Ja, nach der Entdeckung eines neuen Elements gerät der Forscher manchmal in Verlegenheit, welchen Namen er dem Neuentdeckten geben soll.

Man vertrat die Ansicht, der Name des Elements sollte etwas über dessen Eigenschaften aussagen. Es gibt zahlreiche Elemente, die dieser Forderung entsprechen. Ihre Namen tragen einen sachlichen Charakter. Hier wehen keine romantischen Lüfte. Nehmen wir den Wasserstoff (Hydrogenium, griechisch „wassererzeugend“) oder den Sauerstoff (Oxygenium, griechisch „säureerzeugend“) oder das Fluor (lateinisch „das Fließende“) oder das Phosphor (griechisch „der Lichttragende“) oder auch den Stickstoff (Ni-

trogenium, „Salpeterbildner“) — alle diese Bezeichnungen verraten wichtige Eigenschaften. Bor erhielt seinen Namen nach dem arabischen Wort „boraka“, glänzend; Brom nach dem griechischen Wort „bromos“, Gestank, Geruch. Auch die Farbe mancher Elemente war bestimmend für die Namensgebung: Das griechische Wort „chloros“, gelbgrün, wurde zu Chlor, das lateinische „rubidus“, dunkelrot, zu Rubidium.

Es gibt auch zahlreiche Elemente, die ihren Namen zu Ehren eines Planeten des Sonnensystems erhielten, so Selen (griechisch „Mond“), Tellur (lateinisch „Erde“), Uran, Neptunium und Plutonium.

Die Namen anderer wurden der Mythologie entliehen.

Dazu gehört zum Beispiel Tantal. Tantalos hieß der Lieblingssohn des Zeus. Er war den Göttern gegenüber tückisch und hinterlistig, ja er beging ein grausames Verbrechen, wofür er von ihnen aufs strengste bestraft wurde. Das Wasser, in dem er zu stehen hatte, reichte ihm bis an die Kehle, schwerbeladene Zweige mit saftigen, wohlriechenden Früchten hingen über seinem Haupte. Doch wollte er seinen Durst stillen, entschwand das Wasser. Langte er nach den Früchten, wichen die Zweige zur Seite. Das Element Tantal erhielt seinen Namen, weil sein Oxid nicht wie andere Oxide überschüssige Säure unter Salzbildung an sich reißen konnte. Es erinnerte an Tantalos, der immer Durst hatte, obwohl er im Wasser stand.

Wir kennen Elemente, die ihre Namen nach verschiedenen Staaten und Ländern der Welt er-

hielten. Zu ihnen gehören die Elemente Germanium, Gallium (lateinische Bezeichnung „Gallia“ für Frankreich), Polonium, Skandium (zu Ehren Skandinaviens), Frankium, Ruthenium (lateinischer Name für Rußland), Europium und Amerizium. Die Namen anderer erinnern an Städte: Hafnium (Hafniae, lateinischer Name für Kopenhagen), Lutetium (Lutetia, lateinischer Name für Paris), Berkelium (nach der kalifornischen Universitätsstadt Berkeley). Yttrium, Terbium, Erbium, Ytterbium sind Abwandlungen von Ytterby. So heißt ein schwedisches Städtchen, wo ein diese Elemente enthaltene Mineral entdeckt worden war. Strontium deutet auf das Mineral „Strontianit“ hin, zuerst in der Nähe des schottischen Dörfchens Strontian gefunden. Magnesium erhielt seinen Namen nach einer Gesteinsart, die nahe der thessalischen Stadt Magnesia vorkommt.

Titan erhielt seinen Namen nach den sagenhaften Bewohnern der Erde, den Titanen. Und Vanadin wurde nach der nordischen Göttin Freyja benannt, die den Beinamen Vanadis trug und die sich durch eine große Beständigkeit ihrer Gefühle ausgezeichnet haben soll. Eine ähnliche Beständigkeit der Eigenschaften legt ja auch das Vanadin an den Tag. Schließlich wollte man mit der Bezeichnung des Elements den Namen eines großen Gelehrten verewigen. Wir kennen heute Kurium, Einsteinium, Fermium, Mendelewium, Nobelium, Lawrencium und Kurtschatovium.

Über den Ursprung der Namen von chemischen Elementen, die bereits im Altertum bekannt wa-

ren, herrscht Meinungsverschiedenheit. Tatsächlich ist bis auf den heutigen Tag noch nicht endgültig geklärt, weshalb Schwefel Schwefel heißt, Eisen Eisen oder Blei Blei.

**Zahlenwerte, ohne die die Chemie nicht auskommen kann** Die heutige Chemie, die eine exakte Wissenschaft ist, könnte ohne Zahlenwerte nicht auskommen. Bei ihren Untersuchungen beschreibt sie insbesondere quantitative Zusammenhänge im Stoffaustausch. Denn soll eine Reaktion in der gewünschten Weise zustandekommen, muß der Chemiker wissen, welche Mengen an Ausgangsstoffen er einzusetzen hat und welche Ausbeute die Reaktionen ergeben werden.

Notwendige Zahlenwerte, von denen nun die Rede sein soll, sind die Atom- und Molekulargewichte. Ohne sie gäbe es keine chemische Berechnung.

Es wäre, gelinde gesagt, nicht zweckmäßig, die Atom- bzw. die Molekülmasse in üblichen Einheitswerten auszudrücken (sagen wir in Gramm oder Milligramm). Die absoluten Atommassen sind sehr klein. Das Wasserstoffatom wiegt z. B.  $1,674 \cdot 10^{-24}$  g, das Kohlenstoffatom  $19,9 \cdot 10^{-24}$  g, und der zahlenmäßige Ausdruck für die Atomgewichte der übrigen Elemente gibt ein ähnliches Bild ab.

Man rechnet deshalb mit einer relativen Einheit.

Die ersten Errechnungen der Atomgewichte stammen von dem Begründer der Atomtheorie, von dem englischen Chemiker und Physiker John

Dalton, der auch zwei der wichtigsten Grundgesetze der Chemie, das Gesetz der konstanten Proportionen und das Gesetz der multiplen Proportionen bestätigte bzw. entwickelte. Dalton nahm das Atomgewicht des Wasserstoffs als Einheit an und bezog darauf die Atomgewichte der anderen Elemente. Die in Wasserstoffeinheiten ausgedrückte Masse eines Atoms ergab sein Atomgewicht. Das Atomgewicht gibt also an, um wievielfach das jeweilige Atom schwerer als ein Wasserstoffatom ist.

Beinahe ein Jahrhundert lang erkannte die Chemie die Daltonschen Werte an. Doch in der Folge kam man davon ab. An die Stelle der Wasserstoffeinheit trat das Sauerstoffatom als Standardatom. Sein Atomgewicht wurde als 16,000 angenommen. Wasserstoff hat also nur ein Sechzehntel der Atommasse des Sauerstoffs. Die Sauerstoffeinheit erwies sich als zweckmäßig, weil der Sauerstoff, zum Unterschied von Wasserstoff, beinahe für alle chemischen Elemente Bindungspartner ist.

Heute wird das Atomgewicht der Elemente mit speziellen Geräten, den sogenannten Massenspektrographen, bestimmt, die eine hohe Genauigkeit gewährleisten. Da sich die Elemente aus Isotopen zusammensetzen, stellen Atomgewichte, die an makroskopischen Mengen ermittelt wurden, Durchschnittswerte dar. Um genauere Ergebnisse zu erlangen, erhob man das Hauptisotop des Sauerstoffs, das Isotop  $^{16}\text{O}$ , zum Standard. Auf diese Weise kam man zur sogenannten physikalischen Atomgewichtsskala, die stets die relativen Massen einzelner Atome angibt. Sie

werden als Massenwerte bezeichnet. Der auf die benachbarte ganze Zahl abgerundete Massenwert (Isotopengewicht) stellt die Massenzahl dar, die sich mit der Nukleonenzahl des jeweiligen Elements deckt. Unter Atomgewicht sollte deshalb nur die relative Durchschnittsmasse der natürlicherweise als Isotopengemisch vorhandenen Elemente verstanden werden.

Die Grundlage dieser chemischen Atomgewichtsskala bildet also der sechzehnte Teil der mittleren Masse des Atoms des natürlich vorkommenden Sauerstoffs, der bekanntlich drei Isotope enthält:  $^{16}_8\text{O}$ ,  $^{17}_8\text{O}$  und  $^{18}_8\text{O}$ . Dieses chemische Atomgewicht ist also eine bestimmte Größe für ein Element, das im allgemeinen aus mehreren Isotopen besteht.

Es ergab sich demnach ein Unterschied im Einheitswert des Sauerstoffs, je nachdem, ob ihn Physiker oder Chemiker feststellten. Allerdings war es möglich, das Atomgewicht nach der einen Skala zu errechnen, wenn man den Wert kannte, der nach der anderen Skala bestimmt worden war. Um zum Beispiel das physikalische Atomgewicht zu ermitteln, hatte man das chemische mit der etwas umständlichen Zahl 1,000275 zu multiplizieren. Die chemischen Atomgewichte sind also etwas kleiner als die physikalischen.

Der Vorgang der Bestimmung des Atomgewichts ist an und für sich nicht schwierig. Doch tauchten Schwierigkeiten anderer Art auf. Chemiker und Physiker, eigene Wertmesser in der Hand, erzielten unterschiedliche Werte für verschiedene, in der Chemie äußerst wichtige Größen,

so für die Avogadrosche Zahl oder die universelle Gaskonstante. Auch stellte der Koeffizient für die Umrechnung von einem Skalenwert auf den anderen keine konstante Größe dar; er änderte sich mit der unterschiedlichen Isotopenzusammensetzung des natürlichen Sauerstoffs. Schließlich erwies sich Sauerstoff-16 als ein unbequemes Isotop für die massenspektrographische Bestimmung der Atomgewichte.

Die Wissenschaftler beschlossen deshalb im Jahre 1961, an die Stelle der Sauerstoffeinheit das Kohlenstoffisotop C-12 mit dem Atomgewicht 12,000 als Bezugswert zu setzen. Anstatt zweier Wertmesser, der physikalischen und der chemischen Atomgewichtsskala, stand nun ein einziger zur Verfügung, ein „Universalwertmesser“. Er ermöglicht es unter anderem, die Atomgewichte für viele Elemente genauer anzugeben.

Es ist nicht schwer, von „Sauerstoff“-Atomgewichten zu „Kohlenstoff“-Atomgewichten überzugehen. Die Formel dafür ist sehr einfach. Das in Kohlenstoffeinheiten ausgedrückte Atomgewicht ist gleich dem mit 0,999957 multiplizierten Atomgewicht, das auf Sauerstoff bezogen ist. Hinzugefügt sei, daß es noch einen Anwärter auf die Rolle des Einheitswertes für den neuen Wertmesser gab — das Fluorisotop  $^{19}\text{F}$ . Es bot sogar zahlreiche Vorteile. Die Wissenschaftler zögerten deshalb lange, ehe sie sich entschlossen, ihm den Kohlenstoff vorzuziehen. Die Frage wurde durch Stimmenmehrheit entschieden.



EINE SCHLANGE,  
DIE SICH IN DEN EIGENEN  
SCHWANZ BEISST



**Die Seele der chemischen Wissenschaft** Beinahe alles, was uns auf Erden umgibt, ist aus chemischen Verbindungen aufgebaut, aus verschiedenartigen Kombinationen chemischer Elemente.

Lediglich einen unbedeutenden Teil der Erdmaterie stellen als Elemente vorkommende Stoffe dar: Edelgase, Platinmetalle, Gold, Silber, Quecksilber, Antimon sowie in gewisser Hinsicht verschiedene Formen des Kohlenstoffs. Das wäre aber auch alles.

In sehr entfernten Zeiten setzte sich möglicherweise jener Klumpen kosmischer Materie, aus dem schließlich unser Planet entstand, ausschließlich aus Atomen von fast 100 chemischen Elementen zusammen. Millionen, ja Milliarden Jahre vergingen. Es änderten sich die Bedingungen. Es vollzogen sich ständig Wechselwirkungen zwischen den Atomen. Das gigantische chemische Laboratorium der Natur war und ist immer in Tätigkeit. Die Natur, dieser große Chemiker, hat im Laufe einer unablässigen Evolution die verschiedensten Stoffe, vom einfachsten Wassermolekül bis zu sehr komplizierten Eiweißen, hergestellt.

Die Entwicklung unseres Planeten und des Lebens auf der Erde vollzog sich in beträchtlichem Maße durch chemische Prozesse. Denn die große Vielfalt an chemischen Verbindungen ist Vorgängen zu verdanken, die wir als chemische Reaktionen bezeichnen. Diese bilden den Kernpunkt der chemischen Wissenschaft, ihren Hauptinhalt. Es ist unmöglich, die Zahl der chemischen Reaktionen, die in der Welt allein im Laufe

einer einzigen Sekunde vor sich gehen, auch nur beiläufig zu errechnen.

Damit beispielsweise der Mensch das Wort „Sekunde“ aussprechen kann, müssen sich in seinem Gehirn zahlreiche chemische Prozesse abgespielt haben. Wir sprechen und denken, sind lustig, manchmal auch betrübt — hinter all dem sind Millionen chemischer Reaktionen verborgen. Sie verlaufen fürs Auge unsichtbar. Doch eine Unmenge chemischer Wechselwirkungen beobachten wir Tag für Tag, ohne dem Vorgang Beachtung zu schenken, geschweige denn über sein Wesen nachzudenken.

...In ein Glas starken Tee werfen wir eine Zitronenscheibe — im Nu hellt sich das Getränk auf. Wir streichen ein Zündholz — augenblicklich entflammt das Holzstäbchen, es brennt und verkohlt.

All das sind chemische Reaktionen.

War nicht der Urmensch, dem es gelang, zum ersten Mal ein Feuer anzuzünden, der erste „Chemiker“? Er mußte mit Steinen Funken schlagen, bis es brannte, und dieser Brennvorgang war die erste von Menschen bewirkte chemische Umsetzung, die allernotwendigste, wichtigste in der Entwicklung der Menschheit.

Sie spendete unseren Urahnen Wärme. Und sie erschloß im Prinzip der Menschheit auch den Weg ins Weltall. Wenn Stoffe miteinander reagieren, nehmen wir das im allgemeinen wahr.

Wirft man zum Beispiel in verdünnte Schwefelsäure ein Stückchen Zink, so steigen im Nu Gasbläschen empor, und nach einiger Zeit wird der Metallspan verschwunden sein. Das Zink hat

sich in der Säure unter Absonderung von Wasserstoff aufgelöst. Wir sind Augenzeuge dieses Geschehens.

Zündet man ein Klümpchen Schwefel an, so erblickt man ein bläuliches Flämmchen, und in die Nase steigt ein stechender Geruch. Schwefel und Sauerstoff wurden Bindungspartner und ergaben das Anhydrid der schwefligen Säure.

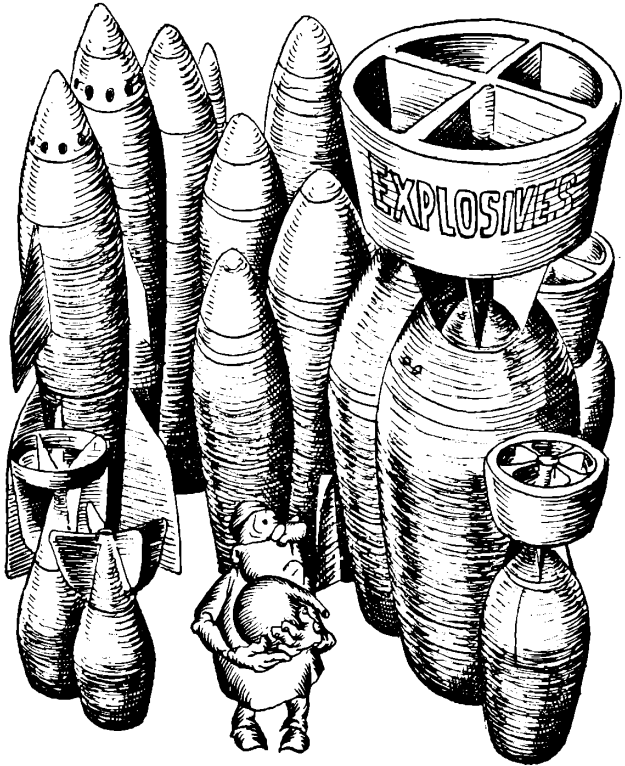
Es genügt, weißes  $\text{CuSO}_4$ -Pulver mit Wasser zu benetzen, damit es sich bläulich färbt. Das Salz verbindet sich mit Wasser, und es bilden sich  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ -Kristalle von dunkelblauer Farbtonung. Chemische Stoffe solcher Art nennt man Kristallhydrate.

Der Vorgang des Kalklöschens ist allgemein bekannt. Gelöschter Kalk  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  entsteht, wenn man auf gebrannten Kalk Wasser gießt. In diesem Falle bleibt die Farbe unverändert. Doch es ist ein leichtes, sich zu vergewissern, daß eine Reaktion zustande gekommen ist. Beim Vorgang des Kalklöschens werden große Wärmemengen freigesetzt.

Unerläßliche Bedingung einer jeden chemischen Reaktion ist Wärmeabgabe bzw. Wärmeaufnahme. Bisweilen sind die abgegebenen Wärmemengen so groß, daß sie mit der Hand wahrzunehmen sind. Unbedeutende Wärmeenergien können mit Hilfe spezieller Meßverfahren ermittelt werden.

**Blitze und Schildkröten** Explosionen sind vor allem deshalb schrecklich, weil sich der Vorgang plötzlich vollzieht — in Bruchteilen einer Sekunde.

Was ist eigentlich eine Explosion? Sie stellt sich als eine chemische Reaktion dar, begleitet von starker Gasentwicklung. Das Abbrennen des



Pulvers in der Patronenhülse oder die Explosion des Dynamits sind Beispiele dafür. Die Explosion ist ein Extremfall. Die meisten

chemischen Umsetzungen benötigen für ihren Verlauf eine längere Zeitspanne.

Bisweilen hat es sogar den Anschein, man könne den Ablauf gar nicht wahrnehmen.

...In einem gläsernen Gefäß befinden sich zwei Gase: Wasserstoff und Sauerstoff, also die zwei Komponenten des Wassers. Man kann das Gefäß lange stehen lassen: einen Monat, ein Jahr, hundert Jahre lang. An der Glaswand wird kein einziges Tröpfchen Naß wahrzunehmen sein. Verbinden sich denn Wasserstoff und Sauerstoff miteinander überhaupt nicht? Natürlich ist dem nicht so. Aber der Vorgang verläuft äußerst langsam. Jahrtausende werden verstreichen, ehe man auf dem Boden des Gefäßes eine kleine Portion Wasser entdeckt.

Woran liegt das? Bei Zimmertemperatur (15 bis 20° C) verläuft die Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktion sehr langsam. Es genügt, das Gefäß anzuwärmen, und sofort laufen die Wände des Gefäßes an — ein unfehlbares Symptom für den Ablauf der Reaktion. Bei 550° C zersplittert das Gefäß: Wasserstoff reagiert jetzt mit Sauerstoff explosionsartig.

Weshalb beschleunigt Wärme den Ablauf des chemischen Vorgangs in einem solchen Maße? Warum beginnt sich die „Schildkröte“ plötzlich blitzschnell fortzubewegen?

Wasserstoff und Sauerstoff bestehen ungebunden in Form der Moleküle  $H_2$  bzw.  $O_2$ . Um sich zu einem Wassermolekül verbinden zu können, müssen sie gegeneinander aufprallen. Je häufiger der Zusammenstoß ist, desto wahrscheinlicher ist das Zustandekommen des Wassermoleküls.

Bei Zimmertemperatur und normalem Luftdruck stoßen die Moleküle über zehn Milliarden mal in der Sekunde zusammen. Ergäbe jeder Anprall eine chemische Wechselwirkung, käme es zu einer Reaktion, die rascher verlief als eine Explosion — innerhalb einer zehnmilliardstel Sekunde.

In unserem Gefäß nehmen wir jedoch keine Veränderung wahr. Weder heute noch morgen. Auch nicht in zehn Jahren. Unter gewöhnlichen Bedingungen löst ein Zusammenstoß nur selten eine chemische Reaktion aus. Wir wissen weshalb. Es prallen ja Wasserstoff- und Sauerstoffmoleküle aufeinander.

Sollen sie instande sein, miteinander zu reagieren, müssen sie zunächst in Atome zerfallen. Genauer gesprochen, die Valenzbindung zwischen den Sauerstoff- und den Wasserstoffatomen in ihren Molekülen muß abgeschwächt werden, und zwar in einem solchen Maße, daß sie kein Hindernis für das Zusammenfügen der andersgerichteten Atome des Wasserstoffs und Sauerstoffs ist. Die Temperatur ist praktisch jene Peitsche, die die Reaktion antreibt. Sie vervielfacht in bedeutendem Maße die Anzahl der Zusammenstöße. Sie zwingt die Moleküle zu stärkeren Schwingungen, wodurch die Valenzbindung geschwächt wird. Sobald Wasserstoff und Sauerstoff einander auf „Atomniveau“ begegnen, reagieren sie miteinander augenblicklich.

**Eine wundervolle Barriere** Lassen wir in der Phantasie einmal folgende Vorgänge vor uns abrollen: Kaum hatten wir Wasserstoff mit Sauer-

stoff vermischt, sahen wir Wasserdampf hochsteigen. Kaum war die Eisenplatte mit Luft in Berührung gekommen, war sie von Rost bedeckt, und nach einer Weile zerbröckelte das harte, glänzende Metallstück in loses Oxidpulver.

Alle, buchstäblich alle chemischen Reaktionen vollzogen sich plötzlich mit der Geschwindigkeit, mit der ein Zauberer seine Kunststückchen vorführt. Alle Moleküle begannen miteinander zu reagieren, unabhängig von ihrem Energiewert. Jede Begegnung zweier Moleküle führte zu einer chemischen Verbindung.

Metalle verschwanden vom Erdboden — sie hatten sich in Oxide umgesetzt. Komplizierte organische Stoffe, darunter auch die Bestandteile einer lebenden Zelle, wurden zu einfachen Verbindungen von größerer Standhaftigkeit.

Eine seltsame Welt hatte sich vor uns aufgetan. Sie erstarrte plötzlich in Leblosigkeit. Übrig blieb eine phantastische Welt von äußerst stabilen Verbindungen, die nicht die geringste Neigung zu chemischen Wechselwirkungen zeigten. Es war eine schreckliche Welt, eine Welt ohne Chemie.

Zum Glück haben wir dieses Gespenst nur an die Wand gemalt. Denn einer solchen universellen „chemischen Katastrophe“ steht ein wunderbares Hindernis im Wege.

Diese Barriere ist die sogenannte Aktivierungsenergie. Damit Moleküle chemisch miteinander reagieren können, müssen die eigenen Energiemengen zumindest die Stufe entsprechender Aktivierungsenergien erreicht haben.

Selbst bei Zimmertemperatur z. B. gibt es unter den Wasserstoff- und Sauerstoffmolekülen solche, deren Energie der Aktivierungsenergie gleichkommt oder diesen Wert sogar übersteigt. Daher kommt es auch unter solchen Bedingungen zu einer Wasserbildung, wenngleich sich der Vorgang außerordentlich langsam vollzieht. Es gibt eben zu wenig „energische“ Moleküle. Eine hohe Temperatur hat allerdings dann zur Folge, daß zahlreiche Moleküle die Aktivierungsenergie erreichen, und die Zahl der zustande gekommenen Wasserstoff-Sauerstoff-Reaktionen erhöht sich in bedeutendem Maße.

**Eine Schlange, die sich in den eigenen Schwanz beißt** Die Medizin kennt ein Symbol aus uralten Zeiten: einen Stab, um den sich eine Schlange ringelt, das Sinnbild des antiken Heilgottes Äskulap.

Etwas ähnliches könnte es auch in der Chemie geben. Doch hier wäre es eine Schlange, die sich in den eigenen Schwanz beißt.

Kehren wir der Mystik den Rücken — unsere „chemische Schlange“ hat einen ganz bestimmten realen Sinn. Sie symbolisiert die chemische Rückreaktion.

Zwei Wasserstoffatome und ein Sauerstoffatom ergeben bei ihrer chemischen Verbindung ein Molekül Wasser. Gleichzeitig zerfällt ein anderes Wassermolekül in seine Bestandteile. Im gleichen Augenblick verlaufen zwei entgegengesetzte Reaktionen: Bildung (Hinreaktion) und Zerfall des Wassers (Rückreaktion). Die formelmäßige Darstellung der entgegengesetzten beiden Vorgänge

würde so aussehen:  $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightleftharpoons 2\text{H}_2\text{O}$ . Der Pfeil nach rechts verweist auf die Hinreaktion, der nach links kennzeichnet die Richtung der Rückreaktion.

Im Prinzip sind alle chemischen Reaktionen ausnahmslos umkehrbar (reversibel). Zuerst hat die Hinreaktion die Oberhand, die



zur Bildung der Wassermoleküle führt. Dann steigt die entgegengesetzte Reaktion an, und es tritt der Augenblick ein, da die Anzahl der sich bildenden Moleküle der Zahl der sich zersetzenden gleichkommt. Ob von links nach rechts oder von rechts nach links — einerlei: Beide Reaktionen verlaufen mit gleicher Geschwindigkeit.

Der Chemiker sagt: Der Gleichgewichtszustand

ist hergestellt. Bei jeder chemischen Umsetzung kommt es früher oder später dazu. Manchmal geschieht das innerhalb einer Sekunde, manchmal vergehen auch Tage. Ein Fall gleicht nicht dem anderen.

In ihrer praktischen Tätigkeit verfolgt die Chemie zweierlei. Erstens ist sie bestrebt, den chemischen Vorgang zu Ende zu bringen: Alle Ausgangsstoffe haben miteinander zu reagieren. Zweitens stellt sie sich die Aufgabe, eine größtmögliche Ausbeute an Endstoffen zu gewinnen. Damit beides zustandekommt, muß der Zeitpunkt, in dem der chemische Gleichgewichtszustand hergestellt ist, so weit wie möglich hinausgeschoben werden. Die Hinreaktion wird gefördert, die Rückreaktion gebremst.

Der Augenblick ist nun gekommen, da der Chemiker das Gewand des Mathematikers anzulegen hat. Er muß das Abhängigkeitsverhältnis zweier Größen bestimmen: das Verhältnis der Konzentration der Endstoffe zur Konzentration der Ausgangsstoffe.

Überwiegt beispielsweise die Hinreaktion, wird die Menge der Endstoffe größer sein als die der Ausgangsstoffe.

Das Verhältnis bezeichnet der Chemiker als Konstante  $K$  des Gleichgewichtszustandes der Reaktion. Erstrebt man eine Maximalausbeute des Endprodukts, muß man vorher den Wert  $K$  für verschiedene Temperaturen errechnen.

Eine solche Arithmetik sieht in der Praxis folgendermaßen aus: Damit eine Ammoniaksynthese zustandekommt, muß bei Zimmertemperatur  $K=100$  Millionen sein. Nun könnte man

meinen, daß unter solchen Umständen die Stickstoff-Wasserstoff-Mischung sofort Ammoniak ergeben würde. Doch dazu kommt es nicht. Die Geschwindigkeit der Hinreaktion ist sehr gering. Vielleicht schafft ein Temperaturanstieg Abhilfe?

Wir erhitzen unsere Mischung auf  $500^{\circ}\text{C}$ .

Aber, aber — der Chemiker schüttelt den Kopf: „Was tun Sie da bloß? Auf diese Weise werden Sie nichts erreichen. Absolut nichts!“

Zur rechten Zeit hat uns der Chemiker von unserem sinnlosen Versuch abgebracht. Seine exakten Berechnungen beweisen: Bei einer Temperatur von  $500^{\circ}\text{C}$  wäre  $K$  gleich 6000, also  $6 \cdot 10^3$ . Das hieße: Freien Lauf für die Rückreaktion  $2\text{NH}_3 \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{N}_2$ . Wir hätten ohne den Chemiker der Mischung immer mehr Wärme zugeführt und uns gewundert, daß sich kein Erfolg einstellte.

Für eine Ammoniaksynthese sind niedrige Temperaturen und entsprechend höhere Drücke am vorteilhaftesten, denn hier wirkt noch ein anderes Gesetz, das chemische Reaktionen steuert: das Le-Chatelier-Braunsche Prinzip, so genannt nach seinen Entdeckern, den Forschern H. Le Chatelier und K. F. Braun.

Stellen wir uns eine Sprungfeder vor, die in eine unbewegliche Stütze eingesetzt ist. Sie wird zunächst weder zusammengepreßt noch gestreckt. Man kann sagen, sie befindet sich im Gleichgewicht. Sie wird erst aus dem Gleichgewicht gebracht, sobald man sie komprimiert bzw. auseinanderzieht. Gleichzeitig widersetzt sich die Feder der Kompression bzw. der Ausdehnung.

Es tritt der Augenblick ein, in dem beide Kräfte einander ausgleichen, und die Feder befindet sich wieder im Gleichgewicht. Doch das wird nicht mehr das ursprüngliche Gleichgewicht sein — es wird in Richtung Kompression oder Dehnung „versetzt“ sein.

Diese Veränderung im Gleichgewichtszustand der der Deformation unterzogenen Sprungfeder stellt in sehr groben Umrissen ein Analogon zur Wirkung des Le-Chatelier-Braunschen Prinzips dar. Es wird als Prinzip des kleinsten Zwanges bezeichnet. Sobald auf ein im Gleichgewicht befindliches System eine äußere Kraft, ein Zwang, einwirkt, verschiebt sich das Gleichgewicht in einer von dieser Kraft vorbestimmten Richtung. Es weicht dem äußeren Zwang aus. Dies geht so lange vor sich, bis es zwischen den Kräften der Gegenwirkung und den Außenkräften zu einem Ausgleich gekommen ist.

Greifen wir das Beispiel der Ammoniakgewinnung wieder auf: Bei einer Erhöhung des Außendrucks verschiebt sich das Gleichgewicht dieses Systems nach rechts, denn das Gasvolumen des sich bildenden  $\text{NH}_3$  ist nur halb so groß wie das der Ausgangsprodukte. Im gegebenen Falle ist dies von Vorteil. Die Reaktion verläuft im wesentlichen von links nach rechts:  $3\text{H}_2 + \text{N}_2 \rightarrow 2\text{NH}_3$ . Die Ammoniakausbeute wird größer.

Bei der Ammoniaksynthese wird Wärme ausgeschieden. Erwärmen wir die Ausgangsprodukte, so wird die Reaktion demnach von rechts nach links verlaufen. Denn eine Temperaturerhöhung führt zur Vergrößerung des Gasvolumens. Der Rauminhalt der Ausgangsstoffe ( $3\text{H}_2$  und  $\text{N}_2$ )

übersteigt das Volumen des Endprodukts ( $2\text{NH}_3$ ). Das bedeutet, daß die Rückreaktion die Oberhand gewonnen hat.

In beiden Fällen wird ein neues Gleichgewicht entstanden sein. Im ersten Falle wird es einen Anstieg in der Ammoniakgewinnung bedeuten, im zweiten eine jähe Abnahme. Bei der Ammoniaksynthese, die in der Technik vollzogen wird, wird dennoch die Temperatur auf  $500^\circ\text{C}$  erhöht. Die hier verwendeten Katalysatoren sind erst bei sehr hohen Temperaturen wirksam. Man erreicht auf diese Weise eine Steigerung der Reaktionsgeschwindigkeit und folglich eine hohe Ausbeute.

### **Wie die Schildkröte zum Blitz wird und umgekehrt**

Vor hundert Jahren führte ein Chemiker, äußerste Vorsicht wahrend, ein Stück Platindraht in ein mit einer Wasserstoff-Sauerstoff-Mischung gefülltes Gefäß ein.

Es erfolgte etwas Außergewöhnliches: Im Gefäß bildete sich Wasserdunst. Die Temperatur war unverändert geblieben, der Druck gleichfalls, und dennoch vollzog sich die eigentlich auf Jahrtausende „berechnete“ Wasserstoff-Sauerstoff-Wechselwirkung innerhalb von wenigen Sekunden.

Erstaunlich war auch, daß das Stückchen Platindraht, mit dessen Hilfe es offensichtlich gelungen war, im Nu zwei Gase zu vereinigen, sich nicht im geringsten verändert hatte. Aussehen, chemische Zusammensetzung, Gewicht — alles war beim alten geblieben.

Der Wissenschaftler, von dem die Rede ist, war

alles andere als ein Zauberer. Ihm ging es nicht darum, durch geheimnisvolle Kunststücke ein Publikum zu amüsieren. Es war der deutsche Forscher Johann Wolfgang Doebereiner. Die Erscheinung, die ihn beschäftigte, nennt man heutzutage Katalyse. Stoffe, die, bildlich gesprochen, imstande sind, „Schildkröten“ in „Blitze“ zu verwandeln, tragen den Namen Katalysatoren. Sie verändern die Geschwindigkeit der Reaktionen, ohne im Endprodukt zu erscheinen. Es gibt deren eine ganze Menge. Welche Stoffe können Katalysatoren sein? Zu ihnen gehören feste als auch pulverförmige Metalle, Oxide verschiedener Elemente, Salze und Basen, ja auch organische Stoffe wie Fermente oder Enzyme. Lebenswichtigste Prozesse spielen sich dank besonderer Katalysatoren, der Fermente, im tierischen und pflanzlichen Organismus ab. Die anorganische und organische Chemie ist also die Wirkungssphäre dieser erstaunlichen Beschleuniger. Sie werden in reiner Form oder in Form von Mischungen (Mischkatalysatoren) verwendet.

Der Vorgang der Ammoniaksynthese würde ohne einen Katalysator wenig effektiv sein, selbst wenn man Druck- und Temperaturwerte variierte. Ganz anders gestaltet er sich bei Anwesenheit eines Katalysators. Gewöhnliches Eisen (mit beigemengtem Aluminium- und Kaliumoxid als Träger und Verstärker) beschleunigt die Stoffumsetzung wesentlich.

Nicht jeder Stoff ist imstande, diesen oder jenen Vorgang zu beschleunigen. Nimmt man beispielsweise statt des Platindrahts ein Stück Kupfer-

Aluminium- oder Eisendraht, dann werden die Wände des oben beschriebenen Gefäßes nicht „anlaufen“. Wasserstoff und Sauerstoff sind in einem solchen Falle nicht geneigt, eine Bindung einzugehen, wie sie das auf Geheiß des Platin-Zauberstabs getan haben.



Die Chemiker sprechen von einer selektiven Tätigkeit der Katalysatoren: Die eine Reaktion können sie tatkräftig beeinflussen, an der anderen gehen sie achtlos vorbei. Allerdings hat auch diese Regel ihre Ausnahmen. So besitzt zum Beispiel Aluminiumoxid die Fähigkeit, mehrere Dutzend Reaktionen der Synthese von organischen oder anorganischen Verbindungen zu

beschleunigen. Schließlich lösen verschiedene Katalysatoren bei gleichen Ausgangsstoffen unterschiedliche Reaktionen aus, und sie ergeben dann auch unterschiedliche Endprodukte. Bemerkenswert ist auf jeden Fall: Der Verwendung von Katalysatoren verdankt die Chemie des zwanzigsten Jahrhunderts ihren phantastischen Aufschwung.

Nicht weniger erstaunliche Stoffe sind die Aktivatoren oder Promotoren. Sie allein vermögen jedoch nicht den Ablauf einer Reaktion zu beeinflussen. Aber treten sie als Partner des Katalysators auf, wird die Reaktion in stärkerem Maße beschleunigt, als dies der Katalysator ohne diese Hilfe hätte bewirken können. Wäre das Stück Platindraht zum Beispiel nicht „rein“ gewesen, sondern mit Eisenkörnchen, Aluminium oder Siliziumdioxid „verschmutzt“, hätte es in der Wasserstoff-Sauerstoff-Mischung noch größere Wunder vollbracht.

Es gibt noch eine andere Art von Katalyse — eine von Antikatalysatoren zustandegebrachte Antikatalyse. Die Wissenschaftler nennen diese Antikatalysatoren Inhibitoren, d. h. „Verlangsamter“. Ihre Aufgabe ist es, Reaktionen zu „bremsen“.

**Kettenreaktionen** ...In einem Glaskolben befindet sich eine Chlor-Wasserstoff-Mischung. Unter normalen Umständen reagieren die Moleküle miteinander äußerst langsam. Nun zünden wir in Kolbennähe Magnesiumspäne an. Im Nu knallt es. (Sollte jemand zu diesem Ex-

periment Lust verspüren, vergesse er ja nicht, über den Kolben eine Glocke aus starkem Drahtgeflecht zu stülpen!)

Weshalb explodierte die Chlor-Wasserstoff-Mischung unter der Einwirkung grellen Lichts?

Es trat eine Kettenreaktion ein. Hätten wir den Kolben auf eine Temperatur von  $700^{\circ}\text{C}$  erhitzt, wäre gleichfalls eine Explosion ausgelöst worden: Chlor und Wasserstoff hätten innerhalb des Bruchteils einer Sekunde miteinander reagiert. Das wäre ja auch kein Wunder. Die Wärme hätte die Aktivierungsenergie der Moleküle hochgetrieben. Doch im Experiment, von dem soeben die Rede war, hatte der Temperaturwert keinerlei Änderung erfahren. Die Reaktion wurde durch das Licht ausgelöst.

Die Lichtquanten sind Träger hoher Energien, die größer sind, als sie für die Aktivierung des Moleküls benötigt werden. Das Lichtquant begegnet aus seinem Weg einem Chlormolekül. Es zerlegt es in Atome, auf die es seine Energie überträgt.

Die Chloratome befinden sich in angeregtem, energiereichem Zustand. Sie stürzen sich auf die Wasserstoffmoleküle, spalten sie in Atome auf. Ein Wasserstoffatom verbindet sich mit einem Chloratom. Das andere bleibt frei, in angeregtem Zustand. Es möchte deshalb ein anderes Atom an seiner Energie teilnehmen lassen. Sobald es auf ein Chlormolekül aufprallt, ist es um das phlegmatische Chlormolekül geschehen.

Dabei kommt ein weiteres aktives Chloratom frei. Es dauert nun nicht lange, bis es an einem

weiteren Wasserstoffmolekül seine Kraft beweist.

Auf diese Weise gelingt es, eine lange Kettenreaktion zustandezubringen.

Es genügt, daß die Reaktion gestartet wird — dank der bei der Reaktion freigewordenen Energie werden immer neue Moleküle aktiviert. Die Geschwindigkeit der Reaktion steigt zunehmend an, einer im Hochgebirge herabgestürzten Schneelawine gleich. Ist das Tal erreicht, kommt die Lawine zum Stehen. Die Kettenreaktion wird also abflauen, wenn alle Moleküle mitgerissen worden sind, wenn alle Wasserstoff- und Chlormoleküle miteinander reagiert haben. Kettenreaktionen sind die Oxydationen organischer Substanzen durch Sauerstoff, die Chlorierungen, Bromierungen sowie viele Polymerisationen.

Die Chemiker kennen also zahlreiche Kettenreaktionen. Um ihre Erforschung hat sich der hervorragende sowjetische Physiker und Chemiker Nobelpreisträger Professor Nikolai Nikolajewitsch Semjonow sehr verdient gemacht. Kettenreaktionen werden auch von den Physikern erforscht. Die durch Neutronen ausgelöste Urankernspaltung stellt ein Musterbeispiel physikalischer Kettenreaktionen dar.

**Wie die Chemie mit der Elektrizität Freundschaft schloß** Bei allen, die ihn kannten, genoß er Achtung. Er war ein solider Mensch. Doch plötzlich verlegte er sich auf eine recht merkwürdige Beschäftigung.

Es begann mit der Anfertigung von kleinen Schei-

ben, die er zu vielen Dutzenden aus Kupfer und Zink herstellte. Dann schnitt er aus einem Schwamm runde Plättchen aus und tränkte sie mit Salzwasser. Schließlich setzte er eine Scheibe auf die andere, wie es Kinder tun, wenn sie eine Pyramide bauen. Allerdings wahrte er dabei eine bestimmte Folge: Kupferscheibe — Schwammstück — Zinkscheibe, und so weiter und so weiter, viele Male, bis die Säule schon einzustürzen drohte.

Der Sonderling berührte mit feuchten Fingern das Fundament seiner originellen Konstruktion. Rasch zog er die Hand zurück. Elektrischer Strom hatte ihm — wie es im Volksmund heißt — einen „tüchtigen Schlag“ versetzt.

Auf diese Weise erfand der berühmte italienische Physiker Alessandro Volta das galvanische Element, eine chemische Stromquelle. Eine chemische Reaktion hatte in der Volta-Säule Elektrizität erzeugt.

Eine neue Disziplin der Wissenschaft, die Elektrochemie, entstand. Sie befaßt sich mit der gegenseitigen Umwandlung der elektrischen und der chemischen Energie sowie mit der Anwendung der Gesetze der klassischen Elektrizitätslehre auf Fragen, die mit der Struktur der Materie zusammenhängen.

Mit den galvanischen Elementen war in die Hände der Forscher ein Gerät gelangt, das ihnen so lange elektrischen Strom zur Verfügung stellen konnte, solange in der Voltaschen Säule die chemischen Vorgänge vor sich gingen.

Es war nun geradezu verlockend, mit Hilfe dieser Gleichstromquelle zu ermitteln, welcher

Art die Wirkung von Elektrizität auf verschiedene Stoffe ist.

Der Arzt Carlisle und der Ingenieur Nicholson wählten Wasser zum Forschungsobjekt. Zu jener Zeit, zu Beginn des neunzehnten Jahrhunderts, war die Behauptung der Chemiker, Wasser setze sich aus Wasserstoff und Sauerstoff zusammen, bereits allgemein anerkannt. Doch es war noch nicht gelungen, im Experiment die Richtigkeit der Annahme zu beweisen.

Die beiden Wissenschaftler verwendeten eine aus 17 galvanischen Elementen zusammengesetzte elektrische Batterie, die einen energiereichen Strom erzeugen konnte, den sie durch Flüssigkeit leiteten. Es erfolgte eine stürmische Zersetzung des Wassers in zwei Gase, in Wasserstoff und Sauerstoff. Die durch elektrischen Strom hervorgerufene Zersetzung von Stoffen nennt man Elektrolyse.

**Feind Nummer 1** In der Welt gibt es Hunderte und Tausende von Hochöfen, die Stahl und Roheisen erschmelzen. In allen Ländern sind Wirtschaftsfachleute damit beschäftigt, aufs genaueste zu errechnen, wieviel Tonnen die Jahresausbeute ergeben hat, wieviel in den kommenden Jahren erzeugt werden müssen.

Doch eines ist geradezu erschütternd: Was an jedem achten Hochofen im Laufe des Jahres erzeugt worden ist, war „für die Katz“. Alljährlich büßt man beträchtliche Metallmengen ein. Rund 12 Prozent der gewonnenen Mengen fallen einem Vielfraß zum Opfer.

Sie werden vom Rost zerfressen. Die Wissen-

schaft nennt diese Erscheinung „Korrosion metallischer Werkstoffe“.

Nicht nur Eisenmetalle sind ihre Opfer, sondern auch die Buntmetalle: Kupfer, Blei und Zink.

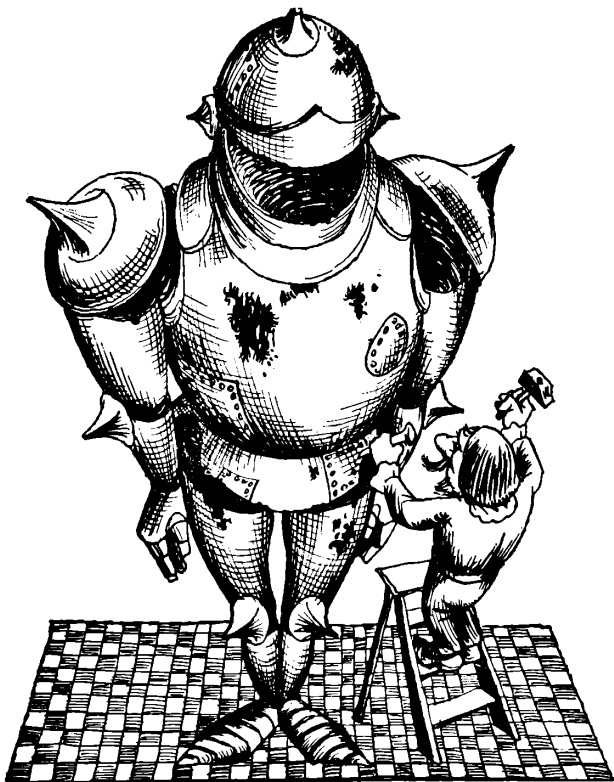
Die Korrosion stellt eine Oxydation der Metalle dar. Die meisten Metalle sind in freiem Zustand nicht sehr beständig. Der Luft ausgesetzt, bedeckt sich mit der Zeit die glänzende Oberfläche eines metallischen Gegenstandes mit jenem braunroten, pulvrig-schuppigen Produkt, dessen Urheber die Oxide sind.

Im Verlauf der Oxydation büßen Metalle und Legierungen zahlreiche wertvolle Eigenschaften ein. Sie verlieren an Festigkeit und Elastizität, an Wärme- und elektrischer Leitfähigkeit.

Die Korrosion bleibt niemals auf halbem Wege stehen. Der Rost, dieser braunrote „Teufel“, zerstört mit der Zeit den ganzen Gegenstand. Es beginnt damit, daß auf die Metalloberfläche Sauerstoffmoleküle gelangen. Dadurch bilden sich die ersten Oxidmoleküle. Es entsteht — wie es heißt — ein Oxidfilm. Er ist porös. Einem Sieb gleich, läßt er die Metallatome durch, die gleichfalls unverzüglich oxydieren. Der Vorgang verläuft auch in umgekehrter Richtung: Die Sauerstoffmoleküle dringen durch die Poren des Oxidfilms ins Metall ein und setzen hier die verheerende Tätigkeit fort.

In chemisch aggressiver Umgebung verläuft der Korrosionsvorgang sehr stürmisch. Chlor, Fluor, Schwefelgas, Schwefelwasserstoff sind für Metalle nicht minder heimtückische Feinde. Kommt es zu einer Korrosion unter Einwirkung von Gasen, spricht man von einer Gaskorrosion.

Auch verschiedene Lösungen sind für die Metalle ein wahrer Schrecken. Dazu gehört auch das



allergewöhnlichste Meereswasser. Selbst die größten Ozeanschiffe müssen von Zeit zu Zeit zu einer

Generalüberholung ins Dock. Nach einer gewissen Zeit muß auch die von der Korrosion zerfressene Außenhaut gewechselt werden.

Von einem amerikanischen Millionär erzählt man sich eine ergötzliche Geschichte.

Der reiche Mann wollte die beste Jacht der Welt besitzen. Traumhaft schön war das Projekt, das er entwerfen ließ. Wahrhaft verlockend war der Name, den er für sein Luxusboot eronnen hatte: „Ruf des Meeres“. Er scheute keine Kosten, und schließlich war das Traumschiff fertig. Nur noch die Kajüten mußten den letzten Schliff bekommen.

Doch o weh! Der Jacht war es nicht vergönnt, in See zu stechen. Der „Ruf des Meeres“ blieb ungehört. Kurz vor der Jungfernfahrt war die Außenhaut durch Korrosion zerstört.

Weshalb aber so rasch? Als Werkstoff für die Bepattung der Außenhaut verwendeten die Baumeister vorwiegend ein sogenanntes Monel, d. h. eine Nickel-Kupfer-Legierung. An sich wäre ja nichts dagegen einzuwenden, denn diese kostspielige Legierung ist in Seewasser äußerst korrosionsfest. Doch ihre mechanische Festigkeit läßt viel zu wünschen übrig. Man fertigte daher zahlreiche Teile der Jacht aus anderen Metallen, aus Sonderstählen an.

Dies wurde der Jacht zum Verderben. An den Stellen, wo Monelmetall mit Stahl in Berührung kam, bildete sich ein starkes galvanisches Element. Die dadurch hervorgerufenen elektrochemischen Reaktionen bewirkten eine außerordentlich starke Korrosion.

Diese Geschichte verdeutlicht eines der Gesetze

der Korrosion, das besagt: Der Zersetzungsvorgang verläuft viel schneller, wenn die Verbindungsstellen verschiedenartiger Metalle praktisch ein unterschiedliches elektrochemisches Potential ergeben und so zur Bildung eines galvanischen Elements führen. Das unedlere Metall wird beschleunigt zersetzt.

**Wie gegen Korrosion anzukämpfen ist** Seit 1600 Jahren steht in der indischen Stadt Delhi eine erstaunliche Säule von 8 m Höhe. Sie besteht aus reinem Eisen, und die Zeit hat keine Gewalt über sie. Seit vielen Jahrhunderten sieht sie wie neu aus. Sie rostet nicht — als ob die Korrosion die ihr eigenen Gewohnheiten aufgegeben hätte.

Auf welche Weise es Metallurgen des Altertums gelungen sein konnte, Reineisen zu erschmelzen, bleibt ein Rätsel. Phantasten verstiegen sich zu der Behauptung, hier sei keines Menschen Hand am Werke gewesen. Den Obelisk hätten Bewohner aus anderen Welten errichtet — gewissermaßen zum Andenken an ihren irdischen Aufenthalt.

Mag die Säule ihren geheimnisvollen Nimbus behalten — für den Chemiker hat ein äußerst wichtiger Tatbestand nach wie vor Geltung: Je reiner das Metall ist, desto langsamer wirkt die zerstörende Gewalt der Korrosion. Gegen sie erfolgreich anzukämpfen, heißt also, immer reinere Metalle verwenden.

Doch mit der Reinheit allein ist es nicht getan. Von Bedeutung ist auch die Güte der Ober-

flächenbehandlung. Stellenweise Unebenheiten können wie Fremdeinschlüsse wirken. Heutzutage ist es Wissenschaftlern und Ingenieuren bereits gelungen, an metallischen Erzeugnissen eine fast ideal glatte Oberfläche zu gewinnen. Vor allem hat diese besondere Oberflächenbehandlung in der Raketen- und Weltraumtechnik Verwendung gefunden.

Sollte also das Problem der Korrosionsbekämpfung gelöst sein? Die Gewinnung von Reinetallen ist äußerst kompliziert. Sie erfordert einen gewaltigen Aufwand. In der Technik werden vor allem Legierungen verwendet, weil man auf diese Weise über eine größere Auswahl an Eigenschaften verfügt. Doch jede Legierung setzt die Anwesenheit von mindestens zwei Metallen voraus. Wir wollen nicht in Abrede stellen, daß es den Chemikern bereits gelungen ist, die verschiedensten Mechanismen des Korrosionsvorgangs aufzuhellen. Wenn sie eine neue Legierung mit vorbestimmten Eigenschaften zu gewinnen suchen, lassen sie die „Korrosionsfrage“ nicht außer acht. Es sind bereits zahlreiche Legierungen bekannt, die sich durch Korrosionsbeständigkeit auszeichnen.

Im Alltag begegnen wir verschiedenen verzinkten und verzinneten Gegenständen. Man bedeckt Eisen mit einem Zink- oder Bleiüberzug als Rostschutz. Mit diesem passiven Rostschutz wird tatsächlich für eine gewisse Zeit Abhilfe geschaffen. Neben metallischen Überzügen gibt es auch nichtmetallische, die möglichst porenfrei sein müssen, damit sie das zu schützende Material vom Korrosionsmittel trennen. Dazu gehören

auch Beschichtungen durch Plaste oder eine dick aufgetragene Ölfarbe.

Der springende Punkt bei jedem Korrosionsvorgang ist seine Abschwächung, also eine Verlangsamung des Ablaufs der sich vollziehenden elektrochemischen Reaktionen. Zu diesem Zweck nutzt man spezielle anorganische und organische Stoffe, die sogenannten Inhibitoren. Auf sie stieß man durch Zufall.

Im alten Rußland — noch vor Peter I. — wandten zum Beispiel die Waffenschmiede eine kuriose Methode an. Damit sich der Zunder nicht festsetzte, ätzten sie den Gewehrlauf mit Schwefelsäure an, der sie Weizenkleie beigaben. Dieses primitive Verfahren genügte, um das Metall gegen Zerstörung durch Säure zu schützen.

Heutzutage verläßt man sich bei der Suche nach neuen Inhibitoren nicht auf einen Zufall. Die Erforschung von Inhibitoren gehört zu den wichtigsten Aufgaben der Chemiker und Physiker. Hunderte der verschiedensten physikalischen und chemischen Verlangsamer des Korrosionsvorgangs sind bereits bekannt. Sie werden sowohl in flüssigem als auch in gasförmigem Zustand angewendet.

Für die Gesundheit der Metalle muß Sorge getragen sein, noch ehe sie von der Korrosionskrankheit angegriffen sind.

Außer durch Inhibitoren wird ein aktiver Korrosionsschutz vor allem durch ein Verändern des Werkstoffes auf dem Wege einer Legierung, durch die Anwendung reiner, möglichst gefügehomer Materialien sowie durch katodischen oder anodischen Schutz erreicht.

**Leuchtender Strahl** Wieviel Aggregatzustände der Materie gibt es? Die Physiker haben vier Erscheinungsformen der Materie ermittelt, die durch eine im molekularen Bereich verschieden große Bindungsfestigkeit bedingt sind. Drei von ihnen sind allgemein bekannt: fest, flüssig und gasförmig. Im Alltag begegnen wir ja praktisch keinem anderen Zustand. Mit diesen drei Formarten begnügte sich auch die Chemie im Laufe von Jahrhunderten. Doch im letzten Jahrzehnt hat es die Chemie mit einem vierten Zustand der Materie zu tun, mit dem Plasma.

Das Plasma kann, wenn man so will, als ein Gaszustand betrachtet werden, jedoch von besonderer Art. Das Plasma wird nicht nur von neutralen Teilen, also von Atomen und Molekülen, gebildet, sondern in hohem Grade auch von Ionen und Elektronen, so daß sich die elektrischen Ladungen aufheben. Ionisierte Teilchen enthält auch das gewöhnliche Gas. Je mehr davon darin enthalten sind, desto höher ist die Temperatur. Daher gibt es auch keine scharfe Grenze zwischen ionisiertem Gas und dem Plasma. Bedingt wird angenommen, daß Gas in Plasma übergeht, sobald dessen Haupteigenschaften, beispielweise eine hohe elektrische Leitfähigkeit, wahrzunehmen sind.

Es mag paradox klingen. Doch im Weltall herrscht das Plasma. Die Materie der Sonne und der Sterne, der Gase, des gesamten interstellaren Raumes befindet sich im Plasmazustand. Bei diesen außerirdischen Objekten handelt es sich um natürliches Plasma. Unter irdischen Verhältnissen ist der Plasmazustand nur für kurze Zeit

beobachtbar. Er tritt bei elektrischen Lichtbögen auf, in Flammen sehr hoher Temperatur oder bei Explosionen. Im allgemeinen muß Plasma künstlich hergestellt werden, und zwar in speziellen Anlagen, den Plasmatronen. Verschiedene Gase (Helium, Wasserstoff, Stickstoff, Argon) werden in dieser Anlage mit Hilfe des elektrischen Lichtbogens in Plasma umgewandelt. Da der leuchtende Plasmastrahl im engen Kanal der Plasmatrondüse in ein Magnetfeld eingezwängt wird, entwickelt sich im Plasma eine Temperatur von mehreren zehntausend Grad Celsius.

Derartige Temperaturen zu erlangen, war seit jeher ein Traum der Chemiker. Mit ihnen könnte man ja den Ablauf zahlreicher chemischer Vorgänge wesentlich beeinflussen. Heute ist dieser Traum Wirklichkeit geworden, denn eine neue wissenschaftliche Disziplin entstand, die Plasmaphysik oder die Chemie des „kalten“ Plasmas.

Gibt es auch ein „heißes“ Plasma, ein auf Millionen Grad Celsius erhitztes, sehr dichtes Plasma? Die Physiker suchen das Plasma zu beherrschen und es zur Kernverschmelzung, zur gesteuerten thermonuklearen Reaktion, zur Umsetzung des Wasserstoffs in Helium zu verwenden.

Die Chemiker begnügen sich mit dem kalten Plasma. Den Ablauf chemischer Vorgänge bei Temperaturen von 10 000 und mehr Grad Celsius zu erforschen — gibt es etwas Verlockenderes?

Manche Skeptiker bezeichnen derartige Versuche als unnützes Unterfangen. Wird nicht in einer so hoch erhitzten Atmosphäre jede Materie dem

gleichen Schicksal verfallen: der Zerstörung, dem Zerfall der meistkomplizierten Moleküle in einzelne Atome und Ionen?

In Wirklichkeit sind die Dinge weitaus komplizierter, als man sie sich zunächst vorgestellt hatte. Das Plasma beschränkt sich nicht auf Zerstörung, es baut auch auf. Bei den Experimenten beobachtete man, daß sich in Plasma die Synthese von neuen chemischen Verbindungen vollzog, darunter auch von solchen, die mit anderen Verfahren nicht zu gewinnen waren. Es waren erstaunliche, bislang nirgendwo beschriebene Substanzen:  $\text{Al}_2\text{O}$ ,  $\text{Ba}_2\text{O}_3$ ,  $\text{SO}$ ,  $\text{SiO}$ ,  $\text{CaCl}$  u. a., wobei die einzelnen Elemente völlig ungewöhnliche, anormale Wertigkeiten aufwiesen. All das war sehr interessant. Aber die Plasmachemie stellte sich wichtigere Aufgaben. Es kam vor allem darauf an, rasch und billig bekannte Substanzen, die äußerst nützlich sind, zu gewinnen.

Einiges von dem, was auf diesem Gebiet bisher erreicht wurde, soll nun kurz skizziert werden.

Bei vielen Vorgängen der organischen Synthese, so zur Herstellung von Plasten, Kautschuken, Farbstoffen und Arzneien, spielt das Äthin (Azehtylen) eine bedeutende Rolle. Doch die Herstellung des Äthins, der Grundsubstanz fast aller organischen Verbindungen, geschieht nach wie vor auf althergebrachte Weise: Kalziumkarbid wird mit Wasser zersetzt. Ein kostspieliger und unbequemer Vorgang!

Im Plasmatron spielen sich die Dinge anders ab. Mit Hilfe von Wasserstoff wird ein Plasma von

5000° C erzeugt. Der Wasserstoff-Plasma-Strahl trägt seine riesigen Energien in einen Spezialreaktor, dem Methan zugeführt wird. Es kommt zu einer intensiven Mischung von Methan und Wasserstoff, und innerhalb des zehnten Bruchteils einer Millisekunde ist Methan zu 75 Prozent in Äthin umgewandelt. Dieses Verfahren gelingt neuerdings schon bei einem Lichtbogen von 1400° C.

Ein Idealfall? Dieses Verfahren kennt auch einen Störfried. Verweilt Äthin auch nur einen einzigen Augenblick länger in der hochgradigen Temperaturzone des Plasmas, so setzt im Nu sein Zerfall ein. Die Temperatur muß also schleunigst herabgedrückt, auf ein ungefährliches Niveau gebracht werden. Das kann mit Hilfe verschiedener Verfahren geschehen, jedoch treten dabei erhebliche technische Schwierigkeiten auf, und es können vorläufig bloß 15 Prozent des gewonnenen Äthins vor der Dissoziation gerettet werden. Immerhin ist dieser Prozentsatz auch nicht zu verachten.

Unter Laborverhältnissen wurde ein Verfahren für die plasmachemische Zerlegung billiger, flüssiger Kohlenwasserstoffe in Äthin, Äthen (Äthylen) und Propylen entwickelt. Vor noch nicht allzulanger Zeit gelang es in der Sowjetunion, Äthin direkt aus Ruß und Wasserstoff bei  $6 \cdot 10^3$ ° C und einem Druck von  $10^4$  at herzustellen. Für die weitere Entwicklung der Azethylenchemie mag dies von großer Bedeutung sein.

Auf der Tagesordnung steht nun ein Problem von ganz besonderer Wichtigkeit: die Bindung

des Stickstoffs aus der atmosphärischen Luft. Denn die Darstellung von stickstoffhaltigen Verbindungen, sagen wir von Ammoniak, ist ein arbeitsintensives, kostspieliges und kompliziertes Unterfangen. Bereits vor Jahren waren Versuche unternommen worden, großtechnisch die Elektrosynthese von Stickstoffoxiden zu bewerkstelligen. Doch der wirtschaftliche Nutzeffekt erwies sich als äußerst gering. Die Plasmachemie verspricht in dieser Hinsicht weitaus mehr.

**Die Sonne in der Rolle eines Chemikers** Stevenson, der Erfinder der Lokomotive, unternahm einst unweit der ersten in England errichteten Eisenbahnstrecke einen Spaziergang in Begleitung seines Freundes, des Geologen Backland.

„Weißt du auch, Backland“, wandte sich Stevenson an seinen Freund, „was diesen Zug in Bewegung setzt?“

„Sicherlich die Hand des Lokführers, der eine deiner besten Lokomotiven führt.“

„Falsch.“

„Der Dampf, der die Lokomotive antreibt?“

„Falsch.“

„Das Feuer unter dem Kessel?“

„Wieder falsch geraten. Die Antriebskraft ist die Sonne. Sie schien in weit entfernten Zeiten über einer Pflanzenwelt, die zur Kohle wurde, mit der der Lokführer nun das Feuer speist.“

Alles Lebende verdankt der Sonne seine Entstehung. Wollten wir Pflanzen im Dunkeln züchten, erhielten wir statt saftiger, grüner Triebe dünne, bleiche Fasern. Denn unter der Einwir-

kung des Sonnenlichts verwandelt das Chlorophyll, ein Farbstoff, der das Blattgrün bedingt, das Kohlendioxid der Luft in zusammengesetzte Moleküle organischer Stoffe, die die Hauptmasse der Pflanzen bilden.

Die Sonnenstrahlen stellen also jenen Chefchemiker dar, der alle organischen Stoffe in den Pflanzen aufbaut. Nicht von ungefähr wurde die Assimilation der Kohlendioxide durch die Pflanzen Photosynthese genannt.

Bislang führte die Erforschung der photochemischen Reaktionen nicht zur Gewinnung von Eiweißen oder Kohlenhydraten unter Laborbedingungen, obwohl diese Verbindungen primäre Produkte bei der Photosynthese der Pflanzen sind.

Für die Synthese von komplizierten organischen Molekülen nutzt die Pflanze anfangs nur Kohlendioxide, Wasser und Sonnenlicht aus. Vielleicht aber wirkt bei diesem „Produktionsvorgang“ noch ein anderer Faktor mit.

Stellen Sie sich einmal ein Werk mit folgendem Produktionsablauf vor: Über Rohrleitungen gelangen Soda, Erdöl, Kalisalpeter und ähnliche Ausgangsstoffe zur Verarbeitung. Das Werkstor passieren Lastkraftwagen mit Brötchen, Wurst und Zucker. Gebilde der Phantasie? Selbstverständlich. Doch Ähnliches vollzieht sich in der Pflanzenwelt.

Auch die Pflanzen besitzen ihre Katalysatoren. Sie heißen Fermente. Jedes Ferment steuert den Ablauf einer Reaktion in einer bestimmten Richtung. Daraus geht hervor, daß an der Photosynthese nicht ein einzelner Chemiker, also nur

die Sonne, Anteil hat, sondern bei ihr wirken noch mehrere „Kollegen“ mit, nämlich die Fermente als Biokatalysatoren. Die Sonne liefert die für das Zustandekommen der Reaktion notwendige Energie, die Fermente steuern sie in der erforderlichen Richtung.

Wenngleich wir vorerst noch nicht imstande sind, der Natur, insbesondere den Pflanzen, diese Patente abzuschauen und viele Stoffe in der Weise herzustellen, in der sie in der Natur „produziert“ werden, können wir doch in einer Reihe von Fällen den Ablauf beeinflussen. Bei der Erforschung bestimmter Reaktionen der Photosynthese nahmen die Wissenschaftler wahr, daß Pflanzen, die mit Licht verschiedener Wellenlänge beleuchtet werden, im Verlaufe der Photosynthese Stoffe verschiedenartiger chemischer Natur bilden. Setzt man sie rotgelben Lichtstrahlen aus, so entstehen bei der Photosynthese hauptsächlich Kohlenhydrate, bei blauer Beleuchtung Eiweiße.

Dieser Umstand läßt uns hoffen, daß es in nicht allzuferner Zukunft der Menschheit gelingen werde, mit Hilfe der Pflanzen komplexe organische Verbindungen in bedeutenden Mengen zu gewinnen. In der Tat: Anstatt Fabriken zu bauen, sie mit kostspieligen Ausrüstungen zu versehen, den komplizierten technologischen Ablauf der Synthese zu gestalten, wird es dann genügen, Gewächshäuser zu errichten und Intensität und spektrale Zusammensetzung des Lichtes zu regeln. Die Pflanzen werden von allein alles Nötige erzeugen: vom einfachsten Kohlenhydrat bis zu den kompliziertesten Eiweißen.

**Zwei Arten chemischer Bindung** Schon vor grauen Zeiten zweifelten manche Forscher nicht an der Existenz von Atomen. Die Frage war: Wie gestaltet sich der Zusammenhalt dieser Atome?

Der berühmte französische Naturforscher René Descartes (1596—1650) stellte sich zum Beispiel die Bindung zwischen den Atomen folgendermaßen vor: Die einen Atome hätten hakenartige Vorsprünge, die anderen seien mit Ösen ausgerüstet. Der Haken greife in die Öse ein, und der Zusammenhalt sei da.

Solange dem Menschen der tiefere Einblick in den Aufbau des Atoms fehlte, waren auch alle seine Vorstellungen vom Zusammenhalt der Atome, von ihrer chemischen Bindung, nur Hypothesen. Der Wahrheit näher gelangte der Mensch, als das Elektron erforscht werden konnte. Doch das geschah erst vor einigen Jahrzehnten. Das negative Elementarteilchen war bereits um 1895 als das bestimmende Teilchen der Katodenstrahlen nachgewiesen worden, doch erst zwanzig Jahre später unternahm man die ersten Versuche, mit seiner Hilfe die chemische Verbindung aufzuhellen. Das geschah, nachdem man sich über die Anordnung der Elektronen um den Atomkern klar geworden war.

Nicht alle Elektronen im Atom haben an der chemischen Bindung Anteil, sondern nur jene, die in der äußersten Schale angeordnet sind, in besonderen Fällen die in den beiden ersten Außenschalen.

Nehmen wir an, es begegnen einander zwei Atome, ein Natrium- und ein Fluoratom. Auf der

Außenschale des Natriumatoms kreist ein Elektron, beim Fluoratom sind es sieben. Beide Atome fügen sich sofort zu einem festen Natriumfluoridmolekül zusammen. Das geschieht dadurch, daß die Elektronen der äußersten Schale, die Valenzelektronen, in Aktion treten.

Das Natriumatom gibt sein Außenelektron leicht ab, es wird zum positiv geladenen Ion. Die zweitnächste Elektronenschale wird dadurch sozusagen entblößt. Sie enthält acht Elektronen. Aus diesem Oktett ein Elektron zu lösen, ist keine leichte Sache.

Dagegen ist das Fluoratom bereit, ein weiteres Elektron in seine Außenschale einzubauen, damit das stabile Oktett erreicht wird. In Erscheinung tritt es als negativ geladenes Fluorion. Es jagt dem Natriumatom, dem es begegnet, förmlich ein Elektron ab und legt sich so eine Achter-Elektronenschale zu.

Positives wird durch Negatives angezogen. Elektrische Kräfte binden die entgegengesetzt geladenen Natrium- und Fluorionen fest aneinander. Es kommt zu einer chemischen Bindung. Man nennt sie Ionenbindung. Sie stellt die hauptsächlichste chemische Bindung dar.

Doch es besteht auch eine andere Art Bindung. Auf welche Weise kommt es zum Beispiel zu einer Bindung, wie sie im Fluormolekül  $F_2$  nachweisbar ist? Die Fluoratome können ja keine Elektronen aus der Außenschale abgeben. Bei zwei Fluoratomen haben wir es auch nicht mit entgegengesetzt geladenen Ionen zu tun.

Die chemische Bindung zwischen den Fluoratomen wird von einem Elektronenpaar bewerk-

stellt. Jedes Atom stellt jeweils ein Elektron zur gemeinsamen Nutzung zur Verfügung. Damit hat sowohl das erste als auch das zweite Atom gewissermaßen acht Elektronen in der Außenschale. Eine solche Bindung heißt Atombindung oder kovalente Bindung. Da kein Atom als Elektronenlieferant des anderen in Erscheinung treten kann, schließen die Atome gleichsam einen Kompromiß. Sie teilen sich in die gemeinsame Elektronenschale. Die meisten der bekannten chemischen Verbindungen kommen dank der chemischen Bindung dieser beiden Typs zustande.

**Chemie und Strahlung** Das Blattgrün, das Chlorophyll, haben die Chemiker bislang nicht synthetisieren können. Doch das Licht wird bereits in der Praxis zur Auslösung photochemischer Reaktionen genutzt. Nebenbei bemerkt: Auch die photographischen Vorgänge sind ein schönes Beispiel photochemischer Tätigkeit. Das Licht übt die Funktion des „Chef-Photographen“ aus.

Das Interesse der Chemiker beschränkt sich bei der Erforschung der Strahlenwirkungen nicht auf Lichtstrahlen. Neben diesen gibt es ja auch die ungemein energiereichen Gamma- und Röntgenstrahlen. Die Röntgenstrahlen sind tausendmal, die Gammastrahlen einige millionenmal „intensiver“ als die Lichtstrahlen.

In Enzyklopädien und Lehrbüchern, in Artikeln und Monographien stößt man seit einiger Zeit auf den neuartigen Begriff Strahlenchemie. So heißt die Wissenschaft, die die Einwirkung der Strahlung auf chemische Reaktionen erforscht.

Die Photochemie ist mit ihr verwandt. Die erste strahlenchemische Reaktion entdeckte im Jahr 1895 Conrad W. Röntgen, als er bemerkte, daß eine photographische Platte durch radioaktive Strahlen geschwärzt wurde.

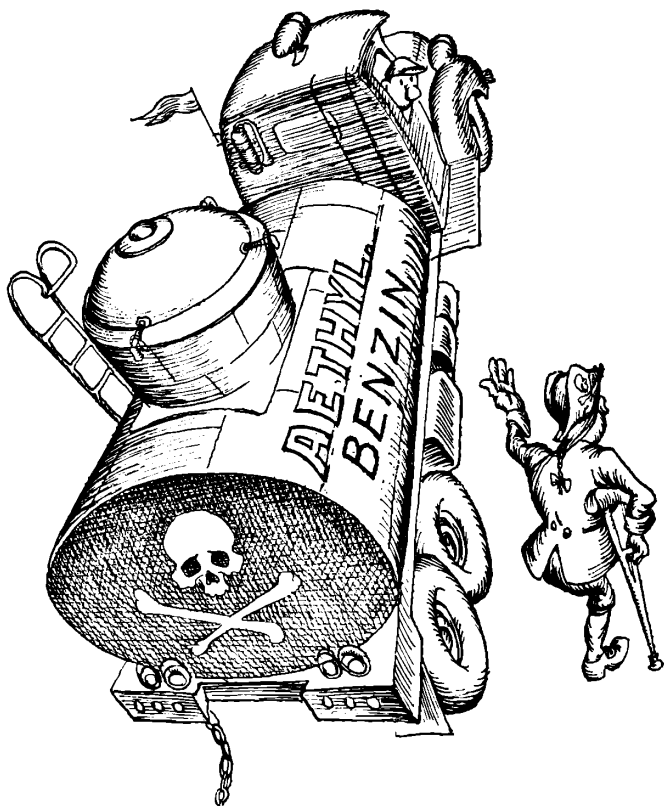
Die Strahlenchemie ist eine junge Wissenschaft. Doch ihre Ergebnisse können sich heute schon sehen lassen. So spielt z. B. der Prozeß des Krackens in der Erdölchemie eine bedeutende Rolle. Die im Erdöl enthaltenen komplexen organischen Verbindungen, lange Kohlenstoffketten der Kohlenwasserstoffe, werden zu kürzeren aufgespaltet. Dabei kommt es insbesondere zur Bildung von kleineren Molekülen von Kohlenwasserstoffen, die zu Benzinkomponenten gehören, oder von gasförmigen Olefinen, die Ausgangsstoffe für die Petrolchemie sind.

Der Vorgang des Krackens ist äußerst aufwendig. Er verläuft bei hohen Temperaturen und bei Anwesenheit von Katalysatoren, denn er muß so gelenkt werden, daß die Aufspaltung der Moleküle in der gewünschten Weise erfolgt. Diese Arbeit muß mit großer Präzision ausgeführt werden. Der Vorgang des Krackens nimmt deshalb eine geraume Zeit in Anspruch.

Nach einem neueren Verfahren benötigt man jedoch für das Cracken weder Wärme noch chemische Beschleuniger, auch nicht viele Stunden angestrenzter Arbeit.

Gammastrahlen lösen den Vorgang aus. Sie zerbrechen die großen Kohlenwasserstoffmoleküle. Diese Fähigkeit der Strahlung ist von großer Bedeutung auch für die Modifizierung von Kunststoffen. Hauptketten werden gespalten und Quer-

vernetzungen gebildet, wodurch die Eigenschaften des Kunststoffes verbessert werden.  
Große Möglichkeiten eröffnet die Synthese durch



Strahlen wirkung. Richtet man einen Elektronenstrahl (Betastrahlen) auf leichte, gasförmige Koh-

lenwasserstoffe (Methan, Äthan oder Propan), so kommt es zu einem komplizierteren, komplexeren Aufbau der Moleküle, zur Bildung von schwereren, flüssigen Kohlenwasserstoffen. Anstelle einer durch die Strahlung hervorgerufenen Spaltung vollzieht sich eine Strahlungssynthese. Diese Fähigkeit der Kernstrahlung, Moleküle miteinander zu „verknüpfen“, wird zur Polymerisation ausgenutzt.

Jedermann kennt das Polyäthylen. Doch nicht jeder weiß, wie kompliziert sich seine Herstellung gestaltet. Hierfür werden hohe Drücke, aber auch spezielle Katalysatoren sowie besondere Apparaturen benötigt. Für die Strahlungspolymerisation ist dies nicht erforderlich. Die Kosten des auf diese Weise gewonnenen Polyäthylens verringern sich um die Hälfte.

Das derart behandelte Polyäthylen erlangt eine Hitze- und Formbeständigkeit, die um das Drei- bis Vierfache größer ist als die des gewöhnlichen Polymeren. Auch Synthekautschuk kann durch Strahlen vulkanisiert werden, wodurch eine engere Vernetzung herbeigeführt wird, durch die sich die Nutzungsdauer der Reifen um 30 Prozent erhöht.

Wir haben nur einige wenige Errungenschaften der Strahlenchemie genannt. Wir stehen auf diesem Gebiet erst an einem Anfang. Von Tag zu Tag werden die Ergebnisse strahlenchemischer Reaktionen immer eindrucksvoller.

Doch die Kernstrahlung ist nicht nur des Menschen Freund, sondern auch sein Feind, ein heimtückischer, unbarmherziger Feind, der die Strahlenkrankheit hervorruft. Biochemische Strah-

lenreaktionen können zu schweren Schädigungen lebender Zellen führen.

Es gibt noch keine Universalrezepte für die Bekämpfung dieser Krankheit. Das Vernünftigste ist es, die Strahlengefahr zu meiden.

Bleiplatten, ein mehrere Meter dicker Betonschutz, starke Metall- und Gesteinsschichten absorbieren den Kernstrahlungsstrom. Allerdings ist ein solcher Schutz sehr kostspielig, zudem äußerst umständlich. Bleischutzkleidung zum Beispiel ist auf keinen Fall bequem.

Sind die Chemiker nicht imstande, einfachere strahlensichere Schutzmittel ausfindig zu machen? Erste Experimente in dieser Richtung sind unternommen worden. Zum Schutze der Kosmonauten vor der sehr gefährlichen kosmischen Strahlung gibt es bereits zuverlässige Methoden, die auch in die irdische Praxis Eingang gefunden haben. Röntgenstrahlen zerstören im Nu die lichtempfindliche Schicht der Silberbromid-Emulsion auf photographischen Platten und auf Filmen.

Vor einigen Jahren beobachteten italienische Chemiker folgende Erscheinung: Hatten sie die Oberfläche der photographischen Platte mit einer anorganischen Lösung benetzt (mit schwefelsaurem Titan oder seleniger Säure), verlor die Platte in bedeutendem Maße ihre Sensibilität nicht nur gegenüber sichtbarem Licht, sondern auch gegenüber Röntgenstrahlen.

Worum handelt es sich hier? Vielleicht um eine Wechselwirkung zwischen den genannten chemischen Stoffen und dem Silberbromid? Ist dadurch eine neue, strahlenfeste Verbindung erzeugt worden?

Keinesfalls. Es war zu keiner chemischen Reaktion gekommen. Die frühere Sensibilität der Platte konnte wiederhergestellt werden, legte man sie in ein Wasserbad. Bis auf den heutigen Tag ist man sich noch nicht über das Wesen des Vorgangs im klaren. Jedoch kann er möglicherweise ein Anfang zur Entwicklung eines ganz neuartigen Strahlenschutzes sein.

**Die allerlängste Reaktion** Im Laufe der letzten Jahre stellten die Chemiker in ihren Laboratorien Hunderte und Tausende komplizierte organische Verbindungen her. Sie waren von so verwickelter Struktur, daß die graphische Darstellung ihrer Formel kein leichtes Unterfangen wäre. Würde man eines der Riesenmoleküle durch ein Modell darstellen, müßte man es — um ein vollständiges Molekül zu veranschaulichen — aus 1000 oder 10 000 Grundeinheiten zusammensetzen. Die größte Errungenschaft der Forscher der organischen Chemie, ihr höchster Stolz ist zweifellos die Ende 1963 gelungene Synthese eines Eiweißmoleküls, ein Ereignis, das von allergrößter Bedeutung ist.

Es handelt sich um die chemische Synthese des Insulins, eines Hormons, das den Kohlenhydratstoffwechsel im Organismus steuert.

Selbst unter Fachleuten herrscht noch keine restlose Klarheit über einige strukturelle Details dieses Eiweißmoleküls. Es ist ein Riesenmolekül, obzwar die Anzahl der Komponenten recht begrenzt ist. Es besteht aus 17 verschiedenen Aminosäuren. Allerdings sind die Bestandteile im

Molekül in höchst eigenartiger Kombination angeordnet.

Der Einfachheit halber nehmen wir an, das Insulinmolekül sei aus zwei Teilen, aus zwei Ketten zusammengesetzt, der Kette A und der Kette B. Verkettet sind diese Bestandteile durch eine sogenannte Disulfidbindung, als ob eine aus zwei Schwefelatomen gebildete Brücke sie miteinander verbinden würde.

Wie vollzieht sich die künstliche Insulinsynthese? Kette A und Kette B werden gesondert hergestellt. Sie müssen dann so zusammengesetzt werden, als ob die Disulfidbrücke dazwischen liegt. Zur Bildung der Kette A mußten die Chemiker etwa einhundert verschiedene Reaktionen durchführen. Der Aufbau der Kette B war noch arbeitsintensiver. Er erforderte die Durchführung von weit mehr als einhundert Reaktionen. Die Arbeit dauerte Monate. Schließlich waren beide Ketten aufgebaut. Nun sollten sie miteinander verkettet werden. Hier tauchten die größten Schwierigkeiten auf. Unzählige Male erwartete die Forscher bittere Enttäuschung. Und dennoch: Eines schönen Tages schrieben sie ins Laborbuch die lakonischen Worte: „Synthese des Insulinmoleküls vollendet“.

Auf dem Wege zur künstlichen Herstellung des Insulins hatte man in folgerichtiger Weise 223 Etappen zu bewältigen. Keine andere chemische Verbindung erforderte bislang einen solchen kolossalen Arbeitsaufwand. Zehn Menschen arbeiteten daran volle drei Jahre. In der lebenden Zelle allerdings vollzieht sich die Synthese des Eiweißes innerhalb von zwei bis drei Sekunden.

# CHEMISCHES MUSEUM



**Frage ohne Antwort** Stelle man an die bedeutendsten Fachleute die Frage, wieviel chemische Verbindungen die Elemente des Periodensystems ergeben können, bekäme man selbst von diesen Koryphäen der Chemie nicht einmal eine ungefähre Zahlenangabe zu hören.

Die einfachste chemische Verbindung ist uns bekannt: Es ist das Wasserstoffmolekül. Wasserstoff ist ja das erste Element, der „leichteste Repräsentant“ der Mendelejewischen Sammlung. Welches aber ist die komplizierteste Verbindung? Eine exakte Antwort auf diese Frage ist nicht möglich. Die Chemie kennt Moleküle von wahrhaft gigantischer Struktur, Moleküle, die aus vielen tausend, hunderttausend, ja Millionen Atomen zusammengefügt sind. Und niemand ist imstande, zu sagen, ob es überhaupt dafür eine Grenze gibt.

Jedoch können wir die Anzahl der bekannten chemischen Verbindungen verhältnismäßig genau ermitteln. Allerdings wird diese Zahl schon morgen überholt sein. Denn gegenwärtig werden in den Laboratorien der Welt täglich an die zehn neue Substanzen synthetisiert. Und die Tagesproduktion steigt von Jahr zu Jahr an. Die Menschheit verfügt heute über mehr als zwei Millionen chemische Verbindungen.

Das ist gewiß eine imposante Zahl. Jedoch haben die einzelnen Bewohner des großen Hauses des Periodensystems daran einen recht unterschiedlichen Anteil.

Die Zahl der Verbindungen der Edelgase z. B. (Helium, Neon und Argon) ist gleich Null, von einigen wenigen unbedeutenden Verbindungen

abgesehen. Mit dem Seltenerdmetall Promethium, das die Physiker im Kernreaktor erzeugen, sind bisher nur drei Verbindungen erzielt worden, dabei die allergewöhnlichsten: Oxidhydrat, Nitrat und Chlorid. Nicht besser ist es um die anderen künstlich gewonnenen Elemente bestellt. Bei einigen sind ja die Wissenschaftler gezwungen, die Anzahl der Atome peinlich genau zu zählen, um sie überhaupt nachzuweisen. Wie könnte da von irgendwelchen Verbindungen die Rede sein?

Allerdings enthält die Mendelejewsche Tabelle ein einmaliges Element — die Zahl der von ihm gebildeten Verbindungen charakterisiert die außergewöhnliche Rolle, die dieses Element spielt. Es ist der Kohlenstoff. Seine Sonderstellung verdankt er der Fähigkeit seiner Atome, in einfacher, zweifacher oder dreifacher Bindung fast beliebig Ketten oder Ringsysteme zu bilden und eine kaum überschaubare Anzahl von organischen Verbindungen einzugehen, in denen er fast stets vierwertig ist.

Unter den über zwei Millionen Molekülen, die als chemische Verbindungen bekannt sind, gibt es über 1 700 000, deren Skelett Kohlenstoffatome bilden. Es existieren also fast sechsmal so viel organische wie anorganische Stoffe. Mit der Erforschung dieser Verbindungen beschäftigt sich ein bedeutender Zweig der Chemie, die organische Chemie. Die Verbindungen aller anderen chemischen Grundstoffe fallen bis auf einige Ausnahmen in den Bereich der anorganischen Chemie.

Die Synthese einer neuen organischen Substanz

ist in der Regel leichter als die Herstellung einer anorganischen Verbindung. Die „Anorganiker“ betrachteten es zweifellos als einen Idealzustand, könnten sie täglich mindestens von einer einzigen neuen Verbindung berichten. In den vergangenen zehn Jahren eröffneten sich auf diesem Gebiet allerdings erfreulichere Perspektiven als bisher.

Den „Organikern“ hilft bei ihrer Tätigkeit eine erstaunliche Eigenschaft der Kohlenstoffatome, über die wir noch sprechen werden.

**Der Vielfalt Ursache und Wirkung** Die Atome des Kohlenstoffs legen eine große Bereitschaft an den Tag, Ketten zu bilden. Sie treten gern in einer langgestreckten Reihe an.

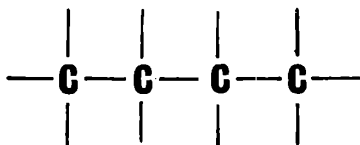
Die aller kürzeste Kette enthält zwei Kohlenstoffatome. So ist die Kette des Äthanmoleküls aus zwei Gliedern zusammengefügt:  $\text{CH}_3\text{—CH}_3$ . Die aller längste ist vorläufig noch unbekannt. Es gelang, eine Verbindung herzustellen, deren Kette 70 Kohlenstoffglieder zählt. (Um nicht mißverstanden zu werden, sei sofort hinzugefügt, daß die Rede von gewöhnlichen Verbindungen ist, nicht von Polymeren, deren Kohlenstoffketten bedeutend länger sind.)

Nichts dergleichen ist bei anderen chemischen Elementen wahrzunehmen. Nur Silizium kann sich den Luxus erlauben, eine sechsgliedrige Kette zu bilden. Eine merkwürdige Verbindung gewannen Forscher mit Germanium, den Germaniumwasserstoff  $\text{Ge}_3\text{H}_8$ , in dem sich drei Metallatome zur Kette zusammengefügt haben. Das ist in der Familie der Metalle einmalig.

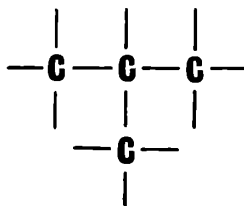
Mit einem Wort: Im Hinblick auf die Fähigkeit zur Kettenbildung steht der Kohlenstoff konkurrenzlos da.

Gäbe es jedoch bloß eine lineare Kettenbildung, würde die organische Chemie nicht diese phantastisch hohe Anzahl von Kohlenstoffverbindungen aufweisen. Die Ketten können sich verästelnd. Sie können sich aber auch schließen und auf diese Weise Ringe bilden oder Vielecke, die aus 3, 4, 5, 6 und mehr Kohlenstoffatomen bestehen.

Im Kohlenwasserstoff Butan (Summenformel  $C_4H_{10}$ ) ist die Kette aus vier Kohlenstoffatomen zusammengesetzt (gradkettiges Butan). Hier sind die Atome „in Reih und Glied“ aufgestellt:



Doch können sie auch so angeordnet sein, daß sie verzweigt sind:



Die Zahl der Atome ist in beiden strukturierten Butanen gleich. Doch die Bindung ist anders. Der Stoff, dessen Atome eine verzweigte

Anordnung aufweisen, besitzt andersgeartete Eigenschaften. Er heißt Isobutan.

Auch beim Pentan finden wir ähnliche Moleküle. Außer der linearen Kette können die fünf Kohlenstoffatome noch drei anders zusammengefügte verzweigte Ketten bilden, und jeder „Konstruktion“ wird ein selbständiger chemischer Stoff zugeordnet sein.

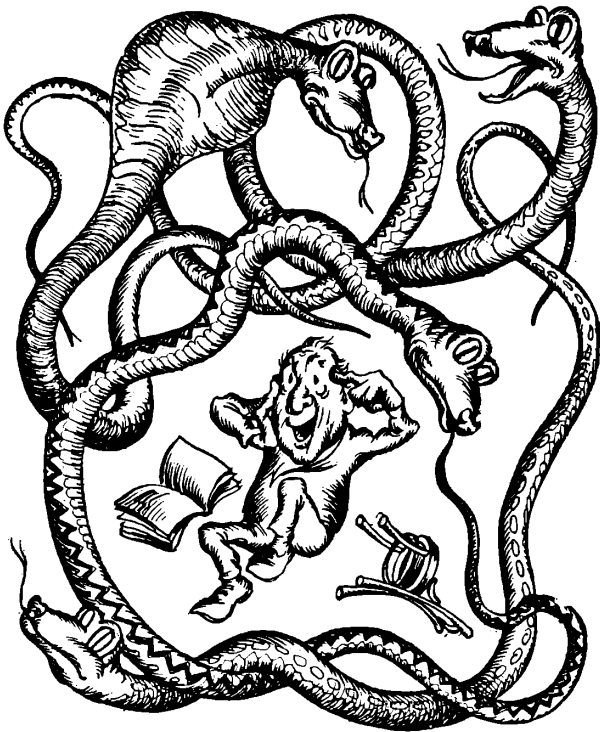
Für eine solche Art chemischer Verbindungen mit gleicher Atomzahl (also gleicher Summenformel), jedoch unterschiedlicher Anordnung der Atome im Molekül (also verschiedener Struktur), erfanden die Chemiker einen besonderen Namen: Isomere. Je mehr Kohlenstoffatome im Molekül vorhanden sind, desto größer ist die Anzahl der Isomere. Sie steigt beinahe in geometrischer Progression an. So kann Pentan ( $C_5H_{12}$ ) drei Isomere ergeben, Heptan schon 9, Oktan 18 und die Kohlenwasserstoffe  $C_{13}H_{28}$  immerhin 800,  $C_{20}H_{42}$  sogar ganze 366 000 Isomere.

Der organischen Chemie ist die Möglichkeit gegeben, in ihr Register Hunderttausende neue Verbindungen einzutragen.

**Chemische Ringe** Manche Legende erzählt davon, auf welche Weise ein großer Gelehrter eine Entdeckung machte. Es wird berichtet, Newton sei gedankenversunken im Garten spaziergegangen, als plötzlich ein Apfel zu Boden fiel. Der kleine Apfel soll den großen Physiker auf den Gedanken gebracht haben, das Gesetz der Gravitation zu begründen.

Von Mendelejew heißt es, das Periodensystem

sei ihm im Traume erschienen. Als er aufwachte, blieb ihm nichts mehr zu tun übrig, als das Traumgebilde zu Papier zu bringen.



Den berühmten deutschen Chemiker August Kekulé, der 1856 die Vierwertigkeit des Kohlenstoffs und dessen Fähigkeit zur Bildung von einfachen und verzweigten Ketten entdeckt hatte, soll

wirkliches Geschehen zu einem großartigen Gedanken beflügelt haben.

Benzol, eine der wichtigsten organischen Verbindungen, der Grundkörper der aromatischen Verbindungen, war den Wissenschaftlern schon längere Zeit bekannt. Man wußte, daß sich diese Verbindung (Summenformel  $C_6H_6$ ) aus sechs Kohlenstoffatomen und sechs Wasserstoffatomen zusammensetzt. Auch manche Reaktion war bereits aufgeklärt. Unklarheit herrschte über etwas sehr Entscheidendes, über die räumliche Anordnung des Kohlenstoffatomsextetts.

Kekulé gelang es, das Problem zu erforschen. Er löste das Rätsel dank eines eigenartigen Vorfalles, den er selber folgendermaßen schilderte:

„Während meines Aufenthaltes in Gent in Belgien bewohnte ich elegante Junggesellenzimmer in der Hauptstraße. Mein Arbeitszimmer aber lag nach einer engen Seitengasse und hatte während des Tages kein Licht. Für den Chemiker, der die Tagesstunden im Laboratorium verbringt, war dies kein Nachteil. Da saß ich und schrieb an meinem Lehrbuch. Aber es ging nicht recht, mein Geist war bei anderen Dingen. Ich drehte den Stuhl nach dem Kamin und versank in Halbschlaf. Wieder gaukelten die Atome vor meinen Augen. Kleinere Gruppen hielten sich bescheiden im Hintergrund. Mein geistiges Auge, durch wiederholte Gesichte ähnlicher Art geschärft, unterschied jetzt größere Gebilde von mannigfacher Gestaltung. Lange Reihen, vielfach dichter zusammengefügt, alles in Bewegung, schlangenartig sich windend und drehend. Und siehe, was war das? Eine der Schlangen erfaßte

den eigenen Schwanz, und höhnisch wirbelte das Gebilde vor meinen Augen. Wie durch einen Blitzstrahl erwachte ich, auch diesmal verbrachte ich den Rest der Nacht, um die Konsequenzen der Hypothese auszuarbeiten.“

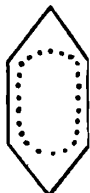
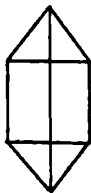
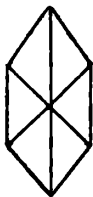
Das zufällige Traumgebilde der sich in den eigenen Schwanz beißenden Schlange brachte den Forscher auf den Gedanken, Kohlenstoffketten könnten sich schließen, sich zu Ringen zusammenfügen.

Seit Kekulé stellten die Chemiker den Aufbau des Benzols folgendermaßen graphisch dar (gebräuchliche vereinfachte Formel):



Dieser Benzolring spielt fortan in der organischen Chemie eine sehr große Rolle.

Neben der von Kekulé vorgeschlagenen Strukturformel des Benzols tauchten andere auf. Die Strukturformel Kekulés widerspricht nämlich den verfügbaren Angaben über den Abstand zwischen den Kohlenstoffatomen im Molekül. Man schlug also andersgeartete Darstellungen vor, zum Beispiel:

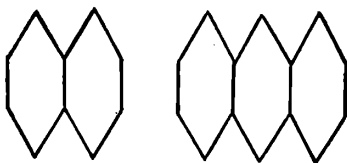


Eine jede dieser Strukturformeln veranschaulicht zwar in bestimmtem Maße Besonderheiten des Benzolmoleküls, jedoch haftet einer jeden auch ein wesentlicher Mangel an: Sie vermögen nicht die Besonderheit des aromatischen Bindungszustandes exakt darzustellen. Deshalb verwendet man heute noch meistens die Kekulé'sche Strukturformel.

Paradoxerweise ergibt sich folgender Tatbestand: Der Benzolaufbau wird als endgültig erforscht angesehen, jedoch verfügt man bis auf den heutigen Tag über keine graphische Darstellung der Formel, die seiner Struktur voll und ganz gerecht werden könnte.

Die Ringe können eine verschiedene Anzahl von Kohlenstoffatomen enthalten. Sie können auch miteinander „verwachsen“ und auf diese Weise eigenartige geometrische Figuren ergeben. Im Reiche der Ringe herrscht die gleiche Vielfalt an Konstruktionen, wie sie unter den offenen Kohlenstoffatomketten wahrzunehmen ist. Jedes Handbuch der organischen Chemie erinnert in dieser Hinsicht an ein Lehrbuch für Geometrie. Beinahe auf jeder Seite stößt man auf geometrische Figuren, d. h. auf Strukturformeln organischer Verbindungen.

Benzolringe sind es, die auch zu folgenden Strukturformeln zusammengefügt worden sind:



Links befindet sich die Strukturformel des Naphthalins, rechts die des Anthrazens, das meist aus Steinkohlenteer gewonnen wird.

**Eine dritte Möglichkeit** Kohlenstoff besitze zwei Gesichter, hieß es. Diese Eigenschaft chemischer Elemente, in mehreren Modifikationen aufzutreten, bezeichnen die Wissenschaftler als Allotropie. Ein und dasselbe Element kommt also in verschiedenen Zustandsformen vor, z. B. Zinn, Phosphor und Eisen in drei, Schwefel in mehr als drei.

Die zwei „Gesichter“ des Kohlenstoffs sind Diamant und Graphit. Es besteht nicht die geringste Ähnlichkeit zwischen dem Diamanten, diesem König der Härte, und dem weichen Graphit. Zu den Abarten des Graphits gehören Ruß, Holzkohle und Koks. Die Ursache der Unähnlichkeit liegt in der unterschiedlichen Anordnung der Kohlenstoffatome im Molekül.

Beim Diamanten, der kubischen Modifikation des Kohlenstoffs, sind sie im Scheitelwinkel einer geometrischen Figur angeordnet, die Tetraeder heißt. Zwischen den Atomen besteht eine außerordentlich feste Bindung, denn jedes ist tetraedrisch im gleichen Abstand von vier anderen Kohlenstoffatomen umgeben. Daher kommt des Diamanten unübertreffliche Härte. Beim Graphit hingegen, der bei gewöhnlicher Temperatur thermodynamisch stabilen Modifikation des Kohlenstoffs, weisen die Kohlenstoffatome eine räumliche Flächenlagerung auf. Sie befinden sich in einem Gitter aus übereinanderliegenden

Ebenen von sechs Ringen, die gegeneinander so verschoben sind, daß die Kohlenstoffatome jeweils über oder unter ihrer Mitte liegen. Ihre Bindung zwischen den Flächen ist sehr schwach. Dank dieser Gegebenheit ist Graphit weich und leicht schichtbar.

Ein heftiger Streit entbrannte, als die Struktur des Rußes geklärt werden sollte. Lange Zeit



herrschte die Meinung vor, Ruß sei keine kristalline Substanz, sondern eine amorphe Abart des Kohlenstoffs. Vor wenigen Jahren wurde die Sache geklärt: Graphit und Ruß stellen praktisch ein und dasselbe dar. Ihr Molekülaufbau ist der gleiche. Es gibt also bloß zwei Kohlenstoffabwandlungen, den Diamanten und das Graphit. Eine dritte gibt es nicht.

Die Wissenschaftler stellen sich aber das Ziel,

eine dritte Abart auf synthetischem Wege zu gewinnen. Diese Aufgabe könnte man folgendermaßen formulieren:

Beim Diamanten und beim Graphit sind die Kohlenstoffatomketten, obgleich von unterschiedlicher Raumanordnung, in beiden Fällen geschlossen. Könnte man die Atome nicht dazu bringen, sich zu einer linearen Kette zusammenzufügen? Mit anderen Worten: Wäre es nicht möglich, ein polymeres Molekül zu gewinnen, das lediglich auf einer Geraden angeordnete Kohlenstoffatome enthält?

Für die Gewinnung eines beliebigen chemischen Produktes benötigt man einen entsprechenden Ausgangsstoff. Für die Herstellung des „Kohlenstoffs Nummer 3“ ist die Wahl des Ausgangsstoffs eindeutig — es kann nur Äthin (Azetylen) sein, eine Verbindung von zwei Kohlenstoff- und zwei Wasserstoffatomen:  $C_2H_2$ .

Aus welchem Grunde fiel die eindeutige Wahl auf das Äthin? Weil in dessen Molekül an die Kohlenstoffatome die geringstmögliche Anzahl an Wasserstoffatomen gebunden ist. Zusätzliche Wasserstoffatome hätten der Synthese Hindernisse in den Weg gelegt.

Eine weitere Besonderheit ist dem Äthin eigen. Die Chemiker bezeichnen es als „hochreaktionsfähig“. Den Zusammenhalt der Kohlenstoffatome im Äthinmolekül sichern drei chemische Bindungen ( $H-C\equiv C-H$ ), wobei zwei verhältnismäßig leicht zu lösen sind und für eine Verbindung mit Atomen anderer Moleküle, z. B. des gleichen Äthins, genutzt werden können. Der erste Schritt des Vorhabens bedeutete also,

aus monomerem Äthin ein polymeres Produkt, eine Verbindung mit zwei oder mehreren konjugierten Kohlenstoff-Dreifachverbindungen zu gewinnen. Der Versuch war nicht neuartig. Bereits im vorigen Jahrhundert hatte der deutsche Chemiker Baeyer den Versuch unternommen, eine solche Reaktion herzustellen. Doch das einzige, was dabei herauskam, war Tetraazetylen, dessen Molekül äußerst instabil war. Den gleichen Weg gingen auch andere Chemiker aus verschiedenen Ländern, Alle Versuche endeten mit Enttäuschungen.

Erst die heutigen, zukunftssträchtigen Verfahren der organischen Synthese brachten den erhofften Erfolg. Es gelang, Polyazetylene (Polyine) herzustellen. Ihre Geburtsstätte ist die Sowjetunion. Hier gewann man diese neue Klasse organischer aliphatischer Verbindungen, die sogenannten Polyine. Die Neugeborenen fanden sofort ein praktisches Betätigungsfeld: Sie erwiesen sich als großartige Halbleiter.

Nun hieß es, auf dem Wege zur Synthese der dritten Abart des Kohlenstoffs den zweiten Schritt zu tun: Aus den Polyinen die Wasserstoffatome zu vertreiben, damit eine lediglich aus Kohlenstoffen zusammengesetzte Kette übrigblieb. Das Verfahren, mit Hilfe dessen man die Wasserstoffatome austreiben wollte, heißt in der Sprache der Chemie oxydierende Dehydropolykondensation. Wir sehen davon ab, das Wesen dieses Vorgangs zu erklären — in den Tagebüchern der Laboratorien nimmt seine Beschreibung Dutzende Seiten ein. Denn die Trennung des Polyazetylens vom Wasserstoff erwies sich

als eine keineswegs leichte Aufgabe. Mancher Versuch scheiterte. Um so bemerkenswerter war der Erfolg der sowjetischen Forscher.

...Schwarzes, rußähnliches, unscheinbares Pulver! Die chemische Analyse ergab: 99 Prozent betrug der Mengenanteil reinen Kohlenstoffs. Bis zum hundertprozentigen Kohlenstoff ist es eigentlich nur noch ein kleiner Schritt. Ein einziges Prozent Wasserstoff muß noch „verabschiedet“ werden. Es hindert die Kohlenstoffatome daran, sich in einer Reihe aufzustellen, sich in parallel verlaufenden Ketten zusammenzufügen. Dieses eine Prozent ist das letzte Hindernis auf dem Wege zur Gewinnung des Kohlenstoffs Nummer 3.

Die „beinahe dritten“, synthetisch gewonnenen Abarten nannten die Chemiker Karbene. Sie haben sich bereits glänzend bewährt, ihre erstaunlichen Eigenschaften unter Beweis gestellt. Sie dienen als erstklassige Halbleiter, als Träger photoelektrischer Fähigkeiten. Sie sind geradezu unglaublich hitzebeständig. Temperaturen von anderthalbtausend Grad Celsius machen ihnen nichts aus.

Wir zweifeln nicht daran, daß in nicht allzuferner Zeit ein „hundertprozentiges“ Karben am praktischen Leben teilhaben wird.

**Ein paar Worte über Komplexverbindungen** Das neunzehnte Jahrhundert brachte große Chemiker hervor. Drei von ihnen gehören zu den Begründern der modernen Chemie. Es sind dies: Dmitri Iwanowitsch Mendelejew, der Entdecker des Periodensystems der Elemente, Alexander

Michailowitsch Butlerow, der Begründer der Strukturtheorie organischer Verbindungen, und der Schweizer Alfred Werner, der die sogenannte Koordinationslehre schuf. Über diese epochemachende Entdeckung in der Chemie soll im folgenden kurz die Rede sein.

Die Koordinationslehre beschreibt die Zusammensetzung, den Aufbau und die Reaktionen von Verbindungen höherer Ordnung, zu denen vor allem die sogenannten Komplexverbindungen, die Doppelsalze, die Hydrate, die Ammoniak- und die organischen Molekülverbindungen zählen. Komplexverbindungen haben eine außerordentlich große Bedeutung, weil sie bei vielen Reaktionen und Prozessen auftreten.

...Es begann damit, daß es die Chemiker unternahmen, die Wechselwirkung zwischen Metallen und Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) zu erforschen. Man nahm ein gewöhnliches Salz, z. B. Kupferchlorid, und setzte Salmiakgeist zu. Die Lösung verdampfte. Es entstanden schöne, blaugrüne Kristalle. Die Analyse ergab eine einfache Zusammensetzung. Doch diese Einfachheit war rätselhafter Natur.

Die chemische Formel für Kupferchlorid ist  $\text{CuCl}_2$ . Hier ist Kupfer zweiwertig. Alles liegt klar auf der Hand. Auch die Kristalle der Ammoniakverbindung haben keine komplizierte Struktur:  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$ .

Doch welcher Art sind die Kräfte, die die zwei Ammoniakmoleküle stabil an das Kupferatom binden? Die beiden Wertigkeiten wurden ja für die Verbindung mit den Chloratomen verausgabt. Folgerichtig müßte in der Verbindung Kupfer vierwertig sein.

Untersuchen wir noch ein anderes Beispiel, eine ähnlich geartete Kobaltverbindung:  $\text{Co}(\text{NH}_3)_6\text{Cl}_3$ . Kobalt ist ein typisch dreiwertiges Element. Aber hier müßte es neunwertig sein!

Verbindungen dieser Art wurden in großer Anzahl synthetisch gewonnen. Im Grunde genommen stellte jede von ihnen so etwas wie eine Zeitzündermine dar, die ins Fundament des Gebäudes der Valenztheorie gelegt worden war.

Ein wüstes Durcheinander entstand. Bei vielen Metallen entdeckte man völlig unerwartete Wertigkeiten.

Alfred Werner fand eine Begründung für die seltsame Erscheinung. Sein Gedankengang war folgender:

Nachdem die normale Wertigkeit der Atome gesättigt ist, vermögen die Atome noch eine zusätzliche Wertigkeit geltend zu machen. Hat beispielsweise das Kupfer seine zweifache Hauptvalenz für die Vereinigung mit den Chloratomen verausgabt, bringt es zwei zusätzliche Valenzen für den Zusammenhalt mit Ammoniak auf.

Verbindungen in der Art von  $\text{Cu}(\text{NH}_3)_2\text{Cl}_2$  nennt man Komplexverbindungen. Einen Komplex stellt hier das Kation dar:  $[\text{Cu}(\text{NH}_3)_2]^{2+}$ . Diese Verbindung ist ionenartig. Viele Stoffe weisen im Anion eine komplexe Struktur auf. So ist in  $\text{K}_2[\text{PtCl}_6]$  das Anion  $[\text{PtCl}_6]^{2-}$  ein Komplexion.

Die Bindungen aller Komplexe unterscheiden sich von denen, die auf den bekannten „klassischen“ Valenzen beruhen. Es sind koordinative Bindungen, bei denen die freien Elektronenpaare sowohl

dem einen als auch dem anderen Teil der Verbindung gehören.

Wie viele Nebenwertigkeiten kann ein Metall besitzen? Die Zahl wird von der Koordinationszahl angegeben. Die Mindestzahl ist 2, die Höchstzahl 12. Für die Kupfer-Ammoniak-Verbindung gilt die Zahl 2, denn genau soviel Ammoniakmoleküle sind an das Kupferatom gebunden.

Das Rätsel der ungewöhnlichen Valenzen war damit gelöst. Eine neue Etappe der anorganischen Chemie, die Chemie der Komplexverbindungen, war eingeleitet worden. Heute kennt man bereits über hunderttausend Komplexverbindungen. Buchstäblich an allen chemischen Instituten und Laboratorien der Welt sind sie ein Forschungsobjekt. Sie erwecken nicht nur bei den Theoretikern der Chemie Interesse, die ja stets genau wissen wollen, auf welche Art die Atome und Moleküle angeordnet sind und weshalb gerade so und nicht anders.

Ohne Komplexverbindungen gäbe es kein Leben. Auch das Hämoglobin, eine wichtige Blutkomponente, sowie das Chlorophyll, die Grundlage der Lebenstätigkeit der Pflanzen, sind Komplexverbindungen. Viele Fermente und Enzyme haben eine Komplexstruktur.

Mit Hilfe von Komplexverbindungen führen Analytiker komplizierteste Analysen verschiedenster Substanzen durch.

Die Chemiker gewinnen zahlreiche Metalle in äußerst reinem Zustand, sobald sie Komplexe als Helfer heranziehen. Als Komplexe stellen sich viele wertvolle Farbstoffe dar. Komplexchemische Vorgänge spielen sich bei der Wasserenthär-

tung ab, in der Galvanotechnik, bei der Auflösung von Zellulose oder beim Gerben. Mit einem Wort: Komplexverbindungen bevölkern die Welt.

### **Überraschung bereitet eine einfache Verbindung**

Die photographische Kamera zu handhaben, ist kein Kunststück. Heute versteht fast jedes Schulkind, mit ihr umzugehen, ohne in die Geheimnisse des photographischen Prozesses einzudringen. Doch unter uns gesagt: Manches ist sogar Fachleuten nicht restlos klar. Um Aufnahmen zu machen und Platten zu entwickeln — dazu gehören nur ein wenig Übung und die Befolgung von ein paar guten Ratschlägen.

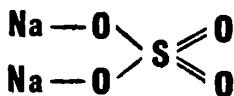
Wir wollen uns nicht des langen und breiten über all das auslassen, was ein Photograph zu tun hat, und beschränken uns daher auf folgenden Hinweis: Auf den Abzügen erscheinen bisweilen braune Flecken, insbesondere dann, wenn sie dem Licht ausgesetzt werden oder schon lange aufbewahrt worden sind. Der Fotoamateur sagt in einem solchen Falle: „Beim Entwickeln ist der Film nicht genügend fixiert worden.“ Die Platte oder das lichtempfindliche Papier hat also nicht lange genug im Fixierbad gelegen. Wozu braucht man dieses „Bad“? Ein Photofreund wird die Frage gewiß beantworten können.

Das Fixierbad dient dazu, um von der Platte die nicht aufgelösten Reste von Silberbromidkörnern zu entfernen. Man könnte auch sagen: Die nicht vom Licht getroffenen Teile des Silberhalogenids — das sind die nichtgeschwärzten Teile der lichtempfindlichen Schicht — werden komplex

gebunden und dann weggespült. Durch das Fixieren wird das Bild lichtbeständig.

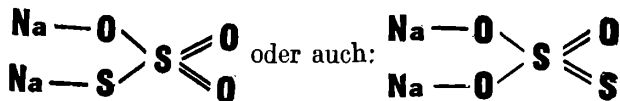
Nicht wenige Fixiermittel sind bislang erfunden worden. Das billigste und das meistverbreitete ist zweifellos das sogenannte Fixiersalz. In der Chemie heißt es Natriumthiosulfat ( $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ). Das Sulfat ist seit langem bekannt. Entdeckt hatte es der deutsche Chemiker Johannes Glauber. Aus diesem Grunde bezeichnet man das Natriumsulfat bisweilen als Glaubersalz. Seine chemische Formel lautet:  $\text{Na}_2\text{SO}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ .

Chemiker haben eine Vorliebe für die Darstellung von Verbindungen in Strukturformeln. Wasserloses Natriumsulfat veranschaulichen sie graphisch folgendermaßen:



Selbst ein Neuling auf dem Gebiete der Chemie wird auf den ersten Blick erkannt haben: Schwefel ist hier positiv sechswertig, Sauerstoff negativ zweiwertig.

Das Thiosulfat hat fast den gleichen strukturellen Aufbau. Nur anstelle des Sauerstoffatoms enthält es ein Schwefelatom:



Das ist alles noch sehr einfach. Und doch stellt dieses Thiosulfat eine merkwürdige Verbindung dar. Es enthält zwei verschiedenwertige Schwefel- atome. Eines hat die Ladung  $6^+$ , das andere  $2^-$ .

Nicht oft stoßen die Chemiker auf solche Kuriositäten. Auch Alltägliches birgt manchmal Ungewöhnliches.

**Was Sir Humphry Davy noch nicht wußte** Das Verzeichnis der wissenschaftlichen Arbeiten aus der Feder des berühmten englischen Physikers und Chemikers Sir Humphry Davy (1778—1829) ist lang. Er war nicht nur ein begabter Wissenschaftler, sondern auch ein sehr erfolgreicher Forscher. Welches Problem er auch immer aufgriff, er brachte es zu einer glücklichen Lösung. Es gelang ihm auch, eine ganze Reihe neuer chemischer Verbindungen herzustellen. Er entwickelte mehrere neuartige Forschungsmethoden. Allgemein bekannt ist, daß er die chemischen Elemente Bor, Jod und die Verbindung Phosgen sowie erstmals durch Schmelzflußelektrolyse die Elemente Kalium, Natrium, Magnesium, Kalzium, Strontium und Barium darstellte.

Unter seinen Arbeiten ist eine kleine Abhandlung zu finden, in der er von der Gewinnung einer einfachen chemischen Verbindung, von Chlorhydrat, berichtet. Es besteht aus einem Chlormolekül und sechs Wassermolekülen:  $\text{Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ .

Davy erforschte die Eigenschaften der neugewonnenen Substanz. Doch trotz eingehenden Studiums nahm er nicht wahr, daß er es mit einer Verbindung von völlig neuem Typ zu tun hatte, mit einer Verbindung ohne „chemische“ Bindung.

Zu einer solchen Feststellung gelangten erst die Chemiker des zwanzigsten Jahrhunderts. Sie unternahmen den Versuch, das Bestehen des Chlorhy-

drats anhand zeitgenössischer Vorstellungen über die Wertigkeit zu begründen. Jedoch erfolglos. Der Stoff war eine harte Nuß. Und bei weitem nicht die einzige, die sie zu knacken hatten.

Jahrzehntelang waren Chemiker um die Beantwortung folgender Frage bemüht: Sind die reaktionsträgen Gase auch wirklich hoffnungslos träge? Besteht nicht doch die Möglichkeit, diese Edelgase zu einer chemischen Reaktion zu zwingen? Wir wissen, wie diese Bemühungen ausgingen. Es gelang immerhin, mehrere Hydrate von Argon, Krypton, Xenon und Radon zu gewinnen. Aber auch bei ihnen fehlt eine normale chemische Bindung. Dabei sind manche dieser Verbindungen verhältnismäßig stabil.

Ein neues Rätsel gab den Chemikern eine einfache organische Verbindung auf, die man Harnstoff nennt. Sie zeigte große Bereitwilligkeit, sich mit zahlreichen Kohlenwasserstoffen und Alkoholen zu vereinigen. Diese eigenartige „Freundschaft“ rief zunächst Verwunderung hervor: Welcher Art waren die Kräfte, die das Harnstoff- und das Alkoholmolekül zusammenzwangen?

Bemerkenswert war, daß die neue Klasse von Verbindungen — Stoffe ohne „chemische“ Bindung — mit erschreckender Schnelligkeit zunahm. Schließlich stellte es sich heraus, daß hier eine besondere Art der Bindung vorlag: Zwei Moleküle, die eine Verbindung eingehen, sind nicht völlig gleichberechtigt. Das eine ist „Hausherr“, das andere der „Gast“.

Die Hausherren-Moleküle bilden ein Kristallgitter. Im Gitter gibt es Fehlstellen, die nicht

von Atomen besetzt sind. Hier lassen sich die Gäste mit ihren freien Elektronen nieder. Doch die Freundschaft nimmt in der Folge originelle Formen an: Die Gäste halten sich sehr lange auf. Denn es ist für sie nicht leicht, sich aus dem Verband des Kristallgitters freizumachen. Wie in eine Falle geraten zum Beispiel die Moleküle der Gase Chlor, Argon, Krypton und anderer Elemente in die leeren Zellen der kristallinen Struktur des Wassers.

Anlagerungskomplexe nennen die Chemiker solche relativ lockeren Komplexverbindungen, bei denen es keine intermolekulare chemische Bindung gibt.

**26, 28 oder etwas sehr Erstaunliches** Die Stoffe, über die wir nun sprechen wollen, heißen Katena-Verbindungen oder auch Katenane. Ihre Bezeichnung ist von dem lateinischen Wort „catena“, „Kette“, abgeleitet.

Im Wortschatz der organischen Chemie stößt man auf den Begriff Kette sehr häufig. Doch eine Kette gleicht nicht der anderen. Wir hatten schon Gelegenheit, uns davon zu überzeugen, daß die Chemie recht verschiedenartige Ketten kennt: lineare und verzweigte, ja bisweilen sogar äußerst feingliedrige Kombinationen von Ketten.

Der Begriff Kette für organische Verbindungen ist ein bildlicher Ausdruck und kein streng umgrenzter. Normalerweise versteht man ja unter Kette etwas anderes. In den organischen Verbindungen sind die Glieder der Kette untereinander nicht mechanisch steif verbunden, sie greifen beweglich ineinander ein.

In komplexen organischen Verbindungen sind die Ringe gewissermaßen festgelötet, beispielsweise die drei Benzolringe im Anthrazen. Sie bilden gewissermaßen eine aus Ringen zusammengesetzte Kette. Aber die Bezeichnung Kette trifft doch wohl nicht ganz zu. Trotzdem sprechen wir von Molekülketten, wenn wir feststellen, daß Atome in Form einer Kette chemisch aneinandergebunden sind.

Die Chemiker zerbrachen sich lange Zeit die Köpfe darüber, ob es möglich sei, die einzelnen Zyklen gleich zwei Gliedern einer gewöhnlichen Kette miteinander so zu verbinden, daß sie nach Art einer Gliederkette ineinander verschlungen sind.

Mit einem Wort, zwei ringförmige Moleküle sollten fest ineinander hängen, aber ohne chemische



Bindung, sozusagen rein mechanisch.

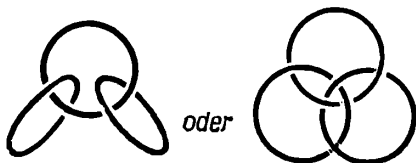
Der verführerische Gedanke reifte jahrelang in der Vorstellung der Chemiker. Die Theorie war auf ihrer Seite. Sie stellte der geplanten Synthese keine unüberwindbaren Hindernisse in den Weg. Man hatte sogar errechnet, aus wieviel Kohlenstoffatomen die Ringe zusammengesetzt sein müßten, damit sie sich auf die genannte Art miteinander verflechten konnten.

Doch in der Praxis stellte sich die Aufgabe als sehr schwierig dar. Mitten in einer Entwicklungs-

etappe geriet der Synthesevorgang in eine Sackgasse, und die Chemiker sahen sich gezwungen, neue Wege ausfindig zu machen.

An einem schönen Apriltag des Jahres 1964 kam die neue Verbindung zustande. Zwanzig folgerichtig durchgeführte chemische Operationen, also zwanzig Stadien, waren ihr vorausgegangen. Die Verbindung setzte sich aus zwei zyklischen, miteinander wie die Glieder einer Kette verbundenen Molekülen zusammen. Das eine Glied enthielt 26, das andere 28 Kohlenstoffatome. Diese Substanz erhielt den prosaischen Namen Katena 6, 28.

Zwei miteinander verkettete Ringe — das ist bereits das Gestern der durch ihre chemische Struktur bemerkenswerten Katena-Verbindungen.



Heute arbeiten die Wissenschaftler an der Gewinnung von noch eigenartigeren Ringgebilden. So wurden inzwischen Modelle dreigliedriger Katena-Verbindungen geschaffen. Beispielsweise müßte das obere Mittelglied eines Modells 26 Kohlenstoffatome enthalten, die Seitenglieder je 20. Für die verwickelte Verflechtung dreier Ringe, wie sie ein anderes Katena-Modell darstellt, müßte jeder Ring zumindest aus 30 Kohlenstoffatomen zusammengefügt sein.

Katena 6, 28 hat ein erstaunlich gewöhnliches

Äußere. Es ist ein weißes kristallines Pulver, dessen Schmelzpunkt bei  $125^{\circ}\text{C}$  liegt. Kommen Katena-Verbindungen in der Natur vor? Das ist noch ungeklärt. Bestehen in der Natur Katena-Verbindungen, müssen sie eine Funktion haben. Doch welche? Es ist die Aufgabe der Forscher, auch diese Frage zu beantworten.

**Eine eigenartige Flüssigkeit** Im Jahre 1760 ging der bis dahin nur wenig bekannte französische Chemiker Cadet de Vaux, ohne es selber zu ahnen, in die Geschichte ein. In seinem Labor



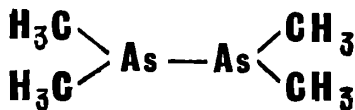
fürhte er — zu welchem Zweck, ist uns unbekannt — folgendes chemische Experiment durch: Er erhitzte essigsäures Kaliumsalz, dem er Arsenoxid beifügte. Was dabei herauskam, erfuhr der Experimentator nie. Der Grund dieser Ungewißheit lag in der Natur der neuen Substanz,

die wahrhaft teuflisch war. Eine schwarzfarbene, dickflüssige Lösung, die, der Luft ausgesetzt, Rauch spie, sich leicht entzündete und oben drein einen kaum zu ertragenden üblen Geruch verbreitete — das war das wahrnehmbare Ergebnis des Experiments.

Siebzig Jahre später ging man daran, die Cadetsche Flüssigkeit gründlich zu erforschen. Man entdeckte, daß ihre Hauptkomponenten Arsenverbindungen waren, die sich als sehr eigenartige Stoffe erwiesen.

Damit die „Eigenart“ der Verbindungen klar werde, sei zunächst daran erinnert, daß alle organischen Verbindungen ein wesentliches Merkmal auszeichnet: Ihre Grundlage bilden Kohlenstoffketten — gerade, verzweigte oder auch geschlossene. In die Ketten können Atome einiger anderer Elemente eindringen! Doch die Anzahl solcher Elemente — man nennt sie Organogene — ist begrenzt. Dazu gehören: Sauerstoff, Stickstoff, Wasserstoff, Schwefel und schließlich auch Phosphor. Was hat Arsen also hier zu suchen?

Einer der Bestandteile der Cadetschen Flüssigkeit war eine Substanz, die den Namen Kakodyl erhielt (das griechische Wort „kakados“ bedeutet „übelriechend“). Ihr struktureller Aufbau zeigte, daß sich Arsenatome unverrückbar zwischen die Kohlenstoffatome geschoben hatten.



Organische Verbindungen, deren Kohlenstoffketten Atome anorganischer Elemente (Metalle und Nichtmetalle) in sich einschließen, nennt man heute elementorganische Verbindungen (bei Metallen metallorganische).

Cadet hatte erstmalig in der Welt eine elementorganische Verbindung synthetisiert. Es sind organische Verbindungen, in denen Metalle an Alkyl- bzw. Arylreste gebunden sind.

Die elementorganische Chemie ist inzwischen zu einem sehr aussichtsreichen Feld der modernen Chemie geworden. Sie entwickelt hochmolekulare Stoffe, in denen die Hauptkette der Moleküle aus verschiedenen Elementen besteht. Sie wird von organischen Gruppen gleichsam umrankt. Zu den elementorganischen Verbindungen gehören neben den metallorganischen auch die siliziumorganischen, die wertvolle Eigenschaften der organischen, wie Lösbarkeit in Lösungsmitteln, und der anorganischen Verbindungen, wie Temperaturbeständigkeit, in sich vereinigen.

Heutzutage kennt man über 15 000 Substanzen dieser Art. Die elementorganische bzw. die metallorganische Chemie wurde zu einem bedeutenden selbständigen Teilgebiet der Chemie, ja zu einem ihrer wichtigsten Bereiche. Sie bildet eine Brücke zwischen der organischen und der anorganischen Chemie. Und schließlich ist auch sie ein erneuter Beweis dafür, daß die konventionelle Gliederung der Wissenschaft in unserer Zeit nur sehr bedingt anzuerkennen ist.

In der Tat: Sie stellt eine recht merkwürdige „Organik“ dar, die Verbindungen erforscht, in

denen Metalle, also typische Vertreter der unbelebten Natur, die Hauptrolle spielen!

Und andererseits: Was für eine „Anorganik“ ist das schon, wenn zahlreiche ihr unterworfenen Stoffe sich in mancher Hinsicht wie reinste organische Produkte gebärden?

Die metallorganischen Verbindungen sind für die Wissenschaft besonders interessant. Unerläßliche Bedingung ihrer Existenz ist die bestehende Bindung zwischen einem Metallatom und einem Kohlenstoffatom.

Fast alle Metalle der hauptsächlichsten Nebengruppen des Periodensystems der Elemente können Komponenten von metallorganischen Verbindungen sein. Eine große Vielfalt an Eigenschaften zeichnet diese Stoffe aus. Die einen explodieren mit ungeheurer Gewalt schon bei Temperaturen, die weit unter dem Nullpunkt liegen. Die anderen hingegen besitzen eine außerordentlich große Hitzebeständigkeit. Die einen sind chemisch sehr aktiv, die anderen durch Fremdeinwirkung nicht sehr beeinflusbar.

Alle — außer den metallorganischen Verbindungen des Germaniums — besitzen Giftwirkung, die uns allerdings noch immer Rätsel aufgibt.

Der Einsatzbereich metallorganischer Verbindungen ist außerordentlich groß, praktisch unbegrenzt. Sie sind buchstäblich auf allen Gebieten „tätig“. Mit ihrer Hilfe gewinnt man Plaste und Kautschuk, stellt man Halbleiter und superreine Metalle her. Sie wirken als Arzneien und als Pflanzenschutzmittel, sind Bestandteile von Brennstoffen für Motoren und Raketen. Als erstrangige Reagenzien und Katalysatoren ermöglichen

sie den Ablauf zahlreicher wichtiger chemischer Vorgänge.

In der Sowjetunion hat sich bereits eine bedeutende Schule der elementorganischen Chemiker herausgebildet. An ihrer Spitze steht Leninpreisträger Professor Alexander Nikolajewitsch Nemesjanow.

**Kleine Geschichte vom BTÄ** BTÄ ist eine Abkürzung. Sie bezeichnet eine Verbindung, die sich im Alltag bewährt hat. Sie hilft Benzin sparen. Wieviel eingesparte Liter Benzin man ihr bereits zu verdanken hat, ist noch nicht errechnet worden. Doch zweifellos ergäbe diese Ermittlung eine imposante Zahl.

Was stellt nun dieses BTÄ dar? Der Chemiker würde sagen: eine metallorganische Verbindung, die aus einer Blei-Natrium-Legierung durch Monochloräthan hergestellt wird. Sie heißt Bleitetraäthyl,  $\text{Pb}(\text{C}_2\text{H}_5)_4$ , kurz BTÄ.

BTÄ ist eine farblose, schwere Flüssigkeit. Sie verbreitet den kaum spürbaren Duft frischen Obstes. Doch ist sie keineswegs harmlos, denn sie gehört zur Gruppe stark wirkender Gifte. An sich verdient das BTÄ kein besonderes Interesse. Der Chemiker kennt viel interessantere Verbindungen. Jedoch genügt es, in den Benzintank des Kraftwagens alles in allem einige Tröpfchen BTÄ zu gießen, und es geschehen Wunder.

Das Herz eines Kraftwagens oder eines Propellerflugzeugs ist der Verbrennungsmotor. Sein Arbeitsverfahren ist einfach. Im Zylinder wird das Kraftstoff-Luft-Gemisch verdichtet und durch elektrischen Funken entzündet. Es kommt zu

„Explosionen“, d. h. zur Freisetzung von Energie, die den Motor antreibt.

Vieles hängt vom Grad der Verdichtung des Gemisches ab. Je stärker die Verdichtung ist, desto größer ist die Leistung des Motors, desto geringer ist der Kraftstoffverbrauch. In der Praxis kann jedoch kein genügend hoher Grad der Verdichtung erzielt werden. Dadurch kommt es zu verschiedenen „Krankheitserscheinungen“ des Motors. Die ungleichmäßige, nicht vollständige Verbrennung des Kraftstoffes führt zur Überhitzung des Motors, zu einem schnellen Verschleiß seiner Bauteile. Außerdem bewirkt sie einen ungerechtfertigt hohen Benzinverbrauch. Ingenieure verbesserten mehrmal die Konstruktion des Motors, Chemiker bemühten sich um die Herstellung reinerer Benzinsorten. Die Krankheitssymptome wurden dadurch zwar abgeschwächt, aber die Krankheit selbst wurde nicht aus der Welt geschafft. Nach wie vor „klopfen“ die Motore, nach wie vor kam es zu Überhitzungen; die unregelmäßigen Explosionen des Gemischs (Detonationen) verkürzten die Gebrauchszeit der Motoren. Nach langwierigen Überlegungen kamen die Wissenschaftler zu folgendem Schluß: Die Detonationen können unterdrückt werden. Eine gleichmäßige Verbrennung des Gemischs ist möglich, wenn die Eigenschaften des Kraftstoffes geändert werden.

Doch wie konnte das erreicht werden?

Um die Beantwortung dieser Frage bemühte sich in unermüdlicher Arbeit der amerikanische Ingenieur Thomas Midgley. Zunächst schlug er eine völlig unerwartete Lösung vor: das Benzin

rot zu färben. Der Kraftstoff würde dadurch zu größerer Wärmeaufnahme befähigt sein, also flüchtiger werden. Und das Benzin-Luft-Gemisch könnte auf einen höheren Grad verdichtet werden.

Midgley färbte also das Benzin. Er gab ihm Jod bei. Das Klopfen wurde endlich schwächer. Doch sobald man statt des Jods einen gewöhnlichen Farbstoff verwendete, war der Motor von der alten Krankheit befallen.

Die Farbe spielte also keine Rolle. Midgley war bitter enttäuscht. Doch bald kam er auf folgenden Gedanken: Es müßte Stoffe geben, die, in geringfügigsten Dosen dem Benzin beigesetzt, dessen Güte wesentlich verbessern.

Jod bewirkte dies nur in geringem Maße. Gab es wirkungsvollere Substanzen? Man stellte Versuche an, mit einfachen und mit komplizierten Stoffen, ja mit Hunderten von Verbindungen. Seite an Seite arbeiteten Praktiker und Theoretiker. Schließlich gelangten die Theoretiker zu folgendem wichtigem Schluß: Antiklopfmittel seien unter den Verbindungen zu suchen, die aus Elementen mit hoher Atommasse bestehen. Eines Tages versuchte man es auch mit Bleiverbindungen.

Doch auf welche Weise konnte man Blei ins Benzin einführen? Weder das Metall selber noch seine Salze sind in Benzin löslich. Es besteht also nur ein einziges Mittel: eine organische Bleiverbindung zu verwenden.

Man kam auf das Bleitetraäthyl oder kurz — BTÄ. Das geschah im Jahre 1921.

Minimale Beigaben des BTÄ zum Benzin taten

Wunder. Wesentlich verbesserten sie die Güte der Vergaserkraftstoffe, da sie zur Erhöhung ihrer Oktanzahl beitrugen. Sie bewirkten eine doppelt so hohe Verdichtung des Benzin-Luft-Gemisches. Dies bedeutete damals, daß bei gleicher Geschwindigkeit der Benzinverbrauch auf die Hälfte herabgesetzt wurde. Das Herz der Kraftwagen, Flugzeuge und Luftschiffe konnte störungsfrei arbeiten.

Von Interesse ist auch die Mitteilung, daß die Weltproduktion des Bleitetraäthyls derartige Ausmaße angenommen hat, daß die Gefahr einer schnellen Erschöpfung der Bleivorkommen drohe.

BTÄ zeichnet sich aber auch durch eine sehr unangenehme Eigenschaft aus: Es ist in hohem Maße giftig. „Verbleites“ Benzin muß deshalb mit doppelter Vorsicht behandelt werden. Das „Verbleien“ der Vergaserkraftstoffe unterliegt strengen gesetzlichen Vorschriften. In der DDR sind nur Zusätze bis zu 0,04 Volumenprozent erlaubt.

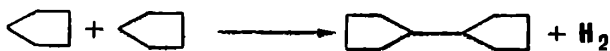
BTÄ ist ein Pionier unter den Klopfbremsen. Es ist bis auf den heutigen Tag das wichtigste Antiklopfmittel geblieben. Doch die Forscher tragen sich mit dem Gedanken, es durch einen in gleichem Maße wirksamen, doch völlig harmlosen Stoff zu ersetzen.

Er ist bereits entdeckt worden. Er heißt CMT. Wollen Sie darüber Näheres erfahren, lesen Sie die nächste Geschichte.

**Ungewöhnliche Brötchen** Heutzutage kennt man eine ganze Anzahl metallorganischer Ver-

bindungen. Mit der Zahl zehntausend wird sie nicht erschöpft sein. Doch vor ungefähr fünfzehn Jahren gab es in der metallorganischen Chemie eine Lücke. Es gelang nicht, sogenannte Übergangsmetalle in organische Moleküle einzufügen. Das sind Metalle, die im Periodensystem der Elemente in den Nebengruppen angeordnet sind. Es sind ihrer fünfzig. Gelang es, hin und wieder eine organische Verbindung mit ihnen herzustellen, so erwies sie sich als äußerst instabil. Von den Chemikern wurde dieses Gebiet deshalb als metallorganische Exotik betrachtet.

Im Jahre 1951 griff Seine Majestät der Zufall ins Geschehen ein (keineswegs erstmalig in der Geschichte der Wissenschaft!). Die amerikanischen Chemiker Kealy und Pouson wollten die Kohlenwasserstoffverbindung Dizyklopentadienyl synthetisieren. Dazu mußten zwei fünfgliedrige Kohlenstoffzyklen miteinander verknüpft werden. Mit anderen Worten: Aus zwei Verbindungen  $C_5H_6$  mußte eine Verbindung  $C_{10}H_8$  gewonnen werden. Man setzte voraus, daß sich zwei Wasserstoffatome abspalten mußten.



*Zyklopentadienyl*

*Dizyklopentadienyl*

Es war bekannt, daß sich eine solche Reaktion nur mit Hilfe eines Katalysators vollziehen konnte. Zu diesem Zweck wurde Eisenchlorid eingesetzt.

Eines schönen Morgens schienen die Forscher vor Staunen sprachlos zu sein. Das Produkt der Reaktion war keine farblose Flüssigkeit, sondern es hatten sich orangefarbene, schöne Kristalle gebildet, die obendrein äußerst stabil waren. Sie hielten der Erwärmung auf fast 500° C stand, was in der organischen Chemie nicht oft vorkommt.

Noch größer war das Staunen, als die mysteriösen Kristalle einer chemischen Analyse unterzogen wurden. Die Kristalle enthielten Kohlenstoff, Sauerstoff und ... Eisen. Das typische „Übergangsmetall“ Eisen hatte sich ohne viel Umstände mit typischen organischen Stoffen vereinigt.

Die chemische Strukturformel dieser eisenorganischen Verbindung erwies sich als sehr ungewöhnlich:



Die zwei Ringe (Zyklopentadiene) stellen regelmäßige, flache Fünfecke dar. In ihrer Anordnung gleichen sie einem Brötchen, bei dem Eisen sozusagen als Aufschnitt dazwischengelegt ist.

Wegen seiner besonderen Struktur fand dieses Molekül — es sieht wie ein Doppelkegel aus — in der chemischen Grundlagenforschung große Beachtung. Seiner Brötchenform verdankt es die Bezeichnung Sandwich-Struktur.

Diese eisenorganische Verbindung, die den Namen Ferrozen erhielt, wurde zum ersten Spröß-

ling einer ganzen Familie. Seinen Aufbau können wir, der Einfachheit halber, schematisch in einer Fläche darstellen; in Wirklichkeit hat sein Molekül eine verwickelte räumliche Lage.

Die Ferrozen-Synthese wurde zu einer Sensation. Sowohl Theoretiker als auch Praktiker sahen sich gezwungen, manche bisher als unanfechtbar geltende Ansicht hinsichtlich der Möglichkeiten der metallorganischen Chemie aufzugeben.

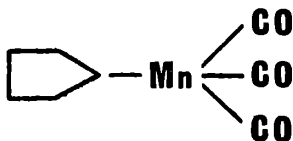
Das Geburtsjahr des Ferrozens war 1951. Heute gibt es mehrere Dutzende ähnlicher Verbindungen mit „Übergangsmetallen“.

Vorläufig sind sie nur für die Theoretiker der Chemie von Interesse. Was ihre Auswertung in der Praxis anbelangt, so herrscht auf diesem Gebiete noch manche Unklarheit. Das Ferrozen dient aber bereits als Zusatz zu Heizölen, um eine rauchlose Verbrennung zu garantieren, oder als Mineralölzusatz für Düsentriebwerke, als Antiklopfmittel und auch als ein Wärmeüberträger.

An dieser Stelle sei auf eine neue Substanz hingewiesen, die in letzter Zeit in Fachkreisen starke Beachtung findet:

*Methylzyklopentadienyl-  
Mangan-Trikarbonyl.*

Die graphische Darstellung seiner Molekülstruktur bereitet keine Schwierigkeiten.



Allerdings ist hier der „Brötchenbelag“ Mangan noch nicht an eine zweite „Schnitte“ (Zyklopentadienyl-Ring) gebunden, sondern an drei Kohlenoxidmoleküle.

CMT ist eine wunderbare Klopfbremse. Es schlägt unseren alten Bekannten, das Bleitetraäthyl, aus dem Feld, und das nicht nur dank seiner besonderen Eigenschaften als Antiklopfmittel, sondern auch dank seiner völligen Harmlosigkeit. Gegenwärtig wird es allen möglichen praktischen Prüfungen unterworfen. CMT wird vorerst vor allem als Promotor dem verbleiten Benzin zugesetzt, obwohl es selbst als ein sehr gutes Antiklopfmittel verwendet werden könnte. Seine Herstellungskosten sind jedoch noch sehr hoch.

Der restlose Ersatz des BTÄ durch das CMT-Klopfmittel kann — wie Ökonomen errechnet haben — in der Sowjetunion eine Jahreseinsparung von 3 Milliarden Rubel ergeben. Dabei ist die materielle Seite noch nicht einmal die ausschlaggebende. Von größerer Bedeutung ist es, daß die Großstadtluft in wesentlich geringerem Maße verunreinigt werden würde.

**Launen des Kohlenoxids** Kohlenoxid oder Kohlenmonoxid (CO) ist eine unkomplizierte Verbindung: ein Atom Kohlenstoff und ein Atom Sauerstoff. Man nennt sie auch Stickgas. Sie ist ein giftiges Gas, brennbar, geruch- und farblos. Bei höheren Temperaturen verliert Kohlenoxid seine Reaktionsträgheit sehr schnell.

...Wir können nicht darauf schwören, daß es sich haargenau so zugetragen hat, doch ungefähr mag

ich folgender Vorfall 1916 in einem deutschen Chemiewerk abgespielt haben: Für irgendwelche Zwecke benötigte man einen alten Stahlballon, in dem seit fünf Jahren ein Wasserstoff-Kohlenoxid-Gemisch unter Druck lagerte. Man öffnete das Gefäß und befreite es von dem Gasgemisch. Den Boden des Behälters bedeckte eine gelbliche Flüssigkeit, die einen unangenehmen Geruch verbreitete.

In der Folge stellte es sich heraus, daß die Flüssigkeit nichts anderes war als die bekannte, doch äußerst seltene chemische Verbindung eines Eisenatoms mit fünf Kohlenoxido-molekülen. In Chemie-Lexiken wird sie unter dem Namen Eisenpentakarbonyl erwähnt, kurz  $\text{Fe}(\text{CO})_5$ .

(Hier sei eine kleine Randbemerkung zu wissenschaftlichen Entdeckungen gestattet. Eisenpentakarbonyl wurde an ein und demselben Tage, am 15. Juni 1891, von zwei Forschern gewonnen: von dem französischen Chemiker Berthelot und dem englischen Chemiker Mond. Die Geschichte wissenschaftlicher Entdeckungen kennt nicht viele Fälle, die zeitlich so eng zusammenfallen).

Man fand bald heraus, woher die Flüssigkeit im Ballon stammte. Da Wasserstoff in den Behälter gelangt war, wurde die eiserne Innenwand des Gefäßes sehr aktiv. Eisenoxide wurden auf die Metalloberfläche abgesetzt. Das unter Druck befindliche Kohlenoxid verband sich mit dem Eisen. Nachdem der Sachverhalt geklärt worden war, konstruierten die Chemiker einen Apparat, mit dessen Hilfe die Substanz kiloweise gewonnen wurde.

Eisenpentakarbonyl erwies sich nämlich für die

Praxis als sehr nützlich. Es bewährte sich als Klopfbremse. Man stellte sogar einen Spezialbrennstoff unter Beigabe des Eisenpentakarbonyls her. Doch nicht lange nutzten die Kraftwagen diesen Kraftstoff. Pentakarbonyl spaltete sich allzu leicht in seine Bestandteile auf, und das Eisenpulver verstopfte die Kolbenringe im Motor. Hinzukam, daß mit der Entdeckung des Bleitetraäthyls (BTÄ) ein geeigneteres Antiklopfmittel zur Verfügung stand.

Die Verlegungsbereitschaft des Eisenpentakarbonyls wollen wir nun in unser Gedächtnis befördern und uns einigen anderen Problemen zuwenden, bevor wir noch einmal auf dies Eisenkarbonyl zu sprechen kommen.

Gegenwärtig kennt man bereits eine ganze Anzahl von Metallkarbonylen: Verbindungen mit Chrom und Molybdän, Wolfram und Uran, Kobalt und Nickel, Mangan und Rhenium, Ruthenium und Osmium. Sie unterscheiden sich voneinander nach den Eigenschaften: die einen sind flüssig, die anderen fest; die einen sind instabil, die anderen ziemlich stabil. Die übliche Anschauung von der Wertigkeit ist nicht imstande, den Aufbau der Karbonyle aufzuhellen. Doch allen ist eine merkwürdige Besonderheit eigen.

Wie wir wissen, gesellen sich in den Komplexverbindungen zu den Metallionen neutrale Moleküle, und zwar in verschiedener Anzahl. Daher bedient man sich in bezug auf Komplexverbindungen nicht des Begriffs Wertigkeit, sondern man spricht von der Koordinationszahl. Diese gibt an, wieviel Moleküle, Atome oder Komplexe an das Zentralatom gebunden werden können.

Die Karbonyle sind noch eigenartigere Gebilde der Natur. Bei ihnen sind neutrale Atome an neutrale Moleküle gebunden. Und die Wertigkeit der Metalle in den Verbindungen muß gleich Null gesetzt werden. Kohlenoxid ist ja ein neutrales Molekül.

Metallkarbonyle sind Koordinationsverbindungen von Metallen der Nebengruppen des Periodensystems mit Kohlenmonoxid CO.

Wir haben es hier wieder einmal mit einer paradoxen Erscheinung der Chemie zu tun, die bis jetzt noch keine ausreichende theoretische Begründung erfahren hat.

Damit wollen wir unsere kleine Abschweifung in das Gebiet der Theorie beenden.

Die Metallkarbonyle erwiesen sich für die Praktiker als begehrenswerte Objekte. Zum Beispiel finden sie als Katalysatoren Verwendung. Jedoch ist dies nicht einmal ihre Hauptrolle. Es gibt für sie Wichtigeres zu tun.

Kehren wir in jenes Werk zurück, wo man vor Jahrzehnten in einem alten Stahlbehälter eine gelbbraune Flüssigkeit, die sich als Eisenpentakarbonyl erwies, bemerkt hatte. Bald darauf wurde untersucht, wie man diese Verbindung erzeugen und vielleicht auch großtechnisch verwenden konnte.

Eines Tages hatte der Arbeiter, der den Apparat der Synthese bediente, nicht bemerkt, daß das Pentakarbonyl durch ein Loch herauszutropfen begann. Da Karbonyle leicht flüchtig sind, bildeten sich Dämpfe, die sich auf einem Eisenblech absetzten. Als der Arbeiter die Havarie bemerkte und sofort beseitigen wollte, stieß er

durch Zufall gegen das in der Sonne liegende Eisenblech. Mit Gepolter stürzte es zu Boden. Es explodierte.

Eine „Untersuchungskommission“ beriet lange über das seltsame Ereignis. Schließlich gelangten die Experten zu folgendem Schluß: Das Eisenblech war explodiert, weil es mit einer außerordentlich feinen Eisenpulverschicht bedeckt war. Allgemein neigt sehr feines Pulver zu Explosionen. Eine derartige Bereitschaft ist z. B. auch Mehlstaub oder Staubzucker eigen.

Das Eisenpulver auf dem Blech verdankte seine Entstehung der thermischen Zersetzung des Pentakarbonyls.

Die Bildung feinsten Metallpulvers durch thermische Zersetzung der Metallkarbonyle erweckte Interesse. Man erhält ja auf diese Weise sehr reine Metalle.

Die Forscher stellten fest, daß sich Pulver dieser Art durch besondere Eigenschaften auszeichnen. Die Größe der Partikel ist minimal, sie beträgt kaum etwas mehr als einen tausendstel Millimeter. Eisenpulver kann auch in Form flaumiger Eisen„watte“ gewonnen werden, deren Moleküle aus festen Metallketten zusammengefügt sind.

Auf einer heißen Oberfläche bilden die Karbonyle einen äußerst beständigen, feinen Film. Dabei besitzen sowohl das Pulver als auch die feinen Schichten höchst wertvolle magnetische und elektrische Eigenschaften. Dieser Umstand hat ihnen den Weg in die Hochfrequenztechnik und in die Elektronik erschlossen. Auch in der Pulvermetallurgie sind Karbonylpulver gesuchte Stoffe.

**Rot und Grün** Hämoglobin und Chlorophyll sind organische Stoffe. Die Rotfärbung des Blutes und die Grünfärbung der Pflanzen sind ihr Werk. Sie sind die Schlüssel zu allem Lebenden auf der Erde. Die graphische Darstellung ihrer Strukturformeln würde in unserem Buch eine ganze Seite einnehmen. Beide sind Komplexverbindungen von ungewöhnlicher Art. Es hat den Anschein, daß sich ein einziges Metallatom



in der Mitte des aus mehreren Ringen gebildeten Gerüsts gefangen hätte. Die Chemiker nennen derartige Verbindungen innere Komplexe. Der „Kern“ des Hämoglobins ist ein Eisenatom. Das Blut verschiedener Tiere enthält unterschiedliche Hämoglobine. Doch ihr Aufbau ist grund-

sätzlich der gleiche. Rund 750 g Hämoglobin sind im Blute des Menschen enthalten.

Das Hämoglobin besorgt den Transport des Sauerstoffs von den Atmungsorganen zu den Geweben des Organismus.

Das Chlorophyll, der grüne Farbstoff, der in allen höher organisierten Pflanzen vorhanden ist, ist in ähnlicher Weise aufgebaut. Doch sein Metallatom ist ein Magnesiumatom. Die Lebensfunktion des Chlorophylls ist außerordentlich bedeutsam und höchst kompliziert. Mit seiner Hilfe assimilieren die Pflanzen das Kohlendioxid der Luft. Für die Photosynthese ist das Chlorophyll entscheidend, denn es absorbiert die Strahlungsenergie der Sonne und setzt sie so um, daß sie der Assimilation dienen kann.

Die Chemiker stehen erst am Anfang des Weges, der zur restlosen Aufhellung der von Hämoglobin und vom Chlorophyll bewirkten Vorgänge führt. Anscheinend spielen hier die Eisen- bzw. Magnesiumatome als Komplexmetalle eine wesentliche Rolle.

Die Phantasie der Natur scheint unbegrenzt zu sein. Eisen und Magnesium sind nicht die einzigen Metalle, die sich ins Innere des Porphyrinskeletts, des organischen Gerüsts des Hämoglobins und Chlorophylls, einschleichen können. In der Rolle eines Metallkerns können auch Kupfer, Magnesium oder Vanadium auftreten.

Es leben auf der Erde auch Wesen, in deren Adern blaues Blut fließt. Im Hämoglobin des Blutes einiger Molluskenarten (Weichtiere) fehlt Eisen. Dafür enthält es Kupfer, das für die Blaufärbung verantwortlich ist.

**Alles in Einem** Zu Beginn der dreißiger Jahre unseres Jahrhunderts stellten Geochemiker eine interessante Hypothese auf. In einem beliebigen Gebilde der Natur, ob in einem Steinsplitter, einem Holzspan, einem Klümpchen Erde oder in einem Tropfen Wasser, seien Atome fast aller auf der Erde bekannten chemischen Elemente vorzufinden.

Zuerst schien die Annahme ein Hirngespinnst zu sein. Doch von Jahr zu Jahr wurde das Auge der analytischen Chemie schärfer und man vermochte mit Hilfe analytischer Methoden Substanzen wahrzunehmen, die nur in tausendstel, ja sogar millionstel Milligramm vorhanden sind. Die Vorstellung der Geochemiker erwies sich zwar nicht als hundertprozentig richtig, jedoch von der Wahrheit nicht weit entfernt.

Tatsächlich könnte man in dem Stein, über den wir am Flußufer gestolpert sind, Silizium und Aluminium, Kalium und Zink, Silber und Uran vorfinden, kurz, beinahe das ganze Periodensystem der Elemente. Selbstverständlich wird der mengenmäßige Anteil der meisten chemischen Elemente nur wenige Atome betragen.

Es wäre jedoch im höchsten Grade naiv, wäre man der Meinung, im Stein bildeten alle Elemente eine einzige Verbindung. Dem ist natürlich nicht so. Man hat es mit einer komplizierten Mischung in Komplexen vorhandener chemischer Stoffe zu tun, deren Hauptkomponenten Silizium, Aluminium und Sauerstoff sind. Der Anteil an anderen Elementen ist wesentlich geringer, ja viele sind darin bloß in geringfügigen Beimischungen enthalten.

So verhält es sich in der Natur. Und im chemischen Labor? Sind Wissenschaftler imstande, eine Verbindung zu gewinnen, von der jedes Molekül alle Elemente des Periodensystems enthält?

Die Chemiker hatten bereits vor der Aufgabe gestanden, komplizierte Verbindungen herzustellen, an denen mehr als zehn Elemente beteiligt sind. Doch niemand hat es sich bisher zum Ziel gesetzt, ein Molekulargebilde zu schaffen, das alle Bewohner des großen Gebäudes des Periodensystems der Elemente durch chemische Bande vereinigen würde. Nicht etwa, daß die Zeit dazu gefehlt hätte oder ein solches Unterfangen für die Praxis uninteressant gewesen wäre. Nein! Der Aufbau eines solchen Supermoleküls wäre eine zur Zeit noch nicht lösbare Aufgabe. Doch so schwierig das auch sein würde, das Problem, ein derartiges Supermolekül zu synthetisieren, scheint im Prinzip lösbar zu sein.

Es gelingt selten, eine chemische Verbindung mit Hilfe eines einzigen Verfahrens herzustellen, also die Reaktion in einem einzigen Stadium durchzuführen. Wollte man ein alle chemischen Elemente einschließendes Molekül aufbauen, müßte dies in vielen Dutzenden, ja Hunderten von Stadien geschehen. Nur etappenweise könnte man ein so kompliziertes Gebäude errichten.

Wir können die Strukturformel der hypothetischen Superverbindung noch nicht angeben, weil bis heute noch niemand darauf gekommen ist, wie man sie aufbauen müßte.

Solange kein „Entwurf“ vorliegt, keine „Zeich-

nungen“ vorhanden sind, ist es unmöglich, sich dieses Gebilde auch nur in Umrissen vorzustellen.

**Das ungewöhnlichste Atom** Ps ist das chemische Zeichen für ein erstaunliches Atom. Aber es wäre vergebens, es in der Tabelle des Periodensystems zu suchen. Denn Ps ist überhaupt kein Atom eines chemischen Elements.

Es ist äußerst kurzlebig. Ihm gehört nicht einmal der zehnmillionste Bruchteil einer Sekunde. Dabei kann man nicht behaupten, es sei radioaktiv, es zerfalle, indem es „zerstrahle“.

Ps ist das Zeichen für Positronium. Sein Aufbau ist äußerst einfach und merkwürdig zugleich.

Das Positronium stellt nämlich für sehr kurze Zeit ein Gebilde aus einem Elektron und seinem Antiteilchen, dem Positron, dar. Zur Geburt des Positroniums kommt es bei bestimmten radioaktiven Umwandlungen, die von Positronenstrahlung begleitet sind. Für eine mittlere Lebensdauer von  $10^{-7}$  Sekunden bzw.  $10^{-10}$  Sekunden bilden das Positron und das Elektron ein stabiles System.

Im Positronium spielt das Elementarteilchen Positron sozusagen die Rolle des Protons. Es besitzt die gleiche Masse wie das Elektron, unterscheidet sich aber von ihm durch entgegengesetzte (positive) Elementarladung.

Prallen ein Positron und ein Elektron aufeinander, ist es um die beiden geschehen. Sie annihilieren, wie die Physiker sagen. Sie gehen in Nichts auf. Exakt bedeutet das: Die Entstehung des Teilchenpaares Elektron—Positron, die Ver-

einigung von Teilchen und Antiteilchen, ist zugleich mit einer „Paarvernichtung“, einer Anihilation verbunden. Sie „zerstrahlen“, indem die ihrer Ruhmasse entsprechende Energie als Gammaquanten oder Pi-Mesonen abgestrahlt wird. Ehe sie also verschwinden, leben die zwei „Erzfeinde“, die sich schließlich doch gegenseitig umbringen, einen Augenblick Seite an Seite. In diesem kurzen Augenblick bilden sie das atomare Phantom Positronium. Es ist allerdings ein Atom ohne Kern, denn das Elektron und das Positron kreisen um ein gemeinsames Gravitationszentrum.

Für wen ist das Positronium von Interesse? Nur für die Theoretiker der Physik? Oder vielleicht für Verfasser utopischer Romane? Könnte es nicht eines Tages mit Hilfe des Positroniums eine neue Art der Energieerzeugung für Raumschiffe geben?

Vor kurzem erschien in den USA ein dickes Buch: „Chemie des Positroniums“. Es ist kein utopischer Roman. Die Autoren sind ernstzunehmende Wissenschaftler. Sie berichten u. a. über die Art und Weise, in der die Forscher das ungewöhnliche Gebilde Positronium auswerten.

Auch in anderen Ländern, zum Beispiel in der Sowjetunion, veröffentlichte man Bücher und Aufsätze, die dem gleichen Thema gewidmet sind. Mit einer allseitigen Erforschung des Positroniums ist gegenwärtig der sowjetische Wissenschaftler W. I. Goldanski beschäftigt. Während seiner kurzen Lebensdauer ist das Positronium zur chemischen Reaktion fähig, ja

es legt eine sehr große Bereitschaft dazu an den Tag, wenn es sich um chemische Verbindungen bei freigebliebenen Wertigkeiten handelt. Die bisher unbesetzten Stellen belegen dann die Positroniumatome.

Mit Hilfe von Spezialgeräten erforschen die Chemiker den Charakter des Zerfalls des Positroniums, das sich in das Molekül eingeschlichen hat. Es stellte sich heraus, daß — je nach Aufbau des Moleküls — der Zerfallsvorgang unterschiedlich verläuft. Dieser Umstand gestattet den Chemikern die Erforschung feinsten Einzelheiten molekularer Konstruktionen, die Beantwortung mancher komplizierter, strittiger Fragen, bei deren Untersuchung andere Verfahren bisher versagten.

**Noch einmal über den Diamanten** In unserem chemischen Museum ist der Diamant keineswegs Exponat Nummer 1. Heutzutage versetzt sein eigenartiges Kohlenstoffskelett niemanden mehr in Erstaunen. Und schon im siebzehnten Jahrhundert verbrannten Chemiker einen Diamantenkristall auf die einfachste Weise: mit Hilfe der Sonnenstrahlen und einer gewöhnlichen Lupe...

Seit langem bewegt die Gemüter der Chemiker eine andere Frage: Könnte man nicht Graphit in einen Diamanten umwandeln? Beide bestehen aus Kohlenstoff. Nur eine „Kleinigkeit“ wäre erforderlich: Man müßte das Kohlenstoffskelett des Graphits in ein Diamantenskelett umbauen, aus einem sehr weichen ein sehr hartes Mineral gewinnen.

Nach langem Hin und Her hatten die Forscher eine Möglichkeit dazu erspäht. Über diese interessante Geschichte werden wir später noch



berichten. Vorderhand begnügen wir uns mit der Bemerkung: Um den Diamanten künstlich zu erzeugen, waren extreme Drücke erforderlich, Drücke, bei denen auf die Flächeneinheit

Kräfte von mehreren hunderttausend Kilopond wirken. Solche ultrahohen Drücke erschließen ungeahnte Möglichkeiten, viele neue Stoffe künstlich zu erzeugen.

So gelang z. B. in einer Hochdruckkammer die Diamantsynthese erstmalig im Jahre 1953 bei einem Druck von etwa 70 000 at und einer Temperatur von 3000° C. In der Sowjetunion gibt es gegenwärtig dafür eine Höchstdruckanlage, die immerhin die Ausmaße eines Gebäudes hat, das zehn Stockwerke hoch ist. Die Wirkung des Hochdruckes wird für viele chemische Prozesse genutzt. Die großtechnisch betriebene Ammoniaksynthese, die Methanolsynthese, die katalytische Druckhydrierung, die Synthese von Harnstoff und Ameisensäure, die Polymerisation von Äthenen sind dafür einige wenige Beispiele.

In der Forschung konnten inzwischen mit Hilfe von Stoßwellen sogar Drücke bis zu mehreren Millionen Atmosphären erzeugt werden, allerdings nur für sehr kurze Zeit, denn es ist technisch sehr schwierig, derartig hohe Drücke zu beherrschen. Meist ist ja die Hochdrucktechnik auch noch mit der Erzeugung hoher Temperaturen verbunden, da die Hochdruckprozesse hauptsächlich durch den Druck, die Temperatur und den jeweiligen Katalysator bestimmt werden.

Mit Hilfe der Hochdrucktechnik ist es beispielsweise auch möglich, eine neue Phosphorart zu erzeugen.

Zu den Zeiten der Alchimisten kannte man bloß zwei Abarten des Phosphors, den weißen und den roten. Heute hat sich eine dritte hinzuge-

stellt, der schwarze. Es ist der schwerste und der dichteste Phosphor. Er leitet Elektrizität und Wärme nicht schlechter als manches Metall. Weißer Phosphor, ein typisches Nichtmetall, verwandelt sich unter der Einwirkung ultrahohen Drucks (100 000 at) in eisengraue Kristalle von metallischem Glanz, die metallische Eigenschaften haben.

Dem Beispiel des Phosphors folgten zuerst Arsen, schließlich noch einige andere Nichtmetalle. Jedes Mal konnte man erstaunliche Umwandlungen der Eigenschaften wahrnehmen. Die schwere Hand des ultrahohen Drucks veränderte die Eigenschaften augenblicklich. Von physikalischem Standpunkt aus geschah nichts Ungeöhnliches: Sehr hoher Druck verändert die Kristallstruktur der chemischen Elemente und ihrer Verbindungen und verstärkt den „Metallcharakter“.

Auf diese Weise entstand ein neuer, typisch physikalischer Begriff: Metallisierung durch Druck. Unter Druckeinwirkung wird vor allem eine Veränderung der Atomstruktur erzielt.

Und nun noch eine weitere Frage, die sich aus Überlegungen ergibt, die wir bei der Anwendung hoher Drücke und hoher Temperaturen anstellen. Denn mit dieser neuartigen Technik verändern wir ja die auf der Erde normalerweise vorhandenen Bedingungen, unter denen sich die Moleküle in der Natur bilden.

Es wird die Zeit kommen, da Weltraumfahrer anderen Planeten einen Besuch abstatten werden: dem Mars, der Venus, dann vielleicht immer entfernteren, geheimnisvolleren Welten.

Ungewöhnliches, Unerwartetes, Unbekanntes wird der Menschheit erschlossen sein.

Sind die chemischen Elemente überall die gleichen? Erstreckt sich die „Allmacht“ des Periodengesetzes und die Gesetzmäßigkeit des Periodensystems der Elemente auf alle Himmelskörper ohne Ausnahme? Oder hat das geniale Gesetz nur in „beschränktem“, irdischem Rahmen Wirkungskraft?

Besteht nicht die Universalität des Periodengesetzes und des Periodensystems der Elemente darin, daß sie überall im Weltall gelten, daß die ihnen zugrunde liegenden Gesetzmäßigkeiten überall die gleichen sind? — Die gleichen unter einem wesentlichen Vorbehalt! Die Umweltbedingungen dürfen sich von den irdischen nicht allzu sehr unterscheiden. Wenn auf anderen Planeten Temperatur- und Druckwerte herrschen, die nur in mehrstelligen Zahlen angegeben werden können, werden die von den Menschen bisher formulierten Gesetze ihre irdische Begrenztheit offenbaren.

**Unbekanntes treten wir mit Füßen** „Ehe du die Sterne zählst, schau' unter die Füße“, sagt ein orientalisches Sprichwort.

Kennen wir unseren irdischen Planeten gut genug? Wir verfügen über relativ geringe Kenntnisse hinsichtlich des Aufbaus des Erdkörpers. Wir wissen nur wenig darüber, aus welchen Elementen seine Tiefen zusammengesetzt sind.

Es wimmelt von Hypothesen, doch keiner einzigen können wir den Vorrang zugestehen.

Tiefbohrungen sind bereits fast neun Kilometer

erdeinwärts vorgedrungen, und ein Ansturm auf noch größere Tiefen hat bereits begonnen: 15 bis 20 Kilometer tief soll gebohrt werden. Im Jahre 1972 sollen erste Proben aus 15 Kilometer Tiefe emporgeholt werden. Doch sei nicht vergessen: Der Radius der Erde beträgt etwa 6370 Kilometer.

Ein anderes Sprichwort aus dem Osten lautet: „Will man die Nuß schmecken, muß man sie knacken!“ Aber es ist äußerst schwierig, die harte „Nuß“ zu knacken, die die Erdkruste darstellt, und den Erdmantel und den Erdkern zu erforschen. Es ist schon eine schwere und gefährliche Arbeit, die mit ungeheueren technischen Problemen verbunden ist, in die obersten Schichten des Erdmantels vorzudringen. Und es ist noch immer so, daß der Mensch eigentlich sehr wenig von dem weiß, was sich unter seinen Füßen tief im Erdinneren abspielt. Steht er nicht auf Geheimnissen, die mindestens ebenso bedeutend sind, wie die Geheimnisse des Kosmos?

Mit Entschiedenheit kann nur eines behauptet werden: Die Komponenten der Erdmasse sind besondere Stoffe. Denn je näher man dem Erdzentrum kommt, desto stärker wird der Druck. Im Kern erreicht er astronomische Werte: bis zu 3 Millionen Atmosphären.

Was den Aufbau des Kerns anbelangt, so streiten sich die Wissenschaftler darüber schon ein volles Jahrhundert lang. Fast jeder von ihnen bringt eine eigene Hypothese vor.

Die einen sind der Ansicht, die Erdkugel habe einen Nickel-Eisen-Kern. Andere sehen die Dinge anders. Ihrer Meinung nach sei das Mineral

Olivin der Baustoff des Erdkerns. Unter gewöhnlichen Umständen stellt Olivin ein Silikatgemisch aus Magnesium, Eisen und Mangan dar. Der im Kerninneren wirkende Riesendruck wandle das Olivin in einen eigenartigen metallähnlichen Stoff um. Im Sinne einer dritten, noch weitergehenden Vorstellung soll Wasserstoff, der bis zur völligen Verhärtung verdichtet ist und daher ungewöhnliche metallische Eigenschaften besitzt, den Zentralanteil des Kerns bilden.

Wie dem auch sei, bis zur Erschließung des Erdkerns dürfte es noch ein Weilchen dauern. Gegenwärtig wissen wir über den Kern unserer Erde viel weniger als über den Kern der Atome. Wahrhaftig: „Unbekanntes“ treten wir mit Füßen, und dieses Unbekannte ist eine wahre Schatzkammer für den Chemiker. Elemente in ungewöhnlichem kristallinen Zustand mögen hier verborgen sein. In 100 Kilometer Tiefe herrschen Drücke von 3000 at und Temperaturen von 1500° C. Unter diesen Bedingungen könnten sich bereits Diamanten bilden. Vielleicht gibt es hier auch Nichtmetalle, die metallische Eigenschaften haben, oder eine Vielfalt von Verbindungen, deren Eigenschaften wir uns nicht vorzustellen vermögen?

Die Chemie der Tiefen birgt sicherlich große Überraschungen für uns. Doch zur Zeit ist unsere Chemie — wie der sowjetische Forscher A. F. Kapustinski gelegentlich bemerkte — noch eine recht „oberflächliche“ Wissenschaft.

Behält das Periodensystem der Elemente auch für die tieferen Schichten seine Wirkung? Solange die Elektronenstruktur der Atome keine

Änderung erfahren hat, solange die Elektronen die ihnen zugeordneten Schalen besetzt haben, wird das der Fall sein.

**Wenn Ein und Dasselbe nicht ein und dasselbe ist**  
Vom ultrahohen Druck haben wir in unserem Buch noch nicht endgültig Abschied genommen. Soeben stellt er sich bei einem Gedankenexperiment mit einer neuen Überraschung vor.

Die Elektronenschalen um den Atomkern sind eine ziemlich stabile Konstruktion. Eine Schale kann mehrere Elektronen einbüßen, so daß sich das Atom in ein Ion umwandelt. Dieser Vorgang spielt sich auf Schritt und Tritt bei chemischen Reaktionen ab.

Die Elementenschalen können eine ganze Anzahl von Elektronen einbüßen, ja sogar den ganzen Vorrat, so daß der „nackte“ Kern übrigbleibt. Derartiges geschieht bei Temperaturen von einigen Millionen Grad Celsius, zum Beispiel in den Sternen.

Nun wollen wir uns in Gedanken mit der Möglichkeit beschäftigen, die Atome so zu verändern, daß die Gesamtzahl der Elektronen keine Änderung erfährt, obgleich wir die Anordnung der Elektronen, also den Schalenaufbau anders gestalten. Damit würden wir selbstverständlich die Eigenschaften des Atoms, die Eigenschaften des betreffenden chemischen Elements ändern.

Unser Experiment wollen wir in Gedanken am Kaliumatom durchführen. Es besitzt vier Schalen. Die zwei kernnächsten (K und L) sind bis

zur vollen Besetzung ausgebaut: Die K-Schale enthält 2, die L-Schale 8 Elektronen. Zusätzliche Elektronen werden sie unter keinen Umständen aufnehmen. Doch die restlichen zwei Schalen sind noch lange nicht voll ausgebaut. Die M-Schale hat bloß 8 Elektronen aufgenommen (statt der erforderlichen 18), und die N-Schale hat mit dem Ausbau erst begonnen, hat 1 Elektron untergebracht (es geschah dies, ehe die Nachbarchale ihren Ausbau beendet hatte).

Beim Kalium wird also erstmalig kein „folgerichtiger“, sondern ein „stufenweiser“ Ausbau der Elektronenschalen beobachtet.

Doch vorstellbar ist ja auch der Fall, daß das eine Elektron nicht die vierte Schale besetzt, sondern den Ausbau der dritten fortsetzt. Dort gibt es ja noch zehn freie Stellen.

Sollte diese Vorstellung nur ein Hirngespinnst sein? Unter gewöhnlichen Umständen auf jeden Fall. Aber sobald sehr hohe Drücke ins Spiel gebracht werden, kann sich die Situation leicht ändern.

Bei sehr hohen Drücken werden die Elektronenschalen des Atoms stark zusammengepreßt. Es kann dabei dazu kommen, daß verschiedene Außenelektronen in kernnähere, noch nicht vollständig ausgebaute Schalen „durchfallen“.

Beispielsweise zwingt sich das Kaliumelektron aus der vierten Schale in die dritte Schale von außen. Die M-Schale würde dann über 9 Elektronen verfügen.

Was folgert daraus? Die Ordnungszahl 19 ist für Kalium unverändert geblieben. Auch die Anzahl der Elektronen hat sich nicht geändert.

Kurz, es hat sich keine Umwandlung des Elements vollzogen.

Und dennoch: Wir werden unseren alten Bekannten, das basische Metall Kalium, nicht wiedererkennen, sondern werden es mit einem Neuling zu tun haben, der drei Schalen, anstatt der üblichen vier, besitzt. Und die Außenschale enthält nun 9 Elektronen statt eines einzigen. Der chemische Charakter dieses „Novokaliums“ müßte dann noch erforscht werden. Man kann diesbezüglich nur Vermutungen anstellen, denn niemand hat bislang auch nur ein einziges Körnchen des Neulings gesehen.

Bei weiterem Druckanstieg werden auch die dem Kalium folgenden Elemente ihr Alltagsgesicht einbüßen. Mit der stufenweisen Besetzung der Elektronenschalen würde auf diese Weise Schluß gemacht. Dieses das Periodensystem beherrschende Gesetz träte unter den neuen Bedingungen außer Kraft. Solange die eine Schale noch nicht vollständig besetzt wäre, bliebe die benachbarte leer.

Auch die „neuen“ Elemente fänden in einem Periodensystem der Elemente den ihnen zustehenden Platz. Jedoch hätten wir es mit einem andersgearteten System, nicht mit dem Mendelejewschen, zu tun. Seine Bewohner (mit Ausnahme der Elemente der ersten drei Perioden) würden nicht mehr die gleichen sein. Kupfer und Promethium gäben die „basischen“ Metalle ab. Nickel und Neodym, mit weiter ausgebauten Außenschalen, würden die „Edelgase“ sein. Selbstverständlich ist dieses Bild, daß wir uns soeben vor Augen geführt haben, stark ver-

einfacht. Wahrscheinlich würde sich alles viel komplizierter gestalten. Zu einer solchen Vermutung bieten theoretische Berechnungen jedenfalls Anlaß.

Ungewöhnliche Wertigkeiten, seltene Eigenschaften, erstaunliche Verbindungen — all dies wird die „Tiefenchemie“ vielleicht mal darbieten können.

Verlockend? Hirngespinnst? Wer kann das sagen? Wahrscheinlich wird man auch auf diesem Gebiet nicht ohne „verrückte Ideen“ zu Ergebnissen kommen — es handelt sich ja immerhin um die Gewinnung einer Materie völlig neuartigen Typs, vorausgesetzt, daß eine solche bei sehr hohen Drücken existiert. Unter den bisher bekannten Bedingungen haben wir es stets mit gewöhnlichen Elementen zu tun.

Gelänge es aber, die Besetzung der Elektronenschalen unter hohen Drücken so zu verändern, wie wir das angedeutet haben, würden wir eine zusätzliche chemische Wissenschaft erschließen — die Chemie Nummer II.



DIE „ERKENNTNISFÄHIGKEIT“  
DER CHEMIE



**Über den Nutzen der Analyse** Michail Lomonossow sagte einmal: „Weit breitet die Chemie ihre Arme aus.“ Schon vor 200 Jaren ahnte der große Gelehrte die Bedeutung dieser Wissenschaft für die künftigen Generationen.

Unser zwanzigstes Jahrhundert bestätigt die Richtigkeit seiner Worte. Die Chemie von heute ist ein vielarmiges Wesen. Und von Jahr zu Jahr scheinen ihr neue Arme zu wachsen.

Ihre überragende Bedeutung im Leben der Menschen verdankt die Chemie der Tatsache, daß sie in alle Bereiche des Lebens hineingreift, in erster Linie wohl ihrer Fähigkeit, alle Stoffe zu analysieren. Der chemischen Analyse hat man es zu verdanken, daß viele irdische Elemente überhaupt entdeckt werden konnten, daß die Bestandteile der chemischen Verbindungen, der einfachen und der komplizierten — vom Kochsalz bis zu den Eiweißen — erkannt und selbst die härtesten Gesteine in ihrer Zusammensetzung erforscht wurden. Auch die von Geochemikern vorgenommene sorgfältige Bestandsaufnahme der Vorräte an chemischen Elementen in der Erdkruste wurde erst durch chemische Analysen möglich.

Dank ihrer Analysenmethoden wurde die Chemie zu einer exakten Wissenschaft. Die chemische Analyse ist einer der ersten Helfer in den verschiedensten Sphären menschlicher Tätigkeit. Zahllose Beispiele könnten das veranschaulichen.

Der Kohlenstoffgehalt des im Hochofen erschmolzenen Eisens bestimmt in bedeutendem Maße die Eigenschaften des Metalls. Liegt der Kohlenstoffgehalt über 1,7 Prozent, haben wir

Roheisen vor uns, bewegt sich der Wert im Bereiche 1,7 bis 0,02 Prozent, erzielen wir Stähle verschiedener Qualität.

Worin besteht der Unterschied zwischen Roheisen und Stahl, zwischen Messing und Bronze? Wieviel Kupfer enthält Kupfervitriol? Wie groß ist der Gehalt an Kalium und Magnesium im Mineral Karnallit? Auf all diese und viele andere Fragen können wir dank der chemischen Analyse eine Antwort geben. Stets aber sind es zwei Hauptfragen, die sie zu beantworten hat: Welche Elemente bilden die Bestandteile der jeweiligen Stoffe? In welchen Mengenverhältnissen kommen sie vor? Die erste Frage beantwortet die qualitative, die zweite die quantitative Analyse.

Wieviel Arten der Analyse es überhaupt gibt, darüber kann nicht einmal der Fachmann im Nu Auskunft geben.

**Damit das Schießpulver zündet** Wer war der Erfinder des Schießpulvers? Es wird berichtet, der Schweizer Mönch Berthold Schwarz habe im 13. Jahrhundert ein Explosivstoffgemisch erzeugt und somit das Pulver erfunden. Aber er hat eigentlich nur die Sprengkraft des Schießpulvers, das längst bekannt war, in Büchsen ausprobiert. Die Wissenschaft hat festgestellt, daß die alten Chinesen das Pulver schon lange vor unserer Zeitrechnung gekannt haben.

Die Herstellung des sogenannten Schwarzpulvers ist nicht schwierig. Man vermischt im durchschnittlichen Mengenverhältnis 75:15:10 Ka-

lialpeter, fein zerkleinerte Holzkohle und Schwefel. Selbstverständlich ist die Qualität der Bestandteile ausschlaggebend für die Güte des Endprodukts.

Doch wie beurteilt man diese Güte?

Ob der Salpeter gut oder schlecht war, haben die Pulvermischer früher nach seinem Geschmack bestimmt.

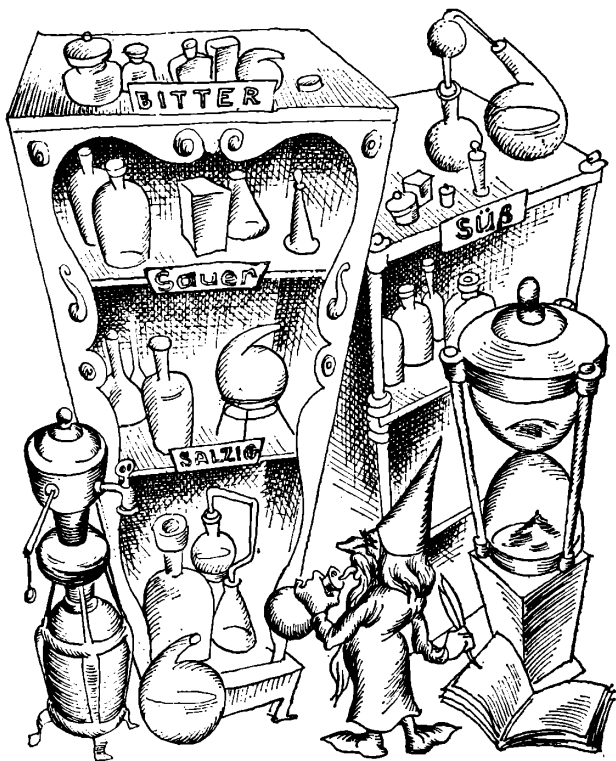
In einem Archiv wurde ein kurioses „Rezept“ für die Geschmacksanalyse des Salpeters aufgestöbert. Darin heißt es: „Ist der Salpeter salzig oder bitter, so ist er nicht gut, beißt er bloß ein ganz klein wenig auf der Zunge und schmeckt er süß, so ist er gut.“

Der Schwefel wurde nach einem noch originelleren Verfahren „begutachtet“.

Ein Stückchen Schwefel, in der Hand zusammengepreßt, wurde an die Ohrmuschel gehalten. Vernahm man ein leichtes Knistern, so war der Schwefel brauchbar; hörte man nichts, wurde er verworfen. Er enthielt dann zuviel Beimischungen.

Weshalb knistert reiner Schwefel? Schwefel ist ein schlechter Wärmeleiter. Hat sich das Klümpchen in der Hand etwas erwärmt, tauchen darin Teilzonen mit unterschiedlicher Temperatur auf. Es entstehen Spannungen, und der brüchige Schwefel bröckelt ab. Dabei ist ein schwaches Knistern zu vernehmen. Unreiner Schwefel ist ein bedeutend besserer Wärmeleiter, daher bedeutend widerstandfähiger. Dieser Tatbestand lieferte sozusagen die „wissenschaftliche“ Grundlage für die chemische Analyse „mittels Gehör“.

Mit einem Wort, die hauptsächlichsten analytischen „Geräte“ der Chemiker von einst waren die Sinnesorgane. Darauf deuten sogar Bezeich-



nungen einiger einfacher und komplizierter Stoffe hin. So hieß das Mineral Beryll seinerzeit Glyzium, weil seine Salze süßlich schmecken. Auch

Glyzerin verdankt seinen Namen der griechischen Bezeichnung für den Begriff „süß“.

**Wie Germanium entdeckt wurde** Anfang März 1886 kam in Petersburg ein Brief an. Der Name des Empfängers lautete Dmitri Iwanowitsch Mendelejew, der des Absenders Clemens Winkler aus Freiberg in Sachsen: Clemens Winkler erlaube sich, dem „genialen Forscher“ den Abdruck einer Mitteilung zukommen zu lassen, aus der hervorgehe, daß der Briefschreiber ein neues Element (es erhielt später den Namen „Germanium“) entdeckt habe. Ursprünglich sei der Entdecker der Ansicht gewesen, das Element entspräche Mendelejews Eka-Antimon und müßte im Periodensystem die bis dahin unbesetzte Stelle zwischen Antimon und Wismut einnehmen. Doch alles weise darauf hin, daß es sich um das Element Eka-Silizium handele, das Mendelejew bereits 1871 vorausgesagt hatte. Winkler schrieb: „Wohl kaum gibt es einen glänzenderen Beweis für die Lehre von der Periodizität der Elemente“.

Hatte nicht der englische Wissenschaftler Henry Cavendish schon hundert Jahre vor der Entdeckung des Germaniums betont, daß „Maß, Zahl und Gewicht“ alles bestimmen? Professor Clemens Winkler hatte ein in Sachsen im Jahre 1885 entdecktes Mineral Argyrodit einer Analyse unterzogen und festgestellt, daß Silber und Schwefel die Hauptbestandteile, Eisenmonoxid, Zinkoxid und Quecksilber — in geringfügigen Mengen — die Beimischungen waren. Die quantitativen Ergebnisse der Analyse hatten jedoch

den Forscher aufmerksam werden lassen. Eine Addition der prozentualen Anteile aller ermittelten Substanzen ergab insgesamt 93 Prozent. Was war mit den übrigen 7 Prozent?

Winkler hatte das Sulfid eines unbekanntes Metalls vor sich. Für eine Analyse der meisten damals bekannten chemischen Elemente waren die bekannten Verfahren gut genug. Es lag also die Annahme nahe, daß die nicht bestimmten Bestandteile mit den bisherigen Analysemethoden nicht erfaßt werden konnten. Winkler äußerte einen kühnen Gedanken. Da sich diese 7 Prozent einer Analyse im üblichen Verfahren entziehen, müsse es sich um ein unbekanntes Element handeln. Diese Annahme erwies sich als richtig. Dank einer unwesentlichen Änderung in der Methode der Analyse gelang es dem Forscher, diese 7 Prozent auszusondern und den Beweis dafür zu erbringen, daß sie tatsächlich jenes damals noch unbekanntes chemische Element waren, das später den Namen Germanium erhielt.

Die Gewichtsanalyse spielte auch bei der Entdeckung von Argon, dieses Repräsentanten der Nullgruppe im Periodensystem, eine wichtige Rolle.

Zu Beginn der neunziger Jahre des vorigen Jahrhunderts unternahm es der englische Physiker John William Rayleigh, die Dichte von Gasen zu prüfen und, davon ausgehend, ihr Atomgewicht zu bestimmen. Alles verlief ohne Schwierigkeiten, solange es der Forscher nicht mit Stickstoff zu tun hatte. Doch ein Liter Stickstoff, den er aus der Luft gewonnen hatte, wog 0,002 g

mehr als die gleiche Menge des aus chemischen Verbindungen abgespaltenen Elements. Ein Liter Stickstoff aus Ammoniumnitrat, Stickoxiden, Harnstoff, Ammoniak oder anderen Verbindungen blieb an Gewicht stets um den genannten Wert hinter dem aus der Luft entnommenen zurück.

Ohne die Ursache dieser merkwürdigen Differenz ergründet zu haben, veröffentlichte Rayleigh in der Londoner Zeitschrift „Nature“ einen ausführlichen Bericht über seine Untersuchungen. Auf den Beitrag reagierte der Londoner Chemiker Professor William Ramsay. Er fand des Rätsels Lösung. Er vermutete, der aus der Luft entnommene Stickstoff war schwerer, weil er ein noch unbekanntes anderes Gas enthielt. Im August 1894 konnten die beiden Forscher die Entdeckung eines neuen chemischen Elements anmelden: Es war das Argon, der eigentliche „Hauptschuldige“ an Rayleighs ursprünglichem Mißerfolg. Der Mengenanteil des Argons im Luftgemisch beträgt ungefähr 1 Prozent.

Auf diese Weise hatte eine gewöhnliche Gewichtsanalyse zur Entdeckung eines neuen Elements geführt.

In jedem chemischen Labor findet die quantitative Analyse Beachtung. Das einfachste Wägen ermöglicht letztlich die Bestimmung des Mengenverhältnisses der Bestandteile in komplizierten Verbindungen und Mineralen. Es versteht sich von selbst, daß dieser quantitativen Bestimmung sehr arbeitsintensive chemische Vorgänge zur Abspaltung der verschiedenen Elemente vorausgehen.

**Licht und Farbe** Raketen zischen, Böllerschüsse krachen — der Himmel schillert in buntem Lichterglanz. Feste mit Salutschüssen, Knallkörpern und sprühenden Feuerwerksgarben zu begehen, ist eine alte Tradition. Die Kunst der Feuerwerkerei war im alten China schon zweitausend Jahre vor unserer Zeitrechnung bekannt. Doch die Farbe des Feuers für chemische Analysen zu nutzen — auf diesen Gedanken sind die Wissenschaftler erst vor noch nicht allzulanger Zeit gekommen.

Ungefähr vor hundert Jahren beobachtete der deutsche Physiker Robert Kirchhoff, daß die Salze verschiedener Metalle das farblose Licht der Gasflamme verschieden färben. Natriumsalze verleihen dem Licht eine gelbe Färbung, Kalziumsalze eine karminrote, Bariumsalze einen Stich ins Grün usw.

Kirchhoff zog daraus den Schluß, man könnte auf Grund der Färbung der Flamme dieses oder jenes chemische Element in der beobachteten Substanz rasch und einwandfrei nachweisen. Doch der Forscher hatte sich zu früh gefreut. Hatte Kirchhoff es mit reinen Salzen zu tun, verlief alles glatt. Doch eine Mischung beispielsweise von Natrium- und Kaliumsalzen ergab im Gasflammenlicht eine auf hellgelbem Untergrund (durch das Natrium) nur schwach schimmernde violette Färbung, die durch das Kalium hervorgerufen wurde.

Schließlich schlug der Chemiker Robert Bunsen vor, das Gasflammenlicht mit Hilfe eines Spezialgeräts, des Spektroskops, zu untersuchen. Im Prisma, dem Hauptbestandteil des Spektro-

skops, wird weißes Licht in seine Spektralfarben, d.h. in seine Farbkomponenten zerlegt. (Die Bezeichnung „Spektroskop“ bedeutet ja „Beobachtung des Spektrums“).

Ein Erfolg stellte sich bald ein. Es erwies sich, daß zum Unterschied von anderen Lichtquellen die Gasflamme, in die das zu untersuchende Salz eingebracht worden war, kein kontinuierliches Spektrum, sondern ein Lichtspektrum mit bestimmter Anordnung der Linien ergibt. So konnte man bei spektroskopischer Untersuchung einer mit Natriumsalzen gespeisten Flamme zwei grelle, naheliegende gelbe Linien entdecken. Führt man in die Flamme Kaliumsalz ein, tauchten im Spektrum eine rote und zwei violette Linien auf.

Kirchhoff und Bunsen stellten fest, daß die Linien bestimmter chemischer Elemente, die in Form von Salzen in die Flamme gebracht wurden, stets an der gleichen Stelle auftauchten. Man kann der Flamme Natriumchlorid, schwefelsaures, kohlen-saures oder auch salpetersaures Natrium begeben, die Natriumlinien werden stets an ein und derselben Stelle wahrzunehmen sein. Es ändert sich auch nichts daran, wenn Natriumsalze mit anderen Salzen vermischt sind, beispielsweise mit Salzen von Kalium, Kupfer, Eisen, Strontium oder Barium — die Natriumlinien werden von der ihnen zugeordneten Stelle nicht abrücken.

Die Entdeckung war ein Ansporn. Kirchhoff und Bunsen entfalteten eine rastlose Tätigkeit. Sie unterzogen eine ganze Reihe von Elementen und Verbindungen der Flammenanalyse. Nach eini-

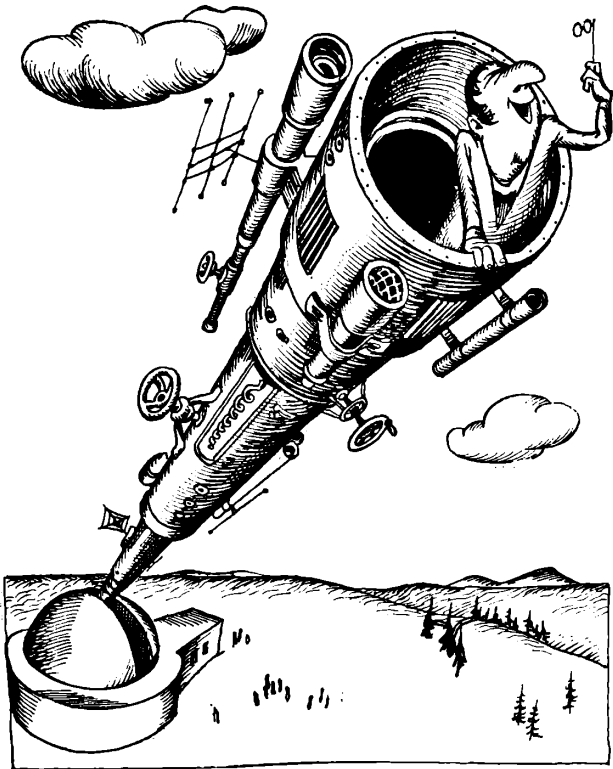
ger Zeit stellten sie eine Liste der chemischen Elemente mit einer genauen Charakteristik ihrer Spektrallinien auf. Nun waren sie imstande, viele komplizierte Substanzen zu analysieren, ohne das Opfer einer Täuschung zu werden.

Die Geburt der Spektralanalyse war damit vollzogen. Sie stellte nicht nur eine vorzügliche Methode für die qualitative Bestimmung dieser oder jener chemischen Elemente in Verbindungen dar. Mit ihrer Hilfe wurden auch neue Elemente entdeckt: Rubidium, Zäsium, Indium und Gallium. Nachdem es erwiesen war, daß die Intensität (Helligkeit) der Linien von der Menge der jeweiligen Bestandteile der untersuchten Substanz abhing, räumte man der Spektralanalyse auch unter den Verfahren der quantitativen Analyse einen Ehrenplatz ein.

**Chemische Analyse... der Sonne** Auf die 1868 zu erwartende Sonnenfinsternis bereiteten sich die Astronomen gründlich vor. Sie vergaßen dabei auch nicht das Spektroskop, mit dessen Hilfe erst vor kurzem mehrere neue Elemente entdeckt worden waren.

Am 25. Oktober 1868 erhielt die Akademie der Wissenschaften zu Paris zwei Briefe, die unabhängig voneinander einen gleichen Inhalt hatten: Der eine kam von der Küste des fernen Indiens von dem Franzosen Jules Janssen, der andere Briefschreiber war der Engländer Norman Lockyer. Beide Forscher hatten dank der Spektralanalyse der Sonnenprotuberanzen ein auf der Erde unbekanntes Element entdeckt, einen „Sonnenstoff“. Im Spektrum ergebe er

eine gelbe Linie, die der Färbung nach der Natriumlinie gleiche. Dennoch sei sie keinesfalls dem Natrium zuzuordnen.



Nicht genug damit, daß es den beiden gelungen war, die Sonne selbst „einer Analyse zu unterziehen“, sie behaupteten sogar, ein neues Ele-

ment entdeckt zu haben. Lockyer schlug vor, diesen Stoff nach dem griechischen Wort für die Sonne Helium zu nennen.

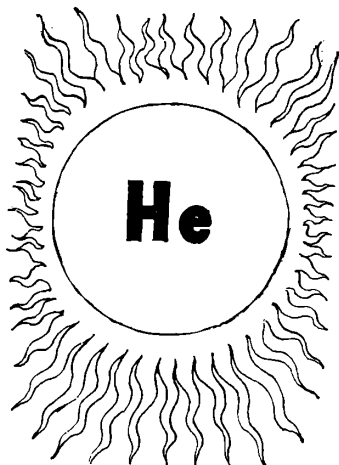
Auf der Erde wurde Helium, das „Sonnenelement“, erst 1895, also 27 Jahre später, von William Ramsay und William Crookes, vorgefunden. Aus Anlaß des bedeutenden Ereignisses, der Entdeckung einer Methode, mit deren Hilfe man nun die Erforschung der Geheimnisse himmlischer Lichtquellen unternehmen konnte, faßte die Pariser Akademie der Wissenschaften den Beschluß, eine Sondermedaille zu prägen. Diese Methode verdiente die Medaille. Denn will man eine beliebige Materie in einem anderen Verfahren der chemischen Analyse unterziehen, muß man zumindest über das geringfügigste Stückchen dieser Materie verfügen. Für die Spektralanalyse stellten Entfernungen kein Hindernis dar.

Nach der Entdeckung des „Sonnenelements“ wurden die Forscher nicht müde, ihre Spektrographen (registrierende Spektroskope) auf das Objekt Sonne zu richten. Und die Sonne gab manches Geheimnis preis und erzählte aus ihrem Leben...

Nach der Sonne kam die Reihe an andere Gestirne, an ferne und nahe Sterne. Die Spektroskope fingen den Glanz der Sternatenmosphären ein. Und in der Stille ihrer Laboratorien versenkten sich die Forscher ins Studium des verworrenen Spektrallinienbildes. Man entdeckte auf den Himmelskörpern chemische Elemente, die auf der Erde bereits bekannt waren.

Nach der Entdeckung des auf der Erde damals noch unbekanntes Heliums gelang es, im

Spektrum einiger Sterne ein Element nachzuweisen, das auf der Erde in der Natur nicht vorhanden ist: das Technetium. Wir wissen, daß dieses Element-Phantom auf der Erde zunächst in Spuren bei der künstlichen Kernumwandlung nachgewiesen werden konnte. Auf den Sternen



ist Technetium kein seltenes Element, denn es wird im Ergebnis der sich unaufhörlich vollziehenden Kernreaktion stets von neuem geboren.

Weitere neue Elemente wurden weder auf der Sonne noch auf den Sternen entdeckt. Sollte dies auch in Zukunft nicht gelingen? Es ist ja nicht ausgeschlossen, daß in den Sternen Kerne schwerer Elemente zustandekommen und existieren,

deren Gewinnung unter irdischen Verhältnissen heute nur ein Wunschtraum der Forscher ist. Eine interessante Tatsache trat in den letzten Jahren zutage: Die Bestandsaufnahme der Elemente im Weltall ergibt eine andere Bilanz als auf der Erde. Nicht Sauerstoff und Silizium sind im Weltraum die Hauptelemente, sondern Wasserstoff und Helium. Die im Weltraum vorhandenen Mengen dieser ersten Vertreter des Periodensystems übersteigen den Gesamtvorrat an allen übrigen Elementen. Die kosmische Chemie kann also feststellen: Die Galaxis ist in erster Linie das Reich des Wasserstoffs.

**Wellen und Materie** Die Natur kennt zahllose Farbtöne. Und manchmal bringt das bunte Farbenspiel selbst die Farbchemiker in Verlegenheit.

„Von welcher Farbe ist die Neodymnitratlösung?“

„Sie ist rosafarben.“

„Und wie ist die Farbe der Lösung von dreiwertigem Eisen zu bezeichnen, wenn man ihr Kaliumrhodanid (Kaliumthiozyanat) zusetzt?“

„Rot.“

„Welche Farbe kommt zustande, wenn man Phenolphthalein einer Alkalilösung beimengt?“

„Das Karminrot.“

Dieses Gespräch könnte noch lange fortgeführt werden. Eine große Anzahl chemischer Reaktionen vollzieht sich sozusagen in farbiger Ausstattung, in unserem Beispiel innerhalb des „Farbbereiches“ Rot, wobei die verschiedensten Farbtöne

nungen vorkommen. Nannten wir noch ein Dutzend weitere Verbindungen, deren Lösungen eine dem Rot zugeordnete Farbtönung aufweisen, würde die Angelegenheit noch komplizierter werden. Maler und Textilfachleute vermögen — so heißt es — an die zwei Dutzend roter Farbtöne voneinander zu unterscheiden. Hier macht Übung den Meister.

Woher sollen wir die Worte nehmen, um die oft nur schwer unterscheidbaren Farbtönungen in der Chemie zu beschreiben. Das auf Erfahrungen und individueller Veranlagung beruhende Vermögen, Farben und Farbtönungen voneinander zu unterscheiden, eignet sich wenig für den Chemiker. Denn selbst die Lösung ein und desselben Stoffes kann bei unterschiedlicher Konzentration ein reiches Spiel an Farbtönen ergeben. Es ist nicht einfach, sie alle im Kopf zu behalten.

Es gibt Menschen, die Farben selbst bei verbundenen Augen zu unterscheiden vermögen, und zwar mit den Fingerspitzen. Der berühmte englische Schriftsteller Jonathan Swift, der „Gullivers Reisen“ schrieb, machte sich über die „wissenschaftliche“ Arbeit der Akademie der Wissenschaften zu Laputa lustig, die Blinde Farbmischungen herstellen ließ.

Der Sarkasmus des englischen Satirikers wäre heutzutage unbegründet, denn die Chemiker können die Farbe einer Lösung bestimmen, ohne sie gesehen zu haben. Dazu verhilft ihnen die sogenannte Spektralphotometrie. Diese recht eigenartige Methode der Analyse verdankt ihren Namen einem Gerät, das Spektrometer heißt. Mit

seiner Hilfe kann man eine chemische Verbindung bzw. ihre Lösung einer Farbanalyse unterziehen.

Als Sir Isaac Newton einen feinen Sonnenstrahl durch ein Glasprisma hindurchließ, nahm er wahr, daß das weiße Licht kein einheitliches, sondern ein zusammengesetztes ist. Auch die Farben eines Regenbogens sind Komponenten des weißen Lichts. Eine Art Regenbogen sah Newton vor sich, als er das Spektrum eines Sonnenstrahls betrachtete.

Doch was ist Licht? Es sind elektromagnetische Schwingungen, Wellen. Eine jede Welle hat ihre Länge, die üblicherweise mit dem griechischen Buchstaben  $\lambda$  (Lambda) bezeichnet wird. Mit Hilfe der Wellenlänge kann jede Farbe oder jeder Farbton aufs genaueste charakterisiert werden. So sagen z. B. die Chemiker: „Rot mit einer Wellenlänge von 650 Nanometern“, oder: „Rot mit einer Wellenlänge von 760 Nanometern.“ (Ein Nanometer ist der milliardste Teil eines Meters oder der millionste Teil eines Millimeters.) Nun erübrigt sich, die verschiedenen Schattierungen durch schmückende Beiworte wie „himbeerfarben“, „grellrot“ oder „weinrot“ zu kennzeichnen. Es genügt, die Wellenlänge anzugeben, und in der ganzen Welt wird jeder Wissenschaftler genau wissen, von welcher Farbe, von welcher Farbtonung die Rede ist. Nun hat eine jede Verbindung einen „Personalausweis“ mit dem Vermerk: Wellenlänge soundsoviel Nanometer.

Doch damit ist die Sache noch nicht erledigt. Die Farbe einer Verbindung hängt ja auch davon ab, welche Strahlen von welcher Wellenlänge

sie absorbiert und welche nicht. Körperfarben werden dadurch hervorgerufen, daß die Gegenstände bestimmte Anteile des auf sie auftreffenden Lichtes absorbieren, während sie die übrigen Anteile reflektieren. Die betreffenden Körper haben die Farbe des zurückgeworfenen Restes. Die Farbe ergibt sich also aus der additiven Mischung der Spektralfarben, die ein Körper reflektiert oder hindurchläßt. Eine grüne Nickelsalzlösung zum Beispiel „verschluckt“ alle Lichtwellen außer jenen, die der grünen Farbe zugeordnet sind. Die gelbe Lösung des chromsauren Kaliums wird Strahlen, die dem gelben Teil des Spektrums entsprechen, nicht absorbieren.

Mit dem Spektrometer kann man einen Strom von Lichtstrahlen ganz bestimmter Wellenlängen gewinnen, verfolgen, wie die Strahlen von dieser oder jener Substanz absorbiert werden, und die Wellenlängen messen. Auf solche Art gelang es bereits, eine unermeßliche Anzahl organischer und anorganischer Verbindungen zu erforschen.

Die Untersuchung mittels Spektrographen wird heute in vielen Fällen mit der sogenannten Interferenztechnik gekoppelt. Eine Interferenz entsteht als Überlagerung mehrerer Wellenzüge, die von zwei Erregungszentren ausgehen. Das Licht wird „gebeugt“, und zwar entsprechend seiner Wellenlänge. Aus der Lage der hellen und dunklen Beugungsstreifen auf einem Schirmbild kann die Lichtwellenlänge ermittelt werden. Dazu dient das Interferometer.

Außer dem sichtbaren gibt es noch das unsichtbare Licht, jenes, daß das Sehorgan des Men-

schen nicht wahrzunehmen vermag. Die jenseits des sichtbaren Spektrums liegenden Wellenlängen nennt man ultraviolette bzw. infrarote Strahlung. Die Chemiker sind auch in dieses Gebiet vorgestoßen. Sie untersuchten die Spektren verschiedener chemischer Verbindungen im ultravioletten und infraroten Spektralbereich. Dabei nahmen sie eine äußerst interessante Erscheinung wahr. Es stellte sich heraus, daß einer jeden chemischen Verbindung (oder einem Ion) ein ganz bestimmtes Absorptionsspektrum eigen ist. Auch in dieser Hinsicht gibt es also eine gesetzmäßige Erscheinung, die besagt, daß ein gasförmiges Element diejenigen Spektrallinien absorbiert, die in seinem Emissionsspektrum enthalten sind.

Mit Hilfe der Absorptionsspektren kann man nicht nur qualitative, sondern auch quantitative Analysen durchführen, und zwar aus folgendem Grunde: In vielen Fällen ist die Intensität der Linien um so stärker, je größer die Konzentration der chemischen Verbindung bzw. der Elemente in der betreffenden Lösung ist. Demzufolge wird das Licht einer bestimmten Wellenlänge auch „gieriger“ verschluckt. Hat man also die Lichtabsorption einer Lösung ermittelt (in der Sprache der Wissenschaft heißt das „die optische Dichte der Lösung“), so kann man leicht auf die Menge des jeweiligen Elementes schließen.

**Alles in Allem — ein kleiner Quecksilbertropfen**  
Aus uralten Zeiten stammt der Aphorismus:  
„Alles Geniale ist einfach.“

Im Jahre 1959 wurde der Nobelpreis für Chemie einer Entdeckung auf dem Gebiet der chemischen Analyse zuerkannt. Sie stammt von dem hervorragenden tschechischen Physikochemiker Jaroslav Heyrovský. Seit 1922, dem Geburtsjahr der Entdeckung, kamen immer mehr Wissenschaftler zu Heyrovský, um in der Handhabung des neuen Verfahrens unterwiesen zu werden. Gegenwärtig zählt man bereits über tausend Veröffentlichungen, die jährlich zum Thema „Polarographische Analyse“ erscheinen.

Worin besteht diese Methode? Da sie sehr schwierig ist, versuchen wir es sie in groben Umrissen zu beschreiben.

In einem Becher aus Glas befindet sich eine Lösung, in der die Konzentration einer Substanz zu bestimmen ist. Der Boden des Gefäßes ist von einer Quecksilberschicht bedeckt, die als Anode dient. In regelmäßigen Abständen fallen in den Becher aus einem Kapillarrohr Quecksilbertröpfchen. Diese Tropfelektrode dient als Katode.

Den Elektroden wird über einen Spannungsteiler elektrischer Strom zugeführt, dessen Spannung ständig erhöht wird. In der Lösung muß nun der Vorgang der Elektrolyse einsetzen. Doch dazu kommt es nur bei einem bestimmten Potentialwert des Quecksilbertropfens. Ist dieser Wert gering, bleibt der Kreis stromlos. Steigt der Wert an, setzt eine Entladung der in der Lösung enthaltenen Ionen ein. Der Kreis wird vom Strom durchflossen.

Enthält die Lösung Ionen verschiedener Elemente, vollzieht sich die Entladung nicht gleich-

zeitig, sondern allmählich, und nur in einer bestimmten Folge, da die Zersetzungsspannungen der Ionen nacheinander erreicht werden. Einer jeden Ionenart ist ein bestimmter Spannungswert zugeordnet.

Die Chemiker stellen nun ein Koordinatensystem auf. Auf den Abszissen wird der Potentialwert (Spannung) vermerkt, auf der Ordinate die Stromstärke. Die erzielte Kurve hat Stufenform. Jede Stufe entspricht der Entladung von bestimmten Ionen.

Das gewonnene Bild wird mit einem Schema verglichen, das für eine Lösung gilt, die bekannte Stoffe in bekannter Konzentration enthält.

Auf diese Weise können die Lösungen sowohl einer quantitativen als auch einer qualitativen Analyse unterworfen werden. Dank zusätzlicher Einrichtungen vollzieht sich der Ablauf der Analyse automatisch.

Das polarographische Verfahren stellt eine außerordentlich wirksame Methode dar. Dazu kommt, daß sie ein einfaches, rasches und sehr genaues Verfahren ist. Mit diesen Eigenschaften schlägt sie die meisten übrigen analytischen Methoden aus dem Feld. Die Polarographie ermöglicht es z. B., in einem Kubikzentimeter einer Lösung den millionsten Teil eines Gramms Zinkchlorid nachzuweisen. Und die ganze Untersuchung dauert nicht einmal zehn Minuten.

Die Erfindung Heyrovskýs ist inzwischen vervollkommenet worden. Heute gibt es bereits mehrere Varianten des polarographischen Verfahrens. Interessant ist z. B. die polarographi-

sche Absorptionsanalyse, der eine ungewöhnlich hohe Empfindlichkeit eigen ist. Sogar Milliardstel eines Gramms organischen Stoffes sind in einem Kubikzentimeter Lösung leicht nachzuweisen.

Auf welchem Gebiet kann die Polarographie gute Dienste leisten? Sie hat in der Praxis eine große Bedeutung erlangt. Sowohl bei der automatischen Steuerung des Produktionsablaufes als auch bei der Analyse von mineralischen Rohstoffen, von Spurenelementen, von Chemieerzeugnissen und Legierungen, von Schlacken, keramischen Stoffen, Elektrolytbädern und Flotationsrückständen wird sie angewendet. Mit ihrer Hilfe können im Organismus Vitamine, Hormone und auch Gifte nachgewiesen werden. Ärzte denken daran, die Polarographie zur Frühdiagnostik der Krebserkrankungen einzusetzen.

**Chemisches Prisma** Der Autor der Entdeckung, von der die Rede sein soll, war Botaniker. Er hieß Michail Semjonowitsch Zwet.

Das bevorzugte Objekt seiner Forschungen war das Chlorophyll, das uns bereits bekannte Blattgrün.

Chemische Verfahren waren dem russischen Botaniker M. S. Zwet vertraut. Unter anderem wußte er von der Existenz von Stoffen, die an der Oberfläche verschiedene Gase und Flüssigkeiten aufnehmen (adsorbieren) können.

Professor Zwet führte folgendes Experiment durch: Aus Pflanzenblättern stellte er eine breiige Masse her, die von grüner Farbe war. Aus dieser Masse gewann er einen alkoholhaltigen Auszug.

Die übriggebliebene Masse wurde farblos, denn alle Farbstoffe gingen in die Alkohollösung über.

Nun goß er die chlorophyllhaltige Lösung in ein Glasrohr, das mit leicht benzolgetränkter Kreide gefüllt war.

Die obere Schicht des Kreidepulvers färbte sich grün.

Der Forscher wusch dann das Glasrohr mit tropfenweise zugesetztem Benzol aus. Der grüne Ring verschob sich, rückte nach unten, um schließlich in mehrere verschiedenfarbige Streifen zu zerfallen. Es gab gelbe, grüne, grünblaue und schließlich drei gelbe Streifen. Was sich damals vor den Augen des Botanikers abspielte, erlangte in der Arbeit der Chemiker eine überragende Bedeutung.

Es stellte sich heraus, daß das Chlorophyll eine komplexe Mischung von mehreren Verbindungen ist, die der Molekülstruktur und den Eigenschaften nach einander nahestehen. Was man heutzutage als Chlorophyll bezeichnet, ist lediglich eine dieser Verbindungen — allerdings die hauptsächlichste. Alle im natürlichen Chlorophyll enthaltenen Substanzen konnten voneinander mit Hilfe sehr einfacher Verfahren getrennt werden.

Die Kreide adsorbiert alle, doch jede auf eigene Art. Verschieden stark war ihre Bindung an der Oberfläche des Pulvers. Beim Durchgang durch das Rohr schwemmte das Benzol die Stoffe in bestimmter Reihenfolge weg: jene, die in schwächerem Maße anhafteten, vor solchen, deren Bindungen an die Oberfläche stärker wa-

ren. Auf diese Weise kam es zu ihrer Trennung.

Einem Prisma gleich, das das Sonnenlicht in die Spektralfarben aufteilt, zerlegte die kleine Säule als „chemisches Prisma“ die komplexe Mischung in ihre Bestandteile.

Den Namen für diese 1903 entdeckte analytische Methode fand der Autor selber: „Chromatographie“. Das heißt soviel wie Farbenschrift. Sie wird auch chromatographische Adsorptionsanalyse genannt.

Heute gehört die „Farbenschrift“ zum allernotwendigsten Rüstzeug jedes analytischen Labors.

Dornenreich gestaltet sich bisweilen der Weg wissenschaftlicher Entdeckungen. So manche gerät auf lange Jahre hinaus in Vergessenheit, um plötzlich am Himmel der Wissenschaft aufzuleuchten in hellem Glanz, gleich einem Stern erster Größe. Ein solches Schicksal war auch der Chromatographie beschieden. Sie fiel der Vergessenheit anheim, und man erinnerte sich ihrer erst in den vierziger Jahren wieder. Sie spielt heute in der Praxis der Laboratorien und der Industriebetriebe eine beachtliche Rolle.

**Wie Promethium entdeckt wurde**      Eigentlich wurde das Element mit der Ordnungszahl 61 mehrere Male „entdeckt“. Und jedesmal erhielt es einen anderen Namen, weil jedesmal die Forscher meinten, sie hätten endlich das richtige Element 61 gefunden. Es hieß Illinium, Florentium und Zyklonium. Doch stets erwies sich die „Entdeckung“ als eine Täuschung.

Schließlich konnte der Beweis erbracht werden, daß es auf der Erde überhaupt kein 61. Element gibt. Nicht daß die Natur ihre Launen gehabt und aus purem Übermut dem Periodensystem der Elemente einen Bewohner vorenthalten hätte!

Alle Isotope des Elements 61 sind radioaktiv, also äußerst instabil. Seit langem sind sie auf der Erde zerfallen. Sie haben sich in Isotope der Nachbarelemente umgewandelt.

Schließlich fand man im Jahre 1945, sozusagen „en passant“ — nämlich bei der Tätigkeit am Kernreaktor — unter den Spaltprodukten des Urans-235 viele Isotope der Lanthaniden. Darunter waren auch Promethiumkerne.

Die Theoretiker der Physik unterschrieben nach reiflicher Überlegung die Mitteilung über die Kernreaktionen, bei denen sich Promethium gebildet hatte. Doch die Chemiker gaben sich damit nicht zufrieden: Sie wollten unbedingt das neue Element mit den Händen „abgetastet“, zumindest ein winziges Körnchen mit eigenen Augen gesehen haben.

Übrigens wäre es auch kaum möglich gewesen, bei der Urankernspaltung aus dem Trümmeregemisch mehr als einige Zehntel, vielleicht auch nur Hundertstel eines Gramms des 61. Elements auszusondern.

Doch sollte das ein unüberwindbares Hindernis sein? Zu jener Zeit hatten es die Chemiker bereits mit noch geringeren Substanzen zu tun gehabt. Sie hatten sie geschickt zu analysieren und zu nutzen verstanden.

Die eigentliche Schwierigkeit bestand in etwas

anderem. Promethium gehört zu den Seltenerdmetallen. Von der zu beobachtenden Ähnlichkeit unter den Mitgliedern dieser „Familie“ war bereits die Rede. Der Urankerntrümmerhaufen enthält auch zahlreiche Bruchstücke der Nachbarn des Promethiums, des Neodyms und Samariums.

Es ist also eine selektive Trennung erforderlich. Das war aber damals eine in höchstem Maße schwierige Aufgabe. Chemiker, die sich fürs ganze Leben die Seltenerdmetalle zum Forschungsobjekt erwählt haben, vollbringen wahrlich eine wissenschaftliche Heldentat. Vierzehninge voneinander zu unterscheiden, jeden von ihnen gesondert zu gewinnen, ist eine einzige Quälerei.

Der Franzose G. Urbai stellte sich vor fast fünf Jahrzehnten die Aufgabe, reines Thulium zu gewinnen. Er glaubte, bei seinen Arbeiten mit Seltenerden ein neues Element gefunden zu haben, das er Celtium nannte. Es erwies sich als ein Irrtum. Schließlich vermochte er, Thulium rein darzustellen, doch nur um den Preis von fünf Jahren intensiver Arbeit, bei der er über fünfzehntausend einförmige, höchst ermüdende chemische Operationen durchführen mußte.

Reines Promethium auszusondern ist ein wenig leichter. Man muß bedenken, daß Promethium radioaktiv, also dem Zerfall unterworfen ist. Die meisten Promethiumisotope sind sehr kurzlebig. Vielleicht ist am Ende der zahllosen Trennungsvorgänge von ihm nichts übriggeblieben. Deshalb tun schnellere Verfahren not, damit die Trennung der Lanthaniden nicht Jahre, nicht

Monate, auch nicht Wochen in Anspruch nimmt, sondern sich innerhalb von mehreren Stunden vollzieht. Über eine solche Methode verfügten die Chemiker damals noch nicht.

Da erinnerten sie sich der Chromatographie. Sie stellt ein physikalisch-chemisches Trennverfahren dar, bei der die zu trennenden Substanzen mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten befördert werden, so daß durch eine unterschiedliche Verteilung und Anlagerung an einem Trägermaterial eine außerordentlich gute Trennung erfolgt. In unserem Falle vollzog sich diese Isolierung der einzelnen Bestandteile etwa folgendermaßen:

Das Zwetsche Teilungsrohr (heute trägt es den eindrucksvolleren Namen „chromatographische Säule“) wird mit einem Adsorbenten gefüllt. Das ist jedoch nicht mehr Kreide wie einst. Es werden besondere Harze verwendet, die gute Ionenaustauscher sind. Diese Kunstharze, komplizierte polymere Stoffe, haben den Charakter von Elektrolyten, sie bestehen aus Kationen und Anionen. Schickt man eine Salzlösung der Seltenerdmetalle durch eine chromatographische Säule, ein Rohr, das mit pulverisiertem Harz ausgekleidet ist, so werden im oberen Teil der Säule die Kationen des Harzes gegen die der Seltenerdmetalle ausgetauscht, wobei die Seltenerdmetalle vom Harz festgehalten werden. Die Lanthaniden ähneln zwar einander sehr, doch sind sie nicht völlig gleich. Deshalb wird jedes einzelne Element in einer bestimmten Beladungszone festgehalten.

Die Bindung an das pulverisierte Harz ist von

unterschiedlicher Festigkeit, und in dieser Verschiedenheit ist auch eine bestimmte Ordnung wahrzunehmen.

Lanthan, der Familienerste, bringt mit dem Harz die festeste Verbindung zustande, Lutetium, das letzte Element der Gruppe, die schwächste.

Nun wird das Harz einer Wäsche unterzogen, wozu eine spezielle Lösung, Milch- oder Zitronensäure, verwendet wird. Die Tropfen dieser Lösung umspülen die Harzkörner. Sie bilden mit den Ionen der Seltenerden Komplexverbindungen. Dabei gehen zuerst die schweren Seltenerden, die weniger fest am Austausch haften, in die Lösungsphase über. Und wieder geschieht dies in strenger Folge. Der Säule entweichen nacheinander die Salzlösungen der getrennten Seltenerden: an erster Stelle die Lutetium-, an letzter die Lanthansalze. Auf diese Weise erfolgt also die Trennung der einzelnen Lanthaniden.

Auf einem solchen Wege trennten die amerikanischen Forscher D. Marinsky, L. Glendenin und Ch. Choryell das Element Promethium von seinen Nachbarn Neodym und Samarium. Ja, es gelang ihnen das Element 61 mit den Massenzahlen 147 und 149 aus 50 Lanthanidenisotopen zu isolieren. Der ganze Vorgang beanspruchte nur wenige Stunden.

**Der Duff von Walderdbeeren** ...Wir betreten eine sonnige Lichtung inmitten eines Tannenwäldchens. Es ist ein heißer Julitag. Walderdbeeren leuchten uns entgegen, reife, grellrote

Beeren, die köstlich schmecken. Wie duftet die Walderdbeere? Worauf beruht diese eigenartige Erscheinung, die wir Duft nennen?

Unsere Frage ist durchaus berechtigt, denn es gibt bereits eine selbständige Lehre, die sich mit Riechstoffen beschäftigt. Allerdings haben sich die Wissenschaftler bis auf den heutigen Tag noch nicht darüber geeinigt, weshalb einige Stoffe einen starken Duft verbreiten, andere dagegen überhaupt keinen, weshalb die einen herrlich, die anderen dagegen schlecht riechen.

Zweifellos besteht eine Beziehung zwischen dem Geruch eines Stoffes und dem Aufbau seiner Moleküle. Doch welcher Art sie ist, konnte bisher nicht endgültig geklärt werden. Es gibt also noch keine exakte physikalische Theorie der Gerüche.

Die Chemiker haben es in dieser Hinsicht etwas leichter. Sie sind imstande, verschiedene Moleküle zu nennen, die für diesen oder jenen Geruch „verantwortlich“ sind. Ein Chemiker kann uns auch erklären, wie die Walderdbeere duftet. Ihr Aroma ist eine komplizierte Mischung von 96 verschiedenen Gerüchen. Ein Parfümfabrikant, selbst der phantasiebegabteste, kann sich nur neiderfüllt an diesem von der Natur erzeugten Walderdbeerenparfüm ergötzen!

Auf welche Weise gelang es, diese komplizierte Parfümmischung zu erkennen?

Auch in diesem Falle wurde der Stoff durch eine Trennsäule geschickt. Man nennt die hier angewendete Methode Gaschromatographie.

Das Adsorbent ist bei diesem Verfahren ein speziell hergestelltes Siliziumdioxid, das mit

einer nicht flüchtigen Flüssigkeit getränkt ist. Das bewegliche Medium ist hier ein Edelgas (z. B. Argon).

Übrigens kann man es noch einfacher haben: Das Glasrohr wird mit einer nichtflüchtigen Flüssigkeit nur angefeuchtet. In diesem Falle muß das Rohr sehr lang sein. Um das Aroma der frischen Walderdbeere zu isolieren, verwendeten die Forscher deshalb ein 120 m langes Rohr, das zu einer Spirale gebogen worden war.



Es wurde von einem Thermostaten umgeben, der für einen allmählichen Temperaturanstieg zu sorgen hatte.

Die verschiedenen Bestandteile des Beerenduftes verließen das bewegliche Medium nicht auf die gleiche Weise, sondern die einen leichter, die anderen schwerer. Auch im Rohr „siedelten“ sie sich in einer ganz bestimmten Reihenfolge „an“. Sobald man nun durch das Rohr Argon

hindurch fließen ließ, wurden die Riechstoffe daraus vertrieben. Der Austritt der verschiedenen Stoffe aus der komplizierten Anlage wurde registriert. Es stellte sich nun heraus, daß sich der Walderdbeerenduft aus 96 Bestandteilen zusammensetzt.

Die Möglichkeiten der Gaschromatographie sind fast unbegrenzt. Das Verfahren gestattet, die Anwesenheit von Substanzen in einer Konzentration von  $10^{-12}$  g nachzuweisen!

Mit seiner Hilfe wurden von den Chemikern bereits komplizierteste Naturstoffe erforscht. Wieviel Bestandteile sind wohl im Erdöl enthalten? Die Gaschromatographie bewies, daß es nicht weniger als 230 sind! Sie konnten nicht nur gezählt werden, sondern es gelang auch, über jeden Bestandteil genaue Auskunft zu erhalten.

**Napoleons Tod — Legende und Wirklichkeit** Die offizielle Version lautet: Napoleon Bonaparte I. verschied auf der Insel St. Helena am 5. Mai 1821. Angebliche Todesursache: Magenkrebs. In weniger als sechs Monaten soll die heimtückische Krankheit den 1815 entmachteten Kaiser hinweggerafft haben.

Die Version wurde zwar allgemein anerkannt, doch nicht alle glaubten daran. Sie schienen dazu ihre Gründe zu haben.

Einstige Vertraute des Imperators wurden nicht müde, bis an ihr Lebensende zu beteuern, Napoleon sei nicht eines natürlichen Todes gestorben, sondern vergiftet worden.

Bonaparte selber ließ einen Monat vor seinem

Tode die Bemerkung fallen: „Ich sterbe keines natürlichen Todes. Mich ermordet die englische Oligarchie und ihre gedungenen Mörder.“ Vergleicht man die Beschreibungen, die über Napoleons Krankheit vorlegen, mit dem Bild, das für Magenkrebs charakteristisch ist, so ergeben sich zahlreiche Widersprüche. Sie deuten auf eine andere Todesursache hin.

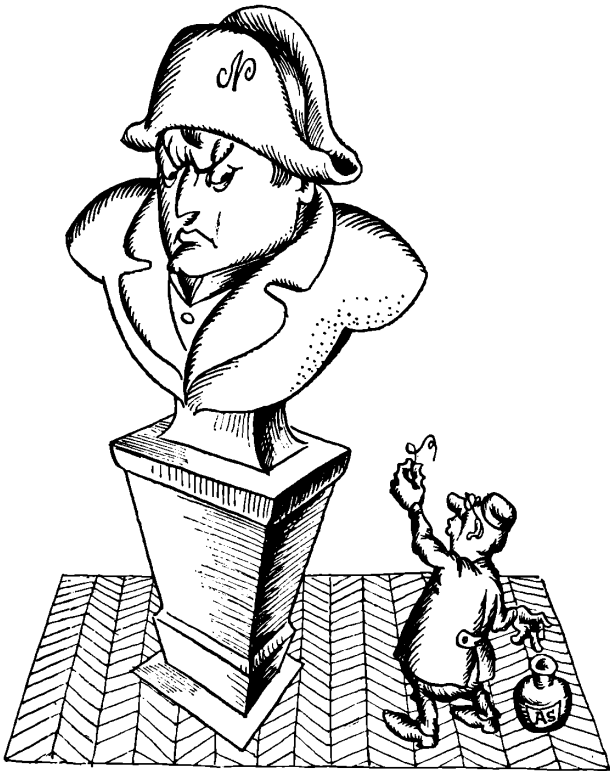
Womit konnte Napoleon vergiftet worden sein? Man kannte im vorigen Jahrhundert eine Unmenge von Giften. Doch wohl kaum hätte es der unbekannt Missetäter gewagt, sich eines beliebigen zu bedienen.

Er brauchte ein geschmack- und geruchloses Gift, damit das Opfer nichts gewahr wurde. Außerdem sollte es kein starkwirkendes sein, sondern durch allmähliche Ansammlung im Organismus den Tod herbeiführen. Dafür kam damals nur Arsen in Frage. Doch konnte man beweisen, daß Napoleon mit Arsen vergiftet worden war? Vermutungen bleiben Vermutungen.

Was nottat, waren Bestätigungen, unwiderlegbare, die keinerlei Zweifel aufkommen ließen. Zeugen gab es nicht mehr.

140 Jahre nach dem traurigen Ereignis wurde in der schottischen Universitätsstadt Glasgow eine ungewöhnliche Untersuchung eingeleitet: „In Sachen des widernatürlichen Todes von Napoleon Bonaparte“. Zwei Ärzte führten die Untersuchung. Ein Haarbüschel vom Haupte des großen Franzosen, das bisher in einem Museum aufbewahrt worden war, sollte untersucht werden.

Die Ärzte wußten: Ist Arsen in den menschlichen Organismus eingedrungen, sammelt es sich



in den Haaren an. Entdeckte man also Arsen-  
spuren in den Haaren Napoleons, die weit über  
dem Normalen lagen, so war der Mord bewie-  
sen. Es ist natürlich leicht zu sagen: „Entdeckte

man...“ Die in den paar Härchen vermutete Arsenmenge konnte ja nur minimal sein. Man hätte sie einer chemischen Analyse unterziehen können. Jedoch sind die dafür geeigneten chemischen Methoden zu wenig empfindlich. Irrtümer wären nicht ausgeschlossen. In diesem Falle jedoch durfte man nicht fehlgehen.

Die kostbaren Härchen wurden 24 Stunden lang in ein zylindrisches Aluminiumgehäuse eingeschlossen, im Atomreaktor von Harwell mit Neutronen bestrahlt. War Arsen darin enthalten, mußten sich nach dieser „Aktivierung“ radioaktive Arsenisotope nachweisen lassen.

Die entsprechenden Messungen ergaben: Arsengift hatte Napoleon ums Leben gebracht. In seinen Haaren war dreizehnmal mehr Arsen, als in den Haaren allgemein vorzufinden ist. Ja, man konnte an der ungleichmäßigen Verteilung des Arsens längs der Haare auch erkennen, daß das Gift allmählich, in geringfügigen Dosen, verabreicht worden war.

Auf welche Weise war es den Forschern gelungen, den Nachweis für die wahre Ursache von Bonapartes Tod zu erbringen, ohne ein einziges chemisches Verfahren angewandt zu haben?

**Radioaktive Aktivierungsanalyse** Natürliches Arsen ist ein äußerst stabiles Element. Auf alle Fälle war es bislang keinem Forscher gelungen, auch nur das minimalste Anzeichen einer Radioaktivität des Arsens wahrzunehmen.

Eine weitere Besonderheit zeichnet das Element aus: Es besitzt nur ein einziges Isotop. Viele Elemente stellen Mischungen von zwei, drei, ja

bisweilen sogar mehr Isotopen dar, zum Beispiel das Blei, von dem es zehn Isotope gibt, die alle in der Natur vorkommen.

Die Arsenatomkerne enthalten 33 Protonen und 42 Neutronen. Das ist eine äußerst stabile Kombination.

Jedoch genügt es, dem Kern ein zusätzliches Neutron zuzuführen, und um die bisherige Stabilität ist es geschehen. Es bildet sich ein andersgeartetes, ein radioaktives Arsenisotop. Es genügt, sich eines Strahlungsmäßiggeräts zu bedienen, dessen Registriervorrichtung die Kernstrahlung anzeigt. Je größer die Menge aktiven Arsens ist, desto intensiver ist die Strahlung.

Darauf beruht das Prinzip eines einfachen und zugleich großartigen Verfahrens: der radioaktiven Aktivierungsanalyse. Sie ist ein sehr empfindliches radiochemisches Verfahren, bei dem durch Bestrahlung künstliche radioaktive Isotope erzeugt werden, die zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Substanzen herangezogen werden. Mit Hilfe dieser Methode kann man selbst Mengen nachweisen, deren Größe mit 10 bis 12 Nullen nach dem Komma angegeben wird. Zu diesem Zweck muß man das zu analysierende Objekt Neutronenstrahlen aussetzen und anschließend die Intensität der durch die entstandenen radioaktiven Isotope emittierten Strahlung messen.

Diese Methode war es, die die Umstände des Todes von Napoleon Bonaparte aufzuklären half. Sie stellt wahrhaftig ein großartiges Beispiel für die Dienste dar, die die exakte Wissenschaft zu leisten imstande ist.

Für die heutigen Analytiker ist die Aktivierungsanalyse ein Auge, dem nichts verborgen bleibt. Mit Leichtigkeit nimmt es das wahr, was anderen Verfahren nicht zugänglich ist.

Es ist bekannt, daß reines Germanium als ein großartiger Halbleiter verwendet werden kann. Stellen wir uns einmal vor, daß es sich durch Zufall mit Atomen eines anderen Elements zusammenfügt, sagen wir mit Antimonatomen. Die Beimischung mag unbedeutend erscheinen: Auf tausend Milliarden Germaniumatome fällt ein Antimonatom. Doch dieses einzige Atom macht die großen Halbleitereigenschaften des Germaniums zunichte.

Deshalb muß Germanium auf absolute Reinheit geprüft werden.

Dies kann nur mit Hilfe der Aktivierungsanalyse bewerkstelligt werden.

Neutronen prallen auf eine Germaniumplatte, die eine bestimmte Antimonmenge enthält. Möglicherweise ist sie so geringfügig, daß sie keinerlei Beachtung verdient. Sie kann aber auch so groß sein, daß sie das reine Germanium zum Ausschluß stempelt.

Die Germanium- und die Antimonkerne verhalten sich gegenüber den Neutronen ungleich. Germaniumkerne lassen Neutronen völlig teilnahmslos durch, Antimonkerne „verschlucken“ sie gierig. Daher kommt es bloß zur Bildung von radioaktiven Antimonisotopen. Aufgabe des Zählrohres ist es nun, anzuzeigen, ob die Antimonbeimischung im Germanium groß oder geringfügig ist.

### **Wie des Gewichtlosen Gewicht zu bestimmen ist**

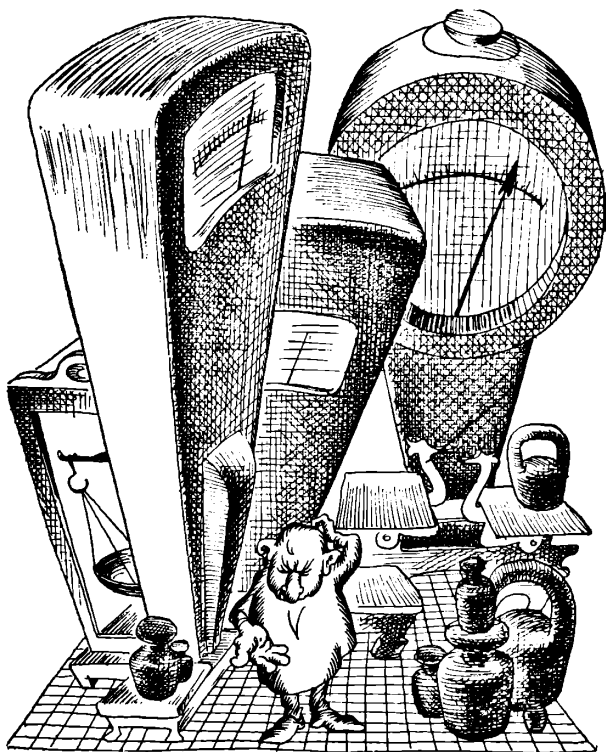
Sind 500 Mikrogramm viel? Ein Mikrogramm ist das Tausendstel eines Milligramms oder der millionste Teil eines Gramms. 500 Mikrogramm sind also Zehntausendstel eines Gramms oder ein halbes Milligramm. Verfügen wir über 500 Mikrogramm Wasser, macht das einen halben Kubikmillimeter aus, an Volumen den dritten Teil eines Stecknadelkopfes. Haben wir es mit einer zehnmal so schweren Substanz zu tun, dann wird ihr Raumvolumen um das Zehnfache geringer sein. Eine solche Substanz wahrzunehmen, ist wahrhaft nicht leicht. Was kann man damit schon anfangen? Sie ist höchstens unter einem Mikroskop zu beobachten. Das wäre aber auch alles.

500 Mikrogramm Plutonium, und kein Mikrogramm mehr, befanden sich 1942 in den Händen amerikanischer Forscher. An dieser wahrhaft „gewichtlosen“ Menge gelang es ihnen, die Haupteigenschaften des Elements zu erforschen, und zwar derart erschöpfend, daß man nach Ablauf eines Jahres bereits das Projekt für die Errichtung eines Werkes zur künstlichen Gewinnung des Plutoniums in Angriff nehmen konnte. Diese 500 Mikrogramm stellten damals bereits eine wägbare Menge dar.

Im Verlaufe verschiedener chemischer Operationen waren die Chemiker wiederholt gezwungen, Gewichtsbestimmungen vorzunehmen...

An einer Waage scheint nichts Besonderes zu sein. Sie ist, wie ihr Name sagt, eine Waage. Selbst die Analysenwaage, die mit einer Genauigkeit von einem hundertstel Milligramm das Ge-

wicht anzeigt, ist von ziemlich einfacher Bauart. Doch die Wissenschaftler befriedigte eine



solche Empfindlichkeit schon seit langem nicht mehr. Und so schuf man zu Beginn unseres Jahrhunderts eine Waage, die bis zu einem

zehntausendstel Milligramm genau ist. Mit Hilfe einer solchen Waage bestimmte der englische Chemiker William Ramsay nicht nur das Gewicht von ungefähr  $0,16 \text{ cm}^3$  Radon, sondern bestätigte auch die Theorie Rutherfords vom radioaktiven Zerfall des Radiums.

Doch selbst mit dieser Waage gab man sich noch nicht zufrieden. Nach einiger Zeit konstruierte der schwedische Chemiker Hans Peterson eine Waage, die imstande war, das Gewicht mit einer Genauigkeit von sechs Zehntausendsteln eines Mikrogramms zu bestimmen, d. h. von  $6 \cdot 10^{-10} \text{ g}$ . Kann man sich eine solche Genauigkeit überhaupt vorstellen?

Die ultrapräzise Gewichtsbestimmung — das Wägen des „Gewichtslosen“ — das ist eine der neuesten Errungenschaften der Wissenschaft. In ihren Bereich gehören die Analysen von Probenstoffmengen zwischen  $10^{-6}$  und  $10^{-5} \text{ g}$ . Neben dieser Ultramikroanalyse, die sich einer Mikrogramm-Methode bedient, gibt es bereits eine Submikroanalyse für den Bereich von  $10^{-9}$  bis  $10^{-8} \text{ g}$  (Nanogramm-Methode).

Es gibt auch entsprechende Verfahren zur Durchführung verschiedener chemischer Vorgänge mit kleinsten Stoffmengen. Ihr „Volumen“ kann das Zehntausendstel eines Millimeters betragen, ihre Präzision den zehntausendsten Teil eines Mikroliters ausmachen.

Die ultramikrochemischen Verfahren finden bereits Anwendung nicht nur bei biologischen und biochemischen Forschungen, sondern auch — vielleicht in erster Linie — beim Studium der künstlichen Transuranelemente.

**Chemie der vereinzelt Atome** Es gab Zeiten, da sich die Chemiker in bittere Klagen darüber ergingen, es sei schwierig, Eigenschaften eines neuen Elements zu erforschen, wenn einem nur Probensubstanzmengen im Milligrammbereich zur Verfügung stehen.

Im Laufe der Zeit erlitt das „Geringfügigkeitskriterium“ Abwandlungen. Im Jahre 1937 gelang es den italienischen Physikern Perrier und Sergè, die Eigenschaften des zu jener Zeit synthetisierten Technetiums zu erforschen, obwohl ihnen nur 0,000 000 001 g dieses Elements, also nur ein Milliardstel Gramm, zur Verfügung stand.

Das Gelingen dieses Unternehmens war ein Ansporn für alle Forscher. Bei der Erforschung der Transurane dachten sie nun nicht mehr an Einheiten wie Gramm, Milligramm oder Mikrogramm. „Gewichtslose“, fast „unsichtbare“ Mengen — so wurden die Substanzmengen umschrieben, deren sich die Wissenschaftler bei ihren Analysen bedienten. Doch je weiter die Forscher in das Gebiet des Periodensystems der Elemente vorstießen, wo die Transurane „zu Hause“ sind, desto größere Schwierigkeiten stellten sich ihnen entgegen.

Schließlich kam die Reihe an das 101. Element, das zu Ehren des großen russischen Chemikers Mendelejew Mendelewium genannt wurde.

Hatte das neue Transuranelement einen Namen bekommen, waren die Forscher von seiner Existenz überzeugt.

Es war auf Grund der nuklearen Thermodynamik und der Systematisierung der schwersten Aktiniden nicht allzu schwierig gewesen, die Bedin-

gungen festzulegen, unter denen die Synthese des 101. erfolgreich sein könnte. Auch die graphische Darstellung der Gleichung für den Ablauf der entsprechenden Kernreaktion verlangte keinen besonderen Aufwand an Mühe. Es konnte auch vorausgesagt werden, welche Isotope des neuen Transurans zustande kommen müssen.

Doch all das waren theoretische Voraussagen. Was in der Theorie erzielt wurde, erforderte eine Bestätigung durch die Praxis. Es mußte der Beweis erbracht werden, daß im Verlauf einer Kernreaktion tatsächlich Isotope des 101. und keines anderen Elements gewonnen worden waren.

Was des weiteren geschah, fällt ins Gebiet der Phantastik. „Im Verlauf eines Experiments zur Synthese des 101. Transuranelements kann man lediglich mit der Gewinnung eines einzigen Atoms des neuen Elements rechnen“, besagten exakte physikalisch-mathematische Überlegungen. Ein einziges Atom, ein bisher noch unbekanntes Atom kündete die „Geburt“ an. Doch war es auch wirklich ein Atom des 101. Elements?

Empfindliche Strahlungsmesser gestatteten es zwar, die Halbwertszeit eines Atoms zu bestimmen, aber nicht seine chemische Natur zu ermitteln.

Ja, ist es denn überhaupt möglich, auch nur die Haupteigenschaften eines einzelnen Atoms zu erforschen, eines Atoms, das überhaupt nur ein einziges Mal vorhanden ist?

Auch in diesem Fall kam die Chromatographie zu Hilfe.

Es stand fest, daß das 101. Element zur Gruppe der Aktiniden gehören mußte. Die schweren Aktiniden ähneln in mancher Hinsicht den Elementen einer analogen Gruppe, den Lanthaniden. Die Trennung der Lanthaniden war mit Hilfe der Ionenaustauscherchromatographie erfolgreich durchgeführt worden. Bei diesem Trennungsverfahren waren die einzelnen Lanthaniden in einer ganz bestimmten Folge aus der Mischung ausgesondert worden, zuerst die schweren, dann die leichteren.

In der Aktinidenreihe sollte im Periodensystem das 101. Element dem Einsteinium (Ordnungszahl 99) und unmittelbar dem Fermium (Ordnungszahl 100) folgen. Wollten wir mit Hilfe der Chromatographie Einsteinium, Fermium und das Element mit der Ordnungszahl 101 voneinander trennen, so müßte in den allerersten Flüssigkeitstropfen, die der chromatographischen Säule entfließen, das 101. Element nachzuweisen sein.

Das Experiment einer Synthese des Mendelewiums wurde von den Forschern siebzehnmal durchgeführt. Siebzehnmal zogen sie die Austauscherchromatographie zu Rate, um das chemische Wesen des neuen Atoms zu ermitteln, das nach dem Willen des Menschen erschaffen worden war. Jedesmal kam ein Mendelewiumatom zum Vorschein. Die Chromatographie zeigte erneut, was sie zu leisten vermag. Der gleichen Säule waren ja auch schon die Elemente Fermium und Einsteinium entströmt.

Was es heißt, ein einziges Atom zu erzeugen und auch noch exakt nachzuweisen, mag ein

Vergleich veranschaulichen: In einem Stecknadelkopf von einem Kubikmillimeter sind 100 Trillionen ( $10^{20}$ ) Eisenatome enthalten. Nun stellen wir uns vor, wir müßten unter diesen Atomen spazieren gehen und das eine einzige Atom herausfinden, das sich von allen anderen unterscheidet.

Das Experiment war ein bedeutender Erfolg. Die dem Mendelevium zugeordnete Ordnungszahl 101 ist richtig, Mendelevium selber gehört den Eigenschaften nach zu den Aktiniden.

Es soll nicht verschwiegen werden: Mit dem Mendelevium hatten die Forscher Glück. Seine Halbwertszeit ist ja verhältnismäßig lang. Sie beträgt rund 90 Minuten. Diese Lebensdauer reicht für die Durchführung einer Reihe chemischer Reaktionen zur Erforschung der Eigenschaften des neuen Elements aus. Übrigens war eines der durchgeführten Experimente eine Überraschung: Es erbrachte den Beweis, daß Mendelevium im zweiwertigen Zustand äußerst stabil ist. Außerdem stellte es sich heraus, daß diese Besonderheit auch dem Einsteinium, dem Fermium und dem Element mit der Ordnungszahl 102 eigen ist. Demzufolge unterscheiden sich die schweren Aktiniden in einiger Hinsicht in merklicher Weise von den Lanthaniden — eine Feststellung, die zum Nachdenken Anlaß gibt.

Die Lebensdauer des 102. Elements und auch des Lawrenziiums und Kurtschatoviums beträgt nur Sekunden und Sekundenbruchteile. Hier ist selbst die Ionenaustauscherchromatographie machtlos. Das Element zerfällt, ehe es der Trennsäule entweichen kann.

Schnellere Forschungsmethoden, wahre Eilverfahren sind notwendig. Die Wissenschaftler bezeichnen sie als „Expresßverfahren“. Mit ihrer Hilfe erforschte man in der Sowjetunion im Kernforschungszentrum Dubna die Eigenschaften des 102. Elements und bestimmte die chemische Natur des Kurtschatoviums, das wahrscheinlich ein Analogon des Hafniums ist.

**Gib es eine Grenze!** Alles auf der Welt muß einmal ein Ende haben — mit Ausnahme des Weltalls, das keinen Anfang und kein Ende hat. Auch jedes Analysenverfahren hat demnach, allgemein gesprochen, seine Grenzen. Haben wir die chemische Natur von einzelnen Atomen eines Elements oder von einzelnen Molekülen einer chemischen Substanz bestimmt, können wir ja dahinter einen Punkt setzen.

Doch hier soll von etwas anderem die Rede sein. Noch zu Beginn der vierziger Jahre, also ungefähr vor drei Jahrzehnten, waren die Chemiker imstande, den Großteil von Beimischungen zu analysieren, falls das Mengenverhältnis zur Hauptsubstanz nicht geringer als 0,01 bis 0,001 Prozent war. Damals war das ein bedeutender Erfolg. Doch in unseren Tagen haben Wissenschaft und Technik Siebenmeilenstiefel angelegt. Sie schreiten mit Riesenschritten vorwärts. Zu Beginn der sechziger Jahre bezog sich die Nachweisbarkeitsforderung schon auf den tausendmilliardsten Teil eines Prozents ( $10^{-12}$ ). Allerdings war es noch nicht möglich, dieser Forderung zu entsprechen. Heute vermag man bereits Ele-

mente und Verbindungen nachzuweisen, die in derartigen „Mengen“ vorliegen. Die ersten Helfer sind dabei die Verfahren der Aktivierungsanalyse, der Gaschromatographie und der Massenspektrometrie.

Doch die Anforderungen an die Nachweisbarkeit von Elementen werden noch größer werden. Der bekannte sowjetische Forscher I. P. Alimarin ist der Ansicht, daß schon gegenwärtig die zu erstrebende Reinheit von Substanzen es notwendig macht, die Nachweisbarkeit auf Substanzmengen bis zu  $10^{-23}$  g auszudehnen. Den Physikern und Chemikern obliegt es, diese schwierige Aufgabe zu lösen.

Zunächst ist sie für radioaktive Atome gelöst worden. Wir sind bereits imstande, radioaktive Atome einiger chemischer Elemente in Einzel-exemplaren nachzuweisen. Doch im Hinblick auf stabile Atome und ihre Verbindungen ist die Empfindlichkeit der Nachweisverfahren noch weit von einer Nachweisbarkeitsgrenze entfernt. Neue Methoden der Analyse müssen entdeckt werden, damit auch jene „weißen Flecke“ auf der Landkarte der Chemie verschwinden, die uns heute manches Kopfzerbrechen bereiten.

**Eine unvergleichliche Zahl** Bei ihren Berechnungen nehmen die Wissenschaftler des öfteren zu sogenannten Konstanten Zuflucht, d. h. zu Festwerten, die eine bestimmte Qualität oder Eigenschaft charakterisieren. Auf eine solche Konstante wollen wir nun zu sprechen kommen.

Sie trägt den Namen „Avogadrosche Zahl“ nach

dem berühmten italienischen Physiker Amadeo Avogadro (1776—1856), der diese Konstante aus der Avogadroschen Regel ableitete, nach der bei gleichem Druck und gleicher Temperatur gleiche Volumen verschiedener Gase gleich viele Moleküle enthalten. Die Avogadro'sche Zahl bezeichnet also eine ganz bestimmte Anzahl von Atomen, nämlich jene, die in einem Kubikzentimeter eines idealen Gases bei  $0^{\circ}\text{C}$  und einem Druck von 1 at enthalten ist.

Ob wir es nun mit Kohlenstoff, Eisen oder Uran zu tun haben, in allen Fällen wird die Anzahl der Atome unter den angegebenen Bedingungen der Avogadroschen Zahl entsprechen. Die Avogadro'sche Zahl beträgt  $2,6873 \cdot 10^{19}$ . Sie ergibt sich aus der Loschmidtschen Zahl durch Division mit dem Molvolumen.

Die Avogadro'sche Zahl ist so riesengroß, daß man sie sich nur schwer vorstellen kann. Doch wir wollen es auf einen Versuch ankommen lassen, indem wir uns eine zweite Konstante, die Loschmidtsche Zahl vorzustellen suchen.

Sie wurde 1865 von Joseph Loschmidt ermittelt und gibt die Zahl der Moleküle in einem Mol an (Mol oder Grammmolekül ist die Anzahl Gramm einer Verbindung, die das Molekulargewicht angibt). Ein Mol eines jeden Stoffes enthält also stets die gleiche Anzahl von Molekülen oder Atomen, nämlich  $6,023 \cdot 10^{23}$  (Loschmidtsche Zahl). Diese Zahl gilt auch für das Grammatom eines Elements, das so viel Gramm enthält, wie sein relatives Atomgewicht angibt. In 12 g Kohlenstoff, in 50 g Eisen oder in 238 g Uran sind stets  $6,023 \cdot 10^{23}$  Atome enthalten.

Auf unserer Erde leben rund 3 Milliarden Menschen. Nehmen wir nun an, jedes irdische Wesen habe es sich zur Aufgabe gemacht, die Anzahl der in einem Grammatom eines Elements enthaltenen Atome zu zählen. Setzen wir nun voraus, jeder Mensch „arbeite“ daran acht Stunden täglich und sei imstande, in einer jeden Sekunde der bereits ermittelten Zahl eine Eins hinzuzufügen.

Wieviel Zeit würden die Bewohner der Erde benötigen, um alle  $6,023 \cdot 10^{23}$  Atome abzuzählen?

Es ist eine einfache mathematische Aufgabe, die eigentlich jeder lösen kann. Die Antwort lautet: ungefähr 20 Millionen Jahre. Die ungeheuer große Menge, die die Avogadro'sche Zahl darstellt, bestätigt uns, daß die Vorstellung von der Allgegenwart der chemischen Elemente auf fester Grundlage beruht. Überall sind zumindest einige wenige Atome eines jeden chemischen Elements vorzufinden.

Die Avogadro'sche Zahl ist so ungeheuer groß, daß die Unmöglichkeit augenscheinlich wird, eine absolut reine Substanz ohne jedwede Beimischung zu gewinnen. Es ist undenkbar, unter  $6,023 \cdot 10^{23}$  Atomen nur ein einzelnes Atom zu haben, das keine neue Unreinheit in die Substanz hineinbringen würde.

In einem Gramm Eisen sind, sagen wir, rund  $10^{22}$  Atome enthalten. Nehmen wir an, die Atome der Kupferbeimischung betragen nur 1 Prozent (10 mg), so bedeutet das immerhin nicht mehr und nicht weniger als  $10^{20}$  Atome. Ist das Mengenverhältnis der Beimischung selbst auf ein

zehntausendstel Prozent herabgesetzt, entfallen dennoch auf  $10^{23}$  Atome der Hauptsubstanz  $10^{16}$  Atome der Beimischung. Gesetzt den Fall, die Beimischung schließt alle Elemente des Periodensystems in sich ein, so wird der Anteil eines jeden Fremdelements im Durchschnitt gleich  $10^{14}$  sein, d. h. einhundert Trillionen Atome betragen.



WEIT BREITET  
DIE CHEMIE  
IHRE ARME AUS



**Nochmals über den Diamanten** Der unbearbeitete Naturdiamant besitzt von allen bekannten Mineralien die größte Härte. Der geschliffene Diamant wird zum Brillanten, dem schönsten der Edelsteine. Blaue Diamanten werden besonders geschätzt, denn sie kommen in der Natur äußerst selten vor. Darum sind sie auch sehr teuer.

Doch was schert uns Brillantenschmuck? Wir wollten, es gäbe die gewöhnlichen Diamanten in größeren Mengen, damit man nicht um jedes Körnchen zu bangen brauchte.

Leider gibt es nur wenige Diamantenlagerstätten. Noch geringer ist die Zahl reicher Vorkommen. Große Diamantenlager befinden sich in Südafrika und in der UdSSR. Vor ungefähr fünfzehn Jahren wurden in Jakutien mächtige Diamantenlagerstätten erschlossen. Heute werden hier Diamanten großtechnisch gewonnen.

Zur Entstehung der Naturdiamanten waren außerordentliche Verhältnisse erforderlich: Temperaturen und Drücke von gigantischen Werten. Die Diamanten entstanden in den Tiefen des Erdinneren. Peridotitmagma wurden bei tektonischen Unruhen infolge des hohen Überdruckes explosionsartig durch die Erdkruste gedrückt. In diesen Peridotiten sind die Diamanten als Einzelkristalle enthalten. Diese aus tiefen Schichten nach oben reichenden „Schlote“ erstarrten. Wertvolle Diamanten werden heute im Kimberlit, einem ultrabasischen magmatischen Gestein, oder auch in Seifen gefunden, die sekundäre Anhäufungen in den Küstenbereichen

der Meere darstellen, so z. B. an der Westküste Afrikas.

Seitdem Lavoisier durch einen praktischen Versuch den Beweis erbracht hatte, daß der Diamant aus Kohlenstoff besteht (er hatte im Jahre 1788 einen Diamanten zu Kohlendioxid verbrannt), lag der Gedanke nahe, Diamanten zu synthetisieren.

Die Geschichte der Wissenschaft kennt Dutzende Versuche, künstliche Diamanten zu gewinnen. Zu den ersten „Diamantensuchern“ dieser Art zählte übrigens Henri Moissan, jener Forscher, dem es gelungen war, freies Fluor darzustellen. Aber jeder seiner Versuche scheiterte. Entweder war die angewandte Methode von Grund auf falsch, oder man verfügte noch nicht über geeignete Apparaturen, mit denen man die für die Diamantsynthese erforderlichen Bedingungen herstellen konnte.

Erst Mitte der fünfziger Jahre unseres Jahrhunderts gab die moderne Technik dem Menschen den Schlüssel zur Lösung des Problems in die Hand. Wie zu erwarten war, diente Graphit als Ausgangsstoff. Es wurde einem Druck von 1 000 000 at und einer Temperatur von rund 3000° C unterworfen.

Gegenwärtig stellt man Diamanten bereits in vielen Ländern der Welt her. In der Sowjetunion gelang es beispielsweise, auch große Einzelstücke zu gewinnen. In Höchstdruckanlagen, die immerhin die Ausmaße zehnstöckiger Gebäude haben, „züchtet“ man Diamanten „nach Maß“.

Das Gelingen dieser Synthese war vor allem den

Physikern zu verdanken, die die Bedingungen erforscht hatten, unter denen der Diamant als die nichtstabile Modifikation des Kohlenstoffs sich bilden kann.

Die Chemiker waren in einem anderen Sinne erfolgreich. Sie steuerten vieles zur Vervollkommnung des Diamanten bei.

Aber kann es denn überhaupt etwas Vollkommeneres als einen Diamanten geben? Stellt nicht



die kristalline Struktur des Diamanten im Reich der Kristalle die Vollkommenheit selber dar? Die Härte des Diamanten ist der idealen geometrischen Anordnung der Kohlenstoffatome im Kristallgitter zu verdanken. Seine Kristalle sind regulär, meist als Achtfächer (Oktaeder) ausgebildet.

Der Diamant kann nicht härter gemacht wer-

den, als er ist. Doch etwas anderes kann geschehen: Man kann einen noch härteren Stoff herstellen.

Den Rohstoff dazu lieferten die Chemiker. Eine Bor-Stickstoff-Verbindung, das Bornitrid, zeichnet sich keineswegs durch ein anziehendes Äußere aus. Aber eine ihm eigene Besonderheit zog die Aufmerksamkeit der Chemiker auf sich: Die Verbindung besitzt die gleiche kristalline Struktur wie Graphit. Das hatte ihr seit langem den Namen „weißer Graphit“ eingebracht.

Die Chemiker erfanden ein billiges Verfahren zur Synthese des Bornitrids. Die Physiker unterwarfen es härtesten Prüfungen unter Anwendung von Drücken von hunderttausend Atmosphären und Temperaturen von über 2000° C. War es nicht gelungen, „schwarzen“ Graphit in Diamanten umzuwandeln? Weshalb sollte es nicht gelingen, aus „weißem“ Graphit eine diamantenähnliche Substanz zu gewinnen?

Und sie stellten das sogenannte Borazon her, das der Härte nach den Diamanten sogar übertrifft. Man kann damit die glatte Fläche des Diamanten ritzen! Dabei ist es noch hitzebeständiger als der Diamant. Es kann als Bohr- und Schleifmittel auch bei sehr hohen Temperaturen Verwendung finden.

Die Borazonherstellung ist vorläufig ein noch kostspieliges Unterfangen. Um die Gesteungskosten beträchtlich zu senken, müssen noch viele Überlegungen angestellt werden. Aber die Hauptsache ist bereits getan. Wieder einmal hat sich bestätigt, daß der Mensch chemische Verbin-

dungen herstellen kann, die die Natur überhaupt nicht kennt.

...Unlängst erreichte uns eine Mitteilung aus Tokio. Japanischen Wissenschaftlern sei es gelungen, eine Substanz zu gewinnen, die an Härte den Diamanten übertrifft, indem Magnesiumsilikat (eine Magnesium-Silizium-Sauerstoff-Verbindung) einem hohen Druck unterworfen wurde.

Heute werden Diamanten vor allem in der Industrie verwendet. Ein Teil dient z. B. als Lagersteine für Uhren bzw. für Meßinstrumente. Ein großer Teil wird bei Diamantbohrern, -fräsern und -sägen eingesetzt. Auch als Ziehsteine für die Drahtindustrie, als Glasschneider und Schallplattennadeln sind Diamanten bekannt. Sehr wichtig ist der Einsatz von Diamanten in der Tiefbohrtechnik, z. B. zum Besetzen von Bohrkronen.

Es scheint also die Zeit nicht mehr fern zu sein, da der Diamant, der jahrhundertlang der König unter den härtesten Stoffen war, gezwungen sein wird, seine Führerrolle anderen zu übergeben.

**Moleküle ohne Ende** Gummi kennt jedes Kind. Es gibt Gummibälle, Gummischuhe, Gummiband, Radiergummi und viele andere Gegenstände aus diesem Material. Aus Gummi gefertigt sind die Scheiben für das Hockeyspiel und die Handschuhe des Chirurgen. Aus Gummi sind letztlich auch die Reifen der Kraftwagen und die Wärmflaschen für die Kranken, die Wasserschläuche und Regenmäntel.

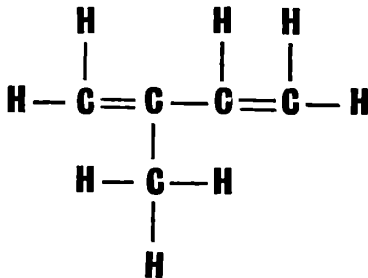
Gummi und Gummiwaren werden heutzutage in Hunderten von Werken hergestellt. Noch vor einigen Jahrzehnten fand in der ganzen Welt für die Gummiherstellung nur Naturkautschuk Verwendung. Das Wort „Kautschuk“ stammt von der indianischen Bezeichnung für den Kautschukbaum. Es bedeutet soviel wie „Tränen der Hevea“. Der Milchsaft dieses bis zu 30 m hohen Baumes wurde gesammelt, bearbeitet und schließlich in Rohkautschuk übergeführt.

Viel Blut und viel Tränen vermischten sich mit den „Tränen des Baumes“. Um 1880 kostete eine einzige Tonne gesammelten Kautschuks durchschnittlich das Leben von acht Indios, die bei der unter unmenschlichen Bedingungen betriebenen Jagd nach dem wertvollen Baumharz im brasilianischen Urwald umkamen.

Aus Kautschuk können viele nützliche Gegenstände gefertigt werden. Die Kautschukernte reichte schon seit 1860 nicht mehr aus, um den steigenden Bedarf der Industrie zu decken. Auch nachdem in Südostasien Kautschukpflanzen angesiedelt worden waren, änderte sich diese Situation, trotz der zunehmenden Gewinnung von Naturkautschuk, nicht wesentlich.

Die Chemie zeigte den Ausweg. Die erste Frage, die sich die Chemiker stellten, lautete: Woher kam die Elastizität des Kautschuks? Lange mußten sie die „Tränen des Heveabaumes“ erforschen, ehe sie die Frage beantworten konnten. Es stellte sich heraus, daß die Moleküle des Kautschuks eigenartig aufgebaut sind. Sie bestehen aus einer großen Anzahl sich wieder-

holender, gleicher Glieder, die sich zu Ketten gigantischen Ausmaßes zusammenfügen. Verständlicherweise ist ein so „langgestrecktes“ Molekül, das aus rund fünfzehntausend Kettengliedern „geknüpft“ ist, imstande, sich nach allen Richtungen hin zu krümmen und zu winden. Es zeigte sich, daß die Länge der Molekülketten, die Art ihrer gegenseitigen Verbindung und ihre „innere“ Ordnung entscheidend waren für die Eigenschaften dieser Stoffe, insbesondere für die Elastizität. Der Grundbaustein dieser Molekülketten war das auf Kohlenstoffatome sich stützende Kohlenwasserstoffglied, das Isopren  $C_5H_8$ . Die formelmäßige Darstellung der Molekülstruktur ergibt folgendes Bild:



Es wäre richtiger, das Isopren als eine Art natürliches Ausgangsmonomer zu bezeichnen. Im Verlauf der Polymerisation erleidet das Isoprenmolekül verschiedene Umwandlungen: Die Doppelbindung zwischen den Kohlenstoffatomen wird gelöst, und die derart gelösten Einzelglieder

verknüpfen sich zum gigantischen Kautschukmolekül.

Das Problem der Gewinnung von künstlichem Kautschuk beschäftigt seit langem Wissenschaftler und Ingenieure. Bereits 1899 hatte der russische Forscher I. L. Kondakow erkannt, daß es möglich sein müßte, Kautschuk zu synthetisieren. Es hatte den Anschein, als ob das keine besonderen Schwierigkeiten bereiten würde. Zuerst war das Isopren zu gewinnen, dann seine Polymerisation durchzuführen. Schließlich mußten die einzelnen Isoprenglieder zu langgestreckten, elastischen Ketten synthetischen Kautschuks verbunden werden, zu Riesenzmolekülen, von denen jedes ein Molekulargewicht von etwa 200 000 haben würde.

Allerdings war es damals äußerst unwahrscheinlich, daß Isopren, das erst aus Naturkautschuk gewonnen werden konnte, der Ausgangsstoff für eine künstliche Kautschukerzeugung werden sollte. Den Chemikern war klar, daß erst einmal das Isopren oder ein ihm ähnliches Monomer aus leicht zugänglichen Ausgangsstoffen hergestellt werden mußte, bevor man daran gehen konnte, Synthetikautschuk zu gewinnen. Zu Beginn des zwanzigsten Jahrhunderts waren I. L. Kondakow und Fritz Hofmann bei ihren Bemühungen, das Isopren zu synthetisieren, unabhängig voneinander auf ein 2,3-Dimethylbutadien gestoßen, das aus Azeton leicht erzeugt werden kann. Jedoch eine kautschukähnliche Masse aus diesem Dimethylbutadien konnte nicht mit dem natürlichen Kautschuk konkurrieren. Schließlich orientierte man

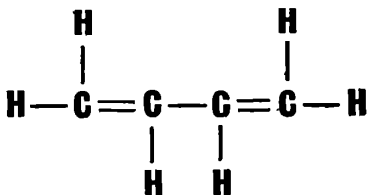
sich Ende der zwanziger Jahre auf das Butadien, das über mehrere Reaktionsstufen aus der Grundsubstanz Äthin (Azetylen), die aus



Kalziumkarbid und Wasser entsteht, hergestellt wird. Es gelang, dieses dem Isopren ähnliche Molekül zum Ausgangsstoff der Kautschuksyn-

these zu machen. Besonders wichtig war die Entdeckung, daß Butadien durch Alkalimetalle (z. B. Natrium) polymerisiert wird.

Großtechnisch wurde künstlicher Kautschuk erstmalig um 1930 in der Sowjetunion und in Deutschland gewonnen. In seiner Struktur sieht das Butadien folgendermaßen aus:

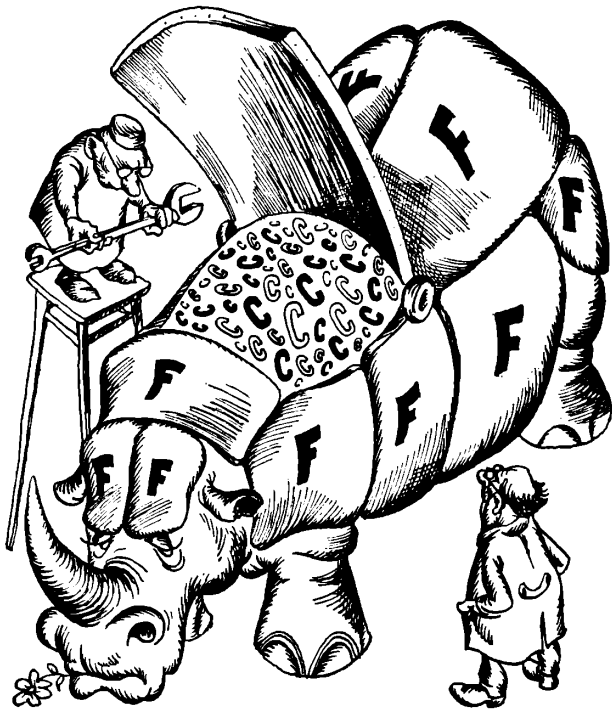


Der Zusammensetzung und dem Aufbau nach ähnelt es wohl dem Isopren, jedoch ist der Polymerisationsvorgang leichter zu steuern.

Gegenwärtig kennt man bereits eine ganze Reihe künstlicher Kautschuke. Man faßt diese Gruppe polymerer Stoffe, die ein kautschukähnliches Verhalten zeigen, mit dem Sammelnamen Elastomere oder Elaste zusammen.

Dem Naturkautschuk und seinen Erzeugnissen sind einige Mängel eigen. In Ölen und Fetten quellen sie stark an. Gegenüber vielen Oxidationsstoffen sind sie nur wenig resistent, insbesondere gegenüber dem Ozon, der ja stets in der Luft vorhanden ist. Naturkautschuk ist also nur begrenzt witterungs- und wärmebeständig. Bei der Fertigung von verschiedenen Erzeugnissen aus Naturkautschuk muß dieser deshalb vorher vulkanisiert, d. h. der Einwirkung von hohen Temperaturen bei Anwesenheit von Schwefel unterworfen werden. Auf eine solche Wei-

se wird Kautschuk in Gummi oder Ebonit umgewandelt. Mit Hilfe der Vulkanisation werden vor allem die mechanischen Eigenschaften des Kautschuks verbessert. Die aus Naturkautschuk



gefertigten Gegenstände (z. B. Kraftwagenreifen) setzen bei ihrer Nutzung bedeutende Wärmemengen frei, was ein vorzeitiges Altern und einen schnellen Verschleiß bewirkt.

Bei der Schaffung von neuen, synthetischen Kautschuken mußten die Forscher danach trachten, diese mit „vollkommeneren“ Eigenschaften auszustatten. Große Bedeutung erlangte eine unter dem Namen Buna bekanntgewordene „Kautschukfamilie“. (Der Name ist aus den ersten zwei Silben der Wörter Butadien und Natrium zusammengesetzt. Natrium spielt beim Polymerisationsvorgang die Rolle eines Beschleunigers.)

Einige elastomere Mitglieder dieser Familie bewährten sich vorzüglich. Dazu gehören die Butadienmischpolymerisate Buna S, Buna SS, Buna SW (SU:SK-S), die fast in der ganzen Gummiindustrie, vor allem für die Fahrzeugbereifung eingesetzt werden, sowie Buna N, Buna NN, Buna NW (SU:SK-N), die zu Benzinschläuchen, ölfesten Packungen, Dichtungen und Kabeln Verwendung finden, weil sie gegen Lösungsmittel, Öle, Fette und Benzine beständig sind.

Einen guten Ruf hat sich das sogenannte Butylkautschuk erworben. Es wird durch Mischpolymerisation von Isobutylen und Isopren gewonnen. Welches sind seine Vorzüge? Die Gesteigungskosten sind sehr niedrig, und im Gegensatz zum Naturkautschuk zeigt Butylkautschuk ein fast völlig neutrales Verhalten gegenüber dem Ozon. Vulkanisierter Butylkautschuk hat heutzutage eine breite Verwendung bei der Herstellung von Gasschläuchen, Profilen, Gefäßauskleidungen und schlauchlosen Reifen gefunden. Gegenüber vulkanisiertem Naturkautschuk ist bei ihm die Gasdurchlässigkeit zehnmal geringer.

Sehr eigenartig sind die kautschukähnlichen Polyurethane. Sie sind reiß- und dehnfest, nur in geringem Maße dem Altern unterworfen. Aus Polyurethanelastomeren stellt man Schaumgummi her, das einen guten Stoff für die Möbelpolsterung abgibt. Kautschuke dieser Art werden in der Industrie vor allem dort eingesetzt, wo hohe mechanische Beanspruchungen zu erwarten sind. Sie dienen außerdem als Schlichtpreßstoffe.

Im verflossenen Jahrzehnt sind Kautschuke entstanden, die sich vor wenigen Jahren die Wissenschaftler nicht einmal im Traum vorstellen konnten. In erster Linie gehören dazu Elaste, die auf der Grundlage siliziumorganischer Verbindungen und der Verbindung von Fluorkohlenstoff gewonnen wurden. Ihre Hoch- und Tiefemperaturbeständigkeit ist mindestens doppelt so groß wie die des Naturkautschuks. Sie sind auch ozonfest. Auf der Basis von Kopolymeren aus Fluorolefinen gelang es schließlich, Kautschuksorten zu schaffen, die den neuesten technischen Anforderungen, die die Radioelektronik, die Raketentechnik und die Luftfahrt stellen, vor allem im Hinblick auf ihre Einsatzfähigkeit unter extremen Bedingungen, gerecht werden. Der beispielsweise auf Fluorkohlenstoffgrundlage gewonnene Kautschuk braucht nicht einmal die Dämpfe der Schwefel- und Salpetersäuren zu fürchten.

Die Reihe der neuen Kautschuksorten ist auch damit noch nicht abgeschlossen. Unlängst gelang es, sogenannte karboxylhaltige Kautschuke zu synthetisieren. Sie sind Mischpolymeri-

sate von Butadien und organischen Säuren. Eine hohe Streckfestigkeit zeichnet sie aus. Es gibt bereits Fluorsilikonkautschuke, die in ihren Eigenschaften eine Kombination von Fluorcarbonplasten und Silikonkautschuken darstellen.

Auch auf diesem Gebiete, im Bereich der Kautschuke, mußte die Natur der Kunst des Menschen den Vorrang einräumen. Zur Zeit arbeiten die Forscher daran, Spezialkautschuke zu entwickeln, die dem Naturkautschuk um ein Mehrfaches überlegen sind. Vor allem geht es dabei um die Gewinnung von Substanzen, die hochtemperaturbeständig sind, von aggressiven chemischen Medien nicht angegriffen werden, kältefest sind, bei sehr tiefen Temperaturen elastisch bleiben und gegen Strahlung beständig sind. Derartige Materialien werden vor allem vom Maschinenbau und von der Kerntechnik benötigt. Hier werden Kautschuke gebraucht, die zwischen  $-60^{\circ}\text{C}$  und  $+500^{\circ}\text{C}$  einsetzbar sind, in Benzin und Öl nicht quellen, von Kerntrennstoffen oder Oxydationsmitteln nicht angegriffen werden, die strahlungsfest und feuerfest sind.

**Ein diamantenes Herz und die Haut eines Nashorns** Die organische Chemie, die die Chemie der Kohlenstoffverbindungen ist, kennt eine Klasse von Verbindungen, die Kohlenwasserstoffe heißen. Ihre Moleküle enthalten nur Kohlenstoff- und Wasserstoffatome. Die bekanntesten typischen Vertreter dieser Klasse sind

das Methan (im Erdgas beträgt sein Mengenanteil bis zu 95 Prozent), das Äthan, das Propan und das Butan. Diese Kohlenwasserstoffe sind gasförmig. Vom Penthan ( $C_5H_{12}$ ) bis zum Hexadekan ( $C_{16}H_{34}$ ) sind sie bei Normaltemperatur flüssig. Vom Heptadekan ( $C_{17}H_{36}$ ) an sind die Kohlenwasserstoffe als feste Bestandteile vorhanden. Flüssige und feste Kohlenwasserstoffe sind Bestandteile des Rohöls,



aus dem verschiedene Benzinsorten, Schmiermittel und eine Reihe anderer wertvoller Produkte gewonnen werden.

Greifen wir aus der Fülle den einfachsten Kohlenwasserstoff, das Methan ( $CH_4$ ), heraus. Was ergibt eine Substitution der Wasserstoff- durch Sauerstoffatome? Wir erhalten Kohlendioxid ( $CO_2$ ). Sind Schwefelatome der Substituent, so

entsteht eine leichtflüchtige, giftige Flüssigkeit, Schwefelkohlenstoff oder Kohlendisulfid ( $\text{CS}_2$ ). Und wenn alle Wasserstoffatome durch Chloratome ersetzt werden, gewinnen wir eine bekannte Substanz: den Tetrachlorkohlenstoff ( $\text{CCl}_4$ ). Und nimmt man Fluor anstelle des Chlors, was geschieht dann?

Noch vor drei Jahrzehnten hätte kaum jemand auf diese Frage etwas Vernünftiges antworten können. Noch im Jahre 1936 war die Meinung verbreitet, Fluor habe keine praktische Bedeutung, weil man es nur sehr schwer rein darstellen konnte. Es aufzubewahren, bereitete allergrößte Schwierigkeiten. Heute beschäftigt sich mit den Fluorkohlenstoffverbindungen ein selbständiges Gebiet der Chemie, die Fluorchemie bzw. die Chemie der Fluorkarbone.

Bereits heute haben es die Wissenschaftler, die auf diesem Gebiet arbeiten, mit Tausenden von Stoffen mit spezifischen Eigenschaften zu tun.

Nach ihren physikalischen Eigenschaften stellen die Fluorkarbone beinahe ein regelrechtes Analogon der Kohlenwasserstoffe dar. Doch damit ist das Gemeinsame erschöpft. Zum Unterschied von den Kohlenwasserstoffen erwiesen sich die Fluorkohlenstoffe als äußerst reaktionsunwillige Substanzen. Aber sie sind in höchstem Maße wärmebeständig. Nicht umsonst bezeichnet man sie bisweilen als Stoffe, die ein „diamantenes Herz und die Haut eines Nashorns“ haben. Es gibt auch flüssige Fluorkohlenstoffe. Sie sind unbrennbar. Ihr Gefrierpunkt liegt im Tiefsttemperaturbereich.

In chemischer Hinsicht ist die Ursache dieser hohen Stabilität im Vergleich zu den Kohlenwasserstoffen oder auch anderen Klassen organischer Verbindungen sehr leicht zu erklären. Vergleicht man die Struktur der Fluormoleküle mit der der Kohlenwasserstoffe, so fällt auf, daß die Fluoratome wesentlich größer sind. Die Elektronenschalen der Fluoratome bilden daher eine Art Sperre, da sie in der Molekülbindung praktisch keinen Raum freilassen für die reaktionsfreudigen Atome, die von außen auf die Moleküle einzuwirken suchen. Sie schirmen das Fluorkarbonmolekül auf wirksame Weise ab.

Andererseits geben die zu Ionen umgewandelten Fluoratome nur äußerst schwer ihr Elektron ab. Sie sind nicht bereit, eine Verbindung mit irgendwelchen anderen Atomen einzugehen. Die Vereinigung ihrer Valenzelektronen mit den Elektronen der Kohlenstoffatome ist so fest, daß sie nur mit einem sehr großen Energieaufwand von den Kohlenstoffatomen entfernt werden könnten.

Fluor ist ja das aktivste Nichtmetall, und kein anderes Nichtmetall ist praktisch imstande, sein Ion zu oxidieren, also seinem Ion das Elektron „abspenstig“ zu machen. Außerdem reagieren die C-Atome des Fluorkarbonmoleküls nicht mit dem weniger elektronegativen Sauerstoff. Die Kohlenstoff-Kohlenstoff-Verbindung ist ja an sich sehr stabil. Denken sie nur einmal an den Diamanten!

Gerade dank der ihnen eigenen Reaktionsträgheit haben die Fluorkohlenstoffe in ausgedehnter

tem Maße Verwendung gefunden. Vor allem sind es ihre erstaunlichen Eigenschaften, die ihnen immer neue Anwendungsgebiete erschließen. Auch heute noch wartet die Chemie der Fluorkarbonate mit einer Fülle neuartiger Umlagerungen und neuen Reaktionen, mit einer Vielfalt der Bindungsarten auf, so daß oft überraschende Ergebnisse zu verzeichnen sind. So ist das unter dem Warenzeichen Heydeflon (DDR), Fluorplast-4 (Sowjetunion), Teflon (USA) bekannt gewordene Polytetrafluoräthylen, ein aus Fluorkohlenstoff hergestellter Thermoplast, äußerst hitzebeständig (bis 300° C) und chemikalienbeständig gegenüber Flußsäure, Schwefel-, Salpeter- und Salzsäure. Auch siedende Basen wirken nicht auf den Plast, und in keinem bekannten organischen oder anorganischen Lösungsmittel ist er lösbar.

Dieser Fluorplast, von allen Fluorplasten der wichtigste, wird nicht zufällig bisweilen organisches Platin genannt. Er ist ein vorzüglicher Werkstoff für die verschiedenen Gefäße, die in chemischen Laboratorien benutzt werden, für verschiedene Apparaturen in der chemischen Industrie, für Rohre verschiedener Zweckbestimmung. In der Welt würde man eine ganze Anzahl von Gegenständen aus Platin herstellen, wäre Platin nicht so kostspielig. Ein Fluorplast dagegen ist ein bedeutend billigerer Werkstoff.

Der Fluorplast ist von allen bekannten Stoffen der glatteste. Ein feines, auf die Tischplatte gelegtes Fluorplasthäutchen „fließt“ im buchstäblichen Sinne des Wortes unverzüglich zu

Boden. Kugellager aus Fluorplast müssen nicht geschweißt werden. Als vorzügliche Schmiermittel, die die herkömmlichen weit übertreffen, finden Fluorplaste immer mehr Anwendung. Und noch eines: Fluorplast ist ein vorzügliches Dielektrikum, ein in höchstem Maße hitzebeständiger Werkstoff.

Eine Fluorplastisolation kann auf  $400^{\circ}\text{C}$  erhitzt werden, eine Temperatur, die den Schmelzpunkt des Bleis übersteigt.

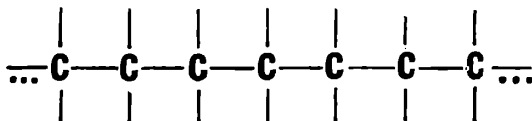
So ist unser Fluorplast wohl einer der erstaunlichsten Stoffe, die der Mensch auf künstlichem Wege erzeugt hat. Sein Molekül ist ein wahrer Gigant, wie ja überhaupt die Moleküle der meisten Fluorkarbone mit unglaublich hohen Molekulargewichten aufwarten.

In der Praxis finden Fluorplaste ein ausgedehntes Verwendungsgebiet, vor allem in der Chemie und Elektrotechnik. Wir können hier nur noch einige wenige Beispiele nennen: Fluorplastfasern sind ein hervorragendes Material für Filter, die für aggressive Chemikalien verwendet werden. Fluorplaste dienen aber auch als verschleißfeste Apparate- und Geräteteile, als äußerst zuverlässiges Isoliermaterial selbst bei Hochspannungsleitern oder zu Oberflächenbeschichtungen, die die Korrosionsfestigkeit des Metalls verbessern bzw. die Abnutzung der Maschinenteile verringern.

Auch als Verpackungsmaterial in der Nahrungsgüterindustrie eignet sich Fluorplast. Weit bekannt sind heute Backformen und Kochtöpfe, die mit Fluorplast beschichtet sind, so daß ein Einfetten vor dem Backen nicht erforderlich ist. Diese Schicht verhindert auch das

Anbrennen der Speisen. In der Medizin haben Gefäßprothesen aus Fluorplast, ja sogar künstliche Herzklappen aus Polytetrafluoräthylen zu hervorragenden Erfolgen geführt.

**Bündnis des Kohlenstoffs und des Siliziums** In der Natur können zwei chemische Elemente Anspruch auf eine Ausnahmestellung erheben. Der Kohlenstoff bildet die Grundlage alles Lebenden, da seine Atome fähig sind, sich zu kettenartigen Verbindungen fest zusammenzufügen.

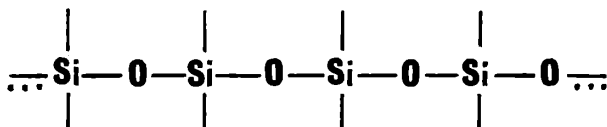


Das Silizium bildet das Hauptelement der gesamten anorganischen Natur. Doch die Siliziumatome sind zum Unterschied von Kohlenstoffatomen zur Bildung derartig langer Ketten unfähig. Daher ist die Anzahl der in der Natur vorkommenden Siliziumverbindungen geringer als die von Kohlenstoffverbindungen. Allerdings übertreffen sie an Zahl die Verbindungen eines jeden anderen chemischen Elements.

Die Wissenschaftler haben die naturgegebenen Mängel des Siliziums zu beseitigen versucht. Silizium ist ja ein vierwertiges Element wie der Kohlenstoff. Zwar ist die Bindung zwischen den Kohlenstoffatomen bedeutend fester als die zwischen den Siliziumatomen, dafür aber legt Sili-

zium keine so große Aktivität an den Tag. Müßte es nicht möglich sein, unter der Mitwirkung des Siliziums Verbindungen zu erzeugen, die den organischen ähneln? Müßten diese „halborganischen“ Verbindungen nicht erstaunliche Eigenschaften besitzen?

Anfangs hatten die Forscher kein Glück. Allerdings gelang ihnen der Nachweis, daß Silizium zur Bildung von Verbindungen fähig ist, in denen eigene Atome in einer Wechselfolge mit Sauerstoffatomen auftreten. Also folgendermaßen:



Jedoch waren diese Verbindungen wenig stabil. Ein wenig später wurden tatsächlich Verbindungen hergestellt, bei denen Silizium- und Kohlenstoffatome einander abwechseln. Derartige Verbindungen, man nannte sie siliziumorganische oder „Silikone“, zeichnen sich durch besondere Eigenschaften aus. Auf ihrer Grundlage gewann man verschiedene Harze und aus diesen Plaste, die längere Zeit selbst hohen Temperaturen ausgesetzt werden können.

Die auf der Grundlage siliziumorganischer Polymere hergestellten Kautschuke sind gleichfalls Träger hervorragender Eigenschaften. Sie zeichnen sich vor allem durch ihre Wärmebeständigkeit aus. Einige Silikongummisorten bewahren ihre Abriebfestigkeit bei Temperaturen bis 350°C. Das ist besonders in der Flugzeugindustrie wich-

tig, da ja die Fahrwerke der Verkehrsmaschinen außerordentlich großen Beanspruchungen unterworfen sind.

Silikonkautschuke quellen nicht in organischen Lösungsmitteln. Daher dienen sie zur Herstellung von Rohrleitungen, in denen Brennstoffe befördert werden.

Die Zähflüssigkeit einiger Silikonharze und -flüssigkeiten bleibt in einem weiten Temperaturbereich fast völlig stabil. Diese Eigenschaft erschloß ihnen den Einsatz als Schmiermittel. Dank der geringen Flüchtigkeit und der hohen Siedetemperatur werden Silikonflüssigkeiten in ausgedehntem Maße in Pumpsanlagen verwendet, mit denen hohe Vakua erzielt werden sollen.

Siliziumorganische Verbindungen besitzen wasserabstoßende Eigenschaften. Deshalb geben sie gute Imprägniermittel für Gewebe ab. Aber sie schützen nicht nur Gewebe. Bei der Errichtung bedeutender Wasserbauten unternahm man den Versuch, verschiedene siliziumorganische Flüssigkeiten zum Schutze der Baustoffe zu verwenden. Mit derartigen Verbindungen beschichtete Steine und Baumaterialien vermögen auch, der zerstörenden Wirkung des Wassers zu widerstehen. Das Sprichwort „Steter Tropfen höhlt den Stein“ hat hier keine Gültigkeit mehr.

Auf Silikongrundlage wurden in letzter Zeit wärmebeständige Emailen hergestellt. Mit einer derartigen Emailleschicht bedeckte Kupfer- oder Eisenplatten halten mehrere Stunden lang selbst Temperaturen bis 800° C aus.

Mit unseren Aufzählungen haben wir nur die allerersten Ergebnisse des eigenartigen Kohlenstoff-Silizium-Bündnisses erfaßt. Und dennoch: die Zweieinigkeit Kohlenstoff-Silizium konnte die Chemiker auf die Dauer nicht befriedigen. Sie stellten sich die Aufgabe, in die Moleküle der siliziumorganischen Verbindungen noch andere Elemente einzubauen, zum Beispiel Aluminium, Titan oder Bor. Auch dieses Problem wurde erfolgreich gelöst. Eine völlig neue „Stoffklasse“ erblickte das Licht der Welt. In diesen Polymeren kann es nunmehr verschiedenartige Kettenglieder geben, zum Beispiel Silizium-Sauerstoff-Bor oder Silizium-Sauerstoff-Aluminium oder Silizium-Sauerstoff-Titan. Der Schmelzpunkt dieser Substanzen liegt im Temperaturbereich von 500 bis 600° C. Das stempelt sie zu Konkurrenten zahlreicher Metalle und Legierungen.

**Erstaunliche Siebe** In ihrem Aufbau sind die Substanzen, von denen nun die Rede sein soll, sehr originell. Sie stellen organische Moleküle gigantischen Ausmaßes dar, und sie sind Träger mancher interessanten Eigenschaft.

Gleich vielen Plasten sind sie in Wasser und organischen Lösungsmitteln nicht löslich. Zu ihren Bestandteilen gehören die sogenannten ionenbildenden Gruppen, d. h. solche, die fähig sind, in Lösungen (insbesondere in Wasser) diese oder jene Ionen zu bilden. Dank diesem Umstand gehören sie der Klasse der Elektrolyte an.

Das Wasserstoffion kann darin durch ein Metall ersetzt werden. Auf diese Weise vollzieht sich ein Ionenaustausch.

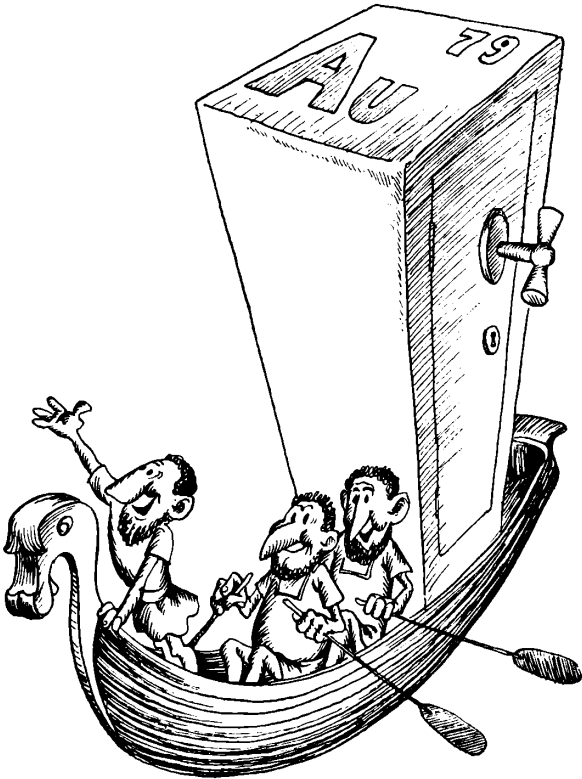
Diese eigenartigen Verbindungen erhielten den Sammelnamen Ionenaustauscher, kurz auch Austauscher genannt. Sind sie zur Wechselwirkung mit Kationen befähigt, heißen sie Kationenaustauscher; vollzieht sich die Wechselwirkung mit negativ geladenen Ionen, nennt man sie Anionenaustauscher. Über den Vorgang des Ionenaustausches erfuhr man zum erstenmal bei Untersuchungen der Bodenstruktur im neunzehnten Jahrhundert, als man feststellte, daß sich in Ackerböden Alkali- und Erdalkaliumionen austauschen können, ein Vorgang, der für die Düngung außerordentlich bedeutsam ist. Als Ionenaustauscher betätigen sich hier vor allem die natürlichen Humusstoffe, also organische Verbindungen.

Es gibt auch eine Reihe anorganischer Ionenaustauscher, zu denen bestimmte Silikate gehören.

Ein großer Fortschritt war jedoch die künstliche Herstellung von Austauschern. Die ersten organischen Ionenaustauscher wurden Mitte der dreißiger Jahre synthetisiert. Und sofort war ihnen die Anerkennung der Fachwelt sicher. Kein Wunder! Die Austauscher vermögen, Zauberkünstlern gleich, hartes Wasser in weiches umzuwandeln, Salzwasser in Süßwasser, und vieles andere.

Stellen sie sich einmal zwei Säulen vor. Die eine ist von Kationen, die andere von Anionen ausgekleidet. Nehmen wir an, wir wollten gewöhnliches, kochsalzhaltiges Wasser entsalzen. Wir leiten das Wasser zuerst durch das Rohr mit den Kationen. Es erfolgt ein Austausch aller

Natriumionen gegen Wasserstoffionen. Nun wird das Wasser nicht mehr Natriumchlorid, sondern



Salzsäure ( $\text{HCl}$ ) enthalten. Danach lassen wir das Wasser durch das Anionenrohr durch. Befindet es sich im Hydroxylzustand, sind also Hydroxylionen hier die Anionenaustauscher, wer-

den alle Chlorionen der Lösung gegen Hydroxylionen ausgetauscht, die ohne jede Verzögerung mit den freien Wasserstoffionen Wassermoleküle bilden. Auf diese Weise wurde das natriumchloridhaltige Wasser bei seinem Durchgang durch die Ionenaustauschsäulen restlos entsalzen. Was seine Geschmackseigenschaften anbelangt, steht es wahrhaftig besten Sorten destillierten Wassers nicht nach.

Doch nicht allein der Wasserentsalzung verdanken die Austauscher ihre große Popularität. Es erwies sich, daß die Austauscher die Ionen in verschieden starkem Grad festhalten. Beispielsweise reißen die mit Lithiumionen beladenen Rohre die hindurchfließenden Ionen stärker an sich als die mit Wasserstoffionen ausgekleideten Austauscher, und die Rubidiumionen sind stärker als die Kaliumionen. Es ergab sich somit die Möglichkeit, mit Hilfe der Austauscher verschiedene Metalle voneinander zu trennen.

Die Austauscher spielen heute eine bedeutende Rolle in verschiedenen Bereichen der Industrie. Die älteste Anwendung ist die Wasseraufbereitung. In der Photographie kannte man lange Zeit kein geeignetes Verfahren zur Wiedergewinnung des kostbaren Silbers. Diese Aufgabe wurde von den Austauschern zufriedenstellend gelöst. Auch zur Bestimmung, Anreicherung und Gewinnung von Spurenelementen, zur Trennung von Uran und Plutonium, zur Reinigung technischer Lösungen dienen Ionenaustauscher.

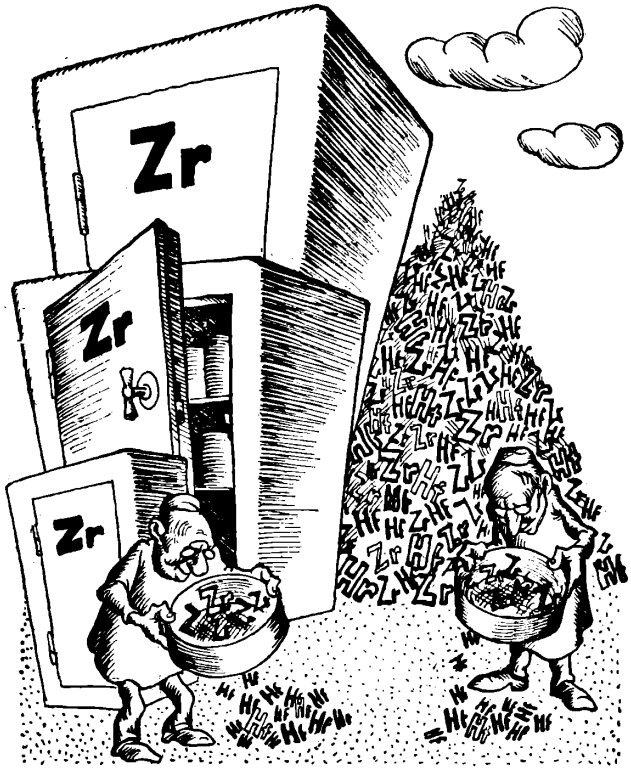
Könnte es nicht sein, daß der Mensch bald imstande sein werde, mit Hilfe der Austauscher aus dem Meereswasser wertvolle Metalle zu ge-

winnen? Wir können diese Frage mit Sicherheit bejahen. Obgleich das Wasser der Meere reich an verschiedenen Salzen ist, wird voraussichtlich die Gewinnung von edlen Metallen aus dem Wasser der Ozeane in nicht allzu ferner Zeit eine neue Errungenschaft sein.

Vorderhand steht dem folgende Schwierigkeit im Wege: Beim Durchgang des Meerewassers durch den Kationenaustauscher verhindern die darin enthaltenen Salze die Anlagerung der geringen Beimischungen edler Metalle. In letzter Zeit gelang es, Elektronenkunstharaustauscher herzustellen, die nicht nur den Austausch eigener Ionen gegen Metallionen aus der Lösung sichern, sondern auch als hochselektive Harze eine ausreichende Regenerierfähigkeit durch Abgabe eigener Elektronen besitzen. Die vor kurzem mit derartigen Kunstharen durchgeführten Versuche zeigten folgendes: Beim Durchgang einer silberhaltigen Lösung durch die Kunstharze schieden sich aus dem Kunstharz nicht Silberionen ab, sondern metallisches Silber, ohne daß das Kunstharz selber im Laufe einer beträchtlichen Zeit etwas von seinen Eigenschaften eingebüßt hätte. Das bedeutet also, daß beim Durchgang einer Mischsalzlösung durch den Elektronenaustauscher die regenerierungsfähigsten Ionen sich in Atome reinen Metalls umwandeln können. Die in der DDR hergestellten synthetischen Ionenaustauscher sind als Wofatite sehr bekannt geworden.

**Chemische Krebschere** Als man den Löwen noch für ein „Wüstentier“ hielt, sagte mancher Spaß-

vogel im Scherz: „Es gibt nichts Einfacheres, als in der Wüste einen Löwen zu fangen.“ Wie



aber sollte man sein „Jagdglück“ probieren? Nun, auch auf diese Frage wußte der Witzbold eine Antwort: „Man nehme ein Sieb und siebe

fleißig den Wüstensand durch. Was geschieht? Der Sand fällt durch die Maschen, die Löwen bleiben im Netz.“

Doch was soll man machen, wenn sich ein äußerst wertvolles chemisches Element in „gemischter Gesellschaft“ befindet, also mit einer großen Anzahl weniger wertvoller Elemente verbunden ist? Wie kann man eine Substanz von unerwünschten Beimischungen befreien, die vielleicht sogar in äußerst geringen Mengen vorhanden sind?

Die Notwendigkeit dazu ergibt sich in der Praxis des öfteren. Der erlaubte Höchstmengenanteil z. B. des Hafniums in dem für Kernreaktorbauteile verwendeten Zirkonium beträgt einige Zehntausendstel eines Prozents. Jedoch im gewöhnlichen Zirkonium sind ungefähr zwei Zehntel eines Prozents enthalten.

Die beiden Elemente ähneln einander sehr, die üblichen Trennverfahren sind deshalb hier wirkungslos. Selbst das erstaunliche chemische „Sieb“ der Ionenaustauscher vermag hier nichts auszurichten. Doch Zirkonium wird dringend benötigt, vor allem aber ein Zirkonium allerhöchsten Reinheitsgrades.

Jahrhundertlang hielten sich die Chemiker an ein einfaches Rezept, das folgendermaßen lautet: „Ähnliches ist in Ähnlichem löslich“. Anorganische Substanzen lösen sich in anorganischen Lösungsmitteln, organische in organischen. Zahlreiche Salze von Mineralsäuren sind gut löslich in Wasser, in wasserfreier Flußsäure, in flüssiger Blausäure. Eine ganze Anzahl organischer Stoffe sind verhältnismäßig gut in organischen Lösungs-

mitteln wie Benzol, Azeton, Chloroform und Schwefelkohlenstoff löslich.

Doch was für ein Verhalten wird eine Substanz an den Tag legen, die sozusagen eine Art Mittel- ding zwischen organischen und anorganischen Verbindungen darstellt? Das Blattgrün z. B. ist, wie wir bereits erfahren haben, eine metallor- ganische Verbindung, die in vielen organischen Lösungsmitteln gut löslich ist. Es gibt aber eine beträchtliche Anzahl metallorganischer Verbin- dungen, die in der Natur nicht vorkommen, die von Menschenhand erzeugt worden sind. Vielen ist die Löslichkeit in organischen Lösungen eigen, wobei die Natur des Metalls bestimmend ist für diese Fähigkeit. Aus dieser Tatsache lei- teten die Chemiker ein neues Verfahren ab.

Bei Kernreaktoren müssen in bestimmten Zeit- abständen die verbrauchten Uranblöcke ersetzt werden, obgleich der Anteil der Beimischungen (Spaltprodukte des Kernzerfalls) üblicherweise nicht mehr als den tausendsten Teil eines Pro- zents beträgt. Zuerst werden die Blöcke in Sal- petersäure aufgelöst. Die Uranmengen sowie die anderen beim Kernspaltungsprozeß gebildeten Metalle wandeln sich in salpetersaure Salze um. Einige Beimischungen wie Xenon oder Jod ent- weichen von selbst in Form von Gasen oder Dämpfen. Die anderen, beispielsweise Blei, ver- bleiben im Niederschlag.

Die gewonnene Lösung enthält also außer Uran auch Beimischungen zahlreicher Metalle. Nach- zuweisen sind darin Plutonium, Neptunium, Sel- tenerden, Technetium und andere. Ihre Gewin- nung erfolgt mit Hilfe organischer Substanzen.

Man vermengt die Salpetersäurelösung (mit dem darin aufgelösten Uran und den Beimischungen) mit der Lösung einer organischen Substanz, mit Tributylphosphat. Sämtliche Uranmoleküle gehen in die organische Phase über, die Beimischungen verbleiben in der salpetersauren Lösung. Die entstandenen Phasen werden auf technischem Wege voneinander getrennt.

Ein solcher Vorgang heißt Extraktion. Es ist ein Diffusionsprozeß, der auf der unterschiedlichen Lösbarkeit der Komponenten in den Lösungsmitteln beruht. Nach zweimaliger Extraktion ist Uran von den Beimischungen fast restlos befreit und kann für den Aufbau der Uranblöcke von neuem verwendet werden. Die Beimischungen werden einer weiteren Absonderung unterzogen, um die wichtigsten Bestandteile wie Plutonium sowie einige radioaktive Isotope durch Extraktion zu gewinnen.

Auf ähnliche Weise können Zirkonium und Hafnium voneinander getrennt werden.

Der Extraktionsvorgang spielt heute in der Technik eine große Rolle. Er dient nicht nur der Reinigung anorganischer Verbindungen, sondern auch zahlreicher organischer Substanzen, z. B. von Vitaminen, Fetten und Alkaloiden.

**Chemie im Ärztekittel** Sein Name hat einen guten Klang: Theophrastus Bombastus von Hohenheim, genannt Paracelsus (1493—1541). Er war ein hervorragender Arzt und Naturforscher. Im Volke genöß er den Ruf eines kurierenden Wundertäters.

Schon in den finsternen Zeiten des Mittelalter

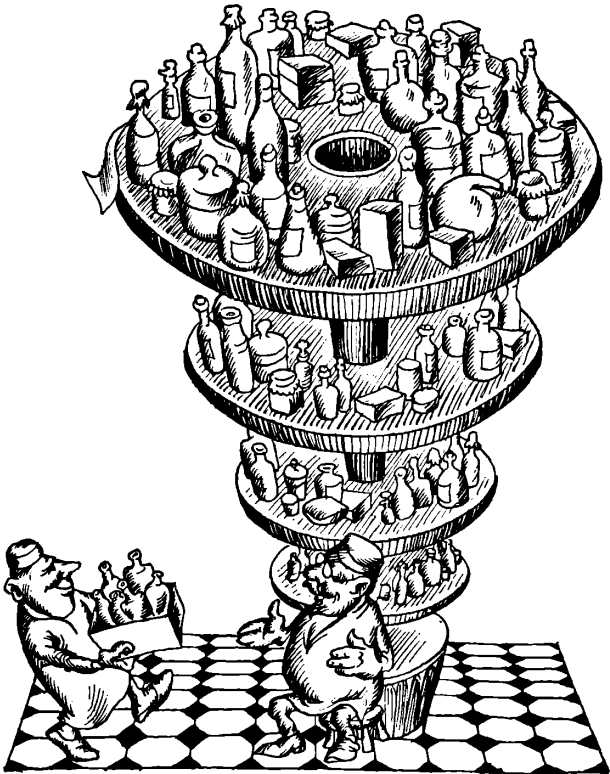
hatten sich enge Bande zwischen der Chemie und der Medizin herausgebildet. Die Chemie hatte sich zwar zu jener Zeit noch nicht das Anrecht auf die Bezeichnung „Wissenschaft“ erworben. Ihre Lehren entsprangen zu einem großen Teil mystischen Vorstellungen, und ihre Kräfte vergeudete sie in fruchtlosen Bemühungen, den geheimnisvollen Stein der Weisen zu finden.

Obzwar in den Netzen der Mystik verfangen, hatte sich die Chemie dennoch genügend Wissen angeeignet, um Menschen von schwerem Siechtum zu befreien oder ihre Pein zu lindern. So wurde die Iatrochemie geboren, die Heilchemie. Sie lehrte, daß alle Vorgänge im Körper von den drei „Grundstoffen“, Schwefel, Quecksilber und Salz, bewirkt würden. Krankheiten waren ein Zeichen dafür, daß diese Stoffe im Körper nicht mehr im richtigen Verhältnis zueinander vorhanden waren.

Manche Chemiker des sechzehnten, siebzehnten und achtzehnten Jahrhunderts nannten sich Apotheker oder Pharmazeuten. Sie brauten aus uralten „Rezepten“ vielerlei Heilmittel zusammen. Dabei blieb ihnen selber vieles unklar. Sie wußten nicht einmal, weshalb die „wundertätigen“ Arzneien den Menschen nützten. Oft kam es auch vor, daß ihre Mixturen und Salben den Patienten schaden.

Unter den „Apothekern“ jener Zeit zählte Paracelsus zu den bedeutendsten. Auf der Liste der von ihm hergestellten Heilmittel stehen Quecksilber- und Schwefelsalben (übrigens werden sie bei Hauterkrankungen noch bis auf den heutigen

Tag verschrieben), Eisen- und Antimonsalze, verschiedene pflanzliche Säfte.  
Zu Beginn vermochte die Chemie der Heilkun-



de lediglich solche Substanzen zur Verfügung zu stellen, die in der Natur vorkommen. Verständlich auch, daß diese Heilmittel damals

nur in geringen Mengen erzeugt werden konnten. Die Medizin forderte mehr.

Blättert man heute in einem modernen Arzneibuch, stellt man fest, daß nur 25 Prozent der Medikamente sozusagen „Naturpräparate“ sind (darunter Auszüge und Aufgüsse verschiedener Pflanzen), die restlichen 75 Prozent sind in der Natur nicht vorhandene, von der allmächtigen Chemie synthetisch erzeugte Arzneien.

Die erste Synthese eines Arzneimittels gelang vor ungefähr 100 Jahren. Es war seit langem bekannt, daß Salizylsäure eine gute Heilwirkung bei akutem Rheumatismus besitzt. Doch es war schwierig, sie aus pflanzlichen Ausgangsstoffen zu gewinnen. Erst 1874 fand man ein einfaches Verfahren zur Gewinnung der Salizylsäure aus Phenolkarbonsäure.

Die Säure wurde bald zum Grundstoff (Ausgangsmaterial) zahlreicher Arzneien, zum Beispiel der Azetylsalizylsäure (bekannt als Acesal oder Aspirin). Medikamente sind in der Regel nicht langlebig — sie werden stets durch neuere, vollkommenere ersetzt, die besser wirken. Das Acesal jedoch stellt eine Ausnahme dar. Von Jahr zu Jahr offenbart es neue erstaunliche Eigenschaften. Mit der Zeit hat es sich erwiesen, daß es nicht nur ein fieber- und schmerzstillendes Mittel ist, sondern auch als Bestandteil vieler Kombinationspräparate gegen manche Leiden erfolgreich eingesetzt werden kann. Ein althergebrachtes Mittel ist das allbekannte Aminophenazon (auch als Pyramidon oder Amidopyrin bezeichnet). Das Jahr 1896 war sein Geburtsjahr.

Heute synthetisieren die Chemiker täglich mehrere neuartige Arzneien. Diese weisen die unterschiedlichsten Eigenschaften auf, dienen den verschiedensten Zwecken, angefangen von schmerzstillenden Mitteln bis zu Medikamenten, die psychische Erkrankungen heilen helfen. Die Erlösung des Menschen von Krankheiten — das ist wohl eine der edelsten Aufgaben der Chemiker. Sie ist aber zugleich auch die schwierigste.

In jahrelangen Versuchen erstrebte der deutsche Chemiker Paul Ehrlich die Synthese eines Präparates zum Einsatz gegen ein schreckliches Leiden, die Syphilis. Bei jedem neuen Versuch gelang eine neue Einzelheit, doch das Gesamtergebnis befriedigte den Forscher noch lange nicht. Erst beim 606. Versuch gewann Ehrlich ein höchst wirksames vollsynthetisches Heilmittel: das als Salvarsan bekanntgewordene Arphenamin, eine arsenhaltige Kohlenstoffverbindung. Das war im Jahre 1907. Zehntausende Menschen wurden nicht nur von der Syphilis, sondern auch von anderen heimtückischen Spirellenerkrankungen befreit. Ehrlich führte die Forschungen weiter. Er wurde zum Begründer der Chemotherapie. Der 914. Versuch ergab ein noch wirksameres Mittel: das Neosalvarsan. Mit diesem Präparat auf der Basis von Arphenamin haben die Ärzte jahrzehntelang große Erfolge erzielt. Noch wirkungsvoller erwiesen sich dann später leichter lösliche Mittel, vor allem die Antibiotika.

Es ist ein langer Weg, den jedes neue Präparat aus dem Labor zum Verkaufstisch in der

Apotheke zurücklegen muß. Denn in der Medizin waltet ein ehernes Gesetz: Ehe ein neues Mittel nicht einer allseitigen Prüfung unterzogen worden ist und einwandfreie Resultate vorliegen, wird es für die ärztliche Praxis nicht freigegeben. Eine Nichtbefolgung der Regel aus



Profitgier, wie das in kapitalistischen Ländern des öfteren vorkommt, hat bisweilen tragische Folgen. Vor noch nicht sehr langer Zeit machten pharmazeutische Werke in Westdeutschland viel Reklame für ein neues Schlafmittel, das Congergan genannt wurde. Tatsächlich genügte ein einziges weißes Tablettchen, damit der Mensch, der an chronischer Schlaflosigkeit litt, in tiefen Schlaf versank. Dem „wundertätigen“ Mittel sang man Lobeshymnen. Doch es erwies

sich als heimtückischer Feind des Kindes im Mutterleib. Tausende Krüppel kamen zur Welt — entsetzlich hoher Preis für ein nicht genügend geprüftes, voreilig auf den Markt gebrachtes „Arzneimittel“.

Es genügt also nicht, daß der Arzt und der Chemiker wissen, daß eine bestimmte Arznei bei einer bestimmten Erkrankung mit Erfolg angewendet werden kann. Sie müssen sich auch darüber im klaren sein, auf welche Weise das Mittel wirkt, auf welche Weise es in den Kampf des Körpers gegen die Krankheit eingreift.

Ein Beispiel mag das verdeutlichen: Gegenwärtig werden oft Schlafmittel verschrieben, deren Grundsubstanz die sogenannten Barbitursäuren sind. Es handelt sich um Verbindungen, deren Bestandteile Kohlenstoff-, Wasserstoff-, Stickstoff- und Sauerstoffatome sind. Außerdem sind an eines der Kohlenstoffatome zwei sogenannte Alkylgruppen gebunden, d. h. Kohlenwasserstoffmoleküle, die ein Wasserstoffatom abgegeben haben. Die Chemiker kamen zu folgender Schlußfolgerung: Nur dann wird die Barbitursäure Schlafmittelwirkung besitzen, wenn die Summe der in den Alkylgruppen enthaltenen Kohlenstoffatome zumindest die Zahl vier ergibt. Je höher die Summe, desto besser, andauernder und tiefer ist die Schlafmittelwirkung. Werden Barbiturate in größeren Mengen eingenommen, so wirken sie giftig.

Je gründlicher die Wissenschaftler das Wesen einer Krankheit erkannt haben, desto zielsicherer werden die Forschungen der Chemiker sein. Die Pharmakologie, deren Betätigungsfeld einst

nur die Herstellung der Arzneimittel und die Erteilung von Anweisungen für deren Anwendung war, nimmt in steigendem Maße die Eigenschaft einer exakten Wissenschaft an. Der Pharmakologe von heute muß Chemiker und Biologe, Arzt und Biochemiker sein. Und er muß vor allem ein verantwortungsbewußter, ein gesellschaftspolitisch aktiver Mensch sein, der sich mit seiner ganzen Kraft dafür einsetzt, der Menschheit Contergan-Tragödien und ähnliches Unheil zu ersparen.

Die Synthese von medizinischen Präparaten ist eine der größten Errungenschaften der Chemiker, die sich, gleichsam als Schöpfer einer zweiten Natur, unsterbliche Verdienste erworben haben.

...Zu Beginn unseres Jahrhunderts ließen die Chemiker nicht von dem Plan ab, neue Farbstoffe herzustellen. Als Ausgangsstoff verwendeten sie die sogenannte Sulfanilsäure, die ein sehr „elastisches“, umbauwilliges Molekül besitzt. Sie wurde zu einem wichtigen Ausgangsstoff für die Synthese äußerst nützlicher Farbstoffe, der Azofarbstoffe. Sie entstehen dadurch, daß aus diesem primären Amin eine kupplungsfähige Diazoniumsalzlösung erzeugt wird, die dann mit besonderen aromatischen Aminen und Phenolen sowie deren Sulfon-, oder Karbonsäuren, mittels einer sogenannten Kupplungsreaktion verknüpft wird.

Doch vor 1935 war niemand auf den Gedanken gekommen, daß die synthetisch gewonnenen Azofarbstoffe zugleich höchst wirksame Arzneimittel sind. Nachdem dies erwiesen war, wurden die

Belange der Färberei zur zweitrangigen Angelegenheit. Rastlos verfolgten Chemiker die Synthese neuer Heilmittel mit dem Sammelnamen Sulfonamide, deren Grundbaustein das Amid der Sulfanilsäure, das Sulfanilamid ist. Die bekanntesten unter ihnen sind heute: Sulfacetamid (Albucid), Sulfafurazol (Sulfasol), Sulfaphenazol (Depocid), Sulfamethoxypyridazin (Depovernil). In der Rangordnung der chemischen Mittel, die im Kampfe gegen Mikroben eingesetzt werden, behaupten heutzutage die Sulfonamide einen der ersten Plätze. Im Jahre 1958 wurden auch die ersten langwirkenden Sulfonamide geschaffen, die in niedrigen Dosen verabreicht werden können, weil sie langsamer abgebaut bzw. ausgeschieden werden.

...Die Indianer in Südamerika gewannen aus der Rinde und den Wurzeln eines Baumes ein tödliches Gift mit dem wohlklingenden Namen Kurare. Der von einem Pfeil Getroffene sank tot zu Boden, wenn die Pfeilspitze mit dem Kuraregift benetzt worden war.

Was führte den raschen Tod herbei? Ehe die Chemiker die Frage zu beantworten vermochten, mußten sie das Wesen des rätselhaften Giftes erkennen.

Zu welchem Schlusse gelangten sie? Hauptträger der Giftwirkung in der Kuraresubstanz ist ein Alkaloid, das in seiner giftigsten Form im sogenannten Kalebassenkurare vorkommt. Gelangt es in den Organismus, verlieren die Muskeln ihre Fähigkeit zur Kontraktion. Sie erstarrten. Der Mensch ist nicht mehr imstande, zu atmen. Es tritt der Tod ein.

Unter bestimmten Bedingungen jedoch kann das Gift von Nutzen sein. Es kann beispielsweise zum Helfer des Chirurgen werden, der es bei komplizierten Eingriffen, zum Beispiel bei Herzoperationen, verwendet, um die Muskeln der Lunge auszuschalten und den Organismus auf künstliche Atmung umzustellen. Hier ist das Tubokurarin, ein Hauptalkaloid des Tubokurare, das weniger giftig als die anderen Kuraarten ist, von großem Nutzen. Beispielsweise dient das Tubokurarinchlorid dank seiner nur kurzanhaltenden Lähmungswirkung zur Behandlung von Tetanuskrämpfen und zur vollständigen Erschlaffung der Muskeln während der Narkose.

Doch das Mittel ist sehr teuer. Es war erforderlich, ein allgemein zugängliches zu finden.

Wiederum standen die Chemiker vor einer schwierigen Aufgabe. Sie unterzogen das Tubokurarinmolekül einer allseitigen Prüfung, spalteten es in seine Bestandteile auf, erforschten sie und klärten Schritt für Schritt das Verhältnis zwischen chemischem Aufbau und der physiologischen Wirkung des Präparates auf. Als verantwortlich für die Wirkung wurden besondere Gruppen erkannt, die jeweils ein positiv geladenes Stickstoffatom enthalten.

Nun konnten die Chemiker darangehen, die Natur nachzuahmen. Da aber viele natürliche Kurarealkaloide zugleich als Ganglienblocker wirken, so daß unangenehme Nebenwirkungen zu verzeichnen sind, mußten sie auch den Versuch wagen, die Natur zu überflügeln. Gleich zu Beginn gewannen sie ein Präparat, das dem

Tubokurarin in der Wirkung nicht nachstand. Sie gaben sich damit nicht zufrieden. Ein neues Präparat, das Sinkurin, wurde gewonnen, das doppelt so aktiv ist wie das Tubokurarin.

Ein weiteres Beispiel sei genannt, das noch überzeugender ist: die Bekämpfung der Malaria. Ein natürliches Alkaloid, das Hauptalkaloid der Chinarinde, das Chinin, wurde aus den gequollenen Wurzeln mit Hilfe aromatischer Kohlenwasserstoffe extrahiert und zur Bekämpfung der Malaria eingesetzt. Den Chemikern gelang es, bereits 1925 das Präparat Pamaquin (Plasmochin) synthetisch herzustellen, dessen Wirkung sechzigmal so stark ist wie die des Chinins. Außerdem gibt es das Chloroquin (Chlorochin) und einige andere Chemotherapeutika.

Die moderne Medizin verfügt über eine wahre Schatzkammer von Heilmitteln, sozusagen für alle Fälle des Lebens, fast für alle Krankheiten, deren Wesen der Mensch erkannt hat.

Es gibt starkwirkende, nervenberuhigende Mittel, die den Menschen aus heftigster Erregung in stoische Ruhe versetzen. Es gibt Präparate, die den Patienten restlos von Angstgefühlen befreien.

Es besteht heute bereits eine ganze Gruppe von Psychopharmaka, von Arzneimitteln, die die menschliche Psyche zu beeinflussen vermögen. Zu ihnen gehören die Tranquillizer (z. B. Meprobramat) oder die Neuroleptika. Das dieser Gruppe angehörige Reserpin spielt bei der Behandlung einiger psychischer Erkrankungen — der Schizophrenie — eine große Rolle. Bei der Behandlung von psychischen Erkrankungen hat

sich bis auf den heutigen Tag die Chemotherapie hervorragend bewährt.

Doch die Arzneimittelchemie hat auch ihre Schattenseiten. Sie kennt z. B. ein so verhängnisvolles Mittel (ein anderes Beiwort wäre zweifellos weniger zutreffend) wie das LSD-25 (Lysergsäurediäthylamid).

In der experimentellen Medizin dient es als Mittel zur Steigerung des psycho-physischen Leistungsvermögens, zur Erzeugung von Modellpsychosen.

In manchem kapitalistischen Land nehmen viele Menschen zu diesem Psychogift Zuflucht, um auf kurze Dauer von „irdischer Schwere befreit“ zu sein. Es ruft verschiedene Symptome der Schizophrenie (optische und akustische Halluzinationen) hervor. Nicht selten sind die Fälle, bei denen nach Einnahme des LSD-25 der normale Geisteszustand nicht mehr wiederhergestellt werden konnte.

Die Weltstatistik besagt: Gegenwärtig sind Herzinfarkte, Insuffizienzen und Sklerosen Haupttodesursache. Resolut nahmen deshalb auch die Chemiker den Kampf gegen diese Erzfeinde der Menschen auf. Immer neue Herzmittel werden erfunden, neue Präparate zur Erweiterung der Gefäße hergestellt.

Im Kampf mit der Tuberkulose tragen in der Regel die von den Chemikern synthetisierten Tuberkulosestatika, die als Chemotherapeutika eine wirksame Arznei gegen die Tuberkelbakterien darstellen, den Sieg davon. Die wichtigsten sind das INH (Isonikotinsäurehydrazid) und PAS (Para-Aminosalizylsäure).

Hartnäckig suchen die Wissenschaftler nach geeigneten Mitteln, um einer schrecklichen Plage der Menschheit Herr zu werden, die als Krebs bezeichnet wird. Auf diesem Gebiet muß jedoch noch viel Forschungsarbeit geleistet werden. Neue „wundertätige“ Heilmittel erwarten die Ärzte von den Chemikern. Es wird nicht vergebens sein. Die Chemie wird ihre Fähigkeiten unter Beweis stellen.

**Der Strahlenpilz wirkt wunder** Das Wort Antibiotikum ist seit langem den Ärzten und den Biologen bekannt. In der Fachliteratur wurde es hin und wieder erwähnt. Aber es sagte demjenigen nichts, die der Biologie und der Medizin fern standen. Selbst unter den Chemikern gab es nur wenige, die mit dieser Bezeichnung genauere Vorstellungen verbanden. Heute ist das Wort Antibiotikum schon Schulkindern ein Begriff.

Unter Antibiotika versteht man im allgemeinen Stoffwechselprodukte von Mikroorganismen, die fähig sind, Mikroorganismen — vor allem Krankheitskeime — abzutöten oder in ihrer Entwicklung zu hemmen.

Noch bevor der Mensch den Begriff Antibiotika seinem Wortschatz einverleibt hatte, kannte er das Wort „Mikroben“. Diese Mikroorganismen — so wurde festgestellt — verursachen manche Krankheiten, wie Lungenentzündung, Gehirnhautentzündung, Ruhr, Typhus oder Tuberkulose. Um dagegen ankämpfen zu können, benötigt der Mensch Antibiotika.

Bereits im Mittelalter wußte man über die Heil-

wirkung einiger Strahlenpilzarten Bescheid. Allerdings hatten die Jünger Äskulaps von anno dazumal eine recht eigenartige Vorstellung davon. Sie waren der Ansicht, nur Schimmelpilze vom Schädel eines gehängten oder geköpften Verbrechers könnten von Heilwirkung sein. Erst in unserem Jahrhundert wurde die biochemische Wirkung der Strahlenpilze aufgedeckt.

Bei der Erforschung einer Strahlenpilzart gelang es dem englischen Mediziner und Bakteriologen Sir Alexander Fleming, den aktiven Träger auszusondern und seine antibiotische Wirkung festzustellen. Die Welt wurde mit dem ersten Antibiotikum, dem Penizillin, beschenkt.

Das Penizillin erwies sich als ein vorzügliches Mittel gegen alle möglichen Krankheitserreger: Streptokokken, Staphylokokken usw. Es ist sogar imstande, die langschraubig gedrehten Spirochäten, die Erreger der Syphilis und anderer Krankheiten, zu besiegen.

Entdeckt hatte Fleming das Penizillin im Jahre 1928. Entschlüsselt wurde die Strukturformel erst 1945. Eine vollständige Synthese im Labor gelang erstmalig im Jahre 1947. Hatte der Mensch wieder einmal die Natur übertrumpft? Bei dieser Synthese war das nicht der Fall. Die Penizillinsynthese ist sehr schwierig. Bedeutend einfacher ist die Gewinnung des Antibiotikums aus Strahlenpilzen. Antibiotika werden deshalb auf dem Wege einer Biosynthese erzeugt.

Zunächst hat der Mikrobiologe im Laboratorium die Vorkulturen zu züchten. Mit ihnen wird

dann die sorgfältig vorbereitete Nährlösung beimpft, und nun entwickelt sich in einem wäßrigen Medium unter optimaler Temperaturführung und ausreichender Belüftung, unter sterilen Bedingungen, ein biochemischer Prozeß, der als Fermentation bezeichnet wird. Das sind chemische Reaktionen, bei denen die von den Mikroorganismen gebildeten Enzyme die Rolle von Katalysatoren spielen. Gleichzeitig vergrößert sich die Organismenmenge um ein Vielfaches, die „Kultur“ wächst. Es erfolgt dabei eine Antibiotikabildung.

Nachdem der Mikrobiologe die Lösung mit den angesiedelten Mikroorganismen unter sterilen Bedingungen gewonnen hat, muß der Chemiker eingreifen. Seine Aufgabe ist es, den aktiven Träger, die Antibiotika, auszusondern. Für die Isolierung und Reindarstellung der Antibiotika werden verschiedene Verfahren angewendet, je nach den physikalischen und chemischen Eigenschaften der Fermentationsprodukte. Spezielle Adsorbenten „reißen“ die Antibiotika, die z. B. nicht durch organische Lösungsmittel aus dem Kulturfiltrat bzw. Filtrationsrückstand extrahiert werden können, mit Hilfe „chemischer Zangen“ an sich. Diese Adsorption geschieht durch Aktivkohle oder durch Ionenaustauscher.

Der auf diese Weise gewonnene „Rohstoff“ muß noch langwierigen Reinigungsverfahren unterzogen werden, ehe es gelingt, eine reine, kristalline Substanz zu erzielen.

Chemiker und Biologen bemühten sich, den Schimmelpilz, aus dem Penizillin gewonnen wird und der sich als wenig „produktiv“ erwiesen

hatte, durch Selektion der Stämme und durch Beeinflussung mit chemischen Substanzen zu „veredeln“. Schließlich konnte sogar eine neue Pilzart gezüchtet werden, die sich in der Penizillinproduktion bedeutend aktiver gebärdet. Inzwischen ist es auch gelungen, halbsynthetische Penizilline in größerem Umfange zu produzieren.

Heute ist die Reihe der Antibiotika recht eindrucksvoll. Man findet darunter das Streptomycin und die Tetrazyklin-Antibiotika, das Chloramphenikol, das Novobiozin und das Neomycin. Insgesamt sind bis auf den heutigen Tag bereits an die tausend verschiedene Antibiotika bekannt, an die hundert gelangen zur Anwendung bei der Behandlung verschiedener Krankheiten. Einige Antibiotika finden auch zum Frischhalten von Fleisch, Fisch und Geflügel Verwendung. Dabei werden die Lebensmittel für kurze Zeit in Lösungen dieser Antibiotika eingetaucht. Ihre Haltbarkeit verdreifacht sich auf diese Weise. Noch wichtiger jedoch ist die Anwendung von Oxytetrazyklin, Chlortetrazyklin und Penizillin als Zusatz zu Futtermitteln für Schweine, Kälber und Geflügel. Das Oxytetrazyklin wurde unter der Bezeichnung Terramycin beispielsweise in der Tierernährung bekannt. Schon geringste Mengen als Futtermittelzusatz fördern das Wachstum, also vor allem die Gewichtszunahme, bei besserer Ausnutzung des Futters. Auch gegen Pflanzenkrankheiten wurden Antibiotika erprobt. Wenn es auch im Labor gelang, Antibiotika vollständig zu synthetisieren, so werden die meisten Antibiotika nach

wie vor unter Mitwirkung von Mikroorganismen synthetisiert. Es gibt aber auch welche, die bereits halbsynthetisch gewonnen werden. Doch stets benötigen die Chemiker bei diesen Prozessen die „Hilfe“ der Natur. Der ganze Herstellungsvorgang des Präparates von Anfang bis zu Ende vollzieht sich allerdings im chemischen Werk. Ohne die wirkungsvollen chemischen Verfahren hätte der Begriff „Antibiotika“ niemals eine so weite Verbreitung und Anerkennung gefunden. Es wäre niemals zu der durch die Antibiotika vollzogenen Umwälzungen in der Behandlung der verschiedensten Krankheiten gekommen.

**Spurenelemente — die Vitamine der Pflanzen** Das Wort „Element“ kann verschiedenes bezeichnen, zum Beispiel Atome einer Art mit gleicher Kernladung. Doch was ist unter dem Begriff „Spurenelemente“ zu verstehen? Es ist der Sammelname für chemische Elemente, die im tierischen und pflanzlichen Organismus in sehr kleinen Mengen, in Spuren, vorkommen. Das Mengenverhältnis der im Organismus des Menschen vorhandenen Elemente ergibt folgendes Bild: Sauerstoff etwa 65%, Kohlenstoff ungefähr 18%, Wasserstoff etwa 10%. Dies sind die Hauptelemente, denn ihr Anteil an der Körpermasse ist bedeutend. Titan oder Aluminium dagegen sind nur etwa in einem Milliprozent im Körper des Menschen vorhanden. Mit vollem Recht heißen sie Spurenelemente.

Die Biochemie schenkte solchen geringfügigen Mengen anfangs keine besondere Aufmerksamkeit.

Die Hundertstel oder sogar die Tausendstel eines Prozentes schienen so geringfügig zu sein, daß man sie nicht zu beachten brauchte. Es waren „Belanglosigkeiten“. Und zu jener Zeit waren derartige „Mengen“ ja auch nicht einmal nachweisbar.

Mit der Vervollkommnung der Technik und der analytischen Verfahren stieg die Zahl der von den Wissenschaftlern in Lebewesen nachgewiesenen Elemente stetig an. Doch es verstrich eine geraume Zeit, ehe die Rolle der Spurenelemente im Organismus erkannt war. Selbst heute noch, da dank der chemischen Analyse sogar millionstel, ja hundertmillionstel Anteile einer Beimengung praktisch in jedem Untersuchungsobjekt nachzuweisen sind, ist die Bedeutung zahlreicher Spurenelemente für die Lebensvorgänge in der Tier- und Pflanzenwelt noch nicht restlos geklärt.

Doch manches ist bereits bekannt. Dazu zählt auch der Nachweis des Vorhandenseins zahlreicher Elemente im Körper des Menschen. Zu diesen gehören Kobalt, Bor, Kupfer, Magnesium, Vanadium, Jod, Fluor, Molybdän, Zink und sogar Radium, das jedoch nur in sehr winzigen Spuren darin enthalten ist.

Bis heute konnten bereits an die 70 chemische Elemente im menschlichen Organismus nachgewiesen werden, und man hat allen Grund anzunehmen, daß in den Organen des menschlichen Körpers das gesamte Periodensystem der Elemente vertreten ist, wobei jedes der einzelnen Elemente eine bestimmte Aufgabe hat. Es scheint sogar die Annahme berechtigt zu sein, daß eine

im Haushalt der Spurenelemente eingetretene Störung die Ursache verschiedener Erkrankungen ist.



Bekanntlich sind Eisen und Magnesium bei der Photosynthese in den Pflanzen von großer Bedeutung. Züchtet man Pflanzen auf völlig eisenfreiem Boden, werden die Blätter und Stiele

von papierfarbenem Weiß sein. Eisenmangel in den Pflanzen bedeutet also eine Verringerung des Chlorophyllgehaltes. Es genügt deshalb voll- auf, das Gewächs mit einer eisensalzhaltigen Lösung zu besprengen, damit es die grüne Farbe annimmt. Für den Ablauf der Photosynthese ist aber auch das Vorhandensein von Kupfer erforderlich. Es beeinflußt die Assimilation der Stickstoffverbindungen. Kupfermangel hemmt die Bildung von Eiweißen, deren Bestandteil der Stickstoff ist.

Komplexe organische Molybdänverbindungen sind Bestandteil verschiedener Fermente. Ihnen ist eine gute Stickstoffaufnahme der Pflanzen zu verdanken. Bei Molybdänmangel ist die Stickstoffaufnahme behindert, es kommt zu einer bedeutenden Ansammlung von Salzen der Salpetersäure. Dadurch bilden sich auf den Blättern der Pflanzen Brandflecke. Von Einfluß ist Molybdän auch auf den Phosphorgehalt der Pflanzen. Bei Molybdänmangel vollzieht sich keine Umwandlung anorganischer Phosphate in organische; gestört ist dann auch die Pigmentansammlung. Es erscheinen Flecke auf den Blättern. Das Grün wirkt fahl und bleich.

Die Phosphoraufnahme der Pflanzen hängt in großem Maße vom Vorhandensein des Bors ab. Dieses Element bewirkt auch einen besseren Transport der verschiedenen Kohlenhydrate innerhalb des pflanzlichen Systems.

Spurenelemente sind auch für den tierischen Organismus von großer Bedeutung. Enthält z. B. das verabreichte Futter kein Vanadin, führt das zu Appetitlosigkeit. Das Tier magert zusehends

ab. In manchen Fällen tritt dann bald der Tod ein. Erhöhter Vanadinegehalt im Schweinefutter bewirkt ein rasches Wachstum der Tiere und die Ablagerung einer starken Fettschicht. (1)

Auch Zink beeinflusst den Stoffwechsel. Es ist ein Bestandteil der roten Blutkörperchen im tierischen Organismus: sogar im Gehirn verschiedener Säugetiere wurden Kupfer, Zink, Mangan, Kobalt, Titan und Silber nachgewiesen.

Befindet sich das Tier (oder auch der Mensch) in erregtem Zustand, so scheidet die Leber in den Blutkreislauf Magnesium, Silizium, Aluminium, Titan und Kupfer ab. Unter normalen Bedingungen sind darin lediglich Magnesium, Kupfer und Titan nachzuweisen, denn die Absonderung von Silizium und Aluminium ist gehemmt. Der Spurenelementenhaushalt wird aber nicht nur von der Leber gesteuert, sondern es haben daran auch das Gehirn, die Nieren, die Lunge und die Muskeln Anteil.

Eine sehr wichtige, verheißungsvolle Aufgabe der Chemie und der Biologie besteht demzufolge darin, die Rolle der Spurenelemente im Wachstums- und Entwicklungsprozeß der Pflanzen und der Tiere zu klären. In nicht allzuferner Zukunft dürfte die Aufhellung dieser Zusammenhänge zu bedeutenden Ergebnissen führen und der Wissenschaft einen weiteren Weg zur Schaffung einer „zweiten Natur“ erschließen.

**Womit sich die Pflanzen ernähren und was die Chemie damit zu tun hat** Schon im Altertum hatten sich Köche dank ihrer Kochkunst Ruhm erworben. Köstliche Speisen schmückten

die Tafeln in königlichen Schlössern. Der Reichtum machte die Herrschenden wählerisch. Die Pflanzenwelt gebärdet sich anspruchsloser. In glühend heißer Wüste scheint das im Prinzip nicht anders zu sein als in den Polarregionen. Überall wachsen Gräser und Sträucher. Sie sehen



zwar verkümmert aus, aber sie haben sich den Bedingungen angepaßt.

Für ein gutes Gedeihen fehlt allerdings etwas. Doch was? Danach forschten Wissenschaftler lange Jahre. Sie experimentierten, prüften die Ergebnisse. Der Sachverhalt blieb lange Zeit ungeklärt.

Klarheit schuf erst Mitte des vorigen Jahrhunderts der berühmte deutsche Chemiker Justus von Liebig. Mit Hilfe der chemischen Analyse „zerlegte“ der Forscher verschiedenste Pflanzen in einzelne chemische Elemente. Zu Beginn schien ihre Zahl unbedeutend zu sein. Im ganzen

fand er deren zehn: Kohlenstoff und Wasserstoff, Sauerstoff und Stickstoff, Kalzium und Kalium, Phosphor und Schwefel, Magnesium und Eisen. Doch dieser „Zehnerbund“ hat auf unserer Erde immerhin den wogenden, grünen Ozean der Pflanzen hervorgebracht.

Die Annahme lautet nun: Um leben zu können, müsse die Pflanze die genannten Elemente auf irgendeine Weise in sich aufnehmen, sie „verschlingen“. Wie geschieht das? Und wo befinden sich die Vorratskammern der pflanzlichen Nahrung?

Im Erdboden, im Wasser, in der Luft.

Erstaunliche Erscheinungen wurden beobachtet. Auf manchen Böden entwickelten sich die Pflanzen stürmisch. Sie blühten auf und trugen reiche Früchte. Auf anderen dagegen verkümmerten sie. Sie wurden zu jämmerlichen Mißbildungen oder gingen völlig ein. Wir wissen heute, daß es in diesen Böden an irgendwelchen Elementen mangelte.

Seit Jahrhunderten bauen die Menschen von Jahr zu Jahr auf fruchtbaren Böden landwirtschaftliche Nutzpflanzen an. Aber dabei verschlechtern sich allmählich die Erträge. Die Ursache dieser Erscheinung heißt „Bodenerschöpfung“. Die im Boden enthaltenen Vorräte an chemischen Elementen sind von den Pflanzen allmählich aufgezehrt worden. Justus von Liebig fand heraus, daß dem Boden die ihm mangelnden Substanzen wieder beigegeben werden müßten. Man müßte ihn düngen.

Schon im Altertum kannte man Düngemittel. Man nutzte sie, sich vorwiegend auf Erfahrungen

stützend. Doch Stallmist reichte nicht aus, die dem Boden entzogenen Nährstoffe zu ersetzen. Auch die seit Jahrhunderten gepflegte Dreifelderwirtschaft (Wintergetreide, Sommerfrüchte, Brache) zu bestellen, brachte schließlich nicht mehr die erhofften Erträge ein.

Justus von Liebig erhob den Einsatz von Düngemitteln zur Wissenschaft. Er wurde zum Schöpfer der Agrikulturchemie. Die Chemie stellte sich in den Dienst der Pflanzenzucht. Vor ihr stand die Aufgabe, die bereits bekannten Düngemittel richtig einzusetzen und neue, zusätzliche, zu erfinden.

Heute gelangen Dutzende von Mineraldüngern zum Einsatz. Die hauptsächlichsten darunter sind: Kalidünger, Stickstoffdünger, Kalkdüngemittel und Phosphorsäuredünger. Denn Kalium, Stickstoff und Phosphor sind jene Elemente, ohne die keine Pflanze gedeihen kann. In vielen mineralischen Düngern sind darüberhinaus noch andere Nährstoffe enthalten, z. B. Magnesium, Eisen, Schwefel und Spurenelemente.

**Eine kleine Analogie oder wie die Chemiker die Pflanzen mit Kalium gefüttert haben** ...Es gab Zeiten, da sich das heute weltberühmte Uran innerhalb der Chemie mit einem entlegenen Platz weit im Hintergrund zu begnügen hatte. Bescheidene Ansprüche auf das Element Uran erhoben lediglich die Glasfärber und die Photographen. Dann brach die Zeit an, in der das Radium zu einem der interessantesten Forschungsobjekte wurde. Aus tausend Tonnen Uranerzen gewann man ein einziges Körnchen

des silberweißen Metalls. Die Rückstände, die bedeutende Uranmengen enthielten, sammelten sich an, blieben unausgewertet. Schließlich gelangte das Uran in den Mittelpunkt des Interesses. Es hatte sich gezeigt, daß die Nutzung der gewaltigen Kernkräfte möglich sei. Die einstigen Abfälle der Radiumgewinnung wurden kostbares Gut. Ähnlich war es auch den Kalisalzen ergangen.

...Schon vor geraumer Zeit waren die Steilsalzlager bei Staßfurt bekannt. Vorwiegend enthielten sie Kali- und Natriumsalze. Das Kochsalz, Natriumchlorid ( $\text{NaCl}$ ), fand überall Verwendung. Aber mitleidslos verwarf man die Kalisalze. Sie türmten sich bergehoch in der Nähe der Salzstollen, denn niemand wußte etwas damit anzufangen. Der Ackerboden lechzte zwar nach Kalidünger, doch die Abfälle von Staßfurt und anderswo konnten nicht verwertet werden. Zu groß waren die darin enthaltenen Magnesiummengen, die in kleinen Dosen zwar nutzbringend sind, in großen Dosen aber den Pflanzen zum Verderben werden.

Die Chemie fand einen Ausweg. Sie ersann ein einfaches Verfahren zur Reinigung der Kalisalze, d. h. zur Abspaltung des Magnesiums. Die Abraumhalden um die Staßfurter Salzlager schmolzen zusammen, nachdem 1811 ein erstes Werk für die Gewinnung der Kalisalze errichtet worden war. Bereits ein Jahr später gab es vier Werke, und 1872 verarbeiteten in Deutschland dreiunddreißig Werke über eine halbe Million Tonnen Rohsalz.

Bald danach begann man auch in verschiedenen

anderen Ländern der Welt besondere Werke für die Erzeugung von Kalidünger zu errichten.

**Eine „Stickstoffkatastrophe“** Ungefähr 100 Jahre nach der Entdeckung des Stickstoffs schrieb ein bedeutender Mikrobiologe. „Vom allgemeinbiologischen Standpunkt aus ist Stickstoff ein wertvolleres Element als das seltenste Edelmetall.“ Und er hatte recht. Stickstoff ist Bestandteil eines jeden Eiweißmoleküls, sowohl des pflanzlichen als auch des tierischen. Ohne Stickstoff gäbe es kein Eiweiß und ohne Eiweiß kein Leben. Friedrich Engels sagte einmal, das Leben sei eine Daseinsform der Eiweißkörper.

Zur Bildung der Eiweißmoleküle benötigen die Pflanzen Stickstoff. Doch woher sollten sie ihn beziehen? Stickstoff ist chemisch wenig aktiv. Unter normalen Bedingungen ist er reaktionsunwillig. Deshalb kann der Luftstickstoff von den Pflanzen nicht verwertet werden. Er ist, in Abwandlung eines russischen Sprichwortes, wohl gut fürs Auge, doch nicht für den Zahn. Die Stickstoffvorratskammer der Pflanzen ist der Boden. Leider sind seine Vorräte karg. Gering sind auch die stickstoffhaltigen Verbindungen im Boden. Daher wird der Bodenstickstoff von den Pflanzen schnell aufgebraucht. Von Jahr zu Jahr muß der Boden immer wieder mit Stickstoff angereichert werden. Stickstoffdünger sind dafür unbedingt erforderlich. Der Begriff „Chilesalpeter“ gehört heutzutage der Geschichte an. Vor mehr als siebenzig Jahren war dieser Begriff weltbekannt.

Über Tausende Kilometer hinweg, inmitten endloser Weiten, erstreckt sich im Norden Chiles und Argentiniens eine trostlose Landschaft: die Atacama-Wüste. Auf den ersten Blick könnte man sagen, eine Wüste wie jede andere. Doch von anderen Wüsten der Erde unterscheidet sie sich durch einen eigenartigen Umstand: Hier liegen abflußlose Salzseen, und an vielen Stellen befinden sich unter einer dünnen Sandschicht mächtige Lager stickstoffsauren Natriums oder Natronsalpeters. Die Vorkommen waren seit Anfang des neunzehnten Jahrhunderts bekannt, doch größere Beachtung fanden sie damals noch nicht.

Geringe Mengen Kalisalpeter wurden für die Herstellung von Schießpulver verwendet, das man ja seinerzeit aus Kohle, Schwefel und Salpeter produzierte. Der Versuch, Natriumnitrat (Natronsalpeter) aus Chile zu diesem Zweck einzusetzen, schlug fehl. Eine ganze Schiffsladung Chilesalpeter wurde versenkt, nachdem sich herausgestellt hatte, daß lediglich Kalisalpeter für Schießpulver geeignet war. Natronsalpeter verbindet sich zu rasch mit der Luftfeuchtigkeit. So wurde der Chilesalpeter erst „berühmt“, als die Landwirtschaft seine wertvollen Eigenschaften zu nutzen begehrte.

Es war übrigens nicht das erste Mal, daß Europäer gezwungen waren, jenseits des „großen Teiches“ in Besitz genommene Güter den Wellen zu übergeben. Im siebzehnten Jahrhundert fand man in Kolumbien an den Ufern des Flusses Platino del Pino Körnchen eines grauweiß schimmernden Metalls. Man gab ihm den Namen Platin. Als es zum ersten Male von dort nach Europa

gelangte, wußte man nichts mit ihm anzufangen. Von den Edelmetallen kannte man zu jener Zeit bloß Silber und Gold. Platin war zunächst nicht gefragt. Doch findige Goldschmiede ließen die



Tatsache nicht unbeachtet, daß nach dem spezifischen Gewicht Platin und Gold einander nahestanden. Sie setzten dem für die Münzprägung bestimmten Gold Platin bei. Das bedeutete eine Münzfälschung. Als der Betrug aufgedeckt wurde, verbot die spanische Regierung jedwede weitere Einfuhr von Platin. Die im Lande vorhandenen Vorräte wurden zusammengetragen und vor zahlreichen Augenzeugen ins Meer versenkt.

Doch der Wellentod der Chilesalpeterladung bedeutete nicht, daß damit auch die chemische

Verbindung Natriumnitrat ein für allemal als nutzlos abgetan war. Die Substanz erwies sich bald als ein hervorragendes Düngemittel, das von der Natur dem Menschen in großzügiger Weise im richtigen Augenblick zur Verfügung zu stehen schien. Andere Arten von Stickstoffdünger kannte man zu jener Zeit noch nicht. Es setzte also eine intensive Ausbeute der natürlichen Vorkommen ein. Aus dem chilenischen Hafen Iquique stachen Tag für Tag vollbeladene Frachtschiffe in See, die den kostbaren Dünger in alle Welt brachten.

...Im Jahre 1896 erschütterte die Gemüter eine Schreckensbotschaft. Der berühmte englische Gelehrte William Crookes prophezeite in einer Rede den Untergang der Menschheit infolge Stickstoffmangels. Was war tatsächlich geschehen? Mit einer jeden neuen Ernte wurden die Felder stickstoffärmer. Die natürlichen Vorräte an Chilesalpeter erschöpften sich allmählich. Die Schätze der Atacama-Wüste bedeuteten nur noch winzige Tropfen inmitten eines Ozeans.

Nun besannen sich die Wissenschaftler auf die atmosphärische Luft. Kliment Arkadjewitsch Timirjasew, der berühmte russische Gelehrte, mag vielleicht der erste gewesen sein, der auf die unerschöpflichen Stickstoffreserven in der atmosphärischen Luft hingewiesen hatte. Er glaubte an die Allmacht der Wissenschaft, an das schöpferische Genie des Menschen. Er teilte nicht Crookes' Befürchtungen. Timirjasew war der Ansicht, die Menschheit werde der „Stickstoffkatastrophe“ Herr werden und einen richtigen Ausweg finden. Er behielt recht. Schon

1903 bewerkstelligte man in Norwegen im Birkeland-Eyde-Verfahren die Bindung des Luftstickstoffs im elektrischen Flambogen durch die großtechnische Gewinnung von Salpetersäure ( $\text{HNO}_3$ ).

Ungefähr zu gleicher Zeit entwickelte Fritz Haber in Deutschland ein Verfahren zur Gewinnung von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff. Das Problem, den für die pflanzliche Ernährung unumgänglich notwendigen Stickstoff zu binden, war gelöst. Was den „freien“ Stickstoff anbelangte, so sind seine Vorräte in der atmosphärischen Luft ungeheuer groß. Setzte man den gesamten in der Luft enthaltenen Stickstoff in Dünger um, wären die Pflanzen für über eine Million Jahre versorgt.

**Alles andere — nur nicht leblos** Der französische Wissenschaftler Lavoisier schlug 1787 vor, ein in der Luft enthaltenes Gas „Azote“ zu nennen. Die griechische Bezeichnung „azotikos“ bedeutet etwa: das Leben nicht unterhaltend. Demzufolge ist der Sinn des Wortes „Azote“ Leblosigkeit. Lavoisier bezeichnete so das Element 7, den „Stickstoff“. Der wissenschaftliche Name Nitrogenium bedeutet „Salpeterbildner“.

Viele Jahrhunderte lang schien die Bezeichnung „Stickstoff“ berechtigt zu sein. Schließlich gelangten Wissenschaftler zu der Überzeugung: Der Stickstoff bringt nicht das Leben um, sondern ist lebensnotwendig. Allerdings ist er bloß in gebundenem Zustand, also in Verbindungen,

von den Organismen verwertbar. Lediglich einige Knöllchenbakterien an den Wurzeln von Hülsenfrüchten besitzen die einzigartige Fähigkeit zur Assimilation des freien Stickstoffs. Alle anderen Pflanzen können den Stickstoff aus dem Boden nur in Form wasserlöslicher, anorganischer Stickstoffsalze aufnehmen.

Diese Feststellung konnte eingeschränkt werden. Der angeblichen Binsenwahrheit, an der nicht zu rütteln war, entzog der sowjetische Forscher M. I. Wolski den Boden.

Er entdeckte eine erstaunliche Sache: Die höheren Lebewesen der pflanzlichen und tierischen Welt sind in gewisser Hinsicht imstande, molekularen Stickstoff unmittelbar aus der Luft aufzunehmen. Ja, ohne diesen Vorgang kommt nach Wolskis Auffassung überhaupt keine normale Entwicklung zustande.

Der Wissenschaftler unternahm eine Reihe von Versuchen, um diese These zu begründen. Er verglich zum Beispiel Gewicht und Zusammensetzung des Hühnereis mit denen des soeben dem Ei entschlüpften Kückens, dem noch keine Nahrung verabreicht worden war. Der Stickstoffgehalt im Kücken war größer als im Ei. Bedeutete das nicht, der Embryo hatte Stickstoff aus der Luft assimiliert?

Wolski „markierte“ den Stickstoff. Er ersetzte einen Teil des Stickstoffs durch das schwere Isotop mit der Masse 15, genannt N-15. Im Ei fehlte dieses Isotop, im Kücken wurde es nachgewiesen. Anstelle von Hühnereiern erforschte nun der Wissenschaftler die Eier von Wachteln und Tauben. Er kam zu einem gleichen Ergebnis: Ge-

ringe Stickstoffmengen waren unmittelbar aus der Luft assimiliert worden. Wolski zog andere Forschungsobjekte aus der Tier- und Pflanzenwelt heran, darunter Bienenlarven, Maiskörner u. dgl. Und jeder einzelne Fall erbrachte ausnahmslos den Beweis dafür, daß der Organismus wohl imstande sei, den atmosphärischen Stickstoff direkt in sich aufzunehmen.

Doch in welchem Maße ist Stickstoff für die Entwicklung des Organismus erforderlich? Wolski untersuchte bei einem Experiment zwei Gruppen von Bruteiern. Die einen waren in gewöhnlicher Umgebung untergebracht, die anderen in einer Luft, in der fast der gesamte Stickstoff durch eine entsprechende Argonmenge ersetzt war. Der Unterschied in der Entwicklung war deutlich genug. Die ausgeschlüpften Kücken, deren Entwicklung in der „Argon“-Luft verlaufen war, gingen bald ein. In der Folge bewiesen Wissenschaftler, daß Stickstoff unmittelbar die Gefäßbildung im Embryo beeinflusse.

Nach der Ansicht mancher deutscher Biochemiker soll auch der Mensch bis zu einem gewissen Grade die Fähigkeit zur Stickstoffassimilation besitzen. Voraussichtlich könne er nicht längere Zeit in völlig stickstofffreier Luft leben. Sollte sich das bestätigen, müßte dieser Umstand bei der Organisation von kosmischen Dauerflügen unbedingt ins Auge gefaßt werden.

Die Entdeckung von Wolski kann zweifellos unter die bedeutendsten Entdeckungen des Jahrhunderts eingereiht werden. Doch steht es noch bevor, den Kern der Sache zu ergründen, den Mechanismus der Bindung molekularen Stick-

stoffs durch die Lebewesen zu erkennen. Denn darüber ist man sich noch nicht im klaren.

Vielleicht ist der Schlüssel zur Beantwortung der Frage in den Arbeiten eines anderen sowjetischen Wissenschaftlers zu finden. M. J. Wolpin erforschte die Vorgänge der Bindung des Stickstoffs unter „milden Verhältnissen“. Dieses Ausdrucks bedient sich bisweilen die Chemie. Die großtechnische Ammoniaksynthese z. B. vollzieht sich wahrhaftig nicht unter „milden Verhältnissen“. Es herrschen da Drücke von Hunderten von Atmosphären und Temperaturen von einigen hundert Grad Celsius.

Im Verlaufe mehrjähriger Forschungsarbeit gelang es Wolpin und seinen Mitarbeitern, den Beweis dafür zu erbringen, daß einige Komplexverbindungen der Übergangsmetalle — Kobalt, Titan, Molybdän, Ruthenium, Iridium — zur Bindung des Luftstickstoffs selbst bei Zimmertemperatur fähig seien. Vermutlich spielen Komplexverbindungen im Tier- und Pflanzenkörper eine erstrangige Rolle. Möglicherweise hat man ihnen auch die Bindung des Luftstickstoffs zu verdanken. Es ist ja bereits erwiesen, daß der Farbstoff von Mikroorganismen, der den Namen Leghämoglobin trägt und ein naher Verwandter des Hämoglobins ist, mit Stickstoff eine recht feste Bindung ergibt.

**Wozu ist der Phosphor gut!** Justus von Liebig war der Ansicht, die Pflanze besitze die Fähigkeit zur Aufnahme von Luftstickstoff. Dem Boden müsse lediglich Kali- und Phosphordünger zugeführt werden. Doch gerade mit diesen

Elementen hatte er Pech. Das ihm „patentiert“ Düngemittel, das von einer englischen Firma erzeugt wurde, brachte keine Steigerung der Erträge. Nach Jahren erkannte Liebig selbst seinen Irrtum. Er hatte nichtlösliche Phosphatsalze verwendet, weil er befürchtete, der Regen werde lösliche schnell aus dem Boden auswaschen. Es ergab sich jedoch, daß die Pflanzen nicht imstande sind, nichtlöslichen Phosphaten Phosphor zu entziehen. Für die pflanzliche Ernährung mußte man eine Art „Halbfabrikat“ herstellen.

Ungefähr zehn Millionen Tonnen Phosphorsäure werden Jahr für Jahr in der Welt von den Pflanzen „verschlungen“. Wozu benötigen sie den Phosphor? Er ist kein Bestandteil von Fetten oder Kohlenhydraten. Auch zahlreiche Eiweißmoleküle, insbesondere die einfachsten, sind nicht phosphorhaltig. Doch ohne die Anwesenheit von Phosphor können die genannten Verbindungen nicht zustandekommen.

Die Photosynthese ist keineswegs ein einfacher Vorgang der Bildung von Kohlenhydraten aus Kohlensäure und Wasser, den die Pflanzen etwa spielend bewerkstelligen. Sie ist ein recht komplizierter Vorgang. Er vollzieht sich in den sogenannten Chloroplasten, eigenartigen „Organen“ der Pflanzenzellen. Vereinfacht kann man die Chloroplasten mit dem Magen des Tierkörpers vergleichen, in dem die aufgenommene Nahrung verdaut und assimiliert wird. Denn gerade diese Chloroplasten haben es mit den eigentlichen „Bausteinen“ der Pflanzen, mit dem Kohlendioxid der Luft und dem Wasser zu tun.

Die Assimilation des Kohlendioxids der Luft vollzieht sich mit Hilfe von Phosphorverbindungen. Die anorganischen Phosphate wandeln das Kohlendioxid in Kohlendioxidanionen um, die in der Folge zum Aufbau komplizierter organischer Moleküle dienen.

Damit erschöpft sich jedoch nicht die Rolle des Phosphors in der Lebenstätigkeit der Pflanzen. Es kann zwar nicht behauptet werden, daß seine Bedeutung für die Pflanzenwelt restlos geklärt ist, doch allein das bereits Erkannte reicht aus, um die Dinge ins rechte Licht zu rücken.

**Der chemische Krieg** Tatsächlich wird in dem Bereich, den wir nun darstellen wollen, ein regelrechter Krieg geführt. Zwar ist es ein Krieg ohne Geschütze und Panzerwagen, ohne Raketen und Bomben, aber dafür ist es ein stiller, von vielen nicht einmal wahrgenommener Krieg mit sehr wirksamen „Waffen“. Es ist ein Krieg auf Leben und Tod.

Stiftet nicht die Fliege großen Schaden? Dieses lästige, tückische Insekt verursacht, wie es sich erwiesen hat, allein in der Sowjetunion alljährlich Millionenverluste. Auch die Heuschrecke kann zu einer fürchterlichen Plage werden. Sie vermag blühende Felder in eine kahle, leblose Wüste zu verwandeln. Errechnet man die Schäden, die diese Räuber aus der Tier- und Pflanzenwelt im Laufe eines einzigen Jahres der Landwirtschaft zufügen, so ergibt das eine Menge, die ausreichte, um 200 Millionen Menschen ein Jahr lang zu ernähren.

Was bedeutet das Suffix „zid“? Es heißt soviel wie „tötend“. Die Chemiker haben verschiedene Substanzen hergestellt, die „Schädlinge“ töten sollen: Insektizide zum Abtöten von Insekten, Zoozide zur Vertilgung von Nagetieren, Herbizide zur Vernichtung von Unkraut. All diese Mittel finden neben mechanischen, physikalischen und biologischen Maßnahmen gegenwärtig in der Land- und Forstwirtschaft breiteste Verwendung.

Zu den genannten Zwecken nutzte man vor dem zweiten Weltkrieg vorwiegend anorganische Giftstoffe. Man verfügte für die Schädlingsbekämpfung über ein ganzes Arsenal an arsen-, schwefel-, kupfer-, barium- und fluorhaltigen Giftstoffen. Mitte der vierziger Jahre trat ein Umschwung ein. In steigendem Maße gelangten auf organisch-synthetischer Grundlage aufgebaute Mittel zum Einsatz. Es war ein bewußt vollzogener Wechsel. Die organischen Giftstoffe erwiesen sich für Menschen und landwirtschaftliche Nutztiere als weniger gesundheitsschädlich. Sie stellten universellere und sparsamere Mittel dar. Zur Herbeiführung der Wirkung, wie sie vorher von anorganischen Substanzen erzielt worden war, ist eine bedeutend geringere Menge erforderlich. Um beispielsweise auf einer Fläche von einem Quadratmeter einige Insektenarten völlig abzutöten, genügt der Einsatz eines millionsten Teils eines Gramms des DDT-Stäubungsmittels, eines Kontaktinsektizids.

Heutzutage gilt das Hexachlorzyklohexan als ein wirksamer organischer Giftstoff. Doch nur

wenigen dürfte es bekannt sein, daß bereits Faraday 1825 diese Substanz zum ersten Male gewonnen hatte. Einhundert Jahre lang erforschten Chemiker die Hexachlorzyklohexane, ohne ihre ausgezeichneten Eigenschaften zu erkennen. Erst nachdem Biologen das Präparat angewandt hatten, schritt man 1935 zur industriellen Herstellung des Mittels. Zu den wirksamsten Insektiziden gehören einige phosphorhaltige organische Verbindungen (z. B. Phosphorsäureester).

Noch vor kurzem wurden für den Tier- und Pflanzenschutz Mittel verwendet, die eine „äußere“ Wirkung besitzen. Doch es genügt ein Regenguß oder heftiger Wind, und das vielgepriesene Schutzmittel ist hinweggespült oder hinweggeweht. Mit der Schädlingsbekämpfung muß man von neuem beginnen. Die Forscher erwogen daher die Möglichkeit, die Giftstoffe dem schutzbedürftigen Organismus einzuverleiben. Der Mensch wird ja auch geimpft und braucht dann die Krankheit nicht mehr zu fürchten. Sobald Mikroben in den Organismus eingedrungen sind, werden sie von unsichtbaren „Gesundheitshütern“, die durch den eingeführten Impfstoff erzeugt worden sind, vertilgt.

Es stellte sich heraus, daß es möglich sei, Giftstoffe mit interner Wirkung herzustellen. Man nutzte dabei den unterschiedlichen Aufbau des Organismus der Insektenschädlinge und der Pflanzen aus. Ein und derselbe Giftstoff kann für die Pflanze harmlos sein, jedoch von tödlicher Wirkung für den Schädling.

Die Chemie gewährt den Pflanzen nicht nur

vor Insekten Schutz, sondern auch gegen das Unkraut. Sie entwickelte sogenannte Herbizide, die das Unkraut ausrotten, ohne die



Kulturpflanze in ihrer Entwicklung zu hemmen.  
Es mag erstaunlich klingen, doch zu den ersten

Herbiziden gehörten Düngemittel. Bereits vor geraumer Zeit hatten Praktiker der Landwirtschaft folgendes wahrgenommen: Wird in die Ackerkrume Superphosphat oder Kaliumsulfat in erhöhten Mengen eingearbeitet, kommt es zu einem Intensivwachstum der Kulturpflanzen bei gleichzeitig gehemmter Entwicklung von Unkraut. Wie bei der Insektenbekämpfung spielen aber auch hier seit längerer Zeit organische Verbindungen eine entscheidende Rolle.

**Wer hilft dem Ackersmann!** Das Vorhandensein eines Rasens auf dem Bahndamm ist unzulässig. Jahraus, jahrein muß der Bewuchs entfernt werden. Lange Zeit gingen die Menschen mit Sichel und Sensen gegen die unerwünschten Pflanzen an. Wieviel Menschen müßten die Strecke Moskau—Chabarowsk, die immerhin neuntausend Kilometer lang ist, auf diese Weise pflegen? Sollte das Gras über die ganze Strecke hin abgemäht werden und nicht bloß ein einziges Mal im Laufe eines Sommers, bedeutete dies den Einsatz von fast tausend Arbeitskräften.

Müßte es nicht möglich sein, ein chemisches "Rasier"verfahren anzuwenden?

Um auf einem Hektar das Gras abzumähen, müßten 20 Arbeiter einen ganzen Tag lang tätig sein. Herbizide führen diese „Vernichtungsoperation“ auf einem Gelände des gleichen Ausmaßes innerhalb von wenigen Stunden aus. Dabei leisten sie saubere Arbeit. Kein „Härchen“ wird man „ungekrümmt“ lassen.

Eine eigenartige Art chemischer Wirkstoffe sind die Defolianten. Das Wort „folio“ bedeutet „Blatt“. Ein Defoliant ist eine Substanz, die den Blattfall bewirkt. Dank ihres Einsatzes konnte z. B. die Baumwollernte mechanisiert werden. Jahraus, jahrein, im Laufe von Jahrhunderten, waren viele Menschen gezwungen, das Baumwollpflücken in der Gluthitze bei  $40^{\circ}$  bis  $50^{\circ}$  mit der Hand zu verrichten. Wer diese Tätigkeit nicht selbst einmal ausgeübt hat, kann sich gar nicht vorstellen, was das bedeutet.

Heutzutage spielt sich der Vorgang viel einfacher ab. Einige Tage, ehe sich die Baumwollkapseln öffnen, wird das Feld mit einem Defolianten besprüht. Die chemische Formel des einfachsten Mittels lautet  $Mg(ClO_3)_2$ . Die Blätter fallen von den Stauden ab, und die Erntemaschinen können an die Arbeit gehen. Auch  $CaCN_2$  kann als Entblätterungsmittel verwendet werden. In diesem Falle wird dem Boden eine zusätzliche Portion Stickstoffdünger zugeführt.

Auf dem Wege der Hilfeleistung für die Landwirtschaft, Schritt für Schritt die Natur verbessernd, entdeckte die Chemie die sogenannten Auxine. Es sind Wuchsstoffe, die das Streckungswachstum der Pflanzen steuern, also Zellstreckungsvorgänge katalysieren. Zuerst fand man Auxine in der Natur. Bald darauf meisterte man die Synthese allereinfachster Auxine unter Laborverhältnissen. Zu ihnen gehört Heteroauxin (IES). Derartige Stoffe beschleunigen nicht nur das Wachstum der Pflanze und die Entwicklung der Frucht, sondern erhöhen auch die

Standfestigkeit und Lebensfähigkeit der Gewächse. Werden allerdings größere Dosen verabreicht, tritt die entgegengesetzte Wirkung ein: Wachs-



tum und Entwicklung der Pflanze werden durch die Auxine gehemmt.

In dieser Hinsicht lassen sich die Auxine mit Heilmitteln vergleichen. Alle bekannten

arsen-, wismut- und quecksilberhaltigen Präparate zeitigen Giftwirkung, falls sie in höheren Dosen verabreicht werden.

Die Auxine sind imstande, sowohl die Periode der Blüte bei Ziersträuchern in bedeutendem Maße zu verlängern, als auch bei Frühjahrsfrost das Knospentreiben und das Sprießen der Bäume zu hemmen. In Gegenden mit rauhem Klima begünstigen sie die Reife verschiedener Frucht- und Gemüsearten. Die den Auxinen eigenen Fähigkeiten werden noch nicht voll genutzt, denn zur Zeit sind noch Laborversuche im Gange. Die bislang erzielten Ergebnisse lassen keinen Zweifel darüber aufkommen, daß sich vor diesen Helfern des Ackersmannes bald ein weites Betätigungsfeld erstrecken wird.

**„Gespenster“ helfen uns** Einem ehrwürdigen Forscher wurde von dankbaren Kollegen als Geschenk eine Vase aus Aluminium überreicht. Muß ein derartiges Geschenk nicht ein nachsichtiges Lächeln hervorrufen?

Heutzutage sicherlich. Doch vor hundert Jahren war es ein großes Geschenk. Es wurde von englischen Chemikern keinem Geringeren als Dmitri Iwanowitsch Mendelejew in Anerkennung seiner großen Verdienste um die Wissenschaft überreicht.

Tatsächlich war dieses silbrige Metall seinerzeit teurer als Gold, weil man noch vor 100 Jahren kein billiges Verfahren zum Erschmelzen von Aluminium aus Erzen kannte. Erst als Aluminium auf elektrolytischem Wege gewonnen wer-

den konnte, stürzten die Preise für das nun in großen Mengen zur Verfügung stehende Leichtmetall.

Manches Element des Periodensystems ist nach wie vor sehr kostbar. Dadurch sind seiner Verwendung Grenzen gesetzt. Daß dies nur vorübergehend der Fall ist, davon sind wir fest überzeugt. Chemie und Physik werden seinen massenhaften Einsatz herbeiführen, und die Bewohner des großen Gebäudes des Periodensystems werden in steigender Anzahl in der Praxis als Helfer des Menschen auftreten.

Nun gibt es unter den chemischen Elementen solche, die in der Erdkruste überhaupt nicht oder bloß in minimalen Mengen vorkommen. Dazu gehören Astat und Frankium, Neptunium und Plutonium, Promethium und Technetium.

Sie müssen auf künstlichem Wege gewonnen werden. Hat der Chemiker ein neues Element erzeugen können, setzen sofort Überlegungen ein, auf welche Weise dem Neugeborenen der Weg ins Leben zu erschließen ist.

Heute ist Plutonium eines der wichtigsten synthetisch gewonnenen Elemente. Seine Weltproduktion übersteigt bereits die Gewinnung vieler „gewöhnlicher“ Elemente. Hinzugefügt sei, daß die Chemiker das Plutonium zu den besterforschten Elementen zählen, obzwar es erst vor drei Jahrzehnten entdeckt worden ist. Plutonium ist ein großartiger „Brennstoff“ für Kernreaktoren. Es steht dem Uran in keiner Hinsicht nach.

In einigen amerikanischen Erdsatelliten waren

Amerizium und Kurium die Energiequellen. Diese Elemente zeichnen sich durch starke Radioaktivität aus. Beim radioaktiven Zerfall des Kuriums z. B. werden ungeheuerere Wärmemengen freigesetzt, die von Thermoelementen in elektrische Energie umgewandelt werden können.

Promethium, das bislang in keinen irdischen Erzen nachgewiesen werden konnte, wird u. a. auch für die Herstellung von Mini-Batterien verwendet, die kaum größer als der Kopf einer gewöhnlichen Reißzwecke sind. Ein halbes Jahr beträgt bestenfalls die Lebensdauer einer chemischen Batterie. Die Promethium-Kernbatterie funktioniert ununterbrochen fünf Jahre lang. Ihr Einsatzbereich ist deshalb sehr groß. Er erstreckt sich vom Hörapparat bis zur Atomrakete.

Astat zeigt große Bereitschaft, in den Dienst der Medizin zu treten. Bei der Behandlung von Erkrankungen der Schilddrüse ist man bemüht, mit Hilfe der Kernstrahlung Erfolge zu erzielen. In der Schilddrüse kann sich bekanntlich Jod ansammeln. Da Astat das chemische Analogon des Jods ist, wird es anstelle von Jod in den Organismus eingeführt, wo es sich in der Schilddrüse ansammelt. Seine radioaktiven Eigenschaften gelangen dann hier zur Wirkung.

Wir sehen also: Einige künstlich gewonnenen Elemente sind für die Belange der Praxis bereits sehr bedeutsam. Doch zur Zeit erweisen sie nur einseitige Dienste: Lediglich ihre radioaktiven Eigenschaften können ausgewertet

werden. Bis zur Auswertung der chemischen Eigenschaften steht noch ein weiter Weg bevor. Eine Ausnahme bildet Technetium. Die Salze dieses Metalls sind imstande, stählernen Gegenständen Korrosionsfestigkeit zu verleihen.

**Und wiederum die Sonne** Warum leuchtet die Sonne? Diese keineswegs rhetorische Frage können wir unserem kleinen Bericht über die Chemie der Tagesleuchte voransetzen.

Die sich auf der Sonne vollziehenden Vorgänge, dank deren dieser Himmelskörper schon Milliarden Jahre am Himmelsgewölbe leuchtet, haben mit üblichen chemischen Reaktionen nichts gemein. Die Chemie der Sonne — das sind unaufhörlich vor sich gehende Kernprozesse unter Freisetzung gewaltiger Energien.

Es gab eine Zeit, da die Menschen die Sonne wie eine Gottheit anbeteten. Sie sahen in ihr den Quell alles Lebenden. In dem naiven Glauben ist ein rationeller Kern enthalten: Ohne die Sonne gäbe es kein Leben auf der Erde.

Wir wissen ungefähr, wie lange schon die Sonne besteht. Wie lange sie noch bestehen wird, ist schwer zu sagen. Etwas anderes haben die Wissenschaftler genau ermittelt: Jeder Quadratcentimeter Sonnenoberfläche strahlt jede Sekunde 1500 cal Wärme aus.

Nachdem die Wissenschaft sich mit der Erforschung der Quellen der Sonnenenergie zu beschäftigen begonnen hatte, tauchte die Vermutung auf, es vollzögen sich auf der Sonne chemische Verbrennungsreaktionen von gewaltigen Ausmaßen. Genauere Ermittlungen belehrten die

Forscher eines Besseren. Denn selbst unter der Voraussetzung, daß ein ganz vorzüglicher Brennstoff, ja der bestmögliche, zu den Sonnenkomponenten zählte, würde er dennoch außerordentlich schnell verbrennen und nicht die hohen, in der sogenannten Photosphäre der Sonne herrschenden effektiven Temperaturen von etwa  $5785^{\circ}\text{C}$  erzeugen. Demzufolge kann die Sonnenenergiequelle keinesfalls chemischer Natur sein.

Der berühmte deutsche Naturforscher Hermann von Helmholtz stellte Ende des vorigen Jahrhunderts folgende Erwägung an: Zu Beginn war die Sonne ein kalter Himmelskörper von gigantischen Ausmaßen, die mit den heutigen nicht vergleichbar sind. Unter der Wirkung von Anziehungskräften verdichtete sie sich, und im Verlaufe des Verdichtungs Vorganges trat eine Erwärmung ein. Der Vorgang sei noch nicht abgeschlossen, und darin sei der Quell der Sonnenenergie zu suchen. Diese Hypothese brachte die Gemüter in Aufruhr. Doch Berechnungen bewiesen die Haltlosigkeit der Annahme. Denn berücksichtigt man jene Wärmemengen, die die Sonne in so großzügiger Weise abgibt, hätte sie im Verlaufe der Kompression die gegenwärtigen Ausmaße, unabhängig vom anfänglichen Volumen, bereits vor zwanzig Millionen Jahren besitzen müssen. Aber das organische Leben auf der Erde besteht erst seit etwa drei Milliarden Jahren. Helmholtz, einer der bedeutendsten Physiker des vorigen Jahrhunderts, konnte noch keine zuverlässige Theorie der Vorgänge auf der Sonne entwickeln.

Der Wahrheit am nächsten kam der schwedische Chemiker Svante Arrhenius, Begründer der Lehre von der elektrolytischen Dissoziation. Im Jahre 1923 vertrat er die Meinung, es gebe nur eine einzige Erklärung für die unvergleichliche Energieabgabe der Sonne: Man müsse annehmen, es vollziehe sich auf der Sonne eine eigenartige Kondensation von Wasserstoffatomen in schwerere. Bei diesem Vorgang würden Energiemengen freigegeben.

Zweifellos war das eine geniale Annahme. Doch sie mußte durch Fakten bestätigt werden.

Die Frage, woraus sich die Sonne zusammensetzt, bewegt schon seit langem die Gemüter. Mit der Erfindung der Spektralanalyse wurden die Sonnenspektren Gegenstand besonderer Beachtung. Sensationelle Entdeckungen ließen nicht lange auf sich warten.

Von der Entdeckung des Heliums ist bereits die Rede gewesen. In der Folge stellte es sich heraus, daß nach dem Wasserstoff Helium die zweitgrößte Komponente der Sonne ist. Die Wasserstoffmenge beträgt das Fünffache der Heliummenge. Die Gesamtmenge dieser zwei Elemente ergibt das Tausendfache der Gesamtmenge aller anderen Elemente. Verhältnismäßig beträchtlich sind auch die Anteile des Sauerstoffs und des Stickstoffs. Es folgen Magnesium, Silizium, Eisen, Natrium, Kalium, Kalzium, Aluminium und Kohlenstoff. Insgesamt wurden auf der Sonne an die 60 chemische Elemente nachgewiesen, darunter auch ein so seltenes Element wie Thorium.

Unwillkürlich drängt sich die Frage auf: Woher kommt diese Vielfalt? Bestand sie seit jeher? Oder kam es zur Bildung dieser Elemente nur allmählich, im Ergebnis der Verschmelzung von leichten Kernen in schwerere, also im Ergebnis von Vorgängen, die man heute als thermonukleare Reaktionen bezeichnet? In dieser Richtung bewegt sich die Annahme von Arrhenius. Doch bereits Mitte der zwanziger Jahre waren die Forscher zur Überzeugung gekommen, daß für eine Verschmelzung von Kernen, vollzöge sich eine solche, phantastisch hohe Temperaturen erforderlich seien, die Millionen, ja Dutzende Millionen Grad Celsius betragen.

Um die Quelle so hoher Temperaturen bestimmen zu können, mußte vorerst der Vorgang einer einfachen thermonuklearen Synthese geklärt sein. Es hieß zu ermitteln, ob die bei der Bildung von Heliumkernen aus Wasserstoffkernen freigesetzten Wärmeenergien ausreichen, den Energievorrat der Sonne zu begründen. So verschmolzen die Fragen nach dem Ursprung der Erde und nach der Quelle der Sonnenenergie zu einem einzigen Fragenkomplex.

Anfangs herrschte die Meinung vor, Helium entstehe aus Wasserstoff auf folgende Weise: Es vereinigten sich zwei Protonen (zwei Wasserstoffkerne). Dieses System sei instabil, und ein Proton wandle sich deshalb in ein Neutron um. Dadurch entstehe ein Kern des schweren Wasserstoffisotops, des Deuteriums. Dieses bilde mit dem neugeborenen Proton ein seltenes Heliumisotop der Massenzahl 3. Im Ergebnis einer Wechselwirkung zweier Heliumkerne entstünden

ein gewöhnliches Helium-4-Isotop und ein Proton.

Eine Hypothese aufzustellen, ist leichter, als sie zu beweisen. Es soll daran erinnert sein, daß die Sonne in jeder Sekunde von jedem Quadratcentimeter der Oberfläche 1500 cal emittiert. Das ist nur dank des Umstandes möglich, daß im Inneren der Sonne Temperaturen von 20 Millionen Grad Celsius herrschen. Zu diesem Schluß gelangten die deutschen Forscher Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker im Jahre 1938. Nun verläuft aber der früher beschriebene Vorgang der Heliumbildung aus Wasserstoff (man nennt ihn Proton-Proton-Reaktion) bei Temperaturen von 10 Millionen Grad Celsius. Diese Tatsache bedeutet, daß es unter solchen Umständen zu keiner Bildung von Elementen kommen kann, die schwerer als Helium sind. Auch diese Quelle reicht also nicht für eine Erklärung der Ursachen der Sonnenenergie aus. Welchen Weg man auch einschlug, er führte stets zur Überzeugung, das Innere der Sonne müsse über zusätzliche Wärmequellen verfügen.

Bethe und von Weizsäcker fanden einen Ausweg aus der Sackgasse. Sie überlegten etwa folgendermaßen: Die Wasserstoff-Helium-Umwandlung könne sich auf der Sonne nicht nur als Proton-Proton-Reaktion vollziehen. Es existiere eine zweite Möglichkeit. Der Verlauf sei folgender: Auf der Sonne ist Kohlenstoff vorhanden. Sein Isotop C-12 stößt auf das Proton. Es ist leicht vorstellbar, daß es sofort zur Bildung eines neuen Kerns kommt, der eine um eine Einheit höhere Ladung besitzt. Der Kern

ist dem Stickstoff N-13 zuzuordnen. Er ist instabil, zerfällt rasch und wandelt sich wieder in Kohlenstoff um, jedoch nicht mehr in den Kohlenstoff C-12, sondern in den Kohlenstoff C-13.

Dies sei der erste Schritt. Nun folge der zweite. Es beginne damit, daß nunmehr Kohlenstoff C-13 mit dem Proton reagiert. Es ist einleuchtend, daß es neuerdings zur Bildung eines Stickstoffkerns kommt, diesmal von Stickstoff N-14. Hier hat man es mit einem gewöhnlichen stabilen Isotop zu tun, das in der Atmosphäre der Erde in großen Mengen vorhanden ist. Die zweite Etappe des Vorgangs soll hiermit abgeschlossen sein.

Es folge nun das dritte Stadium, in dem Stickstoff N-14 und ein Proton mitwirken. Im Ergebnis der Reaktion bilde sich ein Sauerstoffisotop der Masse 15. Es ist radioaktiv und erzeugt beim Zerfall wieder Stickstoff, und zwar einen schwereren, nämlich den stabilen Stickstoff N-15. Das vierte Stadium schließe den ganzen Vorgang ab. Ein Proton stelle sich wieder ein, jedoch verlaufe das Geschehen andersartig. Nach der Vereinigung des Protons mit dem Stickstoff N-15 strahlt der neugebildete komplexe Kern sofort ein Alphateilchen aus (es stellt einen Heliumkern dar) und wandelt sich in den Kern des Mutterisotops Kohlenstoff C-12 um. Dieser spielt also in gewissem Sinne die Rolle eines atomaren Katalysators.

Dieser komplexe Mehrstufenprozeß wird als Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus bezeichnet. Bei seinem Ablauf wandelt sich der Kohlenstoffkern

im Ergebnis von vier aufeinanderfolgenden Reaktionen mit Protonen dreimal in Stickstoff und schließlich einmal in schweren Kohlenstoff, einmal in Sauerstoff und schließlich in das ursprüngliche Kohlenstoffisotop und in einen Heliumkern um.

Dieser erstaunliche Zyklus von Kernreaktionen vollzieht sich innerhalb eines gewaltigen Zeitraums. Es müssen fünf Millionen Jahre verstreichen, ehe der Kohlenstoffkern C-12 nach den vollzogenen Umwandlungen wieder zum Kohlenstoff C-12 wird. Bei weitem nicht jeder Zusammenstoß mit einem Proton löst eine Kernreaktion aus. Erfolgreiche Zusammenstöße sind eine Seltenheit.

Die erforderlichen zwanzig Millionen Grad Celsius sind erreicht. Doch selbst unter diesen Verhältnissen geht die Synthese der Elemente nicht über die Heliumbildung hinaus. Aber das ist bereits ein Kapitel für sich.

Nachdem es die Physiker gemeistert hatten, unter Laborverhältnissen verschiedene Kernreaktionen auszulösen, waren sie auch imstande, jedes Stadium des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus nachzubilden. Und sie benötigten dazu nur eine ganz kurze Zeitspanne. Im Beschleuniger können ja die Protonen auf Energien gebracht werden, die selbst die unter natürlichen Umständen auf der Sonne bestehenden um ein Beträchtliches übersteigen. Daher ist hier die Wahrscheinlichkeit eines „Treffens“ unvergleichlich größer.

Hatten Hans Bethe und Carl Friedrich von Weizsäcker mit ihrer Theorie recht?

Das für den Ablauf der Kernreaktionen auf der Sonne entwickelte Schema des Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus ist heute anerkannt. Astrophysiker nutzen es weitgehend für die Begründung ihrer Theorien über die Entstehung der Elemente.

Das Schema fand Eingang in Lehrbücher. Aber es hatte auch seine Schwächen. Ein wesentlicher Mangel haftete ihm an. Es war zwar eine kühne, logische Hypothese, doch immerhin nur eine Hypothese. In der Wissenschaft kann es jedoch keine ewigen Hypothesen geben. Früher oder später wird eine jede entweder verworfen oder zur Theorie erhoben.

Damit die Hypothese vom Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus zur Theorie werden konnte, mußte die Richtigkeit experimentell begründet werden. Das letzte Wort hatte das Experiment. Lange zerbrachen sich die Forscher die Köpfe darüber, auf welche Weise das Experiment zu starten war. Schließlich erwies sich die Sache als erstaunlich einfach.

Im Reiche der Elementarteilchen zählt das Neutrino wohl zu den rätselhaftesten. Eine genaue Übersetzung des Wortes aus dem Italienischen ergibt die Verkleinerungsform „Neutrönchen“ oder „kleines Neutron“. Gleich seinem älteren Bruder, dem Neutron, besitzt es keine Ladung. Auch seine Ruhemasse ist sehr gering. Diese Eigenschaften bedingen die unvergleichliche Durchdringungsfähigkeit des Elementarteilchens. Reihte man selbst hundert Milliarden Erdkugeln aneinander, das Neutrino würde diese ungeheure Masse mühelos durchdringen, ohne seine Energie zu verausgaben.

Bei Kernumwandlungen werden die Neutrinos in zahllosen Mengen erzeugt. In Tätigkeit versetzte Kernreaktoren bringen jede Sekunde tausend Trillionen dieser Elementarteilchen hervor, deren Ruhemasse vielleicht sogar Null ist und die deshalb schwer nachweisbar sind. Immerhin mußten seit dem Zeitpunkt, da, bildlich gesprochen, das Neutrino der Feder der Theoretiker entsprungen war, zwei Jahrzehnte verstreichen, ehe es gelang, des Teilchens auf experimentellem Wege habhaft zu werden.

Die Sonne, dieser natürliche Kernreaktor von gigantischem Ausmaß, schleudert zahllose Neutrinos aus, die das gesamte Sonnensystem durch-eilen, die Erdkugel erreichen und den gesamten Erdkörper durchdringen.

An dieses kleine Neutrino klammerten sich die Forscher in ihrem Bestreben, die Hypothese Bethes und von Weizsäckers wissenschaftlich zu begründen. Sie ermittelten durch sehr komplizierte Berechnungen folgendes: Sollte tatsächlich der Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus der Sonne den Energiereichtum sichern, so müssen in der Sekunde ungefähr sechs Milliarden im Verlauf der atomaren Kernvorgänge auf der Sonne entstandene Neutrinos jeden Zentimeter des Erdbodens erreichen.

Doch wie sollte man sie einfangen, wie sie abzählen? Sicherlich benötigte man dazu besondere Fallen. Das „Fallenproblem“ erwies sich als sehr einfach.

Chlor besitzt ein stabiles Isotop der Massenzahl 37. Angenommen, der Kern dieses Isotops verschlänge ein Neutrino, so würde der Kern

dann folgendes Verhalten an den Tag legen: Aus dem Chlorisotop würde ein Elektron hinausgeschleudert. Dadurch würde der Kern seine Ladung um eine Einheit erhöhen und sich in den Kern des Argonisotops der gleichen Massenzahl umwandeln. Der Argonkern wäre jetzt radioaktiv, sein Zerfall wäre mit Hilfe eines entsprechenden Zählers leicht nachweisbar. Dies ist der Grundgedanke der „Falle“, die der sowjetische Forscher B. M. Pontecorvo vorschlug.

Wie war nun der Versuch in der Praxis zu bewerkstelligen? Beträchtliche Mengen irgendeiner flüssigen Chlorverbindung — besonders eignet sich Tetrachloräthylen — werden in einem Behälter tief in die Erde versenkt. Auf diese Weise soll erreicht werden, daß andere Teilchen nicht in den Behälter eindringen. Nun dauert es sehr lange, bis ein Neutrino mit einem Chloratomkern zusammentrifft, eine Kernreaktion auslöst, in dessen Folge ein radioaktiver Argonkern zustandekommt.

Nach den Berechnungen Pontecorvos mußten dafür 400 Tonnen Tetrachloräthylen ausreichen, um im Laufe von 24 Stunden fünfmal ein Neutrino einzufangen. Geling das, war die Hypothese Bethes und von Weizsäckers begründet.

Eine Gruppe amerikanischer Forscher war unter Anleitung von R. Davis im Laufe des Jahres 1968 damit beschäftigt, Neutrinos einzufangen. In einem verfallenen, stillgelegten Bergwerk wurde in drei Kilometer Tiefe die „Falle“ errichtet. Sie war aufs sorgfältigste vorbereitet worden, und das Einfangen der fünf erforderlichen

Neutrinos schien, wenn auch nicht völlig gesichert, so doch höchst wahrscheinlich zu sein.

Fast ein halbes Jahr dauerte dieses der Idee und dem Maßstab nach einmalige Experiment. In der ganzen Welt harrten Wissenschaftler auf ein positives Ergebnis. Das positive Ergebnis blieb aus. Davis gelang es nicht, auch nur einen einzigen Einfangprozeß nachzuweisen.

Es soll mit besonderem Nachdruck hervorgehoben sein: Die Anlage war mit größter Sorgfalt angelegt, und es wäre völlig unbegründet, wollte man sie als unvollkommen bezeichnen. Höchst zweifelhaft war auch, daß erneute Experimente bessere Ergebnisse zeitigen würden.

Daraus folgert, daß die Hypothese Bethes und von Weizsäckers doch nicht zur Theorie erhoben werden kann. Das Experiment Davis' hat den Beweis dafür erbracht, daß die Intensität des Sonnenneutrinoflusses gering ist. Sie bleibt weit hinter jenem Wert zurück, der einer Sonnentemperatur von 20 Millionen Grad Celsius entsprechen würde. Demzufolge sind die Temperaturen im Sonneninneren nicht so hoch, wie Bethe angenommen hatte. Keinesfalls übersteigen sie 12 Millionen Grad Celsius.

Die thermonuklearen Reaktionen, die sich unter solchen Temperaturverhältnissen auf der Sonne vollziehen, können dem Energiehaushalt unserer „Himmelsleuchte“ höchstens einen Anteil von 10 Prozent sichern.

Woher aber kommen die übrigen 90 Prozent? Sollten sie das Ergebnis nichtthermonuklearer, sondern andersgearteter, von uns noch nicht erkannter Vorgänge sein?

Sowohl das Experiment als auch vorliegende theoretische Vorstellungen bejahen diese Frage. Wie verhält es sich dann aber mit dem Kohlenstoff-Stickstoff-Zyklus? Selbst dann, wenn diese Erscheinung nur einen Zufall darstellte, wäre sie gebührend zu würdigen, denn sie spielt eine sehr große Rolle in der Astrophysik.

Unsere Frage bleibt: Welcher Art sind die Vorgänge, die die restlichen 90 Prozent im Energiehaushalt der Sonne und auch der Sterne decken? (Unsere Sonne ist ja ein ganz gewöhnlicher Stern.) Vielleicht sind wir einer neuen Energieart auf der Spur?

Die Astrophysiker suchen unverzagt nach einer Antwort auf diese Frage. Mit voller Berechtigung können wir sagen, daß der Mensch in nicht allzuferner Zeit imstande sein wird, auf die Frage, weshalb die Sonne scheint, eine eindeutige Antwort zu geben.

**Kosmochemiker bei der Arbeit** Die Bezeichnung „Kosmochemie“ entspricht nicht ganz dem Inhalt dieses interessanten Gebiets der Wissenschaft. Wir wissen ja, daß die in verschiedenen Körpern und Objekten des Weltalls sich vollziehenden Reaktionen — auf der Sonne, auf den Sternen, im Weltraum — vorwiegend Kernprozesse sind, die nichts gemein haben mit den gewöhnlichen, alltäglichen chemischen Reaktionen, die unter irdischen Laborbedingungen verlaufen.

Doch der Begriff „Kosmochemie“ hat bereits in das große Gebäude der Wissenschaft Eingang gefunden. Alljährlich erscheinen in Fachzeit-

schriften und -büchern Berichte über neue Erfolge auf diesem Arbeitsgebiet. Der Kosmochemie haben wir vor allem sehr viel Wissen über den Aufbau und die Entwicklung der unendlichen kosmischen Weiten zu verdanken.

Die Kosmochemie erforscht, aus welchen chemischen Elementen die Himmelskörper zusammengesetzt sind, welcher Art die Verbindungen in der Atmosphäre des Sonnensystems sind, was Meteoriten, diese Boten aus fernen Welten, eigentlich darstellen.

Sie ergründet die für das Verständnis der Evolution des Weltalls entscheidende Frage: Wie, auf welche Weise vollzieht sich die Bildung der chemischen Elemente? Die Antwort der Kosmochemie lautet: Die fernen Sterne sind Produktionsstätten der Kernsynthese von gigantischem Ausmaß. Es vollziehen sich dort, bei unvorstellbar hohen Temperaturen und Drücken, die kompliziertesten Vorgänge verwickelter Kernverschmelzungen, angefangen vom leichtesten, im Weltall meist verbreiteten Element, dem Wasserstoff, bis zur Synthese von überschweren Elementen, die man auf Erden bislang noch nicht zu synthetisieren versteht.

Schließlich ist die Kosmochemie bestrebt, gemeinsam mit der Astrophysik in den interstellaren Raum vorzustoßen, das dort Vorhandene zu ergründen: Herrscht hier absolute Leere, ein absolutes Vakuum, oder „bewohnen“ diesen Raum irgendwelche materiellen Partikel und sei es auch nur in minimalster Konzentration?

Damit wäre das Forschungsgebiet der Kosmochemie in großen Zügen umrissen. Keineswegs

übertrieben ist die Behauptung, daß die Errungenschaften beinahe aller exakten Wissenschaften heutzutage zum Rüstzeug der Kosmochemie gehören. Ein Fachmann dieser Disziplin der Wissenschaft muß ein ausgezeichneter Chemiker sein, sich im großen Gebäude der chemischen Elemente frei bewegen können. Er muß auf den verschiedensten Gebieten der Physik bewandert sein und als Experimentator einen findigen Kopf besitzen. Errungenschaften der Astronomie und der Hochfrequenztechnik müssen ihm gleichfalls vertraut sein. Und nicht zuletzt muß er ein Träumer sein, ein Mensch, der an den Erfolg seiner Arbeit glaubt.

Die Hauptwaffe der Kosmochemie ist die Spektralanalyse. Eine winzige Probe der Sonnen- oder Sternensubstanz ins Labor zu befördern ist leider ein Ding der Unmöglichkeit. Daher vermag der Wissenschaftler, die Zusammensetzung von Sonne und Sternen nur nach jenen Spektren zu erforschen, die von den erhitzten Atmosphären emittiert werden. Mächtige Teleskope und empfindliche Spektrographen gehören zu den Apparaturen des Kosmochemikers. Im Laufe der letzten Jahrzehnte nutzt die Kosmochemie in steigendem Maße radioastronomische Methoden. Dank dieser Hilfsmittel können die Weltraumkörper gründlich erforscht werden. Das geschieht entweder durch Einfangen der von kosmischen Objekten emittierten radioaktiven Strahlung oder auf dem Wege der Aufnahme von kosmischen Radiosignalen.

Einem Kosmochemiker kann man in einem gewöhnlichen Labor begegnen, das der Phantasie eigent-

lich keine reiche Nahrung bietet. Doch manche einfachen Laborgeräte haben eine außerordentlich wichtige Funktion. Sie helfen, die chemische Zusammensetzung von Meteoriten zu erforschen.

Von alters her interessierte sich die Menschheit für diese „himmlischen Steine“. Auf ihre Beschreibung stößt man in uralten Chroniken. Die Annahme ist nicht unbegründet, daß bereits Eisenmeteorite dem Urmenschen den „Werkstoff“ für die Anfertigung erster, primitiver Geräte lieferten. Ungefähr um die Mitte des achtzehnten Jahrhunderts nahmen Chemiker die Erforschung der Meteoriten auf, und seit diesem Zeitpunkt liefern diese oft unscheinbaren Boten aus dem Weltall den Kosmochemikern wertvolle Information.

Es gab auch Fälle, da die Wissenschaft außerstande war, eine plausible Erklärung für das Auftauchen von Meteoriten zu finden. Das trifft vor allem auf den tungusischen Meteoriten zu, der am 30. Juli 1908 auf die Erde niederfiel. Beim Durchstoßen der dichteren Atmosphärenschichten zersprang der Meteor mit einem Getöse, das Hunderte Kilometer weit vernehmbar war. Doch keine Materiestücke blieben erhalten. Niemand fand etwas, obzwar zahlreiche Expeditionen nach Bruchstücken suchten. Eine Reihe von Hypothesen suchten das „tungusische Wunder“ zu erklären. Darunter gab es sogar ungemein phantastische. Eine geradezu märchenhafte Darstellung berichtet von der Explosion eines interplanetaren Raumschiffes, das von einem fremden Planeten zu uns gekommen sei.

Eine andere Deutung besagt, man habe es mit einem Stück Antimaterie zu tun, das auf irgendeine seltsame Weise in unsere Galaxis eingedrungen sei. Kurz und gut, die Kosmochemie war bislang nicht in der Lage, eine eindeutige Erklärung über die Herkunft des tungusischen Meteoriten abzugeben.

Im großen und ganzen haben uns die Meteoriten schon sehr viel über das Weltall berichtet.

Auf Grund der Erforschung Hunderter, ja Tausender Meteoriten konnten die Wissenschaftler den durchschnittlichen Gehalt der darin enthaltenen Elemente bestimmen. Es erwies sich, daß der Gesamtgehalt an Eisen, Sauerstoff, Silizium, Magnesium, Aluminium und Kalzium 94 Prozent beträgt, also den Mengen auf der Erde entspricht. Auch der Gehalt an einzelnen Elementen erwies sich als der gleiche. Es gelang sogar eine, bis auf wenige Ausnahmen, identische isotope Zusammensetzung der in den Meteoriten und auf der Erde vorkommenden Elemente nachzuweisen. So behält der Wert 22,2, der das auf der Erde nachgewiesene Mengenverhältnis zwischen den stabilen Schwefelisotopen S-32 und S-34 ausdrückt, seine Gültigkeit in bezug auf Meteorite. Auch die Erforschung anderer Elemente brachte ähnliche Ergebnisse. Schließlich sei hinzugefügt, daß die von Chemikern in Meteoriten nachgewiesenen chemischen Verbindungen auf unserem Erdball keineswegs unbekannt sind.

Diese Tatsachen zeugen von der Einheit der Materie im Weltall — das Periodensystem der chemischen Elemente wird sich also nicht nur

unter irdischen Verhältnissen behaupten können. Es besteht zu Recht für alle Teile des Weltalls bei Vorhandensein von Atomen mit Elektronenschalen.

Lange Zeit waren die Meteorite einziges stoffliches Forschungsobjekt der kosmischen Chemie. Heutzutage ist das Vergangene, heutzutage ist das Interesse der Wissenschaftler auf den Mond gerichtet. Die verfügbaren Bruchstücke des Mondgesteins helfen, den Schleier des Geheimnisses über bislang unerforschtem Geschehen im Weltall zu lüften.

Die ersten Schlußfolgerungen, zu denen die Forscher gelangten, lauteten: Das Mondgestein unterscheidet sich von all dem, was auf der Erde vorzufinden ist.

Laut Ansicht der Forscher ist die Entdeckung von Glas auf der Mondoberfläche wohl das Überraschendste. Um seine Entstehung zu erklären, wurde folgende Hypothese aufgestellt: Beim Aufprall der Meteoriten auf die Mondoberfläche verdunstete Mondmaterie und fiel in der Folge in Form von winzigen, runden Glastropfen wieder auf die Oberfläche. Die Radien der gläsernen Kügelchen erreichen nur einige Zehntel eines Millimeters. Sie sind von dunkelbrauner, gelber oder auch gelblich-brauner Farbe.

Den Forschern gelang es, es zu klassifizieren und drei verschiedene Typen auszusondern: schlackenähnliche Gesteinsarten, porös aufgetriebene Gesteinsarten und Trümmer der Meteoritenmaterie sowie Lavabruchstücke. Im Mondgestein wurde ein relativ hoher Gehalt an Titanoxid nachgewiesen. Eine derartige Menge Ti-

tanoxid ist auf der Erdoberfläche eine Seltenheit.

Die Mehrzahl der gesammelten Proben sind vulkanischen Ursprungs. Die mineralischen Bestandteile gleichen jenen, die in den Produkten vulkanischer Eruptionen auf der Erde vorkommen. Doch ist auch ein Unterschied wahrzunehmen: Auf dem Mond sind die Minerale nicht so feinkörnig wie auf der Erde, ein Rätsel, dessen Aufschlüsselung sicherlih noch viel Kopfzerbrechen verursachen wird.

Wiederholt stieß man auf die Mitteilung, man hätte in Meteoriten die Anwesenheit eines organischen Stoffes nachgewiesen. Nachrichten dieser Art brachen einen erregten Meinungsstreit vom Zaun. Bis auf den heutigen Tag ist er noch nicht zu Ende geführt worden.

**Ein paar Worte zur eigenen Rechtfertigung** Bisweilen kommt es vor, daß es in einer Sache das Schwierigste ist, ein Ende zu finden. Doch der Schlußpunkt muß einmal gesetzt werden, obwohl noch manche interessante Geschichte gleichsam an der Federspitze hängengeblieben ist. Eines schönen Tages wohnten wir einer erregten Diskussion bei. Sie war von der Art der vor Jahren in Mode gekommenen Dispute zwischen Physikern und Lyrikern. Allerdings stritten diesmal ausschließlich Vertreter der exakten Wissenschaften miteinander. Einer der „Streitlustigen“ verstieg sich zu der Behauptung, es gebe überhaupt keine Chemie als selbständige Disziplin der Wissenschaft. Chemie sei nichts anderes als ein „konkreter Fall“ der Physik. Es

könne keine Wissenschaft der Chemie geben, meinte er, denn sobald man darangehe, den inneren Mechanismus eines beliebigen chemischen Vorgangs aufzuhellen, könne das lediglich auf Grund physikalischer Gesetzmäßigkeiten geschehen. Es reagieren Atome miteinander, sie tauschen ihre Elektronen aus. Was also ist die Grundlage der chemischen Bindung? Physikalische Gesetzmäßigkeiten...

Jeder Leser wird sich vorstellen können, welche Empörung diese Meditationen unseres Physikers unter den Chemikern auslösten!

Lassen wir die Elektronen aus dem Spiel! Die Chemie besteht als eine uralte und ewig junge Wissenschaft! Sie hat ihre eigenen Gesetze und Regeln, eine eigene jahrhundertlange Entwicklungsgeschichte und heute noch kaum vorstellbare Perspektiven, eine schöne und große Zukunft.

Es versteht sich von selbst, daß die moderne Chemie sehr eng mit der Physik, mit der Mathematik und der Kybernetik, mit der Biologie und anderen Wissenschaften zusammenarbeitet. Es ist außerdem ein spezifisches Merkmal der Chemie des zwanzigsten Jahrhunderts (darin unterscheidet sie sich von den früheren Perioden ihrer Entwicklungsgeschichte), daß sie sich auch in verschiedene Richtungen aufgespalten hat, die sich selber sogar zu selbständigen Disziplinen entwickelt haben. Wir sprechen heute von Elektrochemie, von der Photochemie und Strahlenchemie, oder auch von der Chemie hoher Temperaturen und hoher Drücke.

Es kann vorkommen, daß der auf einem Gebiet

Sachkundige jenen nicht mehr versteht, der in einem anderen Bereich der Chemie ein Fachmann ist. Man darf die beiden nicht einer unzulänglichen Ausbildung bezichtigen. Die Sache ist vielmehr die, daß sich die verschiedenen chemischen „Dialekte“ bereits zu selbständigen chemischen „Sprachen“ entwickelt haben.

Damit aber ist die Angelegenheit noch nicht erledigt.

Die Chemie von heute ist mit verschiedenen anderen Wissenschaftsdisziplinen „verwachsen“: zum Beispiel mit der Biologie und der Geologie, der Mechanik und der Kosmogonie. Die „Symbiose“ hat gute Früchte getragen, hat eine Reihe von „Hybrid“-wissenschaften oder Grenzwissenschaften aufkommen lassen: die Biochemie und die Geochemie, die Kosmochemie und die Mechanochemie. Und noch so manches andere.

Nehmen wir z. B. das Betätigungsfeld der Biochemie. Sie ist es, die letztlich eine erschöpfende Antwort auf die Frage zu geben hat: Was ist Leben in all seinen zahllosen Erscheinungsformen? Sie hat, Hand in Hand mit der Pharmakologie und der Medizin, im Kampf gegen Erkrankungen immer wirksamere Mittel ausfindig gemacht.

Und die Kosmochemie? Die Chemie der Sterne und Planeten steckt noch in den Kinderschuhen. Doch ihr Wort wird zweifellos für die Erkenntnis der Evolution entscheidend sein.

Überraschenderweise konnte festgestellt werden, daß gerade die „Hybrid“-wissenschaften uns Tag für Tag mit neuem Tatsachenmaterial und neuen

Beobachtungen bereichern, die man vor kurzem noch gar nicht vermutet hätte. Auf diese Grenzbereiche zwischen den herkömmlichen Disziplinen setzt die Praxis heute die größten Hoffnungen.

Nun versetzen Sie sich in unsere Lage: Man greift zur Feder in der Absicht, etwas „Chemisches“ niederzuschreiben. Doch kaum sind ein paar Zeilen aufs Papier gebracht, lugen zwischen den Worten die lachenden Gesichter der Physiker und der Biologen hervor. Und die „streng chemischen“ Umriss verblasen. Dennoch waren wir redlich bemüht, in unserem Büchlein die „chemischen Grenzen“ nicht allzuweit zu überschreiten.

# INHALT

Anstelle eines vorworts/7

DIE BEWOHNER DES GROSSEN HAUSES

Das Periodensystem der Elemente aus der Vogelschau/15

Wie die Astronomen den Chemikern einen Bären dienst erwiesen/21

Das Doppelgesicht eines Elements/24

Der Allererste und der Allererstaunlichste/29

Chemie=Physik+Mathematik!/37

Noch ein wenig Mathematik/39

Wie etwas Unerwartetes auf die Chemiker zukam/43

Enträtselung, die ein schwacher Trost war/46

Auf der Suche nach einer „tollen“ Idee oder wie die Edelgase ihre Reaktionsträgheit aufgaben/49

Wieder eine Unstimmigkeit? Wo der Ausweg?/55

Das „Alleszerfressende“/57

Wie Hennig Brand den „Stein der Weisen“ entdeckte/62

Die Luft atmet sich leicht oder ein Beispiel dafür, wie Quantität in Qualität umschlägt/64

Einfacher als das Einfache, erstaunlicher als das Erstaunliche.../68

Vom Eis ist die Rede/72

Wieviel Wassersorten gibt es auf Erden?/75

Lebenspendendes, allgegenwärtiges Wasser.../77

Der kleine Eiszapfen und seine Geheimnisse/80

Ein himmelweiter Unterschied/82

Weshalb der himmelweite Unterschied?/85

Noch zweimal „warum“/88

Etwas reimt sich nicht/90

Über Eigenartigkeit in der Baukunst/93  
Die sehr zahlreichen Geschwister/96  
Das Reich der Metalle und seine Paradoxa/99  
Metalle können Flüssigkeiten sein/103  
Ungewöhnliche Verbindungen/105  
Der erste Kybernetiker in der Chemie/108  
Wie Rhenium entdeckt wurde/110  
Die „kybernetische Maschine“ stoppte plötzlich/113  
Wie ein chemisches Element in ein anderes  
umzusetzen ist/115  
Tod und Unsterblichkeit im Reiche der Elemente/122  
Eins, zwei, viele.../126  
War die Natur in ihrem Handeln gerecht?/131  
Ein Weg, der in die Irre führte/135  
Über das Schicksal eines Elements/139  
Wo ist dein Platz, Uran?/142  
Kleine Geschichten aus dem Reich  
der Archäologie/144  
Uran und seine Berufe/147  
Ist das Gebäude unvollendet geblieben?/151  
Hymne an die zeitgenössischen Alchimisten/154  
Am Ende der Welt/160  
Nachrichten aus dem Weltraum/164  
Aus dem „Stammbuch“ der Elemente/168  
Zahlenwerte, ohne die die Chemie nicht auskommen  
kann/172

**EINE SCHLANGE, DIE SICH IN DEN EIGENEN  
SCHWANZ BEISST**

Die Seele der chemischen Wissenschaft/179  
Blitze und Schildkröten/181  
Eine wundervolle Barriere/184  
Eine Schlange, die sich in den eigenen  
Schwanz beißt/186

Wie die Schildkröte zum Blitz wird  
und umgekehrt/191  
Kettenreaktionen/194  
Wie die Chemie mit der Elektrizität Freundschaft  
schloß/196  
Feind Nummer 1/198  
Wie gegen Korrosion anzukämpfen ist/202  
Leuchtender Strahl/205  
Die Sonne in der Rolle eines Chemikers/209  
Zwei Arten chemischer Bindung/212  
Chemie und Strahlung/214  
Die allerlängste Reaktion/219

#### CHEMISCHES MUSEUM

Frage ohne Antwort/223  
Der Vielfalt Ursache und Wirkung/225  
Chemische Ringe/227  
Eine dritte Möglichkeit/232  
Ein paar Worte über Komplexverbindungen/236  
Überraschung bereitet eine einfache Verbindung/240  
Was Sir Humphry Davy noch nicht wußte/242  
26, 28 oder etwas sehr Erstaunliches/244  
Eine eigenartige Flüssigkeit/247  
Kleine Geschichte vom BTÄ/251  
Ungewöhnliche Brötchen/254  
Launen des Kohlenoxids/258  
Rot und Grün/263  
Alles in Einem/265  
Das ungewöhnlichste Atom/267  
Noch einmal über den Diamanten/269  
Unbekanntes treten wir mit Füßen/273  
Wenn Ein und Dasselbe nicht ein und dasselbe  
ist/276

## DIE „ERKENNTNISFÄHIGKEIT“ DER CHEMIE

- Über den Nutzen der Analyse/283
- Damit das Schießpulver zündet/284
- Wie Germanium entdeckt wurde/287
- Licht und Farbe/290
- Chemische Analyse... der Sonne/292
- Wellen und Materie/296
- Alles in Allem — ein kleiner Quecksilbertropfen/300
- Chemisches Prisma/303
- Wie Promethium entdeckt wurde/305
- Die Duft von Walderdbeeren/309
- Napoleons Tod — Legende und Wirklichkeit/312
- Radioaktive Aktivierungsanalyse/315
- Wie des Gewichtlosen Gewicht zu bestimmen ist/318
- Chemie der vereinzelt Atome/321
- Gibt es eine Grenze?/325
- Eine unvergleichliche Zahl/326

## WEIT BREITET DIE CHEMIE IHRE ARME AUS

- Nochmals über den Diamanten/333
- Moleküle ohne Ende/337
- Ein diamantenes Herz und die Haut eines Nashorns/346
- Bündnis des Kohlenstoffs und des Siliziums/352
- Erstaunliche Siebe/355
- Chemische Krebschere/359
- Chemie im Ärztekittel/363
- Der Strahlenpilz wirkt wunder/375
- Spurenelemente — die Vitamine der Pflanzen/379
- Womit sich die Pflanzen ernähren und was die Chemie damit zu tun hat/383
- Eine kleine Analogie oder wie die Chemiker die Pflanzen mit Kalium gefüttert haben/386

**Eine „Stickstoffkatastrophe“/388**  
**Alles andere — nur nicht leblos/392**  
**Wozu ist der Phosphor gut?/395**  
**Der chemische Krieg/397**  
**Wer hilft dem Ackersmann?/401**  
**„Gespenster“ helfen uns/404**  
**Und wiederum die Sonne/407**  
**Kosmochemiker bei der Arbeit/418**  
**Ein paar Worte zur eigenen Rechtfertigung/424**





## Verlag Mir Moskau

Das nächste Buch in  
dieser Reihe:

„Verrückte Ideen“

von IRINA RADUNSKAJA.

Die Dokumentarbelletristik  
und Reportagen der jungen  
Schriftstellerin erwecken  
stets reges Interesse.

Irina Radunskaja  
ist Absolventin

des Moskauer Instituts  
für Flugwesen, Fakultät  
Radiotechnik.

Musik und Poesie hatten  
sie im Banne gehalten.

Doch die Oberhand gewann  
die Wissenschaft mit  
ihren schwindelerregenden  
Erfolgen und verheißungsvollen  
Geheimnissen. Irina Radunskaja  
veröffentlicht in der

zentralen Presse spannende  
Reportagen über  
allerneueste Entdeckungen,  
Essais zu aktuellen  
Fragen der modernen  
Wissenschaft.

Die journalistische Praxis  
erwies sich als guter  
Helfer bei der Abfassung  
ihres Erstlingswerks  
„Verrückte Ideen“.

Die Autorin erzählt  
von überraschenden,  
bisweilen paradox  
anmutenden Hypothesen  
und Theorien in der  
zeitgenössischen Physik,  
die, sinnvoll entwickelt,  
zu erstaunlichen  
Ergebnissen geführt  
haben.